

پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی طرق - مزده بر پایه شیمی کانی کلینوپیروکسن (جنوب نطنز، کمان ماگمایی ارومیه - دختر)

مرضیه غدیرپور^۱، جمشید احمدیان^{۱*}، شهزاد شرافت^۱ و محمدعلی مکی‌زاده^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

چکیده

در پهنه ولکانیکی جنوب نطنز (کمان ماگمایی ارومیه-دختر) واقع در شمال اصفهان، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با طیف گسترده‌ای از آندزیت بازالتی، آندزیت و به مقدار کم ریولیت دیده می‌شود. سنگ‌های حدواسط و نسبتاً بازیک منطقه از کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز، اسفن، آپاتیت و تیتانومگنتیت تشکیل شده‌اند. کانی‌های ثانویه کلریت، کلسیت و آمفیبول در این سنگ‌ها از تجزیه کانی‌های مافیک شکل گرفته‌اند. آنالیز مایکروپروب کلینوپیروکسن‌ها، نشان‌دهنده ترکیب اوژیت برای این کانی است. ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی، دمای بین ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵/۵ کیلوبار را برای تشکیل این کانی نشان می‌دهد. بر پایه نتایج آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن‌ها، ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه دارای سرشت کالک‌آلکالن و فوگاسیته اکسیژن بالا بوده و در جایگاه زمین‌ساختی کمان آتشفشان تکامل یافته است.

واژه‌های کلیدی: کالک‌آلکالن، کمان آتشفشان، طرق - مزده، ارومیه - دختر

مقدمه

Kushiro, 1960; Nisbet and Pearce, 1977, Leterrier

(et al., 1982). علاوه بر این، با بررسی ترکیب شیمیایی کانی کلینوپیروکسن می‌توان دما و فشار تشکیل سنگ را برآورد کرد (Putirka, 2008; Nimis and Taylor, 2000).

منطقه مورد بررسی در پهنه ماگمایی شمال اصفهان (بخش میانی نوار ماگمایی ارومیه دختر) و در محدوده‌ای از طرق تا مزده بین طول جغرافیایی ۴۳° ۵۱' تا ۵۲° ۰۰' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳° ۱۵۳' تا ۳۳° ۳۰' شمالی واقع شده است. ترکیب سنگ‌های آذرین ائوسن منطقه، از اسیدی تا حدواسط و نسبتاً

کلینوپیروکسن از متداول‌ترین کانی‌های سنگ‌ساز بوده و دوره طولانی تشکیل آن (از نخستین مراحل تبلور ماگما در هسته فنوکریست‌ها تا آخرین مراحل تبلور ریزبلورها در زمینه سنگ)، تاریخچه تبلور ماگماهای میزبان را ثبت می‌کند. ترکیب کلینوپیروکسن به‌ویژه فنوکریست‌های این کانی در سنگ‌های آتشفشانی به‌خوبی ماهیت گدازه میزبان را نشان‌دهنده است و با بررسی شیمی پیروکسن می‌توان دسته ماگمایی، محیط زمین‌ساختی و سنگ منشأ یک توده آذرین را تعیین کرد

توف و گدازه‌های آندزیتی با آذرآواری‌ها و در جنوب شرق آن آندزیت‌های بازالتی و سنگ‌های آذرآواری به چشم می‌خورند. واحدهای سنگی شمال طار از نوع لیتیک توف هستند. جدیدترین سازندهای منطقه، تراورتن‌های سفید کواترنری است که در جنوب طار، دیگر واحدهای سنگی را می‌پوشاند.

روش مطالعه

برای بررسی محیط زمین‌ساختی و شرایط فیزیکی شیمیایی سنگ‌های مورد پژوهش، پس از بررسی‌های دقیق و برداشت‌های صحرائی از ۳۰ نمونه سنگ‌های آذرین منطقه، مقطع نازک تهیه شد و بافت‌ها و کانی‌های موجود مورد شناسایی قرار گرفتند. پس از بررسی‌های دقیق کانی‌شناسی و انتخاب نمونه‌های غیردگرسان، آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها توسط دستگاه مایکروپروب مدل JEOL-JXA در دانشگاه Naruto ژاپن انجام شد. آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها تحت شرایط شدت جریان ۱۵ nA و ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ Kev انجام شده است. در راستای بررسی شیمی کانی‌ها، محاسبه فرمول کانی‌ها و نمودارهای مربوطه با نرم‌افزارهای Minpet, Igpert ترسیم شد.

پetroگرافی و شیمی کانی کلینوپیروکسن

سنگ‌های حدواسط و نسبتاً بازیگ مورد پژوهش، به رنگ سبز تیره و خاکستری روشن در محدوده آندزیت بازالت تا آندزیت قرار می‌گیرند. این سنگ‌ها از کانی‌های کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و الیون تشکیل شده و دارای بافت‌های میکرولیتی پورفیری (شکل ۲-۱)، گلوپورفیری (شکل ۲-۲) و بادامکی (شکل ۲-۳) هستند. از کانی‌های فرعی این سنگ‌ها، می‌توان به کانی‌های کدر و آپاتیت اشاره کرد. الیون در این سنگ‌ها به ندرت به صورت فنوکریست دیده شده و به طور کامل یا بخشی به ایدینگزیت دگرسان شده است. کلینوپیروکسن به صورت فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ماکل ساده و یا به صورت ریزبلور در خمیره سنگ دیده می‌شود (شکل ۲-۲). این کانی به صورت جزئی به اورالیت تجزیه شده است.

بازیگ تغییر کرده است و بخش اعظم آن را سنگ‌های حدواسط و نسبتاً بازیگ تشکیل می‌دهند (Ghadirpour, 2017).

بهره‌گیری از ترکیب شیمیایی عناصر اصلی کلینوپیروکسن برای تخمین شرایط تشکیل سنگ‌های آذرین در مناطق مختلفی از ایران، در گذشته توسط پژوهشگرانی مثل سیاری و شریفی (Sayari and Sharifi, 2016)، فلاحتی و همکاران (Falahaty et al., 2016) و محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2017) انجام شده است.

