

کانی‌شناسی، ژئوشیمی، میانبار سیال و ژنز کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت در جنوب غرب جزیره هرمز، ایران

عاطفه فخری دودوئی^۱ و مسعود علی پوراصل^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه

صنعتی شاهرود

۲. استادیار، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۱۶

چکیده

منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان و در فاصله هشت کیلومتری جنوب بندرعباس واقع شده است. این منطقه در بخش جنوبی پهنه زاگرس چین‌خورده و بخشی از سری هرمز می‌باشد. سنگ‌های پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین تناوبی از گدازه و توفریولیتی تا ریوداسیتی، کریستال توف، شیل توفی، ماسه‌سنگ و لایه‌های تبخیری را دربرمی‌گیرد. کانه‌زایی آهن به همراه آپاتیت به صورت‌های دایک، توده‌ای، رگه-رگچه‌ای و دانه‌پراکنده در سنگ‌های شیل توفی و کریستال توف مشاهده می‌شود. بر پایه مقادیر اکسیدهای آهن و آپاتیت می‌توان کانه‌زایی را به انواع اکسید آهن (بیشتر مگنتیت)، اکسید آهن-آپاتیت و آپاتیت تقسیم کرد. کانی‌های اصلی سازنده کانسار شامل مگنتیت، اولیژیست، هماتیت، گوتیت و لیمونیت، آپاتیت و کانی‌های باطله کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی می‌باشد. کانسارهای جزیره هرمز دارای تمرکز بالایی از عناصر کمیاب خاکی^۱ (REE) است و عیار مجموع REE در کانسارهای غنی از آپاتیت تا سه درصد می‌رسد. مطالعات ژئوشیمیایی نشان از همبستگی مثبت قوی P با REE است. مقایسه الگوی توزیع REE در کانسارهای مگنتیت-آپاتیت جزیره هرمز که به کندریت به‌هنجار شده است، با آنهایی از کانسارهای بلوک بافق-پشت بادام و کانسارهای آهن تیپ کایرونا^۲، مشابهت زایشی این کانسارها با یکدیگر نشان می‌دهد. دمای همگن شدن در میانبارهای دو فاز مایع و بخار (L+V) در کانی آپاتیت بین ۳۰۹ تا ۵۶۵ (میانگین ۳۸۸) درجه سانتی‌گراد و درجه شوری بین ۱۴/۱۶ تا ۳۳/۸۷ (میانگین ۲۰/۸۰) درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است. در نهایت، با توجه به شواهد زمین‌شناسی صحرایی، کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و میانبار سیال، کانه‌زایی جزیره هرمز در گروه کانسارهای مگنتیت-آپاتیت نوع کایرونا و با منشأ ماگمائی-گرمابی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: مگنتیت، آپاتیت، عناصر کمیاب خاکی، ماگمائی-هیدروترمال، جزیره هرمز.

مقدمه

در ارتباط با منشأ این کانسارها غالب است، این کانسارها به‌طور مستقیم از تبلور و تفکیک ماگما ناشی شده‌اند، یا محصول فرایندهای جانشینی گرمابی هستند (Geijer, 1910; Hitzman et al., 1992; Sillitoe and Burrows,

اگرچه تحقیقات زیادی درباره کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت نوع کایرونا در سرتاسر جهان انجام شده است، با این وجود منشأ این کانسارها بحث‌برانگیز است و نظریه‌های مختلفی در ارتباط با منشأ آنها مطرح است. امروزه دو نظریه

1. Rare earth elements

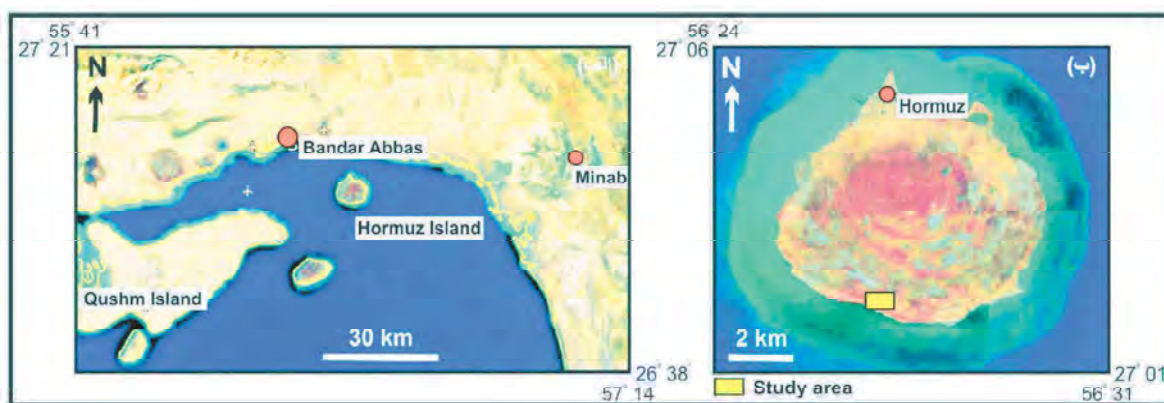
2. Kiruna

* نویسنده مرتبط: masoodalipour@shahroodut.ac.ir

2002; Smith et al, 2009; Smith et al., 2013; Dare et al., 2014; Bilenker, 2016; Tornos et al., 2017; He et al., 2018; Westhues et al., 2017). در این میان، بحث‌ها بیشتر درباره منشأ ماگمایی مستقیم (ارتوماگمایی) می‌چرخد و کانسنگ‌های اکسید آهن-آپاتیت از ماگمای غنی از مواد فرار، آهن و فسفر یا سیالات ماگمایی دمای بالا ناشی می‌شوند (Jonsson et al., 2010; Nystrom et al., 2010; Knipping et al., 2015; Tornos et al., 2017). در فرضیه اخیر سیالات گرمایی غنی از فلز حین چرخش جایگزین کانی‌های اولیه سنگ میزبان می‌شود (Rhodes and Hitzman et al., 1992; Oreskes, 1999; Smith et al., 2009; Smith et al., 2013; Dare et al., 2014; Westhues, et al., 2016). بر اساس مطالعه Trol et al. (2019) کانسارهای نوع کایرونا بیشتر منشأ ماگمایی دارند، اما ممکن است دارای کانی‌های مگنتیت و آپاتیت گرمایی مرحله تاخیری باشند که می‌تواند به‌طور محلی بر روی کانی‌های ماگمایی حرارت بالا تشکیل شوند. (Xie et al., 2019) نیز مدل زایشی دو مرحله‌ای را برای کانسار اکسید آهن-آپاتیت نوع کایرونا Elaco در شیلی معتقد هستند، به طوری که کانسنگ‌های توده‌ای از فرآیندهای ماگمایی حاصل شده‌اند که به‌وسیله دگرسانی ماگمایی-گرمایی مرحله بعدی تحت تاثیر قرار گرفته و کانسنگ‌های رگه-رگچه‌ای و برشی به وجود آمده است. این مدل می‌تواند برای فلززائی بسیاری از کانسارهای نوع کایرونا به کار برده شود.

منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان، فاصله هشت کیلومتری جنوب بندرعباس و در جنوب غرب جزیره هرمز واقع شده است (شکل ۱-الف، ب). در زمان پیرکامبرین پسین-کامبرین پیشین در ایران، کانسارهای بی‌شماری از اکسیدهای آهن-آپاتیت کشف و شناسایی شده است. در منطقه فلززائی بافق-پشت بادام، این کانسارها با توالی آتشفشانی-رسوبی سری ریزو میزبانی می‌شوند. کانسارهای آهن چغارت (کارگران بافقی، ۱۳۸۰؛ Moore and Modabber, 2003; Daliran et al., 2007; Mohammad-Torab and Lehmann, 2008; Daliran et al., 2010; Mokhtari

چادرملو (Mokhtari and Ebrahimi, 2015; Samani, 1988; Mokhtari et al., 2013; Mokhtari and Ebrahimi, 2015) آهن-آپاتیت اسفوردی (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ Jami et al., 2006; Mohammad Torab and Lehmann, 2008; Aftabi et al., 2009; Mokhtari et al., 2013) گزستان و لکه‌سیاه (افضلی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Daliran et al., 2016; Mokhtari, 2015; Rahimi et al., 2016) میشدوان (Daliran, 2002)، آهن سه‌چاهون (Bonyadi, 2017; Eslamizadeh, 2011; et al., 2011)، آنومالی شمالی (سپهری‌راد، ۱۳۷۹؛ بهزادی، ۱۳۸۵)، کانه‌زایی‌های آهن نواری در منطقه فلززائی بافق (Mohseni and Aftabi, 2015) از مهمترین آنها هستند. علاوه بر این، گنبد‌های نمکی جنوب کشور نیز مستعد پی‌جویی و اکتشاف کانسارهای آهن-آپاتیت می‌باشند، به طوری که از مجموع ۱۱۴ گنبد نمکی واقع در جنوب کشور، همگی دارای آنومالی‌های آهن هستند و کانه‌زایی آهن به صورت‌های خاک‌سرخ، نواری، تودم‌ای، رگه-رگچه‌ای و دانه‌پراکنده در سری هرمز مشاهده می‌شود. پژوهش‌های مرتبط با فلززائی در سری هرمز به گستردگی منطقه فلززائی بافق نمی‌باشد. با وجود این، از این مطالعات می‌توان به ژئوشیمی و سنگ‌زایی سنگ‌های دیابازی سازند هرمز (احمدی مقدم و همکاران، ۱۳۹۷)، کانه‌زایی آهن و مس در توالی آتشفشانی-رسوبی هرمز، گنبد نمکی زندان (بیابانگرد و همکاران، ۱۳۹۷)، سازندهای آهن و نمک نواری در جزیره هرمز به عنوان سبک جدیدی از سیستم آهن-نمک گرمایی بروندمی (Atapour and Aftabi, 2017)، و بررسی رفتار ژئوشیمی عناصر نادر خاکی در آپاتیت‌های جزیره هرمز (رستمی و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره کرد. مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی در جزیره هرمز منجر به شناسایی اندیس معدنی جدیدی از آهن-آپاتیت در جنوب غرب این جزیره شده است (رستمی و همکاران، ۱۳۹۳). در این پژوهش، کانه‌زایی آهن-آپاتیت جنوب غرب جزیره هرمز از نظر زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و میانبار سیال مطالعه شده است و در نهایت بر پایه شواهد به دست آمده مدلی برای تشکیل کانه‌زایی در این منطقه ارائه شده است.



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی جزیره هرمز در استان هرمزگان و دریای خلیج فارس، ب) موقعیت منطقه مورد مطالعه در جنوب غرب جزیره هرمز

روش مطالعه

برداشت شده است. این نمونه‌ها به ترتیب مراحل خردایش و آسیاب را پشت سر گذاشته و برای تعیین عیار عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی به روش ذوب قلیایی با روش‌های ICP-OES/MS در آزمایشگاه زرآما تجزیه شده‌اند. در این پژوهش، برای ارزیابی میزان دقت تجزیه‌های شیمیایی از نمونه‌های تکراری استفاده شده است. بدین ترتیب یکی از نمونه‌ها دو مرتبه تجزیه شد و میزان خطای آنالیز برای عناصر مختلف در روش‌های دستگاهی مذکور کمتر از ۱۵ درصد برآورد شده است. برای اندازه‌گیری ریزدماسنجی میانبرهای سیال نمونه دوبرصیقلی از کانسنگ‌های آهن-آپاتیت تهیه شده است. مطالعه میانبرهای سیال بر روی کانی آپاتیت با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ Ceti Magtex و به وسیله دستگاه Linkam مدل THMSG600 در آزمایشگاه شرکت مطالعات و پژوهش آذین زمین پویا به تعداد ۱۰ نقطه انجام پذیرفته است.

