



## F and Cl in biotites from Zahedan granitic rocks

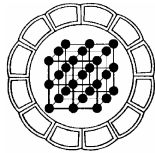
M. Boomeri, G. R. Iashkaripour, M. N. Gorgij

Department of geology, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran  
E-mail: Boomeri@hamoon.usb.ac.ir

(Received: 19/4/2004, received in revised form: 26/1/2005)

**Abstract:** The Late-Eocene, Early-Oligocene Zahedan granitic rocks are intruded the felsic zone of the east Iran. They are mainly granodiorite, I-type and calc-alkaline. F and Cl contents in biotite from the Zahedan granitic rocks range from 0.1 to 0.66 and 0.01 to 0.09 wt. %, respectively. F contents in the biotites are negatively correlated with  $X_{Ti}$  and Cl contents and positively are correlated with  $X_{Si}$  and  $Mg/(Mg + Fe)$ . Values of the calculated  $\log(fH_2O/fHF)$  and  $\log(fH_2O/fHCl)$  of fluid in equilibrium with the chemical composition of biotite range from 3.98 to 4.90 and 1.41 to 2.63, respectively. The contour lines representing these values are different with slope of trend of biotite composition suggesting, the fluid composition also play some role in incorporation of F in biotite in addition to the chemical structure of biotite. IV (F) for biotites in the Zahedan granitic rocks is similar to those of igneous rocks and porphyry Cu ore deposits and IV (Cl) of biotites in the Zahedan granitic rocks is similar to those of hydrothermal and ore forming systems and those of granitic rocks. Based on the IV (Cl), biotites from the Zahedan granitic rocks tend to be more Cl rich than comparable values from biotites in other granitic rocks and less Cl rich than those of porphyry Cu ore deposits. Calculated IV (F/Cl) of biotites from the Zahedan granitic rocks is more similar to ore-forming systems such as porphyry Cu ore deposits. Therefore, the chemical composition of biotites from the Zahedan granitic rocks was interacted with hydrothermal solutions.

**Keywords:** Zahedan granite, Biotite, F and Cl,  $fH_2O/fHF$ ,  $fH_2O/fHCl$ , IV(F), IV (Cl).



## F و Cl در بیوتیت‌های موجود در سنگ‌های گرانیتی زاهدان

محمد بومری، غلامرضا لشکری پور، محمدنبی گرگیج

زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه زمین شناسی

پست الکترونیکی: [Boomeri@hamoon.usb.ac.ir](mailto:Boomeri@hamoon.usb.ac.ir)

(دریافت مقاله ۸۳/۱/۳۰، دریافت نسخه نهایی ۸۳/۱/۱/۶)

**چکیده:** سنگ‌های گرانیتی زاهدان که طی ائوسن پسین - الیگوسن پیشین در زون فلیش شرق ایران نفوذ کردند و اغلب گرانودیوریت، نوع I و کالک آلکالن هستند. مقدار F و Cl در بیوتیت موجود در سنگ‌های گرانیتی زاهدان به ترتیب از حدود ۰/۱ تا ۰/۶۶ و از ۰/۰۱ تا ۰/۰۹۹ درصد وزنی تغییر می‌کند. اتم‌های فلئور در فرمول بیوتیت همبستگی منفی با  $X_{Ti}$  و Cl همبستگی مثبتی را با  $X_{Si}$  و  $Mg(Mg + Fe)$  نشان می‌دهند. مقادیر محاسبه شده  $\log(fH_2O/fHF)$  از ۳/۹۸ تا ۴/۹۰ و  $\log(fH_2O/fHCl)$  از ۱/۴۱ تا ۲/۶۳ متغیر است. خطوط هم مقدار نشان می‌دهند که این مقادیر با روند حاصل از ترکیب شیمیایی بیوتیت متفاوت است. این موضوع بیانگر آن است که علاوه بر ساختار شیمیایی بیوتیت، ترکیب شیمیایی آبگون در تعادل با آن نیز در جایگزینی فلئور و کلر در بیوتیت نقش مهمی داشته است.  $IV(F)$  بیوتیت در سنگ‌های گرانیتی زاهدان مشابه بیوتیت‌های ماگمایی و سیستم‌های پرفیری است، اما  $IV(Cl)$  آنها بیشتر به بیوتیت موجود در سیستم‌های گرمابی، کانسارساز و سنگ‌های گرانیتی شباهت دارد. بر اساس  $IV(Cl)$ ، بیوتیت در سنگ‌های گرانیتی زاهدان نسبت به بیوتیت در سیستم‌های پرفیری از کلر فقیرتر و نسبت به بیوتیت ماگمایی از کلر غنی‌ترند.  $IV(F/Cl)$  محاسبه شده بیوتیت در سنگ‌های گرانیتی زاهدان بیشتر با بیوتیت در سیستم‌های کانسارساز، مثل سیستم‌های مس پرفیری، مشابه است. بنابراین ترکیب شیمیایی بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان حاکی از واکنش آنها با یک محلول گرمابی است.

**واژه‌های کلیدی:** گرانیت زاهدان، بیوتیت، فلئور و کلر،  $fH_2O/fHF$ ،  $fH_2O/fHCl$ ،  $IV(F)$ ،  $IV(Cl)$

#### مقدمه

F و Cl در ماگماها و آبگونیهای گرمایی در دگرسانی گرمایی، انتقال عناصر به ویژه به صورت کمپلکس، و تشکیل کانه‌های معدنی بسیار موثرند [۱ و ۲]. بیوتیت در گرانیتهایی که فاقد مسکوویت و فلوئوریت هستند حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد F و Cl را در برمی‌گیرد [۱]. بنابراین F و Cl در بیوتیت نشان دهنده رفتار آنها در سنگ‌های گرانیته است [۱]. در این مطالعه بیوتیت‌هایی که در سنگ‌های گرانیته مستقیماً از ماگما تشکیل شده و تحت تأثیری عوامل ثانوی قرار نگرفته‌اند بیوتیت ماگمایی خوانده می‌شوند. براساس مقدار F و Cl موجود در بیوتیت‌ها می‌توان گرانیته‌ها را تقسیم‌بندی و گرانیته‌های عقیم را از گرانیته‌های کانسارساز جدا کرد. رفتار F و Cl در بیوتیت سیستم‌های گرانیته و سیستم‌های گرمایی مورد بررسی قرار گرفته و به طور تجربی مشخص شده که جانشینی F و Cl در محل هیدروکسیل ساختار شیمیایی میکاها به وسیله عواملی چون فعالیت F و Cl، ترکیب شیمیایی میکا، و دمای ماگما یا آبگون کنترل می‌شود [۱ و ۲]. بنابر تحقیقات انجام شده، میکاهای غنی از Mg نسبت به میکاهای فقیر از Mg ( تحت شرایط یکسان) دارای F بیشتری هستند. این همبستگی Mg و F در ساختار میکاها را اصل اجتناب FeF (Fe F avoidance principle) نامیده‌اند [۱ و ۲]. این اصل با بررسی مقدار F و Cl در بیوتیت‌های طبیعی در مراجع [۱ و ۳ تا ۱۶] تأیید شده است.

