



## بررسی شیمی کانی بیوتیت در گرانیتوئید مکسان، جنوب شرق ایران

محمد رضا قدسی\*<sup>۱</sup>، محمد بومری<sup>۱</sup>، ساسان باقری<sup>۱</sup>، کازو ناکاشیما<sup>۲</sup>

۱- بخش زمین شناسی دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- دپارتمان علوم زمین و زیست محیطی، دانشگاه یاماگاتا، یاماگاتا، ژاپن

(دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۱۴، نسخه نهایی: ۹۴/۲/۲۶)

**چکیده:** گرانیتوئید مکسان در حاشیه‌ی جنوبی بلوک لوت و در جنوب شرقی ایران قرار گرفته است. ترکیب این گرانیتوئید عبارتند از گرانیت، گرانودیوریت، کوارتز مونزودیوریت، مونزودیوریت، دیوریت و گابرو. شیمی کانی بیوتیت در سنگ‌های گرانیتی تا گابرویی با کمک ریزپردازنده الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها از نوع بیوتیت‌های منیزیم‌دار بوده و با توجه به مقادیر  $\text{FeO}$ ،  $\text{MnO}$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{TiO}_2$  و نیز مقادیر  $\text{Al}^{\text{IV}}$  جزء انواع ماگمایی اولیه به حساب می‌آیند. این بیوتیت‌ها در محیط با گریزندگی نسبتاً بالای اکسیژن تشکیل شده و صفات آهکی-قلیایی و نوع I نشان می‌دهند که با ویژگی‌های تکتونوماگمایی محیط‌های وابسته به فرورانش همخوانی دارد. همچنین شیمی کانی بیوتیت نشان می‌دهد که آلودگی ماگمای سازنده این گرانیتوئید با پوسته قاره‌ای، کم تا متوسط است.

**واژه‌های کلیدی:** شیمی کانی؛ بیوتیت؛ گرانیتوئید؛ مکسان؛ ایران.

### مقدمه

خود جلب کرده است [۴-۸] و هدف این پژوهش در همین راستاست.

گرانیتوئید مکسان بخش مهمی از مجموعه گرانیتوئید بزمان به شمار می‌رود که در حاشیه جنوبی بلوک لوت و در نزدیکی پیوستگاه چندین پهنه ساختاری-رسوبی مهم ایران از قبیل کمربند آتشفشانی ارومیه - دختر، کمان آتشفشانی مکران (بزمان، تفتان و کوه سلطان) و زون فلیش شرق ایران قرار گرفته است که اهمیت بررسی آن را دو چندان می‌کند. این گرانیتوئید یک توده آذرین با کشیدگی شرقی-غربی است که در حدود ۳۰ کیلومتر طول و ۲۰ کیلومتر عرض دارد. از جمله مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در منطقه می‌توان به بررسی‌های زمین‌شناسی [۹] اشاره نمود. وی تشکیل گرانیتوئید بزمان را به زون فرورانش فعال مکران مرتبط دانسته است. ژئوشیمی رسوب‌های آبراه‌ای و

بیوتیت یکی از کانی‌های مهم فرومنیزین در سنگ‌های آذرین فلسیک است و در سنگ‌های آذرین مافیک به شکل فاز فرعی ظاهر می‌شود [۱]. از ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها برای بازتاب طبیعت تشکیل این کانی و پی بردن به شرایط فیزیکی-شیمیایی ماگمای تشکیل دهنده‌ی آن‌ها استفاده می‌شود. بررسی‌های متعدد نشان داده است که ژئوشیمی بیوتیت می‌تواند اطلاعات خوبی درباره فرآیند ذوب و شرایط ترمودینامیک تبلور مذاب گرانیتی آشکار نماید [۱-۳]. ترکیب بیوتیت بیشتر وابسته به ماهیت ماگمایی است که از آن متبلور می‌شود و پتانسیل این کانی برای انعکاس ماهیت و شرایط فیزیکی-شیمیایی ماگما بالا است [۲، ۳]. بررسی ترکیب شیمی کانی بیوتیت برای تعیین پتروژنز و محیط زمین‌ساختی گرانیتوئیدی در ایران موضوعی است که به تازگی در دهه اخیر توجه برخی از پژوهشگران را به

این بررسی، داده‌های ترکیب شیمیایی کانی بیوتیت در گرانیتوئید مکسان به‌منظور آگاهی بیشتر مسائل سنگ زایی و تکتونوماگمایی به‌کار گرفته شد.

### روش بررسی

در این پژوهش، نخست نمونه‌برداری دقیقی از گرانیتوئید مکسان صورت گرفت. حدود ۱۰۰ مقطع نازک از این نمونه‌ها تهیه شدند و با کمک میکروسکوپ پلاریزان مدل Olympus مورد بررسی قرار گرفتند و پس از آشنایی با ویژگی‌های کانی شناختی و سنگ‌شناسی، تعداد ۱۰ مقطع که نمونه‌هایی سالم و فاقد دگرسانی بودند، برای آنالیز نقطه‌ای انتخاب شدند (جدول ۱). تجزیه‌های نقطه‌ای بیوتیت (تعداد ۶۲ نقطه) با ریز پردازنده الکترونی مدل JEOL. JXA-8600M با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلو وات و جریان تابشی  $2 \times 10^{-8}$  amp در بخش علوم زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن انجام شد و نتایج آنالیزها در نرم افزار Excel و Minpet 2.02 پردازش شدند.

جدول ۱ نتایج ریز پردازش الکترونی کانی بیوتیت در گرانیتوئید مکسان.

