

مطالعه پتروگرافی، پترولوژی، شیمی کانی و پتروژنز آمفیبولیت‌های منطقه بهرام گور، شمال باختر معدن گل گهر سیرجان - کرمان

حدیثه رحیمی صادق^۱، سیدحسام‌الدین معین‌زاده^{۲*} و محسن مؤذن^۳

^۱دانشجوی دکترا، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲دانشیار، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳استاد، بخش علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲

چکیده

منطقه مورد مطالعه بخشی از پهنه سنندج- سیرجان است که به‌طور عمده از سنگ‌های دگرگونی تشکیل شده و دارای سنگ‌های متنوعی با منشأ آذرین بازیگ و رسوبی نیز است. سنگ‌های دگرگونی منطقه مورد مطالعه (باختر خیرآباد و شمال معدن گل گهر سیرجان، استان کرمان) را اسلیت، فیلیت، شیست (گارنت شیست، آمفیبول شیست، میکاشیست، کیانیت شیست)، اپیدوت آمفیبولیت، آمفیبولیت، گنیس، کوارتزیت و مرمر تشکیل می‌دهند. بالاترین درجه دگرگونی سنگ‌های منطقه مربوطه به رخساره آمفیبولیت است. براساس داده‌های ژئوشیمیایی منشأ آمفیبولیت‌ها سنگ‌های آذرین بازی و ترکیب شیمیایی آنها کالک آلکان است. طبق نمودار Ti در مقابل V و نمودار سه تایی Nb-Zr-Y، آمفیبولیت‌های منطقه متعلق به محیط‌های تکتونیکی پشته‌های میان اقیانوسی (MOR) و محیط‌های پشت قوسی (BAB) در ارتباط با اقیانوس نئوتتیس هستند. با بررسی شیمی کانی، آمفیبول‌ها در گروه آمفیبول‌های کلسیک قرار می‌گیرند. متوسط درجه حرارت تشکیل آمفیبول‌ها ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد و حداکثر فشار ۷/۵ کیلوپا است. گرادیان حرارتی ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر یک جایگاه پوسته قاره‌ای برای دگرگونی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: پهنه سنندج- سیرجان، رخساره آمفیبولیت، پشته‌های میان اقیانوسی، شیمی کانی، پوسته قاره‌ای

*نویسنده مسئول: سیدحسام‌الدین معین‌زاده

E-mail: hmoeinzadeh@uk.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

زون سنندج- سیرجان یکی از واحدهای مهم ژئوتکتونیکی ایران است که به صورت نوار طویل دگرگون شده‌ای در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس از ارومیه و سنندج در شمال باختر تا سیرجان و اسفندقه در جنوب خاور کشیده شده است. این زون روند ESE-WNW دارد و از طرف جنوب با گسل اصلی زاگرس و در سمت شمال به کمربند ولکانیکی ارومیه-دختر محدود می‌شود. جهت و امتداد کلی پهنه سنندج- سیرجان و گسترش کم آتشفشان‌های ترشیری در این منطقه از زون زاگرس پیروی می‌کند. ولی اختصاصات ساختمانی و رسوب‌گذاری آن مشابه ایران مرکزی است (Dimitrijevic, 1973).

واحدهای سنگی عمده در این زون شامل سنگ‌های دگرگونی به شدت تکتونیزه شده پرکامبرین- پالئوزویک، افیولیت‌های اواخر کرتاسه، سنگ‌های آهکی و چرت‌های رادیولاریت‌ها کرتاسه- ترشیری، ولکانیک‌های آندزیتی ژوراسیک و کنگومرای کرتاسه است (Mohajjel et al., 2003). توسعه و تغییرات تکتونیکی سنندج- سیرجان با گسترش و باز شدن یکی از بازوهای ریفتی دریای تیس در پرمین آغاز شده است. ساختارها و تشکیلات اصلی و مهم زون سنندج- سیرجان در طی سه رویداد مهم، فروانش شمال خاور صفحه عربستان به زیر صفحه ایران مرکزی، تشکیل افیولیت ملانژهای کمربند سنندج- سیرجان و در نهایت برخورد قاره‌ای بین دو صفحه ذکر شده در میوسن به وجود آمده‌اند.

منطقه مورد مطالعه در ۵۰ کیلومتری جنوب باختر سیرجان (استان کرمان) و ۲۰ کیلومتری شمال خاور قزوئیه (استان فارس) و با وسعت بیش از ۱۵۰ کیلومتر مربع با مختصات جغرافیایی بین ۵۰° ۵۴' ۱۸" و ۵۵° ۵۵' ۲۸" و ۲۹° ۱۲' عرض شمالی در لبه خاوری زون سنندج- سیرجان واقع شده است. از لحاظ زمین‌شناسی و ساختمانی طبق تقسیم‌بندی (Dimitrijevic, 1973)، این منطقه در کمربند سیرجان واقع شده است.

مهم‌ترین سنگ‌های منطقه مورد مطالعه شامل سنگ‌های دگرگونی درجه ضعیف فیلیت، اسلیت، شیست‌های سبز و سنگ‌هایی با درجه دگرگونی بالاتر از جمله گارنت شیست، کیانیت شیست و آمفیبولیت هستند، همچنین یک سری توده‌های

متابازالتی و توالی‌های ضخیم از آهک‌ها و دولومیت‌های دگرگون شده به وسعت زیاد در منطقه مورد مطالعه وجود دارند.

با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه واقع در ضلع غربی کفه نمکی سیرجان تا به حال مطالعات جامعی صورت نگرفته است، هدف از این تحقیق بررسی مراحل تکامل دگرگونی، ماهیت اولیه سنگ‌های آمفیبولیت منطقه و محیط تکتونیکی سنگ مادر آنهاست.

