

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و منشأ کانسار اکسید آهن - آپاتیت گلستان آباد (خاور زنجان)

شیوا کردیان¹، میرعلی اصغر مختاری^{1*}، حسین کوهستانی¹ و سمیه ویسه²

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(2) آزمایشگاه‌های مرکز پژوهش‌های کاربردی علوم زمین سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، کرج، ایران

دریافت مقاله: 1397/12/18، پذیرش: 1398/06/31

چکیده

کانسار اکسید آهن -آپاتیت گلستان آباد یکی از کانه‌زایی‌های آهن در کمربند فلززایی طارم -هشتجین است که در فاصله حدود 30 کیلومتری خاور شهر زنجان قرار گرفته است. واحدهای سنگی موجود در این منطقه عبارت از توالی آتشفشانی -رسوبی مربوط به زیرعضو آمند سازند کرج به همراه توده‌های نفوذی با ترکیب کوارتز مونزودیوریت، پیروکسن کوارتز مونزودیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری است. توده‌های نفوذی کوارتز مونزودیوریت و پیروکسن کوارتز مونزودیوریت دارای ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم بالا بوده و از نوع متآلمین و I-type هستند. این توده‌ها در محیط تکنونوماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای تا پس از برخورد تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی اکسید آهن -آپاتیت در کانسار گلستان آباد به صورت عدسی‌ها و رگه -رگچه‌های اکسید آهن -آپاتیت در داخل توده نفوذی کوارتز مونزودیوریتی و پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی و به مقدار کم در داخل سنگ‌های آتشفشانی -رسوبی انوسن مجاور توده نفوذی تشکیل شده است. کانه‌های اصلی در این کانه‌زایی شامل مگنتیت، آپاتیت و اکتینولیت است. ساخت و بافت‌های موجود شامل رگه -رگچه‌ای، نواری، توده‌ای، برشی، دانه‌پراکنده، استوک‌ورک، جانیشینی، بازماندی و پُرکننده فضاهای خالی است. کانسار اکسید آهن -آپاتیت گلستان آباد شباهت‌های زیادی با ذخایر آهن نوع کایرونا از نظر مجموعه کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی، دگرسانی سنگ دیواره و زمین‌شیمی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کانه‌زایی اکسید آهن -آپاتیت، نوع کایرونا، عناصر کمیاب خاکی، پهنه طارم، گلستان آباد، زنجان

مقدمه

کانسارهای آهن نوع آتشفشانی -رسوبی است. از کانسارهای آهن اسکارنی می‌توان به کانسارهای آهن ارجین، گوزل‌دره، باشکند و قوزلو (Besharati et al., 2010; Shahbazi et al., 2015; Moghaddasi et al., 2019; Shafaie Pour et

استان زنجان میزبان کانه‌زایی‌های متعدد آهن از نوع کانسارهای اسکارنی، کانسارهای اکسید آهن -آپاتیت نوع کایرونا و

پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Nabati et al., 2009; Nabati, 2012; Nabati et al., 2014a). بررسی‌های انجام شده نشان داده است که عناصر کمیاب خاکی به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین عناصر همراه در کانه‌زایی‌های اکسید آهن-آپاتیت منطقه حضور دارند (Nabati, 2012; Nabati and Ghaderi, 2014; Mokhtari et al., 2017).

بررسی‌های اکتشافی بر روی کنسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان آباد انجام شده و در سال‌های گذشته مورد بهره‌برداری قرار گرفته است؛ ولی بررسی‌های پژوهشی دقیق بر روی ویژگی‌های کانی‌شناختی، ساخت و بافت، زمین‌شیمی و منشأ کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت آن انجام نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، توالی پاراژنتیکی، زمین‌شیمی و منشأ کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت گلستان آباد مورد بررسی قرار گرفته است.

روش مطالعه

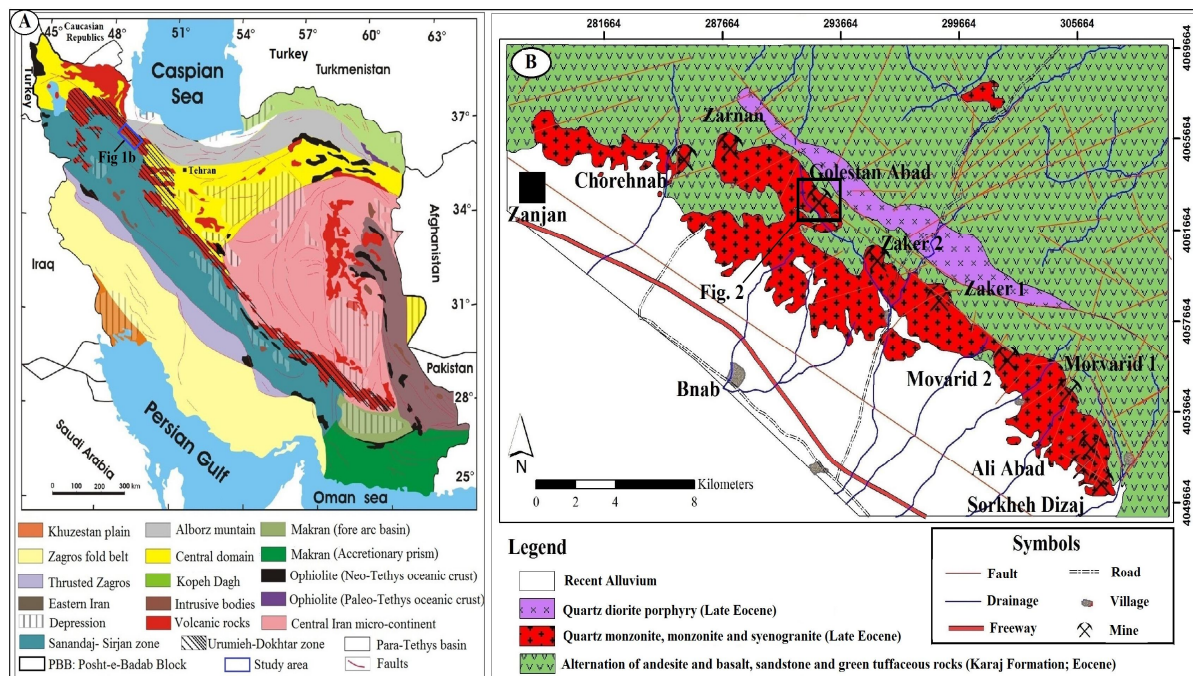
این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. بررسی‌های صحرایی شامل شناسایی واحدهای مختلف سنگی و پهنه‌های کانه‌زایی و نمونه‌گیری از آنها برای بررسی‌های آزمایشگاهی بوده است. در این راستا، علاوه بر تهیه نقشه زمین‌شناسی در مقیاس 1:5000، بیش از 60 نمونه برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و آنالیزهای شیمیایی برداشت شد. طی برداشت‌های صحرایی، امتداد، شیب و ضخامت عدسی‌ها و رگه‌های اکسید آهن-آپاتیت اندازه‌گیری شد. از نمونه‌های برداشت شده، تعداد 12 مقطع نازک و 15 مقطع نازک-صیقلی برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه شد. سپس، بر اساس بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری، به‌منظور انجام مطالعات زمین‌شیمیایی و اندازه‌گیری عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی، تعداد 6 نمونه از توده‌های نفوذی منطقه و 7 نمونه از پهنه‌های کانه‌دار برای آنالیز به روش‌های XRF و ICP-MS انتخاب و در آزمایشگاه شرکت زرآرما در تهران آنالیز شد. بدین منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط

(al., 2020)، از کنسارهای اکسید آهن-آپاتیت به کنسارهای سرخه‌دیزج، مروارید، ذاکر و گلستان آباد (Nabati et al., 2014a; Nabati, 2012; Nabati et al., 2009) و از کنسارهای آهن آتشفشانی-رسوبی به کنسارهای میرجان، کاوند، حسین آباد، شاه‌بلاغی، ریحان و چورزق اشاره کرد (Mokhtari et al., 2019). کنسارهای اکسید آهن-آپاتیت معرف کنسارهای آهن نوع کایرونا هستند که از پروتوزوئیک تا ترشیری در مناطق مختلف جهان تشکیل شده‌اند و به‌طور معمول در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکان هستند (Hitzman et al., 1992; Hitzman, 2000). آپاتیت از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده این کنسارهاست که با مگنتیت و مقادیر مختلفی اکتینولیت همراه است. با وجود پژوهش‌های فراوان بر روی این کنسارها، در مورد منشأ آنها اختلاف نظر وجود دارد. اغلب فرایند از منشأ ماگمایی آنها و جایگزینی ماگمای غنی از مواد فرار و نهشته‌شدن مواد معدنی از سیال باقی‌مانده حمایت کرده و فرایند عدم امتزاج سیال‌ها را به‌عنوان منشأ این کنسارها در نظر گرفته‌اند (Hitzman et al., 1992; Hitzman, 2000). برخی دیگر از پژوهش‌ها، مدل جان‌شینی متاسوماتیک توسط سیالات گرمایی غنی از آهن با شوری بالا و همچنین مدل سیال ماگمایی را برای تشکیل توده‌های معدنی اکسید آهن-آپاتیت نوع کایرونا معرفی کرده‌اند (Hildebrand, 1986; Gleason et al., 2000; Jami et al., 2007; Nabati et al., 2012; Nabati et al., 2014a; Boomeri, 2012). یکی از ویژگی‌های این گروه کانه‌زایی‌ها، تمرکزهای بالای عناصر کمیاب خاکی در آنهاست (Parak, 1975; Frietsch and Perdahl, 1995; Kerr, 1998).

کنسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان آباد یکی از کانه‌زایی‌های آهن در کمربند فلز زایی طارم-هشتجین است (شکل A-1) که در فاصله حدود 30 کیلومتری خاور شهر زنجان قرار گرفته است (شکل B-1). کانه‌زایی‌های متعددی از اکسید آهن-آپاتیت (مانند سرخه دیزج، مروارید و ذاکر) در کمربند ماگمایی-متالورژی طارم تشکیل شده است (شکل B-1) که توسط

دمای 1000 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت به دست آمد. برای تجزیه به روش XRF برای عناصر اصلی، قرصی از نمونه‌های پودر شده تهیه شد. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی توسط دستگاه ICP-MS، حدود 0/2 گرم از هر نمونه در ترکیب لیتیم متابرات/تتراپرات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد. میزان دقت برای عناصر کمیاب و کمیاب خاکی بین 2 تا 3 درصد بوده است.

خردکننده فولادی تا اندازه حدود 5 مش خردایش شده و سپس توسط آسیاب تنگستن کاربرد به مدت 2 دقیقه تا اندازه حدود 200 مش پودر شدند. پس از پودر کردن هر نمونه، ماسه‌های کوارتزی آسیاب شد تا میزان آلودگی به حداقل برسد. در مرحله بعد، میزان 20 گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال و تجزیه شد. مقدار LOI نمونه‌ها با نگهداری پودر سنگ‌ها در



شکل 1. A: موقعیت منطقه گلستان‌آباد بر روی پهنه‌های ساختاری ایران با کمی تغییرات از نضافتی (2006، Nezfati) و B: نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده ذخایر اکسید آهن-آپاتیت زنجان که موقعیت ذخایر سرخه‌دیج، علی‌آباد، مروارید 1، مروارید 2، ذاکر 1، ذاکر 2، گلستان‌آباد، زرنان و چوره‌ناب بر روی آن مشخص شده است، با کمی تغییرات از نباتیان و قادری (2013، Nabatian and Ghaderi). کادر مربعی روی شکل، موقعیت محدوده کانه‌زایی گلستان‌آباد را نشان می‌دهد.

Fig. 1. A: Location of the Golestan Abad area on the Iranian geo-structural zones (after Nezfati, 2006), and B: Simplified geological map of the Zanjan iron oxide-apatite deposits, showing Sorkheh-Dizaj, Aliabad, Morvarid 1, Morvarid 2, Zaker 1, Zaker 2, Golestan Abad, Zarnan and Chohrehnab deposits (after Nabatian and Ghaderi, 2013). The squar box on the map shows the location of the Golestan Abad deposit.

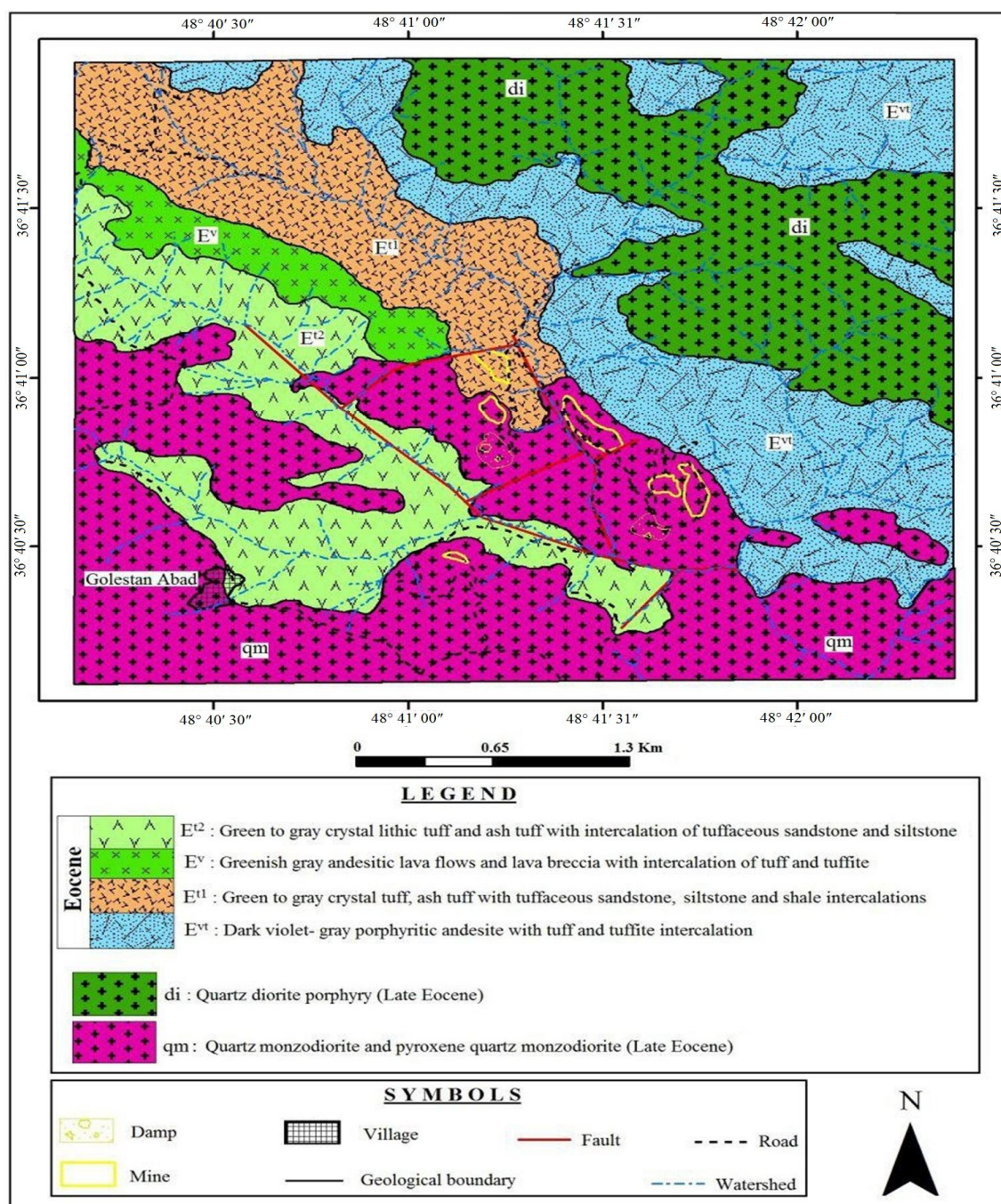
مرکزی تا جنوب‌باختری آن به خود اختصاص می‌دهد. بر اساس نقشه زمین‌شناسی 1:5000 تهیه‌شده از منطقه (شکل 2)، واحدهای سنگی موجود در منطقه مورد بررسی، عبارت از

زمین‌شناسی

کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد بخشی از نقشه زمین‌شناسی 1:100000 طارم (1997، Amini) را در بخش‌های

(qm) و کوارتز دیوریت پورفیری (di) است. ویژگی‌های واحدهای سنگی مزبور در ادامه شرح داده شده است.