Samples no	۴۳۸	۱۶۰	۷	۱۳	۳۱۶	۵۰	۱۱۱	۳۲۰	۳۲۰	۱۲	
n	۸	۱۱	۹	۳	۳	۳	۳	۱۰	۲	۱۰	
Rock type	Granite			Granodiorite		Monzodiorite		Diorite		Gabbro	
SiO <sub>2</sub>	۰.۲۳۸	۷۱.۳۵	۸۹.۳۸	۲۶.۳۷	۶۰.۳۷	۶۱.۳۷	۶۱.۳۷	۴۱.۳۷	۸۱.۳۶	۶۲.۳۷	
TiO <sub>2</sub>	۰.۰۲	۷۸.۲	۹۱.۲	۶۰.۲	۲۲.۲	۵۹.۲	۵۵.۲	۲۵.۲	۱۱.۲	۷۲.۲	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۸.۱۴	۶۷.۱۴	۶۵.۱۴	۴۰.۱۴	۳۵.۱۴	۹۱.۱۴	۹۵.۱۳	۵۰.۱۳	۴۱.۱۴	۸۴.۱۳	
FeO	۶۱.۱۶	۰.۳۱۶	۲۲.۱۷	۹۴.۱۷	۱۹.۱۷	۳۲.۱۸	۴۶.۱۹	-۸.۱۹	۱۰.۱۷	۶۹.۱۶	
MnO	۴۷.۱	۰.۵۱	۰.۱۱	۳۸.۰	۵۰.۰	۲۹.۰	۳۵.۰	۳۳.۰	۱۳.۰	۹۰.۰	
MgO	۳۵.۱۳	۱۳.۱۱	۳۷.۱۳	۰.۷۱۳	۳۳.۱۳	۲۶.۱۳	۵۸.۱۱	۹۵.۱۱	۳۸.۱۳	۱۲.۱۳	
CaO	۰.۴۰	۰.۴۰	۰.۱۰	۲۴.۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۷۰	۰.۵۰	۰.۸۰	۱۴.۰	
Na <sub>2</sub> O	۰.۷۰	۱۱.۰	۰.۷۰	۱.۰	۱.۰	۰.۶۰	۱.۰	۰.۹۰	۱۱.۰	۰.۸۰	
K <sub>2</sub> O	۱۶.۹	۸۳.۸	۵۶.۹	۳۲.۸	۴۷.۹	۶۲.۹	۶۹.۸	۳۲.۹	۱۳.۹	۰.۵۹	
BaO	۰.۷۰	۱۷.۰	۰.۰	۰.۳۰	۰.۵۰	۰.۰	۰.۹۰	۰.۷۰	۴۵.۰	۰.۸۰	
Cl	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۵۰	۱.۸۰	۰.۸۰	۰.۷۰	۱.۵۰	۵.۷۰	۱.۴۰	۲.۵۰	
F	۹.۰	۵.۰	۹.۰	۷.۰	۲۲.۰	۱.۰	۲۲.۰	۲.۰	۰.۷۰	۳.۰	
O =-cl	۰.۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۴۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۳۰	۱.۳۰	۰.۲۰	۰.۶۰	
O =F	۴.۰	۲.۵۰	۳.۸۰	۳.۰	۱.۴۰	۰.۸۰	۱.۳۰	۰.۹۰	۰.۳۰	۱.۴۰	
H <sub>2</sub> O	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	
Total	۷۴.۹۹	۸۸.۹۴	۲۵.۱۰۲	۹۲.۹۸	-۷.۹۹	۸۱.۹۹	۷۴.۹۹	۶۱.۱۰۰	۸۴.۹۹	۷۹.۹۹	
T Site											
Si	۷۵.۵	۶۸.۵	۷۲.۵	۶۸.۵	۷۱.۵	۶۹.۵	۷۱.۵	۶۷.۵	۵۵.۵	۶۵.۵	
Al <sup>IV</sup>	۲۵.۲	۳۲.۲	۲۸.۲	۳۲.۲	۲۹.۲	۳۱.۲	۲۹.۲	۳۳.۲	۴۵.۲	۳۵.۲	
M Site											
Al <sup>VI</sup>	۳۱.۰	۴۴.۰	۲۷.۰	۲۶.۰	۲۸.۰	۳۴.۰	۲۱.۰	-۸.۰	۱۲.۰	۱۰.۰	
Ti	۲۳.۰	۳۳.۰	۳۲.۰	۳۰.۰	۳۷.۰	۳۰.۰	۴۱.۰	۴۸.۰	۴۷.۰	۵۳.۰	
Fe	۱۰.۲	۱۳.۲	۱۲.۲	۲۹.۲	۱۸.۲	۳۲.۲	۴۷.۲	۴۲.۲	۱۶.۲	۱۰.۲	
Mn	۱۹.۰	۱۴.۰	۱۳.۰	۰.۵۰	۰.۶۰	۰.۴۰	۰.۵۰	۰.۴۰	۰.۲۰	۰.۱۰	
Mg	۰.۱۳	۶۳.۲	۹۳.۲	۹۷.۲	۷۹.۲	۷۶.۲	۶۲.۲	۷۰.۲	۰.۱۳	۹۴.۲	
I Site											
Ca	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۰	۰.۴۰	۰.۰	۰.۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۲۰	
Na	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۲۰	۰.۲۰	
K	۷۷.۱	۷۹.۱	۷۹.۱	۶۲.۱	۸۴.۱	۸۶.۱	۶۸.۱	۸۰.۱	۷۶.۱	۷۴.۱	
Ba	۰.۰	۰.۱۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۰	۰.۱۰	۰.۰	۰.۲۰	۰.۰	
A Site											
Cl	۰.۰	۰.۰	۰.۱۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۲۰	۰.۷۰	۰.۲۰	۰.۳۰	
F	۲۴.۰	۱۵.۰	۲۱.۰	۱۹.۰	۰.۸۰	۰.۵۰	۰.۸۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۸۰	
OH*	۷۶.۳	۸۵.۳	۷۹.۳	۷۹.۳	۹۱.۳	۹۵.۳	۹۰.۳	۸۸.۳	۹۷.۳	۸۹.۳	
Fe/Fe+Mg	۴۱.۰	۴۵.۰	۴۲.۰	۴۳.۰	۴۴.۰	۴۶.۰	۴۹.۰	۴۷.۰	۴۲.۰	۴۲.۰	
Log (XF/XOH)	-۲۱.۱	-۴۴.۱	-۲۸.۱	-۲۰.۱	-۹۹.۱	-۹۵.۱	-۷۱.۱	-۰.۲۲	-۰.۰۳	-۷۸.۱	
Log (XCl/XOH)	-۱۵.۳	-۸.۳	-۸.۲	-۲۲.۲	-۵۷.۲	-۶۴.۲	-۲۲.۲	-۲۲.۲	-۳۵.۲	-۱۰.۲	
Log (XF/XCl)	۹۴.۱	۶۴.۱	۵۷.۱	۹۲.۰	۵۸.۰	۶۹.۰	۶۱.۰	-۲۹.۰	-۶۵.۰	۳۲.۰	

\*OH=4-(F+Cl)

زمین‌شناسی اقتصادی برگه جازموریان را مورد بررسی و پتانسیل‌های زمین‌شناسی اقتصادی و بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی مرتبط با کانی‌سازی را معرفی نموده است [۱۰]. تشکیل اسکارن و کانی‌زایی مس گربرد در جنوب شرق کوه بزمان را بررسی نموده و بیان می‌کند که متامورفیسم سنگ‌های رسوبی کربنیفر-پرمین در مجاورت گرانیتوئید بزمان سبب تشکیل اسکارن و کانی‌زایی مس شده است [۱۱].

تاکنون بررسی‌های جامعی بر روی گرانیتوئید مکسان صورت نگرفته است و این نوشتار به ویژگی‌های سنگ‌شناسی و شیمی کانی بیوتیت در توده‌های مختلف می‌پردازد. یکی از ویژگی‌های جالب توده نفوذی گرانیتوئیدی مکسان منطقه بندی آن است به طوری که از حاشیه به سمت مرکز، ترکیب شیمیایی آن از بازیک تا اسیدی تغییر می‌کند و کانی بیوتیت در اکثر توده‌های نفوذی مشاهده می‌شوند. به این دلیل ممکن است این تغییرات در شیمی بیوتیت نیز منعکس شود. لذا در

مربوط به فعالیت‌های آتشفشانی پلیوکواتر آن آتشفشان بزمان است که در شمال منطقه رخنمون دارند. ترکیب سنگ‌شناسی گدازه‌های آتشفشانی عمدتاً بازالت، آندزیت، داسیت و توف‌های آتشفشانی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی کوه بزمان است [۱۴، ۱۵].

بخش‌های جنوبی گرانیتوئید مکسان را مورد بررسی زمین‌شناسی قرار دادند و با استفاده از شواهد زمین‌شناسی نشان دادند که این گرانیتوئید ویژگی‌های ماگماتیسیم نوع آندی داشته و ترکیب شیمیایی آن از حاشیه به مرکز اسیدی‌تر می‌شود [۱۶]. سن‌سنجی به روش روبیدیوم-استرانسیوم که بر روی شماری از نمونه‌های گرانیتی توسط بربریان و همکاران [۱۶] انجام شده است، سنی معادل ۷۴ تا ۶۴ میلیون سال را نشان داده است که به اواخر کرتاسه پسین و اوایل پالئوسن مربوط می‌شود. بربریان [۹] پیشنهاد می‌کند که مجموعه گرانیتوئید بزمان بر روی منطقه فرورانش عمان (پوسته اقیانوسی عربی) جای دارد و حاصل ذوب گوشته یا پوسته اقیانوسی (عمان) به زیر ورقه ایران مرکزی است که در کواترنری با فوران‌های آهکی قلیایی آتشفشان‌های بزمان، تفتان و کوه سلطان (پاکستان) همراه شده است.

#### سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی گرانیتوئید مکسان

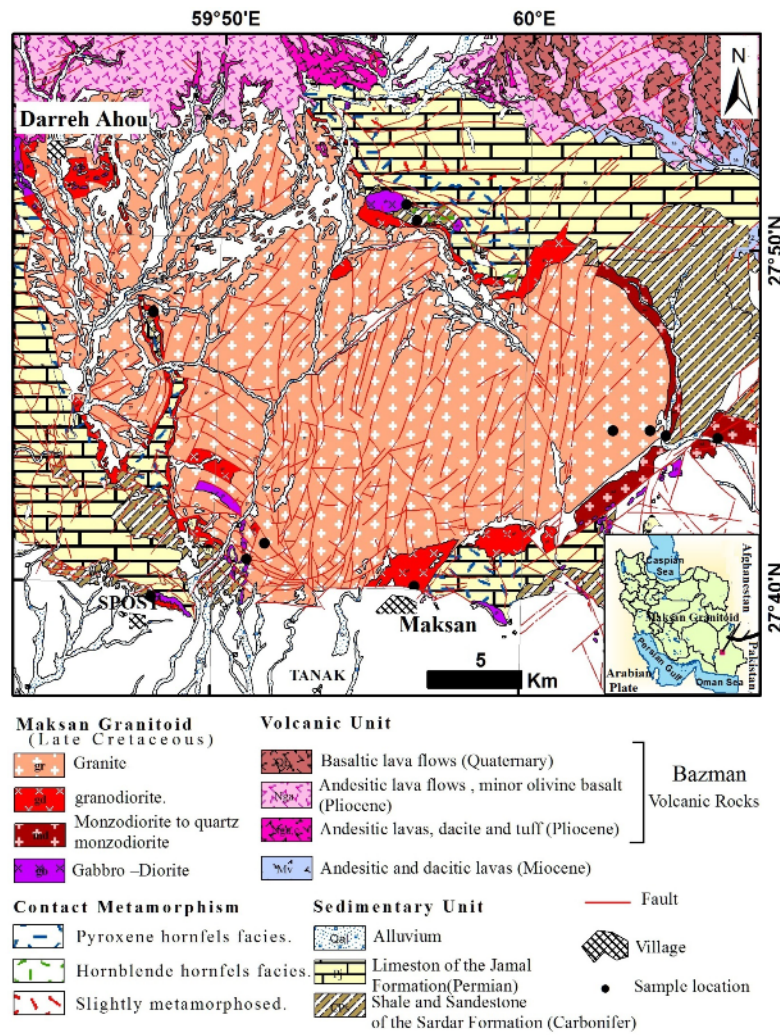
برای نامگذاری سنگ‌های نفوذی از رده بندی مدی [۱۷] استفاده شده است. شمارش ۳۰۰۰ نقطه با کمک دستگاه شمارنده کانی‌ها برای هر نمونه صورت گرفت. مطابق با این رده بندی سنگ‌های گستره مورد بررسی گرانیت، گرانودیوریت، کوارتز مونوزدیوریت، مونزدیوریت، دیوریت و گابرو نامگذاری شده اند (شکل ۲). کانی‌های تشکیل دهنده این گرانیتوئید شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپارهای قلیایی بیشتر از نوع ارتوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، کلینوپیروکسن، اسفن، آپاتیت، زیرکن، مگنتیت و ایلمنیت است. هورنبلند و بیوتیت کانی فرومنیزین غالب در گرانیتوئید مکسان است (شکل ۳). میزان کانی‌های فرومنیزین (هورنبلند و بیوتیت) از حاشیه (گابرو) به سمت مرکز (گرانیت) کاهش می‌یابد.

کانی بیوتیت معمولاً به رنگ قهوه‌ای در مقاطع دیده می‌شود. این کانی در مقاطع مورد بررسی نیمه شکل-دار تا بی-شکل بوده و به صورت ورقه‌ای و مستطیلی دیده می‌شود. چند رنگی مشخص بیوتیت‌ها به صورت قهوه‌ای کمرنگ تا قهوه‌های تیره قابل مشاهده است.

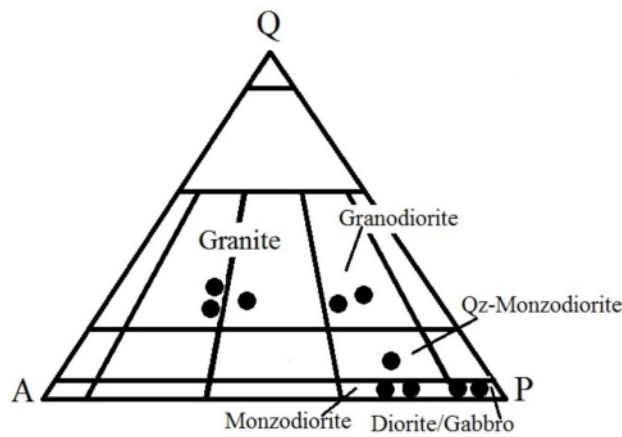
مقادیر کاتیونی بر اساس ۲۲ اکسیژن محاسبه و بنابر فرمول کلی میکا [۱۲]  $(\text{IM}_{2-3}\text{T}_{1-0}\text{O}_{10}\text{A}_2)$ ، فرمول ساختاری آن-ها تعیین شد. فلئوئور و کلر موجب اکسیژن اضافی و در نتیجه افزایش جمع کل ترکیبات می‌شود و در این بررسی مقدار اضافی مذکور از طریق تقسیم وزن اتمی اکسیژن بر وزن اتمی فلئوئور یا کلر محاسبه و سپس از جمع کل ترکیبات کاسته شد تا جمع واقعی به دست آید. مقدار آب با فرض ۴ اتم در جای هیدروکسیل با فرض عنصر سنجی کامل بر مبنای ۲۲ اکسیژن محاسبه شد. جهت محاسبه OH در فرمول بیوتیت، مجموع فلئوئور و کلر از چهار کسر گردید. مقادیر  $\text{Fe}^{2+}$  و  $\text{Fe}^{3+}$  به روش [۱۳] محاسبه گردید.

#### زمین‌شناسی گرانیتوئید مکسان

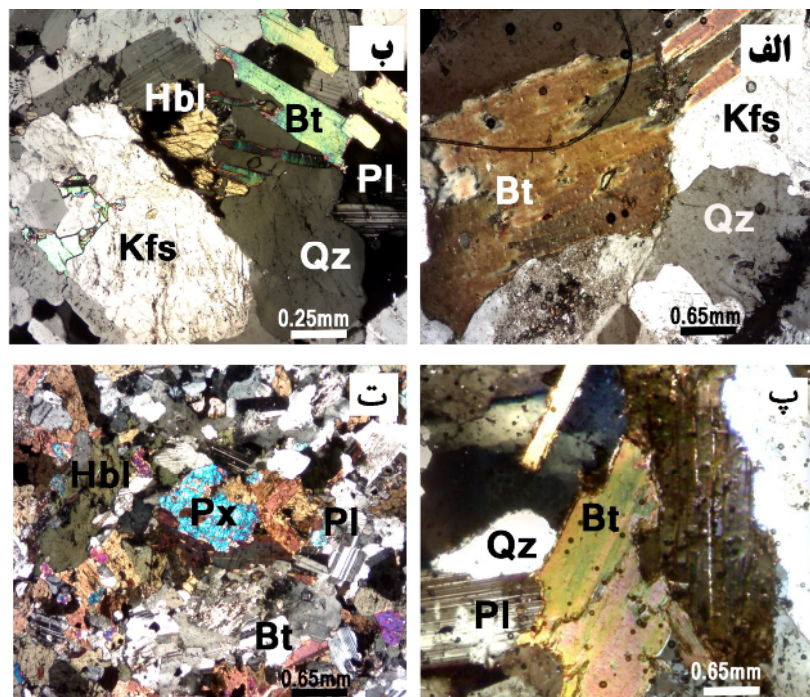
گستره مورد بررسی در ۱۰۰ کیلومتری شمال غرب ایرانشهر، حاشیه جنوبی بلوک لوت و در جنوب شرق ایران واقع شده است. گرانیتوئید مکسان با وسعت تقریبی ۶۰۰ کیلومتر مربع بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰/۰۰۰ هامون جازموریان و ۱:۱۰۰/۰۰۰ مکسان است که در حد فاصل بین طول‌های جغرافیایی ۴۴° ۵۹' تا ۴° ۶۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶° ۲۷' تا ۴۴° ۲۷' شمالی قرار دارد (شکل ۱). این گرانیتوئید بخش مهمی از مجموعه گرانیتوئید بزمان است که در غرب بزمان (شمال روستای مکسان) قرار گرفته است و به درون سنگ‌های قدیمی‌تر از قبیل شیل، ماسه‌سنگ و سنگ آهک (سازند سردر) به سن کرینیفور و آهک و دولومیت‌های (سازند جمال) به سن پرمین نفوذ کرده است [۱۴]. سنگ‌های بازیک و حد واسط به صورت نوار باریکی در حاشیه‌ی گرانیتوئید و در اطراف بخش‌های اسیدی رخنمون دارند. شار حرارتی برخاسته از نفوذ گرانیتوئید مکسان به درون سازند سردر منجر به پیدایش رخساره‌های دگرگونی مجاورتی از قبیل آندالوزیت، کردیریت هورنفلس گردیده است. چگونگی همبری زیرین این واحد به دلیل نبود برونزدهایی از واحدهای سنگی قدیمتر مشخص نیست، ولی همبری زیرین آن با واحد سنگی جمال ناپیوسته و پیشرونده است بدین صورت که واحد سنگی سازند جمال به وسیله ماسه سنگ کوارتز آرنایت پایه بر روی سازند سردر قرار می‌گیرد [۱۴]. سازند جمال در منطقه مورد بررسی عمدتاً شامل ماسه سنگ، کوارتز آرنایت، دولومیت و آهک است که در اثر شارحرارتی گرانیتوئید مکسان تبدیل به مرمر شده است [۱۴]. جوانترین فعالیت ماگمایی در گستره‌ی مورد بررسی



شکل ۱ نقشه‌ی ساده زمین‌شناسی گرانیتوئید مکسان ، اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱ : ۱۰۰۰۰۰ بزمان و مکسان [۱۴، ۱۵] با تغییرات توسط نگارندگان.