۲- مطالعات صحرایی

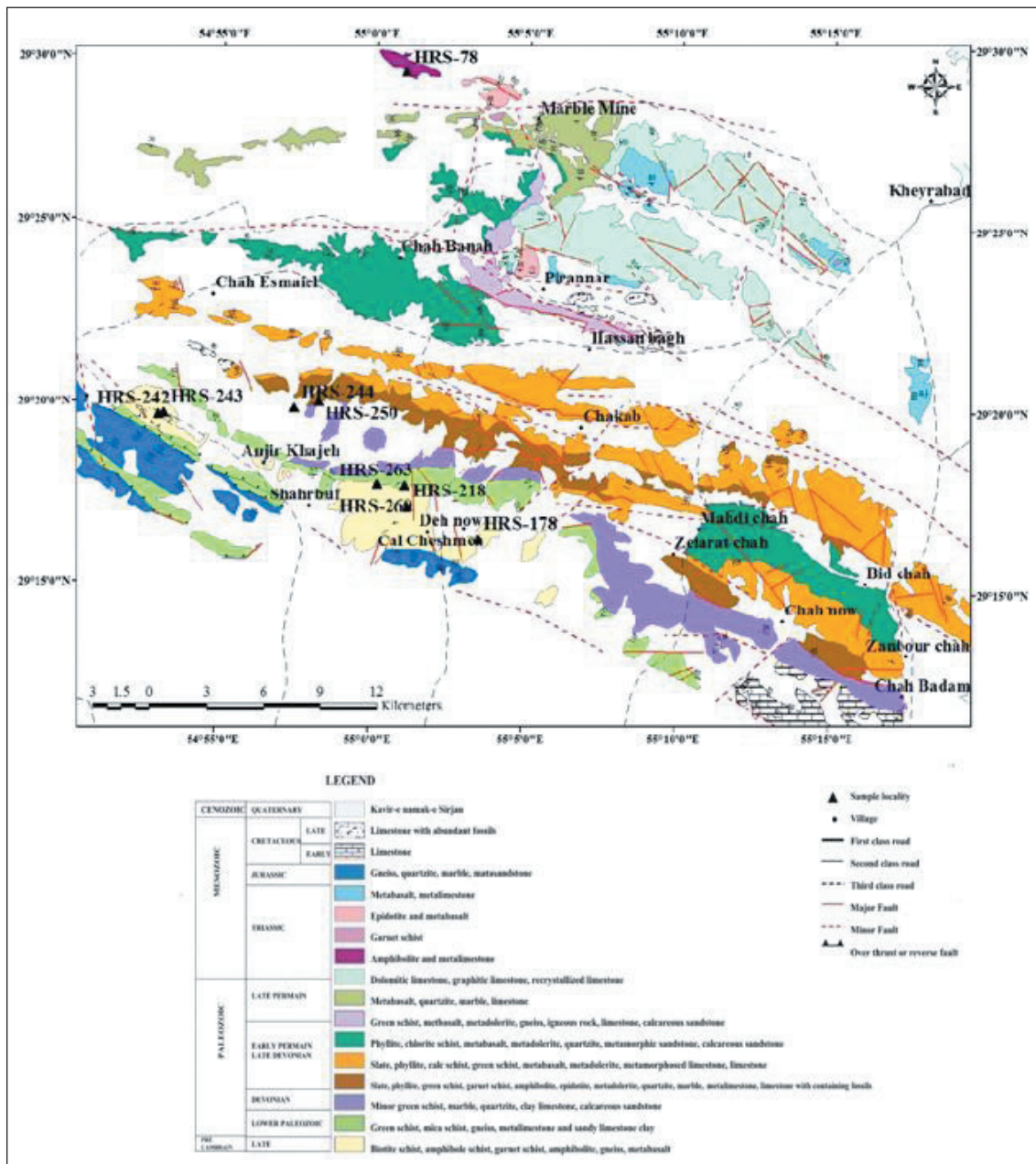
سنگ‌های منطقه مورد مطالعه که عمدتاً دگرگون و دگرشکل شده‌اند، شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی با منشأ آذرین و رسوبی هستند. قدیمی‌ترین این واحد‌های سنگی مربوط به اوایل پالئوزویک (Mohajjel et al., 2003) شامل آمفیبولیت، بیوتیت آمفیبولیت، گارنت کیانیت شیست، آمفیبول شیست، بیوتیت شیست، سبز، گنیس، متابازالت و آهک دگرگون یافته است که این واحدها به نام کمپلکس گل گهر معرفی (سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۷۶) و توسط واحدهای جدیدتر شامل تناوبی از سنگ‌های مرمر، کوارتزیت و سنگ‌های دگرگون نشده از جمله گل سنگ آهکی و ماسه سنگ آهکی پوشیده شده‌اند.

برخی سنگ‌های آذرین بازی در رخساره متوسط آمفیبولیت دگرگون شده و سنگ‌های آمفیبولیت به وجود آمده‌اند و برخی دیگر در رخساره پایین شیست سبز دگرگون شده‌اند که ساخت و بافت اولیه خود را حفظ کرده‌اند و در حد متابازیت دگرگون شده‌اند. آمفیبولیت‌های منطقه غرب کویرنمکی سیرجان به طور گسترده در سه قسمت از کل منطقه در کمپلکس گل گهر پراکنده شده‌اند (شکل ۱):

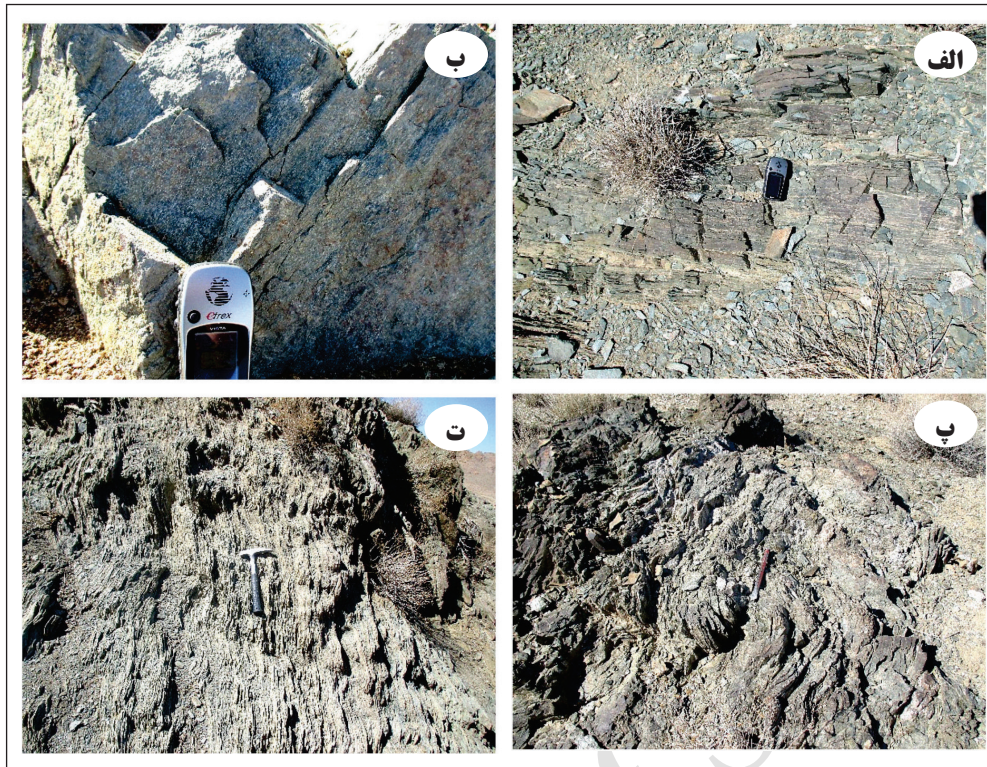
۱) قسمت مرکزی؛ ۲) قسمت جنوب؛ ۳) قسمت جنوب باختری. آمفیبولیت‌های منطقه باختر خیرآباد سیرجان در نمونه دستی به رنگ سبز تیره هستند و به دو صورت جهت یافته و توده‌ای مشاهده می‌شوند. در آمفیبولیت‌های توده‌ای کانی‌های آمفیبول سبز رنگ و پلاژیوکلازهای سفیدرنگ قابل مشاهده هستند (شکل ۲- الف و ب). آمفیبولیت‌های جهت یافته، برگ‌وارگی و خط‌وارگی

آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه بیشتر با سنگ‌های متابازیت، شیست و گنیس همجوار هستند و روی آنها را آهک پوشانده است. آمفیبولیت‌ها دارای ضخامت ۲۰ متر و اکثراً امتداد N50E و شیب 35NW هستند. مرز بین این سنگ‌ها به دلیل عملکرد تکنونیک در منطقه گسله و خرد شده است. گسل‌های منطقه اکثراً دارای روند شمال باختر - جنوب خاور و شمالی - جنوبی هستند.

از خود نشان می‌دهند که به دلیل جهت یافتگی کانی‌های کشیده از جمله آمفیبول است و در اثر نیروهای تکنونیک فعال در طول زون برشی محلی در منطقه چین خورده‌اند. در این حالت آمفیبولیت‌ها شامل لایه‌های موازی روشن و تیره هستند که چین خوردگی ناهماهنگ یا غیرمتجانس نشان می‌دهند (شکل‌های ۲- پ و ت).



