

Investigation of geochemical behavior of rare elements in Moshirabad granite- pegmatite system (southwest of Qorveh, Kordestan)

Maryam Mohamadizadeh ¹, Seyed Hossein Mojtahedzadeh ^{1*} and Farimah Ayati ²

¹ Mining and Metallurgical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran

² Department of Geology, Payam Noor University, Iran

Abstract

The Fertile pegmatites are known as the most important source of strategic and rare elements. These coarse-grained granitic units are related to potentially granitic intrusions and the identification of the parental intrusion is the first step of their exploration and recognition. In the present paper, the Moshirabad granite-pegmatite system located in southwest of Qorveh has been studied using bulk-rock data and available geological information in order to consider rare elements behavior and their contents. The investigations show that the studied igneous units did not formed in a unique fractionation succession, but rather happened separately in parallel differentiation processes. During sequential injections and development of fractionation (Rb increase and K/Rb decrease), the metals such as Sr, Zn, Ba, REEs, Th, Zr, and Hf were depleted whereas, the elements including Nb, Ta, Be, and Ga were enriched. In addition, the evidences imply that hydrothermal activities, also, involved in the concentration and depletion of the elements.

Key words: rare elements, geochemical indicators, LCT granite- pegmatite system, Moshirabad intrusive body, Ebrahim Attar pegmatite

* hmojtahed@yazd.ac.ir

بررسی رفتار زمین‌شیمیایی عنصرهای کمیاب در سیستم گرانیت - پگماتیت مشیرآباد (جنوب‌باختری قروه، کردستان)

مریم محمدی‌زاده^۱، سیدحسین مجتهدزاده^{۱*} و فریماه آیتی^۲

^۱ دانشکده مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

چکیده

پگماتیت‌های بارور، مهم‌ترین خاستگاه عنصرهای کمیاب و راهبردی به‌شمار می‌روند. این واحدهای گرانیتی درشت‌دانه با توده‌های گرانیتی پتانسیل‌دار ارتباط زایشی دارند و نخستین گام برای اکتشاف آنها، شناسایی و اکتشاف توده‌های گرانیتی مادر است. در این مقاله، سیستم گرانیت-پگماتیت مشیرآباد در جنوب‌باختری قروه، با هدف بررسی رفتار و محتوای عنصرهای کمیاب، با به‌کارگیری داده‌های سنگ کل و اطلاعات زمین‌شناسی موجود بررسی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند سنگ‌های آذرین توده مشیرآباد در پی یک فرایند جدایش بلوری پدید نیامده‌اند، بلکه پیدایش آنها به‌صورت جداگانه و موازی هم رخ داده است. در پی تزریق‌های متوالی و پیشرفت فرایند سنگ‌ساز جدایش ماگما که با افزایش Rb و کاهش K/Rb همراه است، محتوای فلزهایی مانند Sr، Zn، Ba، REEs، Th، Zr و Hf در ماگمای مادر کم شده است؛ اما محتوای فلزهایی مانند Nb، Ta، Be و Ga افزایش یافته است. همچنین، شواهد نشان می‌دهند فعالیت‌های گرمایی نیز در تمرکز یا رقیق‌شدن عنصرها دخیل بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: عنصرهای کمیاب، شاخص‌های زمین‌شیمیایی، سیستم گرانیت-پگماتیت نوع LCT، توده آذرین درونی مشیرآباد، پگماتیت ابراهیم‌عطار

مقدمه

تانتالیم، نیوبیم، زیرکونیم، بریلیم، آنتیموان، تنگستن، کبالت، طلا و عنصرهای خاکی کمیاب هستند (Linnen *et al.*, 2012). این فلزها در صنعت و تکنولوژی، کاربردهای مهمی دارند و

فلزهای استراتژیک برای اقتصاد یک کشور بسیار با اهمیت هستند. لیست این فلزها برای هر کشور متفاوت است؛ اما عموماً شامل اورانیم،

* hmojtahed@yazd.ac.ir

LCT از نوع S یا I و پرآلومین هستند. این گرانیته‌ها، میزبان کانی‌سازی عنصرهای کمیابی مانند لیتیم، سزیم، تانتالیم، روبیدیم، بریلیم و نیوبیم هستند و پگماتیت‌های نوع LCT را پدید می‌آورند. گرانیته‌های نوع NYF بیشتر از نوع A و پرآلکالین هستند و پگماتیت‌های نوع NYF را پدید می‌آورند. این گرانیته‌ها میزبان کانی‌سازی‌های نیوبیم، ایتیریم، فلئور، زیرکونیم، اورانیم، توریم، تیتانیم و عنصرهای خاکی کمیاب هستند (Cerny, 1989; Ercit, 2005).

بر پایه اهمیت اقتصادی گرانیته‌های بارور، بررسی زمین‌شیمیایی گرانیته‌ها در ایران، با نگاه ویژه به رفتار عنصرهای کمیاب، یک ضرورت است. گرانیته‌های بارور شناسایی شده، اهداف خوبی برای کارهای اکتشاف تفصیلی برای اکتشاف فلزهای استراتژیک خواهند بود. از جمله این بررسی‌ها می‌توان به پژوهش‌های Arjmandzadeh و همکاران (۲۰۱۳) و Didar و همکاران (۲۰۱۴) درباره پتانسیل عنصرهای کمیاب در گرانیته‌های جنوب مشهد و بلوک لوت اشاره کرد. همچنین، کارهای Breaks و همکاران (۲۰۰۵) در زمینه بررسی پگماتیت‌های بارور نوع پرآلومین ایالت سوپریور واقع در آنتاریو، کانادا، و Melcher و همکاران (۲۰۱۵) درباره پگماتیت‌های نیوبیم-تانتالیم-قلع‌دار در آفریقا از کارهای اکتشافی برای شناسایی پتانسیل‌های عنصرهای کمیاب هستند.

مجموعه گرانیته-پگماتیت مشیرآباد در جنوب‌باختر شهرستان قروه جای گرفته است و بخشی از پهنه ساختاری سنج - سیرجان است. این پهنه میزبان توده‌های گرانیته‌ی گوناگون است. با وجود اطلاعات زمین‌شناسی جامع از این پهنه، بررسی‌های سنگ‌شناسی فراوان و وجود داده‌های سنگ کل از

برای برخی از آنها در صنعت، جایگزینی وجود ندارد (Gunn, 2014). سیستم گرانیته-پگماتیت بارور، مهم‌ترین منبع عنصرهای ناسازگار به‌شمار می‌رود. بسیاری از این عنصرها از فلزهای استراتژیک نیز هستند (Linnen *et al.*, 2012).

به باور پژوهشگران باید ویژگی‌های سنگ‌زمین‌شیمیایی محیط‌های زمین‌شناسی میزبان کانه‌زایی، با دیدگاه شناسایی فرایندهای زمین‌شیمیایی حاکم بر کانه‌زایی بررسی شوند تا نتایج به‌دست‌آمده در مقیاس ناحیه‌ای (پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی) برای تفکیک پهنه‌های پتانسیل‌دار به کار برده شوند. از این‌رو، زمین‌شیمی توده‌های سنگی بارور و تفکیک سنگ‌های بارور و عقیم را مسیر پژوهشی مهمی در چشم‌انداز آتی علم زمین‌شیمی برای پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی دانسته‌اند (Cohen *et al.*, 2010). پگماتیت‌های بارور از عنصرهای کمیاب، اقتصادی‌ترین منبع فلزهای ناسازگار و استراتژیک هستند (Cerny *et al.*, 2012; Gunn, 2014). این واحدهای گرانیته‌ی درشت‌دانه با توده‌های گرانیته‌ی بارور وابستگی زایشی دارند و بسته به محتوای عنصرهای کمیاب و ترکیب‌های فرار، معمولاً در فاصله تا ده کیلومتری توده گرانیته‌ی مادر پدید می‌آیند. از این‌رو، نخستین گام برای اکتشاف پگماتیت‌های با عنصرهای کمیاب بررسی گرانیته‌های خاستگاه آنهاست (Breaks *et al.*, 2003, 2005). مسئله اصلی در اکتشاف این گرانیته‌ها، تفکیک گرانیته‌های بارور و عقیم است.

گرانیته‌ی پهنه‌ها بر پایه محتوای عنصرهای کمیاب به دو گروه لیتیم - سزیم - تانتالیم‌دار (LCT) و نیوبیم - ایتیریم - فلئوردار (NYF) رده‌بندی می‌شوند (Cerny, 1989). گرانیته‌ی پهنه‌های نوع

سیستم گرانیت-پگماتیت پرآلومین نوع S

گرانیتوئیدهای پرآلومین نوع S به شکل پلوتون‌ها یا باتولیت‌های بزرگ با رخنمون‌هایی با گستردگی بزرگ‌تر از ده کیلومتر مربع تشکیل می‌شوند. دایک‌های پگماتیتهای از توده گرانیتی خاستگاه می‌گیرند و در شعاع تا نزدیک به ده کیلومتری از توده مادر، در راستای شکستگی‌ها و در منطقه‌ای به گستردگی ۲۰-۱۰ کیلومتر مربع توزیع می‌شوند (Breaks and Tindle, 1997). توالی سنگی پدیدآمده در توده گرانیتی مادر از کف به سقف دربردارنده بیوتیت‌گرانیت، دو میکا لوکوگرانیت، مسکوویت‌گرانیت درشت دانه، لوکوگرانیت پگماتیتهای و دایک‌های پگماتیتهای است. واحدهای سنگی مراحل پایانی تبلور ماگمای مادر (پگماتیت‌ها)، در سقف و سطوح بالاتر از سقف باتولیت جای می‌گیرند (شکل ۱) (Sinclair, 1996; Breaks and Tindle, 1997).

