مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و پنجم، شمارهٔ اول، بهار ۹۶، از صفحهٔ ۱۳ تا ۲۴

انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

شیمی کانی و بررسی نقش آلومینیوم کل بیوتیت برای تشخیص نوع کانی‌زایی در توده‌های نفوذی محور کرج-طالقان

اسماعیل کشت‌کار*[۱]، منصور قربانی[۱]، جعفر عمرانی[۲]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

(دریافت مقاله: ۹۴/۱۲/۱۴، نسخه نهایی: ۹۵/۴/۲۷)

چکیده: توده‌های نفوذی محور کرج ـ طالقان در البرز مرکزی با پراکندگی‌های خاص، به شکل سیل، لوپولیت، فاکولیت، استوک و پلاگ در درون سنگ‌های آذرآواری سازند کرج و معادل آن جای گرفته‌اند. بر پایه‌ی بررسی‌های میکروسکوپی، ترکیب سنگ‌شناختی این توده‌ها مشابه بوده و شامل الیوین گابرو، الیوین مونزودیوریت، الیوین مونزونیت، پیروکسن مونزونیت به همراه دایک‌های فلسیک از نوع سینیت است. مجموعه کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این مجموعه شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار، پیروکسن، الیوین و بیوتیت قلیایی است. بیوتیت یکی از شاخص‌ترین کانی‌های فرومنیزین در سنگ‌های مورد بررسی است که از لحاظ ترکیبی بین قطب آنیت و سیدروفیلیت قرار گرفته و از نوع بیوتیت‌های غنی از منیزیم است. بیشتر این بیوتیت‌ها از نوع ماگمایی اولیه بوده و بخشی از آنها در گستره‌ی بیوتیت‌های دوبار متعادل شده قرار دارند. بیوتیت‌های مورد بررسی، در نمودارهای دوتایی و سه‌تایی، که بر پایه‌ی اکسیدهای Al_2O_3، MgO و *FeO استوارند، در گستره‌ی کالک‌آلکالن کوهزایی قرار می‌گیرند. دمای جایگیری توده نفوذی زیاران بر اساس تیتانیوم بیوتیت، بین ۶۴۰ تا ۷۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد محاسبه شده است. همچنین فشار محاسبه شده بر اساس آلومینیم کل بیوتیت برای این مجموعه گرانیتوئیدی بین ۰٫۲۷Kb تا ۲٫۵۸ Kb (با میانگین ۱٫۰۶ Kb) است. محتوای آلومینیوم کل بیوتیت توده‌های محور کرج-طالقان بین ۲٫۲۵ تا ۳٫۰۱ در تغییر است که بر اساس نتایج بدست آمده توسط یوشیدا و همکاران روی گرانیتوئیدهای ژاپن، سنگ‌های زیاران توانایی خوبی در کانه‌زایی مس- آهن و سنگ‌های پراچان و شکرناب در کانه‌زایی سرب و روی دارند.

واژه‌های کلیدی: *شیمی کانی؛ آلومینیوم کل بیوتیت؛ البرز مرکزی؛ سیل؛ دما-فشارسنجی.*

مقدمه

بیوتیت به عنوان یکی از فراوان‌ترین و شاخص‌ترین کانی مافیک در ترکیب گرانیتوئیدها، با توجه به ساختار بلوری، شکل شبکه ساختاری، فرومنیزین بودن و تاثیر فراوان تغییرات ترکیب شیمیایی بر ویژگی‌های اپتیکی، کانی مهمی است [۱]. فرمول بیوتیت X_2Y_4-$6Z_8O_{20}(OH, F, Cl)_4$ است که در ساختار آن، لایه مکعبی اول (سایت X) با کاتیون‌های بزرگ مانند K، Na و یا Ca و نیز Ba،Rb، Cs پر می‌شود. این لایه، با دو لایه هشت‌وجهی Y که با عناصر (Fe^{2+}، Mg) و مقادیر کمتری Fe^{3+}، Mn، Cr، Ti، پر شده، احاطه می‌شود و در سایت چاروجهی Z نیز عموماً عناصر Si یا Al و احتمالاً Fe^{3+} و Ti قرار می‌گیرند. ترکیبات و نسبت جایگزینی اکسیدهای سه عنصر اصلی Fe، Al و Mn می‌تواند در تحلیل شرایط سنگ‌شناسی ماگمای مادر موثر باشد. بنابراین با استفاده از ترکیب شیمیایی بیوتیت می‌توان نوع ماگما را تشخیص داده [۲]، ماهیت آن را تعیین کرده [۳]، واحدهای سنگی منطقه را رده‌بندی کرده و تحلیل‌های سنگ‌شناسی ارائه کرد.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۶۷۹۹۶۲۳۹ ، پست الکترونیکی: keshtkaresmail@gmail.com

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]

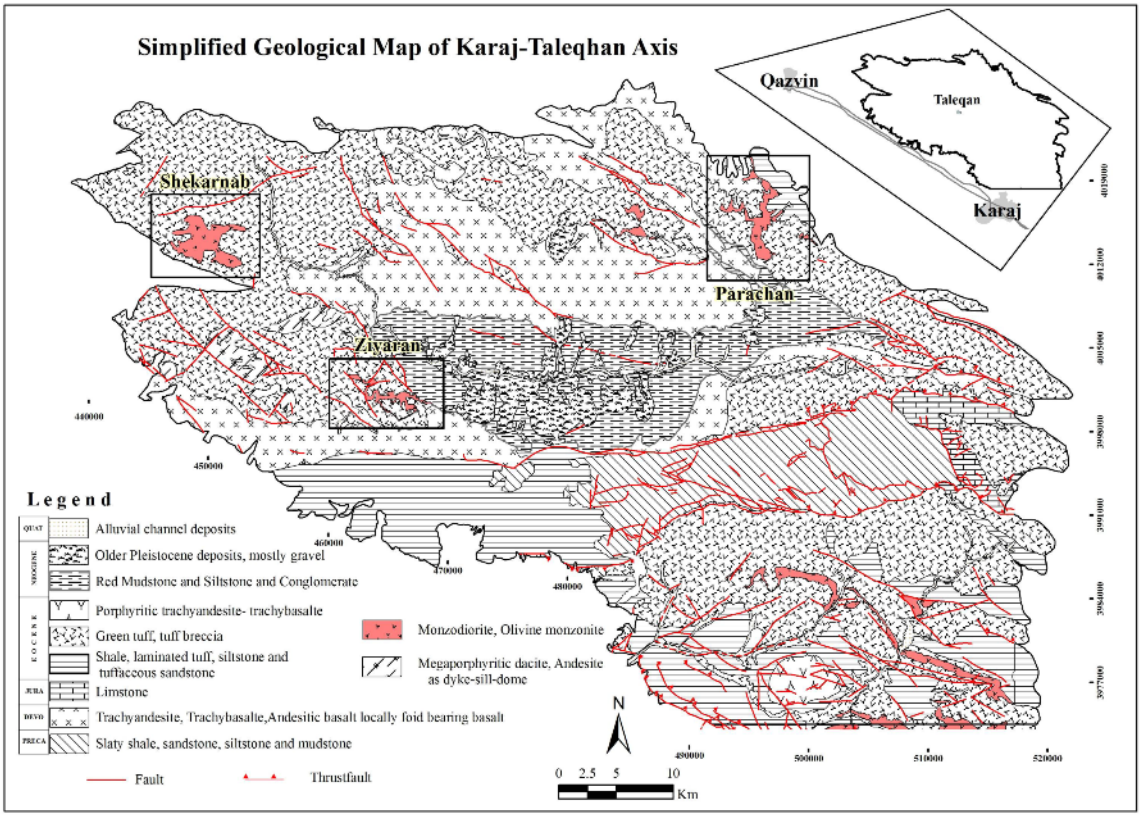
از بیوتیت در زمین دما-فشارسنجی استفاده‌ی زیادی می‌شود زیرا ساختار مخصوص این کانی، این امکان را می‌دهد که عناصر گوناگون در بخش‌های مختلف شبکه اتمی‌اش، به سهولت جایگزین شوند [۴-۶]. بنابر بررسی‌های جدید مشخص شده که ویژگی‌های کانی شیمی و محتوای آلومینیم کل موجود در بیوتیت، ارتباط تنگاتنگی با کانه‌زایی در گرانیت‌ها دارد [۴]. در این راستا، به دلیل گستردگی بیوتیت در سنگ‌های گرانیتوئیدی منطقه، پس از انجام بررسی کانی شیمی، از این کانی هم برای دماسنجی و هم برای فشارسنجی استفاده و رابطه آن با نوع کانی‌زایی بررسی شده است.