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه با موقعیت نمونه‌های آمفیبولیت برداشت شده ترسیم شده براساس برداشت صحرایی و عکس‌های ماهواره‌ای (برگرفته از سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۷۶).



شکل ۲- تصاویر صحرایی از آمفیبولیت‌های خیرآباد سیرجان: الف و ب) آمفیبولیت توده‌ای منطقه مورد مطالعه که کانی‌های آمفیبول به رنگ سبز تیره و پلاژیوکلاز به رنگ سفید مشخص هستند؛ پ و ت) آمفیبولیت‌های جهت یافته، با چین خوردگی غیرمتجانس؛ لایه‌های چین خورده ضخامت متفاوت دارند که به صورت دوشاخه چین خورده‌اند.

۳- پتروگرافی آمفیبولیت‌ها

هورنبلند و پلاژیوکلاز و فاقد کوارتز هستند. انواع اصلی اورتو آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه آمفیبولیت، اپیدوت آمفیبولیت و بیوتیت آمفیبولیت هستند (جدول ۱).

بر اساس شواهد میکروسکوپی، آمفیبولیت‌ها از نوع اورتو آمفیبولیت هستند. در نمونه دستی تیره رنگ و در زیر میکروسکوپ شامل کانی‌های هورنبلند + پلاژیوکلاز ± اپیدوت ± بیوتیت ± تیتانیت ± روتیل هستند. اورتو آمفیبولیت‌ها حاوی مقدار زیادی

جدول ۱- کانی‌شناسی نمونه‌های آمفیبولیت منطقه مورد مطالعه.

Sample	Latitude & Longitude	QTZ	Bt	Pl	Fsp	Chl	Cal	Am	Brs	Act	Tr	Ep	Ser	Tur	Ttn	Rt	Op	Rock Type
HRS-218	55° 01' 09" - 29° 17' 10"	O	X	X		Xret		X									O	Biotite Amphibolite
HRS-78	55° 00' 53" - 29° 32' 34"	X		X	O	Xret		X				X	Xret				O	Epidote Amphibolite
HRS-178	55° 03' 29" - 29° 16' 18"	X		X	O	Xret		X				X	Xret				O	Epidote Amphibolite
HRS-244	54° 57' 26" - 29° 19' 50"	X			X	Xret	O	X				X	Xret				O	Epidote Amphibolite
HRS-222	55° 00' 09" - 29° 17' 47"	O		X				X					Xret		O	O	O	Amphibolite
HRS-242	54° 53' 01" - 29° 19' 37"	O		X				X				O	Xret		O		O	Amphibolite
HRS-243	54° 53' 11" - 29° 19' 39"	O		X		Xret		X	X				Xret		O		O	Amphibolite
HRS-250	55° 00' 06" - 29° 17' 30"	O		X				X					Xret		O	O	O	Amphibolite
HRS-255	55° 01' 02" - 29° 17' 43"	O		X	O	Xret	O	X		O	O	O		O	O		O	Amphibolite
HRS-260	54° 53' 00" - 29° 19' 30"	O		X		Xret		X	X				Xret		O		O	Amphibolite
HRS-263	55° 01' 07" - 29° 17' 44"	O		X	O	Xret		X		O	O	O	Xret		O		O	Amphibolite

X: Major Mineral, O: Minor Mineral, Xr: Relict Mineral, Xret: Retrograde Product, X(Incl): Inclusion
 I: Syn tectonic Mineral, I: Post tectonic Mineral
 Mineral abbreviations after J. Siivola & R. Schmid (2007)

۳-۱. آمفیبولیت

در آمفیبولیت‌های حاصل از سنگ مادر آذرین بازی، پورفایروبلاست‌های آمفیبول به صورت تیغه‌ای و منشوری نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار به رنگ سبز-قهوه‌ای در زمینه‌ای از پلاژیوکلازهای دگرسان یافته و سرسیتی شده، در هم قفل شده و بافت گرانوبلاستیک ایجاد کرده‌اند (شکل ۳-الف).

گردهمایی کانی‌ها در آمفیبولیت‌های حاصل از سنگ مادر آذرین، هورنبلند ($\approx 50\%$)، پلاژیوکلاز ($\approx 40\%$)، کانی‌های فرعی از جمله تیتانیت، روتیل و کانی‌های اوپاک ($\approx 10\%$) هستند. تیتانیت به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل است که دور اکسید آهن را گرفته‌اند. همچنین بقایای روتیل مشاهده می‌شود که احتمالاً در هنگام بالا آمدن و کاهش فشار تبدیل به تیتانیت شده‌اند (شکل ۳-الف).

۳-۲. اپیدوت آمفیبولیت

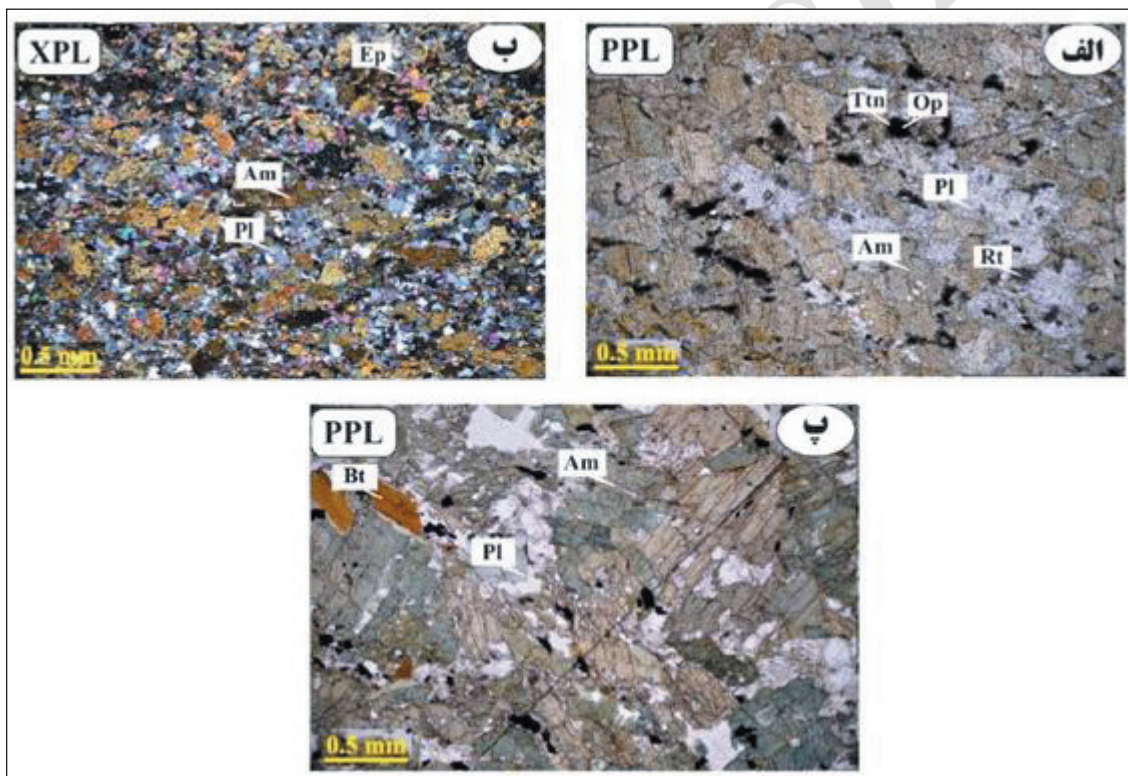
اپیدوت آمفیبولیت از هورنبلند ($\approx 40\%$)، پلاژیوکلاز ($\approx 30\%$)، اپیدوت ($\approx 20\%$)

و کوارتز و کانی‌های اوپاک ($\approx 10\%$) تشکیل شده است. اپیدوت از نوع پیستاسیت بوده و بیشتر در بخش روشن سنگ (غنی در پلاژیوکلاز) تمرکز یافته است. پلاژیوکلاز بافت گرانوبلاستیک دارد در حالی که آمفیبول‌ها بافت نماتوبلاستیک از خود نشان می‌دهند. داخل پورفایروبلاست‌های پلاژیوکلاز می‌توان اینکلوژن‌هایی از آمفیبول و اپیدوت را دید (شکل ۳-ب).