هر واحد سنگی در توده گرانیتی نوع S بارور از چند مجموعه کانی مانند کانی‌های اصلی، فرعی، ثانویه و اقتصادی (میزبان عنصرهای کمیاب) پدید آمده است. کوارتز، پتاسیم‌فلدسپار، به مقدار کمتری پلاژیوکلاز و بیوتیت از کانی‌های سازنده گرانیت‌ها هستند. مسکوویت، کلدیریت، تورمالین، گارنت، آپاتیت، زیرکن و به مقدار بسیار کمتر، مونازیت، ایلمنیت و آلانیت از کانی‌های فرعی به‌شمار می‌روند. به ترتیب پهنه‌بندی کانیایی، بریل، کانی‌های نیوبیم-تانتالیم‌دار (تانتالیت، کلمبیت، پیروکلر، میکرولیت)، کانی‌های لیتیم‌دار (اسپودمن و پتالیت) و پلوسیت (حاوی سزیم) از جمله کانی‌های اقتصادی در توده هستند (شکل ۱) (Selway et al., 2005).

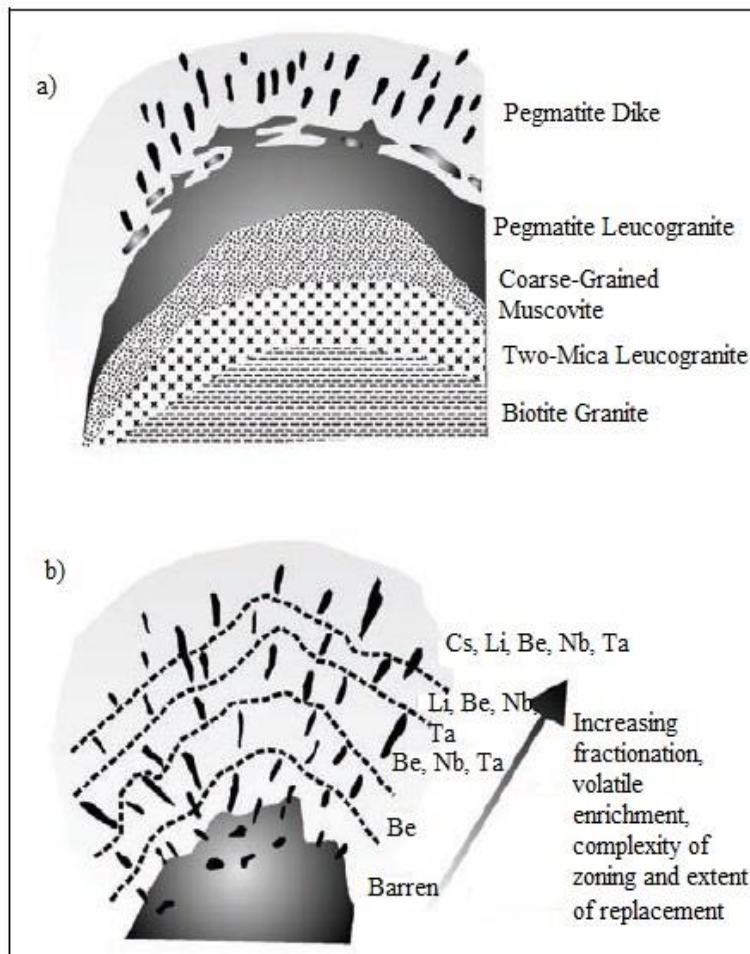
گرانیتوئیدهای آن، زمین‌شیمی گرانیتوئیدها با محوریت شناسایی توده‌های پتانسیل‌دار محجور مانده است. بهره‌گیری از پتانسیل‌های اطلاعاتی و داده‌های موجود یک تدبیر خردمندانه است و باعث کاهش هزینه مطالعات اکتشافی و سرعت بخشیدن به انجام این نوع بررسی‌ها می‌شود.

در این مقاله، سیستم گرانیت-پگماتیت مشیرآباد با هدف بررسی رفتار و محتوای عنصرهای کمیاب با استفاده از داده‌های سنگ کل و اطلاعات زمین‌شناسی در دسترس بررسی شده است.

Gardideh (۲۰۱۰a)، ترکیب سنگ‌شناسی و سنگ‌زایی توده آذرین درونی مشیرآباد را بررسی کردند و دریافتند این توده دربردارنده واحدهای سنگی آذرین دیوریت، مونزودیوریت، کوارتز دیوریت، کوارتز مونزودیوریت، تونالیت، گرانودیوریت و مونزوگرانیت تا سینوگرانیت است. همچنین، این توده سرشت متالومین تا کمی پرآلومین دارد و در پی تبلوربخشی ماگمای نوع I به‌دست آمده از ذوب‌بخشی مواد پوسته‌ای پدید آمده است.

Sepahi و همکاران (۲۰۱۲) زمین‌شیمی عنصرهای اصلی در کل سنگ و کانی‌های پلاژیوکلاز، پتاسیم‌فلدسپار و آمفیبول و دما و فشار پیدایش توده را بررسی کردند و دریافتند توده مشیرآباد در پی تزریق‌های متوالی ماگما در دمای ۵۵۶ تا ۷۱۶ درجه سانتیگراد، فشار ۲/۳ تا ۶ کیلوبار و ژرفای ۷ تا ۲۰ کیلومتر پدید آمده است.

Salami و همکاران (۲۰۱۴) دایک‌های پگماتیتهای رخنمون‌یافته در نزدیکی توده را بررسی کرده‌اند. شناسایی پهنه‌بندی در ترکیب کانی‌شناسی این واحدهای درشت‌دانه از نتایج این پژوهش بوده است.



شکل ۱- پهنه‌بندی سنگ‌ها و عنصرهای کمیاب در سیستم گرانیت-پگماتیت نوع LCT (Sinclair, 1996; Selway *et al.*, 2005)

گرانیت پرآلومینی که مقدار میانگین عنصرهای کمیاب (مانند: Cs, Ga, Li, Nb, Rb, Sn و Ta در داده‌های سنگ کل آن دست کم سه برابر میانگین مقدار آن عنصرها در پوسته بالایی باشد هدف خوبی برای اکتشاف دایک‌های پگماتیتهی بارور است (Selway *et al.*, 2005). با افزایش درجه جدایش بلوری (تفریق)، محتوای عنصرهای یادشده در گرانیت‌ها افزایش و محتوای Ti, Ba, Sr و Zr کاهش می‌یابد (Cerny and Meintzer, 1989; Cerny, 1988). نسبت‌های عنصری K/Rb, Zr/Hf, Nb/Ta و Fe/Mn نیز شاخص‌های خوبی برای تعیین درجه جدایش بلوری در واحدهای آذرین درونی و شناسایی توده‌های بارور و عقیم هستند. میانگین مقدار این نسبت‌ها در

توده‌های گرانیتی مرتبط با پگماتیت‌های نوع LCT سرشار از سیلیس ($\text{SiO}_2 > 70 \text{ wt}\%$) هستند. شاخص اشباع‌شدگی از آلومین آنها از یک بزرگ‌تر است؛ یعنی سرشار از کانی‌های آلومینیوم‌دار (مانند: گارنت، مسکوویت و تورمالین) هستند. شاخص اشباع‌شدگی از آلومین پگماتیت‌ها معمولاً از گرانیت‌های مادر بزرگ‌تر است. همچنین، گرانیت‌ها مقدار کلسیم، آهن و منیزیم کمی دارند. نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ آنها متغیر است. پگماتیت‌ها پتاسیم بیشتر و آپلیت‌ها سدیم بیشتر دارند (Cerny and Meintzer, 1988). مقدار عنصرهای کمیاب شاخص خوبی برای شناسایی توده‌های آذرین درونی مرتبط با پگماتیت‌های حاوی عنصرهای کمیاب است.

گرانیت‌های پرآلومین بارور به‌گونه چشم‌گیری از میانگین مقدار آنها در پوسته بالایی کمتر است (Selway *et al.*, 2005). پژوهش‌ها نشان داده‌اند گرانیت‌های پرآلومین بارور، نسبت Nb/Ta کوچک‌تر از ۵، K/Rb کمتر از ۱۵۰ و Zr/Hf کمتر از ۱۸ دارند (Ballouard *et al.*, 2016). نسبت Fe/Mn نیز کمتر از ۱۵ است. از آنجایی که عنصرهای اصلی تحت‌تأثیر دگرسانی‌ها قرار می‌گیرند، نسبت‌هایی مانند Fe/Mn در برابر نسبت‌های عنصرهای کمیاب کمتر قابل اعتماد هستند (Selway *et al.*, 2005).

زمین‌شناسی منطقه مشیرآباد

توده آذرین درونی مشیرآباد در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان و باختر شهرستان قروه، در استان کردستان، رخنمون دارد. سن زمین‌شناسی پیدایش این توده تا کنون به‌دست نیامده است. سن‌سنجی‌های U-Pb برای گابرو و مونزونیت در نزدیکی روستای میهم، در جنوب قروه، به ترتیب سن 149 ± 0.2 و 151 ± 0.2 میلیون سال پیش و برای لوکوگرانیت صوفی‌آباد سنندج، در ۴۵ کیلومتری شمال‌باختری قروه، سن $156/5 \pm 0.6$ میلیون سال پیش را نشان می‌دهند (Mahmoudi *et al.*, 2011; Sepahi *et al.*, 2012). از این رو، پیدایش توده مشیرآباد چه‌بسا در دوره ژوراسیک پایانی روی داده است.

