

# Geochemistry of apatite in various felsic rocks of the Piranshahr plutonic complex: an approach to investigate magmatic evolution

Seyed Ali Mazhari<sup>1\*</sup>, Kwan-Nang Pang<sup>2</sup>

1. Associate Professor, Research Center of Geographical Sciences and Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran 2. Associate Researcher, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan

Article info	Abstract
Article history	The felsic intrusive rocks in the Piranshahr plutonic complex consist of three
Accepted: 14 Jan 2024	groups: syenite, nepheline-syenite, and alkali-feldspar granite. They are co-genetic
Keywords:	and formed approximately 40 million years ago. Textural relationships, major oxides,
trace elements, apatite,	and trace element composition of the selected felsic rock samples were studied using
evolution, Piranshahr	SEM, EPMA, and LA-ICP-MS methods. In the studied samples, apatite appears as
complex.	euhedral to subhedral crystals with prismatic forms and has a homogeneous texture
erste	without zonation. The low amounts of MnO and the REE pattern of apatites confirm
	their magmatic nature, indicating that post-crystallization processes did not affect the
112000-2704 11200-2001	composition of apatites. All apatite crystals fall into the fluorapatite category. The
	amounts of fluorine and chlorine vary in different felsic rocks, and the F/Cl ratio
	decreases from granites towards syenites and nepheline-syenites. The determination
	of the apatite saturation temperature indicates that alkali feldspar granites have a
	higher crystallization temperature range (858-844°C) than both syenites (818-783°C)
	and nepheline syenites (668-610°C). Analyzing the manganese levels in the
	examined apatites suggests a consistent oxidizing setting with minimal fluctuations
	in $fO_2$ conditions (logfO <sub>2</sub> = -8 to -9.8). Trace elements in different apatites show
	significant differences; for instance, apatites in granitic samples are enriched with
	HFSE and rare earth elements (REE), while apatites in nepheline-syenites have a
	higher concentration of components such as silica, Cr, Ni, and V. The composition
	of trace elements and the F/Cl ratios in apatites demonstrate consistent variations and
	alignment with the host rock composition. The results of the apatite mineral
	composition confirm previous petrological findings regarding the impact of volatile
	phases separation on magmatic evolution in the Piranshahr felsic rocks.

### Introduction

Apatite is a common minor mineral found in a wide range of rock types and is considered the most abundant phosphate mineral in the Earth's crust. This mineral contains significant amounts of elements with different geochemical behaviors such as halogens, rare earth elements (REE), Sr, Y, Th, and U, which

are sensitive to melt and fluid evolution. Previous studies indicate that apatite can serve as an effective tool for understanding complex magmatic processes and post-magmatic transformations (alteration, hydrothermal activity, and metamorphism) (e.g. Bruand et al., 2017).

\*Corresponding author: Seyed Ali Mazhari; E-mail: a.mazhari@hsu.ac.ir How to cite this article: Mazhari, A., Pang, K.N., 2024. Geochemistry of apatite in various felsic rocks of the Piranshahr plutonic complex: an approach to investigate magmatic evolutions. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9 (2), 77-105. http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106551



DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106551

Geochemistry of apatite in various felsic rocks of ...

The Piranshahr massif is one of the numerous intrusive bodies located in the northwestern part of the Sanandaj-Sirjan zone. Detailed geochemical, isotopic, and dating studies on this massif indicate the presence of two types of magmas: felsic and mafic, displaying compositional diversity. The felsic portion of this massif consists of various rock occurrences formed under undersaturated nepheline syenite, saturated (syenite), and oversaturated (alkali feldspar granite) conditions. These are co-genetic and have evolved through complex petrological processes (Mazhari et al., 2009). In this study, the composition of major and trace elements in apatite crystals in various felsic rocks of the Piranshahr massif (along with their other geochemical and isotopic characteristics) is examined better to understand the magmatic evolution processes of this massif.

### Material and methods

### Analytical methods

Based on previous data from the Piranshahr intrusive assemblage, eight samples of felsic rocks were selected to investigate the composition of apatite. For this study, polished thin sections prepared from the samples were initially carefully examined using SEM, and the characteristics of the apatite crystals were investigated. The composition of the major oxides of apatite was determined by EPMA (Electron Probe Micro-Analysis) using the CAMECA SX100 electron microprobe.

The composition of trace elements in apatites was measured using LA-ICP-MS. For this purpose, a 193  $\mu$ m Analyte Excite laser ablation system connected to a quadrupole ICP-MS of the Agilent 7500c type (with a plasma power of 1100 W) was utilized. The analysis of trace elements was performed at the same points where their major oxide

compositions had previously been determined by EPMA. The analyses were conducted under conditions of an 8 Hz repetition rate, a spot size of 43  $\mu$ m, and a laser energy of 80 mJ. The NIST SRM 610 was used as an external standard, while the Ca level was calibrated using the laboratory's internal standard. The NIST SRM 612 was also utilized as an auxiliary reference. The error estimation for measuring trace elements in this study is less than 10%. All analyses were done at the Chinese Academy of Science, Guangzhou, China.

### **Results and discussion**

Apatites, in terms of their morphology, appear as prismatic to sub-prismatic crystals with various dimensions. These crystals exhibit a homogeneous texture and often appear without zoning, and the presence of wide inclusions or pores is rarely observed. The morphological characteristics and the absence of significant inclusions indicate that apatite in the felsic rocks of the Piranshahr intrusive complex has not been significantly influenced by post-crystallization processes (such hydrothermal alteration as or metamorphism).

All apatite crystals in the felsic rocks of the Piranshahr intrusive complex fall into the category of fluorapatite. The apatite in alkali feldspar samples, on average, contains 2.3 wt% fluorine, whereas the amount of F in the apatites of syenites (average wt% 2.6) and nepheline syenites (average wt% 1.5) is lower. On the other hand, the apatites in the nepheline syenite samples have higher chlorine content compared to those in the syenites and alkali feldspar granites. Apatite crystals in alkali granite samples exhibit enrichment in many high field strength elements (HFSE) such as Ga, Y, Nb, Zr, Hf, U, Th, and rare earth elements (REE), while apatites in nepheline

78

syenites are relatively depleted in these elements. Apatite crystals in nepheline syenite samples have the highest concentrations of metallic elements such as V, Cr, and Ni. The amounts of these metals are minimal in apatites of alkali feldspar granites, while apatites in syenites exhibit intermediate compositions.

The REE patterns in apatites show a good correlation with the whole-rock patterns. However, the abundance of REE in apatite is several times higher than that in whole-rock. In all samples, light rare earth elements (LREE) are enriched compared to heavy rare earth elements (HREE), but the ratios vary among different types of felsic rocks. Generally, the LREE/HREE ratio in apatites increases from syenites towards nepheline syenites and alkali feldspar granites.

The calculation of the apatite saturation temperature suggests a higher crystallization temperature in alkali feldspar granites (858-844°C) compared to syenites (818-783°C) and nepheline syenites (668-610°C). The results of calculations using the manganese content in the studied apatites indicate an oxidizing environment with limited variations in fO2 conditions (logfO<sub>2</sub>= -8 to -9.8) during their formation.

### Conclusion

The investigation of variations in trace elements, whose concentrations in apatite are typically influenced by melt oxidation conditions (such as Ce, Eu, and Ga), suggests that fO2 has not played a significant role in the compositional changes of the studied apatites. The distribution coefficients of trace elements between apatite crystals and the host rock show pronounced and irregular variations, indicating the influence of various factors (such as initial melt and temperature) on these distribution coefficients.

The variations in the composition of apatite trace elements in the felsic rocks of Piranshahr show good consistency with the compositional changes in the host rocks and align well with the proposed trends in magmatic evolution from petrological studies. The results of this research indicate that the examination of changes in the composition of apatite trace elements can contribute to understanding magmatic developments, especially where complex magmatic differentiation and separation of volatile phases have occurred.

# References

- Bruand, E., Fowler, M., Storey, C., Darling, J., 2017. Apatite trace element and isotope applications to petrogenesis and provenance. American Mineralogist 102, 75-84.
- Mazhari S. A., Bea F., Amini S., Ghalamghash, J., Molina, J.F., Pillar, M., Scarrow, J.H., Williams, S., 2009. The Eocene Bimodal Piranshahr Massif of the Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran: A Marker of the End of the Collision in the Zagros Orogen Journal of the Geological Society, 166, 53–69.

CRediT authorship contribution statement





دسترسی 👌 آزاد



مجله علوم زمين خوارزمي Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir



# ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر: رهیافتی برای بررسی تحولات ماگمایی

سید علی مظهری<sup>۱</sup>\*، کوان-نانگ یانگ<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران ۲. دانشیار، مؤسسه علوم زمین، آکادمیا سینیکا، تایپه، تایوان

چکیدہ	اطلاعات مقاله
سنگهای نفوذی فلسیک در مجموعه نفوذی پیرانشهر شامل سه گروه سیینیت، نفلینسیینیت و آلکالیفلدسپار	تاريخچه مقاله
گرانیت میشوند که در حدود ۴۰ میلیون سال پیش تشکیل شده و هم <sub>ا</sub> ژنز هستند. روابط بافتی و ترکیب اکسیدهای	دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰
اصلی و عناصر کمیاب آپاتیت از نمونههای منتخب انواع سنگهای فلسیک به روشهای SEM، SEM و LA-ICP	پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴
MS مورد بررسی قرار گرفت. در نمونههای مورد مطالعه آپاتیت به صورت بلورهای شکلدار تا نیمهشکلدار با فرمهای	واژەھاى كليدى
منشوری ظاهر شده و دارای بافت همگن و بدون منطقهبندی میباشد. مقادیر پایین MnO و الگوی REE آپاتیتها نیز	عناصر كمياب، آپاتيت،
ماهیت ماگمایی آنها را تأیید کرده و بیانگر عدم تأثیر فرایندهای بعد از تبلور بر روی ترکیب آپاتیتهاست. تمام بلورهای	ژئوشیمی، تحول
آپاتیت در رده فلوئوروآپاتیت قرار میگیرند. میزان فلوئور و کلر در انواع مختلف سنگهای فلسیک متغیر است و نسبت	ماگمایی، مجموعه نفوذی
F/Cl از گرانیتها به سمت سیینیتها و نفلینسیینیتها کاهش مییابد. محاسبه دمای اشباع آپاتیت نشان میدهد که	پيرانشهر.
دمای تبلور در آلکالیفلدسپار گرانیتها (۸۵۸-۸۴۴ درجه سانتیگراد) نسبت به سیینیتها (۸۱۸-۷۸۳ درجه	
سانتیگراد) و نفلینسیینیتها (۶۶۸-۶۱۰ درجه سانتیگراد) بیشتر است. میزان Mn موجود در آپاتیتها حاکی از	
شرایط تقریباً ثابت اکسایش با حداقل نوسانات (۹/۸- تا ۸- = log fO2) در انواع سنگهای فلسیک میباشد. عناصر	首体的限
کمیاب در آپاتیتهای مختلف تفاوت بارزی نشان میدهد بهطوری که در نمونههای گرانیتی آپاتیت سرشار از عناصر	
HFSE و عناصر نادر خاکی (REE) است در حالیکه آپاتیتهای سنگهای نفلینسیینیتی تمرکز بالاتری از اجزایی	
همچون سیلیس، Ni ،Cr و V نشان میدهند. ترکیب عناصر کمیاب با نسبت F/Cl در آپاتیتها تغییرات هماهنگ و	
منطبق با ترکیب سنگ میزبان نشان میدهد. نتایج بررسی ترکیب کانی آپاتیت، یافتههای پترولوژیکی قبلی در مورد	
سنگهای فلسیک پیرانشهر مبنی بر تأثیر تفکیک فازهای فرار بر تحول ماگمایی را تأیید میکند.	

### مقدمه

محسوب مى شود (Piccoli and Candela, 2002). این کانی مقادیر قابل توجه از عناصر با رفتارهای ژئوشیمیایی متفاوت همچونهالوژنها، عناصر نادر آپاتیت (Ca<sub>5</sub> [PO<sub>4</sub>]<sub>3</sub> [F, Cl, OH]) یک کانی فرعی رایج در انواع مختلف سنگهای آذرین است و فراوان ترین کانی حاوی فسفات در پوسته زمین

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106551

(i)(\$)

(cc)

E-Mail: a.mazhari@hsu.ac.ir \* الويسنده مسئول: سيد على مظهرى استناد به این مقاله: مظهری، ع.، پانگ، ک. ن. (۱۴۰۲) ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر: رهیافتی برای بررسی تحولات ماگمایی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۲، صفحه ۷۷ تا ۱۰۵. http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106551

خاکی (REE)، Th ،Y ،Sr (REE و U دارد که نسبت به تحول مذاب و سیال حساس هستند ( Bruand et al., 2017). مطالعات گذشته نشان میدهد که آپاتیت می تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای درک فرایندهای پیچیدهٔ ماگمایی و تحولات بعد از ماگماتسیم (دگرسانی، فعالیت هیدروترمال و دگرگونی) مورد استفاده قرار گیرد (به عنوان مثال، Sha and Chappell, 1999; Palma et al., 2019). ويژگى مهم آپاتیت این است که بلورهای حاصل از تبلور ماگماهای مختلف، بدون توجه به تغییرات شیمیایی و ایزوتوپی در سنگ منبع، دارای ویژگیهای ژئوشیمیایی خاص می باشند که از این خاصیت می-توان در تعیین ماهیت اولیه ماگما بهره برد Belousova et al., 2001; Chu et al., 2009; ) Laurent et al., 2017). بنابراین در مواردی که داده-های ایزوتوپی ماگما برای تعیین منشأ قابل استفاده نباشد، از ترکیب شیمیایی آپاتیت میتوان برای تشخیص منبع ماگما و تحولات ماگمایی و فرایندهای یس از ماگماتیسم استفاده کرد (Liu et al., 2023).

