

# کاربرد ترکیب کلینوپیروکسن‌ها در تعیین شرایط دما- فشارسنجی بازالت‌های آتشفشان‌های احمدآباد، طهمورث و قره‌طوره (شمال قروه- کردستان)

اشرف تorkian<sup>۱\*</sup> و نفیسه صالحی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران  
<sup>۲</sup>دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۸/۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: ۱۰/۰۷/۱۳۹۷

## چکیده

آتشفشان‌های احمدآباد، طهمورث و قره‌طوره بخشی از مراکز آتشفشانی موجود در محور قروه- بیجار و جزیی از برونزدهای ماگمایی بازوی شمالی زون سندج- سیرجان، با عنوان همدان- تبریز را تشکیل می‌دهند. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی به‌طور عمده بازالت است و بافت‌های پورفیری، میکرولیتیک پورفیری و گلوپورفیری به وفور قابل مشاهده هستند. فنوکریست‌های عمده شامل کلینوپیروکسن و الیون هستند. فراوانی کلینوپیروکسن در بازالت‌های قره‌طوره کمتر است و کانی الیون به عنوان فنوکریست عمده در سنگ‌های این مرکز آتشفشانی یافت می‌شود. درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن منطقه‌بندی عادی و در برخی موارد معکوس و آثار خوردگی خلیجی نشان می‌دهند که حاکی از عدم تعادل با مذاب میزبان است. نتایج بررسی شرایط فیزیکو شیمیایی حاکم بر ماگما (دما و فشار) با استفاده از کانی کلینوپیروکسن نشان می‌دهد که سنگ‌های آتشفشان‌های احمدآباد و طهمورث در دمای ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳ تا ۱۱ کیلوبار و بازالت‌های آتشفشان قره‌طوره در دمای ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰ تا ۳ کیلوبار تشکیل شده‌اند. فوگاسیته بالای اکسیژن در این سنگ‌ها و همسویی دما و فشار درشت‌بلورهای الیون در این منطقه با دما و فشار بلورهای کلینوپیروکسن در احمدآباد و طهمورث همگی حاکی از این است که که بلورهای کلینوپیروکسن در منطقه قره‌طوره در اعماق کمتر و احتمالاً در یک مخزن نیمه عمیق شکل گرفته‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** کلینوپیروکسن، دما- فشارسنجی، بازالت، قروه، کردستان.

\*نویسنده مسئول: اشرف تorkian

E-mail: a-torkian@basa.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

فرایندهای متعدد رخ داده در اتاق ماگمایی مانند تبلور تفریقی، اختلاط ماگمایی و آرایش پوسته‌ای می‌تواند بر ترکیب شیمیایی ماگما تأثیرگذار باشد و در برخی موارد سبب برهم خوردن تعادل موجود و یا حتی روند تبلور شود. این تغییرات ممکن است به‌صورت ویژگی‌های بافتی مشخص، نظیر خوردگی‌های خلیجی و بافت‌های غربالی در بلورهای تشکیل‌دهنده سنگ‌های آتشفشانی مشاهده شود (Dobosi and Fodor, 1992; Rutherford and Hill, 1993; Simonetti et al., 1996). در این راستا مطالعه ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های بافتی کانی‌ها تصویر قابل درکی از روند تحول ماگما ارائه خواهد داد. دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن پارامترهایی هستند که اطلاعاتی را پیرامون شرایط دما، فشار و تحول ماگما در اختیار قرار می‌دهند.

در طی سه دهه گذشته مدل‌های متعدد دما- فشارسنجی بر مبنای ترکیب شیمیایی کانی‌هایی چون هورنبلند (Hollister et al., 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Holland and Blundy, 1994; Anderson and Smith, 1995; Ridolfi et al., 2010; Ridolfi and Renzulli, 2011) کلینوپیروکسن (Putirka, 2008) ارائه شده است. کلینوپیروکسن به عنوان یک فاز کانی‌شناسی متداول در سنگ‌های بازالتی بیش از سایر کانی‌ها مورد توجه بوده است. این کانی پیش از این به منظور بررسی شرایط دما و فشار تبلور در سنگ‌های آتشفشانی شمال خاوری قروه (آتشفشان‌های قرزلجه کند و کوه قلعه‌پریان که در بیست کیلومتری جنوب آتشفشان احمدآباد قرار دارند) توسط تorkian و صالحی (۱۳۹۲) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل دمای ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار متوسط تا کم را در زمان تبلور بلورهای کلینوپیروکسن نشان می‌دهد. در این پژوهش تلاش بر این است تا با استفاده از شیمی کانی پیروکسن ماهیت ماگمایی در برگیرنده، تحولات رخ داده برای آن و همچنین پارامترهای فیزیکو شیمیایی (فشار، دما و فوگاسیته اکسیژن) آشکار شود.

آتشفشانی مورد مطالعه در این پژوهش از مراکز آتشفشانی احمدآباد، طهمورث و قره‌طوره هستند که بین طول‌های ۴۶' ۴۷° تا ۵۹' ۴۷° خاوری و عرض‌های ۱۸' ۳۵° تا ۳۰' ۳۵° شمالی قرار گرفته‌اند (شکل ۱). این آتشفشان‌ها بخشی از آخرین برونزدهای ماگمایی ایران به سن کواترنری را تشکیل می‌دهند. به عقیده Azizi and Moinevaziri (2009) سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه در بخش شمالی زون سندج- سیرجان قرار گرفته‌اند، که محور آتشفشانی همدان- تبریز نامیده می‌شود. در این محور و به موازات تراست اصلی زاگرس توده‌های آتشفشانی مستقل، با ترکیبات متنوع رخنمون دارند که به‌طور عمده به دو گروه فلسیک و مافیک تقسیم می‌شوند. ترکیب سنگ‌های مافیک (که بخشی از آنها در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند) اغلب بازالت تا تراکی بازالت و ترکیب سنگ‌های فلسیک به‌طور غالب داسیت و ربولیت است.

در آتشفشان‌های احمدآباد، طهمورث و قره‌طوره سنگ‌های بازالتی به‌صورت لایه‌هایی متشکل از جریان‌های گدازه، اسکوری و بعضاً بمب‌های آتشفشانی دیده می‌شوند که در نمونه دستی رنگ خاکستری تیره تا سیاه دارند و با ضریب رنگینی ۶۵ تا ۷۸ درصد مزوکرات تا ملانوکرات به حساب می‌آیند. در بررسی‌های صحرایی بقایای زینولیت‌های گنیسی مشهود است. هیچ‌گونه اثری از رخداد دگرسانی‌های شیمیایی در مناطق مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این فعالیت‌های معدنی و برداشت از توده‌های آتشفشانی به عنوان منابع اصلی اسکوری (پوک معدنی) امکان نمونه‌برداری دقیق‌تر و از اعماق بیشتر (نمونه‌های سالم) را فراهم کرده است.

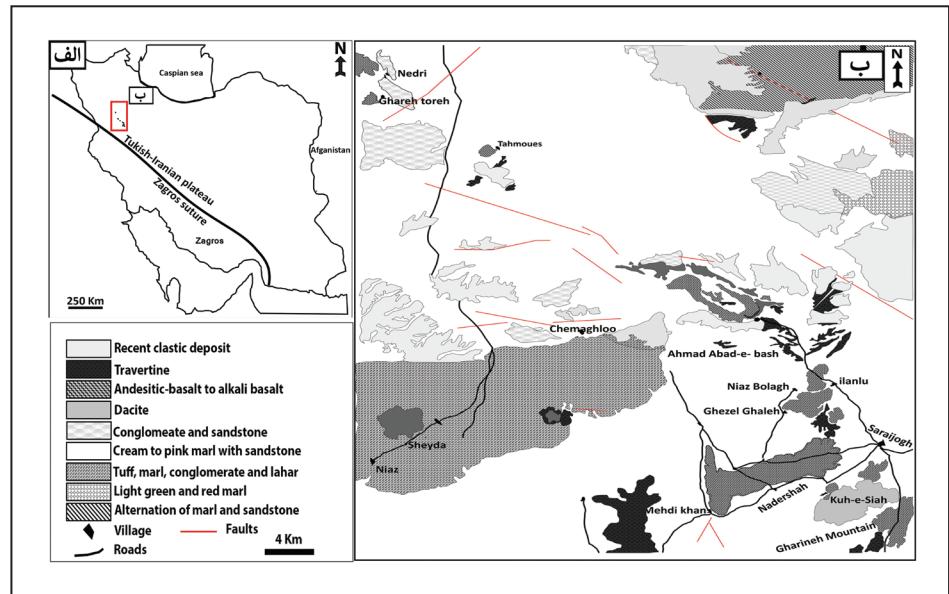
## ۳- روش انجام پژوهش

به منظور بررسی شرایط فیزیکو شیمیایی گدازه‌های بازالتی آتشفشان‌های احمدآباد، طهمورث و قره‌طوره با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن، پس از بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری تعدادی مقطع نازک جهت انجام آنالیزهای الکترون میکروپروپ بر روی کانی پیروکسن به آزمایشگاه استیتو آتشفشان‌شناسی و ژئوفیزیک در رم (ایتالیا) ارسال شد. ۳۴۱ نقطه از کانی کلینوپیروکسن توسط دستگاه میکروپروپ

## ۲- زمین‌شناسی منطقه

در حد فاصل شهرهای قروه تا بیجار آتشفشان‌های متعددی وجود دارند. سنگ‌های

Jeol- JXA8200، با قطر باریکه الکترونی ۳ μm، ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ kV، شدت جریان ۱۰ nA و زمان شمارش ۲۰ ثانیه آنالیز شد. نتایج این داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران، مستطیل قرمز رنگ منطقه مورد مطالعه در این پژوهش؛ ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه در شمال قروه (برگرفته از حسینی، ۱۳۸۵).

