

دما-فشارسنجی فنوکریست‌های آمفیبول-پلاژیوکلاز سنگ‌های آتشفشانی در شرق کامو، شمال استان اصفهان (بخش میانی نوار آتشفشانی ایران مرکزی)

محمد سیاری، مرتضی شریفی* و سید محسن طباطبایی‌منش
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده در بخش میانی نوار آتشفشانی ایران مرکزی (کمان ماگمایی ارومیه-دختر) که بخشی از ایالت ماگمایی شمال زمین‌درز بیتلیس-زاگرس است، قرار دارد. این سنگ‌ها از نظر پتروگرافی ترکیب داسیت تا آندزیت نشان می‌دهد و متشکل از فنوکریست‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت با بافت غالب پورفیریستیک است که در زمینه‌ای از فلدسپار، کوارتز، میکروولیت و شیشه قرار گرفته‌اند. پلاژیوکلازها ترکیب به نسبت یکنواختی داشته و همگی از نوع آندزین است. آمفیبول‌ها همگی کلسیک و از نوع چرماکیت هستند. برآورد دما و فشار تبلور بر اساس کاربرد تلفیقی ترسیمی روابط ترموبارومتري آمفیبول و آمفیبول-پلاژیوکلاز محدوده دمایی ۷۶۳ تا ۸۲۳ با میانگین ۷۹۷ درجه سانتیگراد و محدوده فشار ۲/۲ تا ۴/۵ با میانگین ۳/۴ کیلو بار را برای تبلور زوج بلورهای پلاژیوکلاز-آمفیبول نشان می‌دهد. حداکثر عمق تبلور این فنوکریست‌ها ۱۷ کیلومتری پوسته قاره‌ای برآورد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دما-فشار سنجی، آمفیبول، پلاژیوکلاز، سنگ‌های آتشفشانی، کامو، ارومیه-دختر

مقدمه

فعالیت‌های آتشفشانی سنوزوئیک ایران در سه برهه اصلی ائوسن، میوسن بالایی-پلیوسن و کواترنر رخ داده است (Dilek et al., 2010). نوار آتشفشانی ارومیه-دختر خود بخشی از یک ایالت ماگمایی وسیع است که حاصل همگرایی بین صفحه‌های آفریقا-عربی و اوراسیا است (Jackson and Dewey et al., 1986; McKenzie, 1984).

McClusky et al., 2003; McClusky et al., 2000; Dilek and Sandvol, 2009; Allen et al., 2004; Whitney و Dilek (۲۰۰۰) معتقدند سنگ‌های آتشفشانی پس از برخورد سنوزوئیک در این ایالت ماگمایی به طور گسترده‌ای در قسمت شمال و شمال غربی زمین‌درز زاگرس-بیتلیس برون‌زد دارد (شکل ۱). در شکل ۱ پراکندگی سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک در این ایالت ماگمایی نشان

جغرافیایی $33^{\circ}35'$ و $33^{\circ}38'$ شمالی واقع شده است. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده بررسی شده و موقعیت رخنمون‌های مطالعه شده نشان داده شده است.

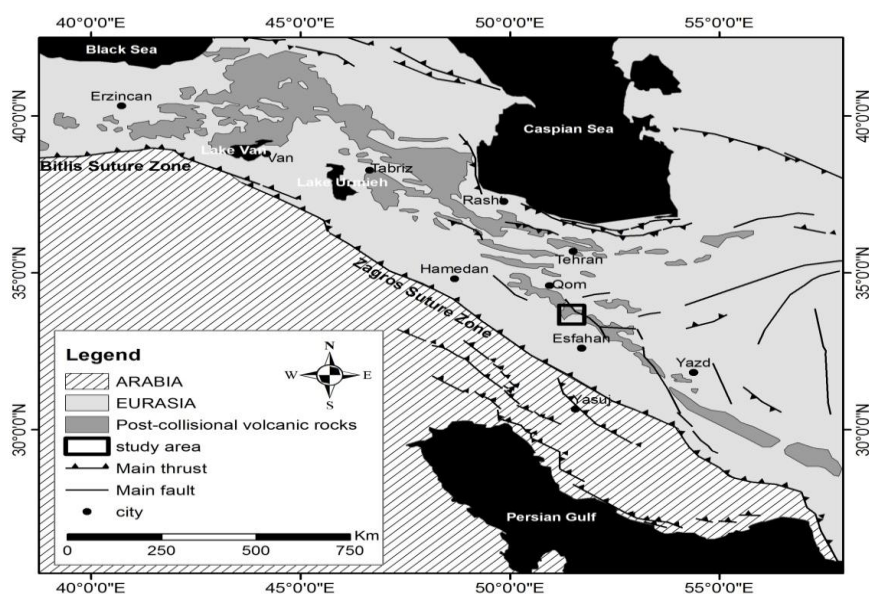
سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده به صورت رخنمون‌های متعددی به ابعاد چند متر تا ده‌ها متر به صورت پراکنده واحدهای رسوبی سازند قرمز پایینی به سن الیگوسن را قطع نموده‌اند. سازند قرمز پایینی از واحدهای رسوبی شیل، مارن ژئوپس‌دار، ماسه‌سنگ‌های قرمز و سنگ‌های آذرآوری تشکیل شده است که بخش عمده لیتولوژی منطقه بررسی شده را تشکیل می‌دهد. از آنجایی که سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده واحدهای رسوبی این سازند را قطع نموده‌اند، سن آنها میوسن-پلیوسن برآورد می‌شود که با فاز سوم ولکانیسم فراگیر سنوزئیک در ایالت ماگمایی شمال زمین درز بیتلیس-زاگرس و بالطبع کمر بند آتشفشانی ارومیه-دختر تطابق دارد. در شکل ۳ کنتاکت سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده (داسیت) با کنگلومرا و سنگ‌های آذرآوری (آگلومرا) سازند قرمز زیرین نشان داده شده است.

داده شده است. مطالعات متعددی روی نوار آتشفشانی ارومیه-دختر انجام شده است (Emami, 1981; Hassanzadeh, 1993; Amidi et al., 1984) که گویای وجود سری ماگمایی غالب کالک‌آلکان و در برخی مناطق شوشونیتی و آداکیتی است.