#### زمین‌شناسی

سنگ‌های گرانیته زاهدان در زون فلش شرق ایران قرار دارند. این زون بیشتر از شیل، ماسه سنگ، سیلتستون، سنگ آهک و رخنمون‌های متعددی از سنگ‌های پوسته اقیانوسی تشکیل شده است که شدیداً خرد شده و دگرگونی ضعیفی را نیز تحمل کرده‌اند. همچنین در این زون سنگ‌های آذرین کالک-آلکان و آلکان متنوعی در دوره‌های مختلف تشکیل شده‌اند. از جمله می‌توان به نفوذ سنگ‌های گرانیته زاهدان در ائوسن پسین-الیگوسن پیشین (۳۱ تا ۳۲ میلیون سال) اشاره کرد [۱۷]. این سنگ‌ها در یک زون طویل و باریک با روند شمال غرب-جنوب شرق امتداد دارند. گرانیته‌های زاهدان در منطقه لخشک توسط کمپ و گریفیس [۱۷] از نوع S و در منطقه لوچان توسط صاحبزاده [۱۸] از نوع I معرفی شده‌اند. ولی‌زاده و صادقیان [۱۹] این گرانیته‌ها را در هر دو منطقه بالا بررسی و به هر دو نوع S و I تقسیم‌بندی کرده‌اند. همچنین سنگ شناختی پتروگرافی و ژئوشیمی سنگ‌های گرانیته زاهدان در قالب یک طرح پژوهشی توسط [۲۰] به طور جامع مطالعه شده است. رخنمون سنگ‌های گرانیته زاهدان در شکل ۱ نشان داده شده است.



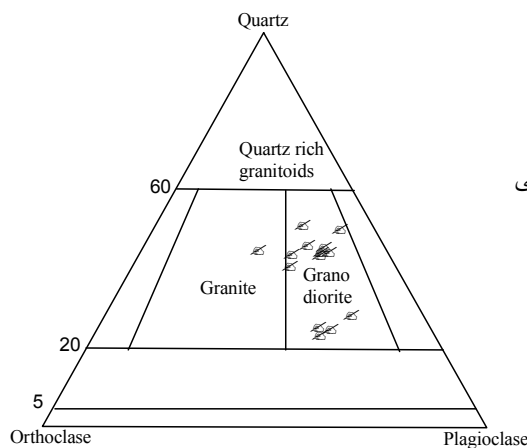
شکل ۱ موقعیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان نسبت به شهر زاهدان. محل نمونه‌ها: LK از لخشک، ZG از گراغه، P از غرب پلیس راه زاهدان، T از تل سیاه و SSG2 از منزل آب.

### مشاهدات صحرایی

گرانیت‌های زاهدان به اشکال مختلفی چون باتولیت - استوک و دایک‌های گرانیتی و پگماتیتی رخمون دارند که در بعضی از مناطق، مثل منطقه لخشک غربی و لوچان، تعداد بیشماری دایک‌های موازی تیره رنگ با روند شمالی-جنوبی آنها را قطع کرده‌اند. گرانیت‌های زاهدان از نظر رنگ ماکروسکوپی نسبت به سنگ‌های میزبان خود که سنگ‌های رخساره فلیشی دگرگون شده هستند، روشن‌ترند. اندازه کانی‌های تشکیل دهنده گرانیت‌های زاهدان نسبتاً متوسط و دارای بافت تقریباً دانه‌ای هستند. انکلاوها در بسیاری از این سنگ‌ها از مقیاس ماکروسکوپی تا مقیاس میکروسکوپی متغیر بوده و خروج آنها بر اثر فرایندهای ثانویه باعث ساخت لانه زنبوری در گرانیت‌ها شده است. گرانیت‌های زاهدان شدیداً تحت تأثیر هوازدگی فیزیکی قرار گرفته و ساخت‌های پوست پیازی، تافونی، لانه زنبوری و غیره در اکثر آنها دیده می‌شود. جابجایی‌های دینامیکی در این گرانیت‌ها شدید بوده به طوری که در اکثر مناطق میلونیتی شدن، جهت یافتگی‌ها و گسل‌ها در مقیاس ماکروسکوپی و سیلیسی شدن با تشکیل بلورهای تقریباً شکل‌دار کوارتز، خمیدگی در بلورهای بیوتیت و کشیدگی بلورهای فلدسپاتی مشاهده می‌شود [۲۰].

## سنگ شناسی

سنگ‌های گرانیتی زاهدان عموماً از نوع گرانودیوریت (شکل ۲) و دارای بافت و کانی‌شناسی ساده‌ای هستند. بافت اصلی آنها تقریباً دانه‌ای است، و بافت‌های پرفیروئید، پرفیری، پرفیروبلاستیک، پگماتیت و آپلیتی نیز در آنها مشاهده می‌شوند. رشد توأم کانی‌ها به خصوص فلدسپات و کوارتز، باعث بافت‌های خاصی چون گرافیک، گرانوفیریک، و پرتیتی شده است. همه گرانیت‌های زاهدان دارای کانی‌های کوارتز، اورتوکلاز، پلاژیوکلاز و بیوتیت هستند و در برخی از آنها آمفیبول نوع هورنبلند نیز دیده می‌شود. اسفن، مگنتیت، زیرکن، آلانیت، و آپاتیت نیز در اکثر آنها یافت می‌شوند. علاوه بر این، کانی‌های ثانوی چون کانی‌های گروه اپیدوت، مسکوویت، کلریت، و کلسیت در بعضی از آنها مشاهده شده است. تورمالین و گارنت فقط در رگه‌های پگماتیتی یافت می‌شوند [۲۰ و ۲۱]. برای شناخت بهتر سنگ‌شناسی و ژئوشیمی سنگ‌های گرانیتی زاهدان به مرجع [۲۰] مراجعه کنید.



شکل ۲ ترکیب مدال سنگ‌های گرانیتی زاهدان در نمودار اشتريکایزن [۲۶].

## ژئوشیمی

سنگ‌های گرانیتی زاهدان از نظر ترکیب شیمیایی گرانیت و گرانودیوریت بوده و متعلق به گرانیتوئیدهای سری ماگمایی کالکو آلکالن پتاسیم بالا و از نوع I هستند، و درصد مولی  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  آنها کمتر از ۱/۱ است [۲۰]. بعضی از مشخصات شیمیایی گرانیت‌های زاهدان در جدول ۱ ارائه شده است [۲۰]. جایگاه زمین ساختی این گرانیت‌ها برمبنای عناصر اصلی، فرعی و خاکی نادر مشابه گرانیت‌های تشکیل شده در جایگاه‌های زمین ساختی حاشیه قاره‌ای است [۲۰].