جدول ۱- نتایج آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن در بازالت‌های مراکز آتشفشانی طهمورث، احمدآباد و قروه‌طوره.

	طهمورث								احمدآباد		
	T-C1	T-C2	T-C3	T-C4	T-C5	T-C6	T-C7	T-C8	A-C1	A-C2	A-C3
SiO <sub>2</sub>	47.84	48.98	48.86	49.89	46.44	45.90	45.66	46.97	52.35	52.36	51.32
TiO <sub>2</sub>	2.03	1.79	1.83	1.66	2.26	2.42	2.23	2.14	0.72	0.80	0.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.49	5.71	5.11	4.81	6.66	7.54	6.42	6.35	2.78	2.71	3.84
FeO	6.25	6.03	6.39	6.21	7.34	7.02	7.21	6.94	4.06	4.40	7.25
MnO	0.10	0.09	0.11	0.12	0.12	0.09	0.12	0.11	0.08	0.09	0.19
MgO	12.46	12.86	13.08	12.96	12.69	11.63	12.09	12.34	15.99	16.40	13.93
CaO	22.66	22.86	22.65	22.36	22.62	22.03	21.83	22.21	22.58	22.29	21.86
Na <sub>2</sub> O	0.51	0.57	0.49	0.46	0.57	0.78	0.57	0.59	0.57	0.56	1.01
K <sub>2</sub> O	0.02	0.05	0.05	0.05	0.04	0.15	0.07	0.08	0.01	0.02	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.05	0.07	0.09	0.44	0.06	0.16	0.03	0.03	0.02
Total	98.38	98.96	98.62	98.59	98.82	97.98	96.25	97.91	99.16	99.67	100.30
Si	1.81	1.84	1.84	1.87	1.76	1.76	1.78	1.79	1.93	1.92	1.90
Al <sup>IV</sup>	0.19	0.16	0.16	0.13	0.24	0.24	0.22	0.21	0.07	0.08	0.10
Al <sup>VI</sup>	0.10	0.09	0.07	0.09	0.06	0.10	0.07	0.08	0.05	0.04	0.07
Fe <sup>3+</sup>	0.03	0.03	0.05	0.00	0.13	0.10	0.10	0.08	0.03	0.05	0.09
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.02	0.02	0.02
Fe <sup>2+</sup>	0.16	0.16	0.15	0.19	0.10	0.13	0.13	0.14	0.09	0.09	0.13
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mg	0.70	0.72	0.73	0.72	0.72	0.67	0.70	0.70	0.88	0.90	0.77
Ca	0.92	0.92	0.91	0.90	0.92	0.91	0.91	0.91	0.89	0.88	0.87
Na	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo%	50.44	50.22	49.37	49.34	49.14	50.50	49.28	49.56	46.99	45.86	46.53
En %	38.56	39.30	39.61	39.70	38.33	36.79	37.90	38.18	46.30	46.95	41.05
Fs %	11.00	10.48	11.02	10.96	12.53	12.71	12.83	12.26	6.71	7.19	12.42
Mg#	0.78	0.79	0.78	0.79	0.75	0.75	0.75	0.76	0.88	0.87	0.77
Kd(Fe-Mg) Cpx-Liq	0.42	0.36	0.45	0.36	0.46	0.44	0.39	0.30	0.24	0.23	0.57

ادامه جدول ۱-

	احمدآباد											قره‌طوره
	A-C4	A-C5	A-C6	A-C7	A-C8	A-C9	A-C10	A-C11	A-C12	A-C13	A-C14	G-C1
SiO <sub>2</sub>	51.61	51.18	50.97	51.27	49.39	48.77	49.81	49.33	50.19	49.88	51.09	45.03
TiO <sub>2</sub>	1.21	0.66	1.06	0.95	0.97	1.13	0.97	0.89	0.73	0.64	0.69	2.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.60	2.09	3.56	3.27	3.59	4.28	3.52	3.11	3.21	2.75	2.77	5.44
FeO	5.73	4.47	5.48	5.73	4.68	4.59	4.38	3.97	4.55	4.41	4.06	7.01
MnO	0.11	0.10	0.12	0.13	0.08	0.08	0.07	0.07	0.11	0.09	0.08	0.11
MgO	15.22	16.65	15.09	15.22	16.03	15.35	15.61	15.51	16.49	16.39	16.15	13.44
CaO	21.67	21.23	21.97	21.68	21.22	21.84	21.55	21.70	20.23	20.60	21.19	22.55
Na <sub>2</sub> O	0.76	0.46	0.66	0.72	0.68	0.73	0.64	0.62	0.69	0.63	0.75	0.55
K <sub>2</sub> O	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.07	0.06	0.04	0.03	0.18	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.03	0.05	0.03	96.67	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.17
Total	99.94	96.88	98.98	99.02	193.32	96.84	96.64	95.29	96.25	95.46	96.99	97.00
Si	1.90	1.93	1.90	1.91	1.86	1.86	1.89	1.90	1.91	1.91	1.93	1.75
Al <sup>IV</sup>	0.10	0.07	0.10	0.09	0.14	0.14	0.11	0.10	0.09	0.09	0.07	0.24
Al <sup>VI</sup>	0.06	0.03	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.01
Fe <sup>3+</sup>	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.13	0.08	0.09	0.08	0.09	0.07	0.20
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.08
Fe <sup>2+</sup>	0.13	0.08	0.11	0.11	0.13	0.01	0.06	0.04	0.06	0.05	0.05	0.02
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.84	0.94	0.84	0.84	0.78	0.87	0.88	0.89	0.93	0.94	0.91	0.78
Ca	0.85	0.86	0.88	0.86	0.89	0.89	0.88	0.89	0.82	0.85	0.86	0.94
Na	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Wo%	45.73	44.27	46.44	45.72	47.88	46.67	46.12	46.75	43.24	43.92	45.21	48.34
En%	44.68	48.33	44.38	44.67	41.80	45.63	46.49	46.50	49.03	48.64	47.95	39.93
Fs%	9.59	7.40	9.18	9.60	10.31	7.70	7.39	6.75	7.72	7.44	6.84	11.73
Mg#	0.83	0.87	0.83	0.83	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.88	0.77
Kd(Fe-Mg) Cpx-Liq	0.36	0.46	0.25	0.28	0.24	0.29	0.29	0.34	0.27	0.25	0.22	0.29