در مطالعات پترولوژی به طور معمول ترکیب سنگ کل به عنوان میانگین ترکیب ماگما در نظر گرفته میشود (Miles et al., 2013). بسیاری از عوامل در حین تشکیل ماگما و پس از آن میتواند بر ترکیب سنگ کل تأثیر گذاشته و موجب ایجاد چالش در تفسیر روند تحول ماگمایی شود؛ درحالی که آپاتیت میتواند ترکیب ژئوشیمیایی مذاب در زمان تبلور خود را نشان دهد (Nathwani et al., 2020). به علت تنوع شیمیایی و گسترش وسیع، آپاتیت

اطلاعات باارزشی در مورد جزئیات فرایندهای آذرین و حتی بعد از تبلور، فراهم میآورد ( Piccoli and ) و حتی بعد از تبلور، فراهم میآورد ( Candela, 2002 ( Candela, 2002). تحقیقات پیشین کاربرد آپاتیت در بسیاری از مطالعات پترولوژیکی همچون تعین ترکیب سنگ کل ( Bruand et al., 2017)، اکتشاف منابع Belousova et al., 2002; Ihlen et al., اکتشاف منابع معدنی ( 2014; Ihlen et al., 2014)، اکتسیال – کانی ( Chew and Spikings, 2015)، تعیین فوگاسیته را به اثبات رسانده است.

توده پیرانشهر یکی از تودههای نفوذی واقع در شمال غربی پهنه سنندج- سیرجان است. مطالعات تفضیلی زمین شیمیایی، ایزوتوپی و سن سنجی بر روی این توده وجود دو نوع ماگمای فلسیک و مافیک با Mazhari et al., ) تنوع ترکیبی را نشان میدهد 2009). بخش فلسيک اين توده از رخنمونهای مختلف سنگهای مختلف تحت اشباع (نفلین سيينيت)، اشباع (سيينيت) و فوق اشباع (آلكالي فلدسپار گرانیت) تشکیل یافته که هممنشأ بوده و از طريق فرايندهاى پيچيده پترولوژيكى شكل گرفتهاند (Mazhari et al., 2009). در این مطالعه ترکیب عناصر اصلی و کمیاب بلورهای آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک توده پیرانشهر (که سایر ویژگی-های ژئوشیمیایی و ایزوتوپی آنها موجود است) برای تحليل بهتر روند تحولات ماگمايي اين توده مورد بررسی قرار می گیرد.

٨١

مواد و روشها

موقعيت زمين شناسى

مجموعه نفوذی پیرانشهر در ناحیه شمالغربی پهنه سنندج-سیرجان و در مختصات ۲۰ °۴۵ تا ۳۰ ۴۵° طول جغرافیایی شرقی و ۲۵ °۳۶ تا ۲۵ عرض جغرافیایی شمالی واقع شده است. پهنه سنندج-سیرجان به عنوان یکی از واحدهای تكتونوماگمایی ایران، با گسترش طولی تقریباً ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای ۲۵۰–۱۵۰ کیلومتر از شمالغربی تا جنوبشرقی ایران امتداد دارد (شکل a-۱). در این پهنه، بهویژه در نیمه شمالی آن، مجموعه نفوذیهای زیادی وجود دارند که در بازههای زمانی مختلف شامل دوران يالئوزوئيک (Bea et al., 2011)، مزوزوئيک 9 (Mazhari et al., 2011; Yajam et al., 2015) سنوزوئيک ( Mazhari et al., 2009; Mazhari et al., ) 2020) شکل گرفتهاند. توده نفوذی پیرانشهر یکی از این مجموعههای سنگی نفوذی است که در دوره ائوسن بهوجود آمده و از برخورد صفحات ایران و عربستان و بسته شدن نئوتتیس شکل گرفته است .(Mazhari et al., 2009)

توده پیرانشهر با رخنمونی به شکل بیضی نامنظم (با عرضی حدود ۱۰ و طول تقریبی ۱۶ کیلومتر) در یک روند اصلی S۳۰E ظاهر شده است (شکل ۱-d). سنگهای میزبان این توده سنگ آهک و سنگهای رسوبی دگرگون شده مزوزوئیک میباشند که بر اثر حرارتِ توده متحمل دگرگونی مجاورتی شدهاند. در

<sup>1</sup> apophysis

برخی مناطق ضخامت هورنفلسها به حدود ۱۰۰۰ متر میرسد. در این مجموعه نفوذی سنگهای آذرین کاملاً متمایز (اعم از فلسیک و مافیک) با منشأ متفاوت حضور دارند. دادههای سنسنجی رادیومتری، سن نسبتاً یکسان را (حدود ۴۰ میلیون سال پیش) Mazhari et al., ) برای تشکیل آنها پیشنهاد میدهد 2009). گابروهای مافیک در بخشهای مرکزی و غربی توده جای گرفته اند، در حالیکه سنگهای نفوذی فلسیک اغلب ترکیب سیینیتی داشته و در قسمتهای شمالی، شرقی و همچنین در جنوب مجموعه نفوذی واقع شدهاند. در شمال مجموعه نفوذی گابروها به صورت یک زائده ٔ با روند شمالی-جنوبی در سیینیتها نفوذ کرده اند (شکل b-۱). در سمت غربی زائده، ترکیب سیینیتها اشباع از سیلیس و دارای کوارتز مدال می شود به طوری که در برخی مناطق آلکالیفلدسپار گرانیت ظاهر میگردد، اما در شرق زائده میزان کوارتز در سیینیتها کم شده و رخنمونهایی از نفلین سیینیت مشاهده می گردد. مرز بین سنگهای نفوذی فلسیک و مافیک در اکثر بخشهای مجموعه نفوذی پیرانشهر مشخص است بهاستثنای زائده شمالی که شواهد آلایش ماگمای گابرویی با سیینیتها دیده می شود و سیینیتها دارای انکلاوهای بزرگ گابرویی میباشند ( Mazhari .(et al., 2009

همانطور که در فوق اشاره شد، مطالعات دقیق ژئوشیمیایی بر روی سنگهای این مجموعه نفوذی

انجام گرفته است. دادههای پترولوژیکی دو نوع ماگمای مافیک در توده پیرانشهر را نشان میدهد. گابروهای آلکالن (G1) فراوان تر هستند و نسبتهای LILE/HFSE شبیه به ماگماهای گوشتهای درون صفحه ای دارند. نوع دوم گابروهای کالک آلکالن (G2) هستند که ویژگیهای ماگماهای قوسی را نشان می-دهند. نسبتهای ایزوتوپی نمایانگر منشأ غنی شدهتر گابروهای G2 نسبت به نوع G1 می باشد ( Mazhari et al., 2009). تشکیل مجموعه نفوذی پیرانشهر در یک جایگاه تکتونیکی برخوردی موجب ایجاد ماگماهای مختلف با منابع متفاوت شده است. گابروهای آلکالن از یک گوشتهای کمتر تحول یافته منشأ گرفته در حالی که سنگهای مافیک کالکآلکالن از طریق واکنشهای دگرسانی در گوشته بالای مناطق فرورانش شكل گرفتهاند ( Mazhari et al., .(2009

سنگهای فلسیک در مجموعه نفوذی پیرانشهر شامل سیینیت، نفلین سیینیت و گرانیتهای متاآلومین نوع 2-A هستند. نتایج حاصل از دادههای ژئوشیمیایی و ایزوتوپی حاکی از منشأ مشترک سنگهای فلسیک توده نفوذی پیرانشهر میباشد (2009, Mazhari et al., 2009). نفلینسیینیت و گرانیت از طریق تفریق ماگمای سیینیتی در محیط باز شیمیایی طریق تفریق ماگمای سیینیتی در محیط باز شیمیایی قبلاً از آن جدا شده است. گرانیتها در یک محیط شیمیایی باز تشکیل شدهاند، به طوری که سیال آلکالن غنی از فلوئور و آبدار آزادشده از سیینیتها با

سنگهای فلسیک قدیمی واکنش داده است (Mazhari et al., 2009). در این تحقیق تمرکز بر روی انواع نمونههای فلسیک مجموعه نفوذی و بررسی ترکیب آپاتیت آنها خواهد بود.



شکل ۱- a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و پهنه سنندج- سیرجان (اقتباس از Alavi, 1994). ۱: نواحی پرکامبرین، ۲: پهنه تراست زاگرس، ۳: مجموعه ماگمایی ارومیه دختر. E: اصفهان، K: کرمان، MTZ! تراست اصلی زاگرس، Sa: سنندج، SSZ: سنندج- سیرجان پهنه، T: تهران، U: ارومیه، سنندج: ZFSB: کمربند چین خورده ساده زاگرس. d) نقشه ساده مجموعه نفوذی پیرانشهر (Mazhari et al., 2009).

Fig. 1. a) The location of study area in Iran and Sanandaj-Sirjan Zone (Alavi, 1994). 1:

Precambrian area, 2: Zagros thrust zone, 3: Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage; E: Esfahan, K: Kerman, MTZ: main Zagros thrust, Sa: Sanandaj; SSZ: Sanandaj- Sirjan Zone, T: Tehran, U: Urumieh, ZFSB: Zagros fold simple belt. B) Simple geological map of Piranshahr plutonic assemblage (modified from Mazhari et al., 2009).

## روش انجام پژوهش

از مجموعه نفوذی پیرانشهر، تعداد هشت نمونه از سنگهای فلسیک این مجموعه برای بررسی ترکیب آپاتیت انتخاب گردید. این هشت نمونه شامل چهار سیپنیت (نمونههای N29، N60، N71 و N75)، دو آلکالیفلدسپار گرانیت (N33 و N72) و دو نفلین سيينيت (N68 و N68) هستند. نتايج آناليزهاي ژئوشیمیایی سنگکل این نمونهها در جدول ۱ پیوست آورده شده است. روش انجام آنالیز سنگکل، تعیین نسبتهای ایزوتوپی، سنسنجی، جداسازی زیرکن و بررسی مورفولوژی بلورها در مطالعات قبلی (Mazhari et al., 2009) تشريح شده است. مقادير اکسیدهای اصلی و زیر کونیم بوسیله XRF و غلظت عناصر کمیاب با کمک ICP-MS اندازه گیری شده است. نسبتهای ایزوتوپی Nd و Sr به روش TIMS (thermal-ionization mass spectrometer) تعیین شده و سنسنجی U-Pb به روش LA-ICP-MS صورت پذیرفته است. خلاصه نتایج این آنالیزها برای نمونههای مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ییوست آورده شده است.

برای این تحقیق، مقاطع نازک صیقلیِ تهیه شده از نمونهها در ابتدا توسط SEM به دقت مورد مطالعه قرار گرفته و ویژگیهای بلورهای آپاتیت در آنها بررسی شد. ترکیب اکسیدهای اصلی آپاتیت به روش

EPMA با استفاده از دستگاه الکترو مایکروپروب CAMECA SX100 بر روی مقاطع نازک صیقلی نمونههای ذکر شده تعیین شد. ولتاژ شتابنده ۲۰ kV و جریان بیم ۲۰ nA برای این آنالیزها به کار گرفته شد.