سنگ‌های حد واسط (مانند دیوریت، مونزودیوریت، کوارتزیدیوریت، کوارتزمونزودیوریت و دایک‌های میکرویدیوریتی)، گرانودیوریت-تونالیت (بخش حجیم توده) و گرانیت از واحدهای آذرین سازنده این توده به‌شمار می‌روند (Aliani, *et al.*, 2018). در پی انجماد سریع ماگمای مادر، میانبارهایی با سرشفت میکروتونالیت-میکروگرانودیوریت در بخش حاشیه توده و درون واحد تونالیتی-گرانودیوریتی پدید آمده‌اند (جدول ۱؛ شکل ۲). همچنین، دایک‌های آپلیتی و پگماتیت‌های ابراهیم‌عطار در فاصله دورتری از توده آذرین درونی و در باختر آن پدید آمده‌اند (Sepahi *et al.*, 2012) (شکل ۲). این دایک‌ها منطقه‌بندی کانی‌شناسی دارند (جدول ۲) و در مرز آنها با واحدهای آهکی و شیستی تریاس-ژوراسیک میزبان، اسکارن‌های قلع-تنگستن پدید آمده‌اند (Salami *et al.*, 2014).

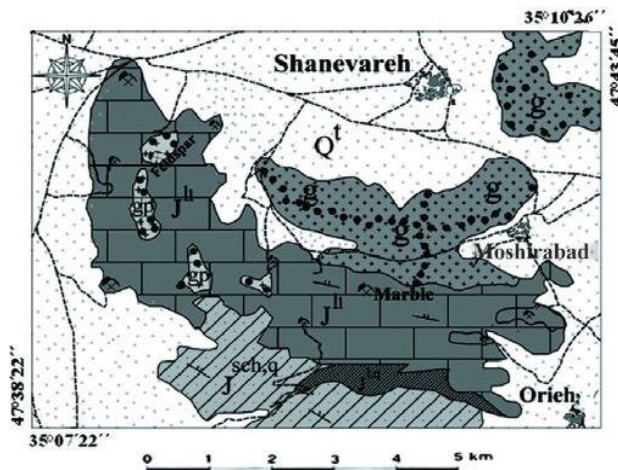
به باور Gardideh و همکاران (۲۰۱۰b)، توده آذرین درونی مشیرآباد در پی ماگماتیسم متالومین تا کمی پرآلومین نوع I کمان‌های آتشفشانی (VAG) مرز فعال قاره‌ای پدید آمده است و خاستگاه سنگ‌مادر آن پوسته زیرین بوده است. گرمای لازم برای ذوب‌بخشی مواد پوسته‌ای را اندازه‌های گوشته‌ای پدیدآمده از فرورانش

جدول ۱- ترکیب کانی شناسی سنگ‌های تشکیل‌دهنده مجموعه نفوذی مشیرآباد (Sepahi et al., 2012)

واحد‌های سنگی	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی	کانی‌های ثانویه
حد واسط	پلاژیوکلاز (۴۵-۶۰ درصد حجمی)، آمفیبول (هورنبلند، ۲۰-۳۰ درصد حجمی)، کوارتز (۱۰-۱۵ درصد حجمی) آلکالی فلدسپار (ارتوکلاز: ۸-۱۵ درصد حجمی)، بیوتیت (تا ۷ درصد حجمی)		سریسیت، زویزیت و کلینوزویزیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کانی‌های رسی
تونالیت-گرانودیوریت	پلاژیوکلاز (۳۵-۴۵ درصد حجمی)، کوارتز (۱۵-۳۰ درصد حجمی)، هورنبلند (۱۵-۲۰ درصد حجمی)، بیوتیت (۱۰-۱۵ درصد حجمی)	تیتانیت، زیرکن و آپاتیت	سریسیت، اپیدوت، کلریت، کلسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن
گرانیت (بیشتر مونوزوگرانیت)	کوارتز (۳۰-۴۰ درصد حجمی)، پلاژیوکلاز (۲۵-۳۰ درصد حجمی)، آلکالی فلدسپار (۲۰-۳۰ درصد حجمی)، بیوتیت (۱۰-۱۵ درصد حجمی)		سریسیت، اپیدوت، کلریت
آپلیت	آلکالی فلدسپار (۴۵٪)، شامل ارتوکلاز و میکروکلین، کوارتز (۲۵-۴۰ درصد حجمی) و پلاژیوکلاز (۱۲-۱۰ درصد حجمی)	بیوتیت، تیتانیت، زیرکن، آپاتیت	-

جدول ۲- منطقه‌بندی کانیاپی دایک‌های یگماتیته کوه ابراهیم عطار (Salami et al., 2014)

پهنه	ترکیب کانی‌شناسی
حاشیه‌ای	فلدسپار (۴۵ درصد حجمی)، کوارتز (۳۵ درصد حجمی)، مسکوویت (۱۰ درصد حجمی)، بیوتیت (۹ درصد حجمی)، تیتانیت (۱ درصد حجمی)
دیواره‌ای	فلدسپار (۴۰ درصد حجمی)، کوارتز (۴۰ درصد حجمی)، مسکوویت (۱۵ درصد حجمی)، بیوتیت (۳ درصد حجمی)، گارنت (۲ درصد حجمی)
میانی	فلدسپار (۴۰ درصد حجمی)، کوارتز (۳۰ درصد حجمی)، مسکوویت (۸ درصد حجمی)، بیوتیت (۲ درصد حجمی)، بریل (۲۰ درصد حجمی)
مرکزی	کوارتز دودی (۷۰ درصد حجمی)، پتاسیم‌فلدسپار (۳۰ درصد حجمی)، بریل



LEGEND

<p>QUATERNARY</p> <p>JURA</p> <p>TRASSIC-JURASSIC</p>	<p>Qt: Low level terraces</p> <p>gp: Granite pegmatite</p> <p>g: Intermediate and felsic plutonic rocks</p> <p>J: White to cream marble thick bedded to massive</p> <p>J^{l,q}: Alternation of quartzite and marble</p> <p>J^{sch,q}: Alternation of amphibole schist and marble lenses</p>	<p>Village</p> <p>Road</p> <p>Mine</p> <p>Sample Locality</p> <p>Bedding Strike</p>
---	---	---

شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی توده آذرین درونی مشیرآباد در باختر قروه (Sepahi et al., 2012)

گردآوری داده و روش تجزیه

داده‌های به‌کاربرده‌شده در بردارنده داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه ۳۵ نمونه سنگی هستند. داده‌های پنج نمونه در فرایند نمونه‌برداری از پگماتیت ابراهیم‌عطار به‌دست آمده‌اند (جدول‌های ۳ و ۴). دیگر داده‌ها از مقاله منتشرشده Sepahi و همکاران (۲۰۱۲) برگرفته شده‌اند (جدول ۴). نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه در آزمایشگاه زرآما و به روش پلاسمای القایی به‌همراه طیف‌سنج جرمی (ICP-MS) برای ۵۸ عنصر (عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی کمیاب) تجزیه شده‌اند؛ اگرچه فلزهای کمیاب و عنصرهای خاکی کمیاب بیشتر مورد نظر بوده‌اند. گفتنی است روش پلاسمای القایی به‌همراه طیف‌سنج جرمی از پیشرفته‌ترین روش‌های طیف‌سنجی نوری و تجزیه

چندعنصری است که غلظت عنصرها را از صدم تا هزارم پی‌پی‌بی (ppb) اندازه‌گیری می‌کند. در این روش، نمونه‌ها محلول می‌شوند و سپس عنصرها در دمای بالا به‌صورت پلاسمای در می‌آیند و تشعشع بالایی از خود تولید می‌کنند. طیف‌سنج جرمی برپایه جرم، این تشعشع را با دقت بسیار بالا تفکیک می‌کند. هر طیف در آشکارساز برپایه شدت طیف اندازه‌گیری و ثبت می‌شود (Payeh Ghadr and Moghadasi, 2018).

جدول ۳- مختصات جغرافیایی نمونه‌های جدید برداشت‌شده از

پگماتیت ابراهیم‌عطار

Sample No.	nPeg-1	nPeg-2	nPeg-3	nPeg-4	nPeg-5
Longitude	47°39'24"	47°39'15"	47°39'30"	47°39'41"	47°39'35"
Latitude	35°08'49"	35°08'43"	35°08'52"	35°09'41"	35°09'36"

جدول ۴- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی عنصرهای اصلی (برپایه درصدوزنی)، کمیاب و خاکی کمیاب (برپایه ppm) در واحدهای سنگی توده آذرین درونی مشیرآباد (nPeg: پگماتیت؛ داده‌های Sepahi و همکاران (۲۰۱۲): Dio: دیوریت، Gro-Ton: گرانودیوریت- تونالیت، Grt: گرانیت، Peg: پگماتیت)

Samples No.	Dio	Dio	Dio	Dio	Dio	Dio	Gro- Ton	Gro- Ton	Gro- Ton	Gro- Ton	Gro- Ton	Gro- Ton
SiO ₂	51.3	56.3	56.7	53.7	51.6	50.1	60.2	65.5	65.6	63	60.6	60.8
TiO ₂	0.8	1	1	0.9	0.8	1.1	0.6	0.5	0.5	0.5	0.9	0.8
Al ₂ O ₃	13.4	15.6	18.9	14	12.6	16.3	18.6	17.3	17.4	18.2	15.8	16.4
Fe ₂ O ₃	7.2	6.3	6.5	9	6.9	7.4	4.4	3.5	3.4	4	5.3	5.6
MnO	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MgO	11.1	6.7	2.2	8.2	15.1	8.2	1.3	1.1	1.2	1.1	3.4	3
CaO	7.5	7.2	7.5	9.6	11.1	10.4	4.6	3.6	3.8	4.1	5	5.8
Na ₂ O	2.5	3.2	3.9	3.3	2.4	2.6	5.1	5.4	5.3	5.1	4.1	3.9
K ₂ O	2.9	1.4	1.3	0.5	1.1	1.1	2.1	1.9	1.9	2	2.2	2
P ₂ O ₅	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Li												
Cs	2.7	2.8	0.9	0.7	0.8	1.3	1.7	1.9	2.2	1.6	1.4	2.5
Be												
Rb	133	59	37	17	39	49	70	80	79	62	103	76
Sr	350	441	612	395	296	451	800	577	562	533	432	761
Ba	420	291	457	73	212	517	650	742	494	582	504	489
Zr	120	101	66	77	87	103	350	315	259	295	173	115
Hf	3	2.8	2.5	2.1	2.6	2.5	8	7.5	6.3	7.5	4.2	3.3
Nb	9	11.4	42.2	9.3	9	14.3	21	24.7	37.6	31.6	23.3	18.3
Ta	0.7	0.8	3.5	0.7	0.7	0.8	1.5	2.1	3.2	2.8	1.6	1.2
Pb												
Zn	62	77	72	80	60	70	49	61	66	53	73	79
Sn	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1
Th	4.6	6.7	8.6	2.1	4.4	2.3	12	19.1	14.6	17.1	11.1	8.5
U	1.2	2.2	2	0.9	1	0.5	2.9	2.4	3.8	2.1	3.1	2
Ga	15	17.5	21.2	15.7	13.1	14.7	22	21.2	22.6	20.3	17.4	20.6
Y	11.7	15.6	34.8	19.2	12.7	18.2	13.5	21.1	28.4	20.9	19.1	17.1
LREE	74.3	82.7	202.3	57.4	79.6	77.5	147.5	262.7	210.6	286.3	127.1	122.2
MREE	7	8	21.6	9.3	8.7	9.7	7.2	15.1	15	14.5	10.4	10.2
HREE	2.9	3.5	8.4	4.6	3.2	4.3	3.9	5.4	6.5	5.8	4.7	4