	قره‌طوره									
	G-C2	G-C3	G-C4	G-C5	G-C6	G-C7	G-C8	G-C9	G-C10	G-C11
SiO <sub>2</sub>	43.09	45.74	45.59	47.43	44.30	45.52	46.34	43.77	45.36	46.00
TiO <sub>2</sub>	3.42	2.73	2.56	1.74	2.53	2.37	2.35	2.93	2.68	2.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.57	5.39	5.73	4.22	5.69	5.58	4.42	6.38	5.68	5.01
FeO	7.68	7.24	7.43	7.35	6.94	7.75	6.64	7.02	6.72	6.45
MnO	0.09	0.17	0.08	0.06	0.10	0.14	0.13	0.10	0.11	0.11
MgO	12.34	13.13	12.94	13.26	13.05	12.42	14.34	12.86	13.77	14.24
CaO	22.57	23.15	22.63	22.83	22.69	22.73	22.37	22.94	22.54	22.68
Na <sub>2</sub> O	0.65	0.65	0.70	0.75	0.73	0.72	0.55	0.68	0.60	0.60
K <sub>2</sub> O	0.09	0.00	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.09	0.33	0.05	0.05
Total	96.75	98.28	97.68	97.66	96.06	97.25	97.26	97.02	97.52	97.44
Si	1.69	1.76	1.76	1.82	1.74	1.77	1.79	1.71	1.75	1.69
Al <sup>IV</sup>	0.30	0.24	0.24	0.18	0.26	0.23	0.20	0.28	0.25	0.31
Al <sup>VI</sup>	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe <sup>3+</sup>	0.24	0.20	0.19	0.18	0.24	0.19	0.19	0.24	0.20	0.22
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.10	0.08	0.07	0.05	0.07	0.07	0.07	0.09	0.08	0.10
Fe <sup>2+</sup>	0.01	0.03	0.04	0.06	-0.02	0.06	0.02	-0.02	0.01	0.00
Mn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.72	0.75	0.74	0.76	0.76	0.72	0.82	0.75	0.79	0.76
Ca	0.95	0.95	0.93	0.94	0.95	0.94	0.92	0.96	0.93	0.93
Na	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wo%	49.41	49.13	48.77	48.60	49.07	49.33	47.13	49.56	48.08	48.68
En%	37.57	38.78	38.80	39.28	39.28	37.51	41.87	38.67	40.72	39.50
Fs%	13.02	12.09	12.43	12.13	11.65	13.15	11.00	11.77	11.19	11.82
#Mg	0.74	0.76	0.76	0.76	0.77	0.74	0.79	0.77	0.78	0.80
Kd(Fe-Mg) <sup>Cpx-Liq</sup>	0.29	0.43	0.56	2.82	1.41	1.80	2.22	1.38	0.30	0.39

#### ۴- سنگ‌نگاری

سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی ترکیب بازالتی دارند. به نحوی که داده‌های حاصل از شیمی سنگ کل ترکیب بازالت آلکان را برای آنها نشان می‌دهد. در مقاطع میکروسکوپی بافت پورفیری، گلوپورفیری و میکروولیتی قابل مشاهده است (شکل‌های ۲- الف و ب). کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده کلتیوپیروکسن و الیون هستند که به صورت فنوکریست و میکروفنوکریست یافت می‌شوند. خمیره از میکروولیت‌ها (شامل کانی‌های کلتیوپیروکسن، پلاژیوکلازهای سوزنی شکل و اکسیدهای آهن و تیتانیم) و شیشه آتشفشانی تشکیل شده است (شکل ۲- پ). در آتشفشان‌های مراکز احمدآباد و طهمورث عمده‌ترین و متداول‌ترین فنوکریست‌های یافت شده بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار کلتیوپیروکسن هستند. حال آنکه در آتشفشان قره‌طوره حضور فنوکریست‌های الیون با بافت اسکلتی قابل توجه است (شکل ۲- ت). در نمونه‌های مورد بررسی قره‌طوره فنوکریست‌های کلتیوپیروکسن فراوانی کمتری دارند و این کانی اغلب ریزبلورهای خمیره را تشکیل می‌دهد. بلورهای کلتیوپیروکسن در هر سه مرکز آتشفشانی منطقه بندی - عادی، معکوس و منطقه بندی ساعت شنی و در برخی موارد آثار خوردگی خلیجی نشان دارند (شکل‌های ۲- ث و ج). زینوکریست‌های کوارتز و بلورهای بیوتیت با آثار هضم‌شدگی در مراکز آتشفشانی احمدآباد و طهمورث

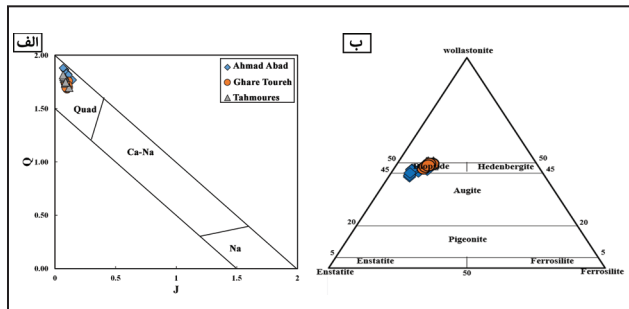
دیده می‌شوند (شکل‌های ۲- چ و ح).

#### ۵- شیمی کانی پیروکسن

کلتیوپیروکسن یکی از مهم‌ترین کانی‌های موجود در سنگ‌های آذرین بازیک است. وابستگی ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها به ترکیب شیمیایی ماگمای میزبان و شرایط فیزیکی و شیمیایی تبلور آن سبب شده تا این کانی دربر گیرنده اطلاعات ارزشمندی از خاستگاه ماگمایی (Letterier et al., 1982) مذاب دربر گیرنده خود و شرایط فیزیکی شیمیایی تبلور از قبیل دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن باشد. پیروکسن که متعلق به گروه سیلیکات‌های زنجیره‌ای است با فرمول ساختاری  $M_2M_1T_2O_6$  مشخص می‌شود و شامل یک موضع تتراهدردی و دو موضع اکتاهدردی است. بر مبنای مطالعات Morimoto et al. (1988) در جایگاه T کاتیون‌های  $Al^{3+}$ ،  $Si^{4+}$  و سپس  $Fe^{3+}$  جایگزین می‌شوند. به طوری که مجموع کاتیون‌های جایگاه T برابر ۲ خواهد بود. مجموع کاتیون‌های موقعیت M1 برابر ۱ و شامل کاتیون‌های  $Fe^{3+}$  و  $Al^{3+}$  باقیمانده از جایگاه T است. چنانچه  $Fe^{3+}$  و  $Al^{3+}$  کافی برای پرشدن مکان M1 نباشد، کاتیون‌هایی مانند  $Ti^{4+}$ ،  $Fe^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $Zn^{2+}$ ،  $Sc^{3+}$ ،  $Ti^{3+}$ ،  $V^{3+}$ ،  $Cr^{3+}$ ،  $Cr^{2+}$  و سپس  $Mn^{2+}$  می‌توانند در این جایگاه قرار گیرند. کاتیون‌های  $Fe^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و  $Mn^{2+}$  در جایگاه M2 با ظرفیتی حدود ۱ قرار می‌گیرند.

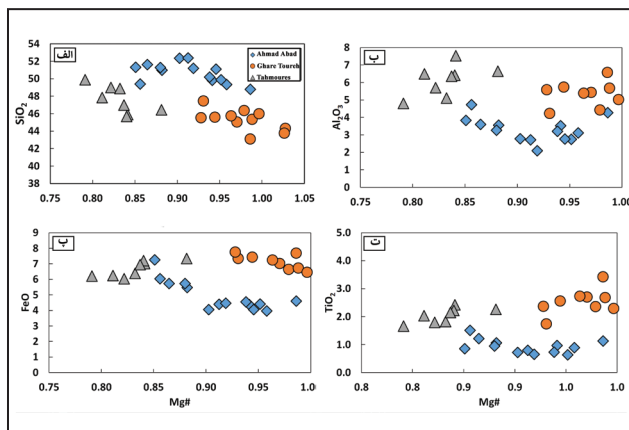


آتشفشانی بین ۰/۷۴ تا ۰/۸۷ تغییر می کند.



شکل ۳- الف) طبقه بندی پیروکسن های مورد مطالعه در نمودار Q-J (Morimoto et al., 1988)؛ ب) ترکیب کلیونوپروکسن های مراکز آتشفشانی احمدآباد، طهمورث و قره طوره در نمودار En-Fs-Wo (Morimoto et al., 1988) (علائم مشابه شکل ۳- الف).

به منظور بررسی اثر تبلور تفریقی بر شیمی کلیونوپروکسن ها از نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی در برابر عدد منیزیم (Mg#)، به عنوان شاخص پیشرفت جدایش بلورین استفاده شده است. در روند اکسیدهای اصلی نسبت به Mg# تغییرات منظم و تدریجی وجود دارد که نشان می دهد این کانی ها از افزایش درجه تفریق ماگمای سازنده پیروی می کنند. چنان که در نمودارها دیده می شود (شکل ۴)، با افزایش عدد منیزیم و پیشرفت تبلور تفریقی، مقدار  $SiO_2$  افزایش می یابد. این تغییر نشان از افزایش مقدار  $SiO_2$  در مذاب در برگیرنده بلورهای کلیونوپروکسن و به تبع آن در خود بلور دارد. کاهش مقدار FeO همزمان با افزایش Mg# و کاهش مقدار  $Al_2O_3$  در کلیونوپروکسن ها، معرف تبلور همزمان (پلاژیوکلاز و کلیونوپروکسن) است و کاهش محتوای اکسید تیتانیم و آهن ورود این عنصر را به ساختار اکسیدهای فلزی مانند ایلمینیت و مگنتیت نشان می دهد.