ترکیب عناصر فرعی و کمیاب در آیاتیت به کمک LA-ICP-MS اندازه گیری شد. برای این کار از یک سیستم کاهنده لیزری Analyte Excite ۱۹۳ µm متصل به یک ICP-MS چهار قطبی نوع ICP-MS 7500c (توان يلاسما W ۱۱۰۰) استفاده شد. آناليز عناصر کمیاب بر روی همان نقاطی انجام شد که قبلاً ترکیب اکسیدهای اصلی آنها به روش EPMA تعیین شده بود. آنالیزها در شرایط فرکانس متناوب M Lz، اندازه بیم نقطهای μm ۴۳ و انرژی لیزری Hz ۸۰، انجام شد. از NIST SRM 610 به عنوان استاندارد خارجی استفاده شد در حالی که میزان Ca با استفاده از استاندارد داخلی آزمایشگاه کالیبره شد. از استاندارد NIST SRM 612 نیز به عنوان یک رفرنس کمکی بهره گرفته شد (Li et al., 2014). برآورد خطا برای اندازه گیری عناصر کمیاب در این تحقیق کمتر از ۱۰٪ است. مطالعات EPMA «SEM و -EPMA MS در جوانگژو، آکادمی علوم چین، انجام شده است. نتايج

# پتروگرافی سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر

فراوان ترین سنگهای فلسیک در توده پیرانشهر سیینیتها هستند که تفاوت حجمی آنها با دو دسته

دیگر بسیار زیاد است. آلکالیفلدسپار گرانیت و نفلینسیینیت محدود به بخش شمالی میشوند که به همراه سیینیتها دیده میشوند. متأسفانه رخنمون سنگها به گونهای است که مشاهده مستقیم مرز بین این سه گروه ممکن نیست.

آلكالى فلدسپار مزوپرتيتى كانى اصلى تشكيل دهنده (۷۰ تا ۸۰ درصد حجمی) سیینیتها می باشد و پس از آن کانیهای فرومنیزین قرار می گیرند که به ترتيب فراواني عبارتند از كلينوپيروكسن هدنبرژيتي (۳۰–۱۰ درصد حجمی)، الیوین فایالیتی (۵ تا ۱۵ درصد حجمي) و بيوتيت (كمتر از ١٠ درصد حجمي). این مجموعه کانیها خاص گرانیتوئیدهای نوع A می باشند. آمفیبول در سیینیتها به ندرت دیده می شود که آنهم به صورت آگر گاتهای آمفیبولهای سدیمدار آبی رنگ فیبری شکل در اطراف كلينوپيروكسن ظاهر مىشود. مزوپرتيت به شكل بلورهای شکلدار که اندازه آن از چند میلیمتر تا چند سانتيمتر تغيير ميكند ديده مي شود. كلينوپيروكسن به صورت بلورهای نیمه شکل دار تا بی شکل سبز رنگ قابل مشاهده است که یا به شکل بلورهای مجزا و یا متصل به اليوين هستند (شكل ۲- a,b). بيوتيت شامل آنیت قهوهای رنگ میباشد که به صورت بلورهای بی شکل یا بیشتر به حالت مجموعه بلورهای ريزدانه احاطه كننده كلينوپيروكسن، اليوين يا مگنتیت در یک بافت کرونا مانند مشاهده می شوند. اليوين بلورهاي بي شكل تشكيل مي دهد كه معمولا به طور ناقص به ایدینگسیت تبدیل شدهاند. ایلمنیت و مگنتیت فراوان ترین کانی های فرعی می باشند که

بی شکل هستند. دانههای بی شکل و ریز آپاتیت فراوان ترین کانی کمیاب در سیینیتها می باشد. سایر کانی های فرعی بسیار کمیاب هستند.

گرانیتها محدود به زائده شمالی میشوند و دارای بلورهای فراوان شکل دار تا بی شکل آلکالی فلدسپار (۵۰ تا ۶۰ درصد حجمی)، کوارتز بین دانه ای (۲۰ تا ۳۰ درصد حجمی)، کلینوپیروکسن (۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی)، آمفیبول (۵ تا ۱۰ درصد حجمی) و بیوتیت (کمتر از ۱۰ درصد حجمی) میباشند (شکل ۲-۵). (کمتر از ۱۰ درصد حجمی) میباشند (شکل ۲-۵). برخی نمونهها مزوپرتیت را به صورت تنها فلدسپار دارند. اما دیگر نمونهها دو نوع آلکالیفلدسپار دارند. بر خلاف سیینیت و نفلین سیینیت، این گرانیتها مقادیر زیادی زیرکن دارند. در نمونه ۲72 علاوه بر زیرکن، کانیهای حاوی REE مثل آلانیت و مونازیت نیز دیده میشوند که میتوانند منعکس کننده میزان بالای REE در این سنگ باشند (بیشترین مقدار در کل توده پیرانشهر). سایر کانیهای فرعی در آلکالی– فلدسپار گرانیت ایلمنیت و آپاتیت میباشند.

نفلینسیینیتها سنگهایی با رنگ روشن میباشند که از نفلین (۲۰–۳۰ درصد حجمی) و مزوپرتیت نیمه شکل دار (۶۰–۷۰ درصد حجمی) با کمی بلورهای بیشکل هدنبرژیت (۵ تا ۱۰ درصد حجمی)، که همیشه به صورت بین دانه ای هستند، تشکیل شده است (شکل ۲–b). کانیهای فرعی فراوان مگنتیت و آپاتیت میباشد و زیرکن نیز به میزان کم قابل رؤیت است.

سنگهای فلسیک پیرانشهر برخلاف بیشتر گرانیتهای نوع A با ترکیب مشابه، شواهد تحولات

طولانی پس از ماگمایی نشان نمیدهند و بافتهای ماگمایی اولیه را به خوبی حفظ کرده اند؛ و تنها واکنش ساب سالیدوس مهم اکسولوشن مزوپرتیتی میباشد. تنها استثنا گرانیتهای پرآلکالن میباشند

که در آنها مزوپرتیت کمی بیشتر سوسوریته شده و اژیرین و ریبکیت به طور موضعی با مجموعه کانیهای ریز دانه میکایی جانشین شده است.



شکل ۲- a نمای کلی از بافت سنگهای فلسیک در مجموعه نفوذی پیرانشهر. a و b) نمونههایی از سیینیتها، c) نمونه آلکالی فلدسپار گرانیت و b) یک نمونه از نفلین سیینیت. pp: آپاتیت، cpx. کلینوپیروکسن، Kfs: آلکالی فلدسپار، Nph: نفلین، Qz: کوارتز. Fig. 2. a) General view of the microscopic texture of felsic rocks in the Piranshahr plutonic assemblage. (a,b) syenitic samples, (c) alkali-feldspar granite, and (d) a nepheline syenite sample. Ap: apatite, Cpx: clinopyroxene, Kfs: alkali feldspat, Nph: nepheline, Qz: quartz.

بافت آپاتیتها

اغلب بین ۳۳ ۲۰ تا ۳۳ ۱۰۰ و نسبت عرض *ا*طول بین ۱:۱ تا ۳:۱ تغییر می کند. این بلورها بافت همگن و اغلب بدون منطقهبندی نشان می دهند و به ندرت در آنها ادخال یا منافذ وسیع مشاهده می شود. ویژگی های ریخت شناسی و نبود ادخال فراوان بیانگر این است که آپاتیت در سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر تحت تأثیر فرایندهای بعد از تبلور

همان گونه که در بالا اشاره شد آپاتیت به عنوان کانی فرعی در همه سنگهای فلسیک توده پیرانشهر حضور دارد. بررسی نمونههای مورد مطالعه در تصاویر SEM نشان میدهد که این آپاتیتها به صورت بلورهای شکلدار تا نیمهشکلدار با فرمهای منشوری در ابعاد مختلف ظاهر میشوند (شکل۳) و اندازه آنها

(همچون دگرسانی هیدروترمال یا دگرگونی) واقع نشدهاند (Miles et al., 2013). بلورهای آپاتیت معمولاً به صورت ادخال در کانیهای مافیک و

فلدسپار یا در طول مرز بین سایر کانیها به صورت دانههای آزاد دیده میشوند (شکل۳).



شکل ۳- تصاویر Bsck-scattered electron) BSE) از نمونه سنگهای فلسیک توده پیرانشهر که ویژگیهای ریختشناسی و بافت غالب در بلورهای آپاتیت را نشان میدهد. Afs: آلکالی فلدسپار، Ame: آمفیبول، Ag: آپاتیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Mag: مگنتیت. Fig. 3. Back-scattered electron (BSE) images of some felsic samples of the Piranshahr pluton indicates major properties of the morphology and texture of apatite crystals. Afs: alkali feldspar, Amp: amphibole, Ap: apatite, Cpx: clinopyroxene, Mag: magnetite.

در همه نمونهها دارای مقادیر مشابه از اکسیدهای اصلی کلسیم (۵۴/۷ wt% - ۵۴/۷ = ۵۵۵) و فسفر (۵۴/۵ ۲/۵ + ۴۰/۹۵ - ۹۲/۵) هستند و از این نظر تفاوت معنیداری بین انواع سنگهای فلسیک (یعنی آلکالیفلدسپار گرانیت، سیینیت و نفلین سیینیت) ترکیب شیمیایی آپاتیت در سنگهای فلسیک توده پیرانشهر نتایج آنالیز عناصر اصلی و کمیاب آپاتیت در جدول ۱ ارائه شده است. بلورهای آپاتیت مورد مطالعه میزان MnO در آپاتیتهای سیینیتها در بین دو دیده نمی شود. مواد فرار به ویژه هالوژن ها از اجزای گروه قرار می گیرد (شکل ۵-a). در مورد SiO<sub>2</sub> روند اصلى تشكيل دهنده ساختار آياتيت محسوب مى-متفاوت است و میزان سیلیس در آپاتیتهای نفلین شوند. براساس میزان Cl ،F و OH آپاتیت به سه گروه سیینیتها بالاتر از سیینیتها و آلکالی گرانیتها فلوئوروآپاتیت، کلرین آپاتیت و هیدروکسی آپاتیت می باشد (شکل b-۵). میزان Rb در آپاتیت سیینیتها تقسیمبندی می شود. بلورهای آپاتیت در سنگهای از دو گروه دیگر کمتر می باشد (شکل C-۵) ولی میزان فلسيک توده پيرانشهر همگي در رده فلوئوروآپاتيت Ba و Sr تغییرات منظمی در آپاتیتهای انواع سنگهای فلسیک نشان نمیدهد (شکل ۵-d و e). بلورهای آپاتیت در نمونههای نفلین سیینیت دارای بیشترین مقادیر عناصر فلزی همچون V، Cr و Ni می باشند. مقادیر این فلزات در آپاتیتهای آلکالی-فلدسپار گرانیت از همه کمتر است و آپاتیتهای سیینیتها ترکیب بینابین دارند (شکل f-h-۵). در بسیاری از عناصر HFSE همچون Zr ،Nb ،Y ،Ga، همچون Th ،U ،Hf و عناصر نادر خاکی (REE) بلورهای آپاتیت در نمونههای آلکالی گرانیت غنی شدگی نشان میدهند درحالی که آپاتیتهای نفلین سینیتها از این عناصر به نسبت فقیر شده هستند (شکل۶). نمودارهای الگوی بهنجارشده نسبت به کندریت

عناصر نادر خاکی برای آپاتیتها و سنگکل نمونه-های مورد مطالعه در شکل۷ نمایش داده شدهاند. همان گونه که مشاهده می شود، روند الگوی REE در آپاتیتها انطباق خوبی با سنگکل نشان میدهد. البته فراوانی عناصر نادر خاکی در آپاتیت چندین برابر بیشتر از سنگ کل می باشد (شکل ۷). در همه نمونهها عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) غنی شده هستند اما نسبتها در انواع سنگهای فلسیک متفاوت است.

قرار می گیرند (شکل a-۴). البته بررسی جزئیات تغییراتهالوژنها در آپاتیتهای مورد مطالعه نشان می دهد که مقادیر F و Cl در سه گروه سنگهای فلسیک یکسان نیست. آپاتیت در نمونههای آلکالی فلدسپار به طور میانگین %۳/۲ wt فلوئور دارد در حالی که میزان F در آپاتیتهای سیینیتها (میانگین ۲/۶ wt%) و نفلین سیینیتها (میانگین %۱/۵ wt)) کمتر است. در سوی دیگر آپاتیتهای نمونههای نفلین سیینیت دارای کلر بالاتر از آپاتیتهای سیینیتها و آلکالیفلدسپار گرانیت میباشند (شکل b-4). بهطور کلی نسبت F/Cl از کمتر از ۲ در آپاتیتهای نمونههای نفلین سیینیت تا بیش از ۵۰/۵ در آپاتیتهای آلکالی گرانیت تغییر میکند و به همین علت از این نسبت می توان برای بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی بلورهای آپاتیت در نمودارهای دوتایی استفاده کرد (شکلهای ۵ و ۶). ترکیب عناصر کمیاب در بلورهای آپاتیت انواع

سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر تغییرات و روندهای متفاوتی ظاهر میسازند. آپاتیت در نمونه-های آلکالیفلدسپار گرانیت دارای بالاترین مقادیر MnO می باشند و آپاتیتهای نمونههای نفلین سیپنیت کمترین میزان منگنز را دارا می باشند.