بحث

زمین‌شناسی

جزیره هرمز در تقسیم‌بندی زمین‌شناختی ایران (آقائباتی، ۱۳۸۵)، در منتهی‌الیه جنوب شرق پهنه زاگرس چین‌خورده و در ورقه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ بندرعباس واقع شده است. از نظر چین‌شناسی، این منطقه بخشی از سری هرمز محسوب می‌شود. احمدزاده هروی و همکاران

این پژوهش با انجام بازدیدهای صحرایی طی نوبت‌های متوالی و متناسب با هدف، پژوهش شروع شد و در طی آن شواهد صحرایی زمین‌شناسی و کانه‌زایی ثبت شد. برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی ماده معدنی و سنگ میزبان، از کانسنگ‌ها و سنگ‌های میزبان مواد معدنی نمونه‌برداری صورت گرفت. تعداد ده مقطع نازک، پنج مقطع صیقلی و ده مقطع نازک-صیقلی تهیه شده و مطالعات میکروسکوپی سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی روی آنها انجام گرفت. تعداد شش نمونه از سنگ‌های آتشفشانی برای مطالعات ژئوشیمیایی برداشت شد. نمونه‌ها از مکان‌هایی انتخاب شدند که سالم، غیردگرسان شده و عاری از رگه-رگچه بودند. سنگ‌های آذرین دارای بافت متوسط تا درشت‌دانه می‌باشند، نمونه‌برداری از آنها به روش لپیری انجام شده است، بدین ترتیب که در هر ایستگاه تعدادی قطعه کوچک سنگ با مقطع عرضی سه تا چهار سانتی‌متر مربع برداشت شده است. نمونه‌های سنگ به ترتیب مراحل خردایش و آسیاب را پشت سر گذاشته و برای تعیین مقادیر غلظت اکسید عناصر اصلی، عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ذوب قلیایی با روش‌های ICP-OES/MS در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآما در تهران تجزیه شده‌اند. برای دستیابی به نمونه معرف از مناطق کانه‌زایی، تعداد سه نمونه به روش لپیری از کانسنگ‌های آهن-آپاتیت

حجم این واحد را ماسه‌سنگ‌های قرمز، خاکستری و سبز رنگی تشکیل می‌دهد که دارای موج نقش‌های چشم‌گیر است. این طبقات دسی‌متری با لایه‌هایی از توفیت‌های سبزرنگ سانتی‌متری در تناوب است. در بعضی از گنبد‌ها و فور سنگ‌های آتشفشانی (توفیت‌های سفید) چنان است که این واحد را بیشتر به یک واحد آتشفشانی شبیه می‌سازد که با طبقات آواری در تناوب است. این واحد با کانه‌زایی‌های آهن و فسفر همراه است.

منطقه مورد مطالعه واحد H4 و بخش‌هایی از واحد H2 سری هرمز را در بر می‌گیرد. واحدهای سنگی در این منطقه مربوط به پرکامبرین، پالئوزوئیک، سنوزوئیک و کواترنری است. واحدهای مربوط به پرکامبرین پسین-پالئوزوئیک پیشین شامل توالی از واحدهای تبخیری، آتشفشانی، آذرآواری و رسوبی است، که وسیع‌ترین رخنمون سنگی منطقه را تشکیل می‌دهند. در این بین واحد شیل توفی و کریستال توف میزبان کانه‌زایی آهن-آپاتیت هستند. مجموعه رسوبی سنوزوئیک (میوسن) دامنه‌ای از ماسه‌سنگ، مارن، مارن ماسه‌ای، سنگ‌آهک ماسه‌ای با میان‌لایه‌هایی از کنگلومرای چرتی قهوه‌ای (سازند آقاجاری) را شامل می‌شود. کواترنری شامل رسوبات بادی است (شکل ۲).

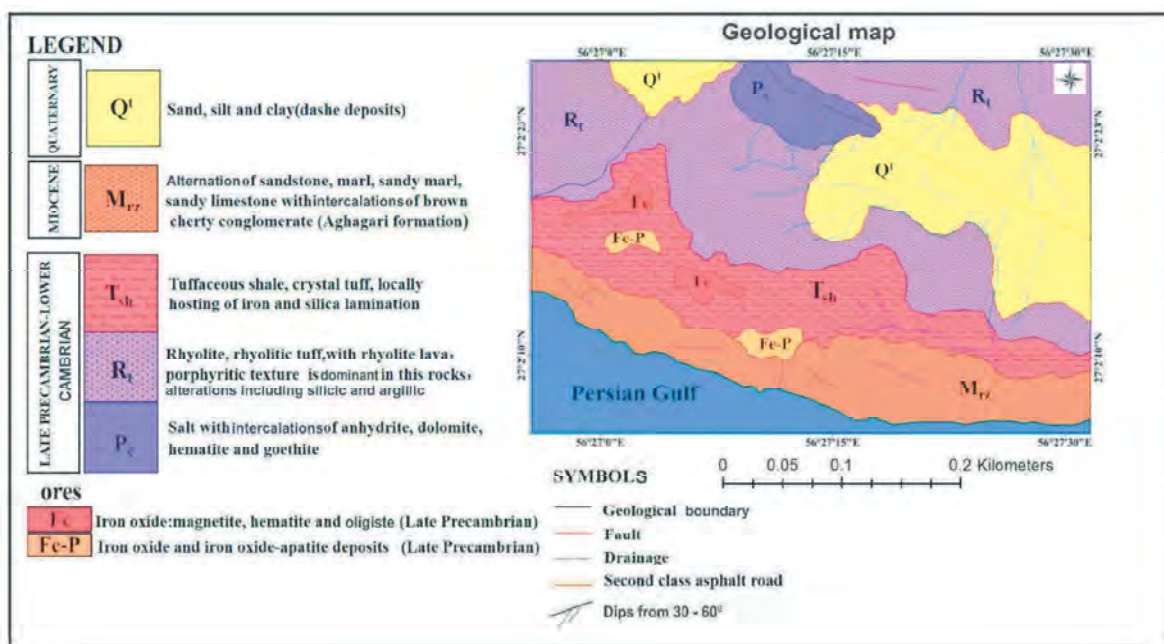
(۱۳۶۹)، سری هرمز را از پایین به بالا به ترتیب به چهار واحد H1، H2، H3 و H4 تقسیم کرده‌اند:

واحد هرمز ۱ (H1) یا واحد نمکی سازند هرمز، قاعده این واحد معلوم نیست و در هیچ جا به تمامی ظاهر نشده است. بیشتر حجم این واحد را طبقات و لایه‌های نمک تشکیل می‌دهند که با میان‌لایه‌های نازکی از توف، مارن، سنگ‌آهک، اکسیدها و سولفیدهای آهن و به‌ندرت سولفید مس همراه است. میان‌لایه‌های یاد شده، واحد نمکی هرمز را به‌صورت نوارهایی با ضخامت‌های گوناگون و رنگارنگ درآورده است.

واحد هرمز ۲ (H2)، این واحد تناوبی از مارن‌های سفید تازرد کمرنگ، انیدریت، توف، ایگنمبریت، سنگ‌های آهکی نازک‌لایه سیاه‌رنگ و سنگ آهن به‌صورت نوارهای نازک میلی‌متری آهن‌دار، اکسیدهای بی‌آب و آبدار آهن می‌باشد. این واحد با رنگ قرمز مشخص می‌شود.

واحد هرمز ۳ (H3) یا واحد سنگ آهک سیاه‌رنگ جلبکی، این واحد که در همه جا از ویژگی ثابتی برخوردار است از نوع سنگ آهک‌های نازک‌لایه، بودار و سیاه‌رنگ است و به‌طور عام سرشار از جلبک‌های گوناگون می‌باشد.

واحد هرمز ۴ (H4) یا واحد آواری-آتشفشانی، بیشتر



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (فخری دودویی، ۱۳۹۷)

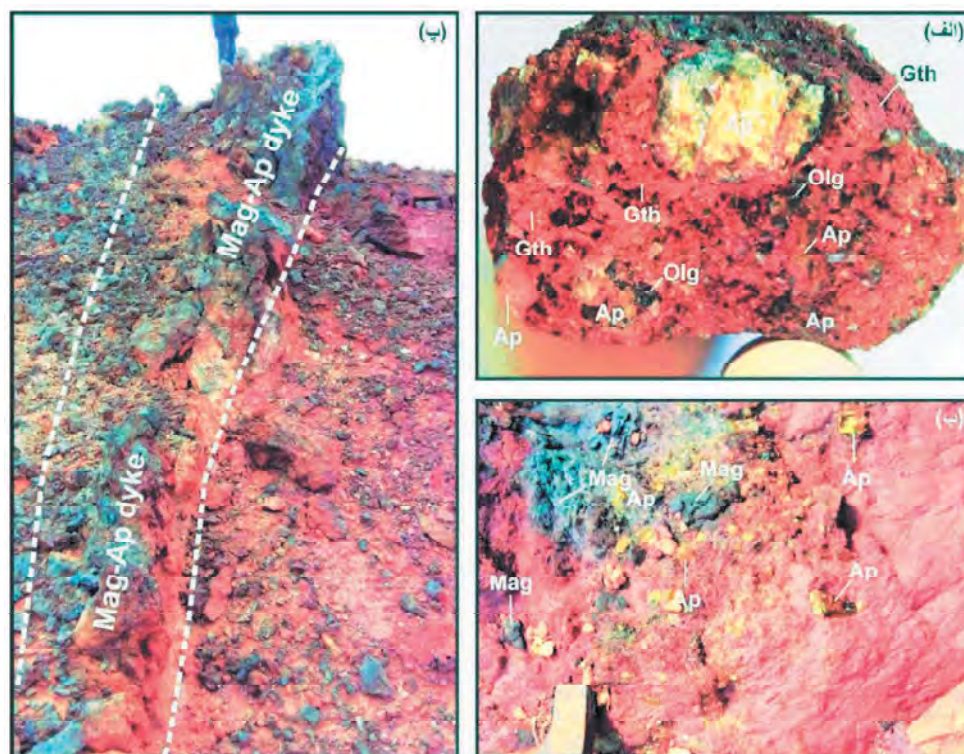
کانه‌زایی

کانه‌زایی شیل توفی و کریستال توف است. کانه اصلی در این بخش بیشتر آپاتیت است که با مگنتیت همراهی می‌شود. بلورهای شفاف تا نیمه‌شفاف آپاتیت دارای رنگ‌های زرد تا سبز فسفری است، و به صورت بلورهای منوپیرامیدال (شش وجهی تک‌سر) و دارای اندازه سه تا پنج سانتی‌متر است. کانه‌زایی فسفات در این بخش به حدی است که می‌توان از آن به‌عنوان یک بخش غنی از فسفات نام برد. کانه‌زایی توده‌ای و تا حدودی دانه‌پراکنده، شکل غالب کانه‌زایی در این بخش است (شکل ۳-ب).

بخش غنی از مگنتیت: در این بخش، دایک‌های مگنتیتی به طول ۱۰ تا ۱۳ متر و پهنای دو تا سه متر در واحد شیل توفی و کریستال توف تزریق شده‌اند. دایک‌های مگنتیتی با راستای شمال غربی-جنوب شرقی دارای شیب حدود ۴۵ درجه به سمت شمال شرق هستند. در این بخش، مگنتیت غالب است و آپاتیت در نمونه‌های میکروسکوپی مشاهده می‌شود. ساختار دایک، شکل غالب کانه‌زایی در این بخش است (شکل ۳-پ).

کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه بر اساس درصد و نوع کانی‌های اکسیدهای آهن و آپاتیت به سه بخش تقسیم می‌شود: **بخش غنی از آپاتیت:** در این بخش، سنگ میزبان کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت شیل توفی و کریستال توف به سن پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین است و ابعاد رخنمون کانه‌زایی به طول حدود ۴۰ متر و پهنای حدود ۲۰ متر است. این بخش با راستای تقریبی شرقی-غربی حدود ۷۵ درجه به سمت جنوب غرب شیب دارد. ترکیب کانی‌شناسی آن بیشتر آپاتیت است که به‌وسیله هماتیت، اولیوژنیت و گوتیت همراهی می‌شود. اندازه بلورهای آپاتیت تا پنج سانتی‌متر می‌رسد. کانه‌زایی توده‌ای و تا حدودی رگه-رگچه‌ای شکل‌های غالب کانه‌زایی در این بخش است (شکل ۳-الف).