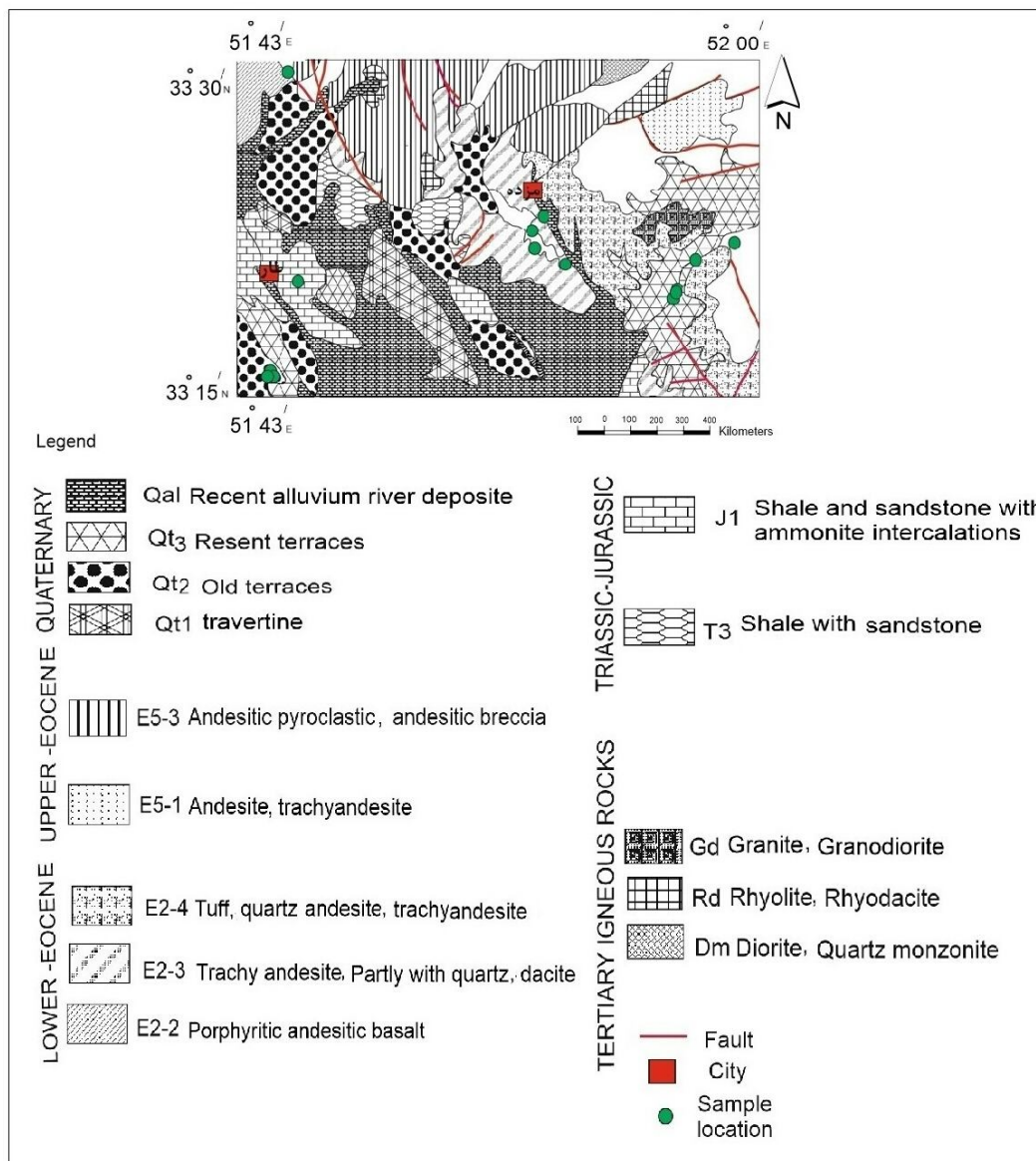
با توجه به پژوهش‌هایی که تاکنون بر روی پترولوژی سنگ‌های منطقه انجام شده است، در هیچ‌یک از مینرال شیمی کلینوپیروکسن برای دستیابی به تعیین سرشت ماگما، دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن اشاره‌ای نشده است. لذا در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده از شیمی این کانی، رهیافتی به تعیین سرشت ماگما و موارد یادشده داشته باشیم.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در بخش میانی نوار ماگمایی ارومیه دختر واقع شده و کهن‌ترین برون‌زد شناخته شده آن، واحدهای سنگی تریاس بالایی و ژوراسیک (لیاس) از جنس شیل با لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و آهک آمونیت‌دار است که در قسمت‌های جنوب و غرب مزده رخنمون یافته‌اند (Zahedi and Rahmati, 2000). واحدهای ائوسن ناحیه (Zahedi and Rahmati, 2000) با کنگلومرا شروع شده است و با واحدهای آذرین شامل آندزیت بازالت، آندزیت، ریولیت و نهشته‌های آذرآواری ادامه می‌یابد (شکل ۱). آندزیت‌های بازالتی پورفیری در ابتدای جاده روستای مزده رخنمون داشته و توسط گسل‌های منطقه قطع شده‌اند. بخش‌های وسیعی از شمال، جنوب و شرق مزده را واحدهای سنگی از جنس تراکی آندزیت، داسیت، آذرآواری‌ها و پیروکلاستیک‌ها به سن ائوسن بالایی تشکیل می‌دهند. واحدهای سنگی یادشده در قسمت‌هایی از شمال و شمال‌غرب روستای مزده نیز رخنمون دارند. در شرق روستای مزده توالی

به کلسیت، اپیدوت و کلریت اشاره کرد که اغلب حفرات سنگ را پر کرده‌اند.

پلاژیوکلازها نیمه‌شکل‌دار و دارای ماکل پلی‌سنتتیک یا منطقه‌بندی عادی هستند. از کانی‌های ثانویه این سنگ‌ها می‌توان



شکل ۱. زمین‌شناسی منطقه طرق - مزده، بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ طرق (زاهدی و رحمتی (Zahedi and Rahmati, 2000))

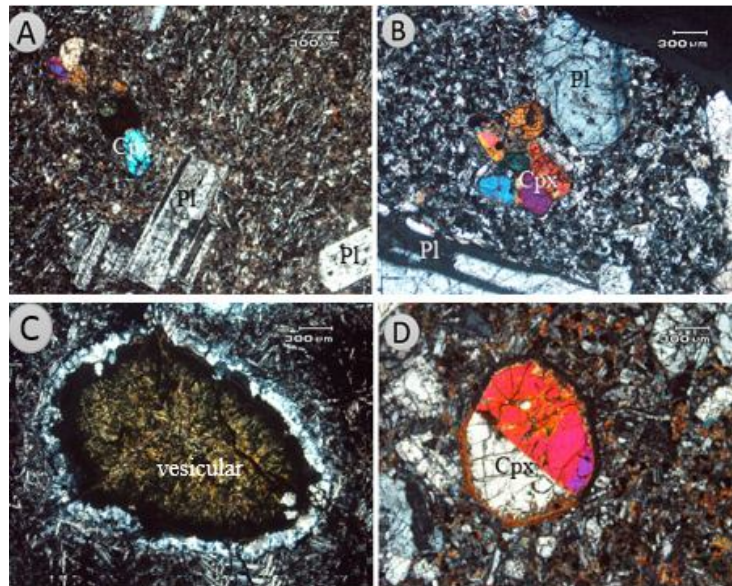
Fig. 1. Geological map of the Tarq-Mazdeh area, part of 1:100000 Tarq map (Zahedi and Rahmati, 2000)

پیروکسن‌های Ca-Mg-Fe، پیروکسن‌های Ca-Na، پیروکسن‌های Na و سایر پیروکسن‌ها تقسیم می‌شوند. در این نمودار، کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گستره آهن-منیزیم - کلسیم^۱ قرار گرفته‌اند (شکل ۳). برای نام‌گذاری

تعدادی از کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های آندزیتی و آندزیت‌بازالتی مورد پژوهش، توسط روش مایکروپروب مورد تجزیه قرار گرفتند (جدول ۱). در طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط موریموتو (Morimoto, 1989)، پیروکسن‌ها به چهار گروه

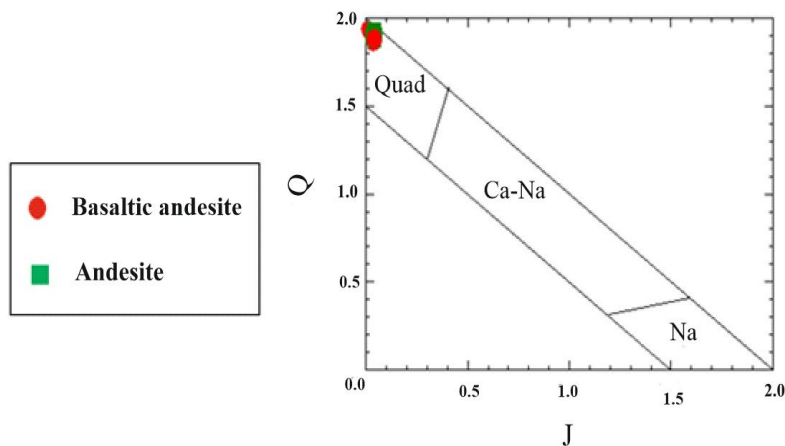
آندزیت‌بازالتی و آندزیت) از گونه کلسیک بوده و در محدوده
اوزیت واقع می‌شوند (شکل ۴).