شیب در روند الگوی REE در آپاتیتهای آلکالی-	بلورهای آپاتیت در نمونههای سیینیتی روندی کم-
فلدسپار گرانیت مشاهده میشود که تفکیکیافته-	شیب در الگوی La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> =۲/۷ -۴/۹) REE) با
ترین الگو (۱۲/۳– ۸/۵–۱۵/۷ا) با مقادیر پایین	مقادیر متفاوت آنومالی Eu/Eu <sup>*</sup> =• /۳۳ – ۱/۲۷) Eu
*Eu/Eu (۴/۴۰ – ۰/۴) را ظاهر میسازند (شکل c-۷).	دارند (شکل a-۷). هرچند فراوانی REE در آپاتیت-
بهطور کلی نسبت LREE/HREE در آپاتیتها از	های نفلینسیینیت کمتر از سیینیتها است، الگوی
سيينيتها به سمت نفلينسيينيتها و آلكالىفلدسپار	REE در آنها تحولیافتهتر و دارای شیب بیشتر
گرانیت افزایش مییابد (شکل d-۷).	(La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> =۵/۴ -۶/۹) و انومالی شدید Eu
	Eu/Eu <sup>*</sup> =•/۲۹) میباشد (شکل b-۲). بیشترین

جدول ۱- نتایج آنالیز اکسیدهای اصلی ( wt%) و عناصر کمیاب (ppm) بلورهای آپاتیت درنمونه سنگهای مورد مطالعه. GR: آلکالی-فلدسپار گرانیت، PU: نفلین سیینیت، SY: سیینیت.

Table 3. The results of apatite major oxides (wt%) and trace elements (ppm) analyses of the studied samples. GR: alkali-feldspar granite, PU: nepheline syenite, SY: syenite.

Sample	N33G-ap-	N33G-ap-	N33G-ap-	N72G-ap-	N72G-ap-	N72G-ap-	N72G-ap-	N67G-ap-
	GP	<u> </u>	GP	CP	<u> </u>	GP	GP	
SiO	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.11
TiO	0.04	0.02	0.00	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04
	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04
FeOt	0.03	0.05	0.06	0.00	0.09	0.00	0.06	0.00
MgO	0.00	0.06	0.00	0.03	0.03	0.05	0.03	0.00
MnO	0.05	0.06	0.06	0.09	0.08	0.07	0.05	0.01
CaO	53.74	54.16	54.02	54.16	53.78	54.25	53.92	54.32
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$P_2O_5$	41.72	40.95	41.44	41.19	41.68	41.36	41.5	42.07
Cl%	0.45	0.39	0.43	0.13	0.18	0.25	0.2	1.02
F%	2.93	3.15	3.16	3.52	3.37	3.22	3.35	1.37
Total	98.97	98.88	99.22	99.29	99.25	99.4	99.17	98.95
Rb	30.53	34.02	43.17	49.26	49.77	32.12	45.11	42.39
Cs	0.16	0.13	0.12	0.14	0.18	0.16	0.17	0.13
Sr	21.54	20.17	27.36	22.88	22.65	23.66	16.52	19.45
Ba	91.55	69.65	74.07	43.63	54.28	46.44	72.12	12.9
V	0.83	0.72	0.81	0.64	0.73	0.76	0.68	3.35
Cr	0.55	0.86	0.75	0.53	0.69	0.37	0.47	2.57
Ni	0.51	0.72	0.35	0.76	0.47	0.63	0.91	1.79
Ga	5.87	6.75	6.51	7.04	6.92	6.07	6.34	4.16
Y	315.81	850.09	896.89	1429.41	1375.23	1205.5	1159.68	72.1
Nb	1.08	2.53	2.89	4.35	4.13	3.78	3.61	0.2
Zr	75.5	160.17	268.08	218.47	171.29	263.54	197.86	8.87
Hf	10.72	19.12	19.94	34.13	25.26	28.79	28	0.83
U	42.13	68.19	50.74	74.73	71.07	53.21	77.82	11.9
Th	352.3	1073.5	1107.8	1717.2	1699.1	1588.9	1455.3	27.81
La	398.45	907.06	866.27	1393.78	1313.29	1150.9	1202.62	34.46
Ce	873.36	2457.16	2319.56	3940.43	3557.6	3117.69	3257.81	114.89
Pr	99.64	279.46	263.82	447.92	404.62	354.59	370.52	9.23
Nd	363.7	1126.35	1063.28	1835.61	1630.79	1429.14	1493.37	40.05
Sm	69.66	245.97	236.92	418.11	349.37	312.44	313.75	8.14
Eu	8.1	19.57	17.15	26.02	25.39	20.26	24.74	0.97
Gd	55.86	220.71	208.35	372.02	319.56	280.04	292.63	7.68
Tb	8.99	34.31	32.39	57.59	49.68	43.54	45.49	1.25

ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک ...

0.63 3 7.28 9 .76 1 1.85 7	39.46 39.46   98.4 98.4   12.83 12.19	37.25 94.25 12.72	65.99 140.79 18.49	57.13 134.64 17.56	50.07 124.76 16.14	52.32 127.46 16.67	1.6 4.19 0.62
7.28 9   .76 1   1.85 7	98.4 9 12.83 7 72.19 0	94.25 12.72 58 17	140.79 18.49	134.64 17.56	124.76 16.14	127.46 16.67	4.19 0.62
.76 1 1.85 7	12.83 1 72.19 0	12.72	18.49	17.56	16.14	16.67	0.62
1.85 7	72.19 0	58 17	10				
		JO.17	105.64	102.92	90.82	95	3.47
.55 7	7.24 0	5.91	9.14	8.87	8.83	8.56	0.52
997.47 5	5723.05	5418.05	9170.64	8264.38	7255.95	7569.21	234.86
.42 (	).28 (	0.26	0.22	0.25	0.23	0.27	0.40
.05 1	1.17	1.17	1.20	1.17	1.17	1.17	1.55
8.9 -	-8.68 -	-8.68	-8.46	-8.9	-8.24	-8.02	-10
58.15 8	358.15 8	858.15	844.38	844.8	844.8	844.38	610.43
	97.47 5 42 ( 05 1 .9 -	35 7.24 1   197.47 5723.05 2   42 0.28 0   05 1.17 1   .9 -8.68 1   8.15 858.15 8	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	55   7.24   0.31   9.14     997.47   5723.05   5418.05   9170.64     42   0.28   0.26   0.22     05   1.17   1.17   1.20     .9   -8.68   -8.68   -8.46     (8.15)   858.15   858.15   844.38	5.5   7.24   0.91   9.14   8.87     997.47   5723.05   5418.05   9170.64   8264.38     42   0.28   0.26   0.22   0.25     05   1.17   1.17   1.20   1.17     .9   -8.68   -8.68   -8.46   -8.9     88.15   858.15   858.15   844.38   844.8	5.5   7.24   6.91   9.14   6.87   8.85     997.47   5723.05   5418.05   9170.64   8264.38   7255.95     42   0.28   0.26   0.22   0.25   0.23     05   1.17   1.17   1.20   1.17   1.17     .9   -8.68   -8.68   -8.46   -8.9   -8.24     88.15   858.15   858.15   844.38   844.8   844.8	55   7.24   6.31   9.14   6.87   8.63   8.55   8.50     997.47   5723.05   5418.05   9170.64   8264.38   7255.95   7569.21     42   0.28   0.26   0.22   0.25   0.23   0.27     05   1.17   1.17   1.17   1.17   1.17     .9   -8.68   -8.68   -8.46   -8.9   -8.24   -8.02     88.15   858.15   844.38   844.8   844.8   844.38

Sample	N67G-ap-	N67G-ap-	N67G-ap-	N68G-ap-	N68G-ap-	N75G-ap-	N75G-ap-	N75G-ap-
No	2	3	4	1	2	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	0.10	0.11	0.08	0.09	0.09	0.05	0.04	0.05
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
FeOt	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
MgO	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
MnO	0.01	0.00	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.05
CaO	54.68	54.63	53.84	53.9	54.23	54.17	53.51	53.86
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
$K_2O$	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
$P_2O_5$	41.66	41.8	42.47	42.31	41.75	41.72	42.21	41.65
Cl%	0.95	1.18	0.91	0.89	0.93	0.75	0.68	0.62
F%	1.35	1.22	1.63	1.82	1.52	2.25	2.36	2.54
Total	98.8	98.99	99	99.1	98.57	99.02	98.9	98.81
Rb	48.75	36.88	41.87	41.34	43.63	7.64	9.59	10.94
Cs	0.15	0.11	0.12	0.1	0.16	0.02	0.02	0.03
Sr	22.37	16.92	22.58	25.71	24.6	20.41	17.65	16.97
Ba	13.36	12.52	12.17	21.44	13.67	65.43	81.2	67.33
V	3.18	3.49	3.2	3.22	3.37	1.98	1.57	1.56
Cr	2.32	2.46	2.48	2.24	2.11	1.4	1.5	1.61
Ni	2.18	2.13	2.26	2.06	1.95	1.49	1.33	1.3
Ga	4.28	4.72	4.47	4.83	4.71	5.13	5.11	5.26
Y	72.87	62.65	86.61	91.17	91.16	137.61	194.97	251.3
Nb	0.23	0.18	0.24	0.28	0.26	0.43	0.40	0.49
Zr	7.00	5.56	13.36	12.58	11.71	14.45	18.85	22.19
Hf	0.96	0.72	2.03	2.23	1.05	1.47	1.58	2.65
U	13.66	10.35	11.8	11.72	15.05	2.38	2.88	3.63
Th	35.97	24.19	36.57	43.35	31.18	6.47	9.08	9.79
La	39.51	29.89	63.91	93.47	43.46	58.34	79.47	93.21
Ce	132.12	99.95	184.48	254.07	145.33	160.85	224.99	266.06
Pr	10.62	8.03	20.71	32.2	11.68	24.26	34.34	40.76
Nd	46.06	34.85	85.8	131.54	50.67	111.4	161.49	193
Sm	9.31	7.082	18.95	29.76	10.22	27.52	39.15	46.66
Eu	1.22	0.93	1.7	2.81	1.29	11.05	11.21	11.73
Gd	8.83	6.68	16.52	25.36	9.72	25.54	38.54	46.58
Tb	1.44	1.09	2.59	3.93	1.59	4.09	6.01	7.21
Dy	8.96	6.78	15.62	23.45	9.86	23.76	33.9	40.32
Но	1.84	1.39	3.01	4.42	2.02	4.47	6.3	7.47
Er	4.89	3.56	7.57	8.97	5.28	10.25	15.43	18.63
Tm	0.74	0.49	1.02	1.35	0.77	1.41	2.21	2.69
Yb	3.99	2.93	7.62	11.75	4.37	8.03	13.55	16.85

ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک ...

مظهری و پانگ

Lu	0.61	0.43	0.95	1.48	0.64	0.93	1.85	2.38
Sum REE	270.14	204.082	430.45	624.56	296.9	471.9	668.44	793.55
δΕυ	0.44	0.44	0.32	0.34	0.42	1.36	0.96	0.84
δCe	1.55	1.55	1.22	1.11	1.55	1.03	1.04	1.04
log fO2	-9.78	-9.78	-9.56	-9.12	-9.34	-9.34	-9.34	-9.12
Т°С	610.43	610.43	668.25	610.43	668.25	782.93	782.93	817.76