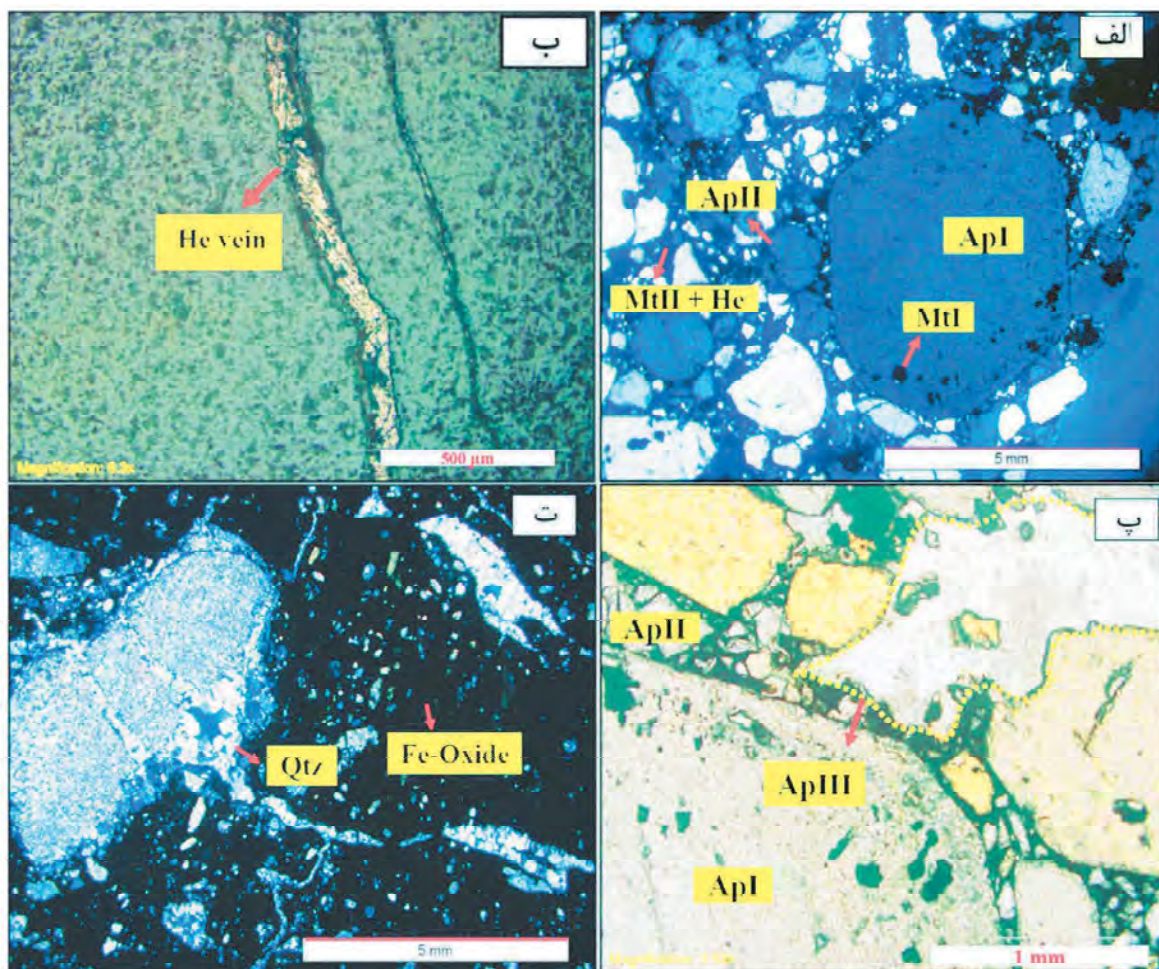
بخش آپاتیت-مگنتیت: این بخش در حقیقت بزرگترین رخنمون کانه‌زایی آپاتیت در منطقه مورد مطالعه است. طول رخنمون کانه‌زایی بیش از ۸۳ متر و پهنای آن ۱۵ متر است. این زون با راستای شمال غربی-جنوب شرقی و شیب حدود ۴۵ درجه به سمت جنوب غرب است. سنگ میزبان



شکل ۳. نمونه دستی از ساختارهای مختلف کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت، الف) کانه‌زایی توده‌ای، ب) کانه‌زایی دانه پراکنده، پ) کانه‌زایی به شکل دایک مگنتیت-آپاتیت

آپاتیت‌های درشت بلور نسل اول مشاهده می‌شوند (شکل ۴-الف). در ادامه، مجموعه هم‌رشدی از کانی‌های آپاتیت و مگنتیت (آپاتیت و مگنتیت‌های نسل دوم) فضاهای خالی بین بلورهای مگنتیت و آپاتیت نسل اول را پر کرده‌اند. این نسل از کانه‌زایی، مذاب‌های غنی از آهن و فسفری هستند که با راه‌یابی به فضاهای بین بلوری و تزریق شدن به درون شکستگی‌های سنگ میزبان باعث ایجاد ساختارهای کانه‌زایی بینابینی، رگه-رگچه‌ای و دایکی شکل می‌شوند. مگنتیت و آپاتیت‌های نسل دوم (به‌ویژه مگنتیت‌های نسل دوم) فاز غالب کانه‌زایی مگنتیت و آپاتیت در منطقه هستند (شکل ۴-الف). اولیژیست و هماتیت‌های اولیه نیز در مراحل پایانی تشکیل مگنتیت و آپاتیت‌های نسل دوم به وجود

کانی‌شناسی، ساخت، بافت و توالی پاراژنری کانسار بر پایه مطالعات کانی‌شناسی، کانه‌ها شامل آپاتیت، مگنتیت، اولیژیست، هماتیت، گوتیت و لیمونیت است. آپاتیت از کانی‌های مهم است که بیشتر به همراه مگنتیت، اولیژیست و هماتیت به صورت‌های توده‌ای، دایک، رگه-رگچه‌ای، دانه‌پراکنده و بین‌دانه‌ای مشاهده می‌شود. بر اساس مطالعات میکروسکوپی و بافتی، حداقل سه نسل کانه‌زایی آپاتیت و مگنتیت در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. در مرحله ابتدایی کانه‌زایی، مگنتیت‌های نسل اول تشکیل شدند که به‌وسیله توده‌ایی از آپاتیت‌های درشت بلور نسل اول دنبال می‌شوند. مگنتیت‌های نسل اول در حد مقادیر کم و به‌صورت بلورهای منفرد و ادخال در داخل



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های اکسید آهن و آپاتیت، (الف) کانه‌زایی اکسیدهای آهن (مگنتیت و هماتیت)-آپاتیت نسل‌های اول و دوم، (ب) بافت رگه‌ای از کانه هماتیت، (پ) تصویری از نسل‌های سه‌گانه آپاتیت، به‌طوری‌که آپاتیت‌های نسل‌های دوم و سوم فضای بین کریستال‌های درشت آپاتیت نسل اول را پر کرده‌اند، (ت) نفوذ رگه‌های کوارتزی به بخش کانه‌زایی آهن-آپاتیت. آپاتیت نسل اول، ApII: آپاتیت نسل دوم، ApIII: آپاتیت نسل سوم، MtI: مگنتیت نسل اول، MtII+He: مگنتیت و هماتیت نسل دوم، He vein: رگه هماتیت، Qtz: کوارتز، Fe-Oxide: اکسید آهن. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans 2010) استفاده شده است

هالیت از مهمترین باطله‌هایی هستند که اکسیدهای آهن و آپاتیت را همراهی می‌کنند. در منطقه مورد مطالعه، رگه-رگچه‌های کوارتز و کلسیت به شکل فازهای تاخیری اغلب به کانه‌زایی‌های توده‌ای و دایکی مگنتیت و آپاتیت تزریق شده و گاهی بلورهای شکل دار از مگنتیت (مگنتیت‌های نسل سوم) را به همراه دارند (شکل ۴-ت). توالی پاراژنتیکی کانی‌ها در کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

آمده‌اند (شکل ۴-ب). نسل سوم کانه‌زایی آپاتیت حاصل انحلال و تبلور دوباره آپاتیت‌های نسل‌های یک و دو بوده که به صورت مایع آپاتیتی به سیستم کانه‌زایی وارد شده و با عبور از محل گسل‌ها، درز و شکاف‌ها، حفره‌ها، فضاهای بین بلورها و یا فضای بین قطعات سنگ‌های آذرآواری تبلور می‌شوند و مواد خود را بر جای می‌گذارند، بافت حاصله از نوع رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی خواهد بود (شکل ۴-پ). کوارتز، کلسیت، مسکوویت، ژپیس و

جدول ۱. توالی پاراژنتیکی کانی‌ها در کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت در جنوب غرب جزیره هرمز

Mineralogy	Stage	Magmatic- Hydrothermal			Superene
		Stage1	Stage2	Stage3	
Ore	Magnetitel	————			
	Apatitel	————			
	MagnetitelII		————		
	ApatitelII		————		
	MagnetitelIII			————	
	ApatitelIII			————	
	Oligiste		-----	————	
	Hematite		-----	————	————
Gangue	Goethite				————
	Limonite				————
	Quartz	-----	————	————	
	Calcite		-----	————	-----
	Muscovite		————	————	
	Anhydrite				————
	Gypsum				————
Structure & Texture	Halite				————
	Dyke	————	————		————
	Massive		————		————
	Vein (Veinlet)			————	————
	Disseminated	-----			

در جدول ۲ آورده شده است. به منظور تعیین ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ میزبان از قبیل نام‌گذاری شیمیایی، سری ماگمایی، محیط تکتونیکی و الگوی به‌هنجار شده‌ی عناصر کمیاب خاکی، بررسی‌های ژئوشیمیایی بر روی نمونه‌های سالم و غیردگرسان شده صورت گرفت است. بر این اساس سنگ‌های محدوده کانسار مورد مطالعه بیشتر از نوع فلسبیک تا حدواسط می‌باشند و گستره‌ای از سنگ‌های ریولیتی تا داسیتی را شامل می‌شوند که از نظر ماهیت ژئوشیمیایی از سری کالک‌آلکالن تا کالک‌آلکالن پتاسیم بالا و شوشونیتی تغییر می‌کنند (شکل ۵، الف، ب). به منظور تشخیص خاستگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه از

ژئوشیمی

جزیره هرمز همانند بلوک بافق-پشت بادام از نظر کانه‌زایی آهن، آپاتیت و عناصر کمیاب خاکی حائز اهمیت است. برای مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمی سنگ‌های میزبان و کانسنگ به ترتیب تعداد شش و سه نمونه معرف برداشت شده، و برای آنالیز عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی تجزیه شده است.

ژئوشیمی سنگ‌های میزبان

مقادیر غلظت اکسیدهای عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی برای شش نمونه از سنگ‌های آذرین میزبان کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت جنوب غرب جزیره هرمز

جدول ۲. مقادیر غلظت اکسید عناصر اصلی (برحسب درصد وزنی)، عناصر کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در شش نمونه سنگ از جزیره هرمز به روش‌های ICP-OES/MS