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری مجموعه‌ی نفوذی محور کرج-طالقان

مجموعه‌ی گرانیتوئیدی محور کرج-طالقان به صورت نفوذی‌های نه چندان بزرگ مانند سیل، لوپولیت، فاکولیت، استوک و پلاگ [۷] درون لایه‌های رسوبی-آتشفشانی سازند کرج (شامل توف سبز، توف قطعه‌دار بلورین، توف ماسه‌ای، توف آهکی، مارن، شیل و گدازه‌های آتشفشانی) نفوذ کرده (شکل۱) و فرسایش این توده‌ها به صورت فرسایش پوست

توده نفوذی شمال زیاران

توده نفوذی شمال زیاران به صورت نفوذی‌هایی عدسی مانند و سیل درون لایه‌های رسوبی-آتشفشانی سازند کرج نفوذ کرده است. توده اصلی دارای ترکیب الیوین گابرو تا مونزونیت است. سنگ‌های با ترکیب الیوین گابرو بیشترین حجم توده را شامل می‌شوند و دارای بلورهای درشت‌تری نسبت به بخش با ترکیب مونزونیتی هستند. سنگ‌های این توده در نمونه‌ی دستی به صورت مزوکرات با بلورهای قابل تشخیص پلاژیوکلاز و پیروکسن هستند. بافت‌های غالب این توده‌ی نفوذی شامل دانه‌ای، پورفیری و درون دانه‌ای هستند و ترکیب کانی‌شناسی این توده شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی، پیروکسن، الیوین، بیوتیت، اندکی آپاتیت، اسفن و آلانیت به علاوه کانی‌های کدر است.



شکل ۱ موقعیت مجموعه‌ی نفوذی مورد بررسی در نقشه زمین‌شناسی ساده شده (بر گرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تهران، قزوین و شکران [۷-۹]).

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]

توده‌های نفوذی شمال پراچان

این توده‌ها با ماهیت سنگ‌شناسی مونزونیت، مونزوگابروی الیوین-پیروکسن‌دار و دایک‌های سینیتی در شمال روستای پراچان (شمال طالقان علیا) در بین توف‌های سازند کرج به حالت سیل، لوپولیت، فاکولیت و استوک دیده می‌شوند و علاوه بر طبقات پیروکلاستیک سازند کرج، آتشفشان‌های ائوسن بالایی-الیگوسن را قطع کرده‌اند و به همین دلیل سنی پس از الیگوسن به آنها نسبت داده شده است. کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های این توده شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی، پیروکسن، الیوین، بیوتیت، کلریت و اندکی آپاتیت، اسفن، زیرکن به علاوه‌ی کانی‌های کدر و سریسیت است. مونزوگابروها از مهم‌ترین سنگ‌های توده‌ی نفوذی پراچان هستند که به‌وسیله‌ی گسل وارون کندوان در کنار سازندهای پالئوزوئیک و در لایه‌های سازند کرج با روند شمال باختری-جنوب خاوری و با اثرهای دگرگونی بر آن دیده می‌شوند [۱۰]. بافت‌های غالب در این توده به صورت دانه‌ای، پورفیری، درون‌دانه‌ای، ساب افتیک و پوئی‌کلیتیک دیده می‌شوند.

توده نفوذی شمال شکرناب

این توده‌ها اغلب به شکل فاکولیت، گاه سیل و پلاگ بین توف‌های بلورین سازند کرج رخنمون دارند. واحدهای سنگ‌شناختی این توده شامل مونزوگابرو الیوین‌دار، مونزودیوریت، مونزونیت پیروکسن‌دار و دایک‌های سینیتی هستند. از نظر مشخصات ماکروسکپی دانه‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن در نمونه‌ی دستی قابل مشاهده‌اند. بافت غالب توده شکرناب دانه‌دار، پوئی‌کیلیتیک، و ساب‌افتیک است. ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های این توده شامل پلاژیوکلاز، فلدسپارقلیایی، پیروکسن، الیوین، بیوتیت و کمی اسفن، آپاتیت به علاوه کانی‌های کدر است. حضور کانی‌های ثانوی نظیر سریسیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کائولن نشان از دگرسانی پروپیلتی دارند که این نوع دگرسانی در رخساره‌ی شیست سبز رخ می‌دهد. براساس بررسی‌های ژئوشیمیایی و ماگمایی، مجموعه نفوذی محور کرج-طالقان سرشت شبه‌آلومین داشته و از نظر ماگمایی از نوع آهکی-قلیایی با پتاسیم بالا و شوشونیتی است. بررسی‌های سنگ‌شناختی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که سنگ‌های مورد بررسی از نوع گرانیتوئیدهای نوع I و دارای ماهیت قلیایی-کلسیک تا قلیایی هستند. از نظر جایگاه زمین‌ساختی، توده‌های مورد بررسی، جزء گرانیتوییدهای کمان‌های آتشفشانی (VAG) و حاشیه‌ی فعال قاره‌ای به شمار می‌آیند [۱۲،۱۱].

روش بررسی

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، پس از بررسی شواهد صحرایی و بازدید از رخنمون‌های مختلف، تعداد ۱۱۸ نمونه‌ی سنگی از واحدهای مجموعه‌ی گرانیتوئیدی مورد بررسی برداشت شدند (تقریباً ۴۰ نمونه از هر توده)، و طی مرحله‌ی بعد، از آن‌ها مقاطع نازک تهیه شدند (تعداد ۸ مقطع از ۱۱۸ مقطع، برای کانی شیمی). سپس برای تعیین ترکیب شیمیایی کانی بیوتیت، آنالیز ریزپردازش الکترونی با ریزپردازنده‌ی ELECTRON PROBE MICRO ANALYZER مدل SX100 ساخت شرکت Cameca فرانسه در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد (جدول۱). این دستگاه با ولتاژ شتاب دهنده‌ی ۱۵Kv و جریان ۲۰ nA کار می‌کند و آنالیز کمی دقیق نقطه‌ای با تفکیک ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون در هر نقطه دلخواه از عنصر برلیم تا اورانیوم (U -Be) ارائه می‌دهد.

بحث و بررسی

شناسایی بیوتیت‌های اولیه از بیوتیت‌های ثانوی

به‌منظور شناسایی بیوتیت‌های اولیه از ثانویه از نمودار سه‌تایی $FeO -10TiO_2 -MgO + MnO$ استفاده شده است. این نمودار می‌تواند بیوتیت‌های اولیه یا ماگمایی را از بیوتیت‌های اولیه‌ای که به تعادل دوباره رسیده‌اند و نیز بیوتیت‌های ثانویه جدا کند. بررسی چگونگی بیوتیت‌ها در نمودار سه‌تایی TiO_2-FeO-MgO [۳] نشان می‌دهد که بیوتیت‌ها، از نوع ماگمایی اولیه بوده و فقط چند نمونه در گستره‌ی بیوتیت‌های دوباره متعادل شده قرار دارد (شکل۲). تفاوت‌های میکروسکوپی تشخیص داده شده بین دو دسته بیوتیت شامل اختلاف رنگ، چند رنگی، بافت و شکل است. به این ترتیب که بیوتیت‌های ماگمایی اولیه با محتوای TiO_2 بالاتر، رنگ تیره‌تر متمایل به قهوه‌ای داشته، بلورهای خودشکل باگت مانند و میله‌ای تشکیل داده که پلئوکروئیسم شدیدتری نشان می‌دهند (شکل ۳ الف، ب، پ و ت). ولی بیوتیت‌های واقع شده در محدوده دوباره متعادل شده، با محتوی TiO_2 پایین‌تر، رنگ روشن‌تر و پلئوکروئیسم ضعیف‌تر مشخص می‌شوند (شکل ۳ ث و ج).