جدول ۱ بعضی از مشخصات شیمیایی گرانیت‌های زاهدان [20]

SiO <sub>2</sub>	سری اگمایی	ASI	Na <sub>2</sub> O/CaO	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	MgO/FeO
۶۷-۷۰٫۱	کالک-الکالن	۱-۱٫۰۸	۱٫۰۳-۱٫۷۱	۰٫۹۱-۱٫۳۴	۰٫۳۴-۰٫۵۶

## روش مطالعه

در این بررسی در امتداد جاده‌های خاش، کرمان، گوربند و میر جاوه از مناطقی چون گراغه، تل سیاه، لخشک، کوه‌های غرب پلیس راه زاهدان-کرمان، گوربند، منزل آب، لوچان و بوگ به طول حدود ۱۵۰ کیلومتر نمونه‌برداری شده است (شکل ۱). میکروآنالیزهای بیوتیت با روش WDS و با یک ابرگمانه‌زن خودکار مدل JEOL. JXA-8600 در دانشگاه یاماگاتای ژاپن با ولتاژشتاب دهنده ۱۵ کیلوولت و جریان پرتو  $10^{-8} \times 2$  آمپر انجام شده است. استانداردهای استفاده شده در میکروآنالیزهای پرتو ایکس عبارتند از: آپاتیت، ولاستونیت، آلبیت، آدولاریا،  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaF}_2$ . قطر پرتو الکترونی استفاده شده در این تجزیه‌ها حدود ۵ میکرون تنظیم شده است. داده‌ها بر اساس یک برنامه کامپیوتری بنام ZAF تصحیح شده‌اند. میزان خطا در این تجزیه‌ها  $\pm 2\%$  است. فرمول بیوتیت برمبنای  $\text{O}22$  محاسبه شده است. کلر و فلوئور موجب اکسیژن اضافی و در نتیجه افزایش جمع کل ترکیبات می‌شود [۲۳]. در این بررسی مقدار اضافی مذکور از طریق تقسیم وزن اتمی اکسیژن بر وزن اتمی فلوئور یا کلر محاسبه و سپس از جمع کل ترکیبات کاسته شد تا جمع واقعی بدست آید. مقدار آب با فرض ۴ اتم در جای هیدروکسیل با فرض عنصرسنجی کامل برمبنای  $\text{O}22$  محاسبه شد و مقدار آهن کل به صورت FeO نشان داده شد. X هر عنصر مساوی با تعداد اتم-های آن در یک جایگاه خاص کانی تقسیم بر تعداد اتم‌های تمام عناصر شرکت کننده در آن جایگاه است.

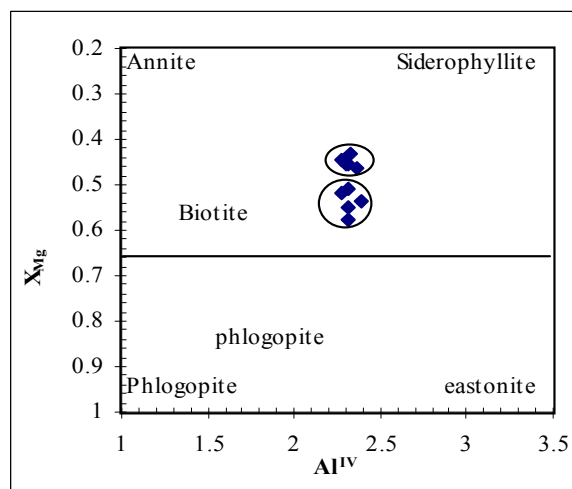
## نتایج

ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان در جدول ۲ ارائه شده است. ترکیب شیمیایی آنها در قلمرو بیوتیت معمولی است و از نظر مقدار Mg در دو گروه متمایز قرار می‌گیرند (شکل ۳). بیوتیت‌های مورد مطالعه دارای  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  و  $\text{TiO}_2$  قابل قیاس با بیوتیت‌های ماگمایی معرفی شده در [۱] بوده و دارای MnO بیشتر و  $\text{Na}_2\text{O}$  کمتر از آنها هستند. مقادیر F و Cl در این بیوتیت‌ها خیلی پایین است به طوری که مقدار F از حدود ۰/۱ تا ۰/۶۶ درصد وزنی و مقدار Cl از ۰/۰۱ تا ۰/۰۹ درصد وزنی متغیر است. همبستگی اتم‌های F در فرمول بیوتیت با  $X_{\text{Ti}}$ ,  $X_{\text{Si}}$ ,  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  و اتم‌های Cl در فرمول بیوتیت در شکل ۴ نشان داده شده است. بیوتیت‌های مورد مطالعه از نظر مقدار فلوئور نیز در دو گروه متمایز قرار می‌گیرند که در شکل ۴ مشخص شده‌اند. مقادیر اتم‌های فلوئور در فرمول بیوتیت به نظر می‌رسد که همبستگی منفی با  $X_{\text{Ti}}$  و Cl و همبستگی مثبت با  $X_{\text{Si}}$  و  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  دارند. بر اساس مطالعات [۲۰] گرانیتوئید زاهدان از اختلاط یک ماگمای بازیک با یک ماگمای اسیدی تشکیل شده است و چون درجه اختلاط برای توده‌های مختلف

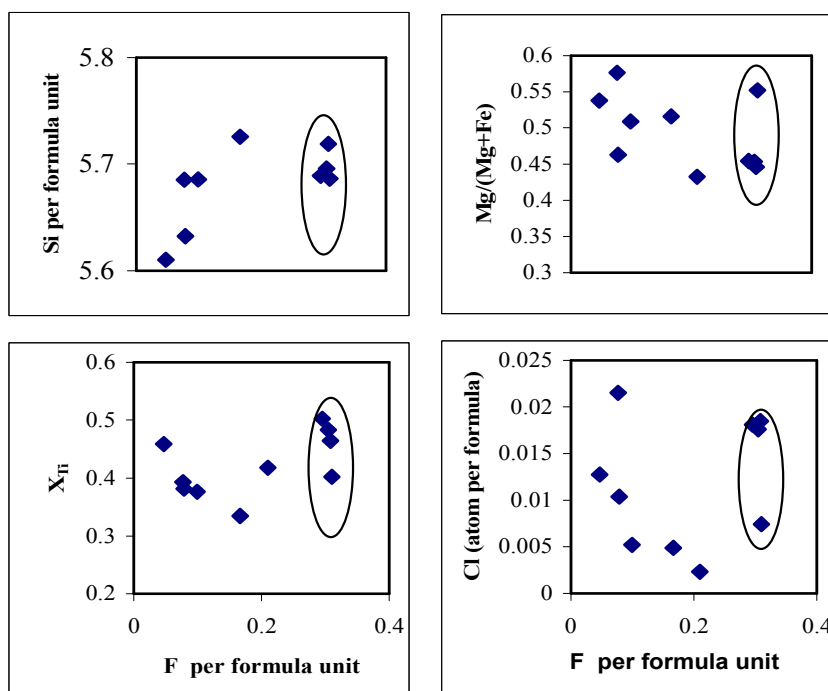
متفاوت بوده است بنابراین ترکیب شیمیایی آنها نیز متنوع است. یکی از دلایل نوسان‌های دیده شده در ترکیب بیوتیت این گرانیتوئیدها نیز ممکن است به این دلیل باشد.