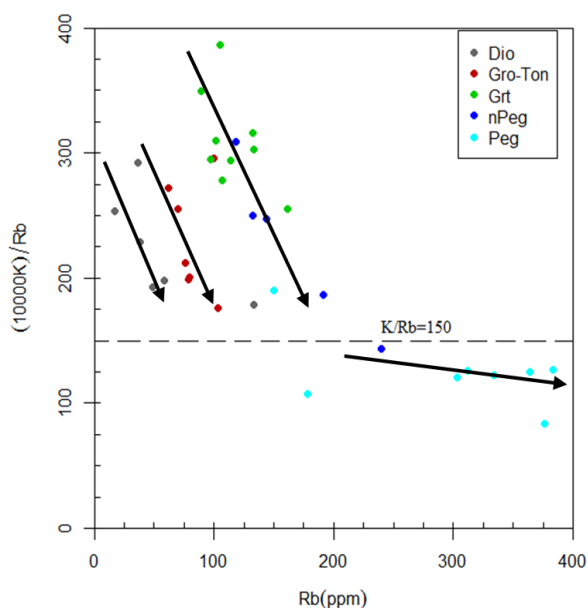
جدول ۴- ادامه

Samples No.	Gro-Ton	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Peg	Peg
SiO ₂	67.9	74.2	71.5	72.1	73.3	73.1	71.3	69.2	72.4	76.3	75.4	74.1
TiO ₂	0.3	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0
Al ₂ O ₃	14.5	12.2	14.1	13.7	14.6	13.3	14.4	14.6	12.9	12.3	12.7	14.1
Fe ₂ O ₃	2.6	0.9	2.3	1.6	1.3	1.7	1.3	2.3	1.3	0.7	0.8	0.2
MnO	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0
MgO	0.7	0.1	0.5	0.4	0.2	0.1	0.4	0.5	0.2	0.1	0	0
CaO	2.3	0.8	1.7	1.4	1.8	2.7	2.5	2.5	0.9	0.7	1	1.4
Na ₂ O	4.3	3.5	4.1	4	4.3	3.9	3.6	4.8	3.6	3.3	4.4	3.8
K ₂ O	3.6	4.9	4	3.8	3.8	3.5	4.9	3.6	5	5	3.4	4.9
P ₂ O ₅	0.1	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0	0.1
Li												
Cs	1.5	0.7	0.9	0.8	0.9	0.6	0.7	0.5	0.9	0.8	1.9	2.9
Be												
Rb	100	105	114	90	102	98	133	107	161	132	150	334
Sr	340	70	270	296	226	604	163	293	100	78	118	50
Ba	750	150	670	731	662	502	295	676	280	151	182	49
Zr	200	60	180	125	74	128	134	199	120	62	49	23
Hf	5	3	4	3.4	2.3	3.7	4.1	4.9	4	2.6	2.5	1.8
Nb	24	25	26	19.8	19.7	21.3	38.7	23.4	20	32.6	51.9	102.5
Ta	1.9	2.1	1.8	1.7	1.9	1.6	4.9	2.1	2.2	3.6	6.8	28
Pb												
Zn	40	11	44	35	16	14	18	37	20	8	10	13
Sn	2	<1	2	1	1	1	5	2	2	1	3	1
Th	15.8	19	18.5	19.3	11.1	19	39.1	20.6	21.2	20.7	6.3	6.4
U	2.9	5.2	3.2	3.7	3.3	4.5	5.1	3.4	3.7	6.9	6	12.8
Ga	18	14	17	15.3	14	21.5	19.7	18.5	16	14.9	18.7	24.3
Y	15.3	9.3	13.3	9.1	8.7	11.2	33.3	15	11	13.9	21	13.4
LREE	141.9	40.7	147.1	121.6	80.5	116.4	144.6	177.1	67.8	43.3	45.7	61
MREE	7.3	4.1	6.4	5.7	4.8	5.8	13.2	8.2	4.5	5.3	7.9	4.7
HREE	3.8	2.7	3.9	2.5	2.6	2.8	8.3	4	3	3.7	6.3	3.6

جدول ۴- ادامه

Samples No.	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	Peg	nPeg- 1	nPeg- 2	nPeg- 3	nPeg- 4	nPeg- 5
SiO ₂	74.8	71.2	71.2	73.4	71.5	71.2	72.7	70.9	73.4	75	74
TiO ₂	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0
Al ₂ O ₃	14.4	14.8	16.2	13	13.9	14.6	12.5	12	11.8	12.3	13
Fe ₂ O ₃	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.8	0.8	0.6	0.8	0.7	0.6
MnO	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0
MgO	0	0	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
CaO	0.4	0.6	0.8	0.6	0.6	0.4	0.8	2.2	0.8	0.5	0.7
Na ₂ O	4.8	4.3	7.6	3.8	5.1	5.3	3.4	3.6	3.3	3.2	3.5
K ₂ O	4.7	5.9	2.3	5.5	4.4	3.8	4.3	4.3	4	4.4	4.2
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.1
Li							7	5	7	3	9
Cs	3.4	3.7	1.9	2.9	2	6.3	3.2	4.1	2.9	1.1	4.9
Be							4.4	3	4.4	3.4	5.5
Rb	312	383	179	364	303	376	144	191	132	118	240
Sr	15	13	15	10	10	<10	106	11	107	97	51
Ba	7	4	9	<10	<10	<10	333	11	341	311	80
Zr	9	14	13	30	10	20	14	21	16	25	19
Hf	0.6	0.9	1	2	<1	1	0.9	1	0.9	1.3	1.5
Nb	75.3	35	68.1	109	38	61	36.3	60.1	31.5	40.5	70.5
Ta	12.5	6.3	12.8	19.8	7.2	8.8	6	8.3	5.1	7.5	10.5
Pb							111	52	70	103	90
Zn	10	5	16	7	8	12	23	22	22	9	19
Sn	1	1	1	1	<1	8	2.2	3.9	2.4	1.3	2
Th	5.5	4.2	3.7	12.9	9.9	4.3	20.4	11.8	20.6	20.1	17.5
U	7.6	5.5	5.4	21.7	5.4	4.5	3.4	5.7	2.6	3.8	6.2
Ga	21.6	22.7	25.3	19	25	33	18.5	20	17.6	17.1	22
Y	13.5	7.1	10.2	14.8	6.3	6.7	20.6	28.6	18.7	19.8	15.6
LREE	21.8	6.9	13.9	38.4	27.5	11.4	89.8	53.8	86.5	85	48
MREE	4.8	2.5	3.8	6.5	2.7	2.8	7.7	7.3	7.5	8	6.2
HREE	3.2	1.8	2.9	4.4	1.7	1.6	5.2	7.4	4.6	5.5	3.7

بلوری یکسان پدید نیامده‌اند (شکل ۳)؛ بلکه سه گروه سنگی دیوریت، تونالیت-گرانودیوریت و گرانیت به‌صورت جداگانه و موازی یکدیگر پدید آمده‌اند. این نکته با پیشنهاد Sepahi و همکاران (۲۰۱۲) دربارهٔ پیدایش تودهٔ مشیرآباد در پی تزریق‌های پی‌درپی ماگما به سطوح بالاتر همخوانی دارد. همچنین، دایک‌های پگماتیتی با محتوای روبیدیم بیشتر از ۲۱۰ پی‌پی‌ام و نسبت K/Rb کمتر از ۱۵۰ در امتداد جدایش بلوری واحد گرانیتی پدیدآمده‌اند و واحدهای جدایش‌یافته‌تری هستند.



شکل ۳- نمودار Rb در برابر K/Rb (Selway et al., 2005) (ضریب ۱۰۰۰۰ برای تبدیل درصد محتوای پتاسیم به پی‌پی‌ام اعمال شده است؛ Dio: دیوریت، Gro-Ton: گرانودیوریت-تونالیت، Grt: گرانیت، Peg: پگماتیت و nPeg: پگماتیت (جدید)؛ پیکان‌ها روند جدایش ماگمای مادر را نشان می‌دهند)

گفتنی است نمودارهای هارکر (شکل ۴) نیز نشان‌دهندهٔ پیدایش سه گروه سنگی یادشده هنگام افزایش محتوای سیلیس هستند.