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

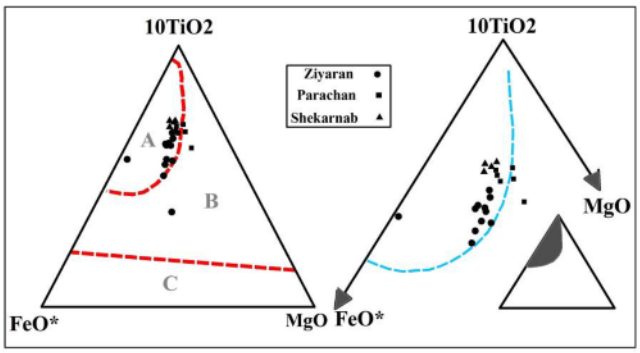
[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]

جدول۱ نتایج آنالیز ریزپردازش الکترونی کانی‌های بیوتیت (wt.%) (فرمول ساختاری بر اساس ۲۲ اتم اکسیژن محاسبه شد).

Location	Ziyaran											
Rock Type	ZR۱۸	ZR۱۹	ZR۲۰	ZR۲۱	ZR۲۲	ZR۲۳	ZR۲۴	ZR۲۵	ZR۲۶	ZRB۲۳	ZRB۲۴	ZRB۲۵
SiO_2	۳۵٫۴۲	۳۵٫۲۹	۳۵٫۱۰	۳۵٫۵۲	۳۵٫۲۱	۳۴٫۹۷	۳۵٫۱۱	۳۴٫۸۹	۳۵٫۱۲	۳۵٫۵۵	۳۵٫۲۳	۳۵٫۱۸
TiO_2	۵٫۷۲	۵٫۱۶	۵٫۹۱	۴٫۱۶	۳٫۸۶	۳٫۲۶	۵٫۲۰	۵٫۲۰	۵٫۱۳	۴٫۰۱	۱٫۸۶	۵٫۲۶
Al_2O_3	۱۴٫۱۰	۱۴٫۱۹	۱۴٫۳۷	۱۴٫۲۹	۱۴٫۵۲	۱۴٫۸۸	۱۴٫۳۲	۱۴٫۳۱	۱۵٫۱۷	۱۴٫۳۸	۱۶٫۱۱	۱۴٫۰۲
FeO	۱۸٫۲۹	۱۹٫۳۷	۱۸٫۱۴	۲۰٫۱۱	۲۰٫۴۵	۲۰٫۱۷	۲۰٫۳۷	۲۰٫۷۴	۲۰٫۲۱	۱۸٫۳۰	۱۸٫۱۳	۱۹٫۷۱
MnO	٪۲۶	٪۲۳	٪۲۶	٪۳۰	٪۳۲	٪۳۰	٪۳۰	٪۳۳	٪۲۹	٪۲۷	٪۲۶	٪۳۲
MgO	۱۲٫۴۵	۱۲٫۰۶	۱۲٫۰۴	۱۲٫۰۶	۱۱٫۸۵	۱۱٫۶۳	۱۰٫۴۵	۱۰٫۷۵	۱۰٫۷۶	۱۳٫۲۱	۱۴٫۲۲	۱۱٫۶۸
CaO	٪۰۱	٪۰۱	٪۰۵	٪۰۱	٪۰۱	٪۰۳	٪۰۰	٪۰۱	٪۰۰	٪۰۱	٪۰۰	٪۰۱
Na_2O	۰٫۴۴	۰٫۴۹	۰٫۴۶	۰٫۴۳	۰٫۴۵	۰٫۴۲	۰٫۵۹	۰٫۵۹	۰٫۶۶	۰٫۶۸	۰٫۲۸	۰٫۵۵
K_2O	۱۰٫۳۷	۱۰٫۲۳	۱۰٫۲۵	۱۰٫۲۱	۱۰٫۴۵	۱۰٫۱۷	۱۰٫۱۸	۱۰٫۲۵	۱۰٫۳۵	۱۰٫۳۹	۱۰٫۴۷	۱۰٫۰۹
Total	۹۷٫۰۷	۹۷٫۰۴	۹۶٫۵۸	۹۷٫۰۹	۹۷٫۱۲	۹۵٫۸۳	۹۶٫۵۳	۹۷٫۰۷	۹۷٫۷۱	۹۶٫۸۰	۹۶٫۵۶	۹۶٫۸۲
Si	5,36	5,36	5,33	5,41	5,38	5,40	5,64	5,59	5,56	5,64	5,58	5,61
Al	۲٫۵۱	۲٫۵۴	۲٫۵۷	۲٫۵۶	۲٫۶۱	۲٫۷۱	۲٫۷۱	۲٫۷۰	۲٫۸۳	۲٫۶۹	۳٫۰۱	۲٫۶۴
Al^{IV}	۲٫۵۱	۲٫۵۴	۲٫۵۷	۲٫۵۶	۲٫۳۸	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۵۸	۲٫۶۸	۲٫۵۷	۲٫۶۶	۲٫۵۲
Al^{VI}	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۳۵	۰٫۴۷	۰٫۳۴	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۲۱	۰٫۰۰
Ti	۰٫۶۵	۰٫۵۹	۰٫۶۷	۰٫۴۸	۰٫۴۴	۰٫۳۸	۰٫۶۳	۰٫۶۳	۰٫۶۱	۰٫۴۸	۰٫۲۲	۰٫۶۳
Fe	۲٫۳۱	۲٫۴۶	۲٫۳۰	۲٫۵۶	۲٫۶۱	۲٫۶۰	۲٫۷۳	۲٫۷۸	۲٫۶۸	۲٫۴۳	۲٫۴۰	۲٫۶۳
Mn	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴
Mg	۲٫۸۱	۲٫۷۳	۲٫۷۳	۲٫۷۴	۲٫۷۰	۲٫۶۸	۲٫۵۰	۲٫۵۷	۲٫۵۴	۳٫۱۲	۳٫۳۶	۲٫۷۸
Ca	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Na	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۳	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۲۰	۰٫۲۱	۰٫۰۹	۰٫۱۷
K	۲٫۰۰	۱٫۹۸	۱٫۹۹	۱٫۹۸	۲٫۰۴	۲٫۰۰	۲٫۰۸	۲٫۰۹	۲٫۰۹	۲٫۱۰	۲٫۱۱	۲٫۰۵
Mg/(Mg+Fe₂)	۰٫۵۵	۰٫۵۳	۰٫۵۴	۰٫۵۲	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۴۸	۰٫۴۸	۰٫۴۹	۰٫۵۶	۰٫۵۸	۰٫۵۱