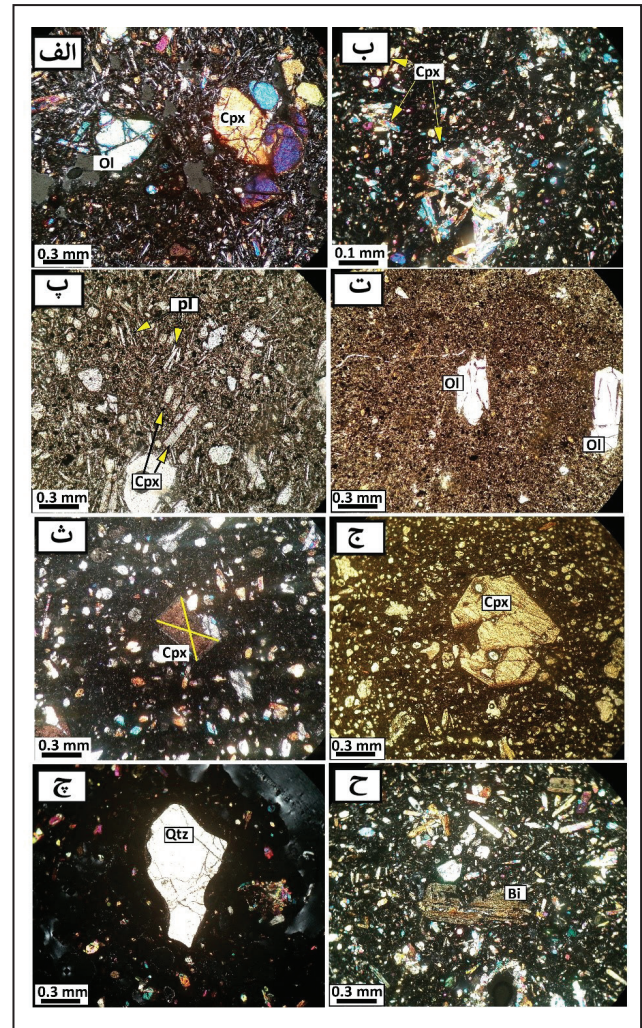


شکل ۴- بررسی روند تغییرات مقادیر اکسیدهای اصلی در بلور کلیونوپروکسن نسبت به Mg#.

### ۵-۱. تعیین سری ماگمایی

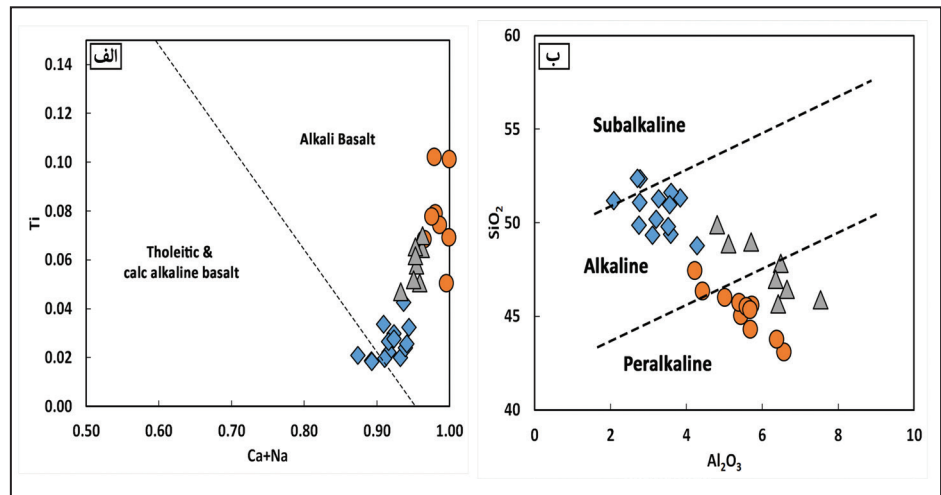
از آنجا که ترکیب شیمیایی کلیونوپروکسن ها تابعی از ترکیب شیمیایی ماگمای والد آنهاست، بنابراین یکی از مزایای مطالعه این کانی ها کسب اطلاعاتی پیرامون سری ماگمایی دربرگیرنده آنهاست. در این راستا از نمودار Ti در برابر Ca+Na (Leterrier et al., 1982) استفاده شد (شکل ۵- الف). اغلب نمونه های مورد بررسی در محدوده بازالت های آلکالن قرار می گیرند.

به عقیده Le Bas (1962) فراوانی عناصری مانند Al، Ti و Si درون شبکه ساختاری پیروکسن به درجه آلکالینته وابسته است و با استفاده از این مشخصه می توان سری های ماگمایی را از هم تفکیک کرد. بر مبنای نمودار میزان  $Al_2O_3$  در برابر مقدار  $SiO_2$  ترکیب شیمیایی کلیونوپروکسن های مورد مطالعه در محدود آلکالن تا پرآلکالن قرار می گیرد (شکل ۵- ب).



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی سنگ های بازالتی آتشفشان های احمدآباد، طهمورث و قره طوره، الف) بافت میکرولیتیک پورفیری؛ ب) بافت گلوبرو پورفیری؛ پ) بلورهای کوچک کلیونوپروکسن در کنار پلاژیوکلازهای سوزنی در بازالت های مرکز طهمورث؛ ت) منطقه بندی ساعت شنی در بلور کلیونوپروکسن؛ ث) شواهد خوردگی خلیجی در درشت بلور کلیونوپروکسن؛ ج) بقایای زینوکریست کوارتزی؛ چ) فنوکریست های الومین با ساخت اسکلتی در کنار بلورهای کوچک کلیونوپروکسن در مرکز قره طوره؛ ح) بلور هضم شده بیوتیت در مرکز آتشفشانی احمدآباد (Ol: الومین، Cpx: کلیونوپروکسن، pl: پلاژیوکلاز، Bi: بیوتیت، Qtz: کوارتز).

طبقه بندی و نام گذاری پیروکسن ها بر مبنای قرارگیری کاتیون ها در مکان های M1 و M2 صورت می گیرد. (Morimoto et al. 1988) در یک دسته بندی اولیه پیروکسن ها را به چهار گروه عمده تقسیم کردند که عبارتند از: ۱) پیروکسن های کلسیم، منیزیم و آهن دار (Ca- Mg- Fe)؛ ۲) پیروکسن های کلسیم و سدیم دار (Ca- Na)؛ ۳) پیروکسن های سدیم دار (Na)؛ ۴) سایر پیروکسن ها. کلیونوپروکسن های موجود در سنگ های بازالتی آتشفشان های احمدآباد، طهمورث و قره طوره در نمودار Q-J در محدوده کلیونوپروکسن های گروه یک یعنی کلیونوپروکسن های (Ca- Mg- Fe) قرار می گیرند (شکل ۳- الف). ترکیب شیمیایی آنها در نمودار Wo- En- Fs (شکل ۳- ب). (Morimoto et al., 1988) در محدوده دیوپسید قرار گرفته است (شکل ۳- ب). بر مبنای فرمول کلی ساختاری ترکیب کلیونوپروکسن های آتشفشان های احمدآباد و طهمورث  $En_{36.79-49.03}Wo_{43.24-50.49}Fs_{6.7-12.83}$  و در آتشفشان قره طوره معادل  $En_{11-13.15}Wo_{34.5-41.87}Fs_{47.13-49.56}$  است. مقدار عدد منیزیم (Mg#) در تمامی مراکز

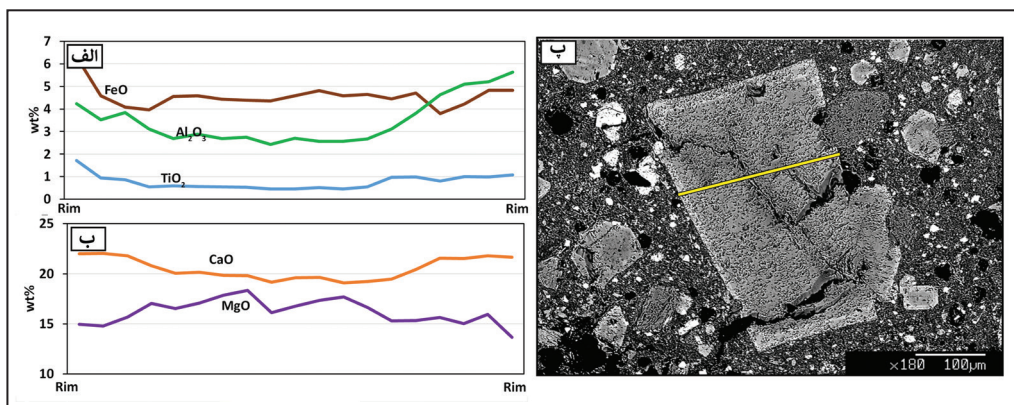


شکل ۵- تعیین سری ماگمایی نمونه‌ها با استفاده از ترکیب شیمیایی بلورهای کلینوپیروکسن (علائم مانند شکل ۴).