واحدهای آتشفشانی-رسوبی مربوط به زیرعضو آمند سازند کرج (E^{v1} , E^{t1} , E^{v2} و E^{t2}) به همراه دو توده نفوذی با ترکیب کلی کوارتز مونزودیوریت و پیروکسن کوارتز مونزودیوریت

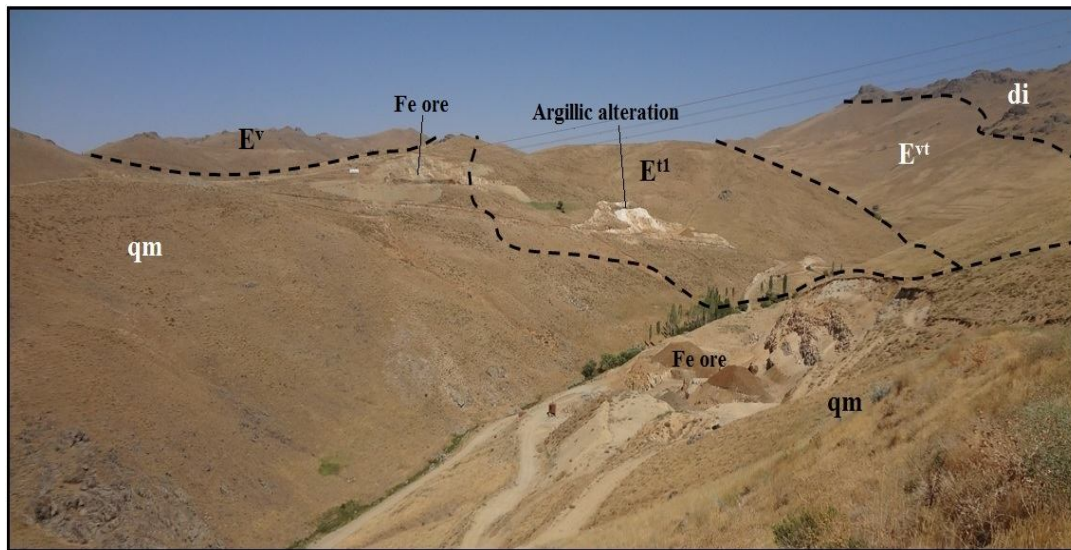


شکل 2. نقشه زمین‌شناسی مقیاس 1:5000 تهیه‌شده از منطقه گلستان‌آباد

Fig. 2. Geological map of the Golestan Abad area in 1: 5000 scale

شمال‌باختر کانسار گلستان‌آباد رخنمون دارد. در برخی نقاط، آثار کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در این واحد قابل مشاهده است. این واحد سنگی به سمت بالا توسط واحد گدازه‌ای E^V به صورت هم‌شیب پوشیده شده است. واحد E^V عبارت از گدازه‌های اسیدی تا حدواسط با ترکیب داسیتی تا آندزیتی به رنگ روشن است که در شمال‌باختر کانسار گلستان‌آباد رخنمون دارد. این واحد سنگی به سمت بالا توسط واحد توفی E^{t2} به صورت هم‌شیب پوشیده شده است.

واحد E^{vt} عبارت از تناوب لایه‌های توفی (شامل توف بلورین، توف سنگی-بلورین، توف ماسه‌ای، ماسه‌سنگ توفی و ماسه‌سنگ) و گدازه‌هایی با ترکیب غالب آندزیتی هستند. روند عمومی این واحد، شمال‌باختر-جنوب‌خاور بوده و در بخش‌های شمال‌خاوری و شمال منطقه مورد بررسی و کانسار گلستان‌آباد رخنمون دارد. این واحد سنگی به سمت بالا توسط واحد توفی E^{t1} به صورت هم‌شیب پوشیده شده است (شکل 3). واحد E^{t1} عبارت از لایه‌های توفی شامل توف سنگی-بلورین، توف سنگی، توف برش و لاپیلی توف است که در شمال و



شکل 3. نمایی از توده‌های نفوذی کوارتز مونزودیوریتی-پيروکسن کوارتز مونزودیوریتی (qm) و کوارتز دیوریت پورفیری (di) در منطقه گلستان‌آباد که به داخل توالی آتشفشانی-رسوبی ائوسن (واحد‌های E^{vt} ، E^{t1} و E^V) نفوذ کرده‌اند (دید به سمت شمال‌باختر). دگرسانی آرژیلیکی در داخل واحد E^{t1} و کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در داخل توده نفوذی qm قابل مشاهده است.

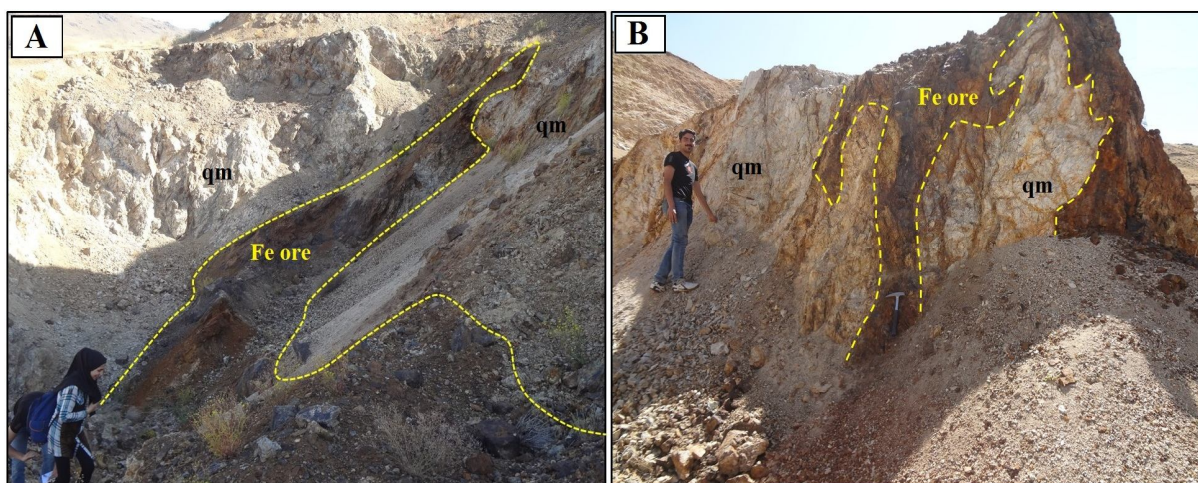
Fig. 3. View from the quartz monzodioritic-pyroxene quartz monzodioritic (qm) and porphyritic quartz diorite (di) intrusions in the Golestan Abad area which are intruded within the Eocene volcano-sedimentary sequence (E^{vt} , E^{t1} and E^V units) (view to the northwest). Argillic alteration and iron oxide-apatite mineralization occur within the E^{t1} unit and qm intrusion.

و کوارتز مونزودیوریت و پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی (qm) مورد هجوم قرار گرفته و در مرز تماس آنها، آثار دگرسانی گرمایی به صورت آرژیلیکی شدن و گاه سیلیسی شدن قابل مشاهده است (شکل 3).

واحد E^{t2} عبارت از تناوب لایه‌های توفی (توف بلورین و خاکستر توف با ترکیب اسیدی تا حدواسط)، توف ماسه‌ای و ماسه‌سنگ است که در بخش‌های باختری و شمال‌باختر منطقه مورد بررسی و شمال روستای گلستان‌آباد رخنمون دارد. این واحدهای توفی توسط توده‌های کوارتز دیوریت پورفیری (di)

طارم (Amini, 1997)، این سنگ‌ها دارای ترکیب کوارتز مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت، کوارتز سینیت و گرانیت هستند. توده کوارتز دیوریت پورفیری (di) با یک روند شمال‌باختر - جنوب‌خاور در بخش شمال‌خاوری منطقه مورد بررسی رخنمون دارد (شکل 2). سنگ‌های این توده دارای رنگ خاکستری تا خاکستری تیره بوده و دارای بافت پورفیری هستند. بر اساس مشاهدات صحرائی، این سنگ‌ها را می‌توان دیوریت پورفیری نام‌گذاری کرد؛ در حالی که در نقشه 1:100000 طارم (Amini, 1997)، این توده دارای ترکیب میکروکوارتز دیوریت پورفیری تا میکرودیوریت پورفیری معرفی شده‌اند.

توده نفوذی کوارتز مونزودیوریتی و پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی (qm) در بخش‌های جنوبی و باختری منطقه مورد بررسی رخنمون داشته و میزبان بخش عمده کانه‌زایی منطقه است (شکل A-4). در مجاورت با کانه‌زایی آهن، این سنگ‌ها متحمل دگرسانی‌های آرژلیک، پروپلیتیک و سیلیسی شده‌اند (شکل B-4). سنگ‌های این توده در سطوح تازه شکست دارای رنگ خاکستری مایل به سبز تا صورتی بوده و دارای بافت میکروگرانولار تا پورفیری در مقیاس نمونه دستی هستند. در برخی نقاط، آنکلاوهای مافیک میکروگرانولار در داخل این توده مشاهده می‌شود. بر اساس نقشه زمین‌شناسی 1:100000



شکل 4. A: نمایی از کانه‌زایی آهن (Fe ore) در داخل توده کوارتز مونزودیوریت-پیروکسن کوارتز مونزودیوریت (qm) در منطقه گلستان‌آباد (دید به سمت شمال) و B: توده کوارتز مونزودیوریتی-پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی دگرسان‌شده در اطراف رگه‌های کانه‌زایی آهن (Fe ore) در منطقه گلستان‌آباد (دید به سمت جنوب‌خاور)

Fig. 4. A: View from the Fe mineralization (Fe ore) within the quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite intrusion (qm) in the Golestan Abad area (view to the north), and B: Altered quartz monzodioritic-pyroxene quartz monzodioritic intrusion around the Fe mineralization veins (Fe ore) in the Golestan Abad area (view to the southeast)

به‌عنوان کانی‌های ثانویه حضور دارند. آپاتیت، اسفن و کانی‌های کدر نیز به‌عنوان کانی‌های کمیاب مشاهده می‌شوند. پلاژیوکلاز با ابعاد حداکثر 5 میلی‌متر، درشت‌بلور اصلی این سنگ‌هاست که به‌صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار حضور دارد. برخی بلورهای پلاژیوکلاز حاوی منطقه‌بندی بوده و گاه بافت غربالی نشان می‌دهند (شکل A-5). ادخال‌هایی از

سنگ‌نگاری

پیروکسن کوارتز مونزودیوریت پورفیری

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت‌های پورفیری، فلسوفیری و پوئی‌کلیتیک بوده و متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، کلینوپیکروکسن، هورنبلند و فلدسپات آلکالن هستند. اکتینولیت، کلسیت، اپیدوت و کلریت

میلی‌متر نیز می‌رسد. برخی از بلورهای پلاژیوکلاز حاوی منطقه‌بندی بوده و گاه بافت غربالی نشان می‌دهند. دگرسانی به سرسیت در برخی از بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود. آمفیبول به دو صورت در این سنگ‌ها حضور دارد. گروه اول شامل بلورهای شکل دار تا نیمه‌شکل دار از نوع هورنبلند است (شکل F-5). ابعاد بلورهای درشت هورنبلند تا 3 میلی‌متر می‌رسد. گروه دوم، اکتینولیت‌های حاصل از دگرسانی بلورهای کلینوپیروکسن هستند. بیوتیت به صورت بلورهای ورقه‌ای در برخی نقاط قابل مشاهده است که اغلب توسط اپیدوت و کلریت جانشین شده است. کلینوپیروکسن در برخی نمونه‌ها به صورت بلورهای شکل دار تا نیمه‌شکل دار با فراوانی محدود حضور دارد. بلورهای کلینوپیروکسن اغلب با درجات شدید به اکتینولیت و کلریت دگرسان شده‌اند. فلدسپات آلکالن و کوارتز به صورت بلورهای بی‌شکل و ریز در زمینه سنگ حضور دارند.

توف بلورین و سنگی - بلورین

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، توف‌های بلورین دارای بافت پورفیرو کلاستیک بوده و متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک جانشین شده توسط اپیدوت، کلسیت و کوارتز هستند (شکل G-5). پلاژیوکلاز کانی اصلی این سنگ‌هاست که به صورت بلورهای نیمه‌شکل دار با گوشه‌های تیز و شکسته شده قابل مشاهده است. ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز کمتر از یک میلی‌متر است. برخی بلورهای درشت پلاژیوکلاز، دگرسانی به اپیدوت را نشان می‌دهند. کانی‌های مافیک اولیه سنگ به طور کامل توسط اپیدوت جانشین شده‌اند؛ ولی با توجه به شکل بلوری منشوری و مستطیلی، احتمالاً از نوع آمفیبول و بیوتیت بوده‌اند (شکل G-5). همچنین، رگچه‌هایی از اپیدوت نیز در برخی نقاط قابل مشاهده است. کوارتز هم به صورت اولیه و درشت‌بلور در متن سنگ پراکنده است و هم در نتیجه دگرسانی و عملکرد سیالات گرمابی به عنوان کانی ثانویه در این سنگ‌ها تشکیل شده است. مقدار کمی قطعات سنگی با بافت پورفیری در برخی نمونه‌ها قابل مشاهده است. در

پیروکسن در داخل برخی بلورهای درشت پلاژیوکلاز وجود دارد. کلینوپیروکسن دیگر درشت‌بلور اصلی این سنگ‌هاست که به صورت بلورهای شکل دار تا نیمه‌شکل دار حضور دارند (شکل B-5). این کانی با درجات مختلفی به اکتینولیت و کلریت دگرسان شده است. در برخی نقاط، بلورهایی دیده می‌شود که بخش مرکزی آنها توسط کلریت جایگزین شده است؛ در حالی که بخش حاشیه بلور سالم است (شکل B-5). ابعاد بلورهای درشت کلینوپیروکسن تا 2/5 میلی‌متر می‌رسد. در برخی از نمونه‌ها، تجمعانی از بلورهای درشت کلینوپیروکسن در همراهی با کانی‌های کدر ریز بلور و بی‌شکل مشاهده می‌شود (شکل C-5) که می‌تواند نشان‌دهنده جدایش کومولایی آنها از ماگمای در حال تبلور باشد. دگرسانی کانی‌های مافیک به اپیدوت در برخی نمونه‌های مجاور با کانه‌زایی آهن مشاهده می‌شود. آمفیبول به دو صورت در این سنگ‌ها حضور دارد. گروه اول عبارت از درشت‌بلورهای هورنبلند شکل دار تا نیمه‌شکل دار است (شکل D-5) که در همراهی با پیروکسن و پلاژیوکلاز مشاهده می‌شوند. ابعاد بلورهای هورنبلند تا 2 میلی‌متر می‌رسد. گروه دوم عبارت از آمفیبول‌های ثانویه (اکتینولیت) حاصل از دگرسانی درشت‌بلورهای پیروکسن هستند. کوارتز و فلدسپات آلکالن به صورت بلورهای ریز و بی‌شکل، در زمینه سنگ حضور دارند.