شکل ۲ موقعیت نمونه‌ها در مثلث نام‌گذاری مدی سنگ‌های نفوذی [۱۷].



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی انتخابی از رخنمون‌های مختلف سنگی (XPL): الف) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های گرانیتی همراه با بلورهای بیوتیت، فلدسپار و کوارتز (ب) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های گرانودیوریت همراه با بلورهای هورنبلند، بیوتیت، کوارتز، پلاژیوکلاز و ارتوز (پ) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های کوارتز مونزودیوریتی همراه با بلورهای کوارتز، بیوتیت و پلاژیوکلاز (ت) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های گابرویی همراه با بلورهای پیروکسن، پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت.

### گرانیت

گرانیت‌ها گسترده‌ترین واحد سنگی گرانیتوئید مکسان به شمار می‌آیند. بافت اصلی در سنگ‌های گرانیتی پورفیروئید است اما بافت‌های دانه‌ای و گرانوفیری نیز در نمونه‌ها دیده می‌شود. گرانیت‌های دارای بافت پورفیروئیدی، حاوی درشت بلورهای ارتوزکلاز به رنگ صورتی بوده که اندازه آن‌ها به ۲ تا ۳ سانتی متر می‌رسد. کوارتز در حدود ۲۷ تا ۲۹ درصد، ارتوکلاز بین ۳۹ تا ۴۵ درصد، پلاژیوکلاز ۲۲ تا ۲۹ درصد و کانی‌های فرعی بیوتیت و هورنبلند (کمتر از ۳ درصد)، اسفن، زیرکن، آپاتیت و کانی‌های تیره (کمتر از یک درصد) مشخص می‌شوند. کانی بیوتیت به صورت بلورهای صفحه‌ای شکل در مقاطع دیده می‌شود و چند رنگی مشخص بیوتیت‌ها به صورت قهوه‌ای کمرنگ تا قهوه‌ای تیره قابل مشاهده است (شکل ۳).

### گرانودیوریت

گرانودیوریت‌ها به صورت توده‌های کوچکی در حاشیه جنوبی و غربی گرانیتوئید مکسان مشاهده می‌شوند. اغلب بافت دانه‌ای دارند. پلاژیوکلاز ۴۱ تا ۴۶ درصد، کوارتز در حدود ۲۰ تا ۲۳ درصد، ارتوکلاز بین ۱۴ تا ۲۶ درصد، بیوتیت ۲ تا ۹ درصد،

هورنبلند ۵ تا ۹ درصد، اسفن، زیرکن، آپاتیت و کانی‌های تیره (کمتر از یک درصد) مشخص می‌شوند (شکل ۳). هورنبلند و بیوتیت کانی فرومنین غالب در گرانودیوریت مکسان هستند. بررسی‌های کانی‌شناسی و شواهد بافتی حاکی از حضور بیوتیت‌های اولیه (آذرین) به صورت صفحه‌های نامنظم و با چند رنگی قهوه‌ای کمرنگ تا تیره در این گروه از سنگ‌ها است. کانی‌های تیره بیشتر شامل مگنتیت و ایلمنیت است.

### دیوریت - مونزودیوریت

این گروه از سنگ‌ها بیشتر به صورت نوار باریکی در حاشیه شرقی گرانیتوئید مکسان رخنمون دارند. غالباً بافت دانه‌ای دارند. پلاژیوکلاز ۵۰ تا ۶۶ درصد، ارتوکلاز بین ۱۵ تا ۱۷ درصد، بیوتیت ۱ تا ۱۲ درصد، هورنبلند ۲ تا ۱۸ درصد، کوارتز کمتر از ۵ درصد، اسفن، زیرکن، آپاتیت (کمتر از یک درصد) و کانی‌های تیره (کمتر از دو درصد) مشخص می‌شوند (شکل ۳). کانی‌های تیره غالب مگنتیت و ایلمنیت است. بیوتیت‌های اولیه به صورت صفحات بزرگ نامنظم مشاهده می‌شوند.

## گابرو

سنگ‌های گابرویی به صورت برونزدهای کوچکی در حاشیه جنوبی گرانیتوئید مکسان مشاهده می‌شوند. بافت‌های دانه‌ای و یوئلی کلیتیک دارند. کانی‌های پلاژیوکلاز ۴۷ تا ۶۵ درصد، هورنبلند ۰ تا ۳۰ درصد، کلینوپیروکسن ۶ تا ۱۸ درصد، بیوتیت ۴ تا ۶ درصد، تشکیل دهنده اصلی این گروه هستند (شکل ۳). میزان کانی‌های تیره (Fe-Ti) در سنگ‌های گابرویی حداکثر به ۵ درصد می‌رسد و کانی تیره غالب مگنتیت است. بلورهای پلاژیوکلاز در برخی از مقاطع تحت تاثیر نیروهای زمین ساختی کج شده‌اند. کانی کلینوپیروکسن به طور معمول از ناحیه رخ‌ها و شکستگی‌ها به اکسیدهای آهن تجزیه شده‌اند. کانی بیوتیت از بلورهای صفحه‌ای بی‌شکل تا کشیده دیده و در برخی از مقاطع به اکسیدهای آهن و کلریت تجزیه شده است.

## بحث و بررسی

## ترکیب شیمی کانی بیوتیت

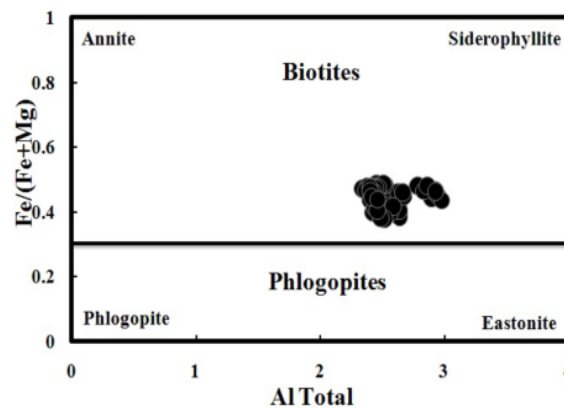
ترکیب میکاهای مورد بررسی چنانکه از شکل ۴ پیداست در قلمرو بیوتیت (آنیت-سیدروفیلیت) قرار گرفته و هیچ یک در قلمرو فلوگوپیت قرار نگرفته است. چنانکه مشاهده می‌شود همه نمونه‌های بیوتیت موجود در گرانیتوئید مکسان دارای بازه مقادیر Al کل متوسط (۲۱۹۸-۲۳۳۴) و آهن کم (۰/۴۹-۰/۳۸) هستند. میانگین مقادیر Al کل از گرانیت تا گابرو روند کاهشی را نشان می‌دهد. به طوری که مقدار میانگین Al کل سنگ‌های گرانیتی ۲/۶۴، گرانودیوریت ۲/۵۸، مونودیوریت ۲/۵۸، گابرو ۲/۴۷ و دیوریت ۲/۴۱ تغییر پیدا می‌کند. افزایش میزان Al کل نسبت به تغییرات کم آهن در بیوتیت‌های گرانیتوئید مکسان می‌تواند بیانگر آلودگی پوسته ای باشد [۶].

