کاربرد کانی بیوتیت در بررسی پتروژنتیک گرانیتوئیدهای بروجرد

فریبرز مسعودی، بهزاد مهرابی و فروغ معظمی گودرزی:
گروه زمین شناسی دانشگاه تربیت معلم، تهران

چکیده

کاتیون‌های Fe, Mg و Al در کانی بیوتیت به فرایندهای ماگمایی حساس هستند. از این‌رو از کانی بیوتیت در بررسی پتروژنز توده‌های گرانیتوئیدی استفاده می‌شود. در این تحقیق از ترکیب شیمیایی کانی بیوتیت برای بررسی ویژگی‌های ژئوشیمایی و پتروژنز سنگ‌های نفوذی کمپلکس بروجرد در بخش شمالی زون سنندج- سیرجان استفاده شده است. نمونه‌های بیوتیت در مقاطع صیقلی گرانیتوئیدهای قدیمی با سن حدود ١٢٠ میلیون سال و گرانیتوئیدهای جوان با سن بین ٦٠-٧٠ میلیون سال به روش تجزیه نقطه‌ای (EPMA) و بیوتیت‌های خالص جدا شده از سنگ به روش XRF بررسی شد. نتایج تجزیه بیوتیت به هر دو روش نتایج مشابهی را نشان دادند.

کانی بیوتیت در نمونه‌های با سن مختلف خصوصیات متفاوتی نشان داده و به خوبی دو گروه سنی از یکدیگر متمایز می‌شوند. بر اساس مقادیر کاتیونی Mg, Mn, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Ti و Al بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای جوان بروجرد در ترکیب خود دارای منیزیم بیش‌تری نسبت به بیوتیت‌های سنگ‌های قدیمی هستند. مهم‌ترین تفاوت بیوتیت در این واحدهای سنگی در مقدار Al کل و نسبت Fe/Fe+Mg است. بیوتیت‌های متعلق به گرانودیوریت و کوارتزدیوریت‌های جوان بین دو قطب آنیت و فلوگوپیت قرار گرفته‌اند و دارای مقدار Al ٢/٤٨ تا ٢/٧٤ اتم در هر واحد فرمول و نسبت Fe/Fe+Mg بین ٠/٣٧٥ تا ٠/٦٠٠ هستند. بیوتیت در گرانیتوئیدهای قدیمی بین دو قطب آنیت و سیدروفیلیت قرار می‌گیرد و مقدار Al از ٢/٧٦ تا ٣/٦٩ اتم در هر واحد فرمول و Fe/Fe+Mg بین ٠/ ٥٩٧ تا ٠/٧٢٠ است. بر اساس ترکیب بیوتیت‌ها، گرانیتوئیدهای جوان و قدیمی کمپلکس بروجرد عمدتاً در محدوده مربوط به گرانیتوئیدهای کالک آلکالن قرار می‌گیرند و این گرانیتوئیدها به ترتیب نوع I و نوع S هستند و در فوگاسیته اکسیژن متفاوتی تشکیل شده‌اند.

مقدمه

با توسعه امکان تجزیه کانی‌ها، توانایی قابل توجه تک کانی‌ها و به خصوص کانی بیوتیت در تعیین خصوصیات ماگمایی گرانیتوئیدها در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهندگان قرار گرفته است(مانند[٤]، [٨]، [١١]، [٣]، [٥]). بیوتیت کانی فرومنیزین غالب در سنگ‌های فلسیک و حد واسط است. در زمان تشکیل ماگمای

واژه‌های کلیدی: بیوتیت، گرانیتوئید، کمپلکس بروجرد، سنندج-سیرجان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

گرانیتی ترکیبات و نسبت اکسیدهای سه عنصر اصلی آهن، آلومینیم و منیزیم در کانی بیوتیت طوری جای‌گزین می‌شوند که خصوصیات و شرایط ژئوشیمایی، تکتونیکی و پتروژنتیکی ماگمای سازنده را در خود ثبت کند[۹].

در این تحقیق از ترکیب شیمیایی کانی بیوتیت برای بررسی ویژگی‌های ژئوشیمایی، پتروژنز و منشأ سنگ‌های نفوذی بروجرد در بخش شمالی زون سنندج- سیرجان استفاده شده است. انتخاب این منطقه به آن علت بوده است که علاوه بر بررسی کارآیی کانی بیوتیت در بررسی گرانیتوئیدها، به اطلاعات موجود در مورد تکوین بخش شمالی سنندج – سیرجان نیز ا فزوده شود.

زمین شناسی عمومی

در منطقه شمال غرب بروجرد توده‌های نفوذی در اسلیت و فیلیت‌های همدان نفوذ کرده وهاله دگرگونی مشخص را به وجود آورده‌اند(شکل۱). نفوذ سنگ‌های گرانیتی با تشکیل رگه‌ها و توده‌های متعددی از پگماتیت همراه بوده است. مجموعه سنگ‌های آذرین و دگرگونی یاد شده تحت عنوان کمپلکس بروجرد معرفی شده است ([۱۲]،[۱۳]). در جنوب این کمپلکس سنگ‌های قدیمی پرکامبرین و تریاس نیز دیده می‌شوند. سنگ‌های پرکامبرین شامل متاریولیت همراه با دولومیت است و سری‌های تریاس در این منطقه در قائده با متاولکانیک‌ها و توف شروع شده و با سنگ‌های آتش‌فشانی رسوبی ادامه می‌یابند و در نهایت مقداری مرمر و متاکوارتزیت به آن‌ها اضافه می‌شود([۱] و [٦]).

در داخل کمپلکس، سری ژوراسیک به طورکلی شامل اسلیت و فیلیت است و در بعضی از مناطق با ماسه سنگ دگرگونی دنبال می‌شود. دگرگونی ناحیه‌ای در رخساره شیست سبز به حداکثر درجه خود رسیده که بعد با دگرگونی مجاورتی ناشی از نفوذ توده‌ها همراه می‌شود.