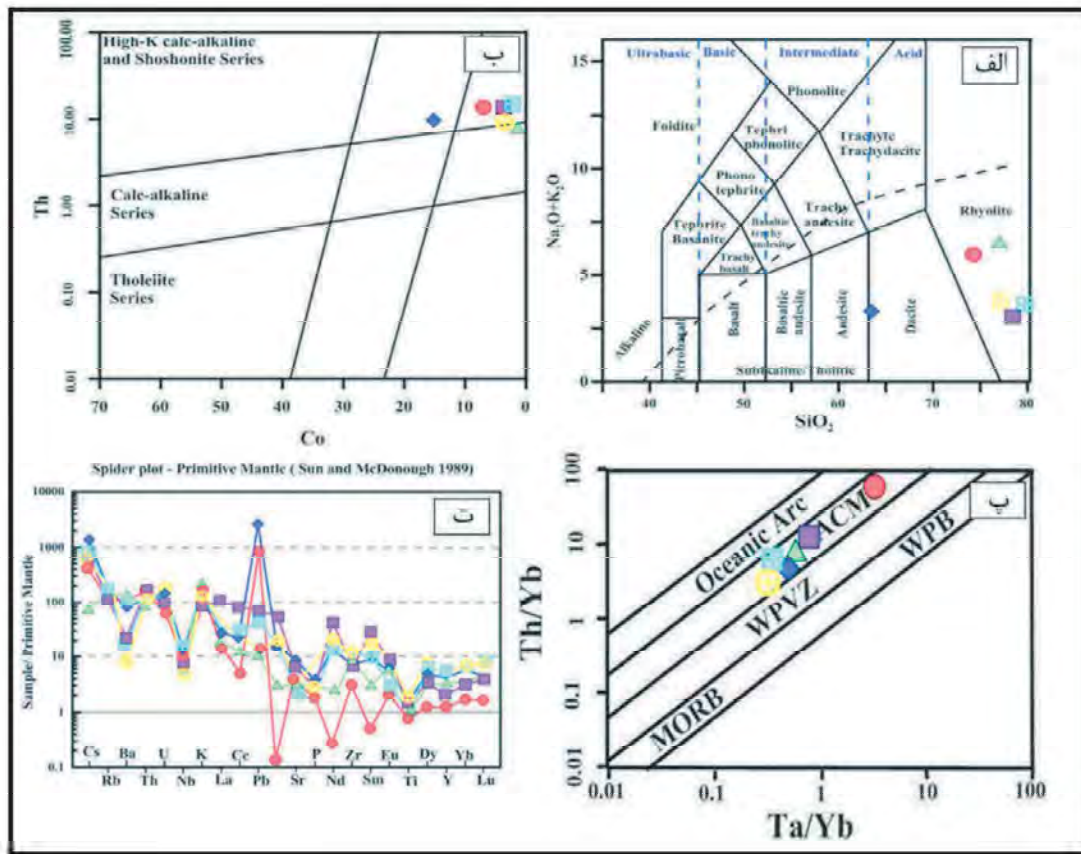
Sample	X	Y	Rock type	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I.
HI-GR-01	۴۴۵۶۵۲	۲۹۹۰۹۱۶	Rhyodacitic tuff	۱۰/۱۱	۷/۰۰	۴/۷۹	۴/۹۹	۳/۲۶	۰/۰۸	۰/۵۸	۰/۰۴	۷۱/۳۶	۰/۱۶	۳/۲۹
HI-GR-02	۴۴۵۷۴۵	۲۹۹۰۸۰۲	Rhyolite	۱۱/۶۵	۰/۲۰	۰/۷۸	۶/۰۰	۳/۳۰	۰/۰۴	۰/۲۸	۰/۰۶	۷۴/۵۸	۰/۲۵	۲/۶۲
HI-GR-03	۴۴۵۷۸۶	۲۹۹۰۶۳۷	Crystal tuff	۹/۰۰	۰/۴۰	۱۶/۱۵	۲/۹۶	۳/۴۹	۲/۲۰	۰/۱۶	۰/۰۸	۶۰/۱۴	۰/۳۲	۴/۹۸
HI-GR-04	۴۴۵۶۹۸	۲۹۹۰۷۷۲	Rhyolite	۱۱/۷۳	۰/۳۱	۷/۶۶	۲/۲۷	۲/۴۶	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۴	۷۶/۱۶	۰/۲۰	۳/۸۶
HI-GR-05	۴۴۵۷۲۵	۲۹۹۰۸۱۰	Rhyolite	۱۰/۰۱	۰/۳۰	۳/۸۲	۲/۴۹	۳/۴۲	۰/۰۴	۰/۳۱	۰/۰۶	۷۳/۸۷	۰/۳۰	۵/۳۸
HI-GR-06	۴۴۵۷۷۴	۲۹۹۰۷۲۱	Rhyolitic tuff	۱۲/۴۶	۰/۱۷	۱/۸۹	۳/۴۰	۳/۷۸	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۴	۷۳/۵۳	۰/۳۵	۴/۱۳
Sample				Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf
HI-GR-01	۴۴۵۶۵۲	۲۹۹۰۹۱۶	Rhyodacitic tuff	۰/۲۰	۹۹/۴	۷۴۰	۲/۳	۰/۸	۷۰	۷۰	۱۷	۳/۲	۳۰	۱/۵۳
HI-GR-02	۴۴۵۷۴۵	۲۹۹۰۸۰۲	Rhyolite	۰/۵۰	۳۰/۹	۹۵۴	۲/۴	۰/۳	۰/۱	۷/۱	۱۱	۰/۶	۱۲	۳/۸۲
HI-GR-03	۴۴۵۷۸۶	۲۹۹۰۶۳۷	Crystal tuff	۰/۵۰	۱۲/۱	۵۸۱	۲/۴	۰/۳	۰/۳	۱۵/۱	۵۸	۱۱	۲۰	۲/۴۸
HI-GR-04	۴۴۵۶۹۸	۲۹۹۰۷۷۲	Rhyolite	۰/۹۰	۱۸/۴	۱۴۳	۲/۰	۰/۶	۰/۲	۲/۴	۱۷	۵/۷	۲۴	۴/۲۰
HI-GR-05	۴۴۵۷۲۵	۲۹۹۰۸۱۰	Rhyolite	۰/۰۸	۱۱/۸	۱۴۹	۲/۱	۰/۴	۰/۰۸	۳/۳	۱۴	۵/۰	۹	۲/۱۰
HI-GR-06	۴۴۵۷۷۴	۲۹۹۰۷۲۱	Rhyolitic tuff	۰/۵۰	۷/۰	۶۰	۲/۶	۳/۵	۰/۰۸	۳/۴	۱۵	۴/۵	۱۵	۴/۰۲
Sample				Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sn
HI-GR-01	۴۴۵۶۵۲	۲۹۹۰۹۱۶	Rhyodacitic tuff	۲۹	۶/۰	۷/۰	۴	۶۰	۸۳	۱۱۵۳	۱/۵	۲/۰	۰/۳۷	۲/۷
HI-GR-02	۴۴۵۷۴۵	۲۹۹۰۸۰۲	Rhyolite	۶۳	۰/۷	۴/۳	۱	۰/۷۵	۸۱	۷۴۵	۷/۸	۴/۰	۰/۷۳	۲/۵
HI-GR-03	۴۴۵۷۸۶	۲۹۹۰۶۳۷	Crystal tuff	۹۸	۴/۷	۱۰/۳	۱۵	۱۷۶	۱۰۷	۱۷۴	۷/۱	۷/۶	۷/۱۵	۳/۱
HI-GR-04	۴۴۵۶۹۸	۲۹۹۰۷۷۲	Rhyolite	۹۱	۰/۸	۷/۸	۳	۳	۱۰۸	۸۶۸	۰/۶	۴/۸	۷/۱۱	۲/۸
HI-GR-05	۴۴۵۷۲۵	۲۹۹۰۸۱۰	Rhyolite	۹۸	۰/۲	۵/۵	۰/۷۵	۵	۶۷	۱۱۷	۰/۴	۹/۶	۰/۳۷	۰/۷
HI-GR-06	۴۴۵۷۷۴	۲۹۹۰۷۲۱	Rhyolitic tuff	۱۴۱	۱/۴	۷/۶	۳	۱	۱۰۰	۶۶۸	۰/۵	۹/۹	۰/۸۲	۲/۵
Sample				Sr	Ta	Te	Th	U	V	Y	Zn	Zr	La	Ce
HI-GR-01	۴۴۵۶۵۲	۲۹۹۰۹۱۶	Rhyodacitic tuff	۱۷۱	۰/۷۳	۰/۱۷	۱۳/۴۲	۷/۳	۱۵	۶	۷۳	۳۴	۱۰	۹
HI-GR-02	۴۴۵۷۴۵	۲۹۹۰۸۰۲	Rhyolite	۶۹	۰/۶۱	۰/۱۵	۷/۷۳	۲/۰	۱۶	۱۵	۶	۹۷	۱۳	۲۳
HI-GR-03	۴۴۵۷۸۶	۲۹۹۰۶۳۷	Crystal tuff	۱۸۲	۰/۹۶	۰/۱۳	۹/۳۵	۳/۲	۵۲	۱۹	۸۳	۷۵	۲۰	۴۱
HI-GR-04	۴۴۵۶۹۸	۲۹۹۰۷۷۲	Rhyolite	۵۰	۰/۸۱	۰/۱۱	۱۳/۳۱	۲/۴	۱۵	۲۳	۱۹	۱۱۴	۲۲	۵۳
HI-GR-05	۴۴۵۷۲۵	۲۹۹۰۸۱۰	Rhyolite	۱۲۶	۰/۶۶	۰/۰۸	۱۲/۹۹	۱/۹	۲۹	۹	۳۸	۷۶	۷۱	۱۵۰
HI-GR-06	۴۴۵۷۷۴	۲۹۹۰۷۲۱	Rhyolitic tuff	۶۱	۰/۷۸	۰/۰۸	۹/۱۷	۳/۳	۲۵	۲۳	۱۴	۱۱۹	۲۱	۵۵
Sample				Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu
HI-GR-01	۴۴۵۶۵۲	۲۹۹۰۹۱۶	Rhyodacitic tuff	۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۸۸	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۲
HI-GR-02	۴۴۵۷۴۵	۲۹۹۰۸۰۲	Rhyolite	۰/۸۲	۳/۴	۱/۳۶	۱/۰۳	۱/۰۵	۰/۳۳	۲/۱۴	۷/۵۰	۰/۲۷	۱/۶	۰/۳۱
HI-GR-03	۴۴۵۷۸۶	۲۹۹۰۶۳۷	Crystal tuff	۴/۲۱	۱۷/۳	۴/۰۳	۰/۹۰	۳/۱۴	۰/۶۷	۳/۶۷	۲/۳۶	۰/۳۶	۲/۶	۰/۳۲
HI-GR-04	۴۴۵۶۹۸	۲۹۹۰۷۷۲	Rhyolite	۵/۰۰	۲/۰	۳/۹۲	۰/۴۹	۳/۲۶	۰/۸۷	۴/۶۱	۳/۱۵	۰/۵۳	۳/۰	۰/۵۸
HI-GR-05	۴۴۵۷۲۵	۲۹۹۰۸۱۰	Rhyolite	۱۵/۱۴	۵۶/۹	۱۷/۷۹	۷/۴۳	۵/۷۲	۰/۵۳	۲/۴۵	۷/۵۱	۰/۲۷	۷/۵	۰/۲۸
HI-GR-06	۴۴۵۷۷۴	۲۹۹۰۷۲۱	Rhyolitic tuff	۵/۴۲	۲۵/۶	۷/۷۵	۱/۴۸	۴/۹۱	۰/۸۴	۵/۵۰	۳/۴۱	۰/۵۷	۳/۰	۰/۵۶

و Ti به شکل بارزی در همه نمونه‌های مورد مطالعه مشهود است (شکل ۵-ت).

ژئوشیمی کانسنگ‌های اکسید آهن-آپاتیت

مقادیر غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی برای سه نمونه معرف از کانسنگ‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت جنوب غرب جزیره هرمز در جدول ۳ آورده شده است.

نمودارهای مرتبط با عناصر غیرمتحرک با قدرت میدان بالا استفاده شده که این نمونه‌ها در حوضه‌های ریفتی واقع در حاشیه فعال قاره گندوانا قرار می‌گیرند (شکل ۵-پ). علاوه بر این، مقادیر غلظت عناصر کمیاب نمونه‌های سنگی منطقه نسبت به ترکیب گوشته اولیه به‌هنگار شده‌است. موازی بودن الگوی عناصر کمیاب در سنگ‌های منطقه، بر منشا واحد این سنگ‌ها دلالت دارد و بی‌هنجاری منفی عناصر Nb



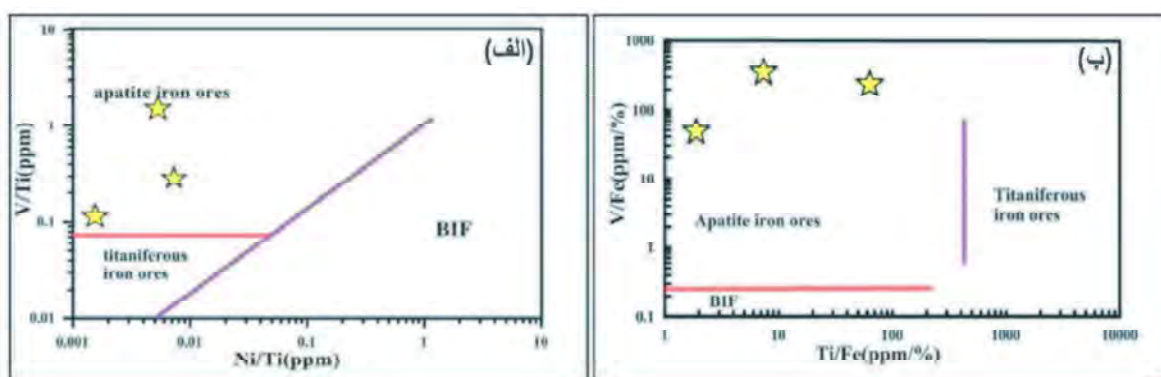
شکل ۵. ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه مورد مطالعه، (الف) در نمودار Na_2O+K_2O در برابر SiO_2 (Le Bas et al., 1986) عمده‌ی نمونه‌ها در محدوده ریولیت و داسیت قرار گرفته‌اند، (ب) در نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007) نمونه‌ها در محدوده‌های کالک‌آلکالن، کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیت جای گرفته‌اند، (پ) در نمودار تعیین خاستگاه زمین‌ساختی بر اساس نسبت‌های عناصر کمیاب (Schandi and Gorton, 2002)، نمونه‌ها در مناطق ریفتی واقع در حاشیه فعال قاره‌ها قرار گرفته‌اند، (ت) در نمودار عناصر کمیاب به‌هم‌نگار شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه (Sun and Mc Donogh, 1989) تمامی نمونه‌های سنگی منطقه الگوی همسانی دارند