کوارتز مونوزودیوریت پورفیری

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، این سنگ‌ها دارای بافت‌های پورفیری و فلسوفیری و گاه میکروگرانولار بوده و از کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند، فلدسپات آلکالن و بیوتیت تشکیل شده‌اند. کلینوپیروکسن، زیرکن، آپاتیت و کانی‌های کدر به عنوان کانی‌های فرعی و سرسیت، اپیدوت، اکتینولیت، کلریت و کلسیت به عنوان کانی‌های ثانویه در این سنگ‌ها حضور دارند. پلاژیوکلاز درشت‌بلور اصلی این سنگ‌هاست که به صورت بلورهای شکل دار تا نیمه‌شکل دار حضور دارد (شکل E-5). ابعاد درشت‌بلورهای این کانی تا 4

(شکل 6-C). در نمودار SiO_2 در مقابل A/CNK (Chappell and White, 1992) نمونه‌های پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی در قلمرو گرانیتوئیدهای نوع I متاآلومینوس و نمونه کوارتز مونوزودیوریت در قلمرو نسبتاً پرآلومینوس واقع می‌شوند (شکل 6-D). برای تمایز گرانیتوئیدهای نوع I و A از نمودار SiO_2 در مقابل Zr (Collins et al., 1982) استفاده شد. در این نمودار تمامی نمونه‌های مورد بررسی در قلمرو نوع I واقع می‌شوند (شکل 6-E). در نمودار SiO_2 در مقابل P_2O_5 روند کاهشی P_2O_5 در نمونه‌های مورد بررسی قابل مشاهده است (شکل 6-F). این روند کاهشی ویژگی گرانیت‌های نوع I محسوب می‌شود (Chappell and White, 1992). به دلیل تبلور آپاتیت در گرانیت‌های نوع I، فسفر به عنوان عنصر سازگار عمل می‌کند و با ادامه تفریق، از مقدار آن کاسته می‌شود؛ در حالی که در گرانیت‌های نوع S، به دلیل عدم تبلور آپاتیت، فسفر به عنوان عنصر ناسازگار عمل می‌کند و غلظت آن در مذاب افزایش می‌یابد (Chappell and White, 1992; Wu et al., 2003; Li et al., 2007). از نظر کانی‌شناسی نیز در توده گرانیتوئیدی منطقه مورد بررسی، کانی‌هایی نظیر پیروکسن، هورنبلند و بیوتیت دارای فراوانی قابل توجهی هستند؛ در حالی که مسکویت، کوردیریت، گارنت، آندالوزیت و سیلیمانیت دیده نمی‌شوند. علاوه بر این، ویژگی متاآلومین نمونه‌های مورد بررسی و همچنین نبود کزنودوم در نورم این نمونه‌ها، شواهد دیگری مبنی بر نوع I توده گرانیتوئیدی گلستان آباد هستند.

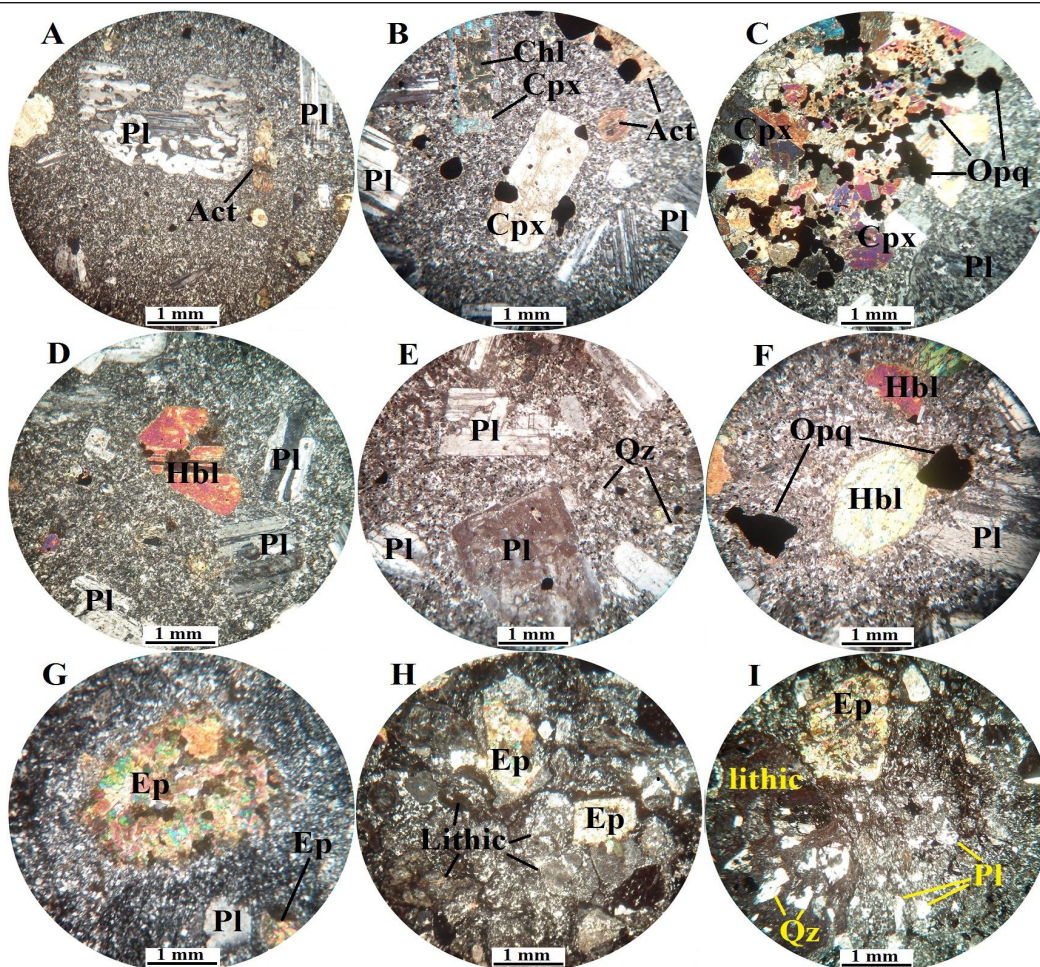
در نمودار عنکبوتی به‌هنجارشده نسبت به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)، همه نمونه‌ها الگوی شبیه به هم حاوی غنی‌شدگی مشخص از عناصر LILE (Rb, Ba), (Cs, U, Th, Ta, Nb) HFSE همراه با آتومالی منفی عناصر (Ti) را نشان می‌دهند (شکل 7-A). چنین الگوی در دیگر توده‌های گرانیتوئیدی منطقه طارم مشاهده شده است (Nabatiyan et al., 2014b).

نمونه‌های نزدیک به توده نفوذی و کانه‌زایی‌های آهن، سیلیسی شدن به صورت گسترده‌ای در این سنگ‌ها رخ داده و رگچه‌های کوارتز، اپیدوت، اکتینولیت و کلریت تشکیل شده است. توف‌های سنگی-بلورین دارای بافت پورفیرو کلاستیک بوده و اغلب متشکل از قطعات سنگی در ابعاد و شکل‌هایی مختلف هستند (شکل 5-H). بلورهای از جنس پلاژیوکلاز و کانی‌های جانشین شده توسط اپیدوت نیز در این سنگ‌ها حضور دارند (شکل 5-I). در زمینه قطعات سنگی و بلورهای یادشده، کانی‌های کدر قابل مشاهده هستند. قطعات سنگی دارای بافت‌های پورفیری و گاه با زمینه جریان‌ی است که نشان می‌دهد این قطعات از سنگ‌های آتشفشانی منشأ گرفته‌اند. در برخی قطعات سنگی، دگرسانی به اپیدوت قابل مشاهده است. ابعاد قطعات سنگی تا 5 میلی‌متر می‌رسد. درشت‌بلورهای موجود در قطعات سنگی اغلب از نوع پلاژیوکلاز بوده و گاه بلورهای کوارتز نیز مشاهده می‌شود.

زمین‌شیمی

برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد 6 نمونه از توده‌های گرانیتوئیدی بر اساس حداقل دگرسانی برای تجزیه سنگ کل به روش‌های دستگاهی XRF و ICP-MS در شرکت زرآزما در تهران تجزیه شد. نتایج تجزیه‌های شیمیایی مزبور در جدول 1 آمده است.

در نمودار SiO_2 در مقابل $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (Middlemost, 1985)، تمامی نمونه‌های مربوط به منطقه گلستان آباد در محدوده کوارتز مونوزودیوریت قرار می‌گیرند (شکل 6-A). برای تعیین سری ماگمایی توده گرانیتوئیدی گلستان آباد از نمودار عناصر کمیاب Co در مقابل Th (Hastie et al., 2007) استفاده شد که همه نمونه‌ها در محدوده کالک‌آلکان پتاسیم بالا قرار می‌گیرند (شکل 6-B). بر اساس نمودار A/CNK در مقابل A/NK (Shand, 1943)، تمامی نمونه‌های پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی در قلمرو متاآلومینوس و نمونه کوارتز مونوزودیوریتی در قلمرو پرآلومینوس قرار می‌گیرند



شکل 5. تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از توده‌های گرانیتوئیدی و واحدهای آذرآواری منطقه گلستان‌آباد. A: بافت پورفیری در پیروکسن کوارتز مونزودیوریت پورفیری به همراه بافت غربالی در پلاژیوکلاز، B: بافت پورفیری در پیروکسن کوارتز مونزودیوریت پورفیری و کلینوپیروکسن دگرسان‌شده به کلریت از بخش مرکزی، C: تجمع بلورهای کلینوپیروکسن و کانی‌های کدر به حالت تجمعی در پیروکسن کوارتز مونزودیوریت پورفیری، D: بافت پورفیری حاوی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و هورنبلند در پیروکسن کوارتز مونزودیوریت، E: درشت‌بلورهای شکل‌دار پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز در کوارتز مونزودیوریت پورفیری، F: بلورهای درشت پلاژیوکلاز و هورنبلند در زمینه دانه‌ریز در کوارتز مونزودیوریت پورفیری، G: درشت‌بلور کانی مافیک جانشین‌شده توسط اپیدوت در توف‌های بلورین، H: قطعات سنگی به همراه کانی‌های مافیک جانشین‌شده توسط اپیدوت در توف‌های سنگی - بلورین و I: قطعه سنگی به همراه بلورهای پلاژیوکلاز و کانی مافیک جانشین‌شده توسط اپیدوت در توف‌های سنگی - بلورین. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Act: اکتینولیت، Chl: کلریت، Cpx: کلینوپیروکسن، Ep: اپیدوت، Hbl: هورنبلند، Lithic: قطعه سنگ، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز)

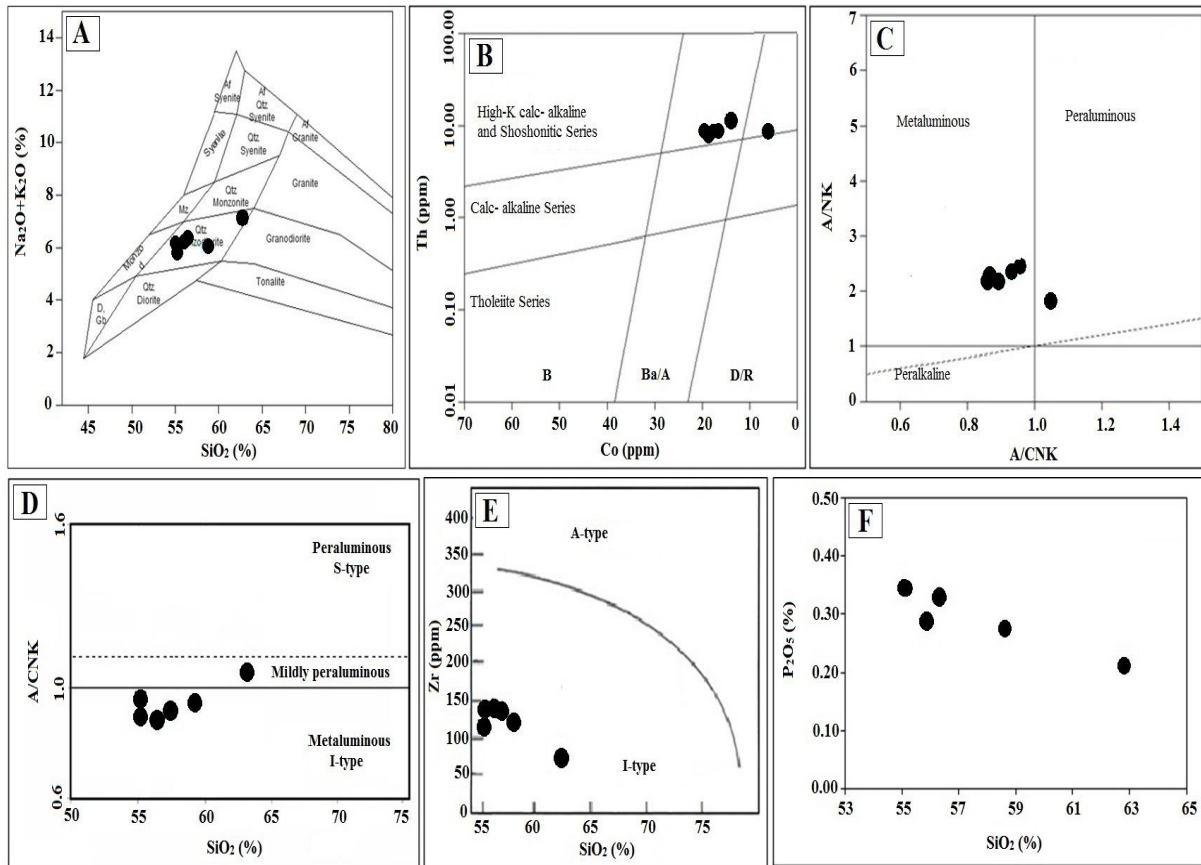
Fig. 5. Photomicrographs (transmitted light, XPL) of granitoid intrusions and volcano-sedimentary rocks in the Golestan Abad area. A: Prophyritic texture along with sieve texture within plagioclase in pyroxene quartz monzodiorite, B: Prophyritic texture and chloritized clinopyroxene from center in pyroxene quartz monzodiorite, C: Accumulation of clinopyroxene and opaque minerals in phorphyritic pyroxene quartz monzodiorite, D: Prophyritic texture in pyroxene quartz monzodiorites containing plagioclase and hornblende phenocrysts, E: Plagioclase phenocrysts within the fine-grained groundmass in phorphyritic quartz monzodiorites, F: Plagioclase and hornblende phenocrysts within the fine-grained groundmass in phorphyritic quartz monzodiorites, G: Mafic mineral replaced by epidote in crystal tuffs, H: Rock fragments along with completely epidotized mafic minerals in crystal lithic tuffs, and I: Rock fragments along with plagioclase and epidotized mafic minerals in crystal lithic tuffs. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Act: actinolite, Chl: chlorite, Cpx: clinopyroxene, Ep: epidote, Hbl: hornblende, Lithic: rock fragment, Opq: opaque mineral, Pl: plagioclase, Qz: quartz)

جدول 1. نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های توده گرانیتوئیدی در منطقه گلستان‌آباد. عناصر اصلی برحسب درصد وزنی (wt.%) و عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برحسب گرم در تن (ppm) هستند.

Table 1. Geochemical data of major, trace and rare earth elements for granitoid samples of the Golestan Abad area. Major elements are in wt.% and trace and rare earth elements in ppm.