کانی بیوتیت در سیستم‌های ماگمایی، دگرگونی و دگرنهادی، به تغییرات دما، فشار و فعالیت سازنده‌هایی چون  $O_2$ ،  $SiO_2$ ، F،  $H_2O$ ، کاملاً حساس است [۱۸]. فاکتورهای فیزیکوشیمیایی یاد شده همراه با امکان جانشینی در چهار جایگاه ساختاری شامل جایگاه چهار وجهی (T) هشت وجهی (M)، میان لایه‌ای (X) و هیدروکسیل (OH, F, Cl) تغییر پذیری ترکیبی بیوتیت‌ها را ممکن ساخته است. بیوتیت‌های سنگ‌های آذرین غنی از سیلیس معمولاً یک روند غنی شدگی از آهن را نسبت به انواع فقیر از سیلیس نشان می‌دهند [۱۸].

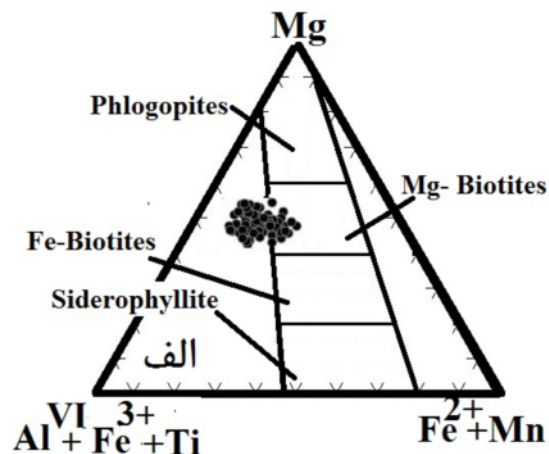
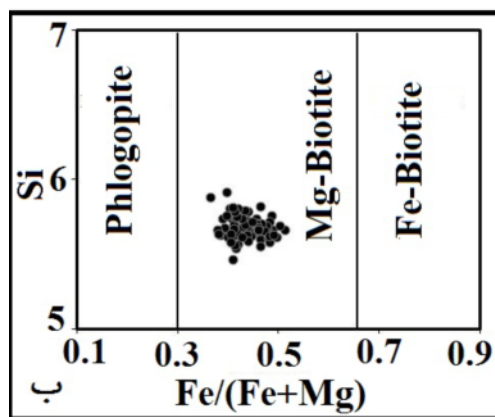
بنابر نمودار مثلثی  $Mg-(Al^{IV} + Ti) - (Fe^{2+} + Mn)$  [۲] (شکل ۵ الف) بیوتیت‌های گرانیتوئید مکسان در گستره‌ی بیوتیت‌های منیزیم دار قرار گرفته که در واقع به دلیل تبلور اولیه‌ی اکسیدهای آهن در قالب مگنتیت و تیتانیم به صورت تیتانیت است. همچنین در نمودار Si نسبت به  $Fe/(Mg + Fe)$  (شکل ۵ ب)، بیوتیت‌ها در گستره بیوتیت‌های منیزیم دار قرار می‌گیرد. حضور این مجموعه کانی یعنی بیوتیت منیزیم‌دار، مگنتیت و تیتانیت دلالت بر گریزندگی نسبتاً بالای اکسیژن در ماگماست [۱۹].

مقدار  $Al^{VI}$  در بیوتیت‌ها به عنوان یکی از معیارهای مهم برای بررسی ویژگی‌های آن‌هاست. همچنین  $Al^{VI}$  پایین تا صفر ( $Al^{VI} < 1$ ) از ویژگی‌های بیوتیت‌های ماگمایی است [۲۰] که در مورد بیوتیت‌های مورد بررسی (۰/۲۵ به طور میانگین) صدق می‌کند. به عقیده‌ی [۱۸] روند غنی شدگی از آهن و منیزیم در بیوتیت بستگی به گریزندگی اکسیژن در طول تبلور ماگما دارد به این دلیل که در شرایط اکسایش از منیزیم غنی شده و در شرایط احیاء از آهن غنی می‌شوند. بنابراین، سنگ‌های گرانیتوئید مکسان مطابق شکل ۵ در شرایط اکسیدان تشکیل شده‌اند.

از لحاظ محتوای هالوژن‌ها، بیوتیت گرانیت‌های مکسان از مقدار فلوئور بیشتری (کلر کمتر) نسبت به سنگ‌های بازیک و حدواسط برخوردارند. به طوری که مقدار میانگین فلوئور در سنگ‌های گرانیتی تا گابرویی از حدود ۰/۸ تا ۰/۲۸ درصد وزنی و مقدار میانگین کلر از حدود ۰/۰۳ تا ۰/۲۳ درصد وزنی متغیر است. هرچند توزیع فلوئور 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 فلوئور در مذاب سیلیکاته و کلر در فاز آبی غنی می‌شوند [۲۱]. معمولاً محلول‌های ماگمایی در دمای بالا از کلر غنی هستند و در دمای پایین‌تر از نقطه بحرانی از کلر فقیرتر می‌شوند [۲۲]. همچنین بنا بر اصل طرد آهن- فلوئور [۲۳، ۲۴]، افزایش آهن در محلول‌های ماگمایی با کاهش میزان فلوئور همراه است. بررسی‌های کانی-شناسی نیز حاکی از افزایش مقدار اکسیدهای آهن (مگنتیت) از گرانیت تا گابرو است. لازم به یاد آوری است که میزان جانشینی F و Cl در منظر هیدروکسیل میکاها به فعالیت F و Cl، ترکیب شیمیایی میکا و دما ماگما نیز بستگی دارد.



شکل ۴ رده بندی شیمیایی میکاهای گرانیتوئید مکسان در چهار ضلعی (ASPE).



شکل ۵ رده بندی شیمیایی میکاهای گرانیتوئید مکسان.

از ۰٫۵۲ تا ۰٫۶۴ متغیر بوده و بیوتیت‌های سنگ‌های حدواسط (دیوریتی) و بازیک (گابرویی) به‌طور چشمگیری با فازهای اکسیدی Fe-Ti همزیست‌اند که احتمالاً این ویژگی توانسته تا حدودی مقدار Ti آن‌ها را افزایش دهد. معمولاً مقدار Ti در بیوتیت‌های همزیست با فازهای اکسیدی اشباع از Ti افزایش نشان می‌دهد [۲۵]. بررسی‌های کانی‌شناسی حضور کانی‌های تیتان دار (اسفن و ایلمنیت) را تایید می‌کند و میزان کانی‌های مگنتیت و ایلمنیت از گرانیت تا گابرو روند افزایشی از خود نشان می‌دهد.

#### تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی

با توجه به اینکه بیوتیت‌ها ماهیت و شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما را نشان می‌دهند و ترکیب بیوتیت در مجموع تابع ترکیب و شرایط تبلور ماگمایی است که از آن متبلور شده است بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان یک معیار مناسب برای شناسایی محیط زمین‌ساختی گرانیت‌ها استفاده کرد. عبدالرحمن [۱] با

#### شناسایی بیوتیت‌های اولیه از بیوتیت‌های ثانوی

به‌منظور شناسایی بیوتیت‌های اولیه از ثانویه از نمودار سه-تایی  $FeO + MnO, TiO_2, MgO$  [۲۰]. استفاده شده است این نمودار می‌تواند بیوتیت‌های اولیه یا ماگمایی را از بیوتیت‌های اولیه‌ای که دستخوش تعادل مجدد شده‌اند و نیز بیوتیت‌های ثانویه جدا کند. براساس این نمودار همه‌ی بیوتیت‌های مورد بررسی در گرانیتوئید مکسان، نسبتاً غنی از FeO و  $TiO_2$  بوده و در قلمرو بیوتیت‌های اولیه یا ماگمایی قرار می‌گیرند (شکل ۶). بیوتیت‌های سنگ‌های گابرویی و دیوریتی، مقادیر  $TiO_2$  و FeO بالاتری نسبت به گرانیت‌ها دارند (جدول ۱). مقدار میانگین  $TiO_2$  از حدود ۲٫۵ (گرانیت) تا ۴٫۶ درصد وزنی (گابرو) متغیر است. بنابر نظر [۲۰]، مقدار Ti بیوتیت وابسته به

$$X_{FeO^*} = \frac{(FeO^* + MnO)}{(FeO^* + MnO + MgO)}$$

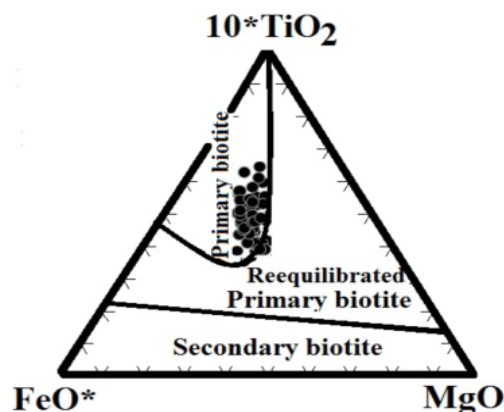
دما بوده و میزان تغییر می‌کند. مقدار  $X_{FeO^*}$  در بیوتیت‌های مورد بررسی