گرانیتوئیدهای کمپلکس بروجرد

پژوهش‌های صحرایی و پتروگرافی نشان می‌دهند که سنگ‌های نفوذی در کمپلکس بروجرد شامل گرانودیوریت، مونزوگرانیت و کوارتزدیوریت است. بیش‌ترین حجم توده نفوذی بروجرد از آنِ گرانودیوریت‌ها است. گرانیتوئیدها به صورت یک توده اصلی گرانودیوریتی و تعداد زیادی توده‌های کوچک و پراکنده کوارتزدیوریتی، مونزوگرانیتی و گرانودیوریت جوان رخنمون دارند. تعیین سن انجام شده به روشRb - Sr سن حدود ۱۲۰ میلیون سال را برای توده گرانودیوریتی اصلی و سن حدود ۷۰ میلیون سال را برای توده‌های کوچک جوان تر نشان می‌دهد[۱۳].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

شکل۱. نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه بروجرد [۱۳].

واحد گرانودیوریتی

سنگ‌های گرانودیوریتی در مرکز توده نفوذی بروجرد رخنمون دارند. این واحد فراوان‌ترین سنگ‌های توده نفوذی بروجرد را دربر گرفته وهمبری آن‌ها با سنگ‌های رسوبی دگرگون شده مجاور (مرمر و دولومیت‌های تجدید تبلور یافته) به خوبی مشخص است. بافت این سنگ‌ها گرانولار و از نظرکانی شناسی دارای پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کوارتز هستند. کانی‌های مافیک آن‌ها شامل بیوتیت و آمفیبول، و کانی‌های فرعی همراه نیز آپاتیت، اسفن، زیرکن و کانی‌های اپک است. در نواحی حاشیه‌ای واحدگرانودیوریتی یک برگوارگی مشخص که ناشی از جهت‌یابی ترجیحی آمفیبول و بیوتیت است، به چشم می‌خورد.

با توجه به مشاهدات صحرایی، واحد گرانودیوریتی توده نفوذی بروجرد به دو صورت جوان با توپوگرافی مرتفع و قدیمی با توپوگرافی پست و کاملاً هوازده زمینه اصلی توده نفوذی بروجرد را تشکیل می‌دهند. واحد قدیمی‌تر به میزان زیادی دستخوش تغییرشده و در برخی نقاط شدت آن به حدی است که تقریباً همه سنگ به طور کامل تجزیه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

واحد کوارتزدیوریت

رخنمون این واحد سنگی از نظر توپوگرافی نسبت به سنگ‌های گرانودیوریتی مرتفع‌تر است و در نمونه دستی به رنگ سفید مایل به خاکستری روشن دیده می‌شود. بر اساس ابعاد بلورها، می‌توان این واحد را به دو زیر گروه ریز بلور و متوسط بلور تفکیک نمود.

کوارتزدیوریت‌ها دارای بافت گرانولار، و از نظر کانی‌شناسی حاوی پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کوارتز هستند. کانی‌های مافیک آن‌ها عبارت از بیوتیت و آمفیبول بوده و کانی‌های فرعی نیز شامل آپاتیت، اسفن، زیرکن و کانی‌های اپک هستند.

واحد مونزوگرانیت پرفیروئید

سنگ‌های این واحد فراوانی کمتری دارند و در دو ناحیه کریم‌آباد و نظام‌آباد رخنمون دارند.این واحد مرتفع‌ترین رخنمون‌ها را به خود اختصاص داده و سنگ‌ها متوسط تا درشت بلور با رنگ سفید مایل به شیری هستند. این سنگ‌ها گاهی اوقات بافت دانه‌ای دارند؛ ولی اغلب بافت آن‌ها پرفیروئید است، که در آن‌ها فنوکریست‌های آلکالی فلدسپار و پلاژیوکلاز شکل دار به‌اندازه تا ۱ سانتیمتر دیده می‌شود.

این سنگ‌ها از نظر کانی‌شناسی دارای پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، بیوتیت و آمفیبول بوده و کانی‌های فرعی نیز شامل آپاتیت، اسفن، زیرکن و کانی‌های اپک است.

تجزیه بیوتیت

پس از بررسی میکروسکپی گرانیتوئیدهای کمپلکس بروجرد، ۸ نمونه معرف برای بررسی کانی بیوتیت انتخاب شد. نمونه‌ها ابتدا خرد شده و کانی بیوتیت به دو روش ثقلی و مغناطیس در دو مرحله از سنگ جدا شد. بعد از انجام جداسازی، نمونه بیوتیت‌های به دست آمده به طور تقریبی دارای درصد خلوص بیش از ۹۸ درصد شدند. برای دستیابی به درصد خلوص کامل جداسازی نهایی این کانی با چشم و با استفاده از استریومیکروسکپ انجام گرفت. نمونه‌های خالص بیوتیت کاملاً پودر و به روش XRF در دانشگاه تربیت معلم تهران برای تشخیص و تعیین کمی عناصر اصلی و کمیاب تجزیه شد(جدول۱). به منظور بررسی صحت داده‌ها، از نمونه‌های بررسی شده دو نمونه به طور همزمان مقاطع صیقلی تهیه و بیوتیت‌های آن‌ها به روش تجزیه نقطه‌ای(EPMA) در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران بررسی شد(جدول۲).

آنالیز بیوتیت به هر دو روش XRF و EPMA نتایج تقریباً مشابهی نشان دادند. از آنجا که روش XRF روشی است که دسترسی به آن آسان‌تر است، می‌توان انتظار داشت که کانی بیوتیت به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

عنوان کلیدی در بررسی ژئوشیمی گرانیتوئیدها بتواند در سطحی گسترده به کار رود. جزئیات و مراحل جداسازی، خالص‌سازی و تجزیه بیوتیت را معظمی[۲] توصیف کرده است.