برای بررسی رفتار زمین‌شیمیایی عنصرها از نمودارهای هارکر (عنصرهای اصلی در برابر سیلیس)، شاندا (اندیس اشباع آلومین) و نیز نمودارهای عنصرهای کمیاب در برابر سیلیس، رفتار عنصرهای کمیاب نسبت به هم و آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) بهره گرفته شد. روش آماری چندمتغیرهٔ PCA با بررسی همبستگی دو به دو پارامترها و شناسایی مؤلفه‌های اصلی تغییرپذیری با کاهش شمار پارامترها و جمع کردن آنها در مؤلفه‌های مشابه به درک بهتر و آسان‌تر فضای چندمتغیره کمک می‌کند. در این روش، معمولاً، چند مؤلفهٔ نخست بخش بزرگی از تغییرپذیری را توجیه می‌کنند. از این رو، تحلیل‌ها برپایهٔ آنها انجام می‌شوند و دیگر مؤلفه‌ها که واریانس بسیار کمتری دارند، نادیده گرفته می‌شوند (Hassani Pak and Sharafaddin, 2012).

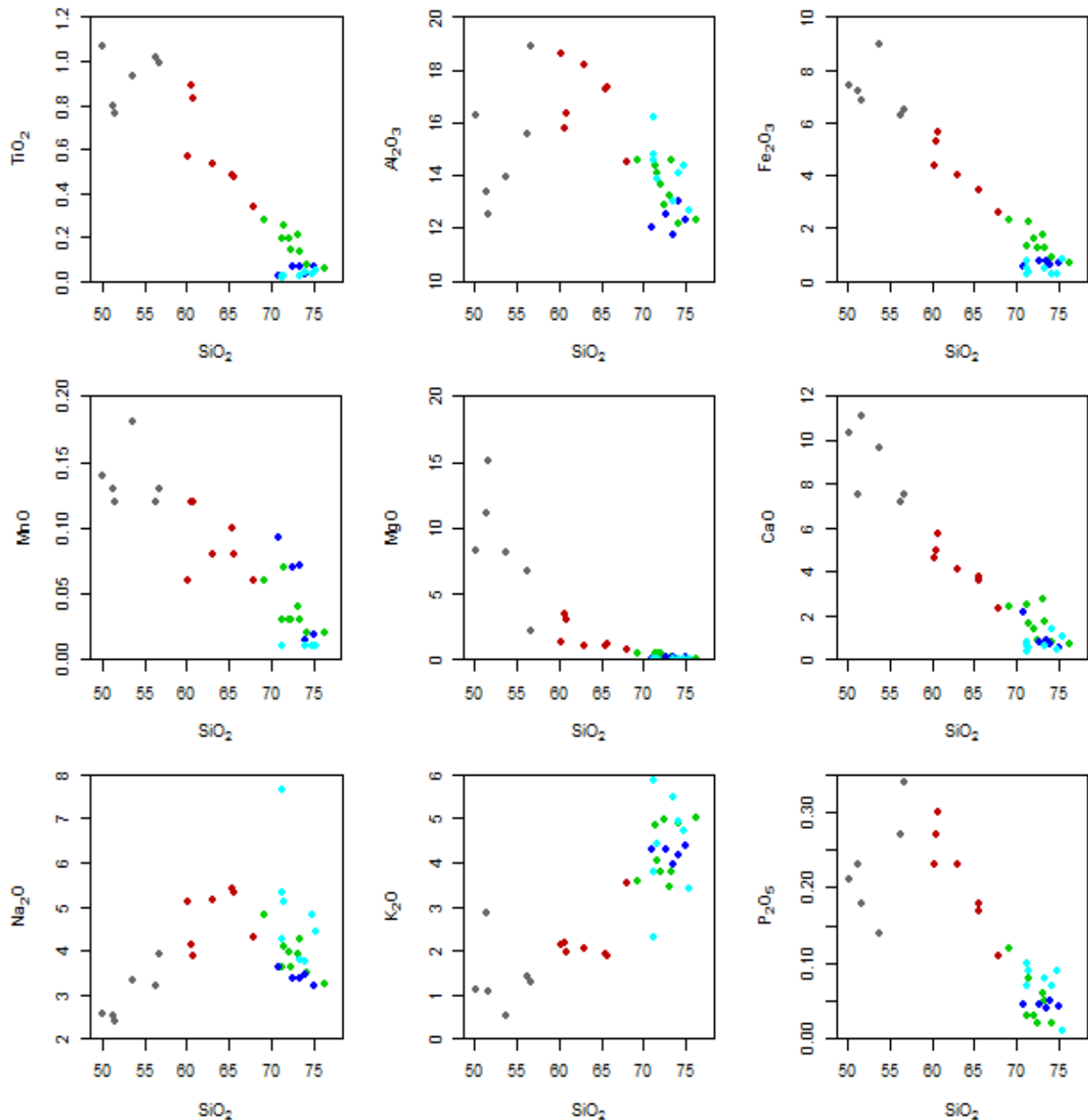
بحث

در این بخش، برپایهٔ بررسی‌های میدانی و تحلیل‌های آماری داده‌های سنگ کل در نمودارهای زمین‌شیمیایی و آنالیز مؤلفه‌های اصلی به تحلیل رفتار زمین‌شیمیایی عنصرهای اصلی و کمیاب در واحدهای سنگی سازندهٔ تودهٔ آذرین مشیرآباد پرداخته می‌شود.

سنگ‌های سازندهٔ یک تودهٔ آذرین درونی واحد معمولاً به‌طور متوالی هنگام بالآمدن ماگما، کاهش دما و فشار و پیشرفت روند جدایش بلوری پدید می‌آیند. نسبت K/Rb شاخص خوبی برای بررسی این توالی جدایش بلوری است. نمودار K/Rb در برابر Rb نشان می‌دهد واحدهای آذرین تودهٔ مشیرآباد در امتداد یک فرایند جدایش

می‌رود در توده آذرین درونی مشیرآباد، نمودار K/Rb در برابر Rb آشکارتر از نمودارهای هارکر سازوکار پیدایش واحدهای آذرین درونی را نمایش داده است.

نایبوستگی‌های پدیدآمده در توالی پیدایش سنگ‌ها در نمودارهای هارکر، به‌ویژه نمودارهای Na_2O ، Al_2O_3 و K_2O ، چه‌بسا گواهی بر پیدایش جداگانه سه واحد سنگی یادشده است. گمان

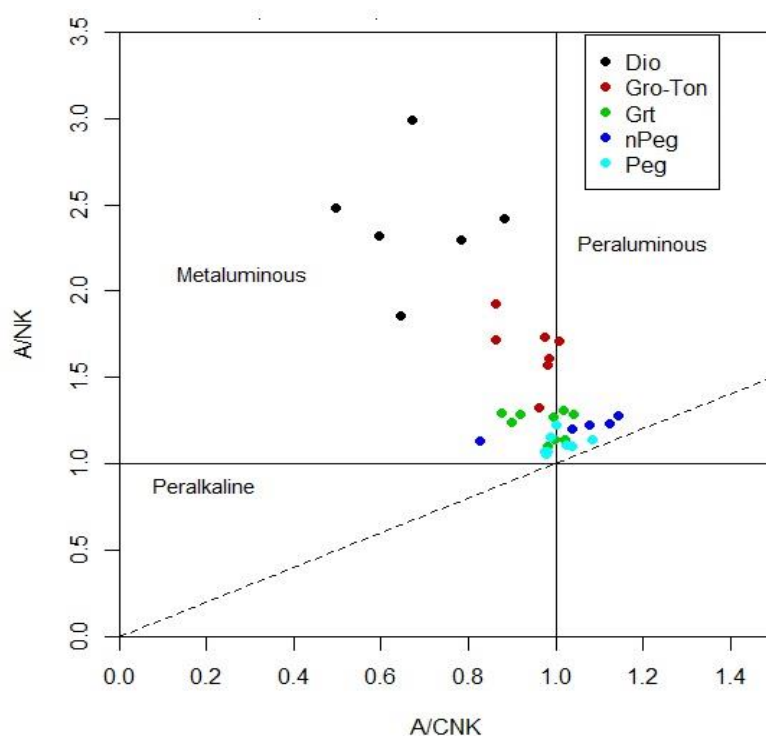


شکل ۴- نمودارهای Harker (۱۹۰۹) برای بررسی رفتار عنصرهای اصلی در برابر سیلیس در واحدهای سنگی توده آذرین درونی مشیرآباد

گرانودیوریت) سرشت متآلومین دارند، اما گرانیت و پگماتیت کمی به پرآلومین گرایش

اگرچه، سنگ‌های پدیدآمده در مراحل نخستین تزریق ماگما (دیوریت، تونالیت و

نشان می‌دهند (شکل ۵) و محتوای سیلیس آنها از ۷۰ درصدوزنی بیشتر است.



شکل ۵- نمودار شاخص اشباع آلومین Shand (۱۹۴۳) برای بررسی واحدهای سنگی توده آذرین درونی مشیرآباد

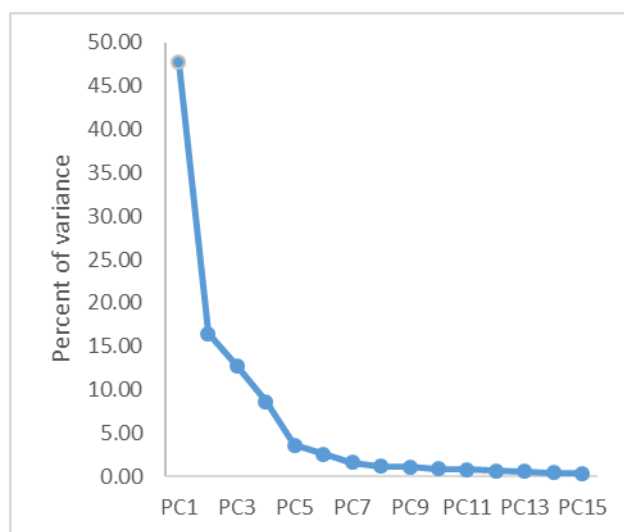
تقریبی ۱۳ درصد هستند. در این مؤلفه، اکسیدهای آلومینیم و سدیم با عنصر گالیم همبستگی مثبت، اما با شاخص درجه جدایش بلوری مذاب، یعنی نسبت K/Rb ، همبستگی منفی نشان می‌دهند. PC3 به پدیده‌های اشاره دارد که باعث شده‌اند سرشت گرانیت و پگماتیت چندان به سوی پرآلومین ($Highly\ peraluminous$) گرایش نیابد. این پدیده شاید پیامد آذرین‌بودن (یا همان نوع I بودن) خاستگاه واحدهای گرانیتی منطقه باشد.