گرانیتوئید مکسان دارای FeO (به‌طور متوسط ۱۷,۳۹wt%) و در گستره‌ی آهنکی - قلیایی قرار می‌گیرند. در نمودار  $Al_2O_3$  نسبت به MgO دو گروه P,C عموماً روند افزایش MgO با کاهش  $Al_2O_3$  نشان می‌دهد که این ناهمخوانی به جایگزینی منیزیم و آلومینیوم در جایگاه هشت وجهی بین بیوتیت‌ها مربوط می‌شود [۱]. بر اساس این نمودار هم بیوتیت‌های مورد بررسی در گستره‌ی آهنکی - قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۷ پ).

بر اساس نتایج نمودار  $FeO^*$  نسبت به MgO [۱] نیز، سنگ‌های گروه C غنی از منیزیم بوده و به‌طور مشابه مقدار  $FeO^*$  در هر دو گروه C,P تقریباً ثابت است و میزان MgO باعث جدایی این دو گروه می‌شود. بین دو گروه A و C یک جایگزینی  $FeO - MgO$  کنترل شده در ترکیبات بیوتیت وجود دارد [۱]. بر اساس این نمودار نمونه‌های بیوتیت گرانیتوئید مکسان نسبت به منیزیم غنی‌شدگی نشان می‌دهند و در گستره‌ی آهنکی - قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۷ ت).

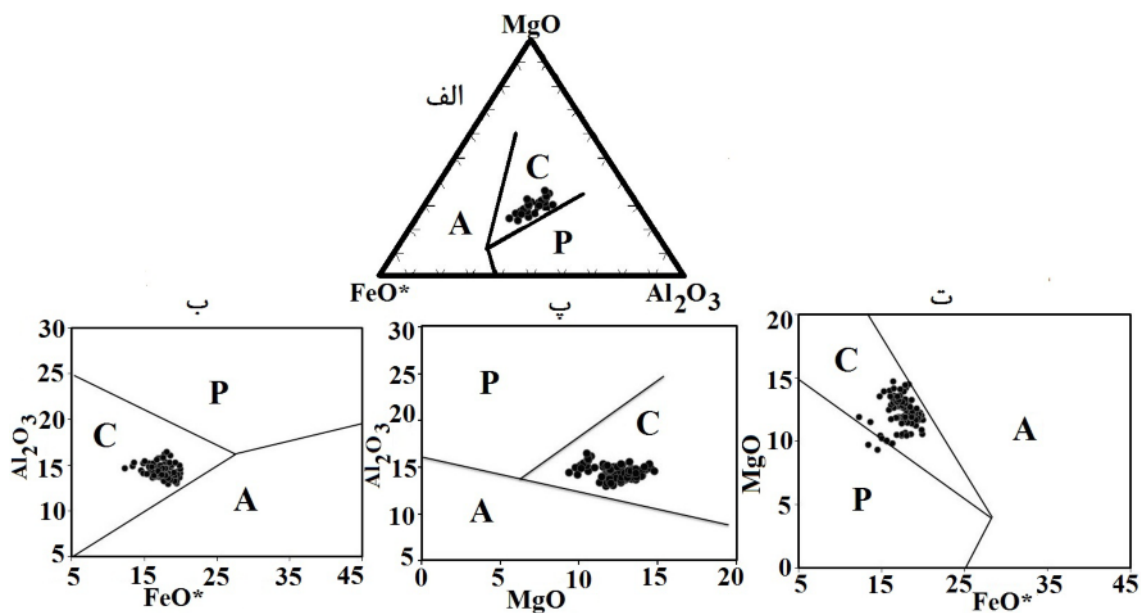
به‌طور کلی بیوتیت‌های آهنکی - قلیایی با افزایش MgO، کاهش نسبی در مقدار  $Al_2O_3$  نشان می‌دهند که می‌تواند در اثر فرآیندهای تبلور بیوتیت‌های غنی از Al در گدازه‌های آلومینیوم دار باشد و نیز ناهمخوانی  $Al_2O_3$  و FeO را می‌توان ناشی از رفتار مشابه بین آهن و منیزیم دانست. در نمودارهای مورد بررسی با افزایش  $Al_2O_3$  میزان MgO و  $FeO^*$  کاهش می‌یابد.

استفاده از آنالیزهای سه اکسید  $Al_2O_3$ ، MgO و  $FeO^*$  در کانی بیوتیت یک نمودار مثلثی ارائه داد (شکل ۷ الف) که سنگ‌های گرانیتی را در سه گروه دسته بندی می‌کند: سنگ‌های قلیایی و ناکوهزایی (A)، سنگ‌های پرآلومین که بیوتیت‌های آن‌ها از آلومینیوم غنی و به سوی قطب سیدروفیلیتیک تمایل دارند و معمولاً همراه با مسکوویت و یا دیگر کانی‌های آلومینیوسیلیکات مثل گارنت، کردیریت و یا آندالوزیت هستند و شامل گرانیت‌های برخوردار نوع S می‌شوند (P) و گرانیت‌های کوهزایی آهنکی - قلیایی از نوع I که به‌طور متوسط غنی از منیزیم بوده و معمولاً همراه با آمفیبول کلسیم دار و یا پیروکسن کلسیم دار و وابسته به فرورانش هستند (C). در شکل ۷ موقعیت نمونه‌های مورد بررسی به تصویر درآمده‌اند. تمام نمونه‌های بیوتیت گرانیتوئید مکسان از نوع گرانیت‌های نوع I هستند و در پهنه‌ی C قرار می‌گیرند که به قلمرو بیوتیت در گرانیتوئیدهای آهنکی - قلیایی فرورانشی وابسته‌اند. این یافته‌ها خاستگاه ماگمایی وابسته به فرورانش گرانیتوئید مکسان را تأیید می‌کند. نمودار  $Al_2O_3$  نسبت به  $FeO^*$  که در شکل ۷ ب نشان داده شده نتایج بهتری را برای بیوتیت‌های گروه‌های متنوع سنگ‌های آذرین ماگمایی ارائه دهند [۱]. دو گروه C و P از لحاظ داشتن  $FeO$  تقریباً مشابه‌اند و در مقدار ثابت  $FeO^*$ ، افزایش  $Al_2O_3$  باعث جدایش بین این دو گروه می‌شود. در گروه A، روند افزایش  $FeO^*$  با کاهش  $Al_2O_3$  همراه بوده که این ناهمخوانی با جایگزینی Al و  $Fe^{2+}$  در جایگاه هشت وجهی صورت می‌گیرد. بر همین اساس نمونه‌های



شکل ۶ نمودار سه تایی  $FeO^*$ ،  $10TiO_2$ ، MgO که بیوتیت‌های اولیه و بیوتیت‌های که دستخوش تعادل مجدد در محیط شده‌اند را از بیوتیت‌های ثانوی متمایز می‌سازد.





شکل ۷ تعیین سری ماگمایی توده‌های مورد بررسی براساس ترکیب شیمیایی بیوتیت در نمودارهای جداکننده‌ی محیط زمین‌ساختی گرانیت‌ها [۱]. A: سنگ‌های قلیایی و غیر کوهزایی، P: سنگ‌های برآلومین، C: سنگ‌های آهکی - قلیایی.