پیروکسن‌های گروه Ca-Mg-Fe، نمونه‌ها از نمودار سه‌تایی
Wo-En-Fs (Morimoto, 1989) استفاده می‌شود. چنان‌که
در این نمودار دیده می‌شود، بیشتر کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های



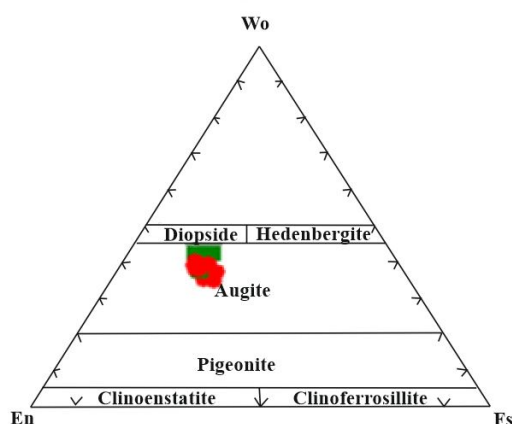
شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های آندزیتی و آندزیت‌بازالتی در منطقه طرق - مزده. A: بافت میکروولیتی پورفیری (نمونه GT9)، B: بافت گلومروپورفیری (نمونه GM14)، C: بافت بادامکی (نمونه GT9) و D: کلینوپیروکسن با ماکل ساده (نمونه GT6). Cpx: کلینوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، علائم اختصاری از کرتز (Kretz, 1983) اقتباس شده است.

Fig. 2. Microscopic images of andesite and basaltic andesite in Tarq- Mazdeh. A: Microlitic porphyritic texture (sample GT9), B: Glomporphyritic texture (sample GM14), C: Amygdaloidal texture, (sample GT9), and D: Clinopyroxene with simple twinning (sample GT6). Cpx: Clinopyroxene, Pl: Plagioclase, Abbreviations used in Fig from Kretz (1983) have been adapted.



شکل ۳. Q-J نمودار برای تعیین ترکیب کلینوپیروکسن‌های منطقه طرق - مزده (Morimoto, 1989). Na: پیروکسن‌های سدیم‌دار، Na-Ca: پیروکسن‌های سدیم-کلسیم‌دار، Quad: پیروکسن‌های آهن، منیزیم، کلسیم‌دار

Fig. 3. Q-J Diagram is used to determine the clinopyroxene composition (Morimoto, 1989). Na: Na pyroxene, Na-Ca: Na-Ca pyroxene, Quad: Ca-Mg-Fe pyroxene, Q: $Ca + Mg + Fe^{2+}$, J: $2Na$.



شکل ۴. نمودار W-En-Fs برای تعیین ترکیب کلینوپیکروکسن‌های موجود در سنگ‌های منطقه طرق- مزده (Morimoto, 1989). همه نمونه‌ها در منطقه اوژیت واقع شده‌اند. علائم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 4. Wo-En-Fs Diagram is used to determine the clinopyroxene composition of Tarq-Mazdeh area rocks (Morimoto, 1989). All of samples are located in augite field. Symbols are similar to legend in Fig. 3.

جدول ۱. نتایج آنالیز مایکروپروب بلورهای کلینوپیکروکسن در منطقه طرق- مزده به همراه محاسبه فرمول ساختاری آنها بر اساس ۶ اکسیژن

Table 1. The results of the microprobe analysis of clinopyroxene in Tarq-Mazdeh area with the structural formula based on 6 Oxygen.

Sample	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
SiO ₂	51.93	51.38	50.80	51.38	51.54	50.57	50.98
TiO ₂	0.51	0.64	0.67	0.57	0.47	0.61	0.57
Al ₂ O ₃	1.82	2.24	2.30	1.26	1.61	2.53	2.07
FeO t	10.10	10.36	11.57	13.89	10.55	10.70	11.15
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.04	0.00	0.07	0.00	0.01
MnO	0.26	0.26	0.32	0.47	0.36	0.29	0.31
MgO	15.39	15.27	15.06	14.89	15.27	15.17	15.41
CaO	19.18	18.94	18.22	16.91	19.40	19.58	18.44
Na ₂ O	0.31	0.25	0.21	0.19	0.25	0.27	0.27
total	99.54	99.39	99.27	99.60	99.57	99.79	99.24
TSi	1.93	1.92	1.91	1.93	1.92	1.88	1.91
TAl	0.06	0.07	0.09	0.05	0.07	0.11	0.08
TFe ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₁ Al	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₁ Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M ₁ Fe ₃	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.10	0.07
M ₁ Fe ₂	0.07	0.07	0.06	0.10	0.07	0.03	0.04
M ₁ Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₁ Mg	0.85	0.85	0.84	0.83	0.85	0.84	0.86
M ₂ Fe ₂	0.20	0.21	0.24	0.28	0.19	0.18	0.23
M ₂ Mn	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
M ₂ Ca	0.76	0.75	0.73	0.68	0.77	0.78	0.74
M ₂ Na	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز مایکروپروب بلورهای کلینوپیکروکسن در منطقه طرق- مزده به همراه محاسبه فرمول ساختاری آنها بر اساس ۶ اکسیژن

Table 1 (Continued). The results of the microprobe analysis of clinopyroxene in Tarq-Mazdeh area with the structural formula based on 6 Oxygen.

Sample	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Sum_cat	4	4	4	4	4	4	4
Ca	40.20	39.88	38.68	35.50	40.83	41.99	39.22
Mg	44.91	44.74	44.47	43.49	44.73	45.27	45.61
Fe₂-Mn	14.88	15.37	16.84	21.00	14.43	12.73	15.15
JD₁	0.87	0.95	0.61	0.00	0.00	0.00	0.13
AE₁	0.31	0.00	0.21	0.74	0.97	1.07	0.91
CFTS₁	1.77	2.08	2.71	1.49	2.47	4.32	2.97
CTTS₁	0.75	0.94	1.00	0.85	0.70	0.92	0.86
CATS₁	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WO₁	37.37	36.53	34.84	33.16	37.51	36.49	35.19
EN₁	44.57	44.51	44.35	43.50	44.57	45.01	45.37
FS₁	14.33	14.86	16.24	20.23	13.76	12.15	14.55
Q	1.89	1.89	1.88	1.91	1.89	1.85	1.87
J	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03
WO	39.38	39.06	37.59	34.62	39.45	39.73	37.76
EN	43.99	43.82	43.23	42.42	43.21	42.84	43.90
FS	16.62	17.11	19.16	22.95	17.33	17.42	18.33
WEF	97.67	98.12	98.36	98.53	98.09	97.88	97.96
JD	0.69	0.63	0.28	0.00	0.00	0.00	0.06
AE	1.64	1.24	1.35	1.47	1.91	2.11	1.97
Sample	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
SiO₂	51.25	52.09	52.25	52.52	52.81	51.17	51.26
TiO₂	0.63	0.32	0.34	0.35	0.29	0.69	0.68
Al₂O₃	2.14	0.92	0.87	0.86	1.03	2.17	2.03
FeO t	12.24	21.19	21.98	21.84	21.35	12.31	11.90
Cr₂O₃	0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.09
MnO	0.25	0.49	0.57	0.49	0.50	0.32	0.33
MgO	14.96	20.26	20.31	20.32	20.56	15.55	15.52
CaO	18.29	4.63	4.51	4.34	4.76	16.90	18.05
Na₂O	0.31	0.09	0.09	0.07	0.11	0.27	0.25
total	100.14	100.06	100.97	100.87	101.45	99.53	100.17
TSi	1.93	1.94	1.94	1.95	1.94	1.91	1.90
TAl	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.08	0.08
TFe₃	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
M₁Al	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
M₁Ti	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
M₁Fe₃	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.07
M₁Fe₂	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز مایکروپروب بلورهای کلینوپیکروکسن در منطقه طرق - مزده به همراه محاسبه فرمول ساختاری آنها بر اساس ۶ اکسیژن
Table 1 (Continued). The results of the microprobe analysis of clinopyroxene in Tarq-Mazdeh area with the structural formula based on 6 Oxygen.