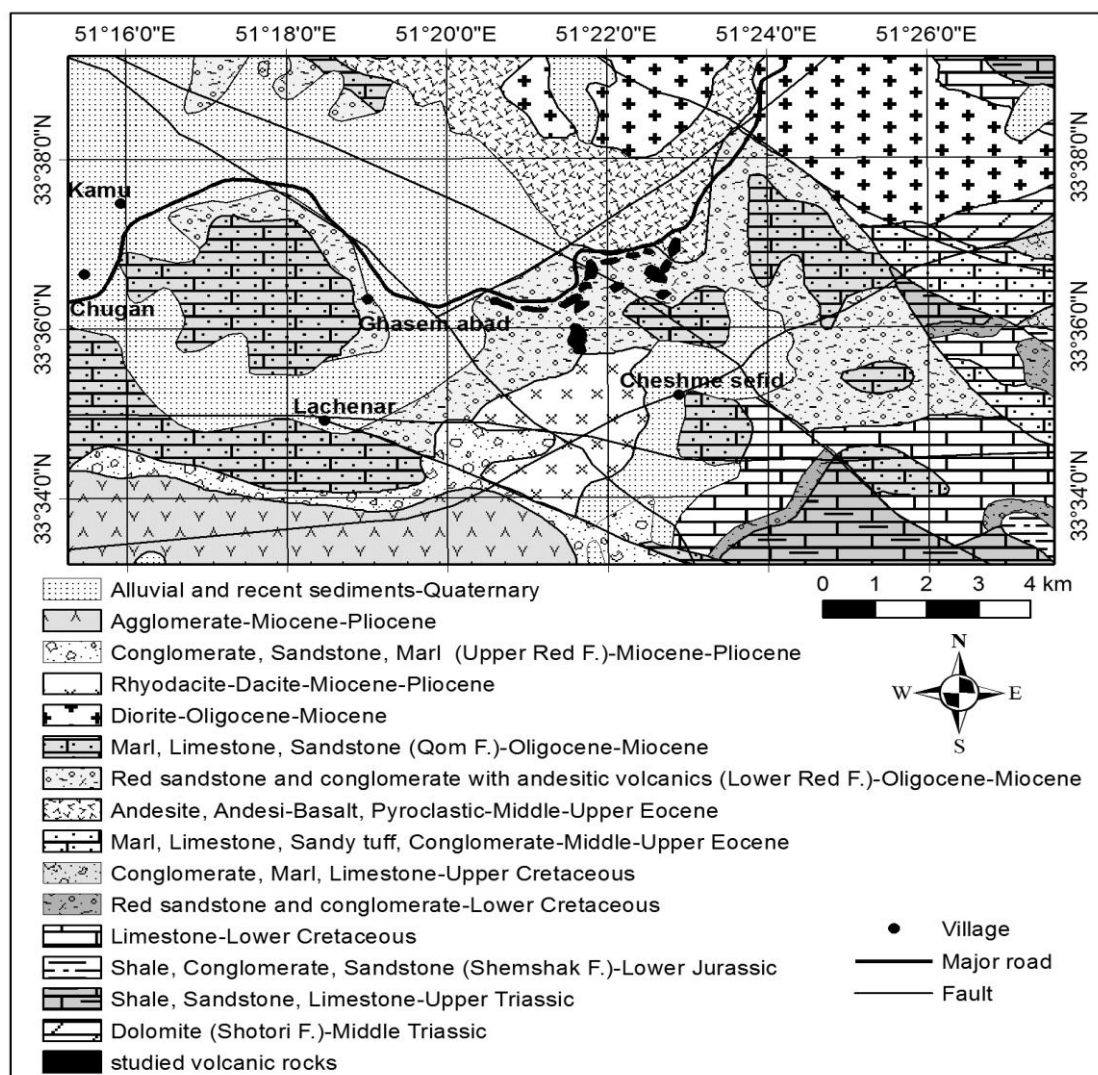
در پژوهش حاضر، سنگ‌های آتشفشانی به سن نئوژن در بخش میانی این پهنه آتشفشانی در شرق روستای کامو (شمال استان اصفهان) از جنبه‌های مینرال‌شیمی و ترموبارومتري بررسی شده‌اند، همچنین شرایط فیزیکی تبلور بلورها مورد بحث قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده در ایالت ماگمایی سنوزوئیک نشان داده شده است.

زمین‌شناسی منطقه

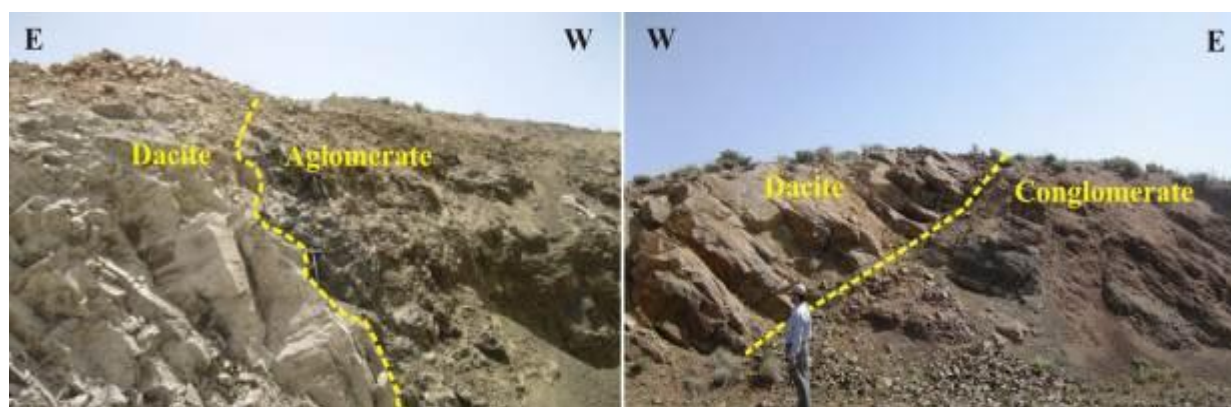
ناحیه بررسی شده در استان اصفهان و در 130° کیلومتری شمال شهر اصفهان، در شرق روستای کامو قرار دارد. محدوده بررسی شده بین طول‌های جغرافیایی $51^{\circ}20'$ و $51^{\circ}24'$ شرقی و عرض‌های



شکل ۱- پراکندگی سنگ‌های آتشفشانی پس از برخورد صفحات عربی-اوراسیا (بر اساس تلفیقی از Hessami et al., 2003; Dilek et al., 2010; Agard et al., 2011)، موقعیت منطقه شرق کامو



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده شرق کامو (بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان) (با کمی تغییرات و اعمال اصلاحات)



شکل ۳- سنگ‌های آتشفشانی شرق کامو (داسیت) که کنگلومرا و سنگ‌های آذرآواری (آگلومرا) سازند قرمز زیرین را قطع نموده‌اند.

روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های مقدماتی و صحرایی و همچنین، نمونه‌برداری از رخنمون‌های مورد نظر، نمونه‌های مناسب برای تهیه مقاطع نازک و نازک-صیقلی انتخاب شد. مطالعات پتروگرافی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان الیمپوس با نور عبوری مدل BH2 انجام گرفته است. آنالیزهای نقطه‌ای انجام شده روی کانی‌ها با دستگاه تجزیه ریزکاو الکترونی cameca-SX100 با ولتاژ شتاب‌دهنده 15kv و شدت جریان 15nA در دانشگاه اشتوتگارت آلمان انجام شده است.

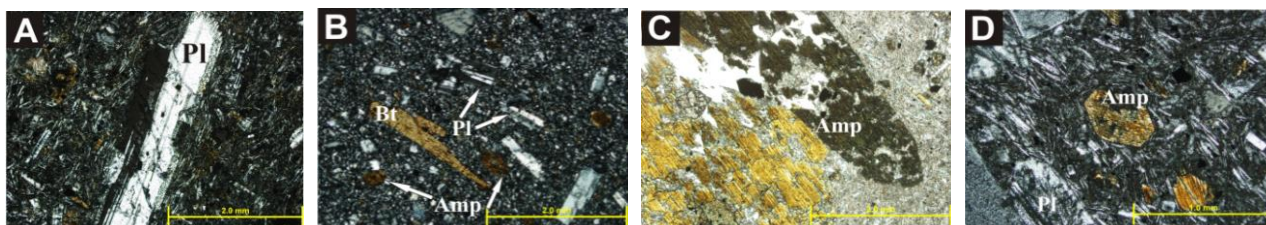
پتروگرافی

سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده از نظر کانی‌شناسی به طور عمده ترکیب داسیت تا آندزیت دارد. بافت پورفیری، هیالوپورفیریک و میکرولیتیک پورفیریک و گاهی بافت جریانی، برجسته‌ترین بافت این سنگ‌ها است که از فنوکریست‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و گاهی بیوتیت تشکیل شده و در زمینه‌ای از فلدسپارهای ریزبلور، کوارتز (نمونه‌های داسیتی)، میکرولیت، شیشه و کانی‌های کدر قرار دارد. فنوکریست‌های آمفیبول از نوع هورنبلند است که غالباً خودشکل بوده و در مقاطع طولی و عرضی در مقاطع میکروسکوپی در کنار بلورهای مستطیلی پلاژیوکلاز دیده می‌شود. فنوکریست‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز در تعادل قرار دارد، زیرا نمونه‌های آمفیبول فاقد حاشیه اکتینولیتی بوده و دارای مرزهای

دانه‌ای عادی با پلاژیوکلاز همزیست و مجاور خود هستند و به همین لحاظ برای تخمین شرایط درجه حرارت تشکیل سنگ در عمق می‌توان از این زوج‌ها استفاده نمود. در شکل ۴ تصویر میکروسکوپی این سنگ‌ها نشان داده شده است. کانی‌ها غالباً سالم و فاقد دگرسانی چشم‌گیری است. تنها در بخش‌هایی، آمفیبول‌ها به کلریت دگرسان شده‌اند و تا حدی نیز می‌توان پلاژیوکلازهایی در حال دگرسانی جزئی به سرسیت و مجموعه سوسوریتی تشخیص داد.

شیمی کانی‌ها

نتیجه تجزیه ریزکاو الکترونی فنوکریست‌های پلاژیوکلازها و آمفیبول‌های بررسی شده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ به همراه محاسبه فرمول ساختاری ارائه شده است. محاسبه فرمول ساختاری پلاژیوکلازها بر اساس ۸ اکسیژن ساختاری انجام شده (Deer et al., 1992) که در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب فنوکریست‌های پلاژیوکلاز سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده در شکل ۵ مشخص شده است. همگی این پلاژیوکلازها ترکیب آندزین داشته و تغییرات بسیار اندکی از مرکز به حاشیه بلور نشان می‌دهد که نشان‌دهنده منطقه‌بندی بسیار ضعیف است. این وضعیت نشان می‌دهد که در زمان تبلور پلاژیوکلازها شرایط دما، فشار و فوگاسیته H_2O به نسبت پایدار بوده و تغییرات شرایط فیزیکی، نامحسوس بوده است (Best, 2003).



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی سنگ‌های آتشفشانی شرق کامو؛ (A) فنوکریست پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از میکرولیت و فلدسپارهای ریزبلور با کمی دگرسانی سوسوریتی در مرکز (B؛ (XPL) فنوکریست‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت در زمینه‌ای از شیشه و ریزبلورهای کوارتز و فلدسپار (C؛ (XPL) فنوکریست آمفیبول با ماکل ساده (D؛ (PPL) مقاطع عرضی آمفیبول در زمینه‌ای از میکرولیت و شیشه همراه با بافت جریانی حاصل از جهت‌یابی میکرولیت‌ها در جهت جریان گدازه (XPL)