بررسی‌های سنگ‌شناسی، و داده‌های ژئوشیمی عناصر اصلی، فرعی و ایزوتوپی بر روی سنگ‌های مجموعه گرانیتوئید بزمان نشان داد که این مجموعه یک کمپلکس نفوذی آهکی- قلیایی از نوع I است و دارای ویژگی‌های ماگماتیسیم حاشیه فعال قاره ای است، به عبارت دیگر پلوتونیسیم آن را به فرورانش پوسته‌ی اقیانوسی عمان (پوسته عربی) به زیر پوسته‌ی قاره‌ای ایران مرکزی در نظر می‌گیرند [۱۶]. بربریان [۹] با تکیه بر داده‌های ایزوتوپی، عقیده دارد که این گرانیتوئید دستخوش آلودگی‌های پوسته‌ای کمی شده است. بنابراین با توجه به این نکته و نیز بازه متوسط تغییرات مقادیر آلومینیم بیوتیت‌های گرانیتوئید مکسان در نمودار (شکل ۹)، می‌توان نتیجه گرفت گرانیتوئیدی مکسان دارای آلودگی پوسته‌ای کم تا متوسط است.

در روش دیگر از عناصر فرار برای تعیین میزان آلودگی پوسته ای در گرانیت‌ها استفاده می‌شود. در ساختار بیوتیت، F، Cl و OH آنیون‌های قابل جایگزینی در مراحل اولیه، در موقعیت آبدارند. در صورتی که Fe و Mg، عناصر اصلی سازنده این کانی بوده و در جایگاه‌های هشت وجهی قرار می‌گیرند بر این اساس آگو و بریمهال [۲۸] یک طرح رده‌بندی برای واحدهای مختلف گرانیتی باتولیت کالیفرنیا ارائه کرده و با استفاده از عناصر ردیاب و شیمی آمفیبول، آن را کامل کرده‌اند. بنابر این رده بندی سنگ‌های حاوی بیوتیت با توجه به  $\text{Log}X_F/X_{Cl}$  و افزایش نسبت F/OH، به گرانیت‌های نوع I با آلودگی اندک I-

در نمودار Al total-Mg [۲۶] نیز سنگ‌های گستره مورد بررسی در گستره‌ی منیزیم بالا و آهکی - قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۸) که با نتایج روش [۱] کاملاً همخوانی دارد. از طرف دیگر ترکیب شیمی بیوتیت قادر به جدایی سنگ گرانیتی میزبان خود بر پایه‌ی رده بندی الفبایی گرانیت هاست، به گونه‌ای که [۲۷] بر حسب تغییرات نسبت  $\text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  نسبت به  $\text{Al}^{IV}$  در بیوتیت نموداری را ارائه کردند که جدا کننده انواع گرانیت‌ها بر پایه خاستگاه آن‌هاست. در این نمودار تمام نمونه‌های بیوتیت مورد بررسی در گستره‌ی گرانیت‌های کوهزایی نوع I قرار می‌گیرند که با نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوشیمی سنگ کل [۹] کاملاً همخوانی دارد (شکل ۹).

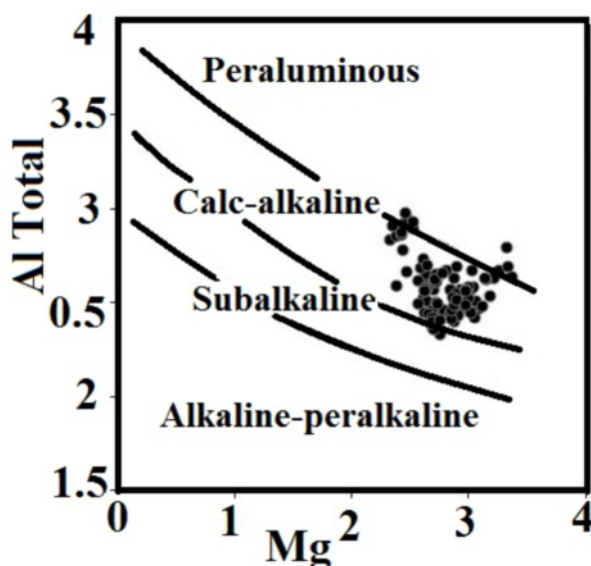
تعیین میزان آلودگی پوسته‌ای گرانیت‌ها به کمک شیمی کانی بیوتیت

یکی از راه‌های تشخیص آلودگی، استفاده از چهارضلعی ASPE است که در آن دو متغیر  $\text{Fe}/\text{Fe} + \text{Mg}$  و Al total به ترتیب شاخص گریزندگی اکسیژن و پرآلومینه بودن ماگما در زمان تبلور بیوتیت است [۶]. چنانکه پیشتر نشان دادیم ترکیب میکاهای مورد بررسی دارای مقادیر Al کل متوسط و آهن کم (متوسط) است. چنین الگویی مختص بیوتیت در گرانیتوئیدهایی است که دستخوش آلودگی کمی از پوسته شده اند [۶].

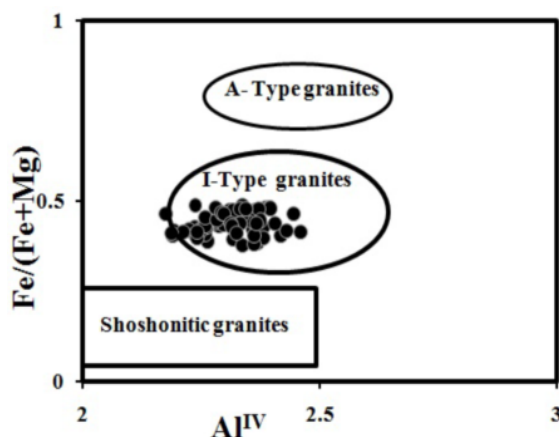
بیشتری داشته و گرایش به داشتن منگنز کمتر و مقدار فلوئور بالاتری در ساختار بیوتیت‌های خود دارند. برعکس کلر در آن‌ها واکنش نشان می‌دهد که همه این موارد بر آلودگی کم تا متوسط ماگمای سازنده آن‌ها با پوسته قاره‌ای دلالت دارد. این یافته‌ها در مقایسه با نتایج حاصل از داده‌های ایزوتوپی [۹، ۱۶] که بر اساس آن‌ها مقدار نسبت اولیه  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  برای تعدادی از سنگ‌های مجموعه گرانیتوئید بزمان پایین و چیزی در حدود ۰.۷۰۴ است و آلودگی اندک با پوسته‌ی قاره‌ای را نشان می‌دهد، همخوانی دارند.

، (I-type granites Weakly Contaminated) WC  
 گرانیتهای نوع I دارای آلودگی متوسط (I-MC I-type)  
 (granites Moderately Contaminated I-type)  
 به شدت آلوده (I-type granites Strongly Contaminated)  
 (I-type granites Strongly Contaminated and I-SCR)  
 و گرانیتهای نوع I احیایی به شدت آلوده  
 (Reduce) تقسیم شده اند.

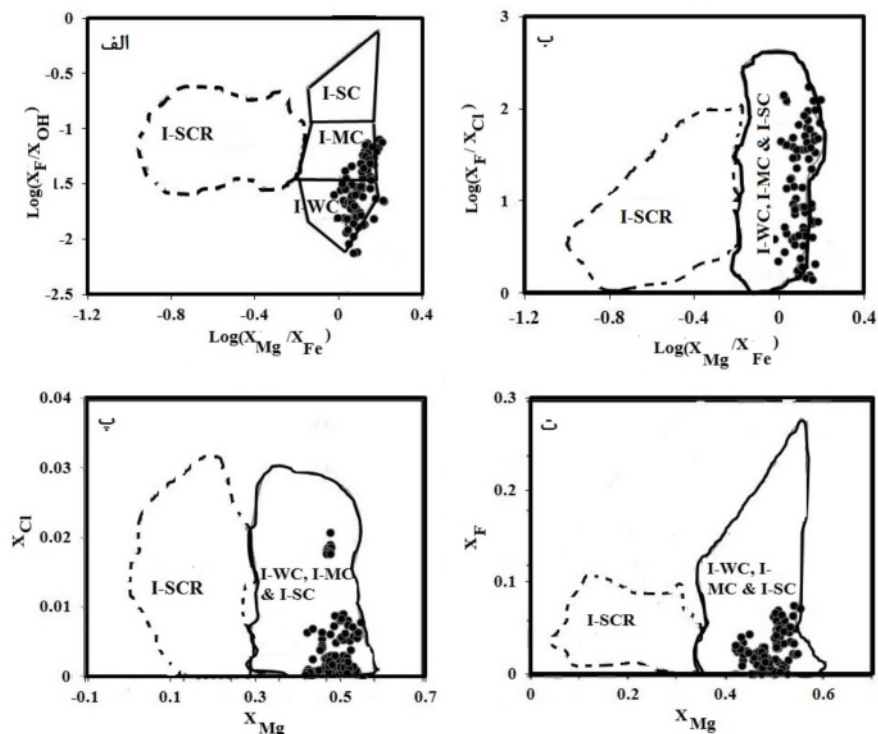
بنابر شکل ۱۰، نمونه‌های گرانیتوئید مکسان در گستره‌ی گرانیتهای نوع I با آلودگی اندک I-WC و آلودگی متوسط I-MC قرار می‌گیرند. این سنگ‌ها آلومینیم کمتر و منیزیم



شکل ۸ تعیین سری ماگمایی گرانیتوئیدهای مورد بررسی براساس ترکیب شیمیایی بیوتیت [۲۶].