جدول ۳. مقادیر غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در ۳ نمونه از کانسنگ‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت جزیره هرمز به روش‌های ICP-OES/MS

Sample	X	Y	Ore type	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Hf	Li
HI-GO-1	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Apatite ore	۰/۸	۴۳۹	۴۳	۰/۹	۰/۳	۰/۹	۷/۴	۱۹	۰/۳۷	۹	۴۷۰۰	۹/۷۸	۲
HI-GO-2	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Iron oxide-apatite	۰/۸	۳۰۹	۷۳۰۰	۷/۱	۷/۲	۷/۷	۵۵	۲۶	۷/۹	۱۹۳	۲۰۴۸۰۰	۷۵۰	۵۲
HI-GO-3	۴۴۵۵۴۶	۲۹۹۰۷۱۹	Iron oxide-apatite	۰/۸	۱۵۲	۱۵۰۰	۷/۶	۰/۸	۰/۶	۲۳/۹	۱۸	۳/۶	۳۲	۲۳۵۰۰	۷/۸۴	۹۱
				Mn	Nb	Ni	P	Pb	Rb	S	Sb	Se	Se	Sn	Sr	Ta
HI-GO-1	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Apatite ore	۱۲۵	۲/۹	۰/۷۵	۱۶۰۶۰۰	۰/۷۵	۱	۴۱۲	۰/۳۷	۵/۲	۱۴۷	۷/۳	۲۵۱	۷۵۱
HI-GO-2	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Iron oxide-apatite	۱۴۵۹۲	۴/۵	۱۱	۲۶۶۰۰	۱۰۴	۷۲	۱۱۸۲	۳/۶	۴/۶	۲۱	۵/۶	۲۴۸	۰/۵۶
HI-GO-3	۴۴۵۵۴۶	۲۹۹۰۷۱۹	Iron oxide-apatite	۲۳۶۷	۵/۲	۱	۱۶۱۵۳	۱۸	۷۸	۶۶۴	۷۵	۳/۷	۱۲	۳/۸	۱۵۳	۰/۷۷
				Te	Th	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr
HI-GO-1	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Apatite ore	۰/۱۵	۱۸۹	۱۰۹	۰/۷۵	۳/۲	۳۰	۳/۰	۳۶۲۶	۱	۵	۵۹۰۷	۱۰۴۴۹	۱۲۸۰
HI-GO-2	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Iron oxide-apatite	۰/۷۵	۲۹	۹۸۱	۰/۵۰	۵/۲	۳۸	۲/۶	۶۲۷	۱۲۵	۸	۹۴۳	۱۸۴۴	۱۶۳
HI-GO-3	۴۴۵۵۴۶	۲۹۹۰۷۱۹	Iron oxide-apatite	۰/۷۵	۲۱	۱۱۷۹	۷/۹۷	۷/۹	۲۵	۰/۷۵	۳۴۵	۲۸	۲۰	۵۵۹	۱۰۷۰	۹۲
				Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu	REE		
HI-GO-1	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Apatite ore	۵۱۴۷	۸۷۶	۸۵	۸۴۵	۱۲۶	۷۶۱	۴۶۰	۶۰	۲۵۵	۴۰	۲۶۲۹۲		
HI-GO-2	۴۴۵۷۷۶	۲۹۹۰۵۲۰	Iron oxide-apatite	۶۶۸	۱۲۲	۶	۱۱۲	۱۷	۱۰۸	۶۳	۸	۴۴	۶	۴۱۱۶		
HI-GO-3	۴۴۵۵۴۶	۲۹۹۰۷۱۹	Iron oxide-apatite	۳۷۸	۶۶	۸	۶۰	۱۰	۵۹	۳۴	۵	۲۵	۳	۲۳۶۸		

طبقه‌بندی این کانسنگ‌ها بر اساس مطالعات کانی‌شناسی می‌باشد. (Frietsch and Perdahl, 1995) بر پایه مقادیر Ti و Fe ، V ، Ni ، V/Ti در برابر پرداخته‌اند. با استفاده از تغییرات نسبت V/Ti در برابر نسبت Ti/Fe ، و نسبت V/Fe در برابر نسبت Ni/Ti می‌توان کانسارهای اکسیدهای آهن-آپاتیت، کانسارهای آهن تیتانیوم‌دار و کانسارهای آهن رسوبی (BIF) را از یکدیگر تشخیص داد. بر این اساس، هر سه نمونه معرف از کانسنگ‌های منطقه جزیره هرمز در محدوده کانسنگ‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت قرار می‌گیرند (شکل ۶-الف، ب).

با مطالعه رفتار ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب در کنار مطالعات زمین‌شناسی و کانی‌شناسی می‌توان برای طبقه‌بندی کانسنگ‌ها و تعیین تیپ آن‌ها استفاده کرد (Dill, 2010). بر پایه درصد کانی‌های مگنتیت و آپاتیت، کانسنگ‌های منطقه مورد مطالعه را می‌توان در قالب کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت، آپاتیت-مگنتیت و آپاتیت طبقه‌بندی کرد. بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی مقدار Fe در نمونه‌های HI-G-7، HI-G-6 و HI-G-4 به ترتیب ۲۰/۴۸، ۳/۳۵، و ۴۷/ درصد و مقدار P در این نمونه‌ها به ترتیب ۲/۶۶، ۷/۶۲ و ۱۶/۰۶ درصد می‌باشند که تأییدی بر



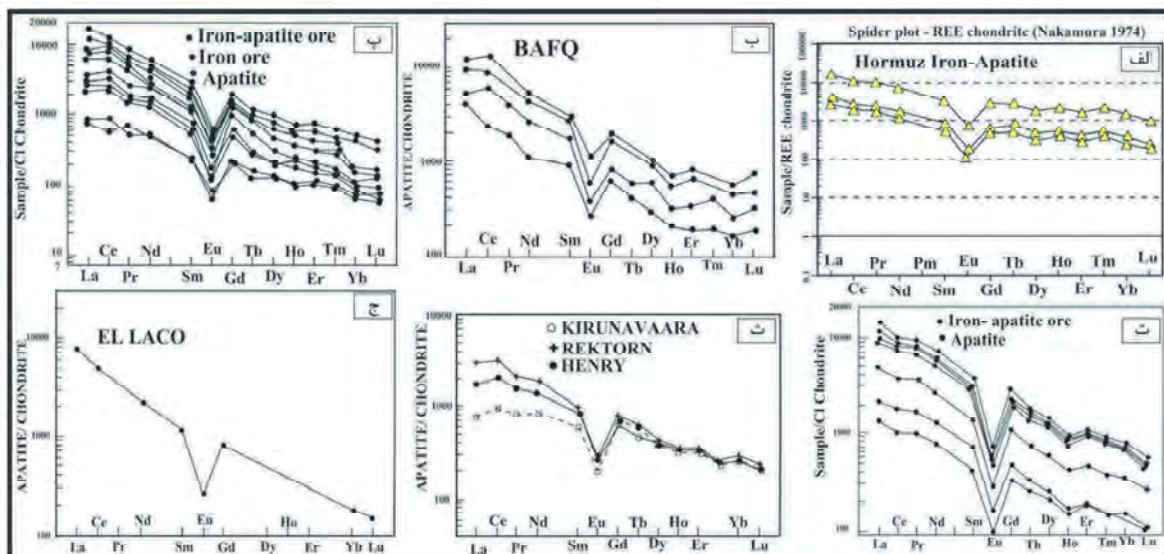
شکل ۶. طبقه‌بندی کانسارهای آهن-آپاتیت، آهن تیتانیوم‌دار و آهن رسوبی بر اساس نسبت‌های عنصری (Frietsch and Perdahl, 1995)، (الف) نسبت V/Ti در برابر نسبت Ni/Ti ، (ب) نسبت V/Fe در برابر نسبت Ti/Fe

به ورود در ترکیب و ساختار مگنتیت نیستند. یکی از ویژگی‌های اصلی کانسارهای مگنتیت-آپاتیت تیپ کاپرونا، وجود درصد بالایی از عناصر کمیاب خاکی در ترکیب آن‌ها است. عناصر کمیاب خاکی در این تیپ از کانسارها به صورت جانشینی عنصر کلسیم در ساختار آپاتیت و نیز به صورت میانبارهای موناژیت در آپاتیت وجود دارد (Frietsch and Perdahl, 1995). توزیع آپاتیت در کانسارهای مختلف به عواملی همچون ترکیب و منشأ سنگ‌های دربرگیرنده آن‌ها بستگی دارد. بلورهای آپاتیت گستره وسیعی از تغییرات شیمیایی مربوط به محیط تشکیل را نشان می‌دهند. در کانی آپاتیت، عامل‌های فلوئور، کلر، هیدروکسیل و کربنات می‌توانند جانشین یکدیگر شوند. عناصر کمیاب خاکی در آپاتیت جانشین Ca^{2+} شده و نقشی مهم برای توزیع REE در سنگ‌ها

کانسنگ‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت منطقه مورد مطالعه، تمرکز بالایی از عناصر کمیاب خاکی دارند. مجموع عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های معرف از کانسنگ مگنتیت-آپاتیت ۲۷۱۹ گرم در تن، در کانسنگ آپاتیت-مگنتیت ۴۷۴۸ گرم در تن و در کانسنگ غنی از آپاتیت ۲۹۹۲۲ گرم در تن می‌باشد. نتایج تجزیه‌های شیمیایی نشان می‌دهد که میان عیار عناصر کمیاب خاکی با مقدار کانی آپاتیت و فسفر در کانسنگ‌ها ارتباط مستقیم و مثبت قوی وجود دارد، آپاتیت از کانی‌های مهم تمرکز دهنده این عناصر در کانه‌زایی جزیره هرمز است. عناصر کمیاب خاکی در کانی آپاتیت جانشین عنصر کلسیم می‌شوند و یا به صورت میانبارهای ریز موناژیت در ساختار آپاتیت وجود دارند. درحالی‌که همبستگی ژئوشیمیایی میان فسفر و عناصر کمیاب خاکی با آهن منفی است، برای این‌که عناصر کمیاب خاکی به دلیل شعاع یونی بزرگ و درجه بالایی ناسازگاری قادر

هماتیت) و یا جانشینی Eu به جای Ca و Sr به دلیل تشابه شعاع یونی است. مقایسه الگوی توزیع بهنجار شده به کندریت عناصر کمیاب خاکی در کانسنگ‌های اکسید آهن-آپاتیت جزیره هرمز با آنهایی از کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه فلززائی بافق مانند کانسارهای اسفوردی، لکه‌سیاه، زیرگان، گزستان، چادرملو، چغارت و سه‌چاهون (شکل ۷-ب، پ، ت)، کانسارهای نوع کایرونا در دیگر نقاط جهان از قبیل El Laco و Henry، Rektorn، Kiiirunavaara (شکل ۷-ث، ج) بیانگر همانندی کامل آن‌ها با یکدیگر است به طوری که همه الگوها غنی‌شدگی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE همراه با بی‌هنجاری منفی مشخص در Eu دارند، که از ویژگی‌های برجسته اکسیدهای آهن-آپاتیت‌های موجود در کانسارهای آهن نوع کایرونا است.