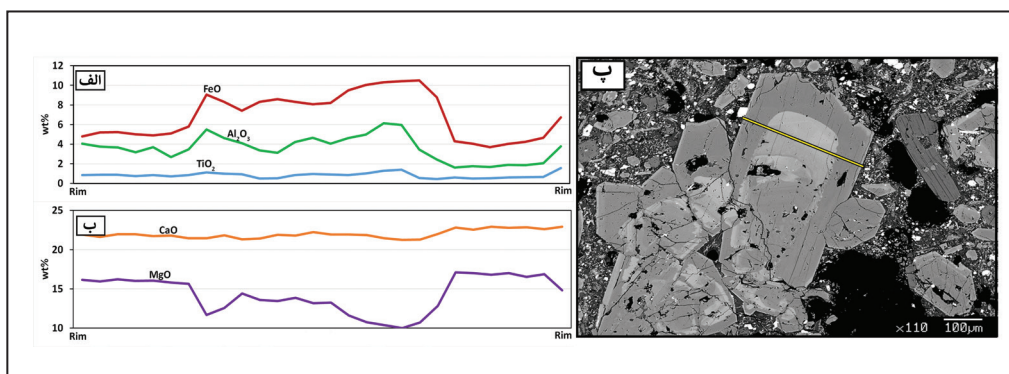
### ۵-۲. منطقه‌بندی بلورین

منطقه‌بندی شیمیایی بلورهای کلینوپیروکسن ذخیره کننده تاریخچه فعالیت‌های ماگمایی است. این منطقه‌بندی ممکن است در نتیجه تغییر تعادل مذاب- بلور در طی رشد درشت‌بلورها در ماگمایی دارای تبلور تفریقی پیشرونده رخ دهد، یا ممکن است حاصل شیمی بلور یا کینتیک رشد بلور باشد (Shimizu, 1990). بسیاری از محققین تأیید کرده‌اند که منطقه‌بندی پیوسته و ناپیوسته نرمال و معکوس بلورهای کلینوپیروکسن در مذاب‌های مافیک معرف الگوهای پیچیده تحول ماگمایی است (Dobosi and Foder, 1992).

در بلورهای کلینوپیروکسن مورد مطالعه علی‌رغم نوسانات موجود در محتوای عناصر اصلی به‌طور کلی منطقه‌بندی عادی و معکوس قابل تشخیص است. به نحوی که در بلورهای دارای منطقه‌بندی عادی از مرکز به سمت حاشیه مقادیر  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$ ،  $FeO$  و  $CaO$  افزایش و مقدار  $MgO$  کاهش یافته است. در حالی که کاهش  $FeO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$  و  $CaO$  و افزایش مقدار  $MgO$  از مرکز به طرف حاشیه در بلورهای دارای منطقه‌بندی معکوس قابل تشخیص است (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۶- الف و ب) منطقه‌بندی نرمال در بلور کلینوپیروکسن مرکز آتشفشانی احمدآباد. چنان که که مشهود است از مرکز به طرف حاشیه مقادیر  $FeO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$  و  $CaO$  افزایش و در عین حال مقدار  $MgO$  کاهش می‌یابد؛ پ) تصویر BSE (back scatter electron imaging) کانی مورد بررسی.



شکل ۷- الف و ب) کاهش مقادیر  $FeO$ ،  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$  و  $CaO$  و افزایش مقدار  $MgO$  از مرکز به طرف حاشیه کانی که معرف منطقه‌بندی معکوس است؛ پ) تصویر BSE (back scatter electron imaging) کانی مورد بررسی.

۶- بررسی شاخص های فیزیکی شیمیایی

ارتباط مستقیمی بین ترکیب کانی های موجود در سنگ های آذرین و ترکیب مذاب در برگیرنده آنها وجود دارد (Dobosi and Fodor, 1992). بنابراین می توان با تکیه ترکیب شیمیایی پیروکسن شرایط فیزیکی شیمیایی حاکم بر ماگمای در برگیرنده مانند دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن را بررسی کرد.

۶-۱. داماسنجی

داماسنجی ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن ها ابزاری مفید در راستای بررسی دما در سنگ های آتشفشانی است. در طی دهه های گذشته پژوهش های متعددی جهت به کارگیری ترکیب شیمیایی این کانی در بررسی های ترمومتری انجام شده و روش های متعددی جهت سنجش دما ابداع شده است (Nimis, 1995; Nimis and Taylor, 2000; Putirka, 2008). در ادامه نتایج حاصل از سنجش دمای بلورهای کلینوپیروکسن در آتشفشان های احمدآباد، طهمورث و قره طوره ارائه خواهد شد:

الف) (Soesoo (1997) شاخص های YPT و XPT را بر مبنای ترکیب اکسیدهای اصلی تعریف کرده است:

$$XPT = 0.446 SiO_2 + 0.187 TiO_2 - 0.404 Al_2O_3 + 0.346 FeO - 0.052 MnO + 0.309 MgO + 0.431 CaO - 0.446 Na_2O$$

$$YPT = -0.369 SiO_2 + 0.535 TiO_2 - 0.317 Al_2O_3 + 0.323 FeO + 0.235 MnO - 0.516 MgO - 0.167 CaO - 0.153 Na_2O$$

با استفاده از این روش دمای تشکیل کلینوپیروکسن های مراکز آتشفشانی مورد بررسی بین ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد برآورد می شود.

ب) Putirka (2008) با استفاده از اکتیویته ارائه شده در روش Taylor and Nimis (2000) معادله جدیدی را با دقتی بالاتر به منظور سنجش دمای تشکیل بلورهای کلینوپیروکسن در سنگ های بازالتی ارائه کرده است:

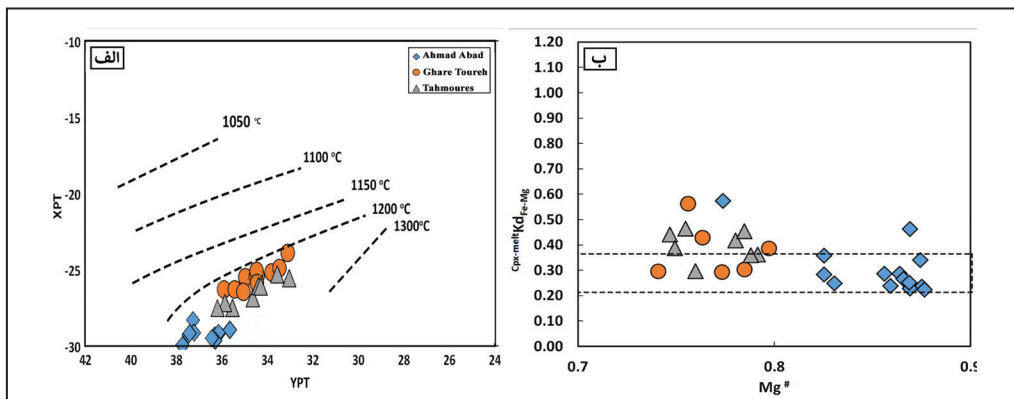
$$T(K) = \frac{93100 + 544P(kbar)}{61.1 + 36.6(X_{Ti}^{cpx}) + 10.9(X_{Fe}^{cpx}) - 0.95(X_{Al}^{cpx} + X_{Cr}^{cpx} - X_{Na}^{cpx} - X_{K}^{cpx}) + 0.395[\ln(a_{En}^{cpx})]^2}$$

نتایج حاصل از محاسبات انجام شده با این کالیبراسیون (که بر مبنای فشار است) دمای ۱۰۹۳ تا ۱۲۶۷ درجه سانتی گراد را برای آتشفشان های احمدآباد و طهمورث و دمای ۹۱۴ تا ۱۰۰۴ درجه سانتی گراد برای قره طوره ارائه می دهد (دمای حاصل از معادله بر حسب کلین بوده و در تمام موارد به درجه سانتی گراد تبدیل شده است). جهت استفاده از روش های دما- فشارسنجی طراحی شده بر مبنای تعادل بین بلور کلینوپیروکسن و مذاب (Putirka, 2008; Putirka et al., 2003)، لازم است در ابتدا تعادل بین بلور و مذاب در برگیرنده مورد بررسی قرار گیرد. از این رو مقدار Kd بین مرکز بلورهای کلینوپیروکسن و ترکیب سنگ کل محاسبه خواهد شد (جدول ۱). بر مبنای آزمایشات و بررسی های صورت گرفته توسط Putirka (2008) این مقدار برای بلورهای در تعادل با مذاب در برگیرنده در دمای بالاتر از ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۶ خواهد بود. با توجه به محاسبات انجام شده مقدار Kd در نمونه های مورد بررسی به طور متوسط ۰/۵۱ است (شکل ۸-ب). نام برده با تکیه بر تبلور ژادیت و با استفاده از تبادلات تعادلی صورت گرفته بین ژادیت، دیوپسید و هیدنرژیت کالیبراسیون زیر را برای محاسبه دمای تشکیل پیروکسن های در تعادل با مذاب ارائه کرده است:

$$\frac{10^4}{T(K)} = 7.53 - 0.14 \ln\left(\frac{X_{Jd}^{cpx} X_{CaO}^{cpx} X_{Fm}^{cpx}}{X_{DiHd}^{cpx} X_{Na}^{cpx} X_{Al}^{cpx}}\right) + 0.07(H_2O^{liq})$$

$$- 14.9(X_{CaO}^{cpx} X_{SiO_2}^{cpx}) - 0.08 \ln(X_{TiO_2}^{cpx}) - 3.26(X_{NaO_{0.5}}^{cpx} + X_{KO_{0.5}}^{cpx})$$

$$- 1.1(Mg^{#liq}) - 0.18 \ln(X_{EnFs}^{cpx}) - 0.027P(kbar)$$



شکل ۸- الف) تعیین دمای تبلور پیروکسن با استفاده از روش (Soesoo (1997)؛ ب) نمودار بررسی تعادل بین مذاب و بلور کلینوپیروکسن. بلورهای قرار گرفته در محدوده مشخص شده با خط چین در تعادل با مذاب در برگیرنده خود هستند.

در گستره سنگ های آذرین واقع می شوند که معرف تبلور در فشار پایین است (شکل ۹).

ب) کالیبراسیون ارائه شده توسط Putirka (2008) بر اساس تبادلات ترکیبی صورت گرفته بین کلینوپیروکسن در تعادل با مذاب همیافت تنظیم شده است و با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود:

$$P = -54.3 + \frac{299T}{10^4} + \frac{36.4T}{10^4} \ln\left[\frac{Jd^{P_{X_{Si}^{liq}}}}{Si^{liq}} Na^{liq} Al^{liq}\right] + 367[Na^{liq} Al^{liq}]$$

با استفاده از این معادله دمای تشکیل بلورهای کلینوپیروکسن در تعادل با مذاب در برگیرنده، ۱۲۷۷ درجه سانتی گراد در آتشفشان های احمدآباد و طهمورث و ۱۱۲۷ درجه سانتی گراد در آتشفشان قره طوره است.

۶-۲. فشارسنجی

جهت تعیین فشار حاکم در زمان تبلور بلورهای کلینوپیروکسن نیز می توان از روش های متعددی استفاده کرد:

الف) اکثر بلورهای کلینوپیروکسن سنگ های بازالتی آتشفشان های احمدآباد و طهمورث دارای نسبت  $Al^{VI}/Al^{IV} > 0.3$  هستند و در نمودار  $Al^{VI}$  در برابر  $Al^{IV}$  در محدوده میانبراهای موجود در بازالت ها قرار می گیرند، که معرف تبلور در شرایط فشار متوسط است. در حالی که کلینوپیروکسن های موجود در آتشفشان قره طوره



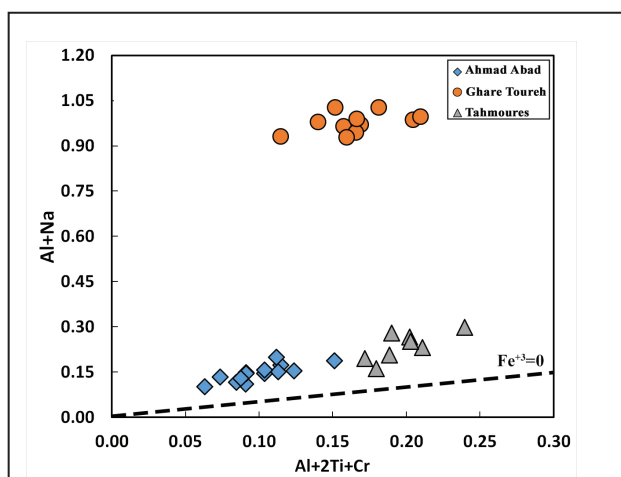
اعماق بین ۰ تا ۲۰ کیلومتری پوسته و کلبیوپروکسن‌های آتشفشان قره‌طوره در اعماق ۰ تا ۵ کیلومتری شکل گرفته‌اند. بر مبنای مطالعاتی (Tunini et al., 2014) ضخامت پوسته در زیر زون ارومیه- دختر معادل ۵۵ تا ۶۳ کیلومتر و ضخامت لیتوسفر نزدیک به ۱۱۰ کیلومتر است.

#### ۶-۳. بررسی فوگاسیته اکسیژن

فوگاسیته اکسیژن عامل مهمی در کنترل فرایندهای ماگمایی، روند تبلور و نوع کانی‌های تبلور یافته است. همچنین این پارامتر تأثیر ویژه‌ای در تغییر دمای لیکیدوس و ترکیب مذاب و بلور دارد (France et al., 2010). جهت بررسی فوگاسیته اکسیژن و حالت‌های متفاوت اکسیداسیون در زمان شکل‌گیری کانی‌ها، می‌توان از تفاوت‌های موجود در مقدار  $Fe^{+3}$  استفاده کرد. بدین منظور نمودار  $2Ti+Cr+Al^{VI}$  در برابر  $Na+Al^{IV}$  به عنوان تابعی از آهن سه ظرفیتی به کار برده شد (Schweitzer et al., 1979). این نمودار بر مبنای موازنه Al موجود در موقعیت تتراهدری با Al و Cr موجود در موقعیت اکتاهدری M1 تنظیم شده است.

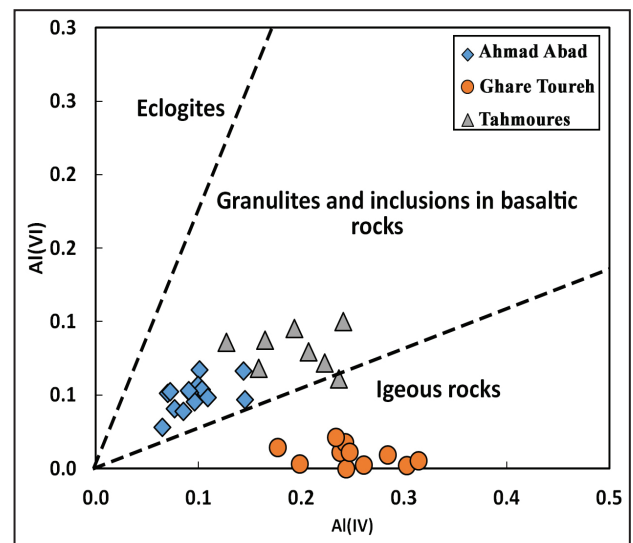
در ترکیب کانی پیروکسن  $Fe^{+3}$  می‌تواند در موقعیت اکتاهدری جانشین عناصری چون Ti،  $Al^{VI}$  و Cr شود. به بیان دیگر فراوانی  $Fe^{+3}$  در پیروکسن‌ها تابعی از مقدار  $Al^{VI}$  و موازنه صورت گرفته بین موقعیت‌های تتراهدری و اکتاهدری است. بنابراین هر چه آلومینیم بیشتر وارد موقعیت تتراهدری شود شرایط برای ورود عنصر آهن سه ظرفیتی به موقعیت اکتاهدری فراهم‌تر خواهد شد. در این نمودار قرارگیری نمونه‌ها در بالای خط  $Fe^{+3}$  معرف فوگاسیته بالای اکسیژن است و هر چه فاصله نمونه‌ها از این خط بیشتر باشد، فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل کانی مذکور بیشتر بوده است (Cameron and Papike, 1981). موقعیت نمونه‌ها در زیر خط  $Fe^{+3}$  حاکی از فوگاسیته کم اکسیژن در محیط شکل‌گیری کانی می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است تمامی نمونه‌های مورد بررسی در بالای خط  $Fe^{+3}$  قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر بالای فوگاسیته اکسیژن هستند. کلبیوپروکسن‌های آتشفشان قره‌طوره بیشترین فاصله را با خط مذکور دارند که نشان‌دهنده مقدار بالای فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل کانی‌هاست. فوگاسیته بالا شکل‌گیری و فراوانی اکسیدهای آهن و تیتان را به همراه خواهد داشت. پایین بودن فوگاسیته اکسیژن نیز شاخص تشکیل در مراحل اولیه تبلور ماگماست.



شکل ۱۰- برآورد فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل کلبیوپروکسن‌ها با استفاده از ترکیب شیمیایی این کانی (Schweitzer et al., 1979).

نتایج حاصل از به کارگیری این روش فشاری معادل ۱/۲ کیلوبار برای بلورهای کلبیوپروکسن قره‌طوره و فشاری معادل ۸/۴ کیلوبار برای کلبیوپروکسن‌های احمدآباد و طهمورث نشان می‌دهد.