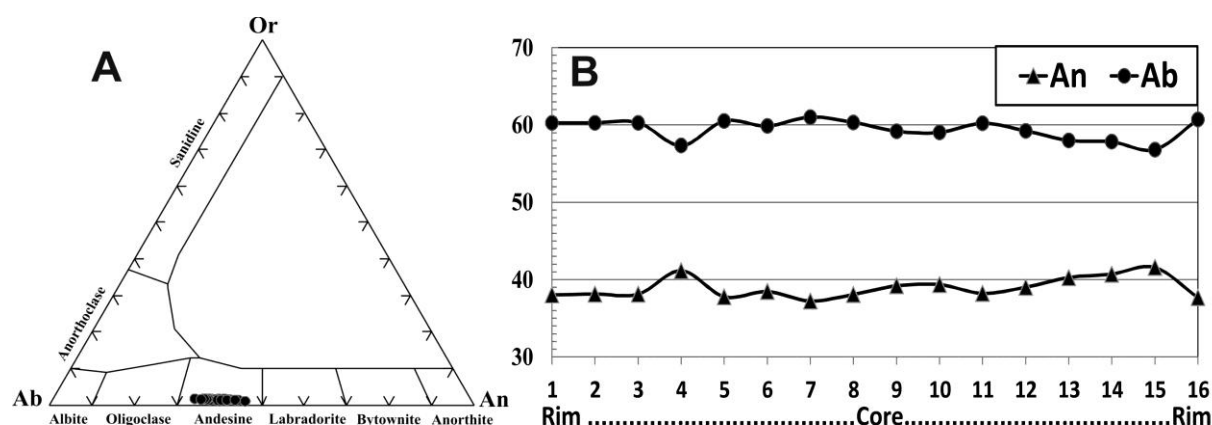
جدول ۱- نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی پلاژیوکلازهای بررسی شده به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	59.07	59.33	58.95	58.27	58.78	58.84	59.21	58.80	58.59	58.57
Al ₂ O ₃	25.41	25.21	25.53	26.02	25.43	25.50	25.31	25.43	25.68	25.80
FeO*	0.18	0.16	0.16	0.24	0.19	0.23	0.20	0.14	0.19	0.13
CaO	8.04	7.98	8.08	8.64	8.08	8.17	7.92	8.16	8.31	8.37
Na ₂ O	7.04	6.97	7.06	6.65	7.15	7.03	7.17	7.15	6.94	6.94
K ₂ O	0.30	0.28	0.29	0.27	0.31	0.30	0.31	0.29	0.29	0.29
BaO	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.04
Total	100.08	99.98	100.06	100.14	99.95	100.07	100.15	99.97	100.05	100.14
Si	2.64	2.65	2.64	2.61	2.63	2.63	2.65	2.63	2.62	2.62
Al	1.34	1.33	1.35	1.37	1.34	1.34	1.33	1.34	1.36	1.36
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Ca	0.38	0.38	0.39	0.41	0.39	0.39	0.38	0.39	0.40	0.40
Na	0.61	0.60	0.61	0.58	0.62	0.61	0.62	0.62	0.60	0.60
K	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	5.00	4.99	5.00	5.00	5.01	5.00	5.00	5.01	5.00	5.01
Or	1.72	1.58	1.61	1.52	1.71	1.69	1.74	1.61	1.62	1.63
An	38.02	38.14	38.11	41.15	37.78	38.45	37.24	38.07	39.19	39.35
Ab	60.26	60.28	60.28	57.33	60.51	59.86	61.03	60.32	59.19	59.02

Sample	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ادامه جدول ۱-....											
SiO ₂	58.88	58.79	58.47	58.42	59.33	58.51	59.02	59.08	57.99	57.16	59.30
Al ₂ O ₃	25.70	25.51	25.75	25.67	25.24	25.49	25.34	25.31	25.84	26.41	25.00
FeO*	0.21	0.23	0.25	0.21	0.18	0.27	0.16	0.16	0.17	0.23	0.22
CaO	7.96	8.23	8.44	8.69	7.95	8.23	7.79	7.93	8.88	9.37	7.65
Na ₂ O	6.93	6.91	6.72	6.82	7.08	7.10	7.28	7.28	6.77	6.51	7.50
K ₂ O	0.28	0.31	0.30	0.26	0.29	0.31	0.32	0.27	0.27	0.26	0.32
BaO	0.02	0.07	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
Total	99.97	100.05	99.92	100.09	100.06	99.91	99.92	100.04	99.93	99.94	99.98
Si	2.63	2.63	2.62	2.62	2.65	2.62	2.64	2.64	2.60	2.57	2.65
Al	1.35	1.35	1.36	1.36	1.33	1.35	1.34	1.33	1.37	1.40	1.32
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.38	0.39	0.41	0.42	0.38	0.40	0.37	0.38	0.43	0.45	0.37
Na	0.60	0.60	0.58	0.59	0.61	0.62	0.63	0.63	0.59	0.57	0.65
K	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.99	5.00	5.00	5.00	5.00	5.01	5.01	5.01	5.01	5.02	5.02
Or	1.58	1.75	1.73	1.46	1.63	1.70	1.76	1.52	1.51	1.43	1.75
An	38.21	39.02	40.27	40.71	37.66	38.39	36.51	37.01	41.40	43.67	35.41
Ab	60.21	59.23	58.00	57.83	60.72	59.91	61.73	61.47	57.09	54.90	62.84

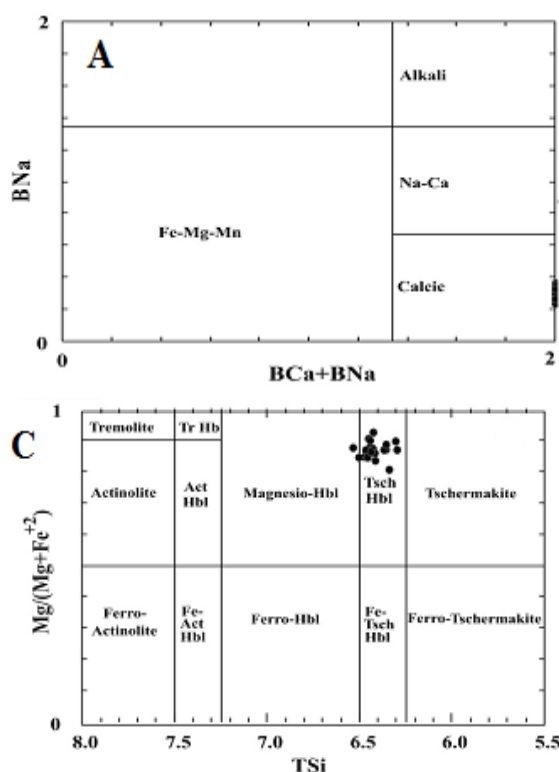
جدول ۲- نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی آمفیبول‌های بررسی شده به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن

sample	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
SiO ₂	44.18	44.48	45.22	45.22	45.51	45.23	45.40	45.60	45.44	45.21	45.13	44.01	44.13	44.89
TiO ₂	1.42	1.46	1.93	1.89	1.82	1.80	1.87	1.90	1.79	1.89	1.88	1.48	1.45	1.58
Al ₂ O ₃	11.44	11.12	10.16	10.28	10.41	10.27	10.35	10.32	10.24	10.58	10.47	11.31	12.08	11.54
FeO*	12.75	12.32	10.44	10.73	10.69	10.15	10.69	10.47	11.23	10.65	10.29	12.75	13.55	12.19
MnO	0.20	0.11	0.10	0.17	0.05	0.07	0.12	0.10	0.11	0.07	0.13	0.10	0.16	0.12
MgO	14.46	14.69	15.81	15.66	15.83	16.29	15.51	15.52	15.46	15.69	15.63	14.54	13.14	14.09
CaO	10.77	11.05	11.25	11.28	11.13	11.16	11.47	11.37	11.20	11.32	11.56	11.14	10.66	10.77
Na ₂ O	2.13	2.15	2.31	2.16	2.02	2.17	2.13	2.18	2.14	2.22	2.25	2.11	2.17	2.19
K ₂ O	0.43	0.43	0.47	0.47	0.45	0.46	0.49	0.46	0.45	0.47	0.46	0.45	0.48	0.45
BaO	0.08	0.04	0.08	0.08	0.08	0.07	0.11	0.08	0.07	0.10	0.10	0.05	0.04	0.05
Total	97.86	97.85	97.77	97.94	97.99	97.67	98.15	98.00	98.13	98.21	97.90	97.95	97.86	97.87
Si	6.30	6.36	6.46	6.44	6.45	6.42	6.47	6.50	6.46	6.43	6.46	6.30	6.34	6.41
Al ^{iv}	1.70	1.64	1.54	1.56	1.55	1.58	1.53	1.50	1.54	1.57	1.54	1.70	1.66	1.59
Al ^{vi}	0.23	0.23	0.17	0.17	0.19	0.14	0.21	0.24	0.18	0.20	0.22	0.20	0.38	0.36
Ti	0.15	0.16	0.21	0.20	0.19	0.19	0.20	0.20	0.19	0.20	0.20	0.16	0.16	0.17
Fe ³⁺	1.20	1.04	0.78	0.84	0.95	0.96	0.72	0.68	0.88	0.82	0.66	1.09	0.99	0.90
Fe ²⁺	0.32	0.43	0.46	0.44	0.32	0.25	0.56	0.57	0.46	0.45	0.57	0.43	0.64	0.56
Mn	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Mg	3.08	3.13	3.37	3.33	3.35	3.45	3.30	3.30	3.28	3.33	3.33	3.10	2.81	3.00
Ca	1.65	1.69	1.72	1.72	1.69	1.70	1.75	1.74	1.71	1.72	1.77	1.71	1.64	1.65
Na	0.59	0.60	0.64	0.60	0.56	0.60	0.59	0.60	0.59	0.61	0.62	0.59	0.61	0.61
K	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
(Ca+Na) _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
Na _B	0.35	0.31	0.28	0.28	0.31	0.30	0.25	0.26	0.29	0.28	0.23	0.29	0.36	0.35
(Na+K) _A	0.31	0.37	0.45	0.40	0.33	0.38	0.43	0.42	0.38	0.42	0.48	0.38	0.33	0.34
Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.91	0.88	0.88	0.88	0.91	0.93	0.86	0.85	0.88	0.88	0.85	0.88	0.81	0.84

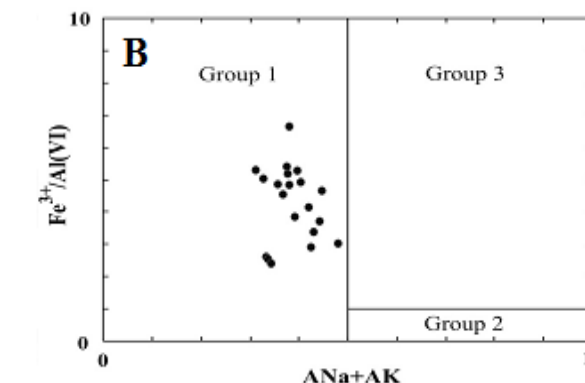


شکل ۵- (A) ترکیب پلاژیوکلازهای تجزیه شده در نمودار سه تایی Ab-An-Or؛ (B) مقطعی از ترکیب یک بلور پلاژیوکلاز از حاشیه به مرکز به حاشیه که نشان‌دهنده ترکیب یکنواخت بلور و عدم منطقه‌بندی مشخصی است. محور عمودی بر حسب درصد است و محور افقی نشان‌دهنده محل نسبی نقطه تجزیه شده در طول مقطع بلور پلاژیوکلاز است و با شماره نمونه تجزیه شده (جدول ۱) مشخص شده است.

آمفیبول‌ها از نمودارهای شکل ۶ استفاده شده است. آمفیبول‌های تجزیه شده همگی از نوع کلسیک (شکل ۶-A)، غیر تیتانیک ($Ti < 0.5$)، با مقدار $ANa+AK < 0.5$ (گروه ۱ در شکل ۶-B) و از نوع چرماکیت (شکل ۶-C) است.



محاسبه فرمول ساختاری آمفیبول‌ها بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن ساختاری و دو مول OH انجام شده است، برای تفکیک آهن از محاسبات فرمول ساختاری بر مبنای 13-CNK استفاده شده است (Leake et al., 1997). برای طبقه‌بندی

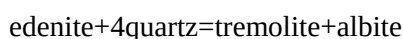


شکل ۶- نمودارهای تقسیم‌بندی آمفیبول‌های تجزیه شده؛ A) آمفیبول‌های تجزیه شده همگی از نوع کلسیک؛ (Leake et al., 1997) بر اساس تقسیم‌بندی C) و $ANa+AK < 0.5$ (B) ترکیب چرماکیت را نشان می‌دهد.

بحث

برای محاسبه دما و فشار سنگ‌های آذرین آمفیبول و پلاژیوکلازدار، در صورتی که آمفیبول و پلاژیوکلاز در تعادل با هم باشد می‌توان از ژئوترموتر آمفیبول-پلاژیوکلاز استفاده نمود. این روش ژئوترموتری یک زمین‌دماسنج تبادلی بوده که بر مبنای واکنش‌های ۱ و ۲ است:

واکنش (۱)



واکنش (۲)



برای ترمومتری آمفیبول-پلاژیوکلاز سه معادله کالبراسیون وجود دارد که در غالب رابطه‌های ۱

سنگ‌های آتشفشانی با بافت پورفیری دو مرحله تبلور را پشت سر گذاشته‌اند. مرحله اول در عمق که با تبلور فنوکریست‌های درشت‌بلورتر مشخص می‌شود. مرحله دیگر در خارج یا نزدیک سطح زمین است که با تبلور ریزبلورهای زمینه، میکرولیت و شیشه مشخص می‌شود. با استفاده از ترکیب فنوکریست‌ها می‌توان اطلاعات با ارزشی در مورد شرایط فیزیکی حاکم بر ماگما در زمان تبلور فنوکریست‌ها به دست آورد. دما و فشار مهم‌ترین شاخص‌های برآورد شرایط فیزیکی در زمان تبلور است.