اپیدوت آمفیبولیت‌ها از دگرگونی سنگ‌های آذرین حدواسط در حد دیوریت در زیر رخساره اپیدوت-آمفیبولیت به وجود آمده‌اند.

۳-۳. بیوتیت آمفیبولیت

بیوتیت آمفیبولیت‌ها کانی‌های اصلی هورنبلند ($\approx 50\%$)، پلاژیوکلاز ($\approx 30\%$)، بیوتیت ($\approx 15\%$) و کانی‌های اوپاک ($\approx 5\%$) هستند. بیوتیت‌ها به رنگ قهوه‌ای با یک جهت رخ واضح در میان آمفیبول‌های کشیده به رنگ سبز-قهوه‌ای و سبز-آبی و پلاژیوکلازهای دگرسان یافته، مشاهده می‌شوند (شکل ۳-پ).



شکل ۳-الف) اورتوآمفیبولیت‌های حاصل از سنگ مادر آذرین بازی، آمفیبول‌های سبز-قهوه‌ای درشت و نیمه‌شکل تا شکل‌دار، قفل شده در میان پلاژیوکلازهای دگرسان یافته و سرسیتی شده که بافت گرانوبلاستیک تشکیل شده و تیتانیت به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل دور اکسید آهن در آمفیبولیت؛ (ب) اپیدوت‌های نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار در میان آمفیبول‌های کشیده و پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند (پ) بیوتیت آمفیبولیت حاوی بیوتیت به رنگ قهوه‌ای با یک جهت رخ واضح در میان آمفیبول‌های کشیده و پلاژیوکلازهای دگرسان یافته با بافت گرانوبلاستیک.

۴-شیمی کانی

انجام شد. نتایج آنالیز تعدادی از آمفیبول‌های موجود در ۴ نمونه آمفیبولیت در جدول ۲ آورده شده است. فرمول ساختاری آمفیبول‌ها بر مبنای ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه شد.

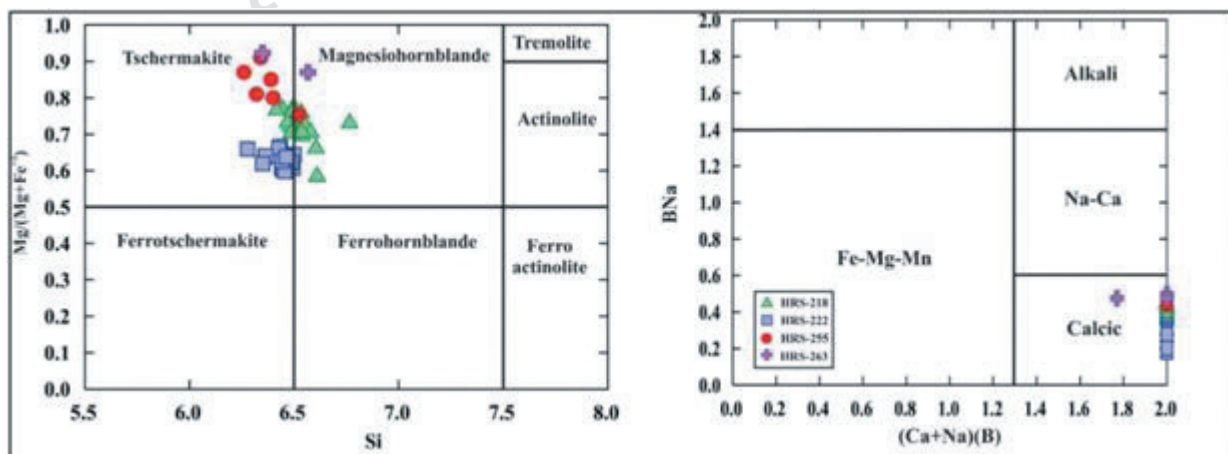
آنالیز شیمی کانی آمفیبول‌ها بوسیله دستگاه الکترون میکروپروپ JEOL JXA-8900 الکترونیک (EPMA) در آزمایشگاه EMS دانشگاه یاماگاتا ژاپن با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلو ولت، جریان پرتو ۲۰ نانومتر و قطر پرتو در حدود ۵ میکرومتر

جدول ۲- نتایج آنالیز EPMA آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه مورد مطالعه، محاسبه کاتیون‌ها بر اساس ۲۳ اکسیژن.