S.N.	DL	G2		G3		G4		G6		G9		G10	
		R. type	Px	Qz Mzd	Px	Qz Mzd	Px	Qz Mzd	Px	Qz Mzd	Px	Qz Mzd	Qz Mzd
SiO ₂	0.1		55.12		55.09		56.29		55.83		58.6		62.77
TiO ₂	0.1		0.9		0.89		0.86		0.85		0.85		0.6
Al ₂ O ₃	0.1		18.48		18.68		18.62		18.48		19.07		16.93
Fe ₂ O ₃	0.1		8.1		7.45		6.97		7.12		3.9		5.68
MnO	0.1		0.19		0.17		0.14		0.17		0.11		0.05
MgO	0.1		3.03		2.88		2.63		2.7		2.8		1.71
CaO	0.1		6.44		7.25		6.74		7.13		6.76		3.58
Na ₂ O	0.1		2.5		2.99		3.16		3.05		3.03		3.31
K ₂ O	0.1		3.18		3.15		3.16		3.2		2.99		3.76
P ₂ O ₅	0.1		0.34		0.34		0.33		0.29		0.27		0.22
LOI	0.1		1.62		0.98		0.93		1.02		1.41		1.2
Total	----		100		100.01		99.99		99.98		99.94		99.93
As	0.1		11.9		10.5		9.2		8.3		6.5		7.3
Cs	1		1.9		1.9		2.6		1.7		2.1		1.3
Ba	1		903		799		791		821		963		1344
Rb	0.05		64		66		74		63		56		71
Sr	0.02		559.8		557.8		566		568.9		601.8		768.1
Y	0.5		24.4		25.7		24.8		25.2		24.6		16.7
Zr	5		111		144		140		145		123		92
Hf	0.05		3.13		3.55		3.44		3.38		2.99		2.77
Nb	0.1		12.8		15.4		13.7		10.3		12.7		13.2
Ta	1		0.78		1.02		0.97		0.73		0.8		0.85
Pb	1		14		13		9		12		7		6
Th	0.1		8.48		8.7		8.24		8.54		8.85		11.26
U	0.1		1.92		1.8		1.8		1.9		1.8		2.1
Sc	1		20.9		21.5		20.8		20.7		19.2		9.5
V	1		152		157		146		146		117		92
Cr	1		31		30		30		28		24		25
Co	0.5		16.8		19.5		18.1		18.1		6.2		13.9
Ni	0.5		26		16		13		11		10		13
Cu	0.5		107		84		72		73		431		79
Zn	1		76		111		79		103		40		48
La	0.5		24		26		25		25		25		28
Ce	0.1		52		56		55		56		55		56
Pr	1		6.49		6.59		6.18		6.25		6.12		6.21
Nd	1		26.6		26.7		25.6		25.4		25.1		23.5
Sm	0.5		5.57		5.54		5.29		5.34		5.22		4.34
Eu	0.05		1.55		1.47		1.42		1.45		1.34		1.14
Gd	0.1		4.83		4.82		4.56		4.65		4.47		3.24
Tb	0.1		0.75		0.75		0.72		0.72		0.7		0.52
Dy	1		5.13		5.2		4.86		4.84		4.88		3.18
Er	0.02		2.83		2.92		2.73		2.68		2.65		1.72
Tm	0.1		0.41		0.43		0.41		0.4		0.39		0.27
Yb	0.05		3		3.4		3.2		3.2		2.8		1.9
Lu	1		0.38		0.39		0.36		0.38		0.33		0.24

Px Qz Mzd: pyroxene quartz monzodiorite; Qz Mz: quartz monzodiorite



شکل 6. موقعیت نمونه‌های منطقه گلستان‌آباد بر روی: A: نمودار SiO₂ در مقابل Na₂O+K₂O (Middlemost, 1985)؛ B: نمودار Co در مقابل Th (Hastie et al., 2007)؛ C: نمودار A/NK در مقابل A/CNK (Shand, 1943)؛ D: نمودار SiO₂ در مقابل A/CNK (Chappell and White, 1992)؛ E: نمودار SiO₂ در مقابل Zr (Collins et al., 1982) و F: روند کاهشی P₂O₅ در مقابل SiO₂.

Fig. 6. Location of samples from the Golestan Abad area on the: A: SiO₂ vs. Na₂O+K₂O diagram (Middlemost, 1985), B: Co vs. Th diagram (Hastie et al., 2007), C: A/NK vs. A/CNK diagram (Shand, 1943), D: SiO₂ vs. A/CNK diagram (Chappell and White, 1992), E: SiO₂ vs. Zr diagram (Collins et al., 1982), and F: Decreasing trend of P₂O₅ vs. SiO₂.

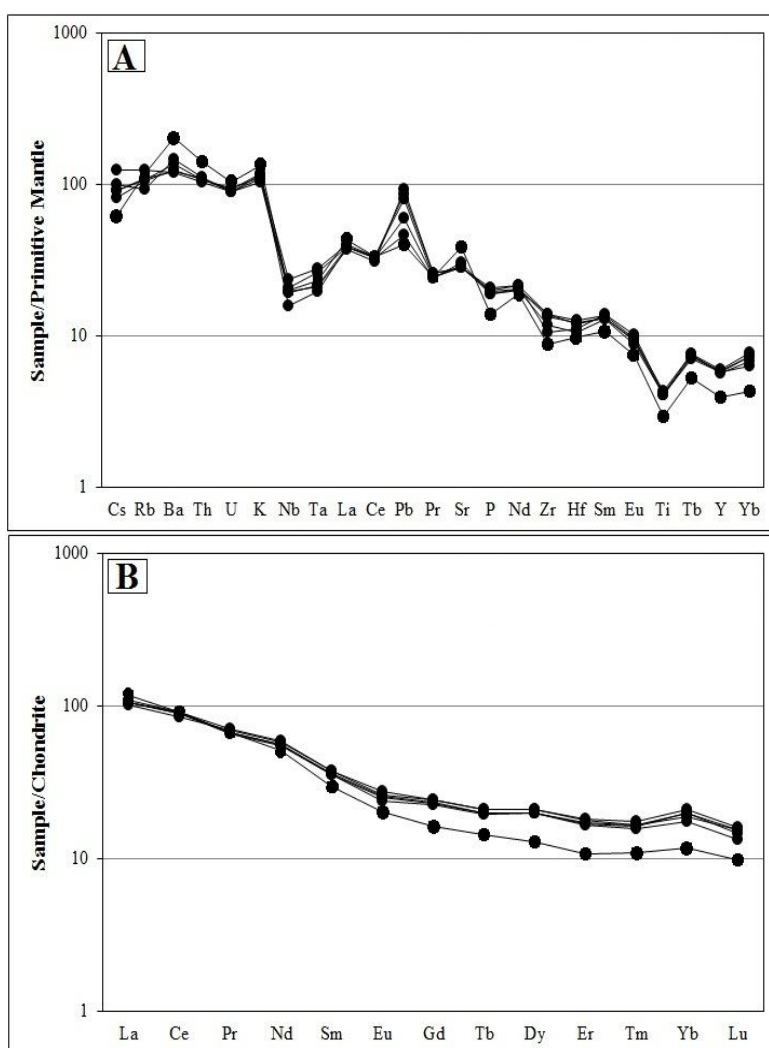
منفی Ti و Nb به عوامل گوناگونی مانند ماگماتیسم مرتبط با فرایند فرورانش (Aldanmaz et al., 2002) و شرکت پوسته در فرایندهای ماگمایی (Kuster and Harms, 1998) نسبت داده می‌شود.

در الگوی عناصر کمیاب خاکی به‌هنجارشده به کندریت (McDonough and Sun, 1995)، الگوی مشابه در همه نمونه‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود (شکل 7-B). نمونه‌های مورد بررسی الگویی غنی از عناصر LREE نسبت به HREE را با نسبت بالای LREE/HREE و آنومالی منفی بسیار ضعیف

ویژگی بارز نمودار عنکبوتی، آنومالی مثبت Pb در همه نمونه‌هاست که می‌تواند نشان‌دهنده از تأثیر مواد پوسته قاره‌ای در تکوین ماگمای مولد سنگ‌های منطقه باشد (Kamber et al., 2002). همراه بودن آنومالی مثبت Pb و آنومالی منفی Nb و Ta نشانه ماگماهای کمان‌های آتشفشانی و ماگماهای متأثر از مواد پوسته قاره‌ای است (Hofmann, 1988). به اعتقاد کاستر و هارمز (Kuster and Harms, 1998)، غنی‌شدگی از LILE و LREE نشان‌دهنده نقش سیالات آزادشده از لیتوسفر فرورانده در غنی‌سازی این عناصر در ماگماست. بی‌هنجاری‌های

Eu نشان می‌دهند (شکل B-7). نمونه کوارتز مونزودیوریتی، الگویی نسبتاً غنی‌شده‌تر در La، تهی‌شده‌تر از MREE و HREE را در مقایسه با نمونه‌های پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی به‌نمایش می‌گذارد (شکل B-7). غنی‌شدگی بالای عناصر کمیاب خاکی سبک می‌تواند ناشی از درجه پایین ذوب‌بخشی و پایین‌بودن عناصر کمیاب خاکی سنگین در ارتباط با حضور گارنت در ناحیه ذوب باشد (Wilson, 1989;).

Eu نشان می‌دهند (شکل B-7). نمونه کوارتز مونزودیوریتی، الگویی نسبتاً غنی‌شده‌تر در La، تهی‌شده‌تر از MREE و HREE را در مقایسه با نمونه‌های پیروکسن کوارتز مونزودیوریتی به‌نمایش می‌گذارد (شکل B-7). غنی‌شدگی بالای عناصر کمیاب خاکی سبک می‌تواند ناشی از درجه پایین ذوب‌بخشی و پایین‌بودن عناصر کمیاب خاکی سنگین در ارتباط با حضور گارنت در ناحیه ذوب باشد (Wilson, 1989;).



شکل 7. A: الگوی عناصر کمیاب به‌هنجارشده به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) برای توده گرانیتوئیدی گلستان‌آباد و B: الگوی عناصر کمیاب به‌هنجارشده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای توده گرانیتوئیدی گلستان‌آباد

Fig. 7. A: Primitive mantle-normalized (McDonough and Sun, 1995) trace element patterns for the Golestan Abad granitoid, and B: Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE patterns for the Golestan Abad granitoid

داریستی) در داخل توده نفوذی پیروکسن کوارتز مونزودیدوریتی و کوارتز مونزودیدوریتی و به مقدار کم، در داخل سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی ائوسن مجاور توده نفوذی متمرکز شده است (شکل‌های A-9، B و C). شکل کانه‌زایی داریستی اغلب مربوط به کمربند رگه‌های اصلی کانه‌زایی است. ضخامت پهنه استوک‌ورکی اغلب کمتر از یک متر است. طول رخنمون رگه‌ها و عدسی‌های کانه‌زایی تا 300 متر می‌رسد؛ درحالی‌که ضخامت آنها کمتر از 20 متر است. این کانه‌زایی‌ها روند عمومی شمال‌باختر-جنوب‌خاور نشان می‌دهند. کانه اصلی در این کانه‌زایی عبارت از مگنتیت است که با مقادیر متغیری از بلورهای آپاتیت، اکتینولیت و کانی‌های سولفیدی (اغلب از نوع پیریت) همراهی می‌شود.

بلورهای آپاتیت و اکتینولیت هم به صورت هم‌رشد با مگنتیت حضور داشته (شکل A-10 و B) و هم به صورت رگه‌ای، کانه‌زایی مگنتیت را قطع می‌کنند (شکل C-10). کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت اغلب توسط ساختارهای گسلی کنترل می‌شود. گسل‌های بعد از کانه‌زایی موجب جابه‌جایی رگه‌ها و عدسی‌های کانه‌زایی و همچنین شکستگی بلورهای آپاتیت در مقیاس نمونه دستی شده است (شکل D-10).

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی انجام شده، دگرسانی‌های گرمایی موجود در اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد شامل سیلیسی، کلسیمی (اکتینولیتی‌شدن)، آرژیلیکی و پروپیلیتی است. دگرسانی سیلیسی در منطقه مورد بررسی به صورت سیلیسی شدن سنگ میزبان آتشفشانی-رسوبی و رگه-رگچه‌های سیلیسی تأخیری قطع‌کننده مراحل قبلی کانه‌زایی مشاهده می‌شود.

کانه‌نگاری و ساخت و بافت کانسنگ

بر اساس بررسی‌های کانه‌نگاری، کانه‌های موجود در کانسار گلستان‌آباد شامل مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت به همراه کانی‌های باطله آپاتیت، اکتینولیت، کلینوپروکسن، کوارتز و کلسیت هستند. هماتیت، کوولیت، گوتیت و ژپس در نتیجه

به‌طور کلی می‌توان گفت که ماگمای اولیه سنگ‌های مورد بررسی در محیطی فرورانشی و از یک گوشته متاسوماتیسم شده به وجود آمده و در ادامه، با مواد پوسته‌ای آلاینش یافته است. از شواهد آلاینش پوسته‌ای یا مشارکت پوسته و مواد پوسته‌ای در تشکیل این سنگ‌ها می‌توان به بی‌هنجاری مثبت Pb اشاره کرد.

محیط زمین‌ساختی

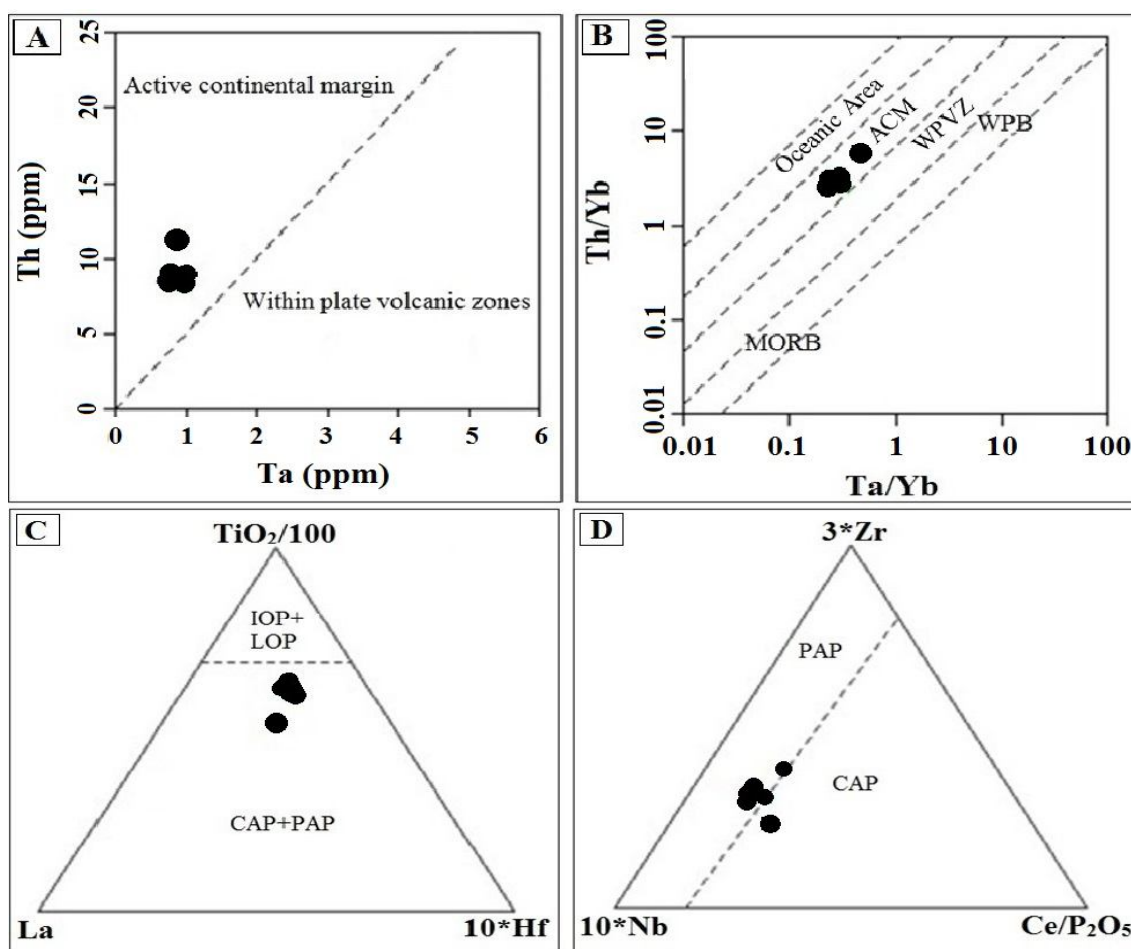
در نمودار Th در مقابل Ta (Schandl and Gorton, 2002)، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده سنگ‌های آذرین حاشیه فعال قاره‌ای واقع می‌شوند (شکل A-8). در دو نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Schandle and Gorton, 2002) نیز نمونه‌های مورد بررسی در محدوده سنگ‌های آذرین حاشیه فعال قاره‌ای واقع می‌شوند (شکل B-8). با توجه به اینکه در نمودارهای شندل و گورتن (Schandle and Gorton, 2002)، همه نمونه‌ها در قلمرو مرتبط با کمان ماگمایی قاره‌ای قرار می‌گیرند، بر این اساس برای تفکیک نوع کمان از نمودارهای مثالی ارائه شده توسط مولر و گروز (Muller and Groves, 1997) استفاده شد. در نمودار سه‌تایی La-TiO₂-Hf (Muller and Groves, 1997)، قلمرو مربوط به کمان‌های قاره‌ای و اقیانوسی از هم تفکیک شده است. در این نمودار، تمامی نمونه‌ها در محدوده کمان‌های قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل C-8). برای تمایز کمان‌های ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای و کمان‌های ماگمایی بعد از برخورد، نمودار سه‌تایی Nb-Zr-Ce/P₂O₅ (Muller and Groves, 1997) مورد استفاده قرار گرفت. بر روی این نمودار، نمونه‌های پیروکسن کوارتز مونزودیدوریت در محدوده کمان بعد از برخورد و نمونه کوارتز مونزودیدوریت در محدوده کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرند (شکل D-8).