و کانسنگ‌ها ایفا می‌کند (Frietsch and Perdahl, 1995). ماگماهای گوناگون با ترکیبات مختلف، دارای الگوهای مختلفی از REE هستند. آپاتیت‌های موجود در نفوذی‌های آلکان و کربناتیت‌ها غنی از REE می‌باشند، و مقدار REE در آن‌ها به چند درصد می‌رسد به طوری که جدایش قوی از LREE/HREE را نشان می‌دهند. الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت (Nakamura, 1974) برای نمونه‌های کانسنگ‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت منطقه مورد مطالعه، غنی‌شدگی LREE/HREE و بی‌هنجاری منفی مشخص در Eu را نشان می‌دهند (شکل ۷-الف). بر پایه نظر Frietsch and Perdahl (1995) تپی‌شدگی Eu در کانسارهای آهن نوع کایرونا به دلیل اکسایش محیط (به دلیل وجود مگنتیت و



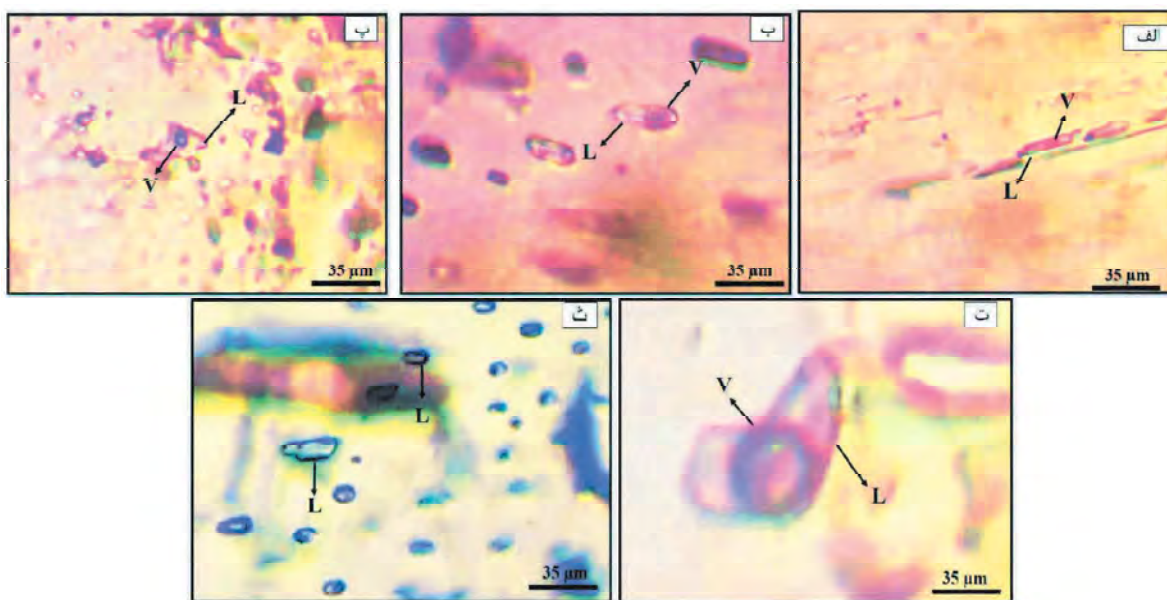
شکل ۷. الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده به کندریت در کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت، الف) کانه‌زایی جنوب غرب جزیره هرمز، ب) کانسارهای ناحیه بافق (Frietsch and Perdahl, 1995)، پ) کانسار اسفوردی (Mokhtari et al., 2013)، ت) کانسار گزستان (Mokhtari et al., 2013)، ث) کانسارهای Henry، Kirunavaara، Rektorn در شمال سوئد (Frietsch and Perdahl, 1995)، ج) کانسار El Laco در شیلی (Frietsch and Perdahl, 1995)

جزیره هرمز در جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی سه نوع میانبار سیال در نمونه‌های آپاتیت شناسایی شد. میانبارهای تک‌فازی مایع (L) که کل حجم این میانبارها از مایع تشکیل شده است، میانبارهای دو فازی غنی از مایع (LV) که از یک فاز مایع (L) به همراه یک فاز بخار (V) تشکیل شده‌اند. حباب بخار در این میانبارها پنج تا ۳۵ درصد حجم کل میانبار سیال را اشغال می‌کند و میانبارهای سیال دو فازی

ریزدماسنجی میانبارهای سیال

مطالعه میانبارهای سیال در کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت جزیره هرمز بر روی بلورهای آپاتیت انجام شده است. میانبارهای سیال موجود در آپاتیت‌های نسل‌های اول و دوم به صورت‌های کشیده، شکل دار و نیمه‌شکل دار هستند و ابعاد طولی آنها میان پنج تا ۳۵ میکرون متغیر است (شکل‌های ۸-الف تا پ). ویژگی‌های کلی میانبارهای سیال در آپاتیت‌های

غنی از بخار (VL) که از یک فاز بخار (V) به همراه یک فاز مایع (L) تشکیل شده‌اند و حباب بخار در آن‌ها از ۵۵ تا ۸۰ درصد حجم کل میانبارها را اشغال می‌کند. میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV) با فراوانی ۸۰ تا ۸۵ درصد بخش عمده میانبارهای سیال موجود در کانی آپاتیت و همچنین میانبارهای دوفازی غنی از بخار (VL) و میانبارهای تک فازی مایع (L) هر کدام بین پنج تا هفت درصد فراوانی کل میانبارهای موجود در نمونه‌های مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند (شکل ۸-الف، ب، پ، ت، ث). این میانبارها هم به صورت اولیه (در امتداد سطوح رشد) و هم به صورت ثانویه (در ریز درز و شکستگی‌ها) و یا به صورت شبه ثانویه افتاده‌اند. در این پژوهش مطالعات حرارت‌سنجی با عملیات سرمایش و گرمایش بر روی میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع انجام شده است.



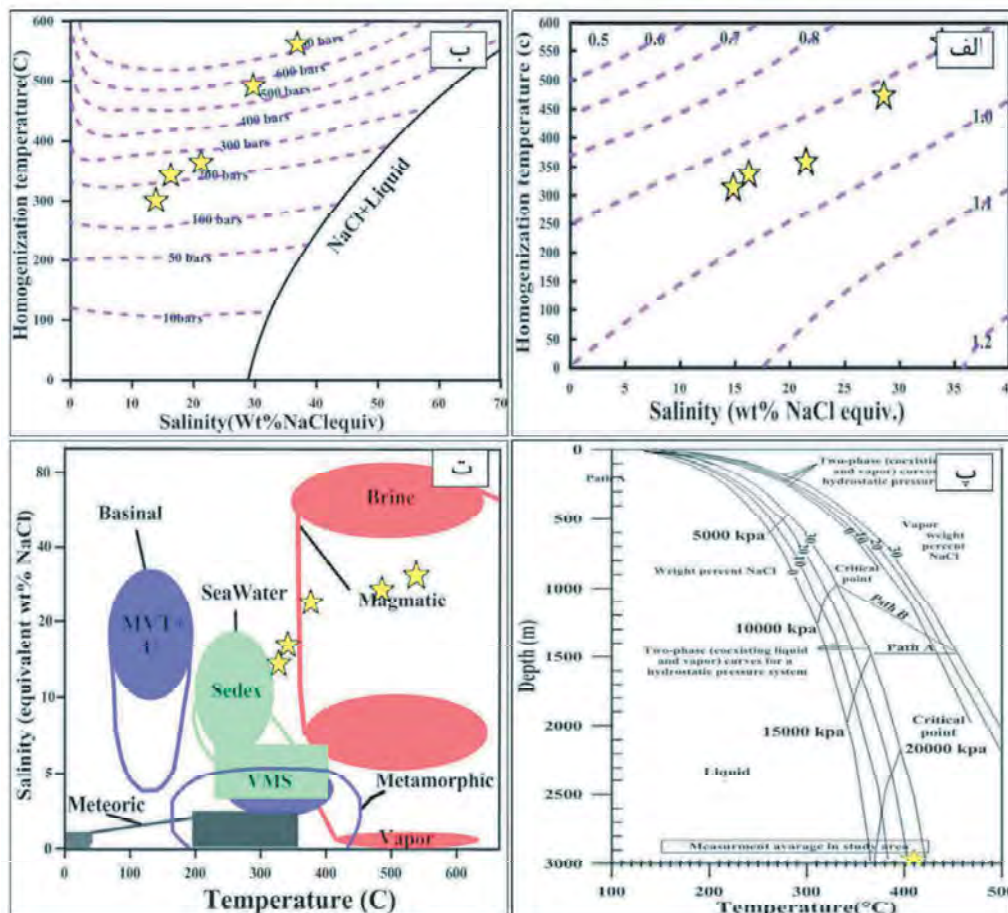
شکل ۸. انواع میانبارهای سیال با شکل‌های مختلف در کانی آپاتیت از منطقه هرمز، الف) میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV) به شکل کشیده، ب) میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV) به شکل بیضوی، پ) میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (LV) به شکل نامنظم، ت) میانبارهای سیال دوفازی غنی از بخار (VL)، ث) میانبارهای سیال تک فازی مایع (L)

جدول ۴. پتروگرافی و ریزدماسنجی میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع در آپاتیت از کانسنگ‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت جزیره هرمز

Sample	Genetic	Size (μm)	Shape	Fluid type	Tmice(°C)	Th (°C)	Salinity (wt. %NaCl eq.)
HI-F2-01	Primary	۱۰	Elongate	LV	- ۱۷/۲۵	۳۳۷	۱۶/۷۶
HI-F2-02	Primary	۱۲	Elongate	LV	- ۸/۵۲	۵۶۱	۳۲/۴۰
HI-F2-03	Primary	۸	Euhedral	LV	- ۱۲/۴۲	۳۰۹	۱۴/۱۶
HI-F2-04	Primary	۲۵	Euhedral	LV	- ۱۲/۷۳	۳۱۳	۱۴/۸۷
HI-F2-05	Primary	۱۰	Elongate	LV	- ۱۰/۹۰	۳۳۵	۱۶/۲۶
HI-F2-06	Primary	۱۲	Elongate	LV	- ۱۸/۶۰	۳۵۷	۲۱/۴۰
HI-F2-07	Primary	۱۰	Elongate	LV	- ۸/۷۰	۴۷۴	۲۸/۵۴
HI-F2-08	Primary	۸	Subhedral	LV	- ۱۲/۷۱	۳۱۲	۱۴/۷۵
HI-F2-09	Primary	۶	Subhedral	LV	- ۱۷/۶۵	۳۱۸	۱۴/۹۵
HI-F2-10	Primary	۶	Elongate	LV	- ۷/۴۵	۵۶۵	۳۳/۸۷

کانه‌زایی را به دست آورد. برای کان‌زایی آهن-آپاتیت منطقه هرمز بر پایه مقدار میانگین دما و شوری، عمق تقریبی ۳۰۰۰ متر برآورد شده است (شکل ۹-پ). از آنجا که محیط به تله افتادن میانبارهای سیال در این بخش از کان‌زایی مرتبط با این اعماق می‌باشد، فشار حاکم بر محیط، فشار لیتواستاتیک است. از نمودار دوتایی میزان شوری در برابر درجه حرارت همگن‌شدگی می‌توان بدون استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار تا حدودی منشأ سیالات کان‌ساز را پیش‌بینی کرد (Kesler, 2005). همان‌طور که در شکل ۹-ت مشاهده می‌شود اکثریت میانبارهای سیال کان‌ساز آهن-آپاتیت هرمز در گستره سیالات با منشأ ماگمایی و گرمابی قرار می‌گیرند، که حاکی از نقش این سیالات در کان‌زایی آهن-آپاتیت هرمز می‌باشد.