مؤلفه اصلی یک (PC1) مربوط به فرایندهای سنگ‌ساز است که با تبلور کانی‌های سنگ‌ساز و پیشرفت فرایند جدایش بلوری مذاب همراه است.

بررسی رفتار اکسیدهای سنگ‌ساز با افزایش میزان سیلیس نشان می‌دهد محتوای عنصرهای اصلی مانند تیتانیم، آهن، منگنز، منیزیم، کلسیم و فسفر به طور معمول کاهش و پتاسیم افزایش یافته‌اند. با وجود این روند منظم، محتوای اکسیدهای آلومینیم و سدیم در گرانیت و پگماتیت با تغییر روند همراه بوده است (شکل ۴)؛ بدین معنی که هنگام پیدایش گرانیت، مقداری از آلومینیم و سدیم از مذاب مادر خارج شده‌اند. از این رو، آلبیت و کانی‌های آلومین دار مانند مسکوویت، گارنت و تورمالین در واحد گرانیتی پدید نیامده‌اند. از سوی دیگر، آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) (جدول ۵) گواه آنست که اکسیدهای آلومینیم و سدیم به همراه K/Rb و گالیم سومین مؤلفه اصلی (PC3) با واریانس

جدول ۵- آنالیز مؤلفه‌های اصلی دخیل در پیدایش سیستم گرانیت- پگماتیت مشیرآباد (پنج مولفه اصلی): PC1 با واریانس ۴۸ درصد؛ فرایندهای سنگ‌ساز و تمرکز عنصرهای کمیاب نوع LCT؛ PC2 با واریانس ۱۶/۵ درصد؛ فرایندهای سنگ‌ساز و رقیق شدن عنصرهای کمیاب سیستم‌های آکالی؛ PC3 با واریانس ۱۳ درصد؛ پدیده‌هایی که از پرآلومین ترشدن سرشت گرانیت و پگماتیت جلوگیری کرده است؛ PC4 با واریانس ۹ درصد؛ مربوط به عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (Y و HREE)؛ PC5 با واریانس ۴ درصد؛ فعالیت‌های غیرماگمایی شناسایی شده است)

PC	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
SiO ₂	0.214	0.238	-0.051	-0.016	-0.073
TiO ₂	-0.236	-0.172	0.045	0.042	0.086
Al ₂ O ₃	-0.151	0.056	0.341	-0.164	-0.013
Fe ₂ O ₃	-0.231	-0.201	0.007	0.039	0.084
MnO	-0.217	-0.188	0.008	0.135	-0.165
MgO	-0.153	-0.303	-0.106	0.058	0.149
CaO	-0.215	-0.229	-0.004	0.094	0.113
Na ₂ O	0.052	0.140	0.306	-0.304	-0.234
K ₂ O	0.221	0.138	-0.115	0.019	0.117
P ₂ O ₅	-0.199	-0.138	0.214	-0.034	0.075
K/Rb	-0.092	0.249	-0.326	0.091	-0.009
Cs	0.119	-0.166	0.255	-0.044	-0.226
Rb	0.223	-0.083	0.164	-0.084	0.110
Sr	-0.231	0.058	0.098	-0.110	0.071
Ba	-0.178	0.232	-0.069	-0.164	0.058
Zr	-0.182	0.224	0.091	-0.215	0.180
Hf	-0.169	0.252	0.087	-0.185	0.233
Nb	0.187	0.005	0.283	0.151	0.282
Ta	0.189	-0.044	0.236	0.123	0.338
Zn	-0.243	-0.113	0.084	0.018	0.020
Nb/Ta	-0.231	-0.034	-0.107	-0.133	0.112
Zr/Hf	-0.223	0.086	-0.060	-0.201	0.119
Th	0.008	0.371	-0.152	0.140	-0.011
U	0.181	0.030	0.135	0.095	0.604
Ga	0.096	0.003	0.392	-0.170	-0.262
Y	-0.102	0.130	0.170	0.478	-0.140
LREE	-0.184	0.272	0.140	0.018	0.040
MREE	-0.185	0.121	0.197	0.302	-0.039
HREE	-0.085	0.164	0.158	0.483	-0.094



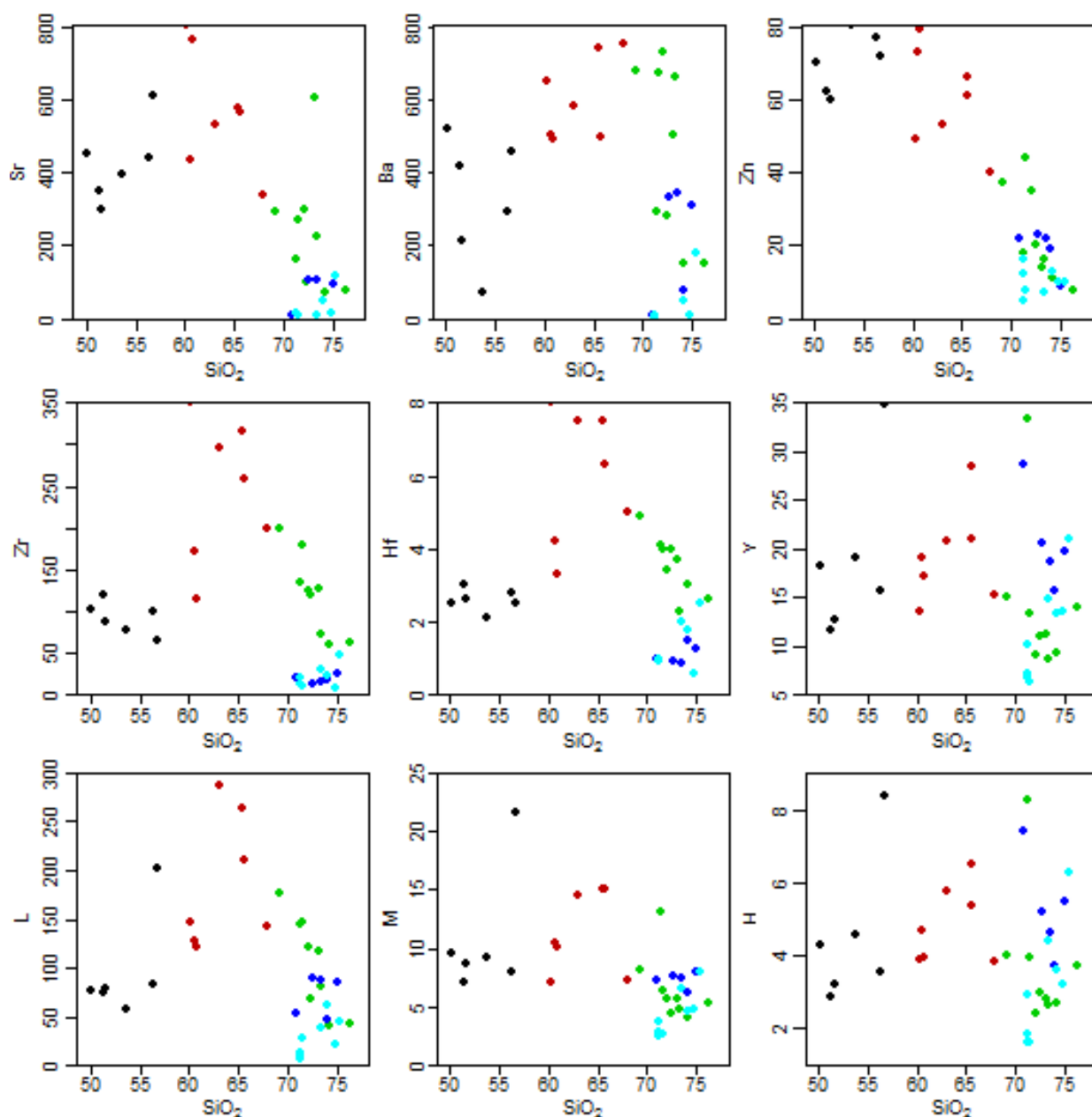
PC	Eigenvalue	Variance	Percentage
PC1	14.36	47.75	47.75
PC2	4.96	16.49	16.49
PC3	3.83	12.73	12.73
PC4	2.60	8.64	8.64
PC5	1.09	3.62	3.62
PC6	0.76	2.53	2.53
PC7	0.49	1.62	1.62
PC8	0.35	1.18	1.18
PC9	0.32	1.08	1.08
PC10	0.25	0.83	0.83
PC11	0.23	0.75	0.75
PC12	0.18	0.61	0.61
PC13	0.16	0.53	0.53
PC14	0.12	0.40	0.40
PC15	0.11	0.37	0.37

سنگ‌سازی و کانه‌سازی را مختل کرده است. این عامل شاید تزریق‌های پی‌درپی، اما ناپیوسته ماگما، فعالیت‌های غیرماگمایی مانند فرایندهای گرمایی یا همان PC5 و یا عاملی که از گرایش سرشت گرانیت و پگماتیت به سوی واحدهای بسیار پرآلومین جلوگیری کرده است یا همان PC3 باشد. از سوی دیگر، این نسبت از نسبت‌های Nb/Ta و Zr/Hf مستقل عمل کرده است و با فلزهایی مانند Ba، LREE، Hf و Zr در PC2 ارتباط بهتری نشان داده است (جدول ۵).