بحث

بر اساس نتایج تجزیه بیوتیت‌ها علاوه بر تعیین ویژگی‌های کانی بیوتیت، محیط تکتونیکی تشکیل گرانیتوئیدهای بروجرد نیز بررسی و ویژگی‌های شیمیایی مانند میزان آلومینیم و درجه اکسیداسیون ماگمای سازنده آن‌ها مشخص شد.

فرمول ساختمانی و خصوصیات بیوتیت

فرمول ساختمانی بیوتیت‌ها برای هر نمونه بر اساس(O, OH, Cl, F) ۲٤ و با استفاده از برنامه کامپیوتری (Min Pet) و بر اساس فرمول معمول بیوتیت ($X_2 Y_{4-6} Z_8 O_{20}$ OH, F, Cl) اقتباس از دیر و همکاران [۷] ساخته شد (جداول ۱و۲).

فورستر [۸] با استفاده از مقادیر کاتیونی Mg, Mn, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Ti و Al موجود در سایت اکتاهدرالی ، رده بندی میکاها را ارائه کرد و ارتباط این کاتیون‌ها با یکدیگر و نیز با نوع میکا را نیز تعیین نمود. بر اساس این تقسیم‌بندی بیوتیت توده‌های نفوذی واحدهای جوان بروجرد دارای منیزیم بیش‌تری در ترکیب خود نسبت به بیوتیت‌های بررسی شده در سایر واحدها است(شکل۲).

اسپیر[۱٦] با توجه خاص به تغییرات Al و Fe/(Fe+Mg) میکاها، چهارگوش آنیت[۱]، سیدروفیلیت[۲]، فلوگوپیت[۳] و ایستونیت[٤] را به صورت ASPE برای نشان دادن ترکیب این کانی‌ها ارائه کرد. دیر و همکاران [۷] نیزمحدوده کانی بیوتیت را در این نمودار مشخص کردند. نمونه‌های بررسی شده با توجه به این خط جدا کننده، در محدوده بیوتیت قرار می‌گیرند(شکل۳). اما از نظر تمرکز دو گروه متمایز دیده می‌شود.

بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای جوان با داشتن مقدار محتوی Al کل بین۲/٤۸ تا ۲/۷٤ در هر واحد فرمولی (A.p.f.u) و با مقدار نسبت Fe/(Fe+Mg) ۰/۳۷۵ تا ۰/٦۰۰ بین دو قطب آنیت و فلوگوپیت قرار گرفته‌اند و گرانیتوئیدهای قدیمی با داشتن محتوی Al کل بین ۲/۷٦۲ تا ۳/٦۹۰ در هر واحد فرمولی(A.p.f.u) و مقدار نسبت Fe/(Fe+Mg) ۰/۵۹۷ تا ۰/۷۲۰ بین دو قطب آنیت و سیدروفیلیت با روندی به سمت قطب سیدروفیلیت قرار می‌گیرد(شکل۳).

۱-Annite ۲-Siderophylite ۳-Phlogopite ٤-Eastonite

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

جدول ۱. نتایج تجزیه بیوتیت به روش XRF و تعیین فرمول ساختاری آن‌ها

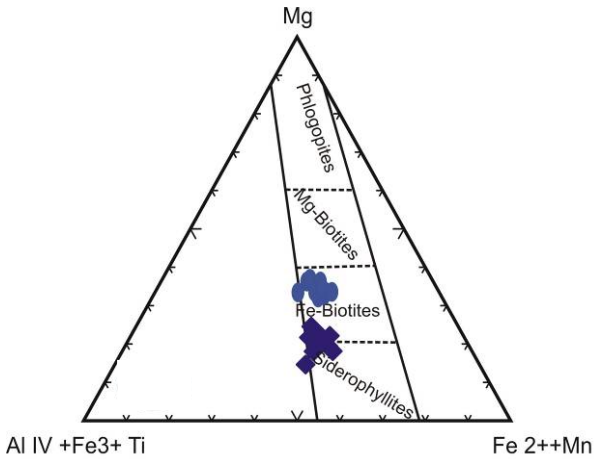
	گرانیت فاز جوان	مونزوگرانیت جوان	کوارتزدیوریت جوان	گرانودیوریت قدیمی	گرانودیوریت قدیمی	گرانودیوریت قدیمی	گرانودیوریت قدیمی	گرانودیوریت قدیمی
Sample	GF9	GK15 - x	GK18x	GF17	BH13 -X	GF96x	B 11 x- 1	B 11 -x4
SiO_2	34.16	32.00	35.50	32.00	34.86	34.00	34.54	33.00
TiO_2	2.63	2.20	1.90	2.58	4.42	2.59	2.96	3.68
Al_2O_3	17.30	19.00	13.90	18.60	15.28	18.30	15.90	17.15
FeO	21.00	22.167	15.00	23.00	19.09	19.36	20.20	22.03
Fe_2O_3	3.86	4.30	3.90	3.95	3.57	3.78	3.90	3.736
MnO	0.23	0.45	0.17	0.44	0.10	0.18	0.36	0.41
MgO	6.90	7.00	12.85	6.21	11.85	7.64	5.00	6.00
CaO	0.27	0.30	0.74	0.15	1.21	0.04	0.12	0.08
Na_2O	0.09	0.23	0.17	0.15	0.19	0.07	0.03	0.16
K_2O	10.42	10.75	11.43	10.50	11.80	10.84	12.00	11.56
F	0.42			0.27	0.32	0.56	0.29	0.02
Cl	0.16	0.08	0.163	0.33	0.13	0.19	0.13	0.20
H_2O	3.914	3.00	3.00	3.97	3.26	3.99	3.94	3.20
Total	101.40	98.28	98.74	102.18	106.13	101.57	99.30	101.25
O_F_Cl	0.22	0.25	0.10	0.19	0.16	0.28	0.15	0.05
Si	5.05	5.144	5.3	4.948	4.97	5.10	5.24	5.30
AlIV	2.94	2.856	2.7	3.052	2.57	2.89	2.75	2.69
Z=	8	8	8	8	7.54	8	8	8
AlVI	0.07	0.77	0	0.12	0	0.21	0.08	0.21
Ti	0.29	0.26	0.21	0.28	0.47	0.28	0.33	0.39
Fe3	0.42	0.52	0.44	0.43	0.38	0.41	0.44	0.40
Fe2	2.59	3.00	1.90	2.78	2.28	2.33	2.56	2.65
Mn	0.03	0.06	0.02	0.05	0.01	0.02	0.04	0.05
Mg	1.52	1.69	2.91	1.34	2.52	1.6	1.13	1.29
Y=	4.94	6.33	5.50	5.02	5.67	4.90	4.60	4.99
Ca	0.04	0.05	0.12	0.02	0.18	0.00	0	0.01
Na	0.02	0	0.05	0.04	0.05	0.02	0.01	0.04
K	1.96	2.22	2.21	1.94	2.15	1.99	2.32	2.12
X=	2.036	2.28	2.39	2.00	2.38	2.02	2.33	2.18
Cations	14.98	16.61	15.65	15.03	15.61	14.93	14.94	15.18
CF	0.4	0.51	0.51	0.24	0.28	0.51	0.28	0.01
CCl	0.08	0.04	0.08	0.16	0.06	0.09	0.06	0.09
OH	3.86	0	3.04	3.84	3.10	3.85	3.99	3.07
O	24	24	24	24	24	24	24	24
Fe/FeMg	0.63	0.64	0.40	0.67	0.47	0.59	0.69	0.67
Mg/FeMg	0.37	0.36	0.60	0.33	0.53	0.41	0.31	0.33