ادامه جدول۱

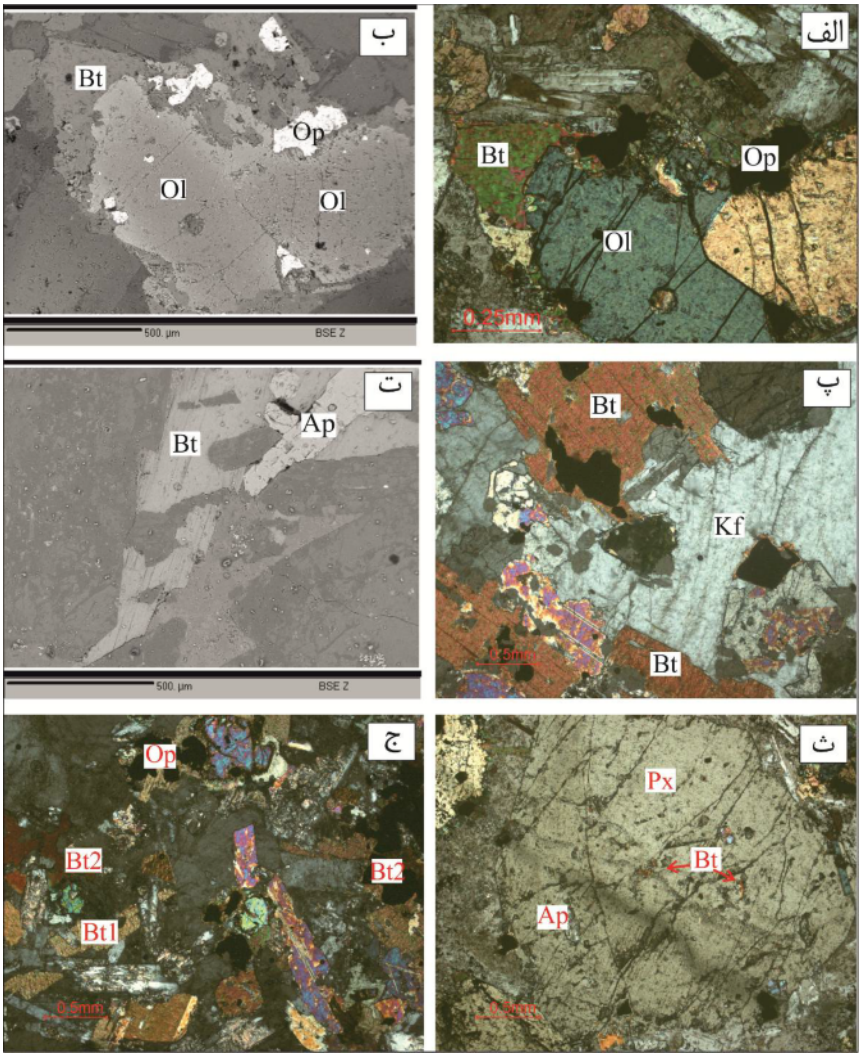
Location	Prachan						Shekarnab			
Rock Type	PR۲۶	PR۲۷	PR۲۸	PR۲۹	PR۳۰	PR۳۱	CH۸	CH۹	CH۱۰	CH۱۱
SiO_2	۳۸٫۰۰	۳۸٫۱۵	۳۸٫۹۹	۳۷٫۱۱	۳۷٫۶۱	۳۷٫۶۴	۳۶٫۱۴	۳۶٫۴۰	۳۷٫۰۷	۳۵٫۵۶
TiO_2	۶٫۸۱	۶٫۱۸	۴٫۷۹	۶٫۵۴	۶٫۸۳	۶٫۲۳	۷٫۴۰	۷٫۴۲	۷٫۰۷	۶٫۶۶
Al_2O_3	۱۲٫۷۱	۱۳٫۰۱	۱۳٫۱۱	۱۲٫۴۴	۱۲٫۳۱	۱۲٫۷۸	۱۲٫۸۸	۱۲٫۶۹	۱۲٫۹۵	۱۳٫۰۰
FeO	۱۳٫۰۰	۱۲٫۲۰	۱۱٫۲۲	۱۵٫۲۵	۱۵٫۴۴	۱۴٫۹۰	۱۷٫۹۴	۱۸٫۷۶	۱۶٫۴۳	۱۸٫۸۷
MnO	٪۰۷	٪۰۹	٪۰۸	٪۰۸	٪۰۸	٪۰۹	٪۱۶	٪۱۴	٪۱۲	٪۱۳
MgO	۱۵٫۸۸	۱۶٫۹۲	۱۸٫۷۲	۱۴٫۲۷	۱۴٫۳۰	۱۵٫۰۵	۱۱٫۷۸	۱۰٫۶۰	۱۱٫۶۹	۱۰٫۵۸
CaO	٪۰۰	٪۰۰	٪۰۰	٪۰۳	٪۰۲	٪۰۱	٪۰۱	٪۰۰	٪۰۵	٪۰۲
Na_2O	۰٫۵۴	۰٫۵۳	۰٫۳۷	۰٫۹۴	۰٫۵۹	۰٫۵۳	۰٫۷۱	۰٫۷۶	۱٫۳۱	۱٫۲۹
K_2O	۱۰٫۴۱	۱۰٫۳۶	۱۰٫۶۵	۱۰٫۰۸	۱۰٫۱۴	۱۰٫۳۵	۹٫۴۷	۹٫۷۸	۹٫۷۹	۹٫۸۴
Total	۹۷٫۴۴	۹۷٫۴۷	۹۷٫۹۴	۹۶٫۷۴	۹۷٫۳۲	۹۷٫۶۰	۹۶٫۹۱	۹۶٫۹۵	۹۶٫۹۱	۹۶٫۱۰
Si	5,81	5,80	5,87	5,79	5,82	5,80	5,46	5,52	5,57	5,46
Al	۲٫۲۹	۲٫۳۳	۲٫۳۲	۲٫۲۹	۲٫۲۵	۲٫۳۲	۲٫۲۹	۲٫۲۷	۲٫۲۹	۲٫۳۵
Al^{IV}	۲٫۱۹	۲٫۲۰	۲٫۱۳	۲٫۱۹	۲٫۱۵	۲٫۲۲	۲٫۲۹	۲٫۲۳	۲٫۱۸	۲٫۲۹
Al^{VI}	۰٫۱۰	۰٫۱۳	۰٫۱۹	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۵	۰٫۲۱	۰٫۱۶
Ti	۰٫۷۸	۰٫۷۱	۰٫۵۴	۰٫۷۷	۰٫۷۹	۰٫۷۲	۰٫۸۴	۰٫۸۵	۰٫۸۰	۰٫۷۷
Fe	۱٫۶۶	۱٫۵۵	۱٫۴۱	۱٫۹۹	۲٫۰۰	۱٫۹۲	۲٫۲۷	۲٫۳۸	۲٫۰۶	۲٫۴۲
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Mg	۳٫۶۲	۳٫۸۴	۴٫۲۰	۳٫۳۲	۳٫۳۰	۳٫۴۵	۲٫۶۵	۲٫۴۰	۲٫۶۲	۲٫۴۲
Ca	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Na	۰٫۱۶	۰٫۱۶	۰٫۱۱	۰٫۲۸	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۲۱	۰٫۲۲	۰٫۳۸	۰٫۳۸
K	۲٫۰۳	۲٫۰۱	۲٫۰۴	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۳	۱٫۸۲	۱٫۸۹	۱٫۸۸	۱٫۹۳
Mg/(Mg+Fe₂)	۰٫۶۹	۰٫۷۱	۰٫۷۵	۰٫۶۳	۰٫۶۲	۰٫۶۴	۰٫۵۴	۰٫۵۰	۰٫۵۶	۰٫۵۰



شکل ۲ تعیین خاستگاه و بررسی چگونگی بیوتیت‌های ماگمایی و دوباره متعادل شده، توده‌های نفوذی مورد بررسی در نمودار سه‌تایی TiO_2-FeO-MgO [۳].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]



شکل ۳ الف) تصویر میکروسکوپی از کانی‌های بیوتیت (Bt)، الیوین (Ol)، کانی کدر (مگنتیت) (Op) و بافت دانه‌ای هم بعد (نور XPL)؛ ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی (BSI) کانی‌های موجود در تصویر الف؛ پ) بیوتیت‌های اولیه حاوی نفوذی‌هایی از کانی‌های کدر وآپاتیت. ت) تصویر میکروسکوپ الکترونی (BSI) کانی بیوتیت اولیه و آپاتیت. ث) بیوتیت به صورت بی‌شکل (لخته‌گون) درون پیروکسن‌های دارای بافت غربالی. پ) تصویری از هر دو نسل بیوتیت کنار هم.

در حالت کلی می‌توان گفت بیوتیت‌های دوباره متعادل شده‌ی گستره‌ی B شکل۲، با بیوتیت‌های ثانویه دارای کانی‌های آپاتیت، روتیل و اکسیدهای آهن–تیتانیوم هماهنگی دارند.