در حقیقت، هنگام پیشرفت فرایند جدایش که با افزایش Rb و کاهش K/Rb همراه است، فلزهایی مانند Sr، Zn، Ba، LREE، HREE، Zr و Hf رقیق شده‌اند. از آنجایی که فلزهای یادشده معمولاً در سیستم‌های گرانیت-پگماتیت نوع NYF متمرکز می‌شوند، رقیق شدن آنها در سیستم گرانیت-پگماتیت مشیرآباد (که همانند سیستم‌های گرانیت-پگماتیت نوع LCT است) توجیه‌شدنی است (شکل ۶).

محتوای نیوبیم و تانتالیم در واحدهای منطقه مشیرآباد، به‌ویژه گرانیت‌ها و پگماتیت‌ها، بیشتر از میانگین آنها در پوسته بالایی (به ترتیب ۲/۵ و ۲۱ پی‌پی‌ام) است. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند هنگام پیدایش پگماتیت، اگرچه مقدار مطلق Nb بیشتر از Ta است، اما غلیظ‌شدن هر دو تقریباً به یک اندازه و برابر با یک تا چهار برابر میانگین پوسته‌ای آنها بوده است. همچنین، نسبت Nb/Ta بیشتر از پنج است؛ بدین معنی که میزان جانشینی Ta با Nb چشم‌گیر نبوده است و فعالیت‌های ماگمایی و گرمایی، هر دو، در غلیظ‌شدن یا رقیق‌شدن عنصرها دخیل بوده‌اند (Ballouard et al., 2016).

تبلور کانی‌های سنگ‌ساز در پی غلیظ‌شدن یا رقیق‌شدن اکسیدهای اصلی (مانند: SiO_2 ، TiO_2 ، Fe_2O_3 ، MnO ، CaO ، K_2O و P_2O_5) روی داده است. پیشرفت فرایند جدایش بلوری با افزایش Rb و کاهش Sr، Zn، Nb/Ta و Zr/Hf همراه بوده است. همچنین، این مؤلفه، دربردارنده عنصرهای کمیابی مانند Nb، Ta، U، LREE، MREE و Zr است (جدول ۵). اگرچه وزن این عنصرهای کمیاب از عنصرهای سنگ‌ساز کمتر است و شاخص‌های جدایش بلوری مذاب مادر را دارند، اما دارای همبستگی خوبی با یکدیگر هستند؛ به‌گونه‌ای که غلیظ‌شدن Nb، Ta و U در راستای رقیق‌شدن LREE، MREE و Zr روی می‌دهد. این غلیظ‌شدن و رقیق‌شدن در واحدهای با سرشت متالومین تا پرآلومین دور از انتظار نیست. البته فلز U در PC5 وزن بیشتری دارد و در این مؤلفه، همچنان همبستگی مثبت آن (اگرچه ضعیف‌تر) با Nb و Ta دیده می‌شود؛ اما با Ga، Cs و Na وابستگی منفی و ضعیف نشان داده است. قرار گرفتن عنصرهای کمیاب Nb، Ta، U، LREE، MREE و Zr در مؤلفه سنگ‌ساز (PC1) نشان می‌دهد بودن یا نبودن این فلزها با فرایندهای ماگمایی سازنده واحدهای سنگی توده رابطه دارد. همچنین، رفتار عنصرهایی مانند U، Ta، Nb، Ga، Cs و Na در یک مؤلفه جداگانه و با ارتباط ضعیف‌تر (PC5) شاید گواهی بر تأثیرگذاری عامل دیگری در بودن یا نبودن فلزهای اقتصادی یادشده در واحدهای سنگی توده باشد. این عامل شاید فعالیت‌های گرمایی باشد که به بررسی بیشتری نیاز دارد. قرارنگرفتن نسبت K/Rb در PC1 نکته قابل تأملی است و گواهی این نکته است که پدیده‌ای ارتباط منظم میان پیشرفت جدایش بلوری و فعالیت



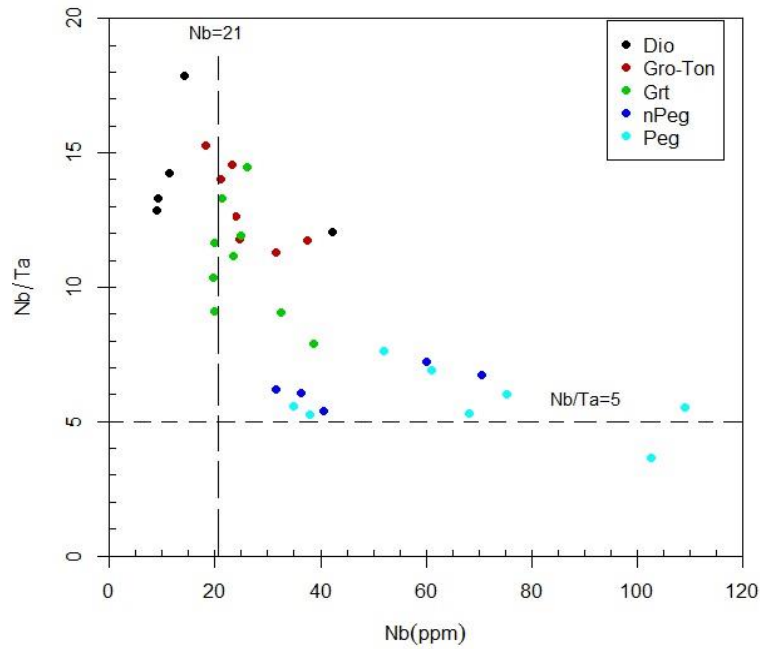
شکل ۶- محتوای عنصرهای کمیاب هنگام تزریق‌های متوالی ماگما در منطقه مشیرآباد (L: LREE؛ M: MREE؛ H: HREE)

اما میزان این غلیظشدن و جایگزینی‌ها در دیگر واحدهای توده چندان چشمگیر نبوده است. از این رو، کانی‌های اقتصادی نیوبیم و تانتالیم‌داری مانند تانتالیت، کلمبیت، پیروکلر و میکرولیت و حتی فراوانی مناسب زیرکن در پگماتیت ابراهیم‌عطار دیده نشده‌اند؛ تنها در پهنه مرکزی آن، بریل

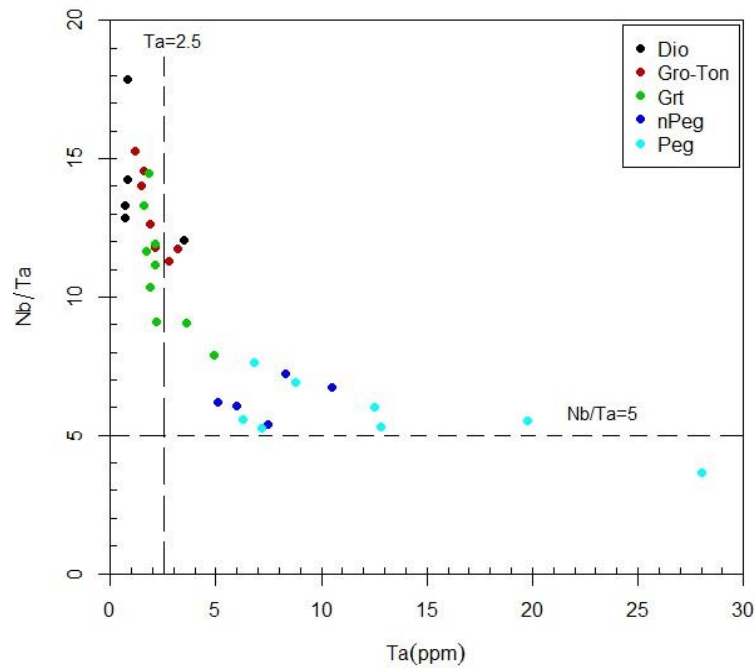
نسبت Nb/Ta همبستگی خوبی با Zr/Hf دارد و هر دو در پی پیشرفت فرایند پیدایش واحدهای آذرین منطقه کاهش یافته‌اند. این کاهش در پگماتیت‌ها بیشتر بوده است؛ به گونه‌ای که Zr/Hf به کمتر از ۱۸ رسیده است (شکل ۱۰). محتوای Nb و Ta بالا در کنار نسبت Zr/Hf و Nb/Ta کم نشان‌دهنده باروربودن گرانیت مادر است (Selway

سیستم آذرین درونی مشیرآباد تمرکز آن در دایک‌های پگماتی‌رویی داده است؛ جایی که انتظار تمرکز کانی‌های نیوبیم-تانتالیم‌دار می‌رود.