کانی‌سازی

کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در کانسار گلستان‌آباد به صورت عدسی‌ها، رگه-رگچه‌های اکسید آهن-آپاتیت (گاه به شکل

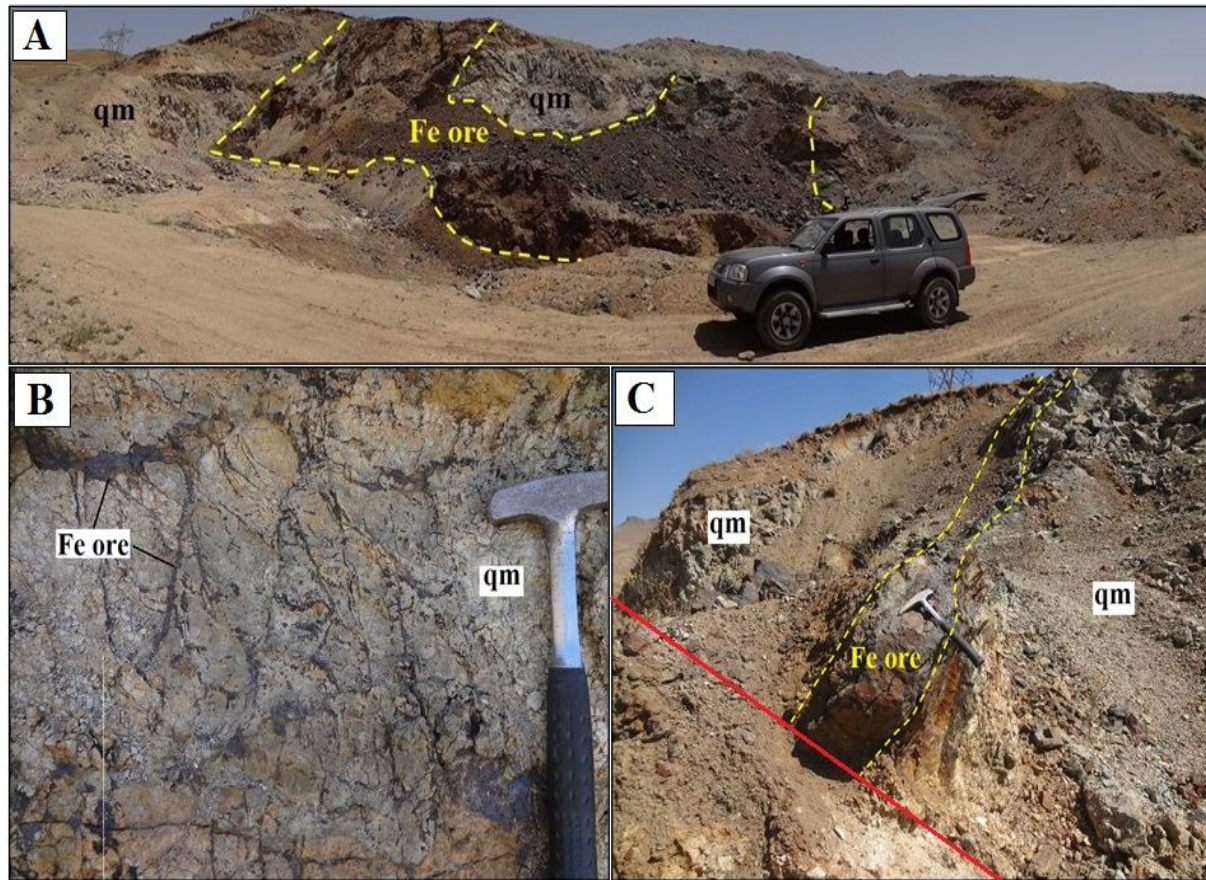
با آپاتیت و پیروکسن‌های اکتینولیتی شده مشاهده می‌شود (شکل A-11). براساس شواهد میکروسکوپی و صحرایی می‌توان دو نسل مگنتیت را شناسایی کرد: 1- مگنتیت نسل اول به صورت پرکننده فضای بین آپاتیت و اکتینولیت است و 2- مگنتیت نسل دوم در همراهی با رگه‌های اکتینولیت-آپاتیت تأخیری به مقدار کم در بین بلورهای آپاتیت و اکتینولیت تشکیل شده است (شکل E-11).

فرایندهای برون‌زاد تشکیل شده‌اند. مگنتیت به صورت بلورهای شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت‌های نواری (شکل A-11)، توده‌ای، رگه-رگچه‌ای و استوک‌ورکی (شکل B-9 و C) و برشی (شکل B-11) در این کانسار حضور دارد. مگنتیت اغلب به صورت پرکننده فضای بین بلورهای آپاتیت (شکل C-11) و گاه اکتینولیت (شکل D-11) مشاهده می‌شود. همچنین، ادخال‌های مگنتیت در داخل اکتینولیت حضور دارد. در برخی نقاط، باندها و نوارهای مگنتیت در تناوب



شکل 8. موقعیت نمونه‌های گرانیتوئیدی گلستان‌آباد بر روی: A: نمودار Ta در مقابل Th (Schandle and Gorton, 2002)، B: نمودار Ta/Yb در مقابل Th/Yb (Schandle and Gorton, 2002)، C: نمودار مثلثی La-10*Hf-TiO₂/100 (Muller and Groves, 1997) و D: نمودار مثلثی 10*Nb-3*Zr-Ce/P₂O₅ (Muller and Groves, 1997)

Fig. 8. Location of the Golestan Abad granitoids on the: A: Ta vs. Th diagram (Schandle and Gorton, 2002), B: Th/Yb vs. Ta/Yb diagram (Schandle and Gorton, 2002), C: La-10*Hf-TiO₂/100 triangular diagram (Muller and Groves, 1997), and D: 10*Nb-3*Zr-Ce/P₂O₅ triangular diagram (Muller and Groves, 1997)

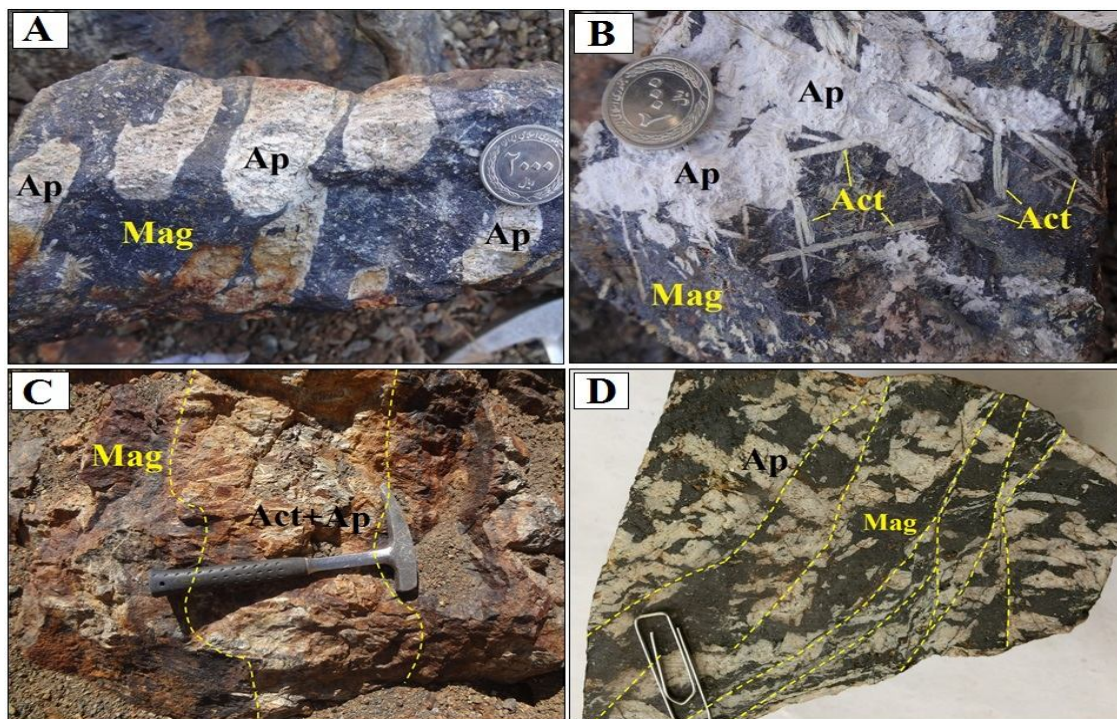


شکل 9. A: نمایی از یکی از سینه‌کارهای معدنی و کانه‌زایی آهن در رخنمون جنوب‌خاوری کانسار گلستان‌آباد (دید به سمت شمال)، B: نمایی از رگه-رگچه‌های کانه‌زایی آهن به صورت داربستی در کمرباطین رگه اصلی اکسید آهن-آپاتیت در کانسار گلستان‌آباد و C: نمایی از رگه اکسید آهن-آپاتیت در کانسار گلستان‌آباد که توسط گسل قطع شده است (دید به سمت شمال‌باختر). (qm: پیروکسن کوآرتز مونزودیوریت)

Fig. 9. A: A View from one of the exploitation site and Fe mineralization at southeastern outcrop of the Golestan Abad deposit (view to north), B: A View from the Fe mineralization as stockwork vein-veinlets at the hanging wall of main Fe oxide-apatite vein in the Golestan Abad deposit, and C: A View from the iron oxide-apatite vein in the Golestan Abad deposit which is crosscut by fault (view to northwest). (qm: pyroxene quartz monzodiorite)

به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل با بافت دانه‌پراکنده در فضای بین شکستگی‌های کانسنگ اکسید آهن-آپاتیت حضور داشته (شکل H-11) و یا به صورت رگچه‌ای (شکل H-11) آن را قطع کرده است. کالکوپیریت معمولاً از حاشیه به کولیت و گوتیت دگرسان شده است (شکل H-11). در نتیجه دگرسانی برون‌زاد، پیریت، کالکوپیریت و مگنتیت به گوتیت تبدیل شده است. همچنین، در نتیجه دگرسانی برون‌زاد پیریت، ژپس در برخی نقاط تشکیل شده است.

برخی بلورهای مگنتیت از حاشیه بلور و شکستگی‌ها مارتیتی شده و به هماتیت تبدیل شده است. پیریت به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار به صورت دانه‌پراکنده در فضای بین بلورهای مگنتیت و آپاتیت حضور داشته (شکل F-11) و یا به صورت رگه-رگچه‌ای (شکل G-11) کانسنگ اکسید آهن-آپاتیت را قطع کرده است. دگرسانی پیریت به گوتیت در برخی بلورها مشاهده می‌شود که گاه به طور کامل گوتیت جانشین پیریت شده است. کالکوپیریت با فراوانی کمتر نسبت به پیریت،



شکل 10. تصاویری از کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد در مقیاس نمونه دستی و رخنمون. A: بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت در متنی از مگنتیت، B: بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت به‌همراه بلورهای سوزنی اکتینولیت در متنی از مگنتیت، C: نمایی از رگه اکتینولیتی-آپاتیته قطع‌کننده کانه‌زایی آهن و شکستگی و جابه‌جایی بلورهای آپاتیت در نتیجه تنش‌های زمین‌ساختی بعد از کانه‌زایی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوایز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Act: اکتینولیت، Ap: آپاتیت، Mag: مگنتیت).

Fig. 10. Photos from the iron oxide- apatite mineralization in the Golestan Abad deposit in hand sample and outcrop scale. A: Coarse-grained euhedral apatite crystals within magnetite matrix, B: Coarse-grained euhedral apatite crystals along with needle shape actinolite crystals within magnetite matrix, C: View from the Actinolite-apatite vein cutting magnetite mineralization, and D: Fracturing and movement of apatite crystals as a result of post mineralization tectonic tension. Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Act: actinolite, Ap: apatite, Mag: magnetite)

مراحل قبلی را قطع کرده‌اند (شکل 10-C و 11-E). در نتیجه تنش‌های زمین‌ساختی، بلورهای درشت آپاتیت متحمل شکستگی شده است (شکل 10-D). اکتینولیت دیگر کانی شاخص همراه با کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در این منطقه است که به‌صورت بلورهای منشوری تا سوزنی درشت شکل‌دار تا ریز نیمه‌شکل‌دار مشاهده می‌شود (شکل 10-B و C). شواهد صحرائی و میکروسکوپی بیانگر آن است که اکتینولیت مربوط به 2 نسل مختلف است: 1- بلورهای درشت و شکل‌دار اکتینولیت حاصل از دگرسانی کلینوپیروکسن که فضای بین آنها توسط مگنتیت پر شده است (شکل 11-D) و 2- بلورهای

آپاتیت شاخص‌ترین کانی همراه با کانه‌زایی مگنتیت در کانسار گلستان‌آباد است که به‌صورت بلورهای درشت شکل‌دار تا ریز نیمه‌شکل‌دار مشاهده می‌شود (شکل 10). از نظر رنگی، بلورهای آپاتیت به رنگ‌های سفید تا صورتی قابل مشاهده هستند. شواهد صحرائی و میکروسکوپی بیانگر آن است که آپاتیت مربوط به 3 نسل مختلف است: 1- بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت که در زمینه مگنتیت پراکنده هستند (شکل 10-A، B و C)، 2- بلورهای ریز آپاتیت که به‌صورت سیمان فضای بین برش‌های مگنتیتی را پر کرده‌اند (شکل 11-B) و 3- بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت که به‌صورت رگه‌ای در همراهی با اکتینولیت،

رگه‌های اصلی کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت مشاهده می‌شود. کانی‌های تشکیل‌شده در مراحل ابتدایی کانه‌زایی توسط کانی‌های دما پایین‌تر در مراحل انتهایی کانه‌زایی یا مرحله برون‌زاد جانشین شده‌اند. از این کانی‌ها می‌توان به جانشینی کلینوپیروکسن توسط اکتینولیت، پیریت توسط گوتیت و کالکوپیریت توسط کولیت اشاره کرد. بقایایی از کانی‌های اولیه در داخل کانی‌های ثانویه مشاهده می‌شود که به تشکیل بافت بازماندی منجر شده است. گوتیت حاصل از فرایندهای برون‌زاد در مسیر شکستگی‌ها و حفره‌ها متمرکز شده و بافت پرکننده فضاهای خالی را به‌وجود آورده است.