ترکیب شیمی کانی بیوتیت

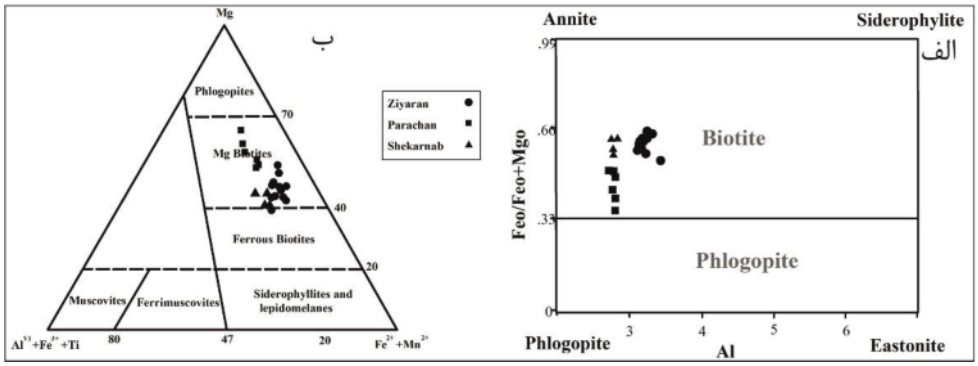
بیوتیت محلول جامد چهار عضو انتهایی یعنی آنیت، سیدروفیلیت، فلوگوپیت و ایستونیت است که بر پایه‌ی این چهار فاز، نموداری زیر عنوان چهارضلعی (ASPE) طراحی شده‌اند که برای تعیین ترکیب میکاهای هشت‌وجهی سه‌گانه به کار می‌رود. در این چهارضلعی، دو متغییر Fe/(Fe+Mg) و Al total به کار گرفته شده‌اند که به ترتیب شاخص گریزندگی اکسیژن و پرآلومینه بودن ماگما در زمان تبلور بیوتیت است [۱۳]. ترکیب میکاهای مورد بررسی چنانکه در شکل ۴ الف پیداست در قلمرو بیوتیت و در بین قطب آنیت و سیدروفیلیت و نزدیک به قطب آنیت قرار دارند و هیچ یک در قلمرو فلوگوپیت نیستند. همچنین همه‌ی بیوتیت‌های مورد بررسی از نوع بیوتیت‌های غنی از منیزیم (شکل۴ ب) بوده و تغییر ترکیب محسوسی نشان نمی‌دهند [۱۴].

تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی

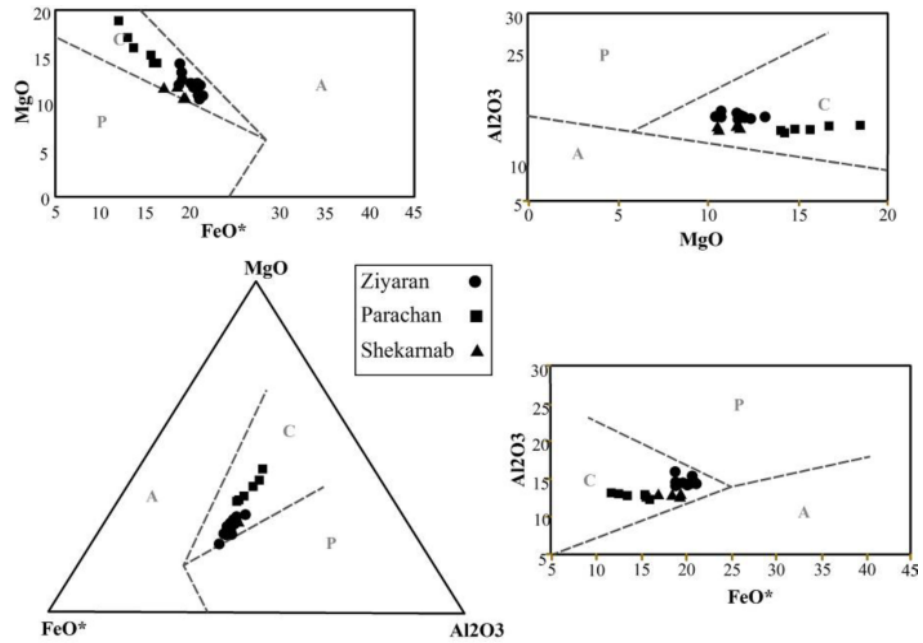
بیوتیت از کانی‌هایی است که ترکیب آن نشان‌دهنده‌ی ویژگی-های ماگمای مادر است. ترکیب بیوتیت در مجموع تابع شرایط

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]

تبلور ماگمایی است که از آن متبلور شده است، بنابراین می‌توان از آن به عنوان یک معیار مناسب برای شناسایی محیط زمین‌شناختی گرانیتوئیدها استفاده کرد. عبدالرحمن [۵] با استفاده از آنالیزهای سه اکسید Al_2O_3، MgO و *FeO در کانی بیوتیت، یک نمودار مثلثی ارائه داد (شکل ۵) که سنگ‌های گرانیتوئیدی را در سه گروه رده‌بندی 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 گرانیتوئید برخوردی نوع S-Type می‌شوند (P) و گرانیتوئیدهای کوهزایی آهکی-قلیایی از نوع I که به طور متوسط غنی از منیزیم بوده و معمولاً همراه با آمفیبول کلسیم-دار و یا پیروکسن کلسیم‌دار و وابسته به فرورانش هستند (C). در شکل ۵ موقعیت نمونه‌های مورد بررسی به تصویر در آمده‌اند. تمام نمونه‌های بیوتیت از نوع گرانیتوئیدهای نوع I هستند و در پهنه‌ی C قرار می‌گیرند که به قلمرو بیوتیت گرانیتوئیدهای قوسی آهکی-قلیایی فرورانشی وابسته‌اند. در نمودار Al -Mg [۱۵] نیز سنگ‌های محور کرج-طالقان در گستره‌ی منیزیم بالا و شبه آهکی و قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۶) که با نتایج نمودارهای عبدالرحمن [۵] کاملاً همخوانی دارد.



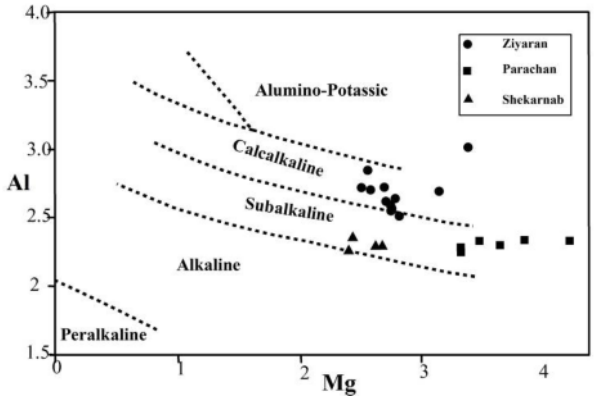
شکل ۴ الف) بررسی انواع میکاهای آهن و منیزیم‌دار در نمودار چهار قطبی [۱۳] ب) بیوتیت‌های مورد آنالیز از نوع بیوتیت‌های غنی از منیزیم هستند [۱۴].



شکل۵ تعیین سری ماگمایی براساس شیمی بیوتیت [۵]. گستره‌ها A: قلیایی، (مناطق کششی) C: آهکی-قلیایی، (مناطق فرورانش) P : پرآلومین (محیط‌های برخوردی).

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]



شکل۶ تعیین سری ماگمایی گرانیتوئیدهای مورد بررسی بر اساس ترکیب شیمیایی بیوتیت [۱۵].

از طرف دیگر ترکیب شیمی بیوتیت قادر به جدایی سنگ گرانیتی میزبان خود بر پایه‌ی رده‌بندی الفبایی گرانیت‌هاست، به گونه‌ای که جیانگ و همکاران [۱۶] بر حسب تغییرات نسبت $Fe/(Mg + Fe)$ در مقابل Al^{IV} در بیوتیت نموداری را ارائه کردند که جدا کننده انواع گرانیت‌ها بر پایه‌ی خاستگاه آن-هاست. در این نمودار نمونه‌های بیوتیت مورد بررسی در گستره‌ی گرانیت‌های کوهزایی نوع I قرار می‌گیرند که با نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوشیمی سنگ کل [۱۲] کاملاً همخوانی دارد (شکل ۷).