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

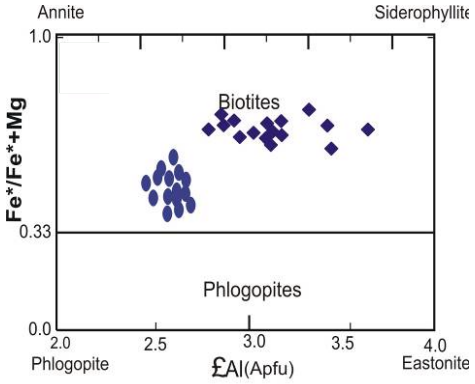
جدول ۲. نتایج آنالیز بیوتیت به روش EPMA و تعیین فرمول ساختاری آن‌ها

	گرانیت فاز جوان GF9							گرانودیوریت قدیمیGF17		
Sample	Point 1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
SiO_2	35.47	35.3	35.34	36.00	37.00	35.00	36.00	32.00	32.00	31.00
TiO_2	3.30	2.34	2.34	2.33	3.00	3.10	3.33	2.74	2.63	3.00
Al_2O_3	15.50	16.9	15.00	15.00	15.30	15.00	16.00	16.00	15.30	15.60
FeO	15.00	20.00	16.00	14.20	15.00	16.00	14.00	17.00	19.80	18.00
Fe_2O_3	2.67	2.50	2.50	3.00	2.56	3.30	4.02	3.80	3.87	3.96
MnO	0.22	0.26	0.26	0.30	0.30	0.30	0.11	0.22	0.27	0.44
MgO	14.00	7.28	12.50	12.80	12.00	13.00	12.00	12.90	6.37	11.90
CaO	0.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.25	0.19	0.27	0.17
Na_2O	0.20	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05	0.07	0.12
K_2O	10.91	10.02	10.02	10.20	10.33	10.50	10.21	10.68	10.15	10.38
F	0.69	0.53	0.53	0.53	0.55	0.65	0.29	0.09	0.34	0.35
Cl	0.23	0.33	0.31	0.32	0.23	0.05	0.33	0.06	0.29	0.33
H_2O	3.94	4.00	5.00	4.20	4.50	4.20	4.23	4.31	3.95	3.95
Total	101.93	99.591	99.82	98.86	100.85	101.35	100.87	100.08	101.37	98.89
Si	5.091	5.24	5.10	5.46	5.28	5.22	5.28	5.07	5.07	4.99
AlIV	2.62	2.75	2.55	2.53	2.57	2.49	2.60	2.63	2.78	2.66
z	7.71	8	7.65	8	7.85	7.71	7.88	7.70	7.85	7.65
AlVI	0	0.21	0	0.14	0	0	0	0	0	0
Ti	0.35	0.26	0.25	0.26	0.32	0.32	0.34	0.28	0.28	0.32
Fe3	0.28	0.27	0.27	0.34	0.27	0.35	0.41	0.4	0.42	0.43
Fe2	1.8	2.48	1.93	1.80	1.79	1.88	1.61	1.99	2.40	2.18
Mn	0.027	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.77	0.05
Mg	2.99	1.61	2.69	2.89	2.55	2.73	2.47	2.69	1.37	2.56
|Y	5.46	4.88	5.18	5.48	4.97	5.33	4.87	5.39	5.26	5.56
Ca	0.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02
Na	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03
K	1.99	1.89	1.84	1.8	1.88	1.89	1.80	1.90	1.88	1.91
|X	2.05	1.95	1.90	1.86	1.94	1.94	1.86	1.95	1.9	1.98
Cations	15.2	14.8	14.74	13.74	14.77	15.00	14.7	15.06	15.06	15.19
CF	0.63	0.50	0.49	0.51	0.50	0.58	0.26	0.08	0.31	0.32
CCl	0	0	0	0	0	0	0.15	0.03	0.14	0.147
OH	3.77	3.96	4.82	4.25	4.29	3.95	3.90	4.03	3.82	3.82
O	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Fe/FeMg	0.38	0.61	0.42	0.38	0.41	0.41	0.4	0.43	0.64	0.46
FeMg/Mg	0.62	0.39	0.58	0.62	0.59	0.59	0.6	0.57	0.36	0.54

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل۲. طبقه‌بندی شیمیایی میکاهای توده نفوذی در رده‌بندی فورستر[۸] گرانیتوئیدهای جوان با دایره و گرانیتوئیدهای قدیمی با لوزی نشان داده شده‌اند.