نتایج مطالعات گرمایش سیالات نشان می‌دهد که تغییرات دمای همگن‌شدن در میانبارهای دو فاز مایع و بخار (L+V) در کریستال آپاتیت بین ۳۰۹ تا ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۸۸ °C) و بر اساس مطالعات سرمایش درجه شوری میانبارهای سیال در میزان آپاتیت بین ۱۴/۱۶ تا ۳۳/۸۷ (میانگین ۲۰/۸۰) درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند. در این مطالعه با استفاده از میزان شوری سیال در مقابل دمای همگن‌شدگی، مقدار چگالی و فشاربخار محاسبه شد که بر این اساس مقدار چگالی بین ۰/۵ تا ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و فشار بخار کمتر از ۲۰۰ تا حداکثر ۷۰۰ بار تغییر می‌کند (شکل ۹-الف، ب). بر اساس نمودار دما-فشار-عمق (Haas, 1971, 1976; Sourirajan and Kennedy, 1962) می‌توان عمق تقریبی



شکل ۹. الف) گستره چگالی سیالات کان‌ساز و روند تغییرات چگالی تحت تأثیر فرایند سردشدگی و اختلاط میانبارها (اقتباس از Wilkinson, 2001)، ب) نمودار تعیین فشار سیال کان‌ساز برحسب دمای همگن‌شدن و شوری (Driesner and Heinrich, 2007)، پ) نمودار دما-فشار-عمق جهت تعیین عمق به‌دام‌افتادگی سیال، که با در نظر گرفتن میانگین دمای همگن‌شدگی و شوری عمق ۳۰۰۰ متر برای به‌دام‌افتادن سیال کان‌ساز به‌دست‌آمده است، ت) تشخیص نوع سیال کان‌ساز با استفاده از میزان شوری در برابر درجه حرارت همگن‌شدگی (اقتباس از Kesler, 2005)

مراحل تشکیل کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت جزیره هرمز

برای تکوین کانه‌زایی اکسیدهای آهن-آپاتیت جزیره هرمز مراحل زیر به‌طور سلسله‌مراتبی ارائه می‌شود:

مرحله اول (بالا آمدگی پوسته قاره‌ای): در زمان پرکامبرین پسین سرزمین ایران بخشی از ابرقاره گندوانا در حاشیه شمالی آن بوده است. در محدوده‌ی پوسته قاره‌ای ایران، گوشته فوقانی به دلیل ازدیاد حرارت دچار ذوب و بالا آمدگی شده و زمین‌های فرآیندهای تکتونیکی کششی را فراهم آورده است (شکل ۱۰-الف).

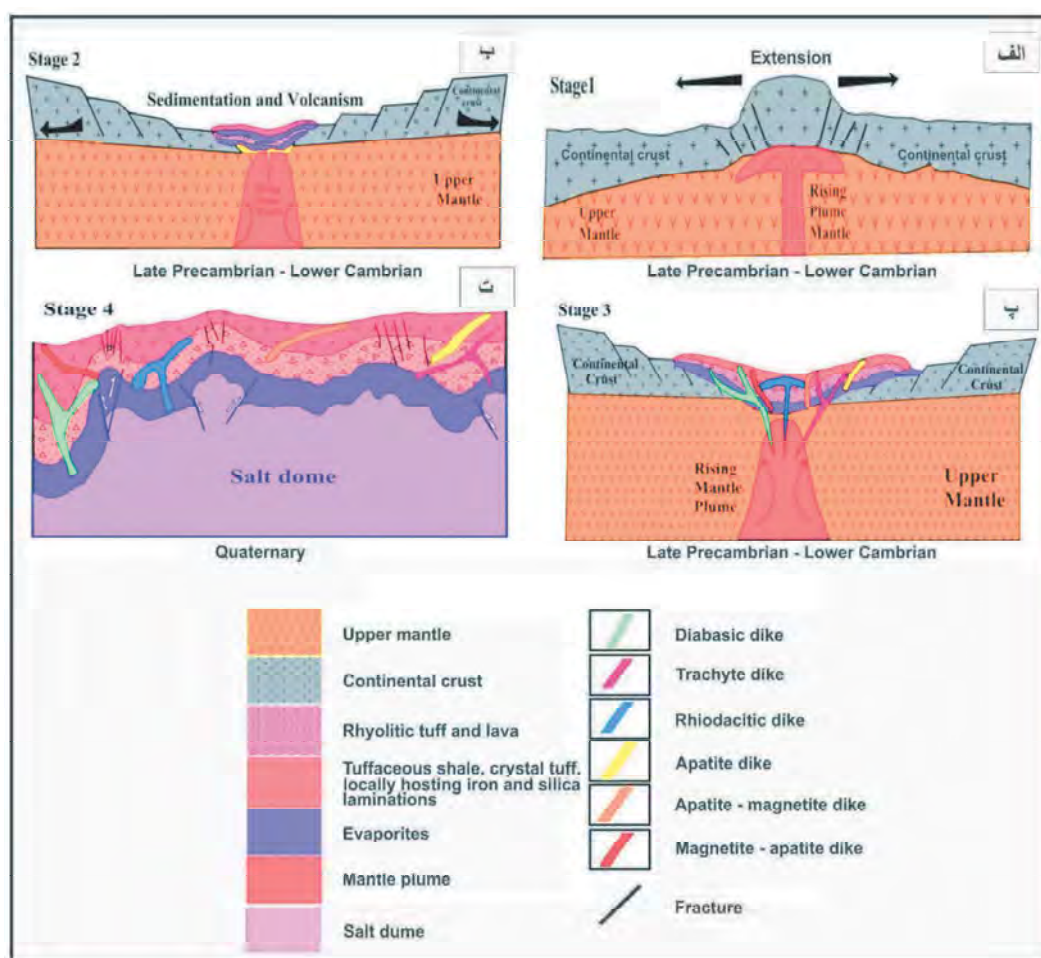
مرحله دوم (فعالیت‌های کششی و گسل خوردگی پوسته قاره‌ای): در این مرحله گسل خوردگی‌ها و فعالیت‌های کششی توسعه پیدا کرده و حوضه‌های رسوبی-آتشفشانی درون قاره‌ای تشکیل می‌شوند. پیامد این کشش منجر به فرونشست و تراوش ماگمای بازالتی به خارج می‌شود. ترکیب این نوع بازالت‌ها نیز از نوع آکالان است. در این زمان در بخش ساحلی حاشیه واگرای پروتوپالئوتتیس رسوبات تبخیری سازند هرمز نهشته شده‌اند (لاسمی، ۱۳۷۹). با توسعه ریف‌ت درون قاره‌ای سری از سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و تبخیری در این حوضه‌ها نهشته می‌شود و از مثال‌های شاخص این رخداد زمین‌شناسی در ایران می‌توان بلوک بافق-پشت‌بادام و منطقه هرمز را نام برد (شکل ۱۰-ب).

مرحله سوم (فعالیت‌های ماگمایی-گرمايي): مرحله فعالیت‌های آتشفشانی در حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای به‌تدریج به فعالیت‌های ماگمایی و نفوذی تغییر می‌یابند. در این نوع محیط‌های زمین‌ساختی، ماگمای مادر ترکیب مافیکی آکالان دارد. در ماگماهای آبدار با فشار بخشی اکسیژن بالا، مگنتیت اولین کانی است که متبلور می‌شود (Martel et al., 1999). همین‌که ماگما به سطح معینی صعود می‌کند، مذاب هموزن باقیمانده دانه‌های مگنتیت متبلور شده را احاطه می‌کند (کانه‌زایی مگنتیت با ساخت و بافت دانه‌پراکنده در این مرحله تشکیل می‌شود). در این مرحله، مذاب باقیمانده متحمل ناآمیختگی شده و مذاب غنی از آهن و مذاب غنی از سیلیس به وجود می‌آید. در طول فرآیند ناآمیختگی مایعات، عناصر فرار از قبیل

S، Cl، F، و P به‌شدت وارد مذاب غنی از آهن می‌شوند (Lester et al., 2013) و حضور عناصر فرار به‌طور قابل ملاحظه‌ای چگالی مایعات را کاهش می‌دهد (Goldstein and Francis, 2008)، بدین ترتیب ساخت قارچی شکل غنی از آهن که محتوی دانه‌های مگنتیت و مذاب آهن-فسفر با درصد بالایی از مواد فرار است، ساخته می‌شود (کانسنگ‌های توده‌ای مگنتیت-آپاتیت در این مرحله به وجود می‌آید). مذاب غنی از آهن در مقایسه با ماگمای غنی از Si هم‌زمان از چگالی کمتری برخوردار است. زمانی که مذاب‌های غنی از آهن و مواد فرار به عمق‌های کمتر صعود می‌کند، کاهش درجه حرارت و فشار سبب از دست رفتن گاز و دفع سیالات ماگمایی-گرمايي غنی از Cl و F از توده غنی از آهن می‌شود. سیالات ماگمایی-گرمايي غنی از Cl و F با توده مگنتیتی سخت شده واکنش داده، و به فاز آهن-فسفر بینابینی تغییر ماهیت می‌دهند و سبب کاهش قابل ملاحظه در مقدار تیتانیوم، کروم و دیگر عناصر کمیاب مگنتیت‌های اولیه می‌شوند (کانی‌های مگنتیت و آپاتیت نسل دوم که فضاهای میان مگنتیت و آپاتیت‌های نسل اول را پر می‌کنند در این مرحله تشکیل می‌شوند که به‌نوبه خود توسط رگه-رگچه‌های مگنتیت و آپاتیت دنبال می‌شوند).

توده‌های آذرین نفوذی مافیک تا فلسیک و دایک‌های دیابازی-تراکیتی و ریوداسیتی در طول تبلور بخشی ماگمای مافیکی اولیه، از مذاب غنی از Si ایجاد می‌شوند. کانه‌زایی‌های اکسیدهای آهن-آپاتیت مانند فازهای تأخیری، سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی میزبان و توده‌های آذرین مافیک تا فلسیک را قطع کرده‌اند (شکل ۱۰-پ). در ضمن، واکنش میان سیالات ماگمایی-گرمايي و سنگ‌های آذرین (به‌ویژه ریولیتی و ریوداسیتی) سری هرمز سبب دگرسانی وسیع آکالی-کلسیک شده است.

مرحله چهارم (چین‌خوردگی، گسلش و فرسایش): در نهایت، از زمان کامبرین زیرین تا عهد حاضر به دلیل فعالیت گنبد‌های نمکی و گسل‌ها، مجموعه سری هرمز (شامل سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی، نفوذی‌ها و کانسنگ‌ها) به‌عنوان پی‌سنگ زاگرس در سطح زمین نمایان شده، و پس از تحمل فرآیندهای هوازدگی و فرسایش مورفولوژی عهد حاضر را پیدا کرده است (شکل ۱۰-ت).



شکل ۱۰. مراحل مختلف تشکیل کانسار آهن-آپاتیت جزیره هرمز، الف) بالا آمدگی پوسته قاره‌ای، ب) توسعه فعالیت‌های کششی و گسل خوردگی پوسته قاره‌ای، پ) فعالیت‌های ماگمایی-گرمایی و کانه‌زایی، ت) در نهایت دیاپیریسم، چین خوردگی، گسلش، هوازدگی و فرسایش

نتیجه‌گیری

کانی‌های مگنتیت و آپاتیت را اثبات می‌کند. کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت جزیره هرمز دارای تمرکز بالایی از عناصر کمیاب خاکی است و عیار مجموع REE در کانسنگ‌های غنی از آپاتیت تا سه درصد می‌رسد، و همبستگی مثبت قوی میان فسفر با REE وجود دارد. مقادیر نسبت‌های V/Ti ، Ni/Ti ، V/Fe و Ti/Fe و الگوی به‌هنجار شده عناصر کمیاب خاکی به‌کندربیت در کانسنگ‌های مگنتیت-آپاتیت جزیره هرمز مشابهت آن‌ها را با کانسارهای مگنتیت-آپاتیت ماگمایی نشان می‌دهد. دمای همگن شدن در میانبارهای دو فاز مایع و بخار (L+V) در کانی آپاتیت بین ۳۰۹ تا ۵۶۵ (میانگین ۳۸۸) درجه سانتی‌گراد و درجه شوری بین ۱۴/۱۶ تا ۳۳/۸۷ (میانگین ۲۰/۸۰) درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است و میانبارهای سیال در گستره سیالات

در منطقه مورد مطالعه، سری هرمز تناوبی از گدازه و توف ریولیتی تا ریوداسیتی، کریستال توف، شیل توفی، ماسه‌سنگ و لایه‌های تبخیری به سن پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین را شامل می‌شود. کانه‌زایی اکسیدهای آهن و آپاتیت به‌صورت‌های توده‌ای، دایک، رگه-رگچه‌ای و دانه‌پراکنده در سنگ‌های شیل توفی و کریستال توف مشاهده می‌شود. بر پایه مقادیر اکسیدهای آهن و آپاتیت می‌توان کانه‌زایی را به انواع اکسیدهای آهن (بیشتر مگنتیت)، اکسیدهای آهن-آپاتیت و آپاتیت تقسیم کرد. کانی‌های اصلی سازنده کانسار شامل مگنتیت، اولیژیست، هماتیت، و آپاتیت است، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی باطله‌های کانسار را تشکیل می‌دهند. مطالعات بافتی وجود نسل‌های مختلف

۱، ۱۹۵-۲۱۶.