شکل ۹- تمامی بلورهای کلبیوپروکسن مراکز آتشفشانی طهمورث و احمدآباد در محدوده فشار متوسط قرار گرفته‌اند، اما موقعیت نمونه‌های منطقه قره‌طوره معرف شکل‌گیری در فشار پایین است (Aoki and Shiba, 1973).

معادله (Putrika et al., 2003) نیز که بر اساس تبدلات بین ژادیت، دیوپسید و هیدنرژیت تبیین شده، جهت بررسی فشار تشکیل بلورهای کلبیوپروکسن به کار گرفته شده است:

$$P = -88.3 + 2.82(10^{-3})T \ln \left\{ \frac{jd^{cpx}}{[Na^{liq} Al^{liq} (Si^{liq})^2]} + 2.19(10^{-2}) T(K) - 25.1 \ln [Ca^{liq} Si^{liq}] + 7.03 [Mg^{liq}] + 12.4 \ln [Ca^{liq}] \right\} \quad (4)$$

مقدار فشار محاسبه شده با استفاده از این روش برای کلبیوپروکسن‌های مرکز قره‌طوره معادل ۱ کیلوبار و برای مراکز احمدآباد و طهمورث به طور میانگین معادل ۱۰ کیلوبار است.

در نهایت از معادله بازنگری شده (Nimis 1995) جهت محاسبه فشار استفاده شده است:

$$P(kbar) = 3205 + 0.354T(K) - 518 \ln T(K) - 5.62(X_{Mg}^{cpx}) + 83.2(X_{Na}^{cpx}) + 68.2(X_{DiHd}^{cpx}) + 2.52 \ln(X_{Al(VI)}^{cpx}) - 51.1(X_{DiHd}^{cpx})^2 + 34.8(X_{EnFs}^{cpx})^2 \quad (5)$$

این معادله که بر اساس ترکیب بلور کلبیوپروکسن تعریف شده است، برای نمونه‌های مورد بررسی در آتشفشان قره‌طوره فشاری معادل ۱ کیلوبار و برای آتشفشان‌های احمدآباد و طهمورث به طور میانگین فشار ۶/۷ کیلوبار را نشان می‌دهد. با توجه به محاسبات فشار انجام شده در صورتی که چگالی پوسته ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شود (Armstrong, 1991)، عمق تشکیل کلبیوپروکسن‌ها قابل محاسبه است. بلورهای کلبیوپروکسن آتشفشان‌های طهمورث و احمدآباد در



## ۷- بحث

آتشفشان‌های مورد بررسی در این پژوهش در محور آتشفشانی همدان- تبریز در زون سندج- سیرجان واقع شده‌اند. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی یافت شده در این مراکز به‌طور عمده بازالت است که داده‌های حاصل از بررسی شیمی سنگ کل ترکیب آلکالن را برای این سنگ‌ها نشان می‌دهد. بافت متداول در این نمونه‌ها بافت پورفیری و میکرولیتیک پورفیری و فنوکریست غالب به استثنای مرکز آتشفشانی قره‌طوره کلیونپروکسن است. خمیره سنگ از میکروولیت‌های کلیونپروکسن، پلاژیوکلاز، اکسیدهای آهن و تیتانیوم و شیشه تشکیل شده است. منطقه‌بندی عادی و معکوس در نمونه‌های مورد بررسی دیده می‌شود.

بلورهای کلیونپروکسن موجود در بازالت‌های مورد مطالعه همگی کلیونپروکسن‌های کلسیم- منیزیم و آهن‌دار هستند. بر مبنای ترکیب شیمیایی کلیونپروکسن‌ها این بازالت‌ها در محدوده بازالت‌هایی با ترکیب آلکالن دسته‌بندی شده‌اند که منطبق با نتایج به دست آمده از بررسی‌های شیمی سنگ کل است. نقش مؤثر فرایند تبلور تفریقی در تکامل سنگ‌های بازالتی میزبان بلورهای کلیونپروکسن با تکیه بر نمودارهای اکسیدهای اصلی در برابر  $Mg\#$  بررسی شد، بلورهای کلیونپروکسن به خوبی از تغییرات رخ داده در مذاب میزبان خود پیروی کرده‌اند. به نحوی که با پیشرفت روند تبلور و افزایش  $Mg\#$ ، افزایش  $SiO_2$  و کاهش  $Al_2O_3$  و  $TiO_2$  و  $FeO$  مشاهده می‌شود. منطقه‌بندی عادی در عناصر اصلی، مشخص‌کننده تاریخچه رشد ساده است. به‌طور کلی این گونه تغییرات تدریجی در نتیجه فرایند تفریق ماگمایی مشاهده می‌شود (Kay and Kay, 1985; Singer et al., 1992). همچنین وجود منطقه‌بندی ترکیبی عادی مؤید رخداد تبلور تفریقی بوده اما منطقه‌بندی معکوس در عناصر اصلی معرف تحول ماگما در یک سیستم باز یا تغییرات رخ داده پیش از فوران مثل واکنش مذاب سیلیکاته و پریدوتیت در گوشته بالایی و/یا آلیایش ماگمایی است (Kay, 1978; Myers et al., 1985). وجود زینوکریست‌های کوارتز موجود در سنگ وقوع آلیایش پوسته‌ای در بازالت‌های میزبان بلورهای کلیونپروکسن را تأیید می‌کند.

نتایج حاصل از برآوردهای دما و فشار نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد مطالعه منطقه قره‌طوره بازه فشاری بین ۰ تا ۳ کیلوبار و دمایی بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. بلورهای کلیونپروکسن آتشفشان‌های احمدآباد و طهمورث در محدوده فشار ۶ تا ۱۰ کیلوبار و دمای ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. بررسی‌ها حاکی از آنست که نمونه‌های مرکز آتشفشانی احمدآباد

## کتابنگاری

ترکیان، ا. و صالحی، ن.، ۱۳۹۲- شیمی پیروکسن و زمین‌دما- فشارسنجی سنگ‌های بازی شمال شرق قروه (کردستان)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، ۲۴، ص. ۶۵۹ تا ۶۷۰. حسینی، م.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه قروه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

نسبت به سایر مراکز در دما و فشار بالاتری تشکیل شده‌اند. بر مبنای محاسبات انجام شده جهت تعیین عمق تشکیل بلورهای کلیونپروکسن می‌توان چنین استنباط کرد که بلورهای کلیونپروکسن در مراحل اولیه تبلور ماگمایی در مخزنی در پوسته زیرین شکل گرفته‌اند. در مورد بلورهای کلیونپروکسن آتشفشان قره‌طوره چنین مشهود است که این بلورها در مخزن ماگمایی در اعماق کمتر و یا در طی صعود ماگما به طرف سطح زمین تشکیل شده‌اند. شواهد سنگ‌نگاری و محاسبه فشار بلورهای الیون (داده‌های منتشر نشده) نیز این مسئله را تأیید می‌کند. از طرفی بلورهای کلیونپروکسن در آتشفشان قره‌طوره بیشترین مقدار فوگاسیته اکسیژن را نشان می‌دهند که حاکی از تبلور آنها در طی پیشرفت تبلور تفریقی و پس از شکل‌گیری بلورهای الیون دارد.

به عبارت دیگر در مراحل ابتدایی تبلور، بلورهای کلیونپروکسن در مخازن ماگمایی آتشفشان‌های احمدآباد و طهمورث و بلورهای الیون، در اتاقک ماگمایی آتشفشان قره‌طوره شکل گرفته‌اند. ضمن صعود مذاب‌ها به طرف سطح زمین در مراکز طهمورث و احمدآباد، آلیایش با مواد پوسته‌ای رخ داده است. از مذاب موجود در اتاقک ماگمایی آتشفشان قره‌طوره ضمن صعود سریع ماگما (شکل‌گیری بلورهای الیون با بافت اسکلتی) به افق‌های بالاتر در یک مخزن ماگمایی موقت در اعماق کمتر، بلورهای کلیونپروکسن تشکیل شده‌اند.

## ۸- نتیجه‌گیری

آتشفشان‌های مورد بررسی در محور آتشفشانی همدان- تبریز عمدتاً ترکیب بازالت و سرشت آلکالن دارند و از فنوکریست‌های کلیونپروکسن کلسیم- منیزیم و آهن‌دار و الیون در زمینه‌ای از میکروولیت‌های کلیونپروکسن، پلاژیوکلاز، اکسیدهای آهن و تیتانیوم و شیشه تشکیل شده‌اند. منطقه‌بندی ترکیبی در پیروکسن‌ها از نوع عادی و معکوس است که به ترتیب حاکی از رخداد تبلور تفریقی و تحول ماگما در یک سیستم باز یا تغییرات رخ داده پیش از فوران است.