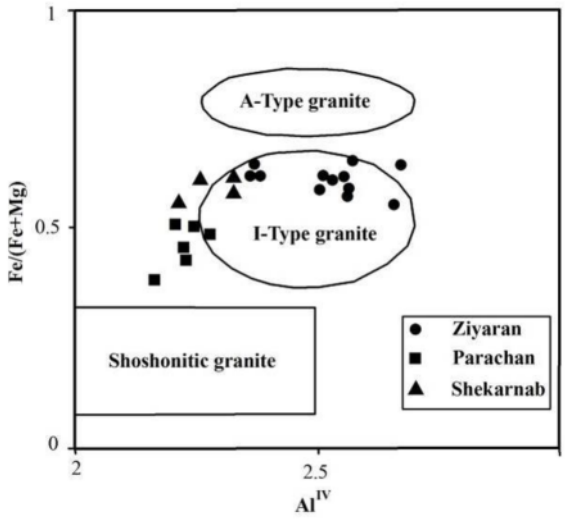
دماسنجی با استفاده از مقدار تیتانیم بیوتیت

زمین دماسنج مقدار تیتانیم در بیوتیت [۱۷]، بر اساس غلظت Ti در متاپلیت‌های پرآلومین بنا شده است. دما می‌تواند هم با ترسیم مقادیر Ti و Mg/(Mg+Fe) روی یک نمودار دوتایی ساده (شکل ۸) و هم با محاسبه‌ی T در فرمول زیر بدست آید:

$$T = ([\ln(Ti)-a-c(X_{Mg})^3]/b)^{0.333}$$

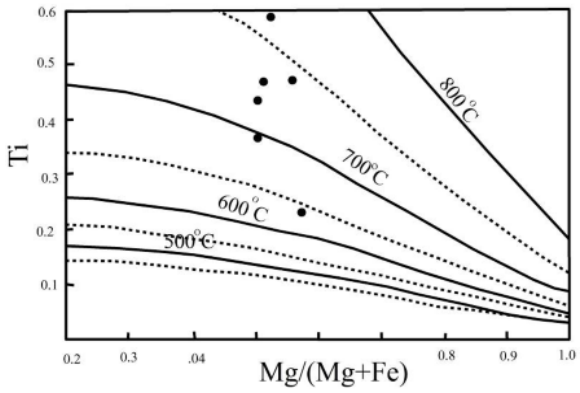
Coefficient	a	b	c
Value	2.3594	4.65E-09	-1.728

که در آن T دما بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد، Ti مقدار اتم در واحد فرمول یا (apfu) بهنجار شده به ۲۲ اکسیژن، X_{Mg} برابر با Mg/(Mg+Fe)، a، b و c پارامترهای بالا هستند. این فرمول برای مقادیر Ti=0.04-0.6apfu، X_{Mg}=0.275-1.0 و T=480-800ºC معتبر است. بنابراین دماسنجی توده‌های پراچان و شکرناب با استفاده از این روش با توجه به بالا بودن مقدار Ti آن‌ها امکان‌پذیر نیست. دمای تعادل گرانیتوئیدهای زیاران براساس این دماسنج، بین ۶۴۰ تا ۷۷۰ درجه‌ی سانتی-گراد (میانگین ۷۳۰ درجه سانتی‌گراد) محاسبه شده است (شکل۸).



شکل۷ نمودار تغییرات نسبت $Fe^{2+}/(Mg+Fe^{2+})$ در مقابل Al^{IV} [۱۶].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]



شکل۸ نمودار همدمای زمین دماسنج تیتانیم در بیوتیت [۱۷].

فشارسنجی با استفاده از محتوای آلومینیم کل (Al^T) بیوتیت

فشارسنجی سنگ‌ها بر اساس محتوای آلومینیم کل آمفیبول (Al^T)، روشی متداول است که توسط محققین مختلفی انجام شده است [۱۸-۲۰]. ولی فشارسنجی سنگ‌های گرانیتی براساس محتوای آلومینیم کل بیوتیت برای اولین بار توسط یوشیدا [۱]، برای فشارسنجی سنگ‌های گرانیتی تعدادی از معادن ژاپن ارائه شد. اعتقاد بر این است که فشار محاسبه با استفاده از محتوای کل آلومینیم بیوتیت در سنگ‌های گرانیتی، حاصل کاهش حجم بیوتیت و ماگمای همراه آن طی فرورانش است [۱]. همچنین بین محتوای کل آلومینیم در بیوتیت و فشار انجماد توده‌های گرانیتوئیدی رابطه‌ای وجود دارد. برای تایید این فرضیه، پژوهشگران داده‌های مربوط به فشار انجماد در مناطق مختلف گرانیتی را که از قبل و با روش‌های دیگری مثل فشارسنجی با آمفیبول [۲۱] و نیز فشارسنجی اسفالریت بود، با محتوای آلومینیم کل بیوتیت مقایسه کردند و متوجه شدند که ارتباط بسیار خوبی بین محتوای آلومینیم کل بیوتیت با فشار انجماد برقرار است. براساس نتایج این پژوهش، با افزایش فشار انجماد، Al^T بیوتیت نیز افزایش می‌یابد. به همین سبب [۱] پیشنهاد کرد که می‌توان از محتوای آلومینیم کل بیوتیت به عنوان یک زمین فشارسنج در سنگ‌های گرانیتی استفاده کرد. معادله تجربی آن به قرار زیر است:

$$P\ (kb) = 3.03 \times Al^T - 6.53\ (\pm 0.33)$$

در این معادله Al^T محتوای کل آلومینیم بیوتیت بر اساس ۲۲ اتم اکسیژن است. از این روش برای تعیین فشار تبلور بیوتیت در سنگ‌های گرانیتی مورد بررسی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که دامنه‌ی تغییرات فشار در مجموعه‌ی گرانیتوئیدی پراچان بین ۰٫۲۷ Kb تا ۰٫۵۴ Kb، در مجموعه‌ی گرانیتوئیدی شکرناب بین ۰٫۳۵ Kb تا ۰٫۶۰ Kb و در مجموعه گرانیتوئیدی زیاران بین ۱٫۰۸ Kb تا ۲٫۵۸ Kb در تغییر است. بنابراین براساس معادله تجربی یاد شده مقدار فشار وارده بر مجموعه نفوذی کرج-طالقان بین ۰٫۲۷ Kb تا ۲٫۵۸Kb (با میانگین ۱٫۰۶ Kb) است همخوانی کاملی با فشار بدست آمده در منحنی مدرج کردن حاصل از زمین فشارسنجی بیوتیت در شکل ۹ برای سنگ‌های گرانیتوئیدی است [۱].

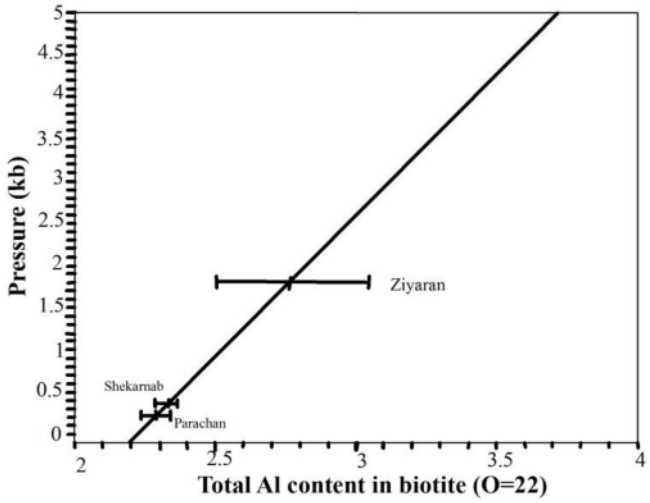
تعیین نوع کانسار گرمابی با استفاده از زمین فشارسنج بیوتیت