Mineral	Amphibole																											
	HRS-218					HRS-222					HRS-255					HRS-263												
Sample																												
SiO ₂	45.10	45.57	45.10	45.84	45.53	45.66	45.22	44.99	45.61	45.94	45.63	45.96	45.03	45.75	44.22	43.00	44.09	44.10	44.99	44.57	44.19	44.87	44.56	44.83	46.72	46.79	45.89	47.17
TiO ₂	0.67	0.63	0.47	0.57	0.64	0.34	0.62	0.55	0.53	0.61	0.56	0.54	0.56	0.66	0.93	0.88	0.75	0.85	0.66	0.80	0.81	0.79	0.79	0.82	0.60	0.47	0.56	0.52
Al ₂ O ₃	12.94	12.54	12.15	13.18	13.18	12.89	13.11	13.24	13.08	12.91	12.55	13.12	13.29	13.70	14.09	14.38	13.92	13.42	13.23	13.36	13.82	13.73	13.40	13.57	14.82	13.29	15.15	14.83
FeO	15.11	15.38	16.55	14.57	14.40	14.65	15.27	15.13	14.30	14.71	14.57	15.04	15.55	14.07	14.35	15.30	14.85	14.15	14.98	14.71	14.24	15.16	15.30	15.57	11.88	12.89	11.39	9.72
MnO	0.36	0.48	0.33	0.37	0.42	0.45	0.45	0.34	0.34	0.39	0.51	0.35	0.30	0.30	0.26	0.23	0.24	0.16	0.20	0.24	0.16	0.22	0.26	0.10	0.39	0.31	0.19	0.24
MgO	11.61	11.32	9.89	11.24	11.08	11.32	11.34	10.81	10.78	11.43	11.39	10.81	11.32	11.07	10.30	10.33	10.22	10.56	10.85	10.66	10.59	10.83	10.68	10.49	12.20	14.15	13.42	13.35
CaO	10.31	10.22	11.06	10.26	10.35	10.63	10.37	10.52	10.96	10.40	10.69	10.51	10.50	10.64	10.69	10.92	11.23	11.53	11.33	11.48	11.19	11.00	11.61	11.05	10.39	8.84	10.13	10.23
Na ₂ O	1.99	2.08	1.91	2.06	2.23	1.71	1.63	1.78	1.59	1.53	1.68	1.46	1.58	1.66	1.86	1.80	1.80	1.72	1.67	1.66	1.82	1.72	1.63	1.67	2.53	1.80	2.15	1.89
K ₂ O	0.30	0.31	0.34	0.28	0.28	0.25	0.33	0.30	0.30	0.29	0.27	0.26	0.29	0.30	0.74	0.74	0.75	0.65	0.59	0.67	0.70	0.67	0.64	0.18	0.21	0.17	0.16	
Cr ₂ O ₃	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09	0.00	0.15	0.06	0.13	0.14	0.02	0.00	0.07	0.02	0.07	0.08	0.02	0.07	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.16	0.11	0.15
Total	98.47	98.60	97.88	98.44	98.19	97.98	98.35	97.80	97.54	98.34	98.00	98.08	98.42	98.22	97.48	97.65	97.93	97.15	98.57	98.14	97.53	98.99	98.93	98.74	99.74	98.92	99.16	98.27
O	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Si	6.43	6.51	6.61	6.54	6.54	6.55	6.45	6.49	6.60	6.54	6.55	6.58	6.42	6.54	6.45	6.28	6.44	6.49	6.50	6.49	6.46	6.43	6.44	6.46	6.52	6.40	6.35	6.57
Ti	0.07	0.07	0.05	0.06	0.07	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.10	0.10	0.08	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.06	0.05	0.06	0.05
Al	2.17	2.11	2.10	2.22	2.23	2.18	2.20	2.25	2.23	2.16	2.12	2.21	2.23	2.31	2.42	2.47	2.40	2.33	2.25	2.29	2.38	2.32	2.28	2.31	2.44	2.14	2.47	2.43
Fe ³⁺	1.06	0.97	0.49	0.82	0.69	0.86	1.09	0.84	0.54	0.98	0.83	0.83	1.12	0.69	0.47	0.71	0.38	0.24	0.52	0.39	0.37	0.66	0.48	0.59	0.56	1.84	1.09	0.72
Fe ²⁺	0.75	0.87	1.54	0.92	1.04	0.89	0.73	0.98	1.19	0.77	0.92	0.97	0.73	0.99	1.29	1.16	1.44	1.50	1.29	1.41	1.37	1.16	1.37	1.29	0.83	-0.37	0.23	0.41
Mn	0.04	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.05	0.04	0.02	0.03
Mg	2.47	2.41	2.16	2.39	2.37	2.42	2.41	2.32	2.33	2.42	2.44	2.30	2.40	2.36	2.24	2.25	2.23	2.32	2.34	2.31	2.31	2.31	2.30	2.25	2.54	2.88	2.77	2.77
Ca	1.58	1.56	1.74	1.57	1.59	1.63	1.58	1.62	1.70	1.58	1.64	1.61	1.60	1.63	1.67	1.71	1.76	1.82	1.75	1.79	1.75	1.69	1.80	1.71	1.55	1.30	1.50	1.52
Na	0.55	0.58	0.54	0.57	0.62	0.48	0.45	0.50	0.45	0.42	0.47	0.41	0.44	0.46	0.53	0.51	0.51	0.49	0.47	0.47	0.52	0.48	0.46	0.47	0.69	0.48	0.58	0.51
K	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.14	0.14	0.14	0.12	0.11	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.03	0.04	0.03	0.03
Cr	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02
Total	15.18	15.19	15.34	15.19	15.26	15.15	15.10	15.18	15.20	15.06	15.16	15.07	15.09	15.14	15.33	15.36	15.41	15.43	15.33	15.38	15.40	15.29	15.38	15.29	15.27	14.81	15.11	15.06
Al(IV)	1.57	1.49	1.39	1.46	1.46	1.45	1.55	1.51	1.40	1.46	1.45	1.42	1.58	1.46	1.55	1.72	1.56	1.51	1.50	1.51	1.54	1.57	1.56	1.54	1.48	1.60	1.65	1.43
Al(VI)	0.61	0.62	0.71	0.76	0.77	0.72	0.65	0.74	0.84	0.70	0.67	0.79	0.65	0.85	0.87	0.75	0.84	0.82	0.75	0.78	0.84	0.76	0.73	0.77	0.96	0.54	0.82	1.00
C	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
B	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.77	2.00	2.00
A	0.18	0.19	0.34	0.19	0.26	0.15	0.10	0.18	0.20	0.06	0.16	0.07	0.09	0.14	0.33	0.36	0.41	0.43	0.33	0.38	0.40	0.29	0.38	0.29	0.27	0.04	0.11	0.06
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.77	0.74	0.58	0.72	0.69	0.73	0.77	0.70	0.66	0.76	0.73	0.70	0.77	0.70	0.64	0.66	0.61	0.61	0.64	0.62	0.63	0.67	0.63	0.64	0.75	1.15	0.92	0.87
Fe ²⁺ /(Mg+Fe ²⁺)	0.23	0.26	0.42	0.28	0.31	0.27	0.23	0.30	0.34	0.24	0.27	0.30	0.23	0.30	0.36	0.34	0.39	0.39	0.36	0.38	0.37	0.33	0.37	0.36	0.25	-0.15	0.08	0.13

است. مقدار Ti موجود در آن‌ها کمتر از ۰/۵ (apfu) است. تمامی این آمفیبول‌ها با توجه به رده بندی (Leake et al. (1997) در گروه آمفیبول‌های کلسیک قرار می‌گیرند و ترکیب شیمیایی آن‌ها در محدوده مگنزیوهورنبلند تا محدوده چرماکیت تغییر می‌کند (شکل ۴).

آمفیبول‌ها دارای گستره Si برابر با ۶/۲۶ تا ۶/۷۶ اتم در واحد فرمولی (apfu) است. مقدار کلسیم موجود در جایگاه B (BCa) بین ۱/۲۹ تا ۱/۸۰ و مقدار سدیم در جایگاه B (BNa) کمتر از ۰/۵ است که با توجه به این مقادیر از نوع آمفیبول‌های کلسیک هستند. نسبت Mg/(Fe²⁺+Mg) در مجموعه آمفیبول‌ها از ۰/۵۸ تا ۱/۱۴ بر نوسان



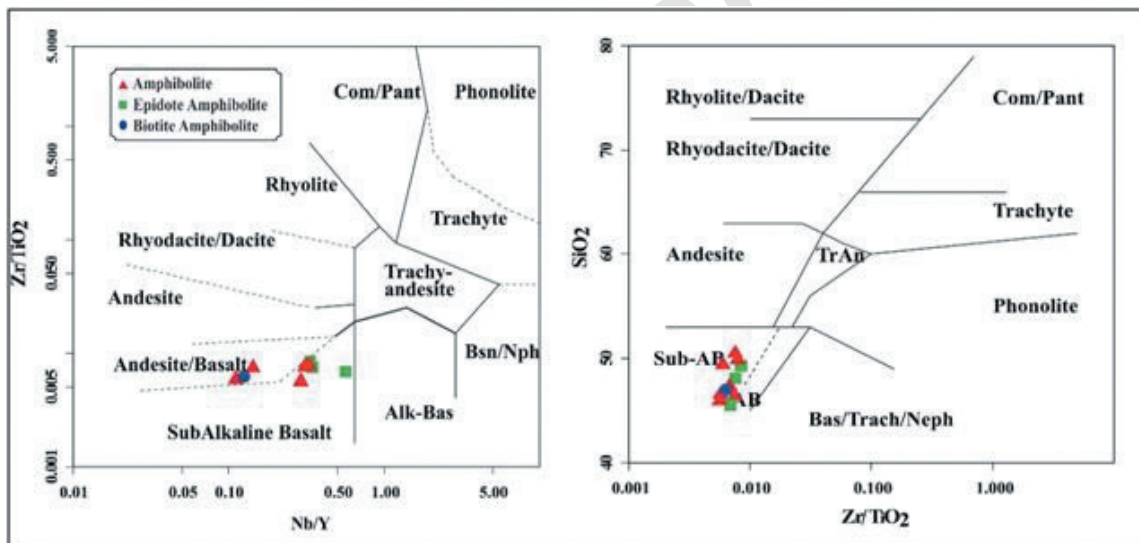
شکل ۴- طبقه بندی آمفیبول‌ها بر پایه ترکیب شیمیایی آنها بر اساس (Leake et al. (1997) در سنگ‌های آمفیبولیت منطقه مورد مطالعه.