**جدول ۲** ترکیب شیمیایی بیوتیت از سنگ‌های گرانیتی زاهدان تجزیه شده به وسیله گمانه‌زن الکترونی

	LK5-1-	ZG2-3-	ZG2-5-	ZG2-6-	LK3-8-	LK6-13	P3-2-1	T3-5-	SSG2
SiO <sub>2</sub>	۳۸,۱۴	۳۷,۱۱	۳۶,۹۷	۳۷,۱۴	۳۷,۷۷	۳۸,۰۹	۳۷,۹۰	۳۸,۴۴	۳۶,۹۰
TiO <sub>2</sub>	۳,۵۹	۴,۱۷	۴,۳۲	۴,۰۰	۴,۱۱	۳,۵۰	۳,۴۲	۳,۰۰	۳,۶۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵,۱۸	۱۳,۵۰	۱۳,۳۴	۱۳,۵۹	۱۴,۹۵	۱۴,۱۶	۱۶,۸۹	۱۶,۱۸	۱۴,۳۷
FeO	۱۷,۹۶	۲۱,۹۱	۲۱,۷۹	۲۱,۸۶	۱۸,۴۷	۱۷,۵۱	۱۹,۸۱	۱۸,۳۹	۲۲,۱۵
MnO	۰,۲۶	۰,۴۹	۰,۳۹	۰,۴۳	۰,۴۲	۰,۵۸	۰,۵۱	۰,۳۰	۰,۴۵
MgO	۱۲,۴۱	۱۰,۲۰	۱۰,۱۸	۹,۸۹	۱۲,۰۵	۱۳,۳۶	۹,۵۹	۱۱,۰۰	۹,۴۷
Na <sub>2</sub> O	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۱۰	۰,۱۲	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۶
K <sub>2</sub> O	۹,۸۶	۹,۴۴	۹,۵۵	۹,۵۷	۹,۶۴	۹,۵۵	۹,۷۳	۹,۷۲	۹,۵۸
F	۰,۶۶	۰,۶۳	۰,۶۱	۰,۶۳	۰,۱	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۳۵	۰,۴۳
Cl	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۷	۰,۰۵	۰,۰۹	۰,۰۴	۰,۰۲	۰,۰۱
H <sub>2</sub> O	۳,۷۰	۳,۵۹	۳,۵۹	۳,۵۸	۴,۰۲	۳,۹۲	۳,۹۵	۳,۸۵	۳,۶۹
Total	۱۰۱,۵۸	۱۰۰,۸۹	۱۰۰,۶۵	۱۰۰,۵۹	۱۰۱,۵۶	۱۰۰,۹۵	۱۰۱,۹۷	۱۰۱,۱۳	۱۰۰,۵۲
تعداد کاتیون‌ها بر مبنای ۲۲ (O) محاسبه شده است.									
Si	۵,۶۹	۵,۷۰	۵,۶۹	۵,۷۲	۵,۶۱	۵,۶۹	۵,۶۳	۵,۷۳	۵,۶۷
Al <sup>IV</sup>	۲,۳۱	۲,۳۰	۲,۳۱	۲,۲۸	۲,۳۹	۲,۳۱	۲,۳۷	۲,۲۷	۲,۳۳
Al <sup>VI</sup>	۰,۳۵	۰,۱۴	۰,۱۱	۰,۱۹	۰,۲۳	۰,۱۸	۰,۵۹	۰,۵۷	۰,۲۸
Ti	۰,۴۰	۰,۴۸	۰,۵۰	۰,۴۶	۰,۴۶	۰,۳۹	۰,۳۸	۰,۳۳	۰,۴۲
Fe	۲,۲۴	۲,۸۱	۲,۸۰	۲,۸۲	۲,۲۹	۲,۱۹	۲,۴۶	۲,۲۹	۲,۸۵
Mn	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۶	۰,۰۵	۰,۰۷	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۶
Mg	۲,۷۶	۲,۳۳	۲,۳۳	۲,۲۷	۲,۶۷	۲,۹۷	۲,۱۲	۲,۴۴	۲,۱۷
Na	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲
K	۱,۸۸	۱,۸۵	۱,۸۷	۱,۸۸	۱,۸۳	۱,۸۲	۱,۸۴	۱,۸۵	۱,۸۸
F	۰,۳۱	۰,۳۰	۰,۳۰	۰,۳۱	۰,۰۵	۰,۰۸	۰,۰۸	۰,۱۷	۰,۲۱
Cl	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰
OH	۳,۶۸	۳,۶۸	۳,۶۹	۳,۶۷	۳,۹۴	۳,۹۰	۳,۹۱	۳,۸۳	۳,۷۹
X <sub>Sid</sub>	۰,۲۶	۰,۲۳	۰,۲۲	۰,۲۴	۰,۲۶	۰,۲۰	۰,۳۹	۰,۳۳	۰,۳۲
X <sub>An</sub>	۰,۲۶	۰,۳۷	۰,۳۸	۰,۳۷	۰,۲۷	۰,۲۹	۰,۲۳	۰,۲۵	۰,۲۵
Log(X <sub>F</sub> /X <sub>OH</sub> )	-۱,۰۷	-۱,۰۸	-۱,۱۰	-۱,۰۸	-۱,۹۲	-۱,۷۱	-۱,۷۰	-۱,۳۶	-۱,۲۶
Log(X <sub>Cl</sub> /X <sub>OH</sub> )	-۲,۶۹	-۲,۳۲	-۲,۳۱	-۲,۳۰	-۲,۴۹	-۲,۲۶	-۲,۵۸	-۲,۸۹	-۳,۲۱
Log(fH <sub>2</sub> O/fHF)	۴,۰۶	۳,۹۹	۴,۰۱	۳,۹۸	۴,۹۰	۴,۷۵	۴,۵۵	۴,۲۹	۴,۱۳
Log(fH <sub>2</sub> O/fHCl)	۱,۹۲	۱,۶۹	۱,۶۷	۱,۶۸	۱,۷۳	۱,۴۱	۱,۹۹	۲,۲۰	۲,۶۳
IV(F)	۱,۹۶	۱,۸۹	۱,۹۱	۱,۸۸	۲,۸۰	۲,۶۵	۲,۴۵	۲,۱۹	۲,۰۳
IV(Cl)	-۳,۲۴	-۳,۴۶	-۳,۴۸	-۳,۴۷	-۳,۴۲	-۳,۷۴	-۳,۱۶	-۲,۹۵	-۲,۵۲
IV(F/Cl)	۵,۱۹	۵,۳۵	۵,۳۸	۵,۳۴	۶,۲۲	۶,۳۸	۵,۶۱	۵,۱۳	۴,۵۵



شکل ۳ مقدار  $X_{Mg}$  در مقابل آلومینیم با کوردیناسیون ۴ برای بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان.