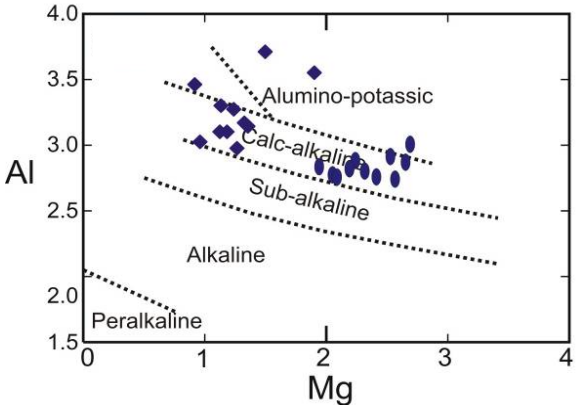
شکل۳. طبقه‌بندی شیمیایی[۱۵] و موقعیت میکاهای بررسی شده. خط جدا کننده محدوده‌های فلوگوپیت و بیوتیت توسط دیر و همکاران[۷] اضافه شده است. گرانیتوئیدهای جوان با دایره و گرانیتوئیدهای قدیمی با لوزی نشان داده شده‌اند.

ترکیب شیمیایی بیوتیت و سری ماگمایی گرانیت‌ها

محققان مختلفی ارتباط ترکیب شیمیایی بیوتیت و سری ماگمایی سازنده آن‌ها را بررسی کرده‌اند[۱٤]، [۳]، [۱۵]. ناچیت[۱٤] با استفاده از ترکیب بیوتیت در گرانیتوئیدها و ارتباط آن‌ها با انواع ماگماهایی که از آن متبلور شده‌اند برای انواع گرانیت‌ها یک طرح رده بندی ساده را ارائه کرد. در این رده‌بندی بر اساس تغییرات Mg در مقابل Al کل در بیوتیت‌ها ماگماهای گرانیتوئیدی مادر را به چهار گروه متمایز(P) گرانیتوئیدهای پرآلومینوس(C) گرانیتوئیدهای کالک آلکالن(SA) گرانیتوئیدهای ساب آلکالن و بالاخره(A-PA) گرانیتوئیدهای آلکالن- پرآلکالن تقسیم و نتایج خود را در یک نمودار دوتایی ارائه کرد. طبق این نمودار ترکیب بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای جوان و قدیمی کمپلکس بروجرد عمدتاً در محدوده مربوط به گرانیتوئیدهای کالک آلکالن قرار می‌گیرند(شکل٤).

عبدالرحمن [۳] برای تعیین سری ماگمای سازنده بیوتیت‌ها با استفاده از اکسیدهای عناصر اصلی Al_2O_3 و FeO_{Total}, MgO گرانیتوئیدها را طبقه‌بندی کرده است. بر اساس این طبقه‌بندی، نسبت FeO*/MgO در بیوتیت‌های سنگ‌های آلکالن برابر ۷/۰٤، در بیوتیت‌های سنگ‌های پرآلومین برابر۳/۸٤ و در بیوتیت‌های کالک آلکالن مقدار آن ۱/۷٦ است. وی بر این اساس سه سری ماگمایی و در پی آن سه محدوده تکتونیکی را برای گرانیتوئیدها معرفی کرد که هر کدام حاصل نوع و کمیت جانشینی‌های خاصی از سه عنصر آهن، منیزیم و آلمینیوم با یک‌دیگر بوده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ٤. تعیین سری ماگمایی گرانیتوئیدهای بررسی شده بر اساس ترکیب شیمیایی بیوتیت[١٤]. گرانیتوئیدهای جوان با دایره و گرانیتوئیدهای قدیمی با لوزی نشان داده شده‌اند.

سه محدوده شامل: A) بیوتیت در محدوده A نشان دهنده گرانیتوئیدهای با منشا ماگمای آلکالن است که در محیط غیر کوه‌زایی تشکیل شده‌اند و شاخص گرانیت‌های نوع A است. C) بیوتیت‌ها درمحدوده C نشان دهنده گرانیتوئیدهای با منشا ماگمای کالک آلکالن است که در محیط کوه‌زایی مرتبط با فرورانش تشکیل شده و شاخص گرانیت‌های نوع I است. P) بیوتیت‌ها در محدوده P نشان دهنده گرانیتوئیدهای با منشأ ماگمای پرآلومین است که در محیط کوه‌زایی برخوردی تشکیل شده و شاخص گرانیتوئیدهای نوع S است.