- رجب‌زاده، م.ع.، حسینی، ک. و موسوی نسب، ز.، ۱۳۹۳. مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی عناصر کمیاب خاکی بر روی آپاتیت کانسار اکسید آهن-آپاتیت اسفوردی بافق-یزد. اولین همایش زمین‌شناسی فلات ایران، ۱۱.

- رستمی، ع.، بازآمد، م.، حاج علیلو، ب. و مؤذن، م.، ۱۳۹۳. بررسی رفتار ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی در آپاتیت‌های جزیره هرمز، استان هرمزگان. مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ۶، ۱، ۷۱-۸۵.

- سپهری‌راد، ر.، ۱۳۷۹. زمین‌شناسی اقتصادی کانسار آهن آنومالی شمالی، چغارت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت‌معلم، ۱۵۸.

- فخری دودویی، ع.، ۱۳۹۷. زمین‌شناسی اقتصادی و ژئوشیمی واحد H۴ سری هرمز، جزیره هرمز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۷۲.

- کارگران بافقی، ف.، ۱۳۸۰. مطالعه زون‌های فسفات دار در کانسار آهن چغارت و ارتباط احتمالی آنها با زون‌های فسفات دار اسفوردی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت‌معلم، ۱۱۱.

- لاسمی، ی.، ۱۳۷۹. رخساره‌ها، محیط‌های رسوبی و چینه‌نگاری سکانشی نهشته سنگ‌های پرکامبرین بالایی و پالئوزوئیک ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۸۰.

- Aftabi, A., Mohseni, S., Babeki, A. and Azaraien, H., 2009. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, central Iran—a discussion. *Economic Geology*, 104, 137-139.

- Atapour, H. and Aftabi, A., 2017. Comments on Geochronology and geochemistry of rhyolites from Hormuz Island, southern Iran: A new Cadomian arc magmatism in the Hormuz Formation. *Lithos*, 2015, 236-237, 203-211: A missing link of Ediacaran A-type rhyolitic volcanism associated with glaciogenic banded iron salt formation (BISF). *Lithos*, 284-285, 779-782.

- Bilenker, L.D., Simon, A.C., Reich, M., Lundstrom, C.C., Gajos, N., Bindeman, I., Barra, F. and Munizaga R., 2016. Fe-O stable isotope pairs elucidate a high-temperature origin of

با منشاء ماگمائی و گرمایی قرار می‌گیرند که حاکی از نقش این سیالات در کانه‌زایی منطقه می‌باشد. در نهایت، با توجه به شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و میانبار سیال، کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت جزیره هرمز در گروه کانسارهای مگنتیت-آپاتیت نوع کایرونا و با منشاء ماگمائی-گرمایی طبقه‌بندی می‌شود.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود که بستر و محیط مناسبی را برای انجام این پژوهش آماده کرده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایند. از دست‌اندرکاران محترم مجله و داورانی که ارزیابی مقاله حاضر را قبول می‌فرمایند، تشکر می‌شود.

منابع

- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.

- احمدزاده هروی، م.، هوشمند زاده، ع. و نبوی، م.ح.، ۱۳۶۹. مفاهیم جدیدی از چینه‌شناسی سازند هرمز و مسئله دیابیریزم در گنبد‌های نمکی جنوب ایران. مجموعه مقالات سمپوزیوم دیابیریزم با نگرش ویژه به ایران، وزارت معادن و فلزات، جلد اول، ۱-۲۲.

- احمدی مقدم، پ.، مرتضوی، م.، پوستی، م. و احمدی پور، ح.، ۱۳۹۷. زمین‌شناسی و سنگ‌زایی سنگ‌های دیابازی سازند هرمز، واقع در استان هرمزگان (جنوب ایران). *مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران*، ۲۶، ۳، ۶۵۱-۶۶۴.

- افضل‌ی، س.، نظامتی، ن.، قادری، م.، قلمقاش، ج.، قاسمی، م.ر. و کریمی باوندپور، ع.، ۱۳۹۳. سنگ‌زایی و کانه‌زایی در کانسار اکسید آهن آپاتیت‌دار گزستان، خاور بافق، ایران مرکزی. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۴، ۹۳، ۷۷-۸۴.

- بهزادی، م.، ۱۳۸۵. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن آنومالی شمالی واقع در منطقه بافق یزد. رساله دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۱۱.

- بیابانگرد، ح.، عالیان، ف. و بازآمد، م.، ۱۳۹۷. کانی‌شناسی، ژئوشیمی و منشأ کانه‌زایی آهن و مس در توالی آتشفشانی-رسوبی هرمز. *مجله زمین‌شناسی اقتصادی*، ۱۰،

- Chilean iron oxide-apatite deposits. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 177, 94-104.
- Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S. and 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.
 - 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, Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective, PGC Publishing, Adelaide, 2, 303-320.
 - Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2007. Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and apatites of the Bafq District, Central-East Iran, in: Andrew, C.J. et al., eds, Digging Deeper, Proceedings of the 9th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Dublin, 1501-1504.
 - Daliran, F., Stosch, H.G. and Williams, P., 2010. Early Cambrian iron oxide-apatite-REE (U) deposits of the Bafq district, east-central Iran, in: Corriveau, L., Mumin, H., eds., Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues: Geological Association of Canada, Short Course Notes, 20, 143-155.
 - Dare, S.A.S., Barnes, S.J. and Beaudoin, G., 2014. Did the massive magnetite lava flows of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS. *Mineralium Deposita*, 50, 607-617.
 - Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews*, 100, 1-420.
 - Eslamizadeh, A., 2017. Petrology and geochemistry of early Cambrian volcanic rocks hosting the Kiruna-type iron ore in Anomaly 10 of Sechahun, Central Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 28, 1, 21-35.
 - Driesner, T. and Heinrich, C.A., 2007. The system H₂O-NaCl. Part I. Correlation formulae for phase relations in temperature-pressure-composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 4880-4901.
 - Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore type. *Ore Geology Review*, 9, 489-510.
 - Geijer, P., 1910. Igneous rocks and iron ores of Kiirunavaara, Luossavaara and Tuollavaara. Scientific and practical researches in Lapland arranged by the Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag, Geology of the Kiruna district 2, Stockholm, 278.
 - Goldstein, S.B. and Francis, D., 2008. The petrogenesis and mantle source of Archaean ferropicrites from the Western Superior Province, Ontario, Canada. *Journal of Petrology*, 49, 1729-1753.
 - Haas, J.L., 1976. Thermodynamic properties of the coexisting phases and thermodynamic properties of the NaCl component in boiling NaCl solutions, United States Geological Survey Bulletin, 1421-B, 71.
 - Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66, 940-946.
 - Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of Itered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48, 2341-2357.
 - He, X.F., Santosh, M., Tsunogae, T. and Malaviarachchi, S.P.K., 2018. Magnetiteapatite

- deposit from Sri Lanka: implications on Kiruna-type mineralization associated with ultramafic intrusion and mantle metasomatism. *American Mineralogist*, 103, 26-38.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron-oxide (Cu-U-Au-Ree) deposits. *Precambrian Research*, 58, 241-287.
 - Jami, M., 2006. Geology, geochemistry and evolution of the Esfordi phosphate iron deposit, Bafq area, Central Iran, Unpublished Ph.D. thesis, University of New South Wales, 355.
 - Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran, *Economic Geology*, 102, 1111-1128.
 - Jonsson, E., Troll, V., Hogdahl, K., Harris, C., Weis, F., Nilsson, K.P. and Skelton, A., 2013. Magmatic origin of giant Kiruna-type apatite-iron-oxide ores in Central Sweden. *Scientific Reports*, 3, 1644.
 - Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. *Elements*, 1, 13-18.
 - Knipping, J.L., Bilenger, L., Simon, A. and Reich, M., 2015. Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology*, 43, 591-594.
 - Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
 - Lester, G.W., Clark, A.H., Kyser, T.K. and Naslund, H.R., 2013. Experiments on liquid immiscibility in silicate melts with H₂O, P, S, F, and Cl: Implications for natural magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166, 329-349.
 - Martel, C., Pichavent, M., Holtz, F. and Scaillet, B., 1999. Effects of fO_2 and H₂O on andesite phase relations between 2 and 4 kbar. *Journal of Geophysical Research*, 104, 29453-29470.
 - Mohammad-Torab, F. and Lehmann, B., 2008. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. *Mineralogical Magazine*, 71, 347-363.
 - Mohseni, S. and Aftabi, A., 2015. Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD), Central Iran: The possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny. *Lithos*, 71, 215-236.
 - Mokhtari, M.A.A., Emami, M.H. and Hosseinzadeh, G., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. *Journal of Earth System Sciences*, 122, 795-803.
 - Mokhtari, M.A.A. and Ebrahimi, M., 2015. Geology and geochemistry of Homeijan magnetite-apatite deposit (SW Behabad, Yazd province). *Geochemistry Journal*, 2, 2, 20-27.
 - Moor, F. and Modabberi, S., 2003. Origin of choghart iron oxide deposit Bafq mining district, central iran: new isotopic and geochemical evidences, 14, 259-269.
 - Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 757-775.
 - Nystrom, J.O., Billstrom, K., Henriquez, F., Fallick, A.E. and Naslund, H.R., 2010. Oxygen isotope composition of magnetite in iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden. *Global Financing Facility (GFF)*, 130, 4, 177-188.
 - Rahimi, E., Maghsoudi, A. and Hezarkhani, A., 2016. Geochemical investigation and statistical analysis on rare earth elements in Lakehsiyah deposit, Bafq district. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 139-150.
 - Rhodes, A.L. and Oreskes, N., 1999. Oxy-

- gen isotope composition of magnetite deposits at El Laco, Chile: Evidence of formation from isotopically heavy fluids. In: *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*, Brian, J. Skinner, ed., Society of Economic Geologists Special Publication 7, 333-351.
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39, 85-106.
 - Schandl, E.S. and Gorton, M.P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97, 629-642.
 - Sillitoe, R.H. and Burrows, D.R., 2002. New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, Northern Chile. *Economic Geology*, 97, 1101-1109.
 - Smith, M.P., Storey, C.D., Jeffries, T.E. and Ryan, C., 2009. In situ U-Pb and trace element analysis of accessory minerals in the Kiruna District, Norrbotten, Sweden: New constraints on the timing and origin of mineralization. *Journal of Petrology*, 50, 2063-2094.
 - Smith, M.P., Gleeson, S.A. and Yardley, B.W.D., 2013. Hydrothermal fluid evolution and metal transport in the Kiruna District, Sweden: contrasting metal behaviour in aqueous and aqueous-carbonic brines. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 102, 89-112.
 - Sourirajan, S. and Kennedy, G.C., 1962. The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Sciences*, 260, 115-141.
 - Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42, 1, 313-345.
 - Tornos, F., Velasco, F. and Hanchar, J.M., 2017. The magmatic to magmatic hydrothermal evolution of the El Laco Deposit (Chile) and its implications for the genesis of magnetite-apatite deposits. *Economic Geology*, 112, 1595-1628.
 - Troll, V.R., Weis, F.A., Jonsson, E., Andersson, U.B., Majidi, S.A., Hogdahl, K., Harris, C., Millet, M.A., Chinnasamy, S.S., Koojiman, E. and Nilsson, K.P., 2019. Global Fe-O isotope correlation reveals magmatic origin of Kiruna-type apatite-iron-oxide ores. *Nature Communications*, 10, 1, 1712.
 - Westhues, A., Hanchar, J.M., Whitehouse, M.J. and Martinsson, O., 2016. New constraints on the timing of host-rock emplacement, hydrothermal alteration, and iron oxide-apatite mineralization in the Kiruna District, Norrbotten, Sweden. *Economic Geology*, 111, 1595-1618.
 - Westhues, A., Hanchar, J.M., LeMessurier, M.J. and Whitehouse, M.J., 2017. Evidence for hydrothermal alteration and source regions for the Kiruna iron oxide-apatite ore (northern Sweden) from zircon Hf and O isotopes. *Geology*, 45, 571-574.
 - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
 - Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, 55, 229-272.
 - Xie, Q., Zhang, Z., Hou, T., Cheng, Z., Campos, E., Wang, Z. and Fei, X., 2019. New Insights for the Formation of Kiruna-Type Iron Deposits by Immiscible Hydrous Fe-P Melt and High-Temperature Hydrothermal Processes: Evidence from El Laco Deposit. *Economic Geology*, 114, 1, 35-46.