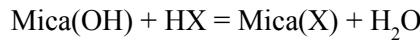




شکل ۴ همبستگی‌های F و Cl با  $Mg/(Mg + Fe)$ ،  $X_{Si}$  و  $X_{Ti}$  بیوتیت موجود در سنگ‌های گرانیتی زاهدان.

#### بحث و بررسی

مبادله یون‌ها در جایگاه هیدروکسیل بین میکا و ماگمای سیلیکاته یا بین میکا و یک فاز آبی در شرایط تعادلی اجازه می‌دهد تا فوگاسیته هالوژن‌های شرکت کننده در این واکنش‌ها را به وسیله روابط زیر محاسبه کنیم [۱]:

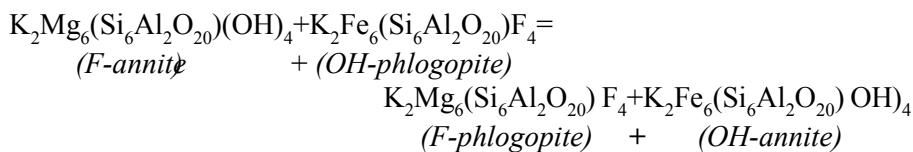


(X) نماد هالوژن‌های F یا Cl است. اگر از ثابت تعادل واکنش بالا لگاریتم بگیریم آنگاه:

$$\log K = \log (aX/aOH) + \log (aH_2O/aHX)$$

$a(X)$  و  $a(OH)$  به ترتیب فعالیت اجزاء هالوژن و هیدروکسیل موجود در سری محلول جامد میکاها و  $a(H_2O)$  و  $a(HX)$  به ترتیب فعالیت  $H_2O$  و HF و HCl یا HCl موجود در ماگما یا آبگون متعادل با میکاهاست. با فرض یک مخلوط ایده آل از  $H_2O$  و HF یا HCl، فعالیت‌ها را می‌توان در فشار یک کیلو بار و در دمای تعادلی واکنش بالا به فوگاسیته تبدیل کرد [۱]. همچنین ثابت تعادل نیز برای مبادله  $F = OH$  درفلوگوپیت، آنیت و سیدروفیلیت مصنوعی به طور تجربی تعیین شده است [۲ و ۲۵]. گرما و اثر ترکیب شیمیایی روی ثابت تعادل از طریق این آزمایش‌ها قابل محاسبه است [۱].

اختلاط همزمان ( $Mg, Fe^{2+}$ ) و ( $F, OH$ ) را در یک محلول همگن بیوتیت، برحسب واکنش مبادله‌ای زیر می‌توان بررسی کرد:



$$\log K = \log K_{ph} - \log K_{an} = 1.107 \quad [۱]$$

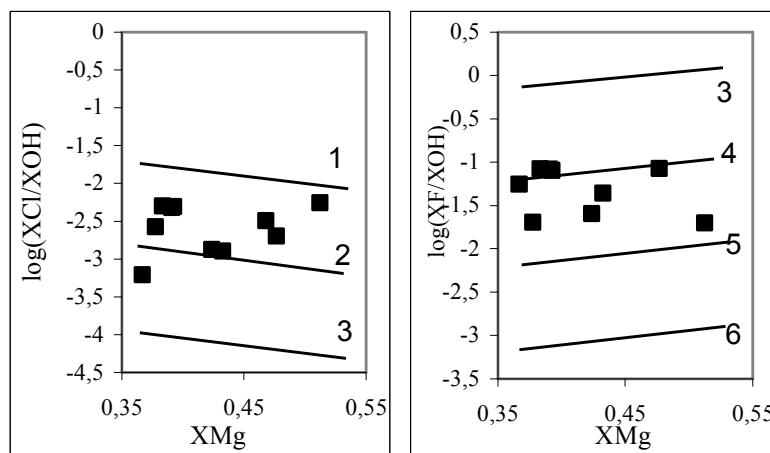
علاوه بر این، با استفاده از داده‌های تجربی و ترمودینامیکی تحت شرایط استاندارد، معادله زیر حاصل شده است:

$$\log K = 2100/T + 1.523 X_{Mg} + 0.416 X_{an} + 0.02 X_{sid} = \log(fH_2O/fHX) + \log(X_F/X_{OH})$$

بخش مولی سیدروفیلیت ( $X_{sid}$ ) و بخش مولی آنیت ( $X_{an}$ ) در بیوتیت از معادله زیر قابل محاسبه است [۲۶]:

$$\begin{aligned} X_{sid} &= (3-Si/A) / 1.75 * (1-X_{Mg}) \\ X_{an} &= 1 - (X_{Mg} + X_{sid}) \end{aligned}$$