شکل ۹ نمودار تغییرات نسبت  $\text{Fe}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  مقابل  $\text{Al}^{\text{IV}}$  موقعیت ترکیب بیوتیت‌های گرانیتوئید مکسان را نشان می‌دهد. گستره‌های گرانیتهای نوع A و I و شوشونیتی توسط [۲۷] ارائه شده است.



شکل ۱۰ ترکیب شیمی بیوتیت‌های گرانیتوئید مکسان روی نمودارهای [۲۸] I-WC (گرانیت‌های نوع I با آلودگی اندک)، I-MC (گرانیت‌های نوع I دارای آلودگی متوسط)، I-SC (گرانیت‌های نوع I به شدت آلوده)، I-SCR (گرانیت‌های نوع I احیایی به شدت آلوده).

[2] Foster M.D., "Interpretation of the composition of trioctahedral micas", United States Geological Survey Professional Paper 354-B (1960) 11-46

[3] Spear J.A., "Micas in igneous rocks", In: Micas, Bailey S.W., (ed); Mineralogical Society of America Review in Mineralogy, 13 (1984) 299-356.

[4] Esmaily D., Maghdour – Mashhour R., "Geochemistry of biotites from Boroujerd granitoid complex, SSZ, Iran: A crucial factor for illustration petrogenesis and tectonomagmatic environment of host rock?", Geophysical Research Abstracts, vol. 11, EGU (2009) 7980.

[5] Karimpour M.H., Stern C.R., Mouradi M., "Chemical composition of biotite as a guide to petrogenesis of granitic rocks from Maherabad, Dehnow, Gheshlagh, Khajehmourad And Najmabad, Iran", Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, 18, no. 4, (2011) 89-100.

[6] Shabani A.A.T., Masudi F., Tecce F., "An investigation on biotite composition from Mashhad granitoid rocks, NW Iran", Journal of Science of Islamic Republic of Iran, 21 (4) (2010) 321-331.

#### برداشت

براساس رده‌بندی شیمیایی میکاها، ترکیب میکاهای مورد بررسی در حدفاصل بین دو قطب آنیت و سیدروفیلیت قرار دارند و با توجه به مقدار  $Fe/Fe + Mg$  جزء بیوتیت‌ها محسوب شده و از فلوگوپیت جدا می‌شوند. ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها از نوع بیوتیت‌های منیزیم‌دار بوده و با توجه به مقادیر اکسیدهای  $FeO$ ،  $MnO$ ،  $MgO$ ،  $TiO_2$  و نیز مقادیر  $Al^{IV}$  جزء انواع ماگمایی اولیه به حساب می‌آیند. این بیوتیت‌ها در محیطی با گریزندگی نسبتاً بالای اکسیژن تشکیل شده و صفات آهکی قلیایی و نوع I نشان می‌دهند که با ویژگی تکتونوماگمایی محیط‌های وابسته به فرورانش همخوانی دارد. همچنین شیمی کانی بیوتیت نشان می‌دهد که آلودگی ماگمای سازنده این گرانیتوئید با پوسته قاره‌ای، کم تا متوسط است.

#### مراجع

[1] Abdel-Rahman A.M., "Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous Magmas", Journal of Petrology 35 (2) (1994) 525-541.

- [17] Streckeisen A., *To each plutonic rock its proper name*, Earth-Science Reviews 12 (1976), 1-33.
- [18] Wones D.R Eugster H.P., "*Stability of biotite: experiment, theory, and application*", American Mineralogist 50(1965) 1228-1272.
- [19] Ishihara S., "*The magnetite series and ilmenite-series granitic rocks*", Mining Geology 27(1977)293-305.
- [20] Nachit H., Lbhi A., Abia E.H., Ohoud M.B., "*Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and magmatic biotites and neoformed biotites*", Geomaterials (Mineralogy), Geoscience 337 (2005) 1415-1420.
- [21] Zhu C., Sverjensky D.A., "*Partitioning of F-Cl-OH between biotite and apatite*", Geochim Cosmo Chim Acta, 56 (1992) 3435-3467.
- [22] Webster J.D., "*Partitioning of Cl between magmatic hydrothermal fluids and highly evolved granitic magmas*", Geological Society of America, Special Publication (1990) 246p.
- [23] Monuz J.L., Ludington S.D., "*Fluoride hydroxyl exchange in biotite*", American Journal of Science 274 (1974) 396-413.
- [24] Monuz J.L., "*F-OH and Cl-OH exchange in mica with application to hydrothermal ore deposits*", Reviews in Mineralogy 13 (1984) 469-493.
- [25] Dymek R.F., "*Titanium and interlayer cation substitutions in biotite from high grade Gneisses, west Greenland*", American mineralogist 68 (9-10) (1983) 880-889.
- [26] Nachit H., Rezfimahefa N., Stussi J.M., Carron J.P., "*Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoides*", Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences 301(11) (1985) 813-818.
- [27] Jiang Y.H., Jiang S.Y., Ling H.F., Zhou X.R., Rui X.J., Yang W.Z., "*Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the westwrn Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: implications for granitoid genesis*", Lithos 693(2002) 165-187.
- [28] Ague J.J., Brimhall G.H., "*Regional variation in bulk chemistry, mineralogy and the compositions of mafic and accessory minerals in the batholites of California*", Geological Society of America Bulletin, 100(1988)891-911.
- [7] Boomeri M., Mizuta T., Ishiyama D., Nakashima K., *Fluorine and Chlorine in biotite from the Sarnowsar granitic rocks, northeastern Iran* Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A30 A1 (2006)111-125.
- [۸] اشرفی ن.، جهانگیری ا.، عامری ع هسب ع.، ابی ن.، "شیمی کانی بیوتیت در توده های آذرین قلیایی بزقوش و کلیبر، شمال غرب ایران"، مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۸) ۳۸۱-۳۹۴.
- [9] Berberian F., "*Petrogenesis of the Iranian Plutons: A study of the Natanz and Bazman intrusive Complexes*", Ph.D. Thesis, Cambridge University (1981).
- [۱۰] قدسی م.ر.، "اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک برگه کرمانچی (شمال غرب ایرانشهر)"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی تهران (۱۳۸۴).
- [۱۱] جمشیدی م.، "تشکیل اسکارن و کانی زایی مس گربودار، جنوب شرق آتشفشان بزمان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۹۰).
- [12] Rieder M., Cavazini G., Yakonov Y.D., Frank – Kanetskii V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P.V., Muller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.L., Sassi F.P., Takeda H. Weiss Z., Wones D.R., "*Nomenclature of the micas*", Canadian Mineralogist 36(3) (1998) 905-912.
- [13] Gunow A.J., Ludington S., Munoz J.L., "*Fluorine in micas from the Henderson molybdenite deposits, Colorado*", Economic Geology 75(1980) 1127-1137.
- [۱۴] وحدتی دانشمند ف.، جرجندی م.، نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش مکسان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۳).
- [۱۵] سهندی م.ر.، پاداشی م.، نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش بزمان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۴).
- [16] Berberian F., Muir I.D., Pankhurst R.J., Berberian M., *Late Cretaceous and Early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and central Iran*, Journal of the Geological Society of London, 139, (1982) 605-14.