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Sample	N60G-ap-	N60G-ap-	N29G-ap-	N29G-ap-	N29G-ap-	N71G-ap-	N710 1
ID     SY     SY     SY     SY     SY     SY     SY     SY       SiO <sub>2</sub> 0.04     0.06     0.03     0.05     0.04     0.03     0.02       TiO <sub>2</sub> 0.02     0.00     0.01     0.04     0.02     0.01     0.01       AlgO     0.03     0.03     0.04     0.04     0.03     0.04       MgO     0.04     0.04     0.04     0.05     0.05     0.04       MgO     0.04     0.04     0.04     0.05     0.05     0.06       CaO     53.99     53.7     53.95     54.19     53.87     53.91     53.73       NaCO     0.00     0.01     0.00     0.00     0.00     0.00     0.00       KaO     0.00     0.01     0.00	No	1	2	1	2	3	2	N/IG-ap-1
SiO: $0.04$ $0.06$ $0.03$ $0.05$ $0.04$ $0.03$ $0.02$ TiO: $0.02$ $0.00$ $0.01$ $0.00$ $0.01$ $0.01$ $0.01$ Al-D3 $0.01$ $0.00$ $0.00$ $0.01$ $0.01$ $0.01$ FeO $0.03$ $0.03$ $0.04$ $0.04$ $0.04$ $0.03$ $0.04$ MgO $0.05$ $0.04$ $0.04$ $0.04$ $0.05$ $0.04$ $0.07$ CaO $53.99$ $53.7$ $53.95$ $54.19$ $53.87$ $53.91$ $53.73$ Na:O $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ KaO $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ So $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ $0.00$ Particle $41.62$ $41.77$ $41.33$ $41.49$ $41.31$ $41.61$ F% $2.56$ $2.33$ $2.63$ $2.69$ $2.76$ $2.80$ $2.95$ Total $98.99$ $98.64$ $99.99$ $98.68$ $98.99$ $98.67$ Rb $12.3$ $9.67$ $19.62$ $20.66$ $21.69$ $24.51$ $23.76$ Cs $0.03$ $0.02$ $0.03$ $0.04$ $0.04$ $0.05$ $0.07$ Sr $1.623$ $18.35$ $16.63$ $19.14$ $20.12$ $22.77$ $1.19$ Cr $1.73$ $1.56$ $1.51$ $1.16$ $1.22$ $1.38$ $1.29$ Ni $1.51$ $1.76$ $1.23$ <	ID	SY						
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	SiO <sub>2</sub>	0.04	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	TiO <sub>2</sub>	0.02	0.00	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01
Fool0.030.040.040.040.040.030.04MgO0.040.060.030.000.040.050.040.07CaO53.9953.753.9554.1953.8753.9153.73Na:O0.000.010.010.000.000.000.00Pool41.6241.7741.3341.4941.3141.641.38Cl%0.640.690.570.540.550.510.41P%2.562.332.632.692.762.802.95Total98.9998.6998.6499.0998.6898.9998.67Rb12.39.6719.6220.6621.6924.5123.76Cs0.030.020.030.040.040.050.07Sr16.2918.3516.6319.1420.122.7023.76Cs0.030.040.441.552.122.271.19Cr1.731.561.151.161.221.381.29Ni1.511.701.231.561.181.301.44Ga5.425.275.575.355.615.345.53Y219.75186.45388.75428.11408.51484.12Mb0.590.510.720.930.891.061.14Zr1.5520.1129.6534.1125.3228.61 <td><math>Al_2O_3</math></td> <td>0.01</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.01</td> <td>0.01</td>	$Al_2O_3$	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	FeOt	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	MgO	0.04	0.06	0.03	0.00	0.04	0.05	0.05
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	MnO	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.07
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	CaO	53.99	53.7	53.95	54.19	53.87	53.91	53.73
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Na <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$P_2O_5$	41.62	41.77	41.33	41.49	41.31	41.6	41.38
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Cl%	0.64	0.69	0.57	0.54	0.55	0.51	0.41
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	F%	2.56	2.33	2.63	2.69	2.76	2.80	2.95
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Total	98.99	98.69	98.64	99.09	98.68	98.99	98.67
Cs $0.03$ $0.02$ $0.03$ $0.04$ $0.04$ $0.05$ $0.07$ Sr $16.29$ $18.35$ $16.63$ $19.14$ $20.1$ $22.70$ $23.56$ Ba $53.42$ $84.44$ $39.08$ $58.35$ $61.26$ $69.22$ $83.44$ V $1.62$ $1.73$ $1.34$ $1.55$ $2.12$ $2.27$ $1.19$ Cr $1.73$ $1.56$ $1.15$ $1.16$ $1.22$ $1.38$ $1.29$ Ni $1.51$ $1.70$ $1.23$ $1.56$ $1.18$ $1.30$ $1.44$ Ga $542$ $5.27$ $5.57$ $5.35$ $5.61$ $5.34$ $5.53$ Y $219.75$ $186.45$ $388.75$ $428.1$ $408.51$ $484.12$ $468.23$ Nb $0.59$ $0.51$ $0.72$ $0.93$ $0.89$ $1.06$ $1.14$ Zr $15.55$ $20.11$ $29.65$ $34.11$ $25.32$ $28.61$ $32.66$ Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $23.399$ $48.48$ $62.187$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$	Rb	12.3	9.67	19.62	20.66	21.69	24.51	23.76
Sr16.2918.3516.6319.1420.122.7023.56Ba53.4284.4439.0858.3561.2669.2283.44V1.621.731.341.552.122.271.19Cr1.731.561.151.161.221.381.29Ni1.511.701.231.561.181.301.44Ga5.425.275.575.355.615.345.53Y219.75186.45388.75428.1408.51484.12468.23Nb0.590.510.720.930.891.061.14Zr15.5520.1129.6534.1125.3228.6132.66Hf2.742.263.697.077.438.3912.16U3.253.013.2412.7615.1613.4318.60Th12.4210.4415.9266.2369.5378.5883.17La106.9682.65162.42204.81215.05243.00267.68Ce307.13233.99484.86621.87652.97737.81821.06Pr47.1835.7272.7983.0487.1998.52101.59Nd224.5167.95360.16377.18396.04447.5431.91Sm54.0840.6284.9288.7992.23104.34101.54Eu12.2611.659.95<	Cs	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07
Ba $53.42$ $84.44$ $39.08$ $58.35$ $61.26$ $69.22$ $83.44$ V $1.62$ $1.73$ $1.34$ $1.55$ $2.12$ $2.27$ $1.19$ Cr $1.73$ $1.56$ $1.15$ $1.16$ $1.22$ $1.38$ $1.29$ Ni $1.51$ $1.70$ $1.23$ $1.56$ $1.18$ $1.30$ $1.44$ Ga $5.42$ $5.27$ $5.57$ $5.35$ $5.61$ $5.34$ $5.53$ Y $219.75$ $186.45$ $388.75$ $428.1$ $408.51$ $484.12$ $468.23$ Nb $0.59$ $0.51$ $0.72$ $0.93$ $0.89$ $1.06$ $1.14$ Zr $15.55$ $20.11$ $29.65$ $34.11$ $25.32$ $28.61$ $32.66$ Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $477.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$	Sr	16.29	18.35	16.63	19.14	20.1	22.70	23.56
V1.621.731.341.552.122.271.19Cr1.731.561.151.161.221.381.29Ni1.511.701.231.561.181.301.44Ga5.425.275.575.355.615.345.53Y219.75186.45388.75428.1408.51484.12468.23Nb0.590.510.720.930.891.061.14Zr15.5520.1129.6534.1125.3228.6132.66Hf2.742.263.697.077.438.3912.16U3.253.013.2412.7615.1613.4318.60Th12.4210.4415.9266.2369.5378.5883.17La106.9682.65162.42204.81215.05243.00267.68Ce307.13233.99484.88621.87652.97737.81821.06Pr47.1835.7272.7983.0487.1998.52101.59Nd224.5167.95360.16377.18396.04447.5431.91Sm54.0840.6284.9288.7992.23104.34101.54Eu12.2611.659.959.499.9611.069.98Gd54.6240.0880.7683.0887.2398.5693.70Tb8.426.2511.8<	Ba	53.42	84.44	39.08	58.35	61.26	69.22	83.44
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	V	1.62	1.73	1.34	1.55	2.12	2.27	1.19
Ni $1.51$ $1.70$ $1.23$ $1.56$ $1.18$ $1.30$ $1.44$ Ga $5.42$ $5.27$ $5.57$ $5.35$ $5.61$ $5.34$ $5.53$ Y $219.75$ $186.45$ $388.75$ $428.1$ $408.51$ $484.12$ $468.23$ Nb $0.59$ $0.51$ $0.72$ $0.93$ $0.89$ $1.06$ $1.14$ Zr $15.55$ $20.11$ $29.65$ $34.11$ $25.32$ $28.61$ $32.66$ Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.55$ $11.40$	Cr	1.73	1.56	1.15	1.16	1.22	1.38	1.29
Ga $5.42$ $5.27$ $5.57$ $5.35$ $5.61$ $5.34$ $5.53$ Y $219.75$ $186.45$ $388.75$ $428.1$ $408.51$ $484.12$ $468.23$ Nb $0.59$ $0.51$ $0.72$ $0.93$ $0.89$ $1.06$ $1.14$ Zr $15.55$ $20.11$ $29.65$ $34.11$ $25.32$ $28.61$ $32.66$ Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.55$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ <td>Ni</td> <td>1.51</td> <td>1.70</td> <td>1.23</td> <td>1.56</td> <td>1.18</td> <td>1.30</td> <td>1.44</td>	Ni	1.51	1.70	1.23	1.56	1.18	1.30	1.44
Y219.75186.45388.75428.1408.51484.12468.23Nb $0.59$ $0.51$ $0.72$ $0.93$ $0.89$ $1.06$ $1.14$ Zr $15.55$ $20.11$ $29.65$ $34.11$ $25.32$ $28.61$ $32.66$ Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$	Ga	5.42	5.27	5.57	5.35	5.61	5.34	5.53
Nb $0.59$ $0.51$ $0.72$ $0.93$ $0.89$ $1.06$ $1.14$ Zr $15.55$ $20.11$ $29.65$ $34.11$ $25.32$ $28.61$ $32.66$ Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ <t< td=""><td>Y</td><td>219.75</td><td>186.45</td><td>388.75</td><td>428.1</td><td>408.51</td><td>484.12</td><td>468.23</td></t<>	Y	219.75	186.45	388.75	428.1	408.51	484.12	468.23
Zr15.5520.1129.65 $34.11$ 25.3228.61 $32.66$ Hf2.742.26 $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ </td <td>Nb</td> <td>0.59</td> <td>0.51</td> <td>0.72</td> <td>0.93</td> <td>0.89</td> <td>1.06</td> <td>1.14</td>	Nb	0.59	0.51	0.72	0.93	0.89	1.06	1.14
Hf $2.74$ $2.26$ $3.69$ $7.07$ $7.43$ $8.39$ $12.16$ U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ <td< td=""><td>Zr</td><td>15.55</td><td>20.11</td><td>29.65</td><td>34.11</td><td>25.32</td><td>28.61</td><td>32.66</td></td<>	Zr	15.55	20.11	29.65	34.11	25.32	28.61	32.66
U $3.25$ $3.01$ $3.24$ $12.76$ $15.16$ $13.43$ $18.60$ Th $12.42$ $10.44$ $15.92$ $66.23$ $69.53$ $78.58$ $83.17$ La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$	Hf	2.74	2.26	3.69	7.07	7.43	8.39	12.16
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	U	3.25	3.01	3.24	12.76	15.16	13.43	18.60
La $106.96$ $82.65$ $162.42$ $204.81$ $215.05$ $243.00$ $267.68$ Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	Th	12.42	10.44	15.92	66.23	69.53	78.58	83.17
Ce $307.13$ $233.99$ $484.88$ $621.87$ $652.97$ $737.81$ $821.06$ Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	La	106.96	82.65	162.42	204.81	215.05	243.00	267.68
Pr $47.18$ $35.72$ $72.79$ $83.04$ $87.19$ $98.52$ $101.59$ Nd $224.5$ $167.95$ $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	Ce	307.13	233.99	484.88	621.87	652.97	737.81	821.06
Nd224.5167.95 $360.16$ $377.18$ $396.04$ $447.5$ $431.91$ Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	Pr	47.18	35.72	72.79	83.04	87.19	98.52	101.59
Sm $54.08$ $40.62$ $84.92$ $88.79$ $92.23$ $104.34$ $101.54$ Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	Nd	224.5	167.95	360.16	377.18	396.04	447.5	431.91
Eu $12.26$ $11.65$ $9.95$ $9.49$ $9.96$ $11.06$ $9.98$ Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	Sm	54.08	40.62	84.92	88.79	92.23	104.34	101.54
Gd $54.62$ $40.08$ $80.76$ $83.08$ $87.23$ $98.56$ $93.70$ Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$ $\delta Eu$ $0.75$ $0.96$ $0.41$ $0.37$ $0.37$ $0.24$	Eu	12.26	11.65	9.95	9.49	9.96	11.06	9.98
Tb $8.42$ $6.25$ $11.8$ $12.66$ $13.29$ $15.02$ $14.78$ Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$	Gd	54.62	40.08	80.76	83.08	87.23	98.56	93.70
Dy $46.75$ $35.25$ $70.96$ $76.03$ $79.83$ $90.2$ $88.7$ Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$ Seu $0.75$ $0.96$ $0.41$ $0.37$ $0.37$ $0.37$ $0.37$ $0.24$	Tb	8.42	6.25	11.8	12.66	13.29	15.02	14.78
Ho $8.63$ $6.55$ $14.01$ $15.01$ $15.76$ $17.81$ $17.51$ Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$ Seu $0.75$ $0.96$ $0.41$ $0.37$ $0.37$ $0.37$ $0.37$ $0.24$	Dy	46.75	35.25	70.96	76.03	79.83	90.2	88.7
Er $21.84$ $15.74$ $35.4$ $39.54$ $41.41$ $45.79$ $47.41$ Tm $3.18$ $2.27$ $5.98$ $6.45$ $6.72$ $7.3$ $7.47$ Yb $20.15$ $13.89$ $41.02$ $42.65$ $44.67$ $49.48$ $48.33$ Lu $2.91$ $1.92$ $5.75$ $6.09$ $6.29$ $6.70$ $6.82$ Sum REE $918.61$ $694.53$ $1440.8$ $1666.69$ $1748.64$ $1973.09$ $2058.48$ SEu $0.75$ $0.96$ $0.41$ $0.37$ $0.37$ $0.37$ $0.24$	Ho	8.63	6.55	14.01	15.01	15.76	17.81	17.51
Tm   3.18   2.27   5.98   6.45   6.72   7.3   7.47     Yb   20.15   13.89   41.02   42.65   44.67   49.48   48.33     Lu   2.91   1.92   5.75   6.09   6.29   6.70   6.82     Sum REE   918.61   694.53   1440.8   1666.69   1748.64   1973.09   2058.48     SEu   0.75   0.96   0.41   0.37   0.37   0.37   0.24	Er	21.84	15.74	35.4	39.54	41.41	45.79	47.41
Yb   20.15   13.89   41.02   42.65   44.67   49.48   48.33     Lu   2.91   1.92   5.75   6.09   6.29   6.70   6.82     Sum REE   918.61   694.53   1440.8   1666.69   1748.64   1973.09   2058.48     & Eu   0.75   0.96   0.41   0.37   0.37   0.37   0.34	Tm	3.18	2.27	5.98	6.45	6.72	7.3	7.47
Lu   2.91   1.92   5.75   6.09   6.29   6.70   6.82     Sum REE   918.61   694.53   1440.8   1666.69   1748.64   1973.09   2058.48     SEu   0.75   0.96   0.41   0.37   0.37   0.37   0.34	Yb	20.15	13.89	41.02	42.65	44.67	49.48	48.33
Sum REE     918.61     694.53     1440.8     1666.69     1748.64     1973.09     2058.48       SEu     0.75     0.96     0.41     0.37     0.37     0.37     0.34	Lu	2.91	1.92	5.75	6.09	6.29	6.70	6.82
SEv. 0.75 0.06 0.41 0.37 0.37 0.37 0.24	Sum REE	918.61	694.53	1440.8	1666.69	1748.64	1973.09	2058.48
0Eu 0.75 0.90 0.41 0.57 0.57 0.57 0.54	δΕυ	0.75	0.96	0.41	0.37	0.37	0.37	0.34