تا ۳ آورده شده‌اند.

رابطه‌های ۱ و ۲ توسط Holland و Blundy (۱۹۹۴) و رابطه ۳ توسط Holland و Blundy (۱۹۹۰) ارائه شده است. رابطه‌های ۱ و ۳ بر اساس واکنش ۱ و رابطه ۲ بر اساس واکنش ۲ کالیبره شده است. رابطه‌های ۱ و ۳ فقط برای مجموعه‌های دارای کوارتز قابل استفاده است، اما رابطه ۲ هم برای مجموعه‌های دارای کوارتز و هم مجموعه‌های فاقد کوارتز قابل استفاده است (Holland and Blundy, 1994).

رابطه ۱:

$$T(\pm 40^\circ C) = \frac{-76.95 + 0.79P + Y_{ab} + 39.4X_{Na}^A + 22.4X_K^A + (41.5 - 2.89P)X_{Al}^{M2}}{-0.0650 - 0.0083144Ln\left[\frac{27X_{Na}^A X_{Si}^T X_{ab}^{Pl}}{256X_{Na}^A X_{Al}^T}\right]} - 273.15$$

رابطه ۲:

$$T(\pm 40^\circ C) = \frac{78.44 - Y_{ab-an} - 33.6X_{Na}^{M4} - (66.8 - 2.92P)X_{Al}^{M2} + 78.5X_{Al}^{T1} + 9.4X_{Na}^A}{0.0721 - 0.0083144Ln\left[\frac{27X_{Na}^{M4} X_{Si}^{T1} X_{an}^{Pl}}{64X_{Ca}^{M4} X_{Al}^{T1} X_{ab}^{Pl}}\right]} - 273.15$$

رابطه ۳:

$$T(\pm 40^\circ C) = \frac{0.677P - 4898}{-0.0429 - 0.0083144Ln\left[\left(\frac{Si-4}{8-Si}\right)X_{ab}^{Pl}\right]}$$

Zen و Hammarstrom (۱۹۸۶):

$$P(\pm 3kbar) = -3.92 + 5.03Al_{total} \quad \text{رابطه ۴}$$

Hollister و همکاران (۱۹۸۷):

$$P(\pm 1kbar) = -4.76 + 5.64Al_{total} \quad \text{رابطه ۵}$$

Rutherford و Johnson (۱۹۸۹):

$$P(\pm 0.5kbar) = -3.46 + 4.23Al_{total} \quad \text{رابطه ۶}$$

Schmidt (۱۹۹۲):

$$P(\pm 0.6kbar) = -3.01 + 4.76Al_{total} \quad \text{رابطه ۷}$$

Smith و Anderson (۱۹۹۵):

رابطه ۸:

$$P(\pm 0.6kbar) = 4.76Al - 3.01 - [((T(^\circ C) - 675)/85) \times (0.53Al + 0.005294 \times T(^\circ C) - 675)]$$

انتخاب رابطه مناسب برای تخمین دما و فشار و

نحوه محاسبه مقادیر مورد نیاز در رابطه‌های ۱

و ۲ به صورت:

$$X_{Si}^{T1} = (Si-4)/4$$

$$X_{Al}^{T1} = (8-Si)/4$$

$$X_{Al}^{M2} = (Al+Si-8)/2$$

$$X_K^A = K$$

$$X_v^A = 3-Ca-Na-K-cm$$

$$X_{Na}^A = Ca+Na+cm-2$$

$$X_{Na}^{M4} = (2-Ca-cm)/2$$

$$X_{Ca}^{M4} = Ca/2$$

$$cm = Si+Al+Ti+Fe^{3+}+Fe^{2+}+Mg+Mn-13.0$$

برای محاسبات فشارسنجی ۵ کالیبراسیون توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است که در قالب رابطه‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده‌اند:

روش استفاده از این معادلات بسیار مهم است که متأسفانه تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش برای انتخاب بهترین رابطه برای ترموبارومتری تمام رابطه‌های ۱ تا ۷ بررسی شد. در شکل ۷ این معادلات برای ۱۸ زوج آمفیبول-پلاژیوکلاز ترسیم شده‌اند. زوج‌های استفاده شده در شکل ۷ و جدول ۳، با عددی چهار رقمی مشخص شده‌اند که دو رقم اول سمت چپ معرف شماره پلاژیوکلاز در جدول ۱ و دو رقم بعدی شماره آمفیبول در جدول ۲ را نشان می‌دهد. از آنجایی که بارومتر رابطه ۸ نسبت به رابطه‌های بارومتری دیگر دقیق‌تر و جدیدتر است برای انجام محاسبات، این رابطه انتخاب شده است. برای انتخاب ترمومتر مناسب هر سه رابطه ترمومتر (رابطه‌های ۱ تا ۳) با

رابطه ۸ ارزیابی شد. نمودارهای شکل ۷ به خوبی نشان می‌دهد که مناسب‌ترین ترمومتر برای تلفیق با بارومتر معادله ۸، ترمومتر معادله ۲ است. زیرا داده‌های حاصل روند منطقی دارد. همچنین، رابطه ۲ برای تمام زوج‌ها قابل استفاده است. در این پژوهش محاسبات با نرم‌افزار APG (نرم‌افزار تخصصی دما-فشارسنجی آمفیبول-پلاژیوکلاز) که توسط Sayari (۲۰۱۲) ارائه شده، انجام شده است. نتایج حاصل بر اساس روش تلفیقی ترسیمی از Sayari (۲۰۱۲) با استفاده از ترکیب رابطه‌های ۲ و ۸ که مناسب‌ترین رابطه برای نمونه‌های مورد بررسی است در جدول ۳ ارائه شده است. در حقیقت جدول ۳ معرف نقطه تلاقی رابطه‌های ۲ و ۸ در نمودارهای شکل ۷ است.