۵- پتروژنر آمفیبولیت

شدت میدان بالا و عناصر کمیاب غیرمتحرک هستند (Pearce and Norry, 1979; Wood et al., 1979). بنابراین عناصر غیرمتحرک از جمله REE و عناصر واسطه با شدت میدان بالا (Ti, Zr, Y, Nb, Ta, Hf, Th) می‌توانند برای شناسایی پتروژنر سنگ‌های بازیگ مورد استفاده قرار گیرند.

از آنجا که دگرگونی یک سیستم کاملاً بسته نیست، استفاده از عناصر اصلی و فرعی برای تعیین پروتولیت و محیط تکنونیک با شک همراه خواهد بود، زیرا هوازگی و دگرگونی می‌تواند ترکیب اصلی را تغییر دهد. بر اساس مطالعات (Poller et al., 2001)، (Ahmed Said and Leake, 1997) و (Yihunie et al., 2006) از عناصر غیرمتحرک P, Ti, V, Nb, Ta, Zr, Y, Cr و REE برای مطالعه پروتولیت آمفیبولیت‌های منطقه استفاده شده است. آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه طیف پیوسته‌ای از ترکیب ساب‌آلکالی‌بازالت تا آندزیت‌بازالت در نمودار Nb/Y در مقابل $Zr/(TiO_2 \times 0.0001)$ و در نمودار Zr/TiO_2 در مقابل SiO_2 ترکیب بازالت از خود نشان می‌دهند (Winchester and Floyd, 1976) (شکل ۵).

برای دستیابی به اهداف این تحقیق پس از بررسی شواهد صحرایی، رخنمون‌های مناسب نمونه‌برداری و از آنها مقاطع نازک و نازک صیقلی تهیه شد. ۱۰ نمونه آمفیبولیت با حداقل دگرسانی برای آنالیز سنگ کل انتخاب شدند و در Activation Laboratories Ltd (ACTLABS) در Ontario, Ancaster کانادا با روش تجزیه XRF-ICP/OES-ICP/MS مورد آنالیز قرار گرفتند که مقادیر ۱۰ اکسید اصلی، ۴۵ عنصر فرعی و LOI به دست آمده است. در این روش مقدار مشخصی از پودر سنگ با کمک ذوب لیتیوم‌بورات مخلوط و در دمای بالا ذوب شد. شیشه‌های حاصل از ذوب پس از انحلال در اسید و رقیق‌سازی توسط دستگاه ICP-OES، MS-ICP و XRF مورد تجزیه قرار گرفتند. نمونه‌های آنالیز شده مقدار متوسط LOI (۱/۴-۴۷/۷۷ wt.%)، محتوای نسبتاً بالای CaO (۱۰/۰۹-۱۵/۶۵ wt.%)، Fe_2O_{3total} (۶/۲۴-۱۱/۱۸ wt.%)، محتوای متوسط MgO (۴/۱۶-۱۰/۴۴ wt.%)، TiO_2 (۰/۸۹-۳/۲۳ wt.%)، Al_2O_3 (۱۲/۹۱-۱۷/۶۶ wt.%)، محتوای کم تا متوسط SiO_2 (۴۵/۵۳-۵۰/۵۱ wt.%) و محتوای کم MnO (۰/۱۷-۰/۳۶ wt.%) و P_2O_5 (۰/۰۷-۰/۵ wt.%) را نشان می‌دهند. عناصر با شدت میدان کم، متحرک هستند و در طول دگرسانی تغییر می‌کنند اما در مقابل، عناصر با

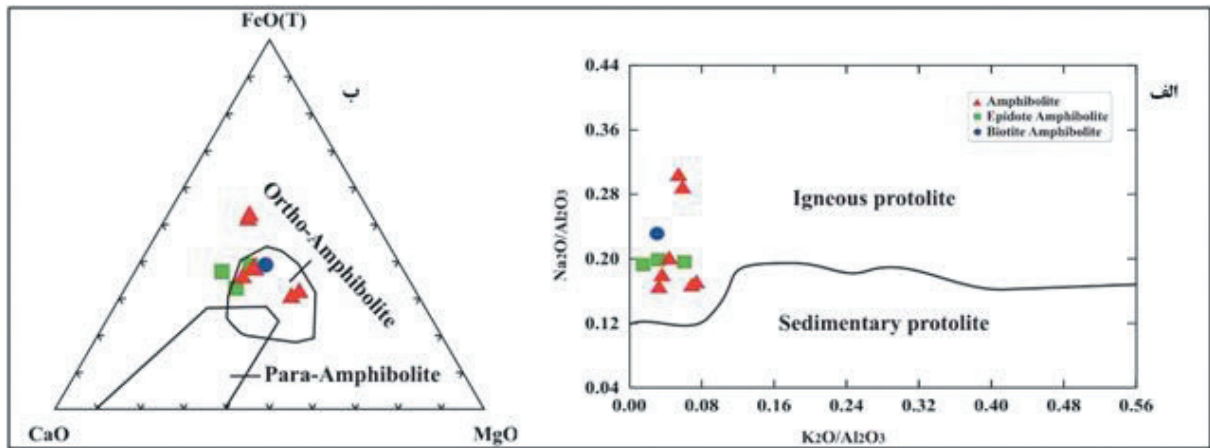


شکل ۵- موقعیت آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه در نمودار ارائه شده توسط (Winchester and Floyd, 1976).

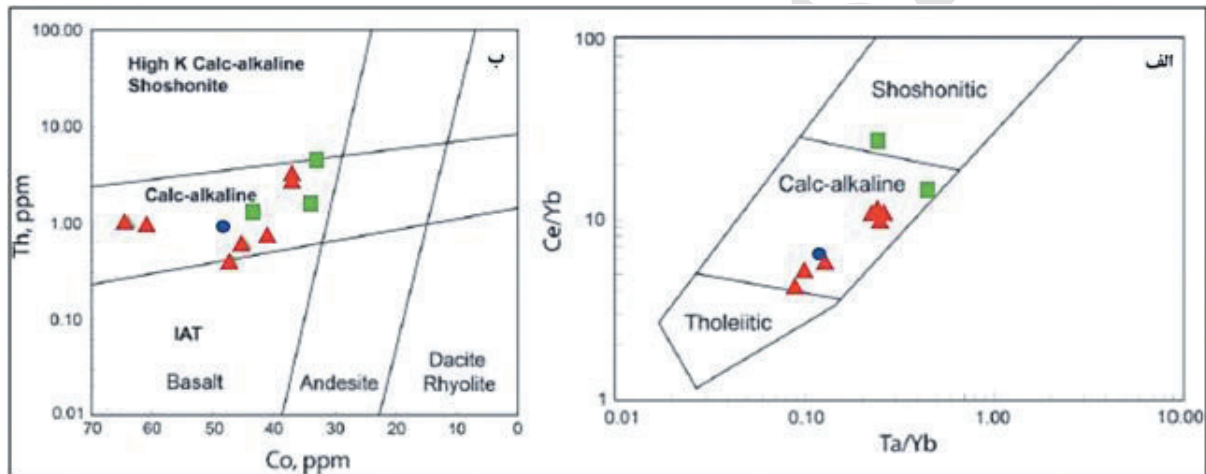
(Pearce, 1983)، طبیعت کالک آلکالن را برای ماگمای اولیه نشان می‌دهند (شکل ۷- الف و ب).