Sample	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
M ₁ Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₁ Mg	0.84	0.95	0.94	0.95	0.94	0.87	0.86
M ₂ Mg	0.00	0.17	0.18	0.17	0.18	0.00	0.00
M ₂ Fe ₂	0.23	0.61	0.61	0.63	0.60	0.29	0.25
M ₂ Mn	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M ₂ Ca	0.73	0.18	0.18	0.17	0.18	0.67	0.72
M ₂ Na	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
Sum_cat	4	4	4	4	4	4	3.99
Ca	38.77	9.54	9.28	8.86	9.71	35.74	38.10
Mg	44.13	58.13	58.10	57.72	58.28	45.78	45.60
Fe ₂ -Mn	17.09	32.31	32.61	33.41	32.00	18.47	16.29
JD ₁	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00
AE ₁	0.00	0.36	0.36	0.29	0.42	0.26	1.00
CFTS ₁	1.58	1.69	2.11	1.43	1.90	2.18	2.82
CTTS ₁	0.93	0.47	0.50	0.50	0.42	1.03	1.01
CATS ₁	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WO ₁	35.83	7.41	6.72	6.96	7.42	32.35	34.09
EN ₁	43.79	58.40	58.43	58.01	58.50	45.55	45.40
FS ₁	16.54	31.64	31.85	32.78	31.31	17.84	15.66
Q	1.89	1.92	1.91	1.93	1.92	1.88	1.87
J	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
WO	38.18	9.30	8.96	8.67	9.45	34.90	36.68
EN	43.46	56.66	56.08	56.49	56.72	44.70	43.89
FS	18.35	34.02	34.94	34.83	33.82	20.38	19.42
WEF	97.66	99.31	99.27	99.42	99.15	97.97	98.08
JD	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00
AE	1.25	0.68	0.72	0.57	0.84	1.53	1.91
Sample	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
SiO ₂	50.82	51.12	50.79	51.20	51.23	51.90	51.27
TiO ₂	0.57	0.62	0.65	0.64	0.55	0.44	0.47
Al ₂ O ₃	2.22	2.48	2.01	2.28	1.91	1.54	2.40
FeO t	11.38	12.32	12.90	13.16	13.18	9.02	9.30
Cr ₂ O ₃	0.00	0.09	0.05	0.06	0.06	0.01	0.04
MnO	0.34	0.32	0.32	0.31	0.34	0.33	0.23
MgO	15.15	14.78	14.85	14.24	15.11	15.00	14.96
CaO	18.62	18.42	17.25	17.40	17.24	20.52	20.45
Na ₂ O	0.31	0.28	0.22	0.27	0.26	0.32	0.29
total	99.45	100.53	99.09	99.66	99.92	99.11	99.48

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز مایکروپروب بلورهای کلینوپیکروکسن در منطقه طرق- مزده به همراه محاسبه فرمول ساختاری آنها بر اساس ۶ اکسیژن
Table 1 (Continued). The results of the microprobe analysis of clinopyroxene in Tarq-Mazdeh area with the structural formula based on 6 Oxygen.

Sample	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
TSi	1.90	1.90	1.91	1.93	1.91	1.94	1.91
TAl	0.09	0.09	0.08	0.07	0.08	0.05	0.08
TFe ₁	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₁ Al	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01
M ₁ Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M ₁ Fe ₃	0.08	0.06	0.05	0.02	0.06	0.04	0.06
M ₁ Fe ₂	0.05	0.08	0.08	0.12	0.07	0.09	0.07
M ₁ Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₁ Mg	0.84	0.82	0.83	0.80	0.84	0.83	0.83
M ₂ Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M ₂ Fe ₂	0.21	0.23	0.27	0.26	0.27	0.14	0.15
M ₂ Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
M ₂ Ca	0.74	0.73	0.69	0.70	0.69	0.82	0.81
M ₂ Na	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Sum_cat	4	4	3.99	4	4	4	3.99
Ca	39.88	39.09	36.70	36.82	36.49	43.11	43.48
Mg	45.15	43.63	43.97	41.94	44.49	43.85	44.28
Fe ₂ -Mn	14.96	17.26	19.32	21.23	19.01	13.02	12.23
JD ₁	0.05	0.57	0.45	1.04	0.18	0.55	0.86
AE ₁	1.17	0.52	0.46	0.00	0.81	0.66	0.36
CFTS ₁	3.44	3.30	2.25	1.13	2.60	1.66	3.28
CTTS ₁	0.85	0.93	0.98	0.95	0.81	0.65	0.70
CATS ₁	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00
WO ₁	35.32	34.65	33.33	33.96	32.90	40.51	39.13
EN ₁	44.86	43.39	43.80	41.72	44.3	43.56	43.91
FS ₁	14.29	16.62	18.71	20.59	18.36	12.38	11.73
Q	1.86	1.86	1.89	1.89	1.88	1.89	1.87
J	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04
WO	38.10	37.70	35.76	36.45	35.31	42.13	41.97
EN	43.14	42.08	42.83	41.51	43.05	42.86	42.74
FS	18.74	20.21	21.40	22.03	21.62	15.00	15.28
WEF	97.59	97.84	98.26	97.94	98.02	97.60	97.75
JD	0.02	0.29	0.25	1.25	0.10	0.46	1.93
AE	2.38	1.86	1.47	0.79	1.86	0.43	1.80

۳) هرچه تعداد نقاط آنالیز شده بر روی نمودارهای تشخیصی، بیشتر از ۱۰ نقطه باشد، نتایج دقیق‌تر خواهد بود (Nisbet and Pearce, 1977). در این پژوهش سعی شده است، تمامی موارد یادشده، رعایت شود.

تعیین سرشت ماگمایی سنگ‌ها بر اساس شیمی کلینوپیروکسن

از بین کانی‌های موجود در سنگ‌ها، کلینوپیروکسن می‌تواند همه عناصر موجود در ماگما را در خود جای دهد؛ بنابراین ترکیب آن می‌تواند نماینده نوع ماگمایی باشد که از آن نشأت گرفته است.

الف) نمودار SiO_2 در مقابل Al_2O_3

میزان Al و Ti درون شبکه ساختاری پیروکسن به درجه آلکالینته ماگما بستگی دارد (Le Bas, 1962). با استفاده از مقدار SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، دسته‌های ماگمایی پرآلکان، آلکان و ساب‌آلکان را از هم متمایز کرده است. با استفاده از این نمودار، کلینوپیروکسن‌های موجود در آندزیت بازالتی و آندزیت‌های مورد بررسی در محدوده ساب‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۵).

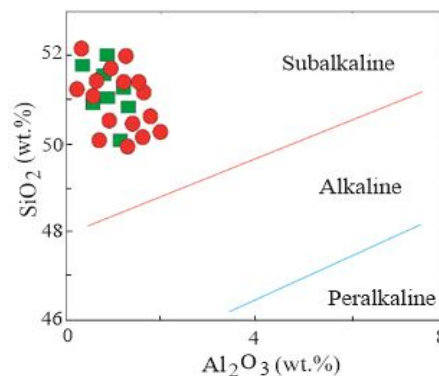
ب) نمودار TiO_2 در مقابل Al_2O_3

در این نمودار (شکل ۶)، بیشتر نمونه‌ها در محدوده کالک‌آلکان و تعداد کمی در محدوده تولیتی واقع می‌شوند.

در ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها، نه تنها ساختار و ترکیب شیمیایی مذاب مادر، بلکه عوامل دیگری مانند ضریب جدایش عناصر در کلینوپیروکسن، کنترل‌های فیزیکی مثل دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن و ترتیب تبلور و سرعت سرد شدن ماگما تأثیر گذارند (Nisbet and Pearce, 1977). به عبارتی دیگر، همیشه ترکیب کلینوپیروکسن بیانگر ترکیب ماگمایی نیست که از آن متبلور شده است و باید نقش دیگر عوامل را نیز در نظر گرفت. به همین دلیل، اگر بنا باشد از روی ترکیب کلینوپیروکسن به ترکیب ماگمایی که این کانی از آن متبلور شده پی‌برد، باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

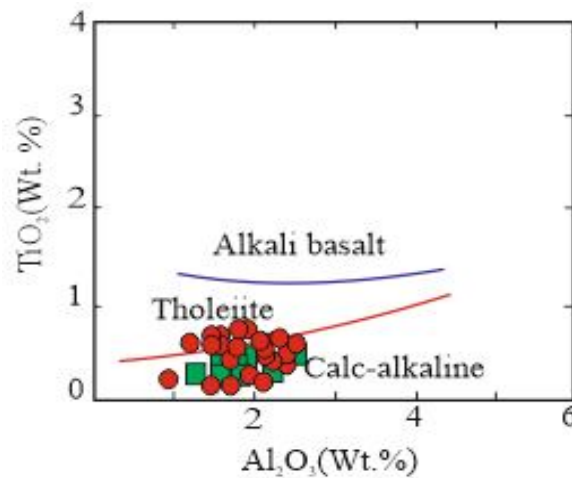
۱) از آنجا که سرعت سرد شدن بر روی جدایش کاتیون‌ها (به‌ویژه کاتیون‌های عناصر کمیاب) توسط کانی‌های کلینوپیروکسن و در نتیجه دور شدن ترکیب کلینوپیروکسن از ترکیب سنگ کل تأثیر می‌گذارد، بهتر است برای تعیین شرایط تک‌نومو ماگمایی از نتایج آنالیز کلینوپیروکسن‌های فنوکریست به جای کلینوپیروکسن‌های زمینه استفاده شود؛ زیرا ترکیب فنوکریست‌های کلینوپیروکسن کمتر تحت تأثیر سرعت سرد شدن ماگما قرار می‌گیرد (Nisbet and Pearce, 1977).

۲) حتی المقدور از عناصری برای طراحی نمودارهای تشخیصی دسته‌های ماگمایی و محیط زمین‌ساختی استفاده شود که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در ماگماهای محیط‌های مختلف داشته باشند (Le Bas, 1962).



شکل ۵. نمودار میزان SiO_2 در مقابل Al_2O_3 کلینوپیروکسن‌ها (Le Bas, 1962). نمونه‌های منطقه طرق - مزده بر روی این نمودار دارای ترکیب ساب‌آلکان هستند. علائم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 5. SiO_2 - Al_2O_3 diagram of clinopyroxens (Le Bas, 1962). The Tarq- Mazdeh area samples are located in subalkaline field. Symbols are similar to legend in Fig. 3.



شکل ۶. نمودار TiO_2 - Al_2O_3 در مقابل Al_2O_3 کلینوپیروکسن‌ها (Le Bas, 1962). نمونه‌های منطقه طرق - مزده در محدوده کالک‌آلکان واقع می‌شوند. علائم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 6. TiO_2 - Al_2O_3 diagram of clinopyroxenes (Le Bas, 1962). The Tarq- Mazdeh area samples are located in calcalkaline field. Symbols are similar to legend in Fig. 3.

ب) نمودار SiO_2 در مقابل Al_2O_3

میزان Ti و Al درون شبکه ساختاری پیروکسن به فعالیت SiO_2 ماگمایی که از آن متبلور می‌شود، بستگی دارد؛ به طوری که مقدار این عناصر از ماگمای ساب‌آلکان به سمت ماگمای آلکان و پرآلکان افزایش می‌یابد. با استفاده از این ویژگی، محیط‌های زمین‌ساختی سنگ‌ها از یکدیگر قابل تفکیک هستند (Le Bas, 1962). چنان‌که دیده شد آندزی بازالت‌ها و آندزیت‌های منطقه در محدوده ساب‌آلکان قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه سنگ‌های WPT، VAB و OFB همگی در محدوده ساب‌آلکان قرار می‌گیرند، تشخیص این سه گروه از یکدیگر مشکل است. درجه جدایش ماگمای اولیه و شرایط تبلور به چنین هم‌پوشانی‌هایی منجر می‌شود (Le Bas, 1962) (شکل ۸).

ژئوترمومتری کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های منطقه

سوئسو (Soesoo, 1997) بر اساس ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها، نموداری را ابداع کرد که با استفاده از آن می‌توان دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های سنگ را تعیین کرد. طبق این روش، دمای تشکیل اغلب پیروکسن‌ها ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰

تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های منطقه بر اساس

شیمی کانی کلینوپیروکسن

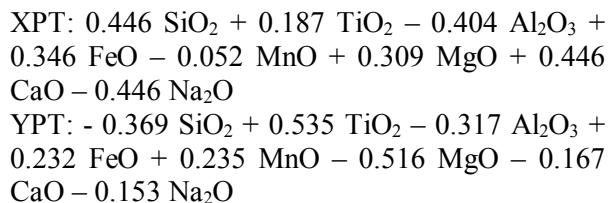
از نمودارهایی که برای تشخیص محیط‌های زمین‌ساختی ماگما با استفاده از ترکیب کلینوپیروکسن استفاده می‌شود، می‌توان به نمودارهای زیر اشاره کرد:

الف) نمودار F1-F2

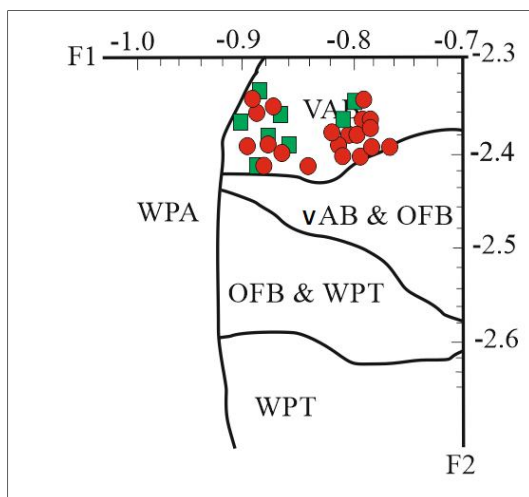
نمودار F1-F2 (Nisbet and Pearce, 1977) به خوبی کلینوپیروکسن‌های سنگ‌های آتشفشانی درون صفحه‌ای را از انواع دیگر جدا می‌کند. جدایش ماگمای WPT از ماگمای VAB نیز به خوبی صورت می‌گیرد؛ ولی هم‌پوشانی قابل ملاحظه‌ای بین WPT-OFB و VAB-OFB دیده می‌شود. نتایج بررسی نمونه‌ها در این نمودار (شکل ۷)، نشان‌دهنده این است که نمونه‌های آتشفشانی منطقه در قلمرو کمان‌های آتشفشانی واقع شده‌اند. فرمول‌های محاسبه F1 و F2 بر اساس آنالیز نقطه‌ای کانی کلینوپیروکسن به صورت زیر است:

$$F1 = -0.012 SiO_2 - 0.0807 TiO_2 + 0.0026 Al_2O_3 - 0.0012 FeO - 0.0026 MnO + 0.0087 MgO - 0.0128 CaO - 0.419 Na_2O$$

$$F2 = -0.0469 SiO_2 - 0.0818 TiO_2 + 0.0212 Al_2O_3 - 0.0041 FeO - 0.1435 MnO - 0.0029 MgO + 0.0085 CaO + 0.016 Na_2O$$