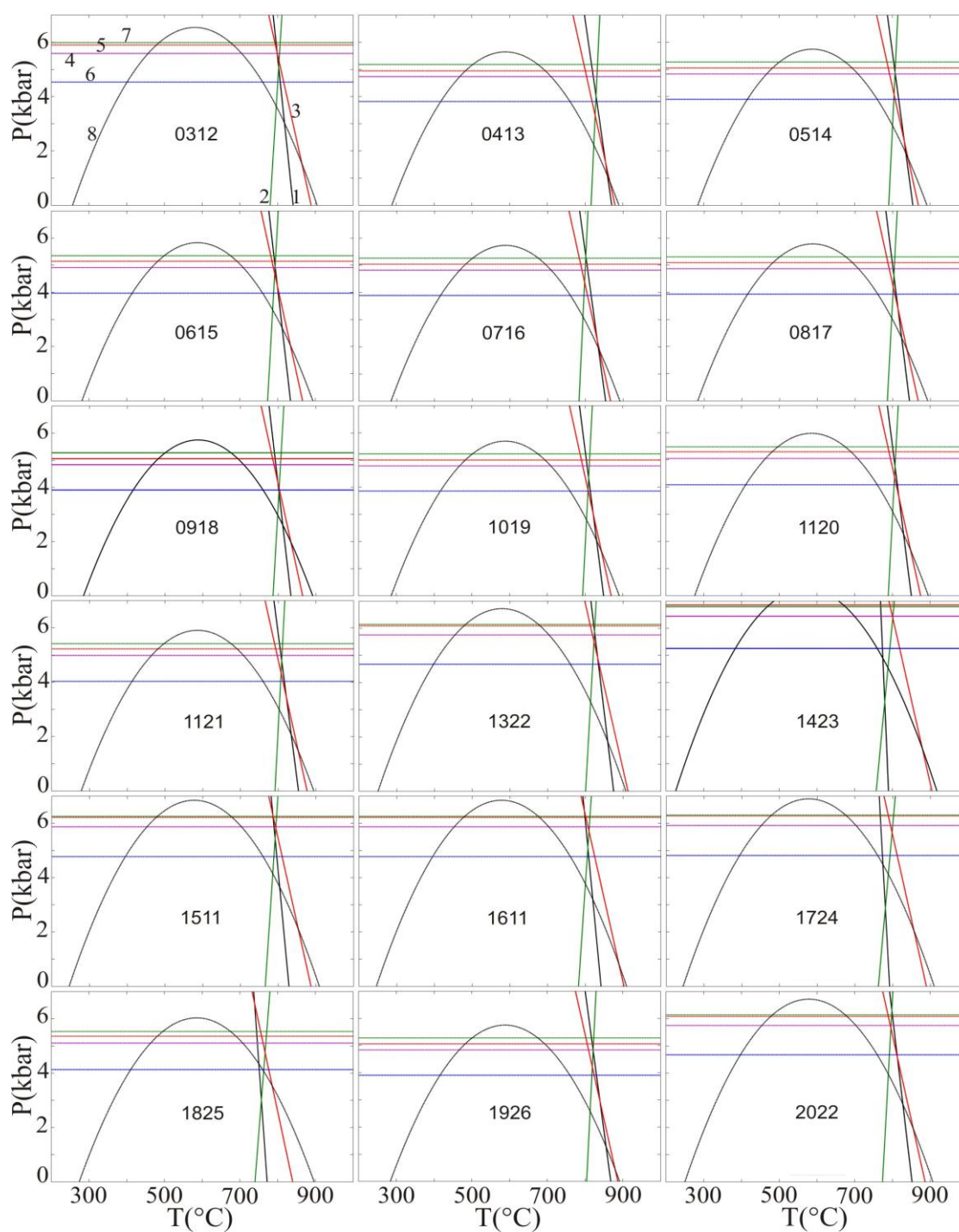
جدول ۳- نتایج ترموبارومتری بر اساس ترکیب رابطه ترمومتری ۲ از Holland و Blundy (۱۹۹۴) و رابطه بارومتری ۸ از Anderson و Smith (۱۹۹۵)

sample	0312	0413	0514	0615	0716	0817	0918	1019	1120	1221	1322	1423
T(°C)	796.2	823.3	800.6	786.7	793.5	797	798.7	804.1	800.9	802.8	813.6	788.5
P(kbar)	3.644	2.221	2.928	3.35	3.105	3.052	2.978	2.795	3.091	2.991	3.286	4.534
sample	1511	1611	1724	1825	1926	2022	2123	min	max	average	St.D	
T(°C)	785.8	800	788.4	762.7	813.5	789.5	789	762.7	823.3	796.6	12.7	
P(kbar)	4.147	3.766	4.118	4.071	2.579	3.955	4.52	2.221	4.534	3.428	0.643	

همان طور که در جدول ۳ نیز مشخص است، تبلور این بلورها در محدوده دمایی ۷۶۳ تا ۸۲۳ با میانگین ۷۹۷ درجه سانتیگراد و محدوده فشار ۲/۲ تا ۴/۵ با میانگین ۳/۴ کیلو بار انجام شده است. با فرض اینکه فشار حاکم در زمان تبلور فنوکریست‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز فشار همه جانبه لیتواستاتیک، ناشی از وزن سنگ‌های فوقانی بوده است، با استفاده از رابطه $P=p.h.g$ می‌توانیم عمق (h) را محاسبه نماییم. البته فشارهای تکتونیکی نیز تأثیر گذار هستند، اما از آنجا که اهمیت و اثر آنها در قیاس با فشار لیتواستاتیک ناچیز است می‌توان از آن صرف نظر کرد (شواهد

پتروگرافی نبود استرس‌های جهت‌دار در زمان تبلور را تأیید می‌نماید).

چگالی (p) سنگ‌های متشکله پوسته قاره‌ای در حدود ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. اگر از افزایش چگالی سنگ‌ها نسبت به عمق و همچنین، کاهش شتاب گرانی با افزایش عمق صرف نظر شود و با تقریب مناسبی چگالی سنگ‌های پوسته و شتاب گرانی زمین ثابت فرض شود (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، حداکثر عمق تبلور این فنوکریست‌ها ۱۷ کیلومتر ارزیابی می‌شود. به عبارت دیگر تبلور آمفیبول‌ها از عمق ۱۷ کیلومتری پوسته قاره‌ای شروع شده است.