نمودار عناصر غیرمتحرک Nb-Zr-Y نشان می‌دهد که نمونه‌های آمفیبولیت مربوط به MOR و Volcanic Arc هستند (Meschede, 1986) (شکل ۸- الف). پلات Ti در مقابل V نیز نشان می‌دهد که آمفیبولیت‌ها در ارتباط با محیط‌های MORB و BABB هستند (Shrevias, 1982) (شکل ۸- ب).

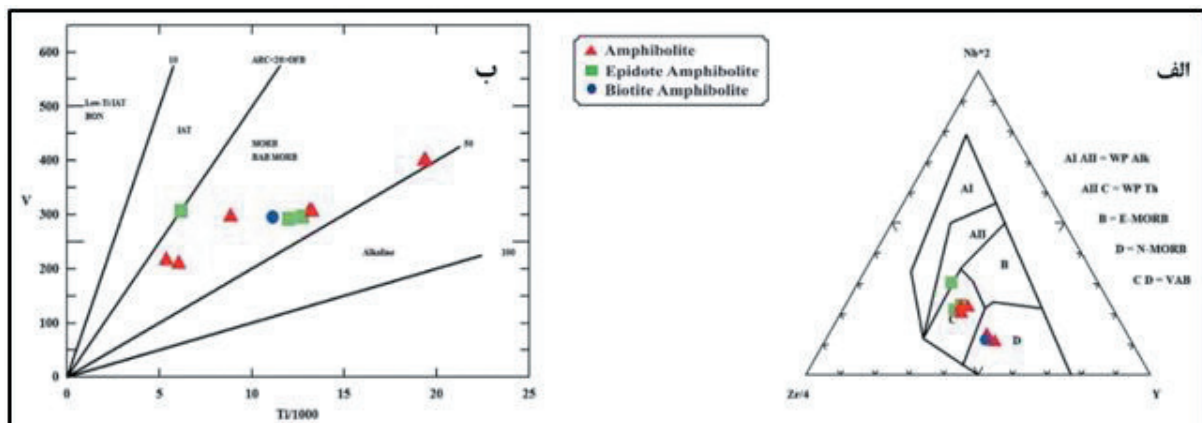
نمونه‌های آمفیبولیت، محتوای Na_2O بالا (۲/۴۴-۳/۹۵ wt.%) در مقایسه با K_2O (۰/۲۱-۱/۱۱ wt.%) دارند. این ویژگی با منشأ آذرین به عنوان پروتولیت برای آمفیبولیت‌ها سازگارتر است (Garrels and Mackenzie, 1971) (شکل ۶- الف). در نمودار سه تایی $FeO(total)$ - CaO - MgO اکثر نمونه‌ها در محدوده اورتوآمفیبولیت ترسیم شده‌اند (Walker et al., 1960) (شکل ۶- ب). نمودار در مقابل Co (Hastie et al., 2007) و نمودار Ce/Yb در مقابل Ta/Yb



شکل ۶- الف) نمودار $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ در مقابل $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Garrels and Mackenzie, 1971) نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه میزان Na_2O بالاتری نسبت به K_2O و پروتولیت آذرین دارند؛ ب) نمودار سه تایی $\text{FeO}(\text{total})\text{-CaO-MgO}$ (Walker et al., 1960)، بیشتر نمونه‌ها در اورتوآمفیبولیت واقع شده‌اند.



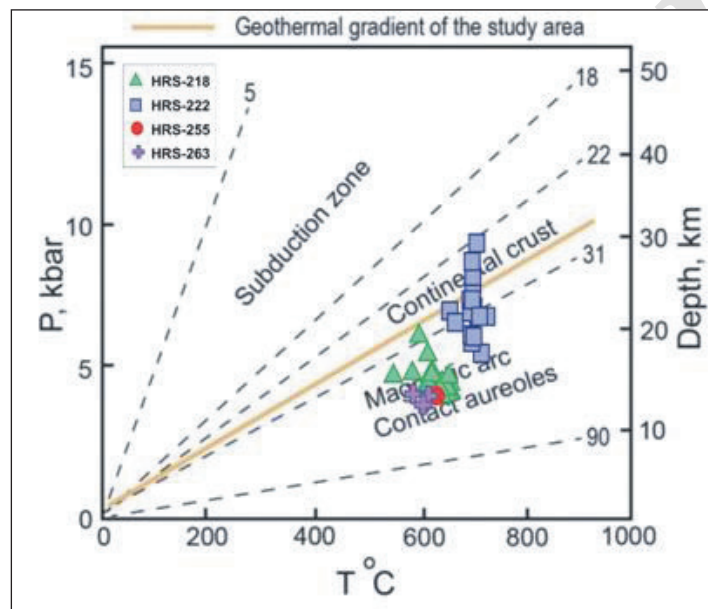
شکل ۷- الف) نمودار Co در مقابل Th (Hastie et al., 2007)؛ ب) نمودار Ta/Yb در مقابل Ce/Yb (Pearce, 1983)، یک طبیعت کالک آلکالن برای ماگمای اولیه را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمودارهای تعیین کننده محیط زمین ساختی سنگ مادر آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه: الف) براساس نمودار Nb-Zr-Y (الف) (Meschede, 1986) و ب) نمودار Ti-V (ب) (Shrevias, 1982)، که محیط تکتونیکی MOR و Volcanic Arc برای آمفیبولیت‌ها نشان می‌دهند.

سانتی گراد برآورد گردید. تخمین فشار در آمفیبولیت‌ها بر اساس مقدار Na در موقعیت B از آمفیبول‌های مورد بررسی در برابر آلومینیوم تتراندرا (Brown (1977)، Liard et al. (1984)، فشارهای ۳ تا ۷/۵ کیلوبار برای سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس میانگین چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای سنگ‌های پوسته فوقانی، یک کیلوبار فشار لیتواستاتیک مطابق با عمق تدفین ۳/۷۵ کیلومتر است. با فرض بیشترین فشار برای سنگ‌های مورد مطالعه (۷/۵ کیلوبار)، در عمق ۲۸ کیلومتر تشکیل شده‌اند. دمای ۷۱۰ درجه سانتی گراد و عمق ۲۸ کیلومتر، گرادیان حرارتی ۲۵ درجه سانتی گراد بر کیلومتر حاصل می‌شود. این گرادیان یک جایگاه پوسته قاره‌ای برای دگرگونی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (Saki et al. 2011) (شکل ۹).