با فرض دمای  $1000\text{K}$  تشکیل بیوتیت‌های موجود در گرانیته زاهدان (گرمای ارزیابی شده برای بیوتیت‌ها در گرانیته [۲۰]) و استفاده از واکنش‌های معادلات بالا،  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$  و  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$  برای آبگونهای متعادل با بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیته زاهدان محاسبه شدند. مقادیر محاسبه شده  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$  از  $3.98$  تا  $4.90$  و  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$  از  $1.41$  تا  $2.63$  متغیر بوده است. در شکل ۵،  $X_{\text{Mg}}$  (بخش مولی فلوگوپیت در بیوتیت) در مقابل  $\log(X_{\text{F}}/X_{\text{OH}})$  و  $\log(X_{\text{Cl}}/X_{\text{OH}})$  ترسیم شده‌اند. مقادیر  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$  و  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$  در شکل فوق با خطوط هم‌مقدار مشخص شده است. شیب خطوط نشان داده شده مقادیر  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$  را نشان می‌دهد که با روند حاصل از ترکیب بیوتیت کمی متفاوت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر ساختار شیمیایی بیوتیت، ترکیب شیمیایی آن نیز در جایگزینی F در ساختار بیوتیت نقش داشته است. همچنین مقادیر  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$  به وسیله ترکیب شیمیایی بیوتیت با دو روند متفاوت قطع شده‌اند (شکل ۵). در واقع مقادیر کلر در بیوتیت سنگ‌های گرانیته زاهدان روند کاملاً متفاوتی با مقادیر  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$  (خطوط موازی هم ارز در شکل ۵) ارزیابی شده به وسیله محاسبات ترمودینامیکی دارد. در حالیکه اگر همه بیوتیت‌های گرانیته زاهدان در تعادل با یک آبگون و در یک دما تشکیل می‌شدند آنگاه روند مقادیر فلوئور و کلر نیز بایستی مشابه خطوط هم‌مقدار نشان دهنده مقادیر  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HF})$  و  $\log(f\text{H}_2\text{O}/f\text{HCl})$  می‌بود. بنابراین توزیع داده‌ها در شکل ۵ نشان دهنده تغییر در ترکیب آبگون یا دما هنگام تشکیل است که معمولاً چنین تنوعی به ترکیب شیمیایی آبگون نسبت داده می‌شود. چون فوگاسیته‌های محاسبه شده در حرارت‌های مختلف در این مطالعه و در مطالعاتی که در [۱] انجام شده، نشان می‌دهد که اختلاف دما کمتر از حدود  $200$  درجه سانتیگراد چنین تنوعاتی را ایجاد نخواهد کرد.



شکل ۵ تغییرات  $X_{Mg}$  با  $X_{OH}/X_F$  و  $X_{OH}/X_{Cl}$  بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان. خطوط هم‌مقدار مقادیر لگاریتم  $(fH_2O/fHF)$  و  $(fH_2O/fHCl)$  محاسبه شده را نمایش می‌دهند.

#### مقادیر پیوندگاه F و Cl یا IV(F) و IV(C)

برای بیان درجه غنی‌شدگی نسبی F یا Cl در یک میکا به صورت کمی و مستقل از دما و فشار، مقادیر پیوندگاه F و Cl یا IV(F) و IV(C) را تعریف کرده‌اند [۱]. IV(F) و IV(C) مستقل از دما بوده و بنابراین برای مقایسه مقادیر هالوژن در میکاهای با ترکیب شیمیایی متفاوت بسیار مفیدند [۱]. IV(F) و IV(C) به ترتیب از فرمول‌های زیر قابل محاسبه‌اند:

$$IV(F)_{\text{biotite}} = 1.52X_{Mg} + 0.42X_{An} + 0.20X_{Sid} - \log(X_F/X_{OH})$$

$$IV(C)_{\text{biotite}} = -5.01 - 1.93X_{Mg} - \log(X_{Cl}/X_{OH})$$

با توجه به معادلات پیشین می‌توان معادلات دیگری را نیز به شرح زیر نوشت که نسبت فوگاسیته آب به فوگاسیته هالوژن را در آبگون به ترکیب میکا ارتباط می‌دهد [۱].

$$\log(fH_2O/fHF) = 2100/T + IV(F)$$

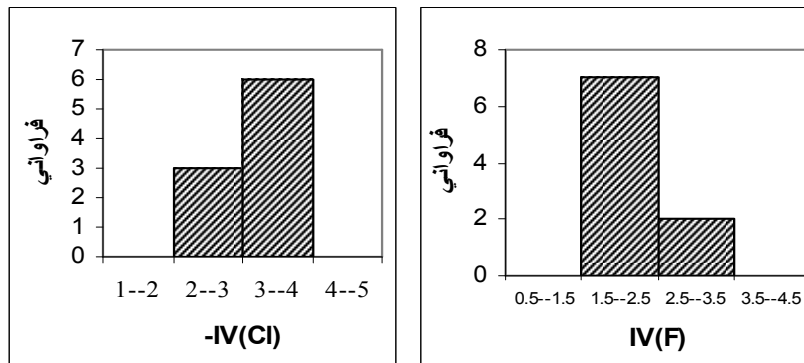
$$\log(fH_2O/fHCl) = 5151/T + IV(C)$$

IV(F) برای بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان در جدول ۲ و در شکل ۶ ارائه شده است. IV(F) برای بیوتیت‌های مذکور مشابه بیوتیت‌های ماگمایی و سیستم‌های پرفیری است (جدول ۳). اگر چه IV(F) در بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان گستره وسیعتری را نشان می‌دهند و تعدادی از آنها IV(F) بالاتری دارند. IV(F) در بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی سنگان حداکثر به ۲٫۲۵ می‌رسد [۲۴] در حالیکه این مقادیر در بیوتیت موجود در سنگ‌های گرانیتی زاهدان به ۲٫۶۵ هم می‌رسند (جدول ۳). گرانیت‌های سنگان در شمال کانسار آهن سنگان خواف واقع شده و از نوع I و کالک-الکال هستند. بیوتیت در این گرانیت نسبتاً غنی از فلئور است [۲۴]. IV(C) سنگ‌های گرانیتی زاهدان مشابه بیوتیت‌های حاضر در سیستم‌های گرمایی و کانسار ساز است (جدول ۳)، اگر چه آنها همپوشی‌هایی نیز با IV(C) بیوتیت‌های ماگمایی نشان می‌دهند. در واقع IV(C) بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان نسبت به این مقادیر در بیوتیت‌های ماگمایی بیشتر منفی هستند یعنی از کلر غنی‌ترند اما نسبت به بیوتیت‌های حاضر در سیستم‌های پرفیری از کلر فقیرترند. بنابراین هر چه IV(F) کوچکتر باشد نشان دهنده درجه نسبی بالاتری از مقادیر فلئورند و هر چه مقادیر IV(C) منفی‌تر باشد حاکی از غنی‌شدگی یک سیستم از کلر است. علاوه بر این، نسبت IV(F) به IV(C) نیز پارامتر دیگری برای بررسی مقدار کلر و فلئور در بیوتیت‌هاست که از طریق معادله زیر قابل محاسبه است [۱]:

$$\log(fHCl/fHF) = -3051/T + IV(F) - IV(C) = -3051/T + IV(F/Cl)$$

$$IV(F/Cl) = 3.45 X_{Mg} + 0.41 X_{An} + 0.20 X_{Sid} - \log(X_F/X_{Cl}) + 5.01$$

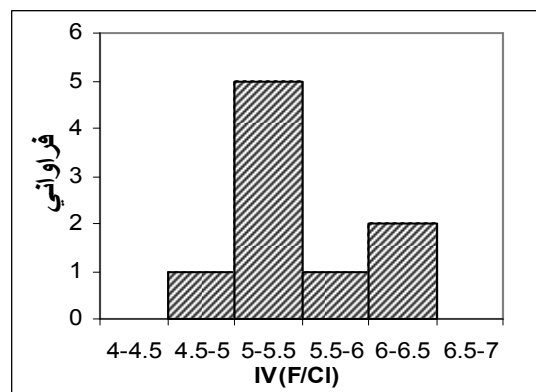
IV(F/CI) محاسبه شده برای بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان در جدول ۲ و شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین شکل ۸ این مقادیر را در مقابل IV(F) نشان می‌دهد.