شکل ۷- ترسیم معادله‌های ۱ تا ۸ برای ۱۸ زوج فنوکریست آمفیبول-پلاژیوکلاز در نمونه‌های بررسی شده؛ در نخستین نمودار معادله‌های ۱ تا ۸ مشخص شده‌اند که در همه نمودارها با رنگ یکسان تکرار شده است. عدد داخل نمودارها زوج‌های استفاده شده را مشخص می‌کند. به این ترتیب که دو رقم اول سمت چپ شماره پلاژیوکلاز و دو رقم دوم شماره آمفیبول را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

سنگ‌های آتشفشانی به سن بعد از میوسن در شرق کامو که سازند قرمز زیرین را قطع نموده‌اند با ترکیب داسیت تا آندزیت است که از فنوکریست‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و بیوتیت در زمینه‌ای از کوارتز، فلدسپار، میکرولیت و شیشه قرار گرفته‌اند. بر اساس تلفیق روابط ترمومتری آمفیبول-پلاژیوکلاز و بارومتری آمفیبول، فنوکریست‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز در شرایط دمایی ۷۶۳ تا ۷۹۷ درجه سانتیگراد و فشار ۲/۲ تا ۴/۵ کیلو بار متبلور شده‌اند. بر این اساس، حداکثر

عمق تبلور این فنوکریست‌ها، ۱۷ کیلومتری پوسته قاره‌ای برآورد می‌شود. این عدد نشان‌دهنده عمق شروع تبلور ماگما در پوسته قاره‌ای است.

سپاسگزاری

نگارندگان این پژوهش از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و همچنین، از همکاری پروفیسور ماسون از دانشگاه اشتوتگارت آلمان به علت همکاری در انجام تجزیه ریزکاو الکترونی و نیز دکتر همایون صفایی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

- Aftabi, A. and Atapour, H. (2000) Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran. *Episodes* 23(2): 119-125.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. and Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: a subduction-dominated process. In: *Geodynamic Evolution of the Zagros* (Eds. Lacombe, O., Grasemann, B. and Simpson, G.). *Geological Magazine* 692-725.
- Allen, M., Jackson, J. and Walker, R. (2004) Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics* 23(TC2008): 1-16.
- Amidi, S. M., Emami, M. H. and Michel, R. (1984) Alkaline character of Eocene volcanism in the middle part of Central Iran and its geodynamic situation. *Geologische Rundschau* 73: 917-932.
- Anderson, J. L. and Smith, D. R. (1995) The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist* 80: 549-559.
- Best, M. G. (2003) *Igneous and metamorphic petrology*. 2nd edition, Blackwell science Ltd., Oxford, UK.
- Blundy, J. and Holland, T. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104: 208-224.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1992) *An introduction to the rock forming minerals*. 2nd edition, Longman and Scientific Technical, London.
- Dewey, J. F., Hempton, M. R., Kidd, W. S. F., Saroglu, F. and Sengo, A. M. C. (1986) Shortening of continental lithosphere: the neotectonics of eastern Anatolia- a young collision zone. In: *Collision Zone Tectonics* (Eds. Coward, M. P. and Ries, A. C.) *Special Publication* 19: 3-36. Geological Society, London.
- Dilek, Y. and Sandvol, E. (2009) Seismic structure, crustal architecture and tectonic evolution of the Anatolian-African plate boundary and the Cenozoic orogenic belts in the eastern Mediterranean region. *Geological Society of London, Special Publication* 327: 127-160.
- Dilek, Y. and Whitney, D. L. (2000) Cenozoic crustal evolution in Central Anatolia: extension,

- magmatism and landscape development. In: Proceedings of the Third International Conference on the Geology of the Eastern Mediterranean: (Eds. Panayides, I., Xenophontos, C. and Malpas, J.) 183-192. Geological Survey Department of Cyprus, Nicosia.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, S. (2010) Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review* 52: 536-578.
- Emami, M. H. (1981) *Géologie de la région de Qom-Aran (Iran): contribution a l'étude dynamique et géochimique du volcanisme Tertiaire de l'Iran Central*. PhD thesis, University of Grenoble, France.
- Hammarstrom, J. M. and Zen, E. (1986) Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist* 71: 1297-1313.
- Hassanzadeh, J. (1993) Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of Cenozoic active continental margin of Central Iran (Shahre-babak area), Kerman province. PhD thesis, University of California, Los Angeles, USA.
- Hessami, K., Jamali, F. and Tabassi, H. (2003) Map of major active faults of Iran, scale 1:2500000, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran.
- 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: 433-447.
- Hollister, L. S., Grissom, G. E., Peters, E. K., Stowell, H. H. and Sisson, V. R. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist* 72: 231-239.
- Jackson, J. and McKenzie, D. (1984) Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International* 77: 185-264.
- Johnson, M. E. and Rutherford, M. J. (1989) Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long valley caldera (California). *Geology* 17: 837-841.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovicher, V. G., Linthout, K., Laird, J. and Mandarino, J. (1997) Nomenclature of amphiboles-Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. *European Journal of Mineralogy* 9: 623-651.
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D. and Tealeb, A. (2003) GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophysical Journal International* 155: 126-138.
- Sayari, M. (2012) APG: An efficient software program for Amp-Pl thermobarometry based on graphical method. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 22: 345-349.
- Schmidt, M. W. (1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110: 304-310.

Thermo-barometry of amphibole-plagioclase phenocrysts in volcanic rocks in the east of Kamu north of Isfahan province (middle part of the Central Iranian volcanic belt)

Mohammad Sayari, Mortaza Sharifi * and Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The studied volcanic rocks, in the middle part of the Central Iranian Volcanic Belt (Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc) belong to a vast magmatic province located in the north of the Bitlis-Zagros suture zone. Petrographically, these rocks show dacite to andesite composition and include phenocrysts of plagioclase, amphibole and biotite with a prevailing porphyritic texture in a matrix composing of feldspar, quartz, microlite and glass. Having a relatively invariable composition, plagioclases are all andesine. Amphiboles are calcic and tschermakite type. Estimation of temperature and pressure of crystallization resulted from graphically integrating amphibole and amphibole-plagioclase geothermo-barometry equations indicates that the amphibole-plagioclase phenocrysts were crystallized in the temperature range of 763-823 °C with average of 797 °C and in the pressure range of 2.2-4.5 kbar with the average of 3.4 kbar. The maximum depth of crystallization is evaluated at 17 km in continental crust.

Key words: Thermo-barometry, Amphibole, Plagioclase, Volcanic rocks, Kamu, Urumieh- Dokhtar

* m.sharifi@sci.ui.ac.ir