مراحل کانه‌زایی و توالی پاراژنتیک

شواهد متعددی برای ترسیم توالی پاراژنتیک در کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد مدنظر قرار گرفته است که مهم‌ترین آنها شامل موارد زیر است:

(1) حضور مگنتیت در فضای بین بلورهای درشت آپاتیت و اکتینولیت (پروکسن) بیانگر تشکیل مگنتیت بعد از آپاتیت (نسل I) و پروکسن است.

(2) حضور آپاتیت در زمینه قطعات مگنتیت برشی‌شده بیانگر تشکیل این نسل از آپاتیت (نسل II) بعد از مگنتیت است.

(3) رگه-رگچه‌های اکتینولیت-آپاتیت حاوی مقداری مگنتیت، کانه‌زایی اصلی را قطع کرده‌اند. بر این اساس، این نسل از آپاتیت (نسل III) و مگنتیت (نسل II) را می‌توان مرحله انتهایی کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در نظر گرفت.

(4) وجود ادخال‌های کانی‌های عناصر کمیاب خاکی در داخل بلورهای آپاتیت بیانگر تشکیل آنها در همراهی با هر سه نسل آپاتیت است.

(5) کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) به‌صورت دانه‌پراکنده در متن کانسنگ مگنتیت-آپاتیت-پروکسن حضور داشته و همچنین به‌صورت رگچه‌ای آن را قطع کرده‌اند. بر این اساس، کانه‌زایی سولفیدی را می‌توان بعد از کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت-پروکسن در نظر گرفت.

درشت و شکل‌دار و سوزنی اکتینولیت که به‌صورت رگه‌ای در همراهی با آپاتیت، مراحل قبلی را قطع کرده‌اند (شکل C-10 و E-11). همچنین، تناوب باندها و نوارهای اکتینولیت-آپاتیت و مگنتیت باعث تشکیل بافت نواری در این کانه‌زایی شده است (شکل A-11). طول بلورهای اکتینولیت گاه تا 5 سانتی‌متر می‌رسد. در زیر میکروسکوپ، بلورهای اکتینولیت به‌صورت سوزنی و رشته‌ای قابل مشاهده بوده و گاه در داخل آنها بقایایی از کلینوپروکسن (شکل I-11) دیده می‌شود. بلورهای درشت آپاتیت حاوی ادخال‌های ریز فراوانی هستند که بر اساس بررسی‌های SEM، این کانی‌ها از نوع کانی‌های عناصر کمیاب خاکی نظیر مونازیت، گزنوتایم و ... هستند (Kordian, 2018). کوارتز اغلب به‌صورت بلورهای ریز در سنگ‌های آتشفشانی اطراف کانه‌زایی به‌صورت دگرسانی سیلیسی سنگ میزبان مشاهده می‌شود. همچنین، رگچه‌های تأخیری کوارتز در برخی نقاط مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. کلسیت نیز به‌صورت رگچه‌های تأخیری مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده است.

نتیجه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی بیانگر آن است که ساخت و بافت‌های موجود در کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد شامل رگه-رگچه‌ای، نواری، توده‌ای، برشی، دانه‌پراکنده، استوک‌ورک، جانشینی، بازماندی و پرکننده فضاهای خالی است (شکل‌های 9، 10 و 11). بافت رگه-رگچه‌ای شاخص‌ترین بافت در منطقه است. همچنین، رگه-رگچه‌های تأخیری اکتینولیت-آپاتیت، کانی‌های سولفیدی، کوارتز و کلسیت، کانه‌زایی آهن-آپاتیت اولیه را قطع می‌کنند. بافت نواری حاصل تناوب باندها و لامینه‌های غنی از مگنتیت، آپاتیت و آپاتیت-اکتینولیت در داخل توده کانه‌زایی است. در نتیجه تنش‌های مربوط به سیالات گرمابی و همچنین زمین‌ساختی، توده معدنی اولیه متحمل برشی شدن شده و بافت برشی را به‌وجود آورده است. بافت دانه‌پراکنده حاصل حضور آپاتیت، اکتینولیت و کانی‌های سولفیدی در متن مگنتیت است. بافت استوک‌ورکی (داربستی) در برخی نقاط در کمربند

و مگنتیتی داشته؛ با این تفاوت که غنی‌شدگی عناصر HREE و نسب به LREE تا حدودی بالاتر است (شکل 13). غنی‌شدگی بالاتر عناصر کمیاب خاکی سنگین در این نمونه را می‌توان در ارتباط با میزبانی مناسب این کانی برای عناصر کمیاب خاکی سنگین در نظر گرفت. چنین الگوهایی در پژوهش مختاری و همکاران (Mokhtari et al., 2017) نیز برای نمونه‌های مربوط به بخش‌های مختلف کانسار گلستان آباد گزارش شده است. الگوی عناصر کمیاب خاکی میانگین توده پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی گلستان آباد برای مقایسه با الگوی عناصر کمیاب بخش‌های مختلف کانه‌زایی این کانسار در شکل 13 نشان داده شده است. توده پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی دارای الگویی غنی از LREE با نسبت متوسط LREE/HREE و بدون آنومالی منفی Eu است. در مجموع می‌توان گفت که توده پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی و مجموعه نمونه‌های کانه‌زایی الگویی تقریباً مشابه هم را به‌نمایش می‌گذارند (شکل 13) که می‌تواند بیانگر ارتباط ژنتیکی کانه‌زایی گلستان آباد با توده پیروکسن کوارتز مونوزودیوریت باشد.

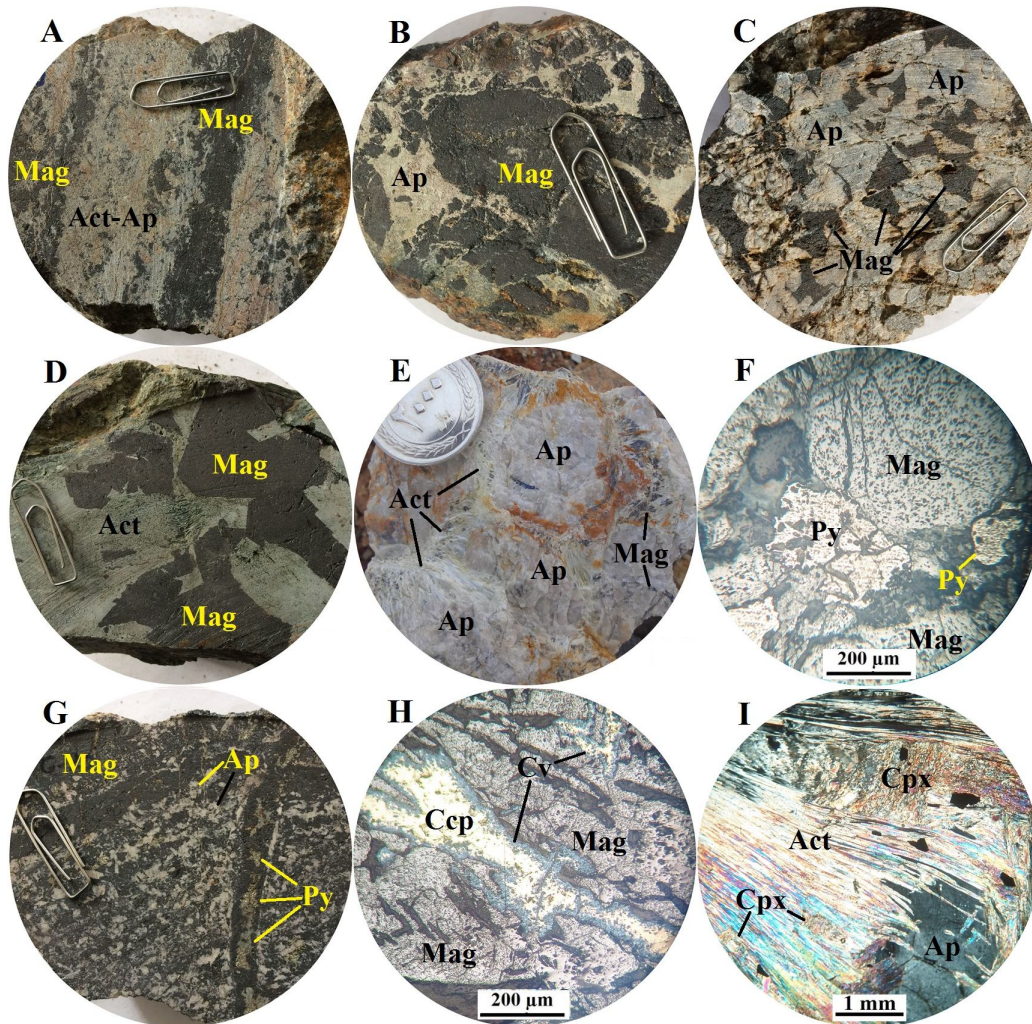
چنان‌که در جدول 2 قابل مشاهده است، تمرکز مجموع عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های آنالیز شده از بخش‌های مختلف کانه‌زایی در کانسار گلستان آباد بالا بوده و در آپاتیت‌های نسل I، II و III به ترتیب 0/98، 0/92 و 0/95 درصد است. مجموع عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های اکتینولیت، کانسنگ‌های مگنتیت و کانسنگ سولفیدی نیز به ترتیب 305/1، 344/9، 345/3 و 177/1 گرم در تن است (جدول 2). در نمونه‌های آنالیز شده توسط مختاری و همکاران (Mokhtari et al., 2017) نیز تمرکز بالایی از مجموع عناصر کمیاب خاکی در نمونه آپاتیته (0/96 درصد) گزارش شده است. کمترین مقدار مجموع عناصر کمیاب خاکی در پژوهش مزبور (حدود 600 گرم در تن) مربوط به نمونه اکتینولیت است. عیار متوسط REE کانسنگ اکسید آهن-آپاتیت گلستان آباد در نمونه‌های آنالیز شده در پژوهش مزبور حدود 0/36 درصد گزارش شده است.

6) پیروکسن در مراحل پس‌رونده کانه‌زایی توسط اکتینولیت جانشین شده است.
7) رگه-رگچه‌های کوارتزی و کلسیتی در مراحل آخر کانه‌زایی، مراحل قبلی کانه‌زایی را قطع کرده‌اند.
8) در مرحله دگرسانی برون‌زاد، مگنتیت توسط هماتیت، پیریت توسط گوتیت و کالکوپیریت توسط کولیت جانشین شده‌اند. بر این اساس، توالی پاراژنتیک کانی‌ها و کانه‌های موجود در کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان آباد در شکل 12 نشان داده شده است.

زمین‌شیمی عناصر کمیاب خاکی در پهنه‌های کانه‌دار

در این بخش، الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در کانسار گلستان آباد مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی‌ها بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی 7 نمونه شامل: یک نمونه اکتینولیتی، دو نمونه مگنتیت، یک نمونه از بخش سولفور (پیریت)، یک نمونه آپاتیت صورتی‌رنگ همراه با رگه اکتینولیت (آپاتیت نسل III)، یک نمونه آپاتیت سفیدرنگ داخل کانسنگ مگنتیت (آپاتیت نسل I) و یک آپاتیت موجود در زمینه کانسنگ مگنتیت برشی (آپاتیت نسل II) است که به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت زرآزما در تهران تجزیه شده‌اند (جدول 2). همچنین، از میانگین نتایج آنالیزهای مربوط به توده پیروکسن کوارتز مونوزودیوریتی برای مقایسه استفاده شده است. الگوی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های پهنه‌های کانه‌دار مختلف نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) به‌هنجار شده‌اند (شکل 13).

با توجه به شکل 13، نمونه‌های مربوط به آپاتیت‌های نسل I، II و III، الگویی پر شیب غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک با نسبت بالای LREE/HREE را به همراه آنومالی منفی Eu نشان می‌دهند. نمونه‌های مربوط به کانسنگ‌های مگنتیتی و سولفیدی نیز الگویی مسطح مشابه هم به همراه آنومالی منفی مشخص در Eu را نشان می‌دهند (شکل 13). نمونه مربوط به بلورهای اکتینولیت نیز الگویی تقریباً مشابه با کانسنگ سولفیدی



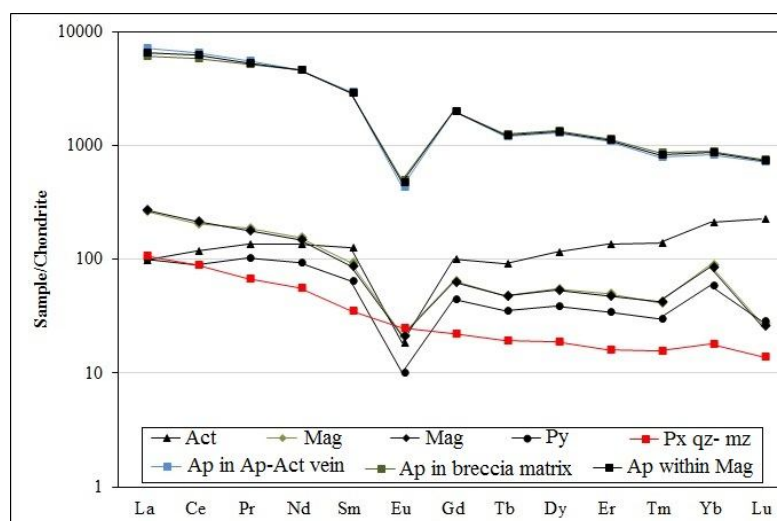
شکل 11. تصاویری از بافت‌ها و کانی‌های موجود در کانسار گلستان‌آباد در مقیاس نمونه دستی و میکروسکوپی. A: بافت نواری متشکل از باندهای مگنتیت و اکتینولیت-آپاتیت، B: بافت برشی حاوی قطعات مگنتیت در متنی از آپاتیت، C: مگنتیت به صورت پرکننده فضای بین بلورهای شکل‌دار آپاتیت، D: مگنتیت به صورت پرکننده فضای بین بلورهای درشت اکتینولیت، E: بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت موجود در رگه اکتینولیت-آپاتیت در همراهی با مقادیر کم مگنتیت نسل دوم، F: پیریت به صورت دانه‌پراکنده در بین مگنتیت‌ها (نور بازتابی PPL)، G: پیریت به صورت رگچه‌ای که کانسنگ مگنتیت-آپاتیت را قطع کرده است، H: کالکوپیریت به صورت رگچه‌ای و دانه‌پراکنده با دگرسانی به کولیت در بین مگنتیت‌ها (نور بازتابی PPL) و I: بقایای کلینوپیروکسن در داخل بلورهای رشته‌ای اکتینولیت (نور عبوری XPL). علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Act: اکتینولیت، Ap: آپاتیت، Ccp: کالکوپیریت، Cpx: کلینوپیروکسن، Cv: کولیت، Mag: مگنتیت، Py: پیریت).