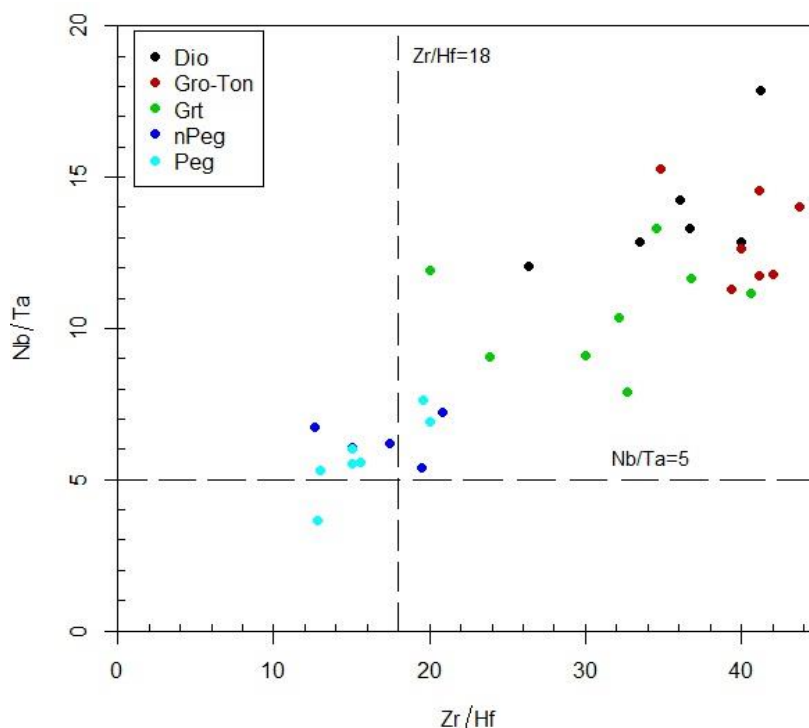
گزارش شده است. بریل نخستین مرحله کانی‌سازی در یک سیستم-گرانیت پگماتیت بارور است که در سقف توده مادر رخ می‌دهد؛ اما در



شکل ۷- نمودار Nb در برابر Nb/Ta واحدهای آذرین درونی مشیرآباد (میانگین نیوبیم در پوسته بالای برابر با ۲۱ پی‌پی‌ام است) (Beus and Grigorian, 1977)



شکل ۸- نمودار Ta در برابر Nb/Ta واحدهای آذرین درونی مشیرآباد (میانگین تانتالیم در پوسته بالای برابر با ۲/۵ پی‌پی‌ام است) (Beus and Grigorian, 1977)



شکل ۹- نمودار Zr/Hf در برابر Nb/Ta (Ballouard *et al.*, 2016) برای واحدهای توده آذرین درونی مشیرآباد

فرایند سنگ‌ساز جدایش بلوری ماگما، با افزایش Rb و کاهش K/Rb، فلزهایی مانند Sr، Zn، Ba، REE ها، Th، Zr و Hf (که معمولاً در سیستم‌های گرانیت-پگماتیت نوع NYF متمرکز می‌شوند) رقیق شده‌اند. همچنین، غلظت فلزهایی مانند Nb، Ta، Be و Ga (که در سیستم‌های گرانیت-پگماتیت نوع LCT متمرکز می‌یابند) افزایش یافته است. از آنجایی که میزان غلیظ‌شدن کم بوده و جایگزینی عنصرهای ایزومورفی مانند K و Rb، Nb و Ta، Zr، Hf، Al و Ga شدید نبوده است، تنها کانی بریل در پگماتیت‌ها پدید آمده است و کانی‌های اقتصادی دیگر مانند کانی‌های Nb-Ta دار (مانند: کلمبیت و تانتالیت) پدید نیامده‌اند. نسبت Nb/Ta بیشتر از ۵ و رفتار برخی عنصرها (مانند: Nb، Ta، U، Cs و Ga) در یک مؤلفه مستقل از مؤلفه سنگ‌ساز و فرایند جدایش بلوری گواه از آن دارد که فعالیت‌های گرمایی نیز در تمرکز یا رقیق‌شدن عنصرها دخیل بوده‌اند.

افزون‌بر این، گرانیت‌های توده مشیرآباد از Sn (میانگین: ۲/۳ پی‌پی‌ام)، Cs (۳/۲ پی‌پی‌ام) و Li (۶/۲ پی‌پی‌ام) تهی هستند و غلیظ‌شدن Be (با متوسط ۴/۱ پی‌پی‌ام) و Ga (۲۲ پی‌پی‌ام) در آنها ضعیف بوده است. پیدایش اسکارن‌های قلع و تنگستن در همبری توده مشیرآباد با واحدهای کربناتی منطقه (Beus and Grigorian, 1977) چه‌بسا عامل خروج عنصرهایی مانند قلع و تنگستن از توده و تجمع آنها در همبری آن باشند.

برداشت

بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند واحدهای آذرین توده مشیرآباد در امتداد یک فرایند جدایش بلوری یکسان پدید نیامده‌اند؛ بلکه به‌صورت جداگانه و موازی یکدیگر رخ داده‌اند. این نکته با پژوهش‌های زمین‌شناسی که برپایه پیدایش توده مشیرآباد در پی تزریق‌های پی‌درپی ماگما به سطوح بالاتر هستند همخوانی دارد. به‌دنبال تزریق‌های متوالی و پیشرفت

منابع

- Aliani, F., Maaniju, M., Sabori, Z., Miri, M. (2018) Petrology and geochemistry of some granitoid and intermediate rocks in southwest of the Qorveh area (Kurdistan). *Iranian Journal of Petrology* 33: 21- 44 (in Persian).
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, A., Santoz, F. Z., Medina, J. and Homam, M. (2013) Petrogenesis, tectonomagmatic setting and mineralization potential of Dehsalm granitoids, Lut Block, eastern Iran. *Geoscience* 23(89): 49- 59 (in Persian).
- Ballouard, P., Boulvais, C., Poujol, M., Branquet, Y., Tartese, R. and Vigneresse, J. L. (2016) Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geological Society of America* 44(3): 231- 234.
- Beus, A. A. and Grigorian, S. V. (1977) *Geochemical exploration methods for mineral deposits*. Applied Publication Ltd., Wilmette, Illinois, US.
- Breaks, F. W. and Tindle, A. G. (1997) Rare-metal exploration potential of the Separation Lake area: an emerging target for Bikita-type mineralization in the Superior Province of Ontario. In: *Summary of Field Work and Other Activities* (Eds. Breaks, F. W. and Tindle, A. G.) *Miscellaneous Paper* 168: 72-88. Ontario Ministry of Northern Development and Mines, Canada.
- Breaks, F. W., Selway, J. B. and Tindle, A. G. (2003) Fertile peraluminous granites and related rare element mineralization in pegmatites, Superior province, northwest and northeast Ontario. *Operation Treasure Hunt*. Ontario Geological Survey, Canada.
- Breaks, F. W., Selway, J. B. and Tindle, A. G. (2005) Fertile peraluminous granites and related rare element mineralization in pegmatites, Superior province, northwest and northeast Ontario. *Geological Association of Canada*, 87- 125.
- Cerny, P. (1989) Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum. In *Lanthanides, Tantalum, and Niobium*. Edited by Moller, Cerny and Saupe, Springer-Verlag, New York, US.
- Cerny, P. and Meintzer, R. E. (1988) Fertile granites in the Archean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites: crustal environment, geochemistry and petrogenetic relationships. In: *Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits* (Eds. Taylor, R. P. and Strong, D. F.) *Special* 39: 170-207. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Canada.
- Cerny, P., London, D. and Novak, M. (2012) Granitic pegmatites as reflections of their sources. *Elements* 8: 289- 294.
- Cohen, D. R., Kelley, D. L., Anand, R. and Coker, W. B. (2010) Major advances in exploration geochemistry, 1998–2007. *Journal of Geochemistry: Exploration, Environment Analysis* 10: 3- 16.
- Didar, P., Nezafati, N., Emami, M. H. and Solgi, A. (2014) Geology and mineralogy of South Mashhad pegmatites with especial attitude on Li mineralization. *Geoscience* 94: 209- 218 (in Persian).
- Ercit, T. S. (2005) REE-enriched granitic pegmatites. In: *Rare element geochemistry and mineral deposits* (Eds. Linnen, R. L. and Samson, I. M.) *Short Course Notes* 17: 175- 199. Geological Association of Canada, Canada.
- Gardideh, S. (2010a) Petrology of igneous-metamorphic Moshirababd-Tazehabad area (South of Qorveh-Kordestan). M.Sc. thesis, Bu-Ali Sina University, Science faculty, Geology Group (in Persian).
- Gardideh, S., Sepahi, A. A. and Aliani, F. (2010b) Petrology and geochemistry of Moshirabad granitoid (South of Qorveh). *Journal of Iranian Crystallography and Mineralogy* 17(4): 563- 580 (in Persian).
- Gunn, G. (2014) *Critical metals handbook*. Published in collaboration with the British Geological Survey, A co-publication between the American Geophysical Union and Wiley.
- Hassani Pak, A. A. and Sharafaddin, M. (2012) *Exploration data analysis*. 3rd edition, Tehran University Press, Tehran, Iran (in Persian).

- Linnen, R. L., Lichtervelde M. V. and Cerny, P. (2012) Granitic pegmatite as sources of strategic metals. *Journal of Elements* 8: 275-280.
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B. and Mohajjel, M. (2011) U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41: 238- 249.
- Melcher, F., Graupner, T., Gabler, H. E., Sitnikova, M., Henjes-Kunst, F., Oberthur, T., Gerdes, A. and Dewaele, S. (2015) Tantalum–(niobium–tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites: Constraints from Ta–Nb oxide mineralogy, geochemistry and U–Pb geochronology. *Ore Geology Reviews* 64: 667- 719.
- Payeh Ghadr, M. and Moghadasi, J. (2018) Instrumental analysis methods. First edition, Payam Noor University Press, Iran (in Persian).
- Salami, S., Sepahi, A. A. and Maanijou, M. (2014) Study of Ebrahim-e-Attar pegmatites and related Skarns (Southwest of Qorveh). *Iranian of Journal Crystallography and Mineralogy* 22(4): 309- 322 (in Persian).
- Selway, J. B., Breaks, F. W. and Tindle, A. G. (2005) A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior province, Canada, and large worldwide tantalum deposits. *Journal of Exploration and Mining Geology* 14(1-4): 1- 30.
- Sepahi, A. A., Maanijou, M., Salami, S., Gardideh, S. and Khaksar, T. (2012) Mineral chemistry and geothermobarometry of Moshirabad pluton, Qorveh, Kurdistan, western Iran. *Island Arc* 21: 170- 187.
- Sinclair, W. D. (1996) Granitic pegmatites. In: *Geology of Canadian Mineral Deposit Types* (Eds. Eckstrand, O. R. Sinclair, W. D. and Thorpe, R. I.) 8: 503- 512. Geological Survey of Canada, Canada.
- Shand, S.J. (1943) *The eruptive rocks*: 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, US.