برای تعیین نوع کانه‌زایی از روابط بین Al^T و نسبت مولی Mg/(Mg+Fe) در بیوتیت گرانیتوئیدهای متعدد در ژاپن، همراه با مشخص کردن نوع فلز [۱]، و مقایسه‌ی آن با سنگ-های گرانیتوئیدهای محور کرج-طالقان استفاده شده است (شکل۱۰). مقدار Al^T در بیوتیت سنگ‌های گرانیتی، با افزایش عمق تشکیل افزایش می‌یابد و به‌عنوان یک نشان‌گر برای براورد فشار سنگ‌شدگی استفاده می‌شود. چنانکه در نمودارهای شکل ۱۰ دیده می‌شود، مقادیر میانگین Al^T در سنگ‌های گرانیتی وابسته به کانسارهای سرب، روی و مولیبدن پایین است و با افزایش عمق سنگ‌شدگی سنگ‌های گرانیتی به ترتیب زیر افزایش می‌یابد:

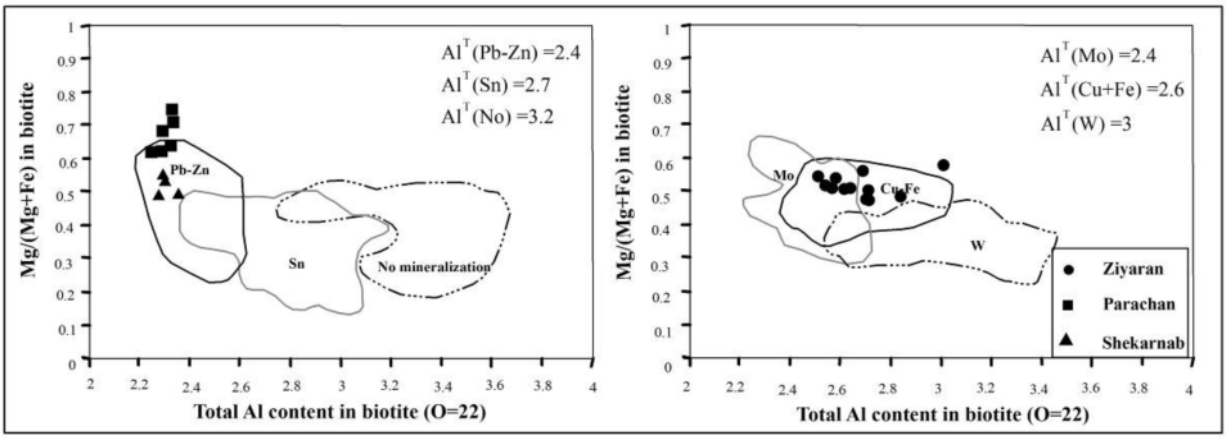
سنگ‌های گرانیتی وابسته به کانسار سرب، روی و مولیبدن < مس، آهن و قلع < تنگستن < سنگ‌های گرانیتی فاقد کانه‌زایی. در این مقایسه روند پراکندگی نمونه‌ها و مقادیر Al^T در بیوتیت‌های گرانیتوئیدی محور پراچان و شکرناب (Al^T=2.3) مشابه با گرانیتوئیدهای وابسته به کانی‌سازی سرب-روی و پراکندگی نمونه‌ها و مقادیر Al^T در بیوتیت‌های گرانیتوئیدی محور زیاران (Al^T=2.67) مشابه با گرانیتوئیدهای شبیه کانی‌سازی مس-آهن در ژاپن است (شکل ۱۰).

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]



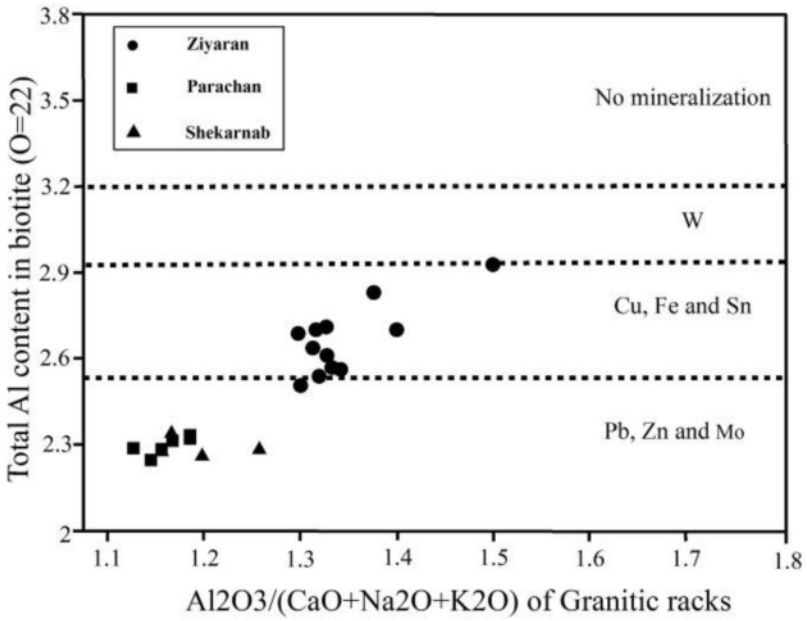
شکل۹ فشار تبلور بیوتیت‌ها بر اساس منحنی مدرج شده زمین فشارسنج بیوتیت [۱]. چنانکه نمودار نشان می‌دهد فشار تبلور بیوتیت‌ها بین ۰٫۲۷ تا ۲٫۵۸ کیلوبار تغییر می‌کنند.



شکل۱۰ مقایسه‌ی نسبت $Mg/(Mg + Fe)$ در مقابل Al^T در بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای متعدد در ژاپن با بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای محور کرج-طالقان برای تعیین نوع کانی‌سازی احتمالی [۱].

بنابراین توده‌های فوق می‌توانند از نظر پتاسیل کانه‌زایی مس-آهن و سرب و روی حائز اهمیت باشند. همچنین وابستگی بین Al^T در بیوتیت و شاخص اشباع شدگی آلومینیوم $(Al_2O_3 / (CaO+Na_2O+K_2O)$ در سنگ‌های گرانیتی وابسته به کانه‌زایی توسط یوشیدا [۱] بررسی شده است (شکل ۱۱). بدین صورت که اگر Al^T بیوتیت در مقابل ضریب اشباع از آلومینیم $Al_2O_3 /(CaO + Na_2O + K_2O)$ در یک نمودار ترسیم شوند، این روابط بین Al^T بیوتیت سنگ‌های گرانیتی با نوع کانسار برقرار است: ۱- کانسارهاری سرب، روی و مولیبدن در سنگ‌های گرانیتی Al^T<۲٫۴ ۲- کانسارهای مس، آهن و قلع در سنگ‌های گرانیتی: ۲٫۴<Al^T<۲٫۹، ۳- کانسار تنگستن در سنگ‌های گرانیتی ۲٫۹<Al^T<۳٫۲، ۴- گرانیت-های بدون کانه‌زایی: ۳٫۲<Al^T. Al^T بیوتیت در سنگ‌های گرانیتوئیدی زیاران، بین ۲٫۵ تا ۳٫۰۱ و در سنگ‌های گرانیتوئیدی پراچان و شکرناب، بین ۲٫۲۵ تا ۲٫۳۵ در تغییر است و این بدان معناست که سنگ‌های زیاران توانایی کانه‌زایی مس، آهن و سنگ‌های پراچان و شکرناب توانایی کانه‌زایی سرب و روی را داراست (شکل۱۱). بنابراین Al^T بیوتیت معیاری برای تشخیص و تعیین نوع کانسار تشکیل شده در مناطق گرانیتی بوده و بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که گرانیتوئیدهای محور کرج-طالقان از نظر کانه‌زایی مس، آهن، سرب و روی پتانسیل خوبی دارند که وجود شاخص‌های این عناصر در منطقه‌ی [۲۲،۱۲] تایید کننده‌ی این ادعاست.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]



شکل۱۱ رابطه‌ی ضریب اشباع آلومینیم ($Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$) و مقدار آلومینیم‌کل بیوتیت (Al^T) برای تعیین چگونگی کانی‌سازی احتمالی [۱].