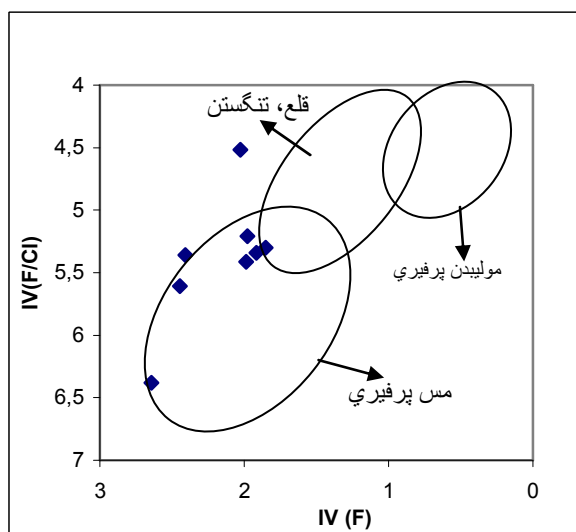
شکل ۶ نمودار مقادیر پیوندگاه فلونئور و منفی مقادیر پیوندگاه کبر برای بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان.

جدول ۳ مقایسه مقادیر محل تلاقی F, CI و F/CI در بیوتیت موجود در گرانیت‌های زاهدان و سایر مناطق.

منطقه	IV(F) ی	منفی IV(CI)	IV(F/CI) ی	مرجع
گرانیت سنگان ایران	۱ تا ۲٫۲۵	۴ تا ۴٫۷۵	۵٫۵ تا ۶٫۵	
بیوتیت ماگمایی	۱٫۵ تا ۲٫۵	۳ تا ۴٫۲۵	-	
مس پورفیری سنتا ایتا	۱٫۷۵ تا ۲٫۲۵	۴ تا ۴٫۵	-	
دیگر مس‌های پورفیری	۱٫۵ تا ۲٫۷۵	۳٫۵ تا ۵	۵٫۵ تا ۶٫۷۵	
کانسارهای قلع و تنگستن	۰٫۵ تا ۲	۳٫۵ تا ۴٫۲۵	۴٫۵ تا ۶	
کانسار مولیبدن پورفیری	۰٫۲۵ تا ۱	۳٫۷۵ تا ۴٫۵	۴ تا ۵٫۷۵	
سنگ‌های گرانیتی زاهدان	۱٫۸۸ تا ۲٫۶۵	۲٫۵۲ تا ۳٫۷۴	۴٫۵۲ تا ۶٫۳۸	مطالعه حاضر



شکل ۷ نمودار ستونی پیوندگاه F/Cl بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان.



شکل ۸ مقادیر پیوندگاه F/Cl بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان. گستره‌های مشخص شده در شکل برای کانسارهای مس پرفیری، مولیندن پرفیری و قلع و تنگستن از [۱]. نمونه‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان در گستره مس پرفیری و قلع قرار می‌گیرند.

مقدار  $IV(F/Cl)$  مستقیماً به مقدار  $f(HCl)/f(HF)$  مرتبط است و چون محاسبه آن به دمای تشکیل و مقدار یون هیدروکسیل بیوتیت وابستگی ندارد، استفاده از آن برای تشخیص چگونگی تشکیل بیوتیت مؤثر است. هرچه  $IV(F/Cl)$  کمتر شد مقدار F/Cl بیشتر است.  $IV(F/Cl)$  محاسبه شده بیوتیت‌های سنگ‌های گرانیتی زاهدان با آنهایی از سیستم‌های کانسار ساز همچون سیستم‌های مس پرفیری و قلع تا حدی همپوشی دارد (جدول ۳ و شکل ۸). چنانکه که گفته شد اگر جایگزینی هالوژن‌ها فقط به وسیله ساختار شیمیایی آن کنترل شود، باید همبستگی F در بیوتیت با Cl،  $X_{Si}$ ،  $X_{Mg}$  کاملاً خطی باشد در حالی که در بیوتیت گرانیت‌های زاهدان این همبستگی دارای نوساناتی است. بنابراین یک یا چند مورد از عوامل زیر ممکن است روی ترکیب این بیوتیت‌ها تأثیر گذاشته باشند.

ترکیب ماگما یا آبگون متعادل با بیوتیت، حضور یا عدم حضور دیگر فازهای قبول کننده هالوژن در گرانیت مثل آپاتیت، ناهمگنی ماگمای تشکیل دهنده آنها، درصد مدال بیوتیت در گرانیت و حضور آبگون‌های مراحل آخر. مقدار فلوئور و کلر در بیوتیت موجود در سنگ‌های

گرانیتی زاهدان نسبتاً کم است. هرچند توزیع فلئور و کلر با تفریق ماگما روند افزایشی را در مذاب سیلیکاته نشان می‌دهد اما در مراحل آخر که یک فاز آبی در حال تشکیل است توزیع آنها بین فاز آبی و مذاب سیلیکاته متفاوت است به طوری که فلئور در مذاب سیلیکاته و کلر در فاز آبی غنی می‌شود [۱۶]. بنابراین یکی از دلایل ناچیز بودن مقدار فلئور موجود در بیوتیت موجود در گرانیت‌های زاهدان ممکن است بر اثر واکنش آنها با محلول‌های گرمایی باشد. مقدار کلر نیز در این بیوتیت‌ها ناچیز است ولی در مقایسه با سایر سیستم‌های گرانیتی این مقدار حد واسط محسوب می‌شود. معمولاً محلول‌های ماگمایی در دمای بالا از کلر غنی هستند ولی محلول‌های در دمای پایین‌تر بخصوص پایین‌تر از نقطه بحرانی از کلر فقیرتر می‌شوند [۱۲]. پس محلول‌هایی که با بیوتیت‌های زاهدان برخورد کرده‌اند احتمالاً در حدود دمای بحرانی بوده‌اند. اثبات گردش چنین محلول‌هایی در گرانیت‌های زاهدان در اکتشاف و پی‌جویی کانسارهای مزوترمال و اپی‌ترمال از اهمیت زیادی برخوردار است.