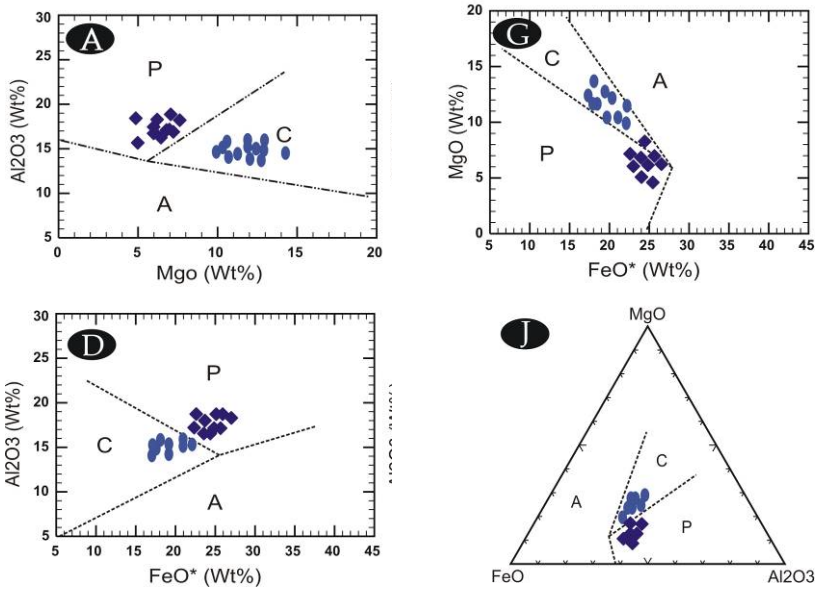
بر اساس این تقسیم‌بندی، نمونه‌های گرانیتوئیدهای جوان کمپلکس بروجرد در محدوده C و گرانیتوئیدهای قدیمی در محدوده P قرار می‌گیرند(شکل ٥) و به ترتیب نوع I و S هستند.

پرآلومینه بیوتیت در مقابل پرآلومینه ماگمای مادر

برجسته‌ترین خصوصیت ترکیبی بیوتیت در توده‌های گرانیتوئیدی، محتوی Al کل آن است. این شاخص به طور مستقیم پرآلومینه ماگمای مادر را نشان می‌دهد؛ زیرا معمولاً بیوتیت میزبان آلومینیم اضافی گرانیت‌ها است [١٦]. بیوتیت بعد از فلدسپات اولین کانی داوطلب برای دریافت آلومینیم اضافی ماگمای مادر است؛ البته بعضی از کانی‌ها مانند آلومینوسیلیکات‌ها(آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت)، گارنت و کردیریت و مسکویت در محیط مذاب می‌توانند این نقش را داشته باشند که در سنگ‌های بررسی شده این کانی‌ها متداول نیستند. با فرض آن‌که تجزیه کل سنگ معرف ترکیب ماگما و سنگ مادر سازنده گرانیتوئیدها باشد، پرآلومینه (A/CNK) سنگ مادر(آنالیز کل سنگ) در مقابل پرآلومینه(A/CNK) کانی بیوتیت برای ٦ نمونه که علاوه بر تجزیه کانی بیوتیت، تجزیه کل سنگ آن‌ها نیز به روش XRF انجام شده است در شکل ٦ نشان داده شده است. در این نمودار، اکثر نمونه‌ها در بالای خط ١:١ قرار می‌گیرند و این موید جذب قسمت اعظم آلومینیم در شبکه بیوتیت‌ها

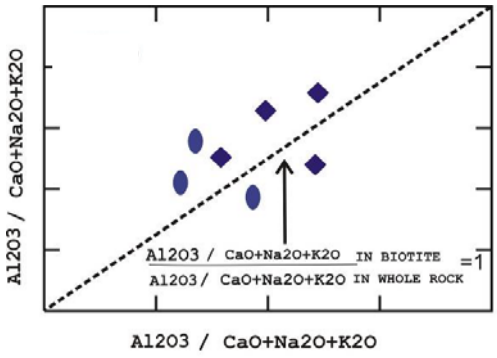
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

است. به علاوه انطباق مثبتی بین A/CNK بیوتیت وA/CNK سنگ مادر برای گرانیتوئیدهای قدیمی وجود دارد و این می‌تواند گویای شکل‌گیری این واحدها از یک والد پرآلومین باشد[۱۱].



شکل۵. تعیین سری ماگمایی گرانیتوئیدهای بررسی شده بر اساس ترکیب شیمیایی بیوتیت[۳]. گرانیتوئیدهای جوان با دایره و گرانیتوئیدهای قدیمی با لوزی نشان داده شده‌اند. بیوتیت در محدوده A گرانیتوئیدهای با منشأ ماگمای آلکالن محیط غیر کوه‌زایی و شاخص گرانیت‌های نوع A است. بیوتیت‌ها درمحدوده C نشان دهنده گرانیتوئیدهای با منشا ماگمای کالک آلکالن در محیط کوهزایی مرتبط با فرورانش و شاخص گرانیت‌های نوع I است. بیوتیت‌ها در محدوده P گرانیتوئیدهای با منشأ ماگمای پرآلومین در محیط کوه‌زایی برخوردی و شاخص گرانیتوئیدهای نوع S است.

در بعضی از نمونه‌های کوارتزدیوریت به جای انطباق مثبت یک انطباق منفی در این نمودار بین درجه پرآلومینیم بیوتیت و سنگ میزبان دیده می‌شود. در این نمونه‌ها آمفیبول جاذب دیگر آلومینیم است. افزایش مقدار پرآلومینه کانی در پرآلومینه ثابت سنگ مادر در نمونه بیوتیت‌های واحد مونزوگرانیت و گرانودیوریت‌های جوان نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها ترکیب بیوتیت از قطب سیدروفیلیت فاصله می‌گیرد و این مؤید شکل‌گیری این واحد گرانیتوئیدی از یک والد ماگمایی (نوع I) است[۱۱].