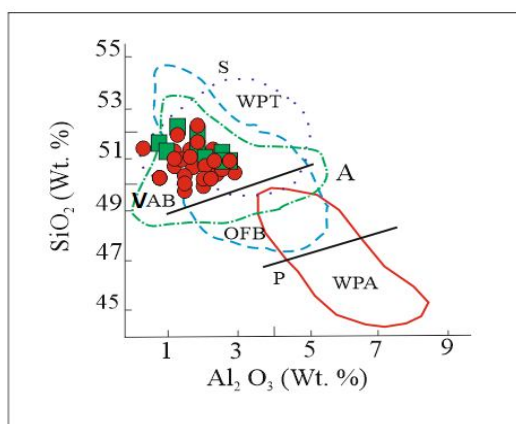


درجه سانتی گراد محاسبه شد. (شکل ۹). به عبارت دیگر، این بازه دمایی نشان‌دهنده تغییرات دما در هنگام تبلور کلینوپیروکسن هاست. XPT و YPT مورد استفاده در نمودار، بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند:



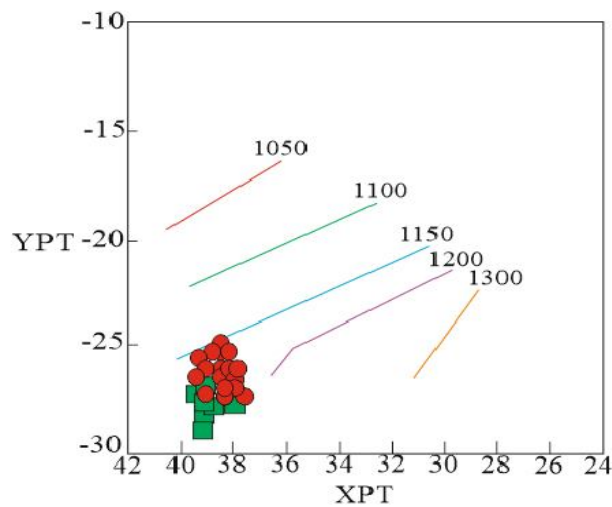
شکل ۷. تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های منطقه طرق- مزده در نمودار F1 و F2، با استفاده از ترکیب کلینوپیروکسن (Nisbet and Pearce, 1977). نمونه‌های مورد بررسی در محدوده آتشفشانی‌های کمان ماگمایی قرار گرفته‌اند. آتشفشانی‌های بستر اقیانوس، WPT: آتشفشانی‌های تولیتی میان صفحه‌ای، WPA: آتشفشانی‌های آلکان میان صفحه‌ای، VAB: آتشفشانی‌های کمان ماگمایی. علائم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 7. Determination of tectonic setting of Tarq-Mazdeh rocks in F1-F2 diagram (Nisbet and Pearce, 1977) using clinopyroxene composition. The Tarq-Mazdeh area samples are located in Volcanic Arc rocks. OFB: Ocean-Floor rocks, WPT: Within Plate Tholeiitic rocks, WPA: Within Plate Alkali rocks, VAB: Volcanic Arc rocks. Symbols are similar to legend in Fig. 3.



شکل ۸. نمودار میزان SiO₂ در برابر Al₂O₃ در کلینوپیروکسن (Le Bas, 1962). S: ساب‌آلکان، P: پرآلکان، A: آلکان. نمونه‌های مورد بررسی طرق- مزده در محدوده ساب‌آلکان قرار گرفته‌اند. علائم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 8. Al₂O₃- SiO₂ diagram of clinopyroxens (Le Bas, 1962). S: Subalkaline P: Peralkaline, A: Alkaline. The Tarq-Mazdeh area samples are located in subalkaline field. Symbols are similar to legend in Fig. 3.



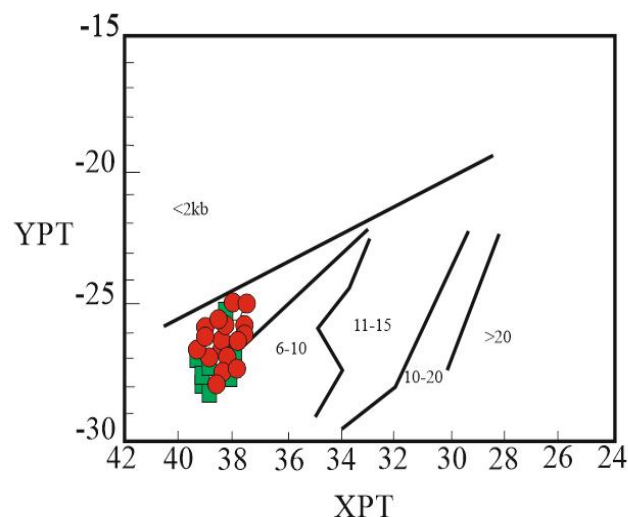
شکل ۹. تعیین دمای کلینوپیروکسن‌ها با استفاده از روش سوئسو (Soesoo, 1997). دمای تشکیل اغلب کلینوپیروکسن سنگ‌های منطقه طرق-مзде ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. علایم به‌کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 9. Determine of clinopyroxene temperature using Soesoo method (Soesoo, 1997). Formation temperature of clinopyroxene of the Tarq-Mazdeh area is 1150 – 1200° C. Symbols are similar to legend in Fig. 3.

سوئسو (Soesoo, 1997) و با استفاده از میزان XPT و YPT، فشار تبلور اغلب کلینوپیروکسن‌ها در سنگ‌های مورد بررسی، بین ۲ تا ۵ کیلو بار است (شکل ۱۰).

ژئوبارومتری کلینوپیروکسن‌ها در سنگ‌های مورد پژوهش

ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها، ابزاری مهم برای سنجش فشار در سنگ‌های آذرین محسوب می‌شود. بر اساس نمودار



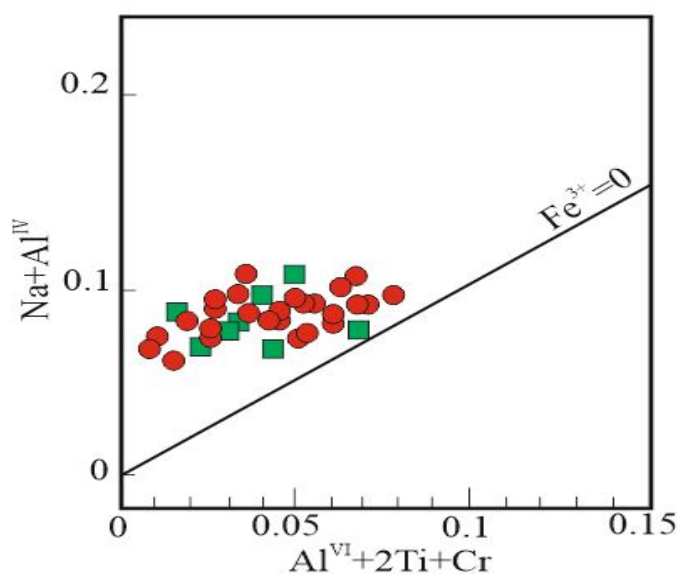
شکل ۱۰. نمودار تعیین فشار کلینوپیروکسن‌ها (Soesoo, 1997)، فشار تشکیل کلینوپیروکسن سنگ‌های منطقه طرق-مзде ۲ تا ۵ کیلو بار است. علایم به‌کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 10. Diagram of determination of oxygen fugacity of clinopyroxene formation environment (Schweitzer et al, 1979). The Tarq- Mazdeh samples plot above $Fe^{3+}=0$ line due to high oxygen fugacity in clinopyroxen formation environment. Symbols are similar to legend in Fig. 3.