Fig. 11. Photos from textures and minerals of the Golestan Abad deposit in hand sample and microscopic scale. A: Banded texture composed of magnetite and actinolite-apatite bands, B: Brecciated texture containing magnetite clasts within the apatite matrix, C: Magnetite as matrix of the euhedral apatite crystals, D: Magnetite as matrix of coarse-grained actinolite, E: Coarse-grained euhedral apatite crystals in actinolite-apatite vein along with minor second generation magnetite, F: Disseminated pyrite between magnetites (reflected PPL light), G: Pyrite veinlet crosscutting magnetite-apatite ore, H: Chalcopyrite in disseminated and veinlet form between magnetite which are altered to covellite (reflected PPL light), and I: Clinopyroxene remnants within the needle shape actinolites crystals (crossed polarized light, XPL). Mineral abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Act: actinolite, Ap: apatite, Ccp: chalcopyrite, Cpx: clinopyroxene, Cv: covellite, Mag: magnetite, Py: pyrite).

		Stage 1	Stage 2	Stage 3	Supergene
Minerals	Apatite I	██████████			
	Clinopyroxene	██████████			
	Magnetite I	██████████			
	Apatite II		██████████		
	Apatite III			██████████	
	Actinolite			██████████	
	Magnetite II			██████████	
	REE minerals			██████████	
	Pyrite			██████████	
	Chalcopyrite			██████████	
	Quartz			██████████	
	Calcite				██████████
	Covellite				██████████
	Hematite				██████████
	Goethite				██████████
Alteration	Silicification	██████████			
	Calcic			██████████	
	Argillic			██████████	
Propylitic				██████████	
Texture	Vein-veinlet	██████████			
	Massive	██████████			
	Stockwork	██████████			
	Banded	██████████			
	Brecciated		██████████		
	Disseminated			██████████	
	Replacement				██████████
	Relict				██████████

شکل 12. توالی پاراژنتیک کانه‌ها و کانی‌های باطله در کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد

Fig. 12. Paragenetic sequence of ore and gangue minerals in the Golestan Abad iron oxide-apatite deposit



شکل 13. الگوی عناصر کمیاب خاکی به‌هنجارشده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های کانه‌دار کانسار گلستان‌آباد

Fig. 13. Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) rare earth element patterns for mineralized samples of the Golestan Abad deposit

جدول 2. نتایج تجزیه‌های شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانهدار کانسار گلستان‌آباد. داده‌ها برحسب گرم در تن (ppm) است.

Table 2. Geochemical data of trace and rare earth elements for ore samples of the Golestan Abad deposit. Data in ppm.

	G70 Act	G71 Mag	G72a Mag	G72 Py	G73 Ap III	G74 Ap I	G69 Ap II
Ba	11	5	5	1	<1	<1	<1
Be	7.1	0.7	0.6	0.7	0.9	0.7	0.7
Bi	0.2	0.2	0.2	3.7	0.3	0.3	0.3
Cd	0.4	0.4	0.4	0.9	1.2	1.2	1.1
Co	26.8	25.6	24.5	1270.4	4.6	3.8	3.4
Cr	47	15	14	13	15	17	14
Cs	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Cu	<1	<1	<1	439	8	43	15
Fe	99226	68.5%	69.5%	38.4%	6515	5476	38864
Hf	1.52	0.79	0.65	0.8	1.84	1.99	1.78
Mo	0.3	10.8	9.5	1.7	2.4	1.9	1.5
Nb	<1	1.4	1.3	1.3	<1	3.4	2.4
Ni	21	39	41	1869	8	7	8
P	448	747	685	6936	>3%	>3%	>3%
Pb	2	3	3	13	12	18	14
Rb	8	8	8	8	8	8	7
S	194	237	227	>3%	1854	889	654
Sc	252.9	1.3	1.4	2	1.6	17.4	1.5
Se	3.89	1.47	1.54	27.55	43.71	46.51	45.42
Sr	15.4	5.4	5.5	4.6	203.9	140.3	164.2
Ta	<0.1	0.15	0.14	0.22	0.27	0.53	0.44
Te	0.24	<0.1	<0.1	1.81	0.34	0.43	0.38
Th	5.73	1.53	1.42	3.38	45.56	36.67	23.15
Ti	989	8405	8864	<10	<10	12	26
U	1.3	1.57	1.45	0.8	14.4	12.1	13.4
V	307	2814	2754	198	51	93	45
Zn	100	191	175	65	10	14	12
Zr	19	19	17	14	<5	5	6
Y	141.7	64.9	62.3	44	1382.8	1457	1423.2
La	23	63	64	24	1699	1442	1543
Ce	72	127	132	55	3989	3592	3778
Pr	12.51	17.46	16.42	9.47	509.07	476.52	487.61
Nd	61.6	70.7	68.4	42.5	2116.5	2117.8	2120.5
Sm	18.76	13.7	12.8	9.61	438.73	423.66	432.64
Eu	1.03	1.21	1.20	0.57	24.44	27.64	26.51
Gd	20.04	12.87	12.54	8.94	396.67	400.08	398.42
Tb	3.26	1.73	1.72	1.28	43.49	45.16	44.18
Dy	28.64	13.43	13.25	9.42	319.6	331.94	324.2
Er	21.5	7.91	7.6	5.49	173.69	184	178.2
Tm	3.46	1.02	1.04	0.74	19.57	21.24	20.51
Yb	33.8	14.2	13.8	9.4	132.4	143.2	138.6
Lu	5.51	0.68	0.64	0.71	17.81	18.66	18.16
REE _t	305.11	344.91	345.37	177.13	9879.97	9223.9	9510.44

Ap I: Apatite within magnetite matrix, Ap II: Apatite in matrix of breccia magnetite, Ap III: Apatite within apatite-actinolite vein, Mag: Magnetite ore, Py: Pyrite ore, Act: Actinolite.

استفاده از مقادیر Fe، Ni، V و Ti به رده‌بندی انواع کانسارهای

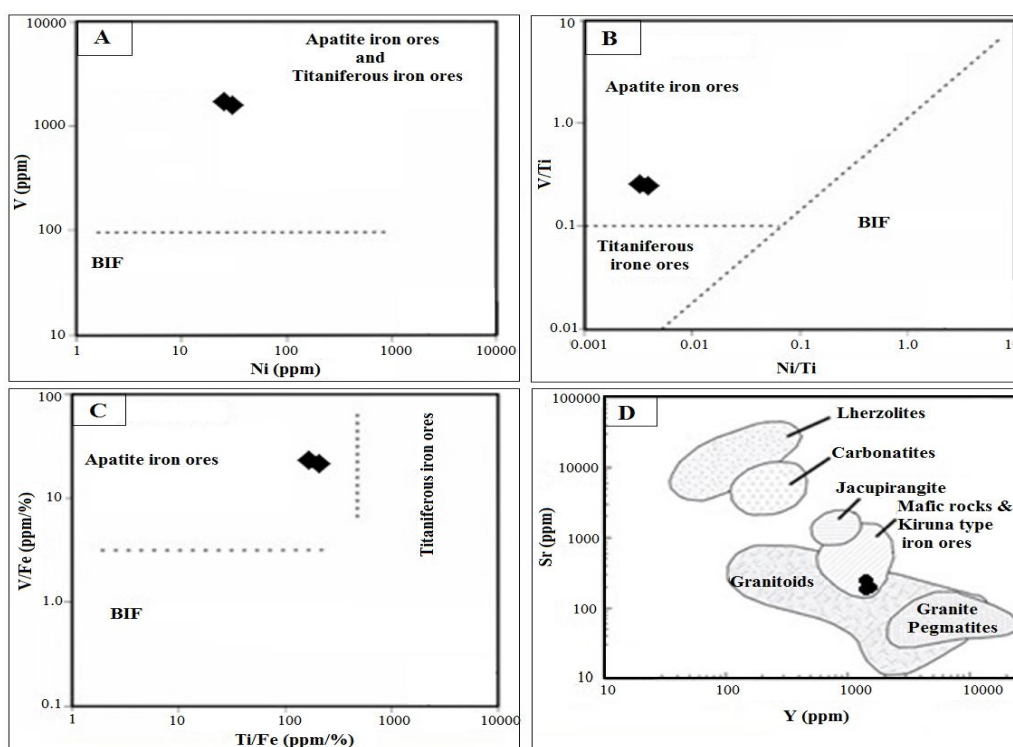
آهن پرداخته‌اند. با استفاده از تغییرات V در مقابل Ni می‌توان

نوع کانزایی

لوبرگ و هورندال (Loberg and Horndal, 1983) با

گلستان‌آباد در محدوده کانسارهای آهن آپاتیت‌دار قرار می‌گیرد (شکل 14-A، B و C). در نمودار Y در مقابل Sr (Belousova et al., 2002) نیز نسل‌های مختلف بلورهای آپاتیت موجود در کانسار گلستان‌آباد در قلمرو سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن نوع کایرونا واقع می‌شوند (شکل 14-D).

کانسارهای آهن آپاتیتی و تیتانیوم‌دار را از کانسارهای آهن رسوبی جدا کرد. همچنین، از تغییرات نسبت V/Ti به Ni/Ti می‌توان کانسارهای آهن-آپاتیت را از کانسارهای آهن تیتان‌دار و کانسارهای آهن نواری شناسایی کرد. در نمونه‌های آنالیز شده از منطقه مورد بررسی، دو نمونه از کانسنگ مگنتیتی مورد آنالیز قرار گرفته است (جدول 2). بر اساس مقادیر V ، Ni و Ti و Co موجود در این نمونه‌ها، کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت منطقه



شکل 14. موقعیت نمونه‌های مگنتیت کانسار گلستان‌آباد بر روی نمودارهای لوبرگ و هورندال (Loberg and Horndahl, 1983). A: نمودار V در مقابل Ni، B: نمودار Ni/Ti در مقابل V/Ti، C: نمودار Ti/Fe در مقابل V/Fe و D: موقعیت نمونه‌های آپاتیت کانسار گلستان‌آباد بر روی نمودار Y در مقابل Sr (Belousova et al., 2002)

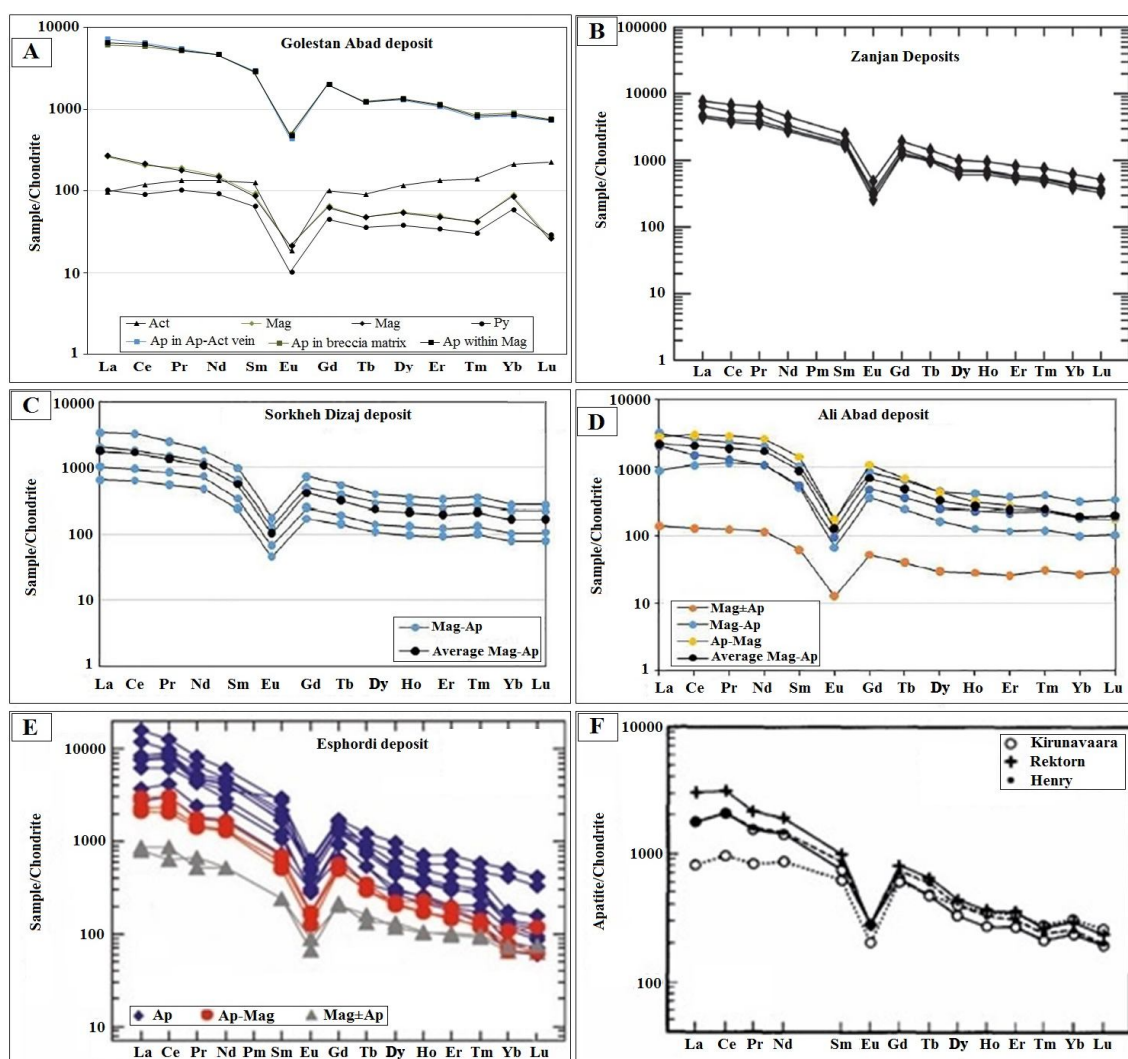
Fig. 14. Location of magnetite samples of the Golestan Abad deposit on Loberg and Hron Dahl (1983) diagrams, A: V vs Ni diagram, B: Ni/Ti vs V/Ti diagram, C: Ti/Fe vs V/Fe diagram, and D: Location of apatite samples of the Golestan Abad deposit on Y vs Sr diagram (Belousova et al., 2002)

خاکی کانسار گلستان‌آباد و دیگر کانسارهای منطقه زنجان، مشابه با الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسارهای آهن ایران مرکزی است (شکل 15-B). از طرف دیگر، مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت

مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت منطقه گلستان‌آباد با دیگر کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه زنجان بیانگر شباهت کامل آنها با یکدیگر است (شکل 15-A، B، C و D). همچنین، الگوی عناصر کمیاب

منطقه زنجان (Nabatian et al., 2012; Mokhtari et al., 2017) و گلستان آباد با الگوی کانسارهای آهن نوع کایرونا در دیگر نقاط جهان نظیر کانسارهای کایرونا، رکتورن و هنری

می‌دهد (شکل 15-F).