ترموبارومتري برای آمفیبول‌های مورد مطالعه با استفاده از نتایج تجربی Ernst and Liu (1998) نشان‌دهنده دمای ۷۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد است. با استفاده از معادله ترمومتري برای واکنش ادنیت + آلبيت = ریشتریت + آنورتیت، کالیبره شده توسط Holland and Blundy (1994)، Blundy & Holland (1990)، درجه حرارت ۷۴۰-۸۲۰ درجه سانتی گراد به دست آمد. ظاهراً این کالیبراسیون‌ها دما را بیش از حد تعریف می‌کند، زیرا آنها در رخساره‌های گرانولیت هستند، در حالیکه پتروگرافی نمونه‌ها با رخساره‌های آمفیبولیت سازگار است و نشان می‌دهد که کانی‌های رخساره گرانولیت مانند اورتوپیروکسن یا کلینوپیروکسن در سنگ‌ها تشکیل نشده است. با استفاده از Ti در ترمومتري آمفیبول از Colombi (1989)، درجه حرارت‌های ۵۴۸ تا ۷۱۰ درجه سانتی گراد با میانگین حدود ۶۳۰ درجه



شکل ۹- روند دما - فشار برای محیط‌های مختلف دگرگونی و گرادیان حرارتی برای نمونه‌های آمفیبولیت (Saki et al. 2011).

سپاسگزاری

از شرکت زمین پژوه سهند برای ارسال نمونه‌ها به منظور آنالیز شیمیایی به کانادا و از پروفسور کازو ناکاشیما به جهت انجام میکروپروب الکترونی در دانشگاه یاماگاتا ژاپن تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از داوران محترم مجله برای نقطه نظرات سازنده تقدیر می‌شود. از جناب آقای دکتر قرشی، سردبیر محترم و پرسنل محترم فصلنامه برای همه زحماتشان تشکر می‌شود.

۶- نتیجه گیری

آمفیبولیت‌های منطقه باختر خیرآباد و شمال معدن گل گهر سیرجان ترکیب شیمیایی کالک‌آلکان دارند و ماگمای پروتولیت در ارتباط با محیط‌های MORB و BABB تشکیل شده‌اند که نشان می‌دهد در یک محیط فرافروانش جایگزین شده‌اند. با توجه به درجه حرارت ۵۴۸ تا ۷۱۰ درجه سانتی گراد و فشار ۳ تا ۷/۵ کیلوبار، سنگ مادر آمفیبولیت‌ها تا رخساره آمفیبولیت دگرگون شده است. به نظر می‌رسد این دگرگونی به علت بسته شدن حوضه اقیانوسی نئوتیس و برخورد قاره‌ای بعدی صورت گرفته است.

کتابنگاری

سبزه‌ای، م.، اشراقی، س.، روشن‌روان، ج. و سراج، م.، ۱۳۷۶- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهار گوش گل‌گهر، سازمان زمین‌شناسی کشور.

References

- Ahmed-Said, Y. and Leake, B. E., 1997- The petrogenesis of the Edough amphibolites, Annaba, NE Algeria: two unrelated basic magmas and the Iherzolite-harzburgite residue of a possible magma source. – *Mineralogy and Petrology*, 59: 207-237.
- Blundy, J. and Holland, T.J., 1990- Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104, 208–224.
- Brown, E.H., 1977- The crosstie content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism. *Journal of Petrology* 18, 53-72.
- Colombi, A., 1989- Me 'tamorphism et ge 'ochimie des roches mafiques des Alpes ouest-centrales (géoprofil Vie`ge-Domodosso la Locarno). *Mem Geol Lausanne* 4.
- Dimitrijevic, M. D., 1973- Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran, YU/52.
- Ernst, W. & Liu, J., 1998- Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti- contents of calcic amphibole in MORB- A semi-quantitative thermobarometer. *American Mineralogist* 83(9-10), 952-969.
- Garrels, R. M. and Mackenzie, F.T., 1971- Evolution of sedimentary rocks. W. W. Norton and Co., New York. 397 p.
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. and Mitchell, S. F., 2007- Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48, 2341–2357.
- Holland, T. and Blundy, J., 1994- Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116(4), 433-447.
- Laird, J., Lanphere, M. A. and Albee, A. L., 1984- Distribution of Ordovician and Devonian metamorphism in mafic and pelitic schists from northern Vermont. *American Journal of Science*, 284(4-5), 376-413.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D. and Krivovichev, V.G., 1997- Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist* 82, 1019–1037.
- Meschede, M., 1986- A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56:207-218.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L. and Sahandi, M. R., 2003- Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21 397–412.
- Pearce, J. A. and Norry, M. J., 1979- Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69 (1), 33–47.
- Pearce, J. A., 1983- Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In *Continental basalts and mantle xenoliths*. Edited by C.J. Hawkesworth and M.J. Norry. Shiva Publishing Ltd., Cheshire, United Kingdom.
- Poller, U., Huth, J., Hoppe, P. and Williams, I. S., 2001- REE, U, Th, and Hf distribution in zircon from western Carpathian Variscan granitoids: a combined cathodoluminescence and ion microprobe study. – *American Journal of Science*, 301: 858-876.
- Saki, A., Moazzen, M. and Oberhänsli, R., 2011- P-T evolution of the Precambrian metamorphic complex, NW Iran: a study of metapelitic rocks. *Geological Journal* 46, 10-25.
- Shervais, J. W., 1982- Ti-V plots and the petrogenesis of modern andophiolitic lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59:101-118.
- Walker, K. R., Jopin, G. A., Lovering, J. F. and Green, R., 1960- Meta-morphic and metasomatic convergence of basic igneous rocks and lime-magnesia sediments of the Precambrian of north-western Queensland. *Journal of the Geological Society of Australia* 6, 149-178.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1976- Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 28: 459-469.

- Wood, D., Joron, J. L., Treuil, M., Norry, M. and Tarney, J., 1979- Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70 (3), 319–339.
- Yihunie, T., Adachi, M. and Yamamoto, K., 2006- Geochemistry of the Neoproterozoic metabasic rocks from the Negele area, southern Ethiopia: Tectonomagmatic implications. – *Journal of African Earth Sciences*, 44: 255-269.

Archive of SID

Petrography, petrology, mineral chemistry and petrogenesis study of amphibolites in Bahram Gor area at northwestern of Gol-e Gohar mine in Sirjan

H. Rahimi Sadegh¹, S. H. Moein Zadeh^{2*} and M. Moazzen³

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Associate Professor, Department of Geology, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³Professor, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 2017 February 08

Accepted: 2017 December 03

Abstract

The study area is a part of the Sanandaj-Sirjan zone which is mainly composed of metamorphic rocks, a variety of igneous basic rocks and sediments. The metamorphic rocks studied at west of Kheyrahad, North of Gol-e Gohar mine in Sirjan, Kerman Province are slate, phyllite, schist (garnet schist, amphibole schist, micaschist, kyanite schists), epidote amphibolite, amphibolite, gneiss, quartzite and marble. Amphibolite facies is the highest metamorphic grade in the region experienced by the rocks. Protolith of amphibolites is basic to intermediate igneous rocks with chemical composition of calc-alkaline. Based on Ti against V diagram and Nb-Zr-Y diagram, amphibolites of the study area belong to mid-ocean ridges (MOR) and Volcanic arc tectonic environments in relation to Neotethys ocean. Mineral chemical features classify amphiboles as calcic amphiboles. Average temperature of amphiboles is 630°C and maximum pressure is 7.5 kbar for the studied amphibolites. Geothermal gradient of ~28°C/Km indicates a continental crust setting for metamorphism.

Keywords: Sanandaj-Sirjan zone, amphibolite facies, MOR, mineral chemistry, continental crust

For Persian Version see pages 173 to 182

*Corresponding author: S. H. Moein Zadeh; E-mail: hmoeinzadeh@uk.ac.ir