شکل۶. درجه اشباع از آلومینیوم بیوتیت در برابر تجزیه کل سنگ میزبان بیوتیت[۱۱]. گرانیتوئیدهای جوان با دایره و گرانیتوئیدهای قدیمی با لوزی نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

میزان اکسیداسیون و فوگاسیته اکسیژن ماگما

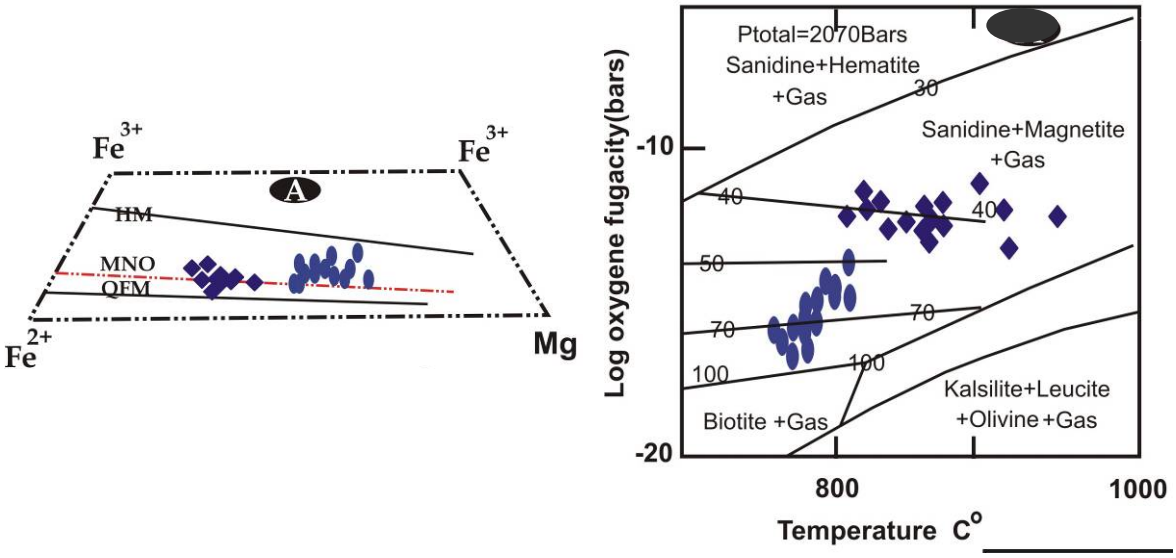
ایشیهارا[۱۰] از نظر میزان اکسیداسیون(احیا) ماگما را به دو قطب اکسیدی و احیایی تقسیم کرد. به عقیده وی ماگماهای اکسیدی در ترکیب کانی‌شناسی خود هماتیت و مگنتیت دارند و انواع احیایی در ترکیب کانی‌شناسی خود ایلمنیت دارند به همین دلیل ایشیهارا[۱۰] این کانی‌ها را در بررسی محیط ماگمایی و تشخیص منشأ آذرین و یا رسوبی ماگمای مادر سنگ‌های گرانیتوئیدی به کار برد. باندازه‌گیری نسبت Fe_2O_3/FeO یک سنگ آذرین می‌توان دریافت که به کدام گروه متعلق است ولی از آنجا که این نسبت به هوازدگی سنگ حساس است کاربرد آن باید با احتیاط لازم صورت گیرد در غیر این صورت می‌تواند نتایج گمراه کننده‌ای داشته باشد.

ونز و اگستر[۱۷] برای رفع این خطا از بیوتیت استفاده کردند. آن‌ها با فرض بر این‌که به‌جز Mg و Fe جانشین دیگری بر تعادل بیوتیت در خط اتصال(محلول جامد) بیوتیت - فلوگوپیت موثر نیست، فوگاسیته اکسیژن را یک متغیر فوق‌العاده وابسته به تشکیل و در نتیجه ترکیب بیوتیت برآورد کردند. ونز و اگستر[۱۷] بر اساس مقدار Fe/Fe+Mg دو روند متضاد اکسیداسیونی و احیایی را در فوگاسیته اکسیژن و دمای تشکیل باتولیت سیرا نوادا تشخیص دادند. در روند اکسیداسیونی، بیوتیت به صورت افزاینده‌ای با کاهش دما(با پیشرفت تبلور) از نظر منیزیوم غنی می‌شود و در روند احیایی یا کاهنده ، بیوتیت به صورت افزاینده‌ای از Fe غنی می‌شود.

روند کیفی فوگاسیته اکسیژن را میتوان از مقدار Fe/Fe+Mg بیوتیت با استفاده از منحنی کالیبره ونز و اگستر [۱۷] که بر اساس دو پارامتر $f(O_2) - T$ از تعادل مگنتیت، فلدسپات پتاسیم و بیوتیت به دست آمده است برآورد کرد این سه فاز در سنگ‌های منطقه بررسی شده نیز وجود دارند. در این نمودار با فرض این که دمای تبلور برای گرانیت‌ها ۷۵۰ تا ۹۰۰ درجه سیلیسیوس است، فوگاسیته اکسیژن بین $۱۰^{-۱۰}$ تا $۱۰^{-۱۷}$ بار تخمین زده شده است(شکل۷ الف). گرانیتوئیدهای جوان و قدیمی کمپلکس بروجرد در این نمودار از یک‌دیگر متمایز و انواع جوان فوگاسیته کم‌تری نشان می‌دهند(شکل۷ الف).

در نمودار Fe^{2+} - Fe^{3+} - Mg ونز و اگستر[۱۷] نیز تفاوت گرانیتوئیدهای قدیمی و جوان دیده می‌شود. گرانیتوئیدهای قدیمی بالای بافر(MNO) و یا نیکل- اکسید نیکل و گرانیتوئیدهای جوان به صورت بسیار جزئی، اما قابل ملاحظه بین بافر(MNO) و (HM) بافر مگنتیت-هماتیت قرار گرفته‌اند. انواع جوان نسبت به گرانیتوئیدهای قدیمی با کاهش شاخص انجماد در فوگاسیته اکسیژن بیش‌تری تشکیل شده و با توجه به روند نمونه‌ها، فوگاسیته اکسیژن با پیش‌رفت تبلور افزایش یافته است(شکل۷ ب).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل۷. الف) نمودار تغییرات فوگاسیته اکسیژن در مقابل دما بر حسب درجه سیلیسیوس اقتباس از ونز و اگستر [۱۷]. پایداری بیوتیت‌ها با مقادیر Fe/Fe+Mg تابعی از فوگاسیته اکسیژن و دما در فشار کلی ۲۰۸۰ بار است. ب) نشان دهنده نمودار سه تایی Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg به منظور تعیین فوگاسیته اکسیژن اقتباس از ونر و اگستر [۱۷] است