شکل ۴- نمایش ترکیب آپاتیت در نمونههای مورد مطالعه بر روی نمودارهای F-Cl-OH (a) و فلوئور در برابر کلر (b). Fig. 4. Plot of apatite composition of the studied samples on the F-Cl-OH (a) and fluorine vs. chlorine (b) diagrams.

بحث

ترکیب ژئوشیمیایی آپاتیت در سنگهای آذرین توسط فاکتورهای متعددی کنترل میشود ( Liu et (al., 2023). ۱) ترکیب منبع ماگما یا ماگمای مادر، ۲) تبلور کانیهای رقیب همزمان یا قبل از آپاتیت، ۳) ضرایب توزیع عناصر بین آپاتیت و مذاب و ۴) شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل. علاوه بر این

ترکیب اولیه آپاتیت ممکن است تحت تأثیر فرایندهای بعد از تبلور مثل دگرسانی هیدروترمال یا دگرگونی نیز تغییر کند (Henrichs et al., 2018). بنابراین برای استفاده از تغییرات ترکیبی آپاتیت در مطالعات پترولوژیکی و بازسازی فرایندهای ماگمایی تعیین تأثیر هر کدام از این عوامل مهم میباشد.

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2024-04-29



شکل ۵- نمودارهای دوتایی نسبت F/Cl در مقابل ترکیب عناصر کمیاب در بلورهای آپاتیت نمونههای مورد مطالعه. علائم همانند شکل ۴ است.

Fig. 5. Binary diagrams of F/Cl vs. trace element composition in apatite grains of the studied samples. The symbols are similar to Fig.4.



شکل ۶- نمودارهای دوتایی نسبت F/Cl در مقابل ترکیب عناصر HFSE و REE∑ در بلورهای آپاتیت نمونههای مورد مطالعه. علائم مشابه شکل ۴ است.

Fig. 6. Binary diagrams of F/Cl vs. HFSE and  $\sum$ REE in apatite grains of the studied samples. The symbols are the same as Fig. 4.



شکل ۷- نمودارهای الگوی بهنجارشده REE برای آپاتیتها و سنگ کل در نمونههای مورد مطالعه: a) سیینیتها، b) نفلینسیینیتها و c) آلکالیفلدسپار گرانیت. مقادیر مورد استفاده برای بهنجارسازی از بوینتون (Boynton, 1984) میباشد. d) نسبت LREE (La+Ce+Pr+Nd) به HREE(C+Tm+Yb+Lu) HREE) در آپاتیتهای مورد مطالعه. GR-ap: آپاتیتهای آلکالیفلدسپار گرانیت، Pu-ap: آپاتیتهای نفلینسیینیت، SY-ap: آپاتیتهای سیینیت.

Fig. 7. Chondrite-normalized REE patterns of apatites and whole-rock samples: a) syenites, b) nepheline syenites, and c) alkali-feldspar syenites. Normalizing values are from Boynton (1984). d) The ratios of LREE (La+Ce+Pr+Nd) to HREE (Er+Tm+Yb+Lu) for the studied apatites. GR-ap: alkali-feldspar granites apatites, Pu-ap: nepheline syenites apatites, SY-ap: syenites apatites.

فرایندهای ثانویه هستند. این مشخصات می تواند نشاندهنده تبلور آنها از ماگمای در حال تعادل یا شرایط نزدیک به تعادل باشد (, Ladenburger et al. 2016). الگوی REE و محدوده تغییرات ترکیب عناصر کمیاب آپاتیتهای مورد مطالعه نیز شبیه به سنگ میزبان می باشد که حکایت از این دارد که منشأ ماگمایی آپاتیتها در بخشهای قبل بیان گردید که آپاتیتهای مورد مطالعه در سنگهای فلسیک توده پیرانشهر به-صورت شکلدار تا نیمهشکلدار با سطوح بلوری به خوبی شکلیافته ظاهر میشوند (شکل۳)، و اغلب دارای ترکیبی همگن بدون آثار دگرسانی یا

بلورهای آپاتیت به احتمال فراوان آپاتیتهای اولیه میباشند (Rønsbo, 2008).

معمولاً مقادیر MnO آپاتیتهای متأثر از فرایندهای هیدروترمال بالاتر از ۳۷% است که این امر در مورد آپاتیتهای منطقه مورد مطالعه صدق نمی کند (شکل ۸–۵) و آپاتیتهای دگرگونی نیز IREE/HREE یکنواختی بدون تفکیک REE/HREE دارند (O'Sullivan et al., 2020). ترکیب آپاتیتها در سنگهای فلسیک توده پیرانشهر با الگوهای تفکیک یافته، روندهای کاملا متفاوت با آپاتیتهای دگرگونی نشان میدهند (شکل ۷). مجموع این شواهد بافتی و ترکیبی حاکی از آن است که فرایندهای بعد از تبلور نقش چندانی در تشکیل بلورهای آپاتیت مورد مطالعه نداشتهاند و آنها را میتوان به عنوان آپاتیت ماگمایی در نظر گرفت.

بررسی ضریب توزیع عناصر کمیاب و شرایط ترمودینامیکی تشکیل بلورهای آپاتیت

استفاده از ترکیب سنگ کل به عنوان مذاب اولیه برای تخمین ضریب توزیع عناصر کمیاب با چالش-های مختلف همراه است. بااین حال در سنگهای فلسیک به علت ویسکوزیته بالای ماگمای مادر و نقش کمتر تفریق بلوری، به کارگیری ترکیب سنگ کل به عنوان مذاب اولیه رایج است (Pan et al., 2016). برای عنوان مذاب اولیه رایج است (Pan et al., 2016). برای بدست آوردن تخمینی از ضریب توزیع عناصر کمیاب بدست آرایت در سنگهای فلسیک توده پیرانشهر ترکیب میانگین بلورهای آپاتیت آنالیز شده در هر سنگ به عنوان مبنای محاسباتی در نظر گرفته شد. ضریب توزیع برای هر یک از عناصر کمیاب را میتوان از

طريق فرمول زير محاسبه نمود ( ,Chapman et al., ) طريق فرمول زير محاسبه نمود ( ,2016

غلظت عنصر کمیاب در سنگکل/ غلظت عنصر کمیاب در آپاتیت = ضریب توزیع عنصر کمیاب

ضرایب توزیع محاسبه شده آپاتیت از این طریق در شکل b-۸ ارائه شدهاند. همان گونه که مشاهده می شود، ضرایب توزیع عناصر تفاوتهای قابل ملاحظه (تا چند ده برابر)، حتى در انواع مشابه، نشان میدهند. به عنوان مثال در بین همه نمونهها، بیشترین و کمترین مقادیر ضرایب توزیع عناصر REE مربوط به دو نمونه آلکالی گرانیت می شود (به ترتیب نمونههای N33 و N72، شکل b-۸). ضریب توزیع REE محاسبه شده برای آپاتیتها در نمونههای نفلین سیینیت و سیینیتی معمولا بین دو نمونه آلکالیفلدسپار گرانیت هستند. مونازیت و آلانیت اگر همزمان یا قبل از تبلور آپاتیت متبلور شوند، میتوانند تأثير قابل ملاحظه بر روى كاهش ضرايب توزيع بسیاری از عناصر کمیاب همچون REE در آیاتیتها داشتهباشند (به عنوان مثال, Belousova et al., 2002). همان گونه که در بخش پتروگرافی توصيف شد، برخی از نمونههای گرانیتی (من جمله N72) دارای مونازیت و آلانیت هستند، درحالیکه سایر نمونهها (ازجمله N33) فاقد این کانیهای فرعی می-باشند. بنابراین اختلاف بارز بین ضرایب توزیع در آپاتیتهای دو نمونه آلکالی فلدسپار گرانیت را می-توان به تبلور کانی های حاوی عناصر کمیاب در طی سردن ماگما نسبت داد. این موضوع با سایر مطالعات انجام شدہ منطبق می-

باشد که بیانگر تأثیر زیاد ترکیب مذاب و عوامل

گوناگون بر روی ضرایب توزیع میباشد به طوری که

نمی توان ضریب توزیع ثابتی برای عناصر کمیاب در

آیاتیت، حتی برای سنگهای مشابه، ارائه داد (به

عنوان مثال Fujimaki, 1986; Yan et al., 2023).

در نمونههای نفلین سیینیت و سیینیتی کانیهای اولیه که دارای مقادیر بالای عناصر کمیاب باشند در سنگها مشاهده نمیشود (به بخش پتروگرافی مراجعه شود). بااینوجود در این نمونهها نیز علیرغم توزیع نسبتاً یکنواخت، تفاوتهای قابل ملاحظه برای ضریب عناصر کمیاب مشاهده میشود (شکل ۸–6).



شکل A-A) ترسیم ترکیب آپاتیتهای مورد مطالعه در نمودار SiO₂ در مقابل MnO برای تمایز آپاتیت ماگمایی از گرمابی ( Zafar et al., 2020). b) میانگین محاسبه شده ضرایب توزیع عناصر کمیاب بلورهای آپاتیت در سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر. علائم همانند شکل۴ است.

Fig. 8. a) Plot of apatite compositions on the binary diagram of  $SiO_2$  vs. MnO distinctive of magmatic and hydrothermal apatites (Zafar et al., 2020). b) The calculated average partition coefficients of the apatite trace elements for felsic rocks in the Piranshahr plutonic assemblage. Symbols are the same as Fig. 4.

آپاتیت در سیستمهای ماگمایی متاآلومین به علت این که نسبت به سایر کانیها زودتر اشباع می شود و با سایر کانیهای فسفات دار واکنش نمی دهد، می تواند در یک محدوده وسیع دمایی وسیع متبلور شود (سیک محدوده وسیع دمایی وسیع متبلور شود (Wolf and London, 1995). بر همین اساس تخمین دمای تبلور آپاتیت به روشهای مختلف و با استفاده از سیستمهای آزمایشگاهی و طبیعی انجام گرفته و نتایج مناسبی بر روی آزمایش قابلیت انحلال آپاتیت در مذابهای با ترکیب طبیعی بدست آمده آپاتیت در مذابهای با ترکیب طبیعی بدست آمده های متاآلومین تا کمی پرآلومین، دمای تبلور آپاتیت را می توان به کمک معادله تجربی زیر تخمین زد (Harrison and Watson, 1984):

 $T = [26400.C_{SiO2}^{l} - 4800] / [12.4.C_{SiO2}^{l} - ln (C_{P2O5}^{l}) - 3.97]$ (1)

در این معادله T دمای اشباع آپاتیت (بر حسب کلوین)، C<sup>I</sup>sio2 غلظت سیلیس و C<sup>I</sup>sio2 غلظت فسفات در مذابی است که آپاتیت شروع به تبلور می-کند. این غلظتها برحسب درصد وزنی میباشند. از ترکیب سنگ کل به عنوان مذاب در حال تعادل برای محاسبه دمای اشباع آپاتیت در نمونه سنگهای فلسیک استفاده شد. محاسبه دمای اشباع آپاتیت از طریق معادله (۱) دمای بالاتری را برای شروع تبلور در نمونههای آلکالیفلدسپار گرانیت (۸۵۸- ۸۴۴ در جه سانتی گراد) نسبت به سیینیتها (۸۱۸- ۳۸۳ درجه سانتی گراد) و نفلین سیینیتها (۸۹۶- ۶۱۰ درجه سانتی گراد) پیشنهاد می دهد (جدول ۱ پیوست).