### برداشت

- ۱- مقدار فلئور و کلر بیوتیت سنگ‌های گرانیتی زاهدان بسیار ناچیز است.
- ۲- همبستگی F در بیوتیت با Cl منفی، و با  $X_{Si}$  در جایگاه تترادر و  $Mg/(Mg+Fe)$  مثبت است. نوسان‌هایی که در این همبستگی‌ها دیده می‌شود نشان می‌دهد که علاوه بر ساختمان شیمیایی بیوتیت عواملی دیگری نیز در جایگزینی کلر و فلئور در بیوتیت نقش داشته‌اند.
- ۳- مقادیر محاسبه شده  $\log(fH_2O/fHF)$  آبگون در تعادل با ترکیب بیوتیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که علاوه بر ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی این آبگون نیز در جایگزینی فلئور نقش داشته است.
- ۴- مقادیر محاسبه شده  $\log(fH_2O/fHCl)$  آبگون در تعادل با ترکیب بیوتیت گرانیت‌های زاهدان نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی این آبگون نقش اصلی را در جایگزینی کلر داشته است.
- ۵-  $IV(F)$  برای بیوتیت موجود در سنگ‌های گرانیتی زاهدان مشابه  $IV(F)$  برای بیوتیت ماگمایی و کانسارهای مس پرفیری است و  $IV(Cl)$  آن مشابه سیستم‌های گرمایی است.

### تشکر و قدردانی

تجزیه بیوتیت به وسیله اُبر ریزگمانه در دانشگاه یاماگاتای ژاپن انجام گرفته است که بدین وسیله از پروفیسور کازوو ناکاشیما برای همکاری در انجام تجزیه‌ها قدردانی می‌شود. همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه زاهدان که بخشی از هزینه‌های این مقاله را تأمین کرده قدردانی می‌شود. از داوران محترم مجله نیز که نکات دقیق و مهمی را جهت اصلاح این مقاله تذکر داده‌اند سپاسگزاری می‌شود.

## مراجع

- [1] Munoz J. L., "F-OH and Cl-OH exchange in mica with application to hydrothermal ore deposits", Rev. Mineral. 13 (1984) 469-493.
- [2] Munoz J. L., Ludington S. D., "Fluoride-hydroxyl exchange in biotite", Am. J. Sci. 274 (1974) 396-413.
- [3] Li Z., Tainosho Y., Shiraishi K., "Owada, M., Chemical characteristics of fluorine-bearing biotite of early Paleozoic plutonic rocks from the Sor Rondane Mountains", East Antarctica. Geochem. Journal 37 (2003) 145-161.
- [4] Icenhower J. P., London D., "Partitioning of fluorine and chlorine between biotite and granitic melt: experimental calibration at 200 Mpa H<sub>2</sub>O", Contrib. Mineral. Petrol. 127 (1997) 17-29.
- [5] Manning D. A. C., "The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qtz-Ab-Or with Excess Water at 1 kb", Contrib. Mineral. Petrol. 76 (1981) 206-215.
- [6] Markel G., Piazzolo S., "Halogen-bearing minerals in syenites and high-grade marbles of Dronnig Maud Land, Anatarctia: monitors of fluid compositional changes during late-magmatic fluid rock interaction processes", Contrib. Mineral. Petrol. 132 (1998) 246-268.
- [7] Middelaar W. T., Keith J. D., "Mica chemistry as an indicator of oxygen and halogen fugacities in the CanTung and other W-related granitoids in the North American Cordillera", Geol. Soc. of Ameri. Speci. (1990) 246 p.
- [8] Sallet R., "Fluorine as a tool in the petrogenesis of quartz-bearing magmatic associations: applications of an improved F-OH biotite-apatite thermometer grid", Lithos 50 (2000) 241-253.
- [9] Seifert W., Kampf H., Wasternack J., "Compositional variation in apatite, phlogopite and other accessory minerals of the ultramafic Delitzsch complex, Germany: implication for cooling history of carbonatites", Lithos 53 (2000) 81-100.
- [10] Speer A., "Micas in igneous rocks", Rev. Mineral. 13 (1984) 299-356.
- [11] Stormer J. C., Carmichael I. S. E., "Fluorine-hydroxyl exchange in apatite and biotite: A potential igneous geothermometer", Contr. Mineral. Petrol. 31 (1971) 121-131.
- [12] Webster J. D., "Partitioning of Cl between magmatic hydrothermal fluids and highly evolved granitic masses", Geol. Soc. of Ameri. Speci. (1990) 246 p.
- [13] Wones D. R., Eugester H. P., "Stability of biotite: experiment, theory and application". Amer. Mineral. 50 (1965) 1228-1272.
- [14] Zaw U. K., Clark A. H., "Fluoride-Hydroxyl ratios of skarns silicates, Cantung E-zone scheelite orebody", Tungsten, Northwest Territories. Canadian Mineral. 16 (1978) 207-221.

- [15] Zhu C., Sverjensky D. A., "Partitioning of F-Cl-OH between minerals and hydrothermal fluids", *Geochim. Cosmochim. Acta* 55 (1991) 1837-1858.
- [16] Zhu, C., Sverjensky, D. A., "Partitioning of F-Cl-OH between biotite and apatite". *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56 (1992) 3435-3467.
- [17] Camp V.E., Griffis R. J., Character, "genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran", *Lithos* 15 (1982) 221-239.
- [۱۸] صاحب زاده ب.، "پتروگرافی و پترولوژی توده آذرین نفوذی زاهدان- لوجان"، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال (۱۳۷۵).
- [۱۹] ولی زاده م. و، صادقیان م.، "ژئوشیمی و پترولوژی گرانیتوئیدهای زاهدان"، مجموعه مقالات ششمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه کرمان (۱۳۸۱) ۴۹۷ تا ۵۰۱.
- [۲۰] بومری م.، لشکری پور غ.، گرگیج م. ن.، "ژئوشیمی و پتروگرافی سنگ‌های گرانیتی زاهدان"، طرح پژوهشی، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۸۳).
- [۲۱] بومری م.، کانی شناسی سنگ‌های گرانیتی زاهدان"، مجموعه مقالات دهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۸۱) ۶۴ تا ۶۸.
- [22] Streckeisen A. L., "IUGS. Sub Commission of the systematics of igneous rocks", *Neues Jab Min. Abh.* 143 (1982) 1-14.
- [23] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "An Introduction to the Rock-forming minerals", Longman (1991) p. 528.
- [24] Boomeri M., "Petrography and geochemistry of the Sangan iron skarn deposit and related igneous rocks", northeastern Iran. Unpublished Ph.D. thesis, Akita University, Japan, (1998) p. 226.
- [25] Munoz J. L., Ludington S. D., "Fluoride-hydroxyl exchange in synthetic muscovite and its application to muscovite-biotite assemblages", *Amer. Mineral.* 62 (1977) 304-308.
- [26] Gunow A. J., Ludington S., Munoz J. L., "Fluorine in micas from the Henderson molybdenite deposits", *Colorado. Econ. Geol.* 75 (1980) 1127-1137.