نتیجه گیری

بر اساس بررسی کانی بیوتیت گرانیتوئیدهای قدیمی با سن حدود ۱۲۰ میلیون سال و گرانیتوئیدهای جوان با سن بین ٦٠-٧٠ میلیون سال در کمپلکس بروجرد، خصوصیات متفاوتی نشان داده‌اند و به خوبی از یکدیگر متمایز می‌شوند. بر اساس مقادیر کاتیونی Mg, Mn, Fe^{2+}, Fe^{2+}, Ti و Al بیوتیت‌های توده‌های نفوذی واحدهای جوان بروجرد دارای منیزیم بیش‌تری در ترکیب خود نسبت به بیوتیت‌های سنگ‌های قدیمی است.

با توجه به میزان Al و نسبت Fe/(Fe+Mg) بیوتیت‌های گرانیتوئیدهای قدیمی بین دو قطب آنیت و فلوگوپیت قرار گرفته‌اند و بیوتیت‌های متعلق به گرانودیوریت و کوارتزدیوریت‌های جوان بین دو قطب آنیت و سیدروفیلیت با روندی به سمت قطب سیدروفیلیت قرار می‌گیرد.

بر اساس ترکیب بیوتیت‌ها، گرانیتوئیدهای جوان و قدیمی کمپلکس بروجرد عمدتاً در محدوده مربوط به گرانیتوئیدهای کالک آلکالن قرار می‌گیرند و به ترتیب نوع I و نوع S هستند که در فوگاسیته اکسیژن متفاوتی شکل گرفته‌اند.

در طی این تحقیق مشخص شد که نتایج تجزیه بیوتیت به هر دو روش XRF و EPMA نتایج تقریباً مشابهی نشان دادند. از آنجا که روش XRF روشی است که دسترسی به آن آسان‌تر است می‌توان انتظار داشت که با توجه به نتایج بدست آمده برای گرانیتوئیدهای کمپلکس بروجرد، کانی بیوتیت به عنوان کلیدی در بررسی نوع ماگما و ژئوشیمی گرانیتوئیدها در سطحی گسترده به کار رود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

تشکر و قدردانی

از آقای دکتر امیر علی طباخ شعبانی برای راهنمایی‌های ارزنده در این تحقیق صمیمانه تشکر می‌شود. این تحقیق با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت معلم انجام شده است.

منابع

۱. رادفر، ج.، بررسی‌های زمین شناسی و پترولوژی سنگ‌های گرانیتوئیدی ناحیه آستانه- گوشه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳٦٦).

۲. -معظمی گودرزی، ف.، کاربرد ترکیب شیمیایی بیوتیت در تعیین جایگاه تکتونیکی گرانیتوئیدهای بروجرد- همدان (شمال غرب زون سنندج-سیرجان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم(۱۳۸۵).

3. A.M. Abdel-Rahman, *Nature of biotites from alkaline, Calc-alkaline and peraluminous magmas.* J. Petrol., 35(1994) 525-541.

4. C.A.R. Albuquerque, Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal. Geochim. Cosmochim. Acta, 37(1973) 1779-1802.

5. M. Ben Ohoud, Discrimination between Primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites. Publhshed by Elsevier SAS(2005).

6. F. Berthier, H.P. Billiaul, B. Halbroronn, and P. Marizot, Etude Stratigraphique, petrologique et stractural de La region de khorramabad (Zagros, Iran)- These De 3e cycle, Grenoble(1974) 282.

7. W.A. Deer, A. Howie and J. Zussman, *An interduction to the rock – forming minerals,* 17th ed., Longman Ltd (1986*)* 528.

8. H.J. Forster, and G. Tischendorf, Reconstruction of the volatile characteristics of granitoidic magmas and hydrothermal solutions on the basis of dark micas: the Hercynian postkinematic granites and associated high-temperature mineralizations of the Erzgebirge (G.D.R). Chemie der Erade (Geochemistry) 49(1989) 7-20.

9. A.J. Hall, *The crystallization of intermediate and acid magmas of Ben Nevis,* Scotland. J. Petrol., 90(1941) 84-104.

10. S. Ishihara, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks: Mining Geology, 27, (1977) 293-305.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

11. A. Lalonde, and P. Bernard, *Composition and colour of Biotite from granits*. Can. Mineral., 31 (1993) 203-217.

12. F. Masoudi, *Contact Metamorphism and pegmatite development in the region SW of Arak-Iran PhD thesis.* The university of Leeds. Department of Earth Sciences(1997*)*.

13. F. Masoudi, B.W.D. Yardley, and R.A. Cliff, Rb-Sr geochronology of pegmatites, plutonic rocks and a hornfels in the region south-west of Arak, Iran. J. Sci., 13(3) (2002) 249-254.

14. H. Nachit, N. Razafimahefa, J.M. Stussl, and J.P. Carron, *Composition Chimique des biotites et typology magmatique des granitoides.* C.R. Acad. Sci., Ser. II, 301 (1986) 813-818.

15. H. Nachit, A. Ibhi, H. Abia, M. Ben Ohoud, *Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites and neoformed biotites.* C.R. Geoscience 337(2005) 1415-1420.

16. J.A. Speer, *Micas in igneous rocks. In Micas (S.W.Bailey,ed).* Rev. Mineral. 13, 299-356. Mineral. Soc. Amer(1984).

17. D.R. Wones and H.P. Eugster, *Stability of biotite experiment, theory, and application.* Am. Mineral. 50(1965) 1228-1272.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]