برآورد دما و فشار گویای دامنه فشاری بین ۳ تا ۱۰ کیلوبار و دمایی بین ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. با این توضیح که مرکز آتشفشانی احمدآباد نسبت به سایر مراکز در دما و فشار بالاتری تشکیل شده است. به علاوه کلیونپروکسن‌های قره‌طوره دارای بیشینه مقدار فوگاسیته اکسیژن هستند که نشان از تبلور آنها طی فرایند تبلور تفریقی و نیز پس از شکل‌گیری بلورهای الیون دارد.

## References

- Anderson, J. L. and Smith, D. R., 1995- The effects of temperature and  $fO_2$  on the Al-in hornblende barometer. *American Mineralogist*, V. 80, p. 549- 559. <https://doi.org/10.2138/am-1995-5-614>.
- Aoki, K. and Shiba, I., 1973- Pyroxenes from Iherzolite inclusions of Itinomegata, Japan. *Lithos*, V. 6, p. 41- 51. 10.1016/0024-4937(73)90078-9.
- Aoki, K. and Kushiro, I., 1968 - Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher. Eifel. *Contr. Mineral. Petrol.*, 18 (1968), pp. 326- 337.
- Armstrong, R. L., 1991- The Persistent Myth of Crustal Growth. *Australian Journal of Earth Sciences*, V. 38, p. 613- 630. <https://doi.org/10.1080/08120099108727995>
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009- Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. *Journal of Geodynamics*, V. 47, p. 167- 179. 10.1016/j.jog.2008.12.002.
- Cameron, M. and Papike, J. J., 1981- Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist*, V. 66, p. 1- 50. <http://www.minsocam.org/ammin/AM66/>.

- Dobosi, G. and Fodor, R. V., 1992- Magma fractionation, replenishment, and mixing as inferred from green-core clinopyroxenes in Pliocene basanite, southern Slovakia. *Lithos*, V. 28(2), p. 133- 150. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90028-W](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90028-W).
- France, L., Ildefonse, B., Koepke, J. and Bech, F., 2010- A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analyses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V.189, p. 340- 346. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.11.023>.
- Holland, T. and Blundy, J., 1994- Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, V. 116, p. 433- 447. 10.1007/BF00310910.
- Hollister, L. S., Grissom, G. C., Peters, E. K., Stowell, H. H. and Sisson, V. B., 1987- Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, V. 72, p. 231- 239. /72/3-4/231/104937.
- Johnson, M. C. and Rutherford, M. J., 1989- Experimentally determined conditions in the Fish Canyon Tuff, Colorado, Magma Chamber. *Journal of Petrology*, V. 30, p. 711- 737. <https://doi.org/10.1093/petrology/30.3.711>.
- Kay, R. W., 1978- Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, V. 4, p. 117- 132. . [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90032-X).
- Kay, S. M. and Kay, R. W., 1985- Aleutian tholeiitic and calc-alkaline magma series I: the mafic phenocrysts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 90, p. 276- 290. 10.1007/BF00378268.
- Le Bas, M. J., 1962- The Caledonian Granites and Diorites of England and Wales. In, Sutherland, D.S., Ed., *Igneous Rocks of the British Isles*, Wiley, Chichester, p. 191-201.
- 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*, V. 59, p. 139- 154. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4).
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988- Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy Magazine*, V. 52, p. 535-550. <https://doi.org/10.1180/minmag.1988.052.367.15>.
- Myers, J. D., Marsh, B. D. and Sinha, A. K., 1985- Strontium isotopic and selected trace element variations between two Aleutian volcanic centers (Adak and Atka): implications for the development of arc volcanic plumbing systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 91, p. 221- 234. 10.1007/BF00413349.
- Nimis, P., 1995- A clinopyroxene geobarometer for basaltic systems based on crystals-structure modeling. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, V. 121, p. 115- 125. 10. 1007/s004100050093.
- Nimis, P. and Taylor, W. R., 2000- Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part 1 Calibration and testing of a Cr-in-cpx barometer and an enstatite-in-cpx thermometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, V. 139, p. 541- 554. 10.1007/s004100000156.
- Putirka, K. D., 2008- Thermometers and barometers for volcanic systems, In: Putirka KD, Tepley F (eds.). *Review in Mineralogy*, V. 69, p. 61- 120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>.
- Putirka, K. D., Ryerson, F. J. and Mikaelian, H., 2003- New igneous thermobarometers for mafic and evolved lava compositions, based on clinopyroxene + liquid equilibria. *American Mineralogist*, V. 88, p. 1542- 1554. <https://doi.org/10.2138/am-2003-1017>.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010- Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction- related volcanoes. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, V. 160, p. 45- 66. 10.1007/s00410-009-0465-7.
- Ridolfi, F. and Renzulli, A., 2011- Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130°C and 2.2 Gpa. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, V. 163, p. 877- 895. 10.1007/s00410-011-0704-6.
- Rutherford, M. J. and Hill, P. M., 1993- Magma ascent rates from amphibole breakdown: an experimental study applied to the 1980- 1986 Mount St. Helens eruptions. *Journal of Geophysical Research*, V. 98, p. 19667-19685. <https://doi.org/10.1029/93JB01613>.
- Schmidt, M. W., 1992- Amphibole composition in tonalite as a function of pressure; an experimental calibration of the Al-in-hornblende Barometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, V. 110, p. 304- 310. 10.1007/BF00310745.
- Schweitzer, E. L., Papike, J. J. and Bence, A. E., 1979- Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Mineralogist*, V. 64, p. 501- 513. <https://doi.org/10.1029/GL005i007p00573>.
- Shimizu, N., 1990- The oscillatory trace element zoning of augite phenocrysts. *Earth Science Review*, V. 29, p. 27- 37.
- Simonetti, A., Shore, M. and Bell, K., 1996- Diopside phenocrysts from nephelinite lavas, Napak Volcano, Eastern Uganda: Evidence for magma mixing. *Canadian Mineralogist*, V.34, p.411- 442. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(0\)90025-Q](https://doi.org/10.1016/0012-8252(0)90025-Q).
- Singer, B. S., Myers, J. D. and Frost, C. D., 1992- Mid-Pleistocene lavas from the Seguam Island volcanic center, central Aleutian arc: closed-system fractional crystallization of a basalt to rhyodacite eruption suite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, V. 110, p. 87- 112. 10.1007/BF00310884.
- Soesoo A., 1997- A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation PT-estimations. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)*, V. 119(1), p. 55- 60. 10.1080/11035899709546454.
- Tunini, L., Jimenez-Munt, I., Fernandez, M., Vergés, J. and Villaseñor, A., 2014- Lithospheric mantle heterogeneities beneath the Zagros Mountains and the Iranian Plateau: a petrological-geophysical study. *Geophysical Journal International*, V. 200, p. 596- 614. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu418>.

# Mineral geochemistry of clinopyroxene and its application in thermobarometry of basaltic rocks in Ahmad-Abad, Tahmoures and Ghahre-toreh volcanoes (North Qorveh- Kurdistan)

A. Torkian<sup>1\*</sup> and N. Salehi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>Ph.D. Student, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 2017 November 04

Accepted: 2018 October 02

## Abstract

The Ahmad- Abad, Tahmoures and Ghahre- toreh volcanoes are part of the volcanic centers located on the Qorveh- Bijar axis and constitute a part of the magmatic outcrops of the northern arm of the Sanandaj Sirjan Zone, Hamedan-Tabriz zone. Volcanic rocks are basaltic in composition and show porphyritic, microlithic porphyry and glomeroporphyritic textures. Major phenocrysts include clinopyroxene and olivine. The abundance of clinopyroxene is found to be lower in Ghahre- toreh basalts, olivine is major phenocryst in this center. Clinopyroxene phenocrysts show normal, in some cases, reverse zoning and gulf corrosion which indicate disequilibrium with the host's melt. The results of thermobarometric calculations (temperature and pressure) using clinopyroxene mineral indicate the temperatures of 1100- 11300 °C and pressures of 3 to 11 kbar for Ahmad- Abad and Tahmoures volcanoes, and volcanic basalts at Ghahre- toreh reveal the temperature of 800 Up to 1100 °C and pressure of 0 to 3 kbar. The high oxygen fugacity in these rocks and the coherence of the temperature and pressure of the olivine phenocryst in this region with the temperature and pressure of the clinopyroxene in Ahmed- Abad and Tahmoures, all show that clinopyroxene crystals of Ghahre-toreh volcano formed at a lower depth and possibly in a shallow reservoir.

**Keywords:** Clinopyroxene, Thermobarometry, Basalt, Qorveh, Kurdistan.

For Persian Version see pages 15 to 24

\*Corresponding author: A. Torkian; E-mail: a-torkian@basa.ac.ir