تعیین فوگاسیته اکسیژن ماگما

فوگاسیته اکسیژن تأثیر ویژه‌ای در تغییر دمای لیکیدوس و ترکیب مذاب و بلور دارد (France et al., 2010). علاوه بر این، فوگاسیته اکسیژن عاملی مؤثر در کنترل فرایندهای ماگمایی بوده و بر توالی تبلور نوع کانی‌های تبلور یافته تأثیر گذار است (Moretti, 2005). پژوهشگرانی چون شوئیتزر و همکاران (Schweitzer et al., 1979) معتقدند میزان آهن Fe^{3+} در محیط تشکیل سنگ‌ها وابسته به فوگاسیته اکسیژن است. آنها نمودار تغییرات $Al^{IV} + Na$ در برابر $Al^{VI} + 2Ti + Cr$ (شکل ۱۱) را برای تعیین فوگاسیته اکسیژن در محیط تبلور

کلینوپیکروکسن ارائه دادند. این نمودار بر اساس میزان Al موجود در موقعیت تتراندتری با Al و Cr^{3+} در موقعیت اکتاندتری، تنظیم شده است. در این نمودار منحنی $Fe^{3+}=0$ ، خط موازنه $Al^{IV} + Na$ با $Al^{VI} + 2Ti + Cr$ است و قرارگیری نمونه‌ها در بالا و یا زیر خط $Fe^{3+}=0$ بیانگر بالا یا پایین بودن فوگاسیته اکسیژن در محیط تبلور کلینوپیکروکسن‌هاست. چنان که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌های منطقه در محدوده فوگاسیته بالای اکسیژن قرار می‌گیرند. این فوگاسیته بالا با حضور کانی کدر تیتانومگنتیت در سنگ‌های مورد پژوهش تأیید می‌شود.



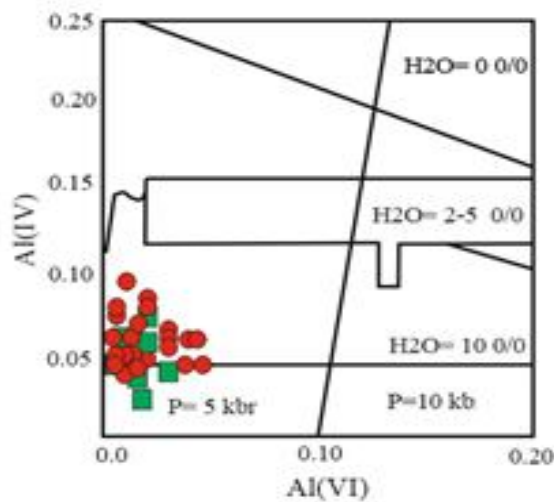
شکل ۱۱. نمودار تعیین میزان فوگاسیته اکسیژن محیط تشکیل کلینوپیکروکسن‌ها (Schweitzer et al, 1979). قرارگیری نمونه‌های منطقه طرق - مزده بالای خط $Fe^{3+} = 0$ به بالا بودن فوگاسیته اکسیژن در محیط تبلور کلینوپیکروکسن‌ها مربوط است. علائم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 11. Diagram of determination of oxygen fugacity of clinopyroxene formation environment (Schweitzer et al, 1979). Tarq- Mazdeh samples plot above $Fe^{3+}=0$ line due to high oxygen fugacity in clinopyroxene formation environment. Symbols are as legend in Fig. 3.

ماگماست (Helz, 1973). فشار بخار آب کمتر از ۱۰ کیلو بار و مقدار آب ماگمایی بین ۵ تا ۱۰ درصد را برای زمان تبلور کلینوپیکروکسن‌های سنگ‌های منطقه نشان می‌دهد (شکل ۱۲).

تعیین فشار و درصد تقریبی آب ماگما توسط کانی کلینوپیکروکسن

توزیع آلومینیم در جایگاه تتراندتری (Al^{IV}) و اکتاندتری (Al^{VI}) کلینوپیکروکسن، روشی مناسب برای تخمین درصد تقریبی آب



شکل ۱۲. تعیین درصد آب ماگما با توزیع Al در موقعیت‌های تترائدری و اکتائدری در کلینوپیروکسن‌های منطقه طرق- مزده (Helz, 1973)، علایم به کار رفته مشابه راهنمای شکل ۳ است.

Fig. 12. Determination of magmatic water using Al distribution in tetrahedral and octahedral position in clinopyroxenes of the Tarq- Mazdeh area (Helz, 1973). Symbols are similar to legend in Fig. 3.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام‌شده، میزان آب ماگمایی ۵ تا ۱۰ درصد را برای زمان تبلور پیروکسن‌های سنگ‌های منطقه نشان می‌دهد. بالابودن نسبی مقدار آب ماگما را می‌توان به تشکیل ماگما در مناطق فرورانش نسبت داد. طی تکامل ماگمایی و افزایش میزان آب ماگما، فوگاسیته اکسیژن ماگما نیز افزایش می‌یابد. سرشت ماگمایی سنگ‌ها بر اساس نمودارهای ژئوشیمیایی پیروکسن‌ها، کالک‌آلکان است که در محیط مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس زیر صفحه ایران مرکزی تشکیل شده است. کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر، کمان ماگمایی نوع آندی است (Berberian et al., 1982). بسیاری از پژوهشگران نظیر بربریان و کینگ (Berberian and King, 1981)، محجل و همکاران (Mohajjel et al., 2003) و علوی (Alavi, 1994) بر این باورند که کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر بر اثر فرورانش صفحه اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه قاره‌ای ایران مرکزی تشکیل شده است. البته در زمان برخورد نهایی این فرایند اختلاف‌نظرهای جزئی وجود دارد. برخی نظیر بربریان و کینگ (Berberian and King, 1981) سن برخورد را کرتاسه پایانی می‌دانند.

منطقه مورد بررسی در شمال اصفهان و جنوب نطنز حداثی طرق- مزده واقع شده است. طیف سنگی مشاهده‌شده در منطقه از انواع اسیدی تا نسبتاً بازیک (ریولیت به مقدار کم، آندزیت و آندزیت‌بازالتی) تغییر می‌کند. از جمله بافت‌های مشاهده‌شده در این سنگ‌ها می‌توان میکرولیتی پورفیری، گلوپورپورفیری و بادامکی را نام برد. کانی‌های شاخص سنگ‌های حدواسط و نسبتاً بازیک منطقه، الیوین ایدینگزیتی شده، پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن‌هایی به شکل فوکرست گاه با ماکل ساده هستند. کلینوپیروکسن‌ها اغلب دارای ترکیب اوژیت هستند. دماهای محاسبه‌شده کلینوپیروکسن‌ها نشان‌دهنده آن است که اغلب آنها در طیف دمایی بین ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تبلور شده‌اند. طیف دمایی مزبور، گویای تغییرات دما حین تبلور کلینوپیروکسن است. با توجه به نمودار فشارسنجی، فشار تشکیل کلینوپیروکسن‌ها کمتر از ۱۰ کیلو بار و در گستره ۲ تا ۵ کیلو بار برآورد می‌شود که با توجه به جنس سنگ‌های منطقه معقول به نظر می‌رسد. تبلور تیتانومگنتیت در این سنگ‌ها بیانگر بالابودن میزان فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل آنهاست.

به صفحه ایران مرکزی که اغلب صاحب‌نظران آن را پس از ائوسن میانی گزارش کرده‌اند، می‌توان گفت که شکل‌گیری مجموعه مورد بررسی هم‌زمان با فرورانش ایجاد شده و با داده‌های ژئوشیمی مطابقت دارد.