فوگاسیته اکسیژن در سنگهای آذرین فلسیک را می توان با استفاده از میزان منگنز در آپاتیت تخمین زد (Miles et al., 2014):

کمیاب در آپاتیت ندارد (Pan et al., 2016 و منابع ذکر شده در آن). برای بررسی صحت این امر در آپاتیتهای مورد مطالعه به بررسی ارتباط فوگاسیته اکسیژن و عناصر کمیاب شاخص در تعیین fO<sub>2</sub> می-یردازیم.

با افزایش فوگاسیته اکسیژن میزان <sup>+E</sup>u<sup>3+</sup> در مذاب افزایش و <sup>+Ce<sup>3+</sup></sup> کاهش مییابد در نتیجه جانشینی <sup>+Eu<sup>3+</sup></sup> در آپاتیت بیشتر شده ولی جانشینی <sup>Eu<sup>3+</sup></sup> کاهش خواهد یافت. این امر منجر به افزایش آنومالی کاهش خواهد یافت. این امر منجر به افزایش آنومالی Eu<sup>3+</sup> و کاهش آنومالی eo (δCe) در الگوی MacDonald et al., و کاهش آنومالی eo (δCe) در الگوی (2013). در بلورهای آپاتیت مورد مطالعه چنین ارتباطی مشاهده نمیشود. آپاتیتهای نمونههای گرانیتی که بالاترین فوگاسیته اکسیژن را دارند، باید دارای بالاترین مقادیر انومالی Eu و کمترین مقادیر مقادیر عربی مقادیر انومالی Eu و کمترین مقادیر مربوط به بخشی از بلورهای آپاتیت نمونههای ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک ...

سیینیتی میباشد (شکل ۹-b). مطالعات پترولوژیکی در توده پیرانشهر نقش تبلور فلدسپار در تحول ماگمایی سنگهای سیینیتی توده پیرانشهر را به اثبات رسانده است (Mazhari et al., 2009). در واقع میتوان گفت تأثیر ترکیب ماگمای مادر و تبلور فلدسپار برای توزیع Eu در بلورهای آپاتیت مورد مطالعه بیشتر از فوگاسیته اکسیژن بوده است.

یکی دیگر از عناصری که در مطالعات تأثیر فوگاسیته اکسیژن بر تبلور آپاتیت مورد توجه قرار گرفته، Ga است (به عنوان مثال Sha and Chappell, 1999). تحقيقات تجربي نشان داده كه اگر سایر شرایط (مثل میزان Ga ماگما) ثابت باشد، با کاهش فوگاسیته اکسیژن غلظت Ga در آپاتیت افزایش می یابد (Pan et al., 2016 و منابع ذکر شده در آن). در بلورهای آپاتیت مورد مطالعه نه تنها این امر مشاهده نشد، بلکه گاه عکس این حالت نیز ظاهر می گردد. به عنوان مثال در نمودار تغییرات Ga در برابر MnO یا  $fO_2$  و  $\delta Ce$  آپاتیتهای نمونههای گرانیتوئیدی علیرغم داشتن بالاترین fO<sub>2</sub>، بالاترین مقادیر Ga را نیز دارا هستند (شکل c,d-۹). مجموع این شواهد بیانگر این است که تغییرات محدود فوگاسیته اکسیژن نمی تواند نقشی تعیین کننده در توزیع و ترکیب عناصر کمیاب آپاتیت در سنگهای فلسيك مجموعه نفوذي پيرانشهر داشته باشد. بررسی تغییرات عناصر کمیاب در انواع

سنگهای فلسیک توده پیرانشهر

مطالعات پترولوژیکی با استفاده از دادههای ژئوشیمیایی، ایزوتوپی و سنسنجی بر روی نمونههای سنگکل مجموعه نفوذی پیرانشهر نشان میدهد که سنگهای فلسیک این مجموعه هم منشأ بوده و نفلین سیینیت ها و گرانیت ها محصولات تفریق یافته از ماگمای سیپنیتی هستند (Mazhari et al., 2009). نوسان در فعالیت شیمیایی سیلیس ماگمای سیینیتی در صفحه بحرانی اشباع از سیلیس می تواند موجب تفکیک سیینیت به دو بخش تحت اشباع (نفلین-سیینیت) و اشباع از سیلیس (گرانیت) شود. ترکیب شیمیایی نفلین سینیتها مطابق است با مذابهای بازمانده غنی از آب و آلکالی که بعدا فاز بخار غنی از F از آن جدا شده است. این امر با مقدار کم فلوئور در نفلینسیینیتها که کمترین مقدار در بین سنگهای فلسیک پیرانشهر است همخوانی دارد، و غنی شدگی در بیشتر عناصر LILE و تهی شدگی HFSE را که به آسانی به صورت کمپلکسهای فلوئور در یک فاز بخار غنی از F منتقل می شوند ( , Montero et al. 1998)، توضيح مي دهد. به طور مشخص تحول سیینیتها به سمت نفلین سیینیتهای تحت اشباع با میزان کم کوارتز نورماتیو در سیینیتهای اطراف آنها بروز می یابد که کمترین میزان کوارتز در نرم تمام سيينيتها مي باشد (Mazhari et al., 2009). آلكالي-فلدسپار گرانیتها بیشترین میزان F و HFSE را در کل مجموعه نفوذی دارند، به طوری که می توان آنها را حاصل تجمع فاز بخار غنی از F دانست که طبق مدل ارائه شده در بررسیهای پتروژنتیکی از ماگمای نفلینسیینیتی خارج شدهاند.



شکل ۹- نمودارهای تغییرات a) دما در برابر فوگاسیته اکسیژن، δCe (b در برابر Ga (c ،δEu در برابر MnO و d) Ga در برابر δCe در بلورهای آپاتیت نمونههای مورد مطالعه. علائم مشابه شکل ۴ میباشند.

Fig. 9. Variation diagrams of a) temperature vs.  $fO_2$ , b)  $\delta Ce$  vs.  $\delta Eu$ , c) Ga vs. MnO, and d) Ga vs.  $\delta Ce$  in the apatite crystals of the studied samples. Symbols are similar to Fig. 4.

در LILE و برخی عناصر فلزی همچون V، Cr و Ni غنی شده هستند (شکل های ۵ و ۶). این تمایز ترکیبی در آپاتیت ها با تفاوت ترکیبی سنگ های میزبان همخوانی دارد. میزان هالوژن ها در بلورهای آپاتیت نیز در راستای میزان هالوژن ها در بلورهای آپاتیت نیز در مطالعات روند تحولات ماگمایی پیشنهاد شده در مطالعات قبلی تغییر می کند. آپاتیت های نمونه های گرانیتی با دقت در نتایج آنالیز شیمیایی بلورهای آپاتیت در سنگهای نفوذی فلسیک پیرانشهر میتوان دریافت که بین ترکیب عناصر کمیاب آپاتیت و سنگکل انطباق خوبی وجود دارد. بلورهای آپاتیت در گرانیتها بالاترین میزان عناصر BEE و SEE و در نفلینسیینیتها کمترین مقادیر از این عناصر را دارا هستند؛ و از سوی دیگر آپاتیتهای نفلینسیینیتها

دارای بیشترین F میباشند درحالی که آپاتیتهای نفلینسیینیتها به نسبت غنی از CI شدهاند (شکل ۴). تغییرات عناصر کمیاب در بلورهای آپاتیت منطبق با تغییرات نسبت F/Cl است (شکلهای ۵ و ۶) که مؤید جدایش فازهای فرار در طی فرایندهای تفریق ماگمایی در سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر میباشد.

# نتيجه گيرى

دادههای ژئوشیمیایی نشان می دهد که سنگهای فلسیک مجموعه نفوذی پیرانشهر به سه گروه هم منشأ سیینیت، آلکالی فلدسپار گرانیت و نفلین-سیینیت تقسیم می شوند. بررسی بافت و نتایج آنالیز شیمیایی بر روی بلورهای آپاتیت انواع سنگهای فلسیک این مجموعه ماهیت ماگمایی آپاتیتها و عدم تأثیر فرایندهای ثانویه بر روی این کانی ها را تأیید می کند.

دمای اشباع آپاتیت نمونههای گرانیتی نسبت به سیینیتها و نفلینسیینیت بالاتر است. محاسبه فوگاسیته اکسیژن با استفاده از میزان Mn در آپاتیت نشانگر تشکیل آپاتیتها در یک محیط اکسیدان با تغییرات محدود میباشد. بررسی تغییرات عناصر کمیاب که غلظت آنها در آپاتیت به طور معمول متأثر از شرایط اکسایش مذاب هستند (همچون Ce مرابع و Ga) پیشنهاد میدهد که فوگاسیته اکسیژن نقش مهمی در تغییرات ترکیبی آپاتیتهای مورد مطالعه نداشته است. ضرایب توزیع عناصر کمیاب بین بلورهای آپاتیت و سنگمیزبان تغییرات شدید و

(همچون مذاب اولیه و دما) بر روی ضرایب توزیع میباشد.

ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک ...

همه آپاتیتهای مورد مطالعه در رده فلوئوروآپاتیت قرار می گیرند ولی نسبت F/Cl در آنها بسیار متغیر است. این نسبت در آپاتیتهای آلکالی-فلدسپار گرانیتها بالاترین مقدار بوده و در نمونههای سیینیتی و نفلینسیینیتی به ترتیب کاهش می یابد. با افزایش F/Cl در آیاتیت میزان عناصر HFSE و REE افزایش و برخی عناصر همچون Ni ،Cr ،Si و V كاهش مىيابد. تغييرات تركيب عناصر كمياب آپاتیت در سنگهای فلسیک پیرانشهر با تغییرات ترکیبی سنگهای میزبان انطباق خوبی نشان میدهد و با روند تحولات ماگمایی پیشنهاد شده در مطالعات پترولوژیکی همخوانی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق مشخص می سازد که بررسی تغییر ترکیب عناصر كمياب آپاتيت مي تواند به درک تحولات ماگمايي، بالاخص در مجموعههایی که تفکیک ماگمایی پیچیده داشته و جدایش فازهای فرار در آنها رخ داده است، کمک کند.

# قدردانی

مطالعات صحرایی و نمونهبرداری این تحقیق با کمک سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شد و هزینه آنالیزهای شیمیایی از طریق بودجه پژوهشی مؤسسه علوم زمین آکادمیا سینیکا، تایون پرداخت شد. در اینجا از همه این عزیزان قدردانی می گردد.

#### References

- Alavi M., 1994. Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229, 211-238.
- Bea F., Mazhari A., Montero P., Amini S., Ghalamghash J., 2011. Zircon dating, Sr and Nd isotopes, and element geochemistry of the Khalifan pluton, NW Iran: evidence for Variscan magmatism in a supposedly Cimmerian superterrane Journal of Asian Earth Sciences 40, 172-179.
- Belousova, E.A., Walters, S., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., 2001. Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland. Australian Journal of Earth Sciences 48, 603-619.
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Fisher, N.I., 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. Journal of Geochemical Exploration 76, 45-69. https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00204-2.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson, P. (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 63-107.
- Bruand, E., Fowler, M., Storey, C., Darling, J., 2017. Apatite trace element and isotope applications to petrogenesis and provenance. American Mineralogist 102, 75-84.
- Chapman, J.B., Gehrels, G.E., Ducea, M.N., Giesler, N., Pullen, A., 2016. A new method for estimating parent rock trace element concentrations from zircon. Chemical Geology 439: 59-70.
- Chew, D.M., Spikings, R.A., 2015. Geochronology and thermochronology using apatite: Time and temperature, lower crust to surface. Elements 11, 189-194. https://doi. org/10.2113/gselements.11.3.189.
- Chu, M-F., Wang, K-L., Griffin, W.L., Chung, S-L., O'Reilly, S.Y., Pearson, N.J., Iizuka, Y. 2009, Apatite composition: Tracing petrogenetic processes in Transhimalayan granitoids. Journal of Petrology 50, 1829-1855.
- Fujimaki, H., 1986. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and liquid. Contribution to Mineralogy and Petrology 84, 42–45. https://doi.org/10.1007/BF00371224.
- Harrison, T.M., Watson, E.B., 1984. The behavior of apatite during crustal anatexis: equilibrium

and kinetic considerations. Geochim Cosmochim Acta 48, 1467-1477.