برداشت

توده‌های نفوذی محور کرج-طالقان در البرز مرکزی با پراکندگی‌های خاص، به شکل سیل، لوپولیت، فاکولیت، استوک و پلاگ در درون سنگ‌های آذرآواری سازند کرج و معادل آن جای گرفته‌اند.

با توجه به این‌که این توده‌ها در توف‌های ائوسن تزریق شده‌اند، لذا سن ائوسن بالایی و احتمالاً الیگوسن را دارند. بر پایه‌ی بررسی‌های میکروسکوپی، ترکیب سنگ‌شناسی این توده‌ها مشابه است و چنانچه توده‌ی شمال زیاران دارای ترکیب الیوین‌گابرو و مونزنیت، توده شمال پراچان دارای ترکیب مونزونیت، الیوین مونزوگابرو و دایک‌های سینیتی و توده‌ی شمال شکرناب دارای ترکیب مونزوگابرو، مونزودیوریت، مونزونیت به همراه دایک‌های فلسیک از نوع سینیت هستند. شاخص‌های رنگی این سنگ‌ها در صحرا و نمونه‌ی دستی به صورت مزوکرات تا ملانوکرات بوده که در آن‌ها بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن قابل تشخیص‌اند. مجموعه کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، فلدسپارقلیایی، پیروکسن، الیوین و بیوتیت است که تفاوت مهم آن‌ها در میزان کانی‌هاست. از کانی‌های فرعی نیز می‌توان به کانی‌های آپاتیت، اسفن و کانی‌های کدر (مگنتیت) اشاره کرد. بررسی‌های شیمی کانی انجام شده روی بیوتیت‌های موجود در سنگ‌های توده-های نفوذی، بیان‌گر بیوتیت‌های غنی از منیزیم است که از نظر ترکیبی بین قطب آنیت و سیدروفیلیت قرار گرفته‌اند. بیشتر این بیوتیت‌ها از نوع ماگمایی اولیه بوده و بخشی از آنها در محدوده‌ی بیوتیت‌های دوباره متعادل شده قرار دارند. تفاوت-های میکروسکوپی تشخیص داده شده بین دو رشته بیوتیت شامل اختلاف رنگ، چند رنگی، بافت و شکل است. به این ترتیب که بیوتیت‌های ماگمایی اولیه خودشکل و با رنگ تیره (متمایل به قهوه‌ای) بوده، که پلئوکروئیسم شدیدتری دارند ولی بیوتیت‌های محدوده‌ی دوباره متعادل شده، رنگ روشن‌تر و پلئوکروئیسم ضعیف‌تر از خود نشان می‌دهند. همچنین بیوتیت‌های مورد بررسی در نمودارهای دوتایی و سه‌تایی، که بر پایه‌ی اکسیدهای Al_2O_3، MgO و *FeO استوارند، در گستره‌ی آهکی-قلیایی کوهزایی قرار می‌گیرند. براساس تیتانیوم بیوتیت موجود در سنگ‌های توده‌ی نفوذی زیاران، دمای جایگیری آن بین ۶۴۰ تا ۷۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد محاسبه شده است. همچنین فشار محاسبه شده براساس آلومینیم کل بیوتیت برای مجموعه گرانیتوئیدی کرج-طالقان ۰٫۲۷ تا ۲٫۵۸ (با میانگین

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]

۱٫۰۶ Kb) است. محتوای آلومینیوم کل بیوتیت در سنگ‌های گرانیتوئیدی زیاران، بین ۲٫۵ تا ۳٫۰۱ و در سنگ‌های گرانیتوئیدی پراچان و شکرناب بین ۲٫۲۵ تا ۲٫۳۵ در تغییر است و این بدان معناست که سنگ‌های زیاران توانایی کانه‌زایی مس، آهن و سنگ‌های پراچان و شکرناب توانایی کانه‌زایی سرب و روی را دارند. مشابه بودن ویژگی‌های صحرایی، سنگ-نگاری، شیمی کانی، نزدیکی مکانی و زمانی سنگ‌های مورد بررسی نشان از رابطه‌ی ژنتیکی و خویشاوندی نزدیک و احتمالاً خاستگاه یکسان آن‌ها دارد.

مراجع

[1] Uchida E., Endo S., Makino M., *"Relationship Between Solidification Depth of Granitic Rocks and Formation of Hydrothermal Ore Deposits"*, Resource Geology, 57 (2007) 47–56.

[2] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., *"An introduction to the rock-forming minerals"*, 2nd edition, Longman, Harlow (1992).

[3] Nachit H., Ibhi A., Abia E.H., Ohoud M.B., *"Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites"*, Comptes Rendus Geoscience 337 (2005) 1415-1420.

[4] Buda G., Koller F., Kovacz J., Ulrych J., *"Compositional variation of biotite from Variscan granitoids in central Europe: A statistical evaluation"*, Acta Mineralogica et Petrographica, 45/1 (2004) 21-37.

[5] Abdel-Rahman A.M., *"Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas",* Journal of petrology 35(2) (1994) 525-541.

[6] Putirka K.D., *"Thermometers and barometers for volcanic systems"*, Reviews in Mineralogy and Geochemistry 69 (2008) 61–120.

[7] Annells, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A.B., Davies, R.G., Hamedi, M.A.R., and Rahimzadeh, F. *"Geological map of Iran, Shakran sheet 6162"*, scale 1:100,000, Geological Survey of Iran (1977).

[۸] امینی ب.، *"نقشه زمین‌شناسی تهران ۱:۱۰۰۰۰۰"*، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۳).

[۹] رادفر ج.، *"نقشه زمین‌شناسی قزوین ۱:۱۰۰۰۰۰"*، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۷۲).

[۱۰] نوری خانکهدانی ک.، *"بررسی پترولوژیکی توده‌های مونزونیتی شمال دیزان (منطقه طالقان)"*، رساله کارشناسی-ارشد، دانشگاه شهید بهشتی (۱۳۷۵) ۱۷۲ ص.

[۱۱] کشت‌کار ا.، قربانی م.، *"مطالعه کلینوپیروکسن‌های موجود در توده‌های نفوذی محور کرج-طالقان (البرز مرکزی)"* مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره دوم (۱۳۹۵) ص ۴۰۵-۴۱۶.

[۱۲] کشت‌کار ا.، *"پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی محور کرج-طالقان"* رساله دکتری پترولوژی (۱۳۹۵)، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۳۲۴ صفحه.

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

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

[15] Nachit H., Razafimahefa N., Stussi J.M., Carron J.P.,*"Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoides"*, Comptes Rendus Hebdomadaires de 1, Académie des Sciences 301(11) (1985) 813-818.

[16] 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 western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: implications for granitoid genesis"*, Lithos 63 (2002) 165-187.

[17] Henry D.J., Guidotti C.V., Thomson J.A. *"The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotite: Implications for Geothermometry and Ti-substitution Mechanisms",* American Mineralogist, 90, (2005) 316-328.

[18] Hammarstrom J. M., Zen E., *"Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer",* American Mineralogist 71(1986) 1297-1313.

[19] Anderson J.L., Smith D.R., *"The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer"*, American Mineralogist 80 (1995) 549– 559.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]

[20] Johnson M.C., Rutherford M.J., *"Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks"* *Geology*17 (1989) 837–841.

[21] Thomas W., Ernst W.G., *"The aluminum content of hornblende in calc-alkaline granitic rocks; a mineralogic barometer calibrated experimentally to 12 kbars, In: Spencer RJ, Chou I-M, (eds) Fluid–mineral interactions: a tribute to H.P. Eugster"*, The Geochemical Society, Special Publication, 2, (1990) 59–63.

[۲۲] رضوی م. ح.، مسعودی ف.، فرح‌خواه ن.، *"شواهد کانی-شناسی، بافتی و ژئوشیمیایی در تشخیص متاسوماتیسم پتاسیک در سیل بنیان سد کرج و تاثیر آن در سنگ‌های درونگیر"* فصلنامه زمین‌شناسی ایران، بهار ۱۳۸۹.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1396.25.1.2.1]