گروه دیگر میوسن را زمان برخورد معرفی کرده‌اند (Mohajjel et al., 2003)؛ اما گروه قابل توجهی ائوسن پایانی را زمان این حادثه می‌دانند (Allen and Armstrong, 2008; Agard et al., 2005). با توجه به سن نسبی به دست آمده از مجموعه آتشفشانی جنوب نظنز و سن برخورد صفحه اقیانوسی نئوتتیس

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3): 401–419.
- Alavi, M., 1994. Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3–4): 211–238.
- Allen, M.B. and Armstrong, H.A., 2008. Arabia–Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265(1–2): 52–58.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265.
- Berberian, F., Muir, I.D., Pankhurst, R.J., and Berberian, M., 1982. Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society*, 139(5): 605–614.
- Falahaty, S., Noghrean, M., Sharifi, M., Torabi, Gh., Safaei, H. and Mackizadeh, M., 2016. Clinopyroxene application in petrogenesis identification of volcanic rocks associated with salt domes from Shurab (Southeast Qom). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 21–38. (in Persian with English abstract)
- France, L., Ildefonse, B., Koepke, J. and Bech, F., 2010. A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(3–4): 340–346.
- Ghadirpour, M., 2017. Petrology and geochemistry of volcanic rocks in south of Natanz (between Tarq and Mazdeh). M.Sc. Thesis, Payam Noor University, Isfahan, Iran, 110 pp.
- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting range at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity. *Journal of Petrology*, 17(2): 139–193.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 68(1–2): 277–279.
- Kushiro, I., 1960. Si–Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. *American Journal of Science*, 258(5): 548–554.
- Le Bas, N.J., 1962. The role of aluminous in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267–88.
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 139–154.
- 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(4): 397–412.
- Mohammadi, S.S., Bayani, R., Nakhai, M., Chung, S.L. and Zarrinkoub, M.H., 2017. Petrography, mineral chemistry, geochemistry and geotectonic setting of tertiary volcanics of Shushk (East of Sarbisheh), Southern Khorasan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(1): 167–186. (in Persian)
- Moretti, R., 2005. Polymerization, basicity, oxidation state and their role in ionic

- modelling of silicate melts. *Geophysics*, 48(4–5): 583–608.
- Morimoto, N., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 27(1): 143–156.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotite. Part 1. and Calibration testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(5): 541–554.
- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition of mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 161–173.
- Putirka, K., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61–120.
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2016. Application of clinopyroxene chemistry to interpret the physical conditions of ascending magma, a case study of Eocene volcanic rocks in the Ghohrud area (North of Isfahan). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 61–78. (in Persian with English abstract)
- Schweitzer, E.L., Papike, J.J. and bence, A.E., 1979. Statistical analysis of clinopyroxenes from deep sea basalts. *American Mineralogist*, 64(2): 501–513.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-T estimations. *GFF*, 119(1): 55–60.
- Zahedi, M. Rahmati, M., 2000. Geological map of Tarq, Scale 1:100000. Geological Survey and Mineral Exploration. (in Persian)



Petrogenesis of Tarq-Mazdeh volcanic rocks based on clinopyroxene chemistry (South of Natanz, Urumieh Dokhtar volcanic belt)

Marzieh Ghadirpour¹, Jamshid Ahmadian^{1*}, Shahzad Sherafat¹ and Mohammad Ali Mackizadeh²

1) Department of Geology, Payame Noor University, Iran

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

Submitted: May 30, 2017

Accepted: May 12, 2018

Keywords: *Calc-alkaline, Volcanic arc, Tarq-Mazdeh, Urumieh-Dokhtar*

Introduction

Clinopyroxene is one of the most common of the rock forming minerals. Its long formation period (from the earliest crystallization of magma in the core of phenocrysts to the final microcrystalline crystallization in the rock background) can show the history of the host magma crystallization. The composition of clinopyroxene, especially those phenocrysts, in volcanic rocks could well establish the magmatic nature of the host lava.

The clinopyroxene composition can point out the magmatic series, the tectonic environment and the source rock (Kushiro, 1960; Nisbet and Pearce, 1977, Leterrier et al., 1982). In addition, it is possible to estimate the temperature and pressure of rock formation by studying the chemistry of clinopyroxenes (Nimis and Taylor, 2000; Putirka, 2008).

The study area is located in the middle part of the Urumieh- Dokhtar magmatic belt. It exactly lies in the area between Tarq and Mazdeh, its longitude is 51° 43' to 52° 00' E and its latitude is 33° 15' to 33° 30' N. The Eocene magmatic rocks vary from rather basic to acidic in composition, but they are mainly intermediate and they are rather basic rocks (Ghadirpour, 2017). Previously, various studies on using the chemical composition of the major elements of clinopyroxene were conducted to discover the conditions for the formation of igneous rocks in different parts of Iran (Sayari and Sharifi, 2016; Falahaty et. al., 2016; and Mohammadi et. al., 2017).

So far, in all of these studies that have been

conducted on volcanic rocks, the mineral chemistry of clinopyroxene has not been used to evaluate the magma's features such as temperature, pressure, and oxygen fugacity. In this article, we are going to study the mentioned features of magma by using clinopyroxene chemistry.

Materials and Methods

To determine the geotectonic setting and the physicochemical conditions of volcanic rocks, thirty thin sections have been prepared. Their minerals and texture have been studied by using polarizing binocular microscope (Olympus BH-2). After detailed mineralogy and selection of suitable samples, microprobe analysis is done by EPMA (JEOL- JXA) in the Naruto University, Japan. The mineral analysis is performed at 15 nA intensity of current and accelerate voltage of 15 Kev.

Discussion

The study area is situated in the South of Natanz, between Tarq and Mazdeh villages. The volcanic rocks vary from acidic to rather basic (basaltic andesite to andesite and rarely rhyolite). Microlitic porphyric, glomeroporphyric and vesicular are some textures which are observed in the volcanics. Plagioclase and euhedral clinopyroxene occasionally with simple twinning are characteristic minerals of rocks.

According to Wo-En-Fs diagram (Morimoto, 1989), clinopyroxene shows mainly the composition of augite.

*Corresponding authors Email: jamshidahmadian@yahoo.com

It is concluded that the magmatic series of rocks is calc-alkaline which is in relation to the subduction of the Neotethys oceanic crust under the central Iranian plate.

There are several diagrams that are used for this purpose which are as follows.

The Al_2O_3 - Ti_2O diagram (Le Bas, 1962): In this diagram, the studied clinopyroxene shows the nature of calc-alkaline. One of the diagrams used to determine the tectonic setting according to clinopyroxene composition is the F1- F2 diagram (Nisbet and Pearce, 1977). Based on this diagram, the Tarq- Mazdeh volcanic rocks belong to the magmatic arc environment.

The Clinopyroxene temperatures are calculated by using a variety of methods which indicate that most of clinopyroxene in temperature range of 1150 to 1200°C has been crystallized (Soesoo, 1997). The temperature indicates changes in crystallization of clinopyroxene.

Result

The calculated temperatures of clinopyroxenes by using various methods show that they are crystallized in the temperature range of 1150 to 1200°C. It mainly means that there is a change in temperature during clinopyroxene crystallization. By considering the barometric diagram, the pressure of clinopyroxene formation has been determined below 10 kb, in the depth range of 2 to 5 km.

References

- Falahaty, S., Noghreyan, M., Sharifi, M., Torabi, Gh., Safaei, H. and Mackizadeh, M., 2016. Clinopyroxene application in petrogenesis identification of volcanic rocks associated with salt domes from Shurab (Southeast Qom). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 21–38. (in Persian with English abstract)
- Ghadirpour, M., 2017. Petrology and geochemistry of volcanic rocks in south of Natanz (between Tarq and Mazdeh). M.Sc. Thesis, Payam Noor University, Isfahan, Iran, 110 pp.
- Kushiro, I., 1960. Si- Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. *American Journal of Science*, 258(5): 548–554.
- Le Bas, N.J., 1962. The role of aluminous in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267–88.
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(1): 139–154.
- Mohammadi, S.S., Bayani, R., Nakhai, M., Chung, S.L. and Zarrinkoub, M.H., 2017. Petrography, mineral chemistry, geochemistry and geotectonic setting of tertiary volcanics of Shushk (East of Sarbisheh), Southern Khorasan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(1): 167–186. (in Persian)
- Morimoto, N., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 27(1): 143–156.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotite. Part 1. and Calibration testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(5): 541–554.
- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition of mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 161–173.
- Putirka, K., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61–120.
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2016. Application of clinopyroxene chemistry to interpret the physical conditions of ascending magma, a case study of Eocene volcanic rocks in the Ghohrud area (North of Isfahan). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 61–78. (in Persian with English abstract)
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-T estimations. *GFF*, 119(1): 55–60.