- Henrichs, I.A., O'Sullivan, G., Chew, D.M., Mark, C., Babechuk, M.J., McKenna, C., Emo, R., 2018. The trace element and U-Pb systematics of metamorphic apatite. Chemical Geology 483, 218–238. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.12.03.
- Ihlen, P.M., Schiellerup, H., Gautneb, H., Skår, Ø., 2014. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential- a review. Ore Geology Review 58, 126–147. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.00 3.
- Ladenburger, S., Marks, M.A.W., Upton, B., Hill, P., Wenzell, T., Markl, G., 2016. Compositional variation of apatite from riftrelated alkaline igneous rocks of the Gardar Province, South Greenland. American Mineralogist 101, 612–626. https://doi.org/ 10.2138/am-2016-5443.
- Laurent, O., Zeh, A., Gerdes, A., Villaros, A., Gros, K., Slaby, E. 2017. How do granitoid magmas mix with each other? Insights from textures, trace element and Sr–Nd isotopic composition of apatite and titanite from the Matok pluton (South Africa). Contribution to Mineralogy and Petrology 172:80.
- Li, H., Ling, M.X., Ding, X., Zhang, H., Li, C.Y., Liu, D.Y., Sun, W.D., 2014. The geochemical characteristics of Haiyang A-type granite complex in Shandong, eastern China. Lithos 200–201, 142–156.
- Liu, S., Zhang, G., Li, H., 2023, Fingerprinting crustal anatexis with apatite trace element, halogen, and Sr isotope data. Geochimica et Cosmochimica Acta 351, 14-31.
- Mazhari S. A., Bea F., Amini S., Ghalamghash, J., Molina, J.F., Pillar, M., Scarrow, J.H., Williams, S., 2009. The Eocene Bimodal Piranshahr Massif of the Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran: A Marker of the End of the Collision in the Zagros Orogen. Journal of the Geological Society, 166, 53–69.
- Mazhari S.A., Amini S., Ghalamghash J., Bea F., 2011. Petrogenesis of granitic unit of naqadeh complex, Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences 4, 1207-1214.
- Mazhari, S.A., Ghalamghash, J., Kumar, Shellnut, G., S., Bea, F., 2020. Tectonomagmatic development of the Eocene Pasevh pluton (NW Iran): Implications for the Arabia-Eurasia collision. Journal of Asian Earth Sciences, 203,

[ DOI: 10.22034/KJES.2024.9.2.106551 ]

104551.

https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104551

- Macdonald, R., Bagiński, B., Dzierżanowski, P., Jokubauskas, P., 2013. Apatite-supergroup minerals in UK Palaeogene granites: composition and relationship to host-rock composition. European Journal of Mineralogy 25, 461–471.
- Miles, A.J., Graham, C.M., Hawkesworth, C.J., Gillespie, M.R., Hinton, R.W., EIMF, 2013. Evidence for distinct stages of magma history recorded by the compositions of accessory apatite and zircon. Contribution to Mineralogy and Petrology 166, 1-19. https://doi.org/ 10.1007/s00410-013-0862-9.
- Miles, A.J., Graham, C.M., Hawkesworth, C.J., Gillespie, M.R., Hinton, R.W., Bromiley, G.D., EMMAC, 2014. Apatite: a new redox proxy for silicic magmas? Geochimica et Cosmochimica Acta 132, 101-119. <u>https://doi.org/10.1016/j.</u> gca.2014.01.040.
- Montero, P., Bea, F., 1998. Accurate determination of 87Rb/86Sr and 143Sm/144Nd ratios by inductively-coupled-plasma mass spectrometry in isotope geoscience: an alternative to isotope dilution analysis. Analytica Chimica Acta 358, 227-233.
- Nathwani, C., Loader, M., Wilkinson, J.J., Buret, Y., Sievwright, R.H., Hollins, P., 2020. Multistage arc magma evolution recorded by apatite in volcanic rocks. Geology 48, 323-327. <u>https://doi.org/10.1130/G46998.1</u>.
- O'Sullivan, G., Chew, D., Kenny, G., Henrichs, I., Mulligan, D., 2020. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies. Earth-Science Reviews 201, 103044. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.10304 4.
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Valencia, V., Simon, A.C., Vervoort, J., Leisen, M., Romero, R., 2019. Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization. Geochimica et Cosmochimica Acta 246, 515-540.
- Pan, L-C., Hu, R-Z., Wang, Z-S., Bi, X-W., Zhu, J-J., Li, C., 2016. Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-

metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region, SW China. Lithos 254–255, 118-130. http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.03.010

- Piccoli, P.M., Candela, P.A., 2002. Apatite in Igneous Systems. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 48, 255-292.
- Prowatke, S., Klemme, S., 2006. Trace element partitioning between apatite and silicate melts. Geochimica et Cosmochimica Acta 70, 4513-4527. https://doi.org/10.1016/j. gca.2006.06.162.
- Rønsbo, J.G., 2008. Apatite in the Ilímaussaq alkaline complex: Occurrence, zonation and compositional variation. Lithos 106, 71–82. https://doi.org/10.1016/j. lithos.2008.06.006.
- Sha, L-K., Chappell, B.W., 1999. Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63, 3861-3881.
- Wolf, M.B., London, D., 1995. Incongruent dissolution of REE- and Sr-rich apatite in peraluminous granitic liquids: differential apatite, monazite, and xenotime solubilities during anatexis. American Mineralogist 80, 765-775.
- Yajam S., Montero P., Scarrow J.H., Ghalamghash J., Razavai S.M.H., Bea F., 2015. The spatial and compositional evolution of the Late Jurassic Ghorveh-Dehgolan plutons of the Zagros Orogen, Iran: SHRIMP zircon U-Pb and Sr and Nd isotope evidence Geologica Acta 13, 25-43.
- Yan, X-Y., Yang, D-B., Xu, W-L., Quan, Y-K., Wang, A-Q., Hao, L-R., Tang, H-T., Wang, F., 2023, Apatite geochemistry from mafic rocks in the northeastern North China Craton: New insights into petrogenesis. Lithos 436-437, 106942.

https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106942

Zafar, T., Rehman, H.U., Mahar, M.A., Alam, M., Oyebamiji, M., Rehman, S.U., Leng, C-B., 2020. A critical review on petrogenetic, metallogenic and geodynamic implications of granitic rocks exposed in north and east China: New insights from apatite geochemistry. Journal of Geodynamics 136, 101723. https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101723.

[ DOI: 10.22034/KJES.2024.9.2.106551 ]

جدول ۱ پیوست- نتایج آنالیز اکسیدهای اصلی (برحسب درصد وزنی) و عناصر کمیاب (ppm) نمونه سنگهای مورد مطالعه. GR= آلکالیفلدسپار گرانیت، PU: نفلین سیینیت، SY: سیینیت. TAS: دمای اشباع آپاتیت (Harrison and Watson, 1984) بر حسب درجه سانتی گراد است.

Supplementary Table 1. The results of major oxides (wt%) and trace elements (ppm) analyses of the studied samples. GR= alkali-feldspar granite, PU: nepheline syenite, SY: syenite. TAS is apatite saturation temperature (°C) (Harrison and Watson, 1984).

Sample No.	N33G	N72G	N67G	N68G	N29G	N60G	N71G	N75G
ID	GR	GR	PU	PU	SY	SY	SY	SY
SiO <sub>2</sub>	69.60	67.75	57.39	59.07	61.51	62.10	64.66	63.32
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.31	0.06	0.15	0.61	0.45	0.44	0.86
$Al_2O_3$	16.22	14.04	23.66	22.30	16.92	17.25	17.22	18.43
FeOt	1.88	5.29	2.20	2.56	4.98	4.93	3.81	2.83
MgO	0.22	0.25	0.04	0.10	0.22	0.30	0.22	0.09
MnO	0.05	0.16	0.02	0.04	0.12	0.17	0.13	0.06
CaO	0.83	0.26	0.41	0.46	1.24	1.62	0.54	1.02
Na <sub>2</sub> O	5.19	6.55	9.01	8.51	6.38	6.22	7.00	6.22
K <sub>2</sub> O	4.93	4.40	5.95	5.65	5.16	5.26	4.65	5.75
P2O5	0.07	0.07	0.02	0.03	0.09	0.10	0.07	0.06
F	0.25	0.75	0.08	0.03	0.14	0.14	0.13	0.12
LOL	0.44	0.50	0.67	0.55	2.49	0.26	0.33	0.29
Total	99.85	100.33	99.51	99.45	99.86	98.80	99.19	99.05
Li	5.44	200.08	17.95	27.82	13.16	9.75	68.21	4.74
Rb	152.63	248.84	211.97	206.70	98.10	61.48	118.82	38.22
Cs	3.27	2.73	2.54	2.09	0.43	0.55	1.36	0.23
Be	3.53	14.99	2.02	2.33	1.29	0.27	3.84	0.19
Sr	67.52	17.06	13.90	18.37	11.88	11.64	16.83	14.58
Ba	425.67	96.95	6.45	47.64	86.86	118.80	185.42	256.51
Sc	1.67	0.60	0.17	0.36	3.56	3.17	1.48	2.53
V	14.16	9.74	5.90	6.10	6.70	5.35	4.57	4.88
Cr	14.28	7.68	8.38	9.70	5.73	8.63	6.45	7.01
Co	1.83	1.86	0.31	0.37	1.66	1.67	0.65	0.97
Ni	6.77	4.48	2.65	0.26	0.57	3.76	2.83	1.96
Cu	5.65	5.68	3.58	2.01	5.49	5.05	4.06	5.49
Zn	30.73	198.84	19.77	38.04	73.01	53.48	98.21	44.49
Ga	19.35	37.04	27.33	27.37	28.51	22.11	27.62	20.66
Y	17.88	110.25	4.12	6.92	22.22	14.36	26.76	7.86
Nb	21.56	113.06	4.07	5.70	14.51	5.88	24.92	6.57
Та	1.92	6.72	4.85	0.42	0.85	0.30	1.31	0.32
Zr	314.00	1579.60	54.50	167.80	146.20	47.40	528.80	32.60
Hf	7.62	58.84	1.11	4.30	3.59	0.98	16.22	0.63
Mo	0.57	2.62	1.16	1.00	0.61	0.82	0.97	1.15
Sn	1.83	18.82	1.03	2.21	1.78	0.29	4.99	0.17
Tl	0.42	0.32	0.89	0.77	0.25	0.15	0.31	0.11
Pb	13.50	12.90	5.46	6.35	4.62	3.76	10.59	3.36
U	1.69	3.39	0.48	0.47	0.13	0.15	0.94	0.10
Th	15.32	105.09	1.21	1.97	0.69	0.54	5.36	0.28
La	33.20	145.19	2.86	7.79	13.54	8.91	22.31	4.86
Ce	58.22	328.37	7.66	16.94	32.33	20.48	54.74	10.72
Pr	5.86	32.94	0.54	1.89	4.28	2.78	5.98	1.43
Nd	19.14	120.76	2.11	6.92	18.96	11.82	22.73	5.86
Sm	3.48	26.13	0.41	1.49	4.25	2.70	5.08	1.38
Eu	0.70	2.60	0.08	0.22	0.77	0.94	0.77	1.70
Gd	2.79	23.25	0.38	1.27	4.04	2.73	4.69	1.28
Tb	0.47	3.79	0.07	0.21	0.62	0.44	0.78	0.22
Dy	2.98	23.55	0.43	1.30	3.94	2.60	4.93	1.32
Но	0.63	4.91	0.10	0.26	0.83	0.51	1.04	0.27

ژئوشیمی آپاتیت در انواع سنگهای فلسیک ...

مظهری و پانگ

									_
Er	1.76	13.45	0.26	0.77	2.28	1.41	3.06	0.66	
Tm	0.27	1.98	0.04	0.13	0.42	0.22	0.53	0.10	
Yb	1.68	11.60	0.26	0.93	3.16	1.55	3.72	0.62	
Lu	0.26	1.52	0.05	0.18	0.58	0.29	0.68	0.09	
TAS	858	844	610	668	798	817	807	783	

جدول ۲ پیوست- سن (برحسب میلیون سال) و نسبتهای ایزوتوپی Sr و Nd نمونه های مورد مطالعه (Mazhari et al., 2009).

Supplementary Table 2. Age (Ma) and Sr-Nd isotopic ratios of the studied samples (Mazhari et al., 2009).

Sample No.	Age (Ma)	εNd	87Sr/86Sri	TDM (Ga)
N33G	41	4.24	0.7048	0.475
N72G	41	2.89	0.7048	0.739
N67G	41	2.29	0.7048	0.662
N68G	41	4.44	0.7048	0.562
N29G	41	4.41	0.7048	0.731
N60G	41	4.50	0.7047	0.585
N71G	41	3.37	0.7048	0.631
N75G	41	3.68	0.7048	0.728