شکل 15. A: الگوی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان آباد، B: الگوی عناصر کمیاب خاکی در آپاتیت‌های کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت منطقه زنجان (Nabatian et al., 2012)، C: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسار اکسید آهن-آپاتیت سه‌رخه دیزج (Mokhtari et al., 2017)، D: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسار اکسید آهن-آپاتیت علی‌آباد (Mokhtari et al., 2017)، E: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسار اکسید آهن-آپاتیت اسفوردی در ایران مرکزی (Mokhtari et al., 2013) و F: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسارهای آهن نوع کایرونا (Frietsch and Perdahle, 1995)

Fig. 15. A: Chondrite-normalized REE pattern in samples of the Golestan Abad iron oxide-apatite deposit, B: Chondrite-normalized REE pattern in apatites of the iron oxide-apatite deposits from the Zanjan district (Nabatian et al., 2012), C: Chondrite-normalized REE pattern in samples of the Sorkheh Dizaj iron oxide-apatite deposit (Mokhtari et al., 2017), D: Chondrite-normalized REE pattern in samples of the Ali Abad iron oxide-apatite deposit (Mokhtari et al., 2017), E: Chondrite-normalized REE pattern in samples of the Eshordi iron oxide-apatite deposit, Central Iran (Mokhtari et al., 2013), and F: Chondrite-normalized REE pattern in samples of the Kirunavaara, Rektorn and Henry iron deposits (Frietsch and Perdahle, 1995)

نتیجه‌گیری

1) کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد در زیرپهنه طارم-هشتجین و اغلب در داخل توده‌های نفوذی با ترکیب پیروکسن کوارتز مونوزودیوریت-کوارتز مونوزودیوریت مربوط به ائوسن بالایی تشکیل شده است. توده‌های نفوذی مزبور دارای ماهیت کالک‌آلکالین پتاسیم بالا بوده و از نوع متآلومین و I-type هستند. این توده‌ها در محیط تکتونوماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای و پس از برخورد تشکیل شده‌اند.

2) کانه‌زایی اکسید آهن-آپاتیت در کانسار گلستان‌آباد به صورت عدسی‌ها و رگه-رگچه‌های اکسید آهن-آپاتیت دیده می‌شود. کانه اکسید آهن اصلی در این کانه‌زایی عبارت از مگنتیت است که با مقادیر متغیری از بلورهای آپاتیت و اکتینولیت همراهی می‌شود.

3) ویژگی بارز کانسار گلستان‌آباد، تمرکز بالای عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های مختلف کانه‌زایی بوده و محتوای مجموع عناصر کمیاب خاکی در آپاتیت‌های نسل I، II و III به ترتیب 0/98، 0/92 و 0/95 درصد است.

4) بلورهای آپاتیت موجود در این کانسار الگویی پرشیب غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک با نسبت بالای LREE/HREE را به همراه آنومالی منفی Eu نشان می‌دهند. الگوی غنی از

LREE با نسبت بالای LREE/HREE همراه با آنومالی منفی Eu از مشخصه‌های کانسارهای آهن نوع کایروناست (Frietsch and Perdahl, 1995). مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانسار گلستان‌آباد با دیگر کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه زنجان، کانسارهای آهن-فسفات ایران مرکزی و کانسارهای آهن نوع کایرونا در دیگر نقاط، شباهت بین آنها را نشان می‌دهد.

5) کانسار اکسید آهن-آپاتیت گلستان‌آباد شباهت‌های زیادی با ذخایر آهن نوع کایرونا از نظر مجموعه کانی‌شناسی، ساخت و بافت ماده معدنی، دگرسانی سنگ دیواره و زمین‌شیمی نشان می‌دهد. تعمیم شواهد به دست آمده از این بررسی‌ها به مناطق مشابه در پهنه طارم می‌تواند کاربرد فراوانی در شناسایی و اکتشاف کانسارهای نوع کایرونا داشته باشد.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. همچنین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از سردبیر و داوران نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشتر این مقاله منجر شده است، تشکر نمایند.

References

- Aldanmaz, E., Pearce, J.A., Thirlwall, M.F. and Mitchell, J.G., 2002. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102(1-2): 67-95.
- Amini, B., 1997. Geological Map of Tarom, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.

- Belousova, E., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. and Fisher, N.L., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Besharati, S., Nabatian, Gh. and Sadeghi, A., 2010. Skarn mineralization in the Arjin region (Southwest Soltanieh). The 1th Conference of the Iranian Economic Geological Society, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,

- Iran. (in Persian with English abstract)
- Boomeri, M., 2012. Rare earth minerals in Esfordi magnetite-apatite deposit, Bafq district. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 22(85): 71–82.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1992. I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1–2): 1–26.
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R. and Chappell, B.W., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200.
- Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1–4): 1–420.
- Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489–510.
- Gleason, J.D., Marikos, M.A., Barton, M.D. and Johnson, D.A., 2000. Neodymium isotope study of rare earth element sources and mobility in hydrothermal Fe oxide (Fe-P-REE) system. *Geochemical et Cosmochemica Acta*, 64(6): 1059–1068.
- Hastie, A.R., Ker, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th–Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341–2357.
- Hildebrand, R.S., 1986. Kiruna-type deposit: their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada. *Economic Geology*, 81(3): 640–659.
- Hitzman, M.W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when and why? In: Porter, T.M., (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. Vol. 1. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 9–25
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1): 241–287.
- Hofmann, A.W., 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(13): 297–314.
- 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(6): 1111–1128.
- Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(1): 38–56.
- Kerr, I.D., 1998. Mineralogy, Chemistry and hydrothermal evolution of the Pea Ridge Fe-oxide-REE Deposit, Missouri, USA. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Windsor, Ontario, Canada, 112 pp.
- Kordian, Sh., 2018. Geochemistry of REE in Golestan Abad iron oxide- apatite deposit (east of Zanjan). Unpublished M.Sc. Thesis, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 122 pp. (in Persian with English abstract)
- Kuster, D. and Harms, U., 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen: a review. *Lithos*, 45(1–4): 177–195.
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., Liu, Y., Yuan, C., Wei, G. and Qi, C., 2007. U–Pb zircon, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I-and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204.
- Loberg, B.E.H. and Horndal, A.K., 1983. Ferride geochemistry of Swedish Precambrian iron ores. *Mineralium Deposita*, 18(3): 487–504.
- McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253.
- Middlemost, E.A.K., 1985. *Magma and magmatic rocks*. Longman, London and New York, 266 pp.
- Moghaddasi, S.J., Ebrahimi, M. and Mohammadi, F., 2019. Mineralogy, geochemistry and genesis of Gozaldarreh iron deposit, southeast Zanjan. *Journal of Economic Geology*, 11(1): 33–55. (in Persian with English abstract)
- Mokhtari, M.A.A., Hossein Zadeh, Gh. and

- Emami, M.H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. *Journal of Earth System Science*, 122(3): 795–807.
- Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Gholizadeh, K., 2019. Mineral chemistry and formation conditions of calc-silicate minerals of Qozlou Fe skarn deposit, Zanjan Province, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(21): 1–28. (Article; 658)
- Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M. and Nabatian, Gh., 2017. Geochemistry and potential resource of rare earth element in the IOA deposits of Tarom area, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 92: 529–541.
- Muller, D. and Groves, D.I., 1997. *Ptassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization*. Springer Verlag, Switzerland, 242 pp.
- Nabatian, Gh., 2012. *Geology, Geochemistry and Evolution of Iron Oxide-apatite Deposits in the Tarom Volcano-plutonic Belt, Western Alborz*. Unpublished Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 375 pp. (in Persian with English abstract)
- Nabatian, Gh. and Ghaderi, M., 2013. Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkheh-Dizaj iron oxide-apatite deposit, NW Iran. *International Geology Review*, 55(4): 397–410.
- Nabatian, Gh. and Ghaderi, M., 2014. Mineralogy and geochemistry of the rare earth elements in iron oxide-apatite deposits of the Zanjan region. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 24(93): 157–170. (in Persian with English abstract)
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V. and Honarmand, M., 2014a. Geology, alteration, age and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 49(2): 217–234.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Daliran, F. and Rashidnejad Omran, N., 2012. Sorkhe- Dizaj iron oxide- apatite ore deposit in the Cenozoic Alborz- Azarbaijan magmatic belt, NW Iran. *Resource Geology*, 63(1): 42–56.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Liu, X., Dong, Y., Jian, S.Y., Quad, A. and Bernroider, M., 2014b. Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz–Azarbaijan belt, Iran: Geochemical, U–Pb zircon and Sr–Nd–Pb isotopic constraints. *Lithos*, 184–187: 324–345.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Rashidnejad Omran, N. and Daliran, F., 2009. Geochemistry and genesis of Sorkhe- Dizaj apatite- beraing iron oxide deposit, southeast Zanjan. *Journal of Economic geology*, 1(1): 19–46. (in Persian with English abstract)
- Nezafati, N., 2006. *Au-Sn-W-Cu-Mineralization in the Astaneh-Sarband Area, West Central Iran, including a comparison of the ores with ancient bronze artifacts from Western Asia*. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Tuebingen, Tuebingen, Germany, 114 pp.
- Parak, T., 1975. Kiruna iron ores are not intrusive-magmatic ores of the Kiruna type. *Economic Geology*, 70(7): 1242–1258.
- Schandle, E.S. and Gorton, M.P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97(3): 629–642.
- Shafaie Pour, N., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Honarmand, M., 2020. Petrology and geochemistry of the Qozlou granitoid and related Fe skarn (west Zanjan). *Journal of Economic Geology*, 12(1): 47–76. (in Persian with English abstract)
- Shahbazi, S., Ghaderi, M. and Rashidnejad Omran, N., 2015. Mineralization stages and iron source of Bashkand deposit based on mineralogy, structure, texture and geochemical evidence, Southwest of Soltanieh. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 24(95): 355–372. (in Persian with English abstract)
- Shand, S.J., 1943. *Eruptive Rocks: Their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite*. Johan Wiley and Sons, New York, 350 pp.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Wilson, M., 1989. *Igneous petrology*. Unwin Hyman, London, 466 pp.
- Wright, J.B. and McCurry, P., 1997. Geochemistry of calc-alkaline volcanic in northwestern Nigeria, and a possible PAN-

AFRICAN suture zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 37(1): 90–96.

Wu, F., Jahn, B., Wilde, S.A., Lod, C.H., Yu, T.F., Lina, Q., Ge, W. and Sun, D., 2003.

Highly fractionated I-type granites in NE China II: isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3–4): 191–204.



Geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry and genesis of the Golestan Abad iron oxide- apatite deposit (East of Zanjan)

Shiva Kordian¹, Mir Ali Asghar Mokhtari^{1*}, Hossein Kouhestani¹ and Somayeh Veisheh²

1) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2) Laboratories in Geological Research Center of Geological Survey of Iran, Karaj, Iran

Submitted: Mar. 09, 2019

Accepted: Sept. 22, 2019

Keywords: Magnetite-apatite mineralization, Kirouna-type, Rare earth elements, Taron zone, Golestan Abad, Zanjan

Introduction

Iron oxide-apatite deposits (IOA) are considered to be Kirouna-type iron ores which have been formed during Proterozoic to Tertiary eras in different parts of the world. They usually have a connection with calc-alkaline volcanic rocks (Hitzman, 2000). Apatite occurs as a major constituent of these deposits which is accompanied with magnetite and some actinolite. One of the most important features of these deposits (Frietsch and Perdahl, 1995) is higher concentration of REEs.

There are some iron oxide-apatite deposits in the Taron-Hashtjin magmatic-metallogenic belt, northwestern Iran. The Golestan Abad iron oxide-apatite deposit is one of the IOA deposits at the Taron-Hashtjin belt which is located about 30 km east of Zanjan. The Golestan Abad deposit was studied during the exploration studies, but its geological characteristics, mineralogy, texture, geochemistry and genesis have not been studied yet.

Materials and methods

This research study can be divided into two parts that include field and laboratory studies. Field studies include recognition of different lithological units and mineralization zones along with sampling for laboratory studies. During field studies, 60 samples were selected for

petrographical, mineralogical and analytical studies. Moreover, 12 thin sections and 15 thin-polished sections were used for petrographical and mineralogical studies. For geochemical studies, 6 samples from intrusive host rocks and 7 samples from mineralized zones were analyzed by XRF and ICP-MS methods at the Zarazma laboratory, Tehran.

Results

The Golestan Abad area is composed of Eocene volcano-sedimentary rocks of the Karaj Formation which have been intruded by quartz monzodiorite, pyroxene quartz monzodiorite and porphyritic quartz diorite intrusions. Based on petrographic studies, the pyroxene quartz monzodiorites have porphyritic and felsophyric textures and are composed of plagioclase, quartz, clinopyroxene, K-feldspar and hornblende phenocrysts set in a quartz-feldspatic groundmass. Quartz monzodiorites show porphyritic and felsophyric textures and composed of plagioclase, hornblende, quartz, K-feldspar and biotite. The quartz monzodiorite and pyroxene quartz monzodiorites have high-K calc-alkaline affinity and may be classified as metaluminous I-type granitoids. Primitive mantle-normalized (McDonough and Sun, 1995) trace elements diagrams for these granitoids indicate LILE enrichment along with negative HFSE and distinctive positive Pb

*Corresponding author Email: amokhtari@znu.ac.ir

anomalies. Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE patterns for these granitoids demonstrate LREE enrichment (high LREE/HREE ratio) and weak negative anomalies in Eu. These granitoids were formed in an active continental margin to post collisional tectonic setting.

Mineralization at the Golestan Abad occurs as lenses and vein-veinlets of iron oxide-apatite mainly within the quartz monzodiorite- pyroxene quartz monzodiorite intrusions. Stockwork ores occur in the footwall of the main veins. Mineralized lenses and veins have up to 300m length and 20m width. Hydrothermal alterations around the mineralized veins include silicification, calcic (actinolitization), argillic and propylitic. From a mineralogical point of view, this deposit is composed of magnetite, apatite, actinolite, pyrite and chalcopyrite as primary minerals, while hematite, covellite, goethite and gypsum were formed during supergene alteration. Mineralization textures in the Golestan Abad deposit include vein-veinlet, banded, massive, brecciated, disseminated, stockwork, replacement, relict and open space filling. Based on mineralogical and textural studies, 3 stages of apatite formation were distinguished which include: 1- coarse-grained idiomorphic apatite crystals within the magnetite matrix, 2- fine-grained apatite crystals as matrix of brecciated magnetites, and 3- coarse-grained idiomorphic apatite crystals within the actinolite-apatite veins which have been cut in the previous stages. Apatite crystals of the 3 mentioned stages have high concentrations of REE that include 0.98, 0.92 and 0.95%, respectively. Condrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE patterns for 3 apatite generations demonstrate LREE enrichment with high LREE/HREE ratio and distinctive negative Eu anomalies.

Discussion

Similar REE patterns of apatite crystals and mineralized samples with host quartz monzodiorite-pyroxene quartz monzodiorite samples demonstrate a genetic link between iron oxide-apatite mineralization and granitoids. Furthermore, REE patterns of the Golestan Abad deposit are similar to other iron oxide-apatite deposits of the Taram-Hashtjin metallogenic belt

(Nabatian and Ghaderi, 2014; Mokhtari et al., 2017), and those of Central Iranian iron ores (Mokhtari et al., 2013). Finally, the REE patterns of the Golestan Abad deposit are similar with the REE patterns of the Kiruna-type iron ores (Frietsch and Perdahl, 1995). Totally, based on mineralogical assemblages, hydrothermal alteration, mineralization textures and geochemical characteristics, the Golestan Abad iron oxide- apatite deposit can be classified as the Kiruna-type iron ores.

Acknowledgment

This research was made possible by a grant from the office of vice-chancellor for research and technology, University of Zanjan. We acknowledge their support. The respectable reviewers and editor of the Journal of Economic Geology are also thanked for their constructive comments.

References

- Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489–510.
- Hitzman, M.W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when and why? In: Porter, T.M., (Editor), *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective*. Vol. 1. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 9–25
- Mokhtari, M.A.A., Hossein Zadeh, Gh. and Emami, M.H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. *Journal of Earth System Science*, 122(3): 795–807.
- Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M. and Nabatian, Gh., 2017. Geochemistry and potential resource of rare earth element in the IOA deposits of Taram area, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 92: 529–541.
- Nabatian, Gh. and Ghaderi, M., 2014. Mineralogy and geochemistry of the rare earth elements in iron oxide-apatite deposits of the Zanjan region. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*. 24(93): 157–170. (in Persian with English abstract)