

پتروگرافی و شیمی کانی سنگ‌های آتشفشانی جنوب غرب جندق (شمال شرق اصفهان)

لیلا محمودآبادی، سید محسن طباطبایی منش * و قدرت ترابی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب غرب جندق و در محل غسل درونه گستره وسیعی را پوشش می‌دهند. این سنگ‌ها عمدتاً شامل بازالت، آندزیت، آندزیت کوارتزار، داسیت و لاتیت با بافت‌های پورفیری، میکرولیتی پورفیری و هیالوپورفیری را هستند. پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن، کوارتز و آلکالی‌فلدسپار از سازنده‌های اصلی و کانی‌های اویاک و بیوتیت سازنده‌های فرعی هستند. سریسیت، کائولینیت، کلسیت و کلریت کانی‌های ثانویه این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. بر اساس داده‌های ژئوشیمی کانی‌ها، ترکیب پلاژیوکلازها آندزین تا لابرادوریت؛ کلینوپیروکسن‌ها، دیوپسید تا اوژیت؛ و آمفیبول‌ها مگنزپروکسید هستند. در برخی از فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، منطقه‌بندی نوسانی مشاهده شد. با توجه به ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها این سنگ‌ها روند ساب‌آلکان از خود نشان داده و نمودارهای زمین‌ساختی، محیط کمان‌های آتشفشانی را برای آن‌ها پیشنهاد می‌نماید. دمای تشکیل این سنگ‌ها بر مبنای دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز در فشارهای ۱ تا ۱۰ کیلو بار برابر با ۸۵۸-۹۴۵ درجه سانتیگراد است. دماسنجی کلینوپیروکسن‌های منطقه برای فشارهای ۱ تا ۱۰ کیلو بار دمایی برابر با ۹۴۱-۹۵۹ درجه سانتیگراد را ارائه می‌دهد. فشارسنجی کلینوپیروکسن‌ها نیز گویای شکل‌گیری آن‌ها در فشارهای مختلف و در اعماق متفاوت و در حین صعود است. بالا بودن میزان آب موجود در محیط تبلور پیروکسن‌ها و همچنین نمودار تغییرات $Al^{IV}+Na$ در برابر $Al^{VI}+2Ti+Cr$ بیانگر فوگاسیته بالای اکسیژن در محیط تشکیل آن‌هاست. رخداد دگرسانی گرمایی در بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی به‌خوبی آشکار است.

واژه‌های کلیدی: آتشفشانی ائوسن، کمان‌های آتشفشانی، ساب‌آلکان، غسل درونه، جندق

مقدمه

۱۳۷۵؛ امامی، ۱۳۷۶؛ درویش‌زاده، ۱۳۸۳) و در دشت کویر فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن قابل توجه بوده و گسترش قابل ملاحظه‌ای دارد (معین‌وزیری، ۱۳۷۵). سازنده‌های ائوسن، به‌طور عمده شامل آندزیت و توف هستند که به دنبال حرکات کرتاسه پایانی در آب‌های

فعالیت‌های بزرگ آتشفشانی دوران سوم در تمام ایران به‌جز زاگرس و کپه داغ مشهود است (نبوی، ۱۳۵۵؛ درویش‌زاده، ۱۳۸۳) که پهنه ایران مرکزی از این مطلب مستثنی نیست (نبوی، ۱۳۵۵؛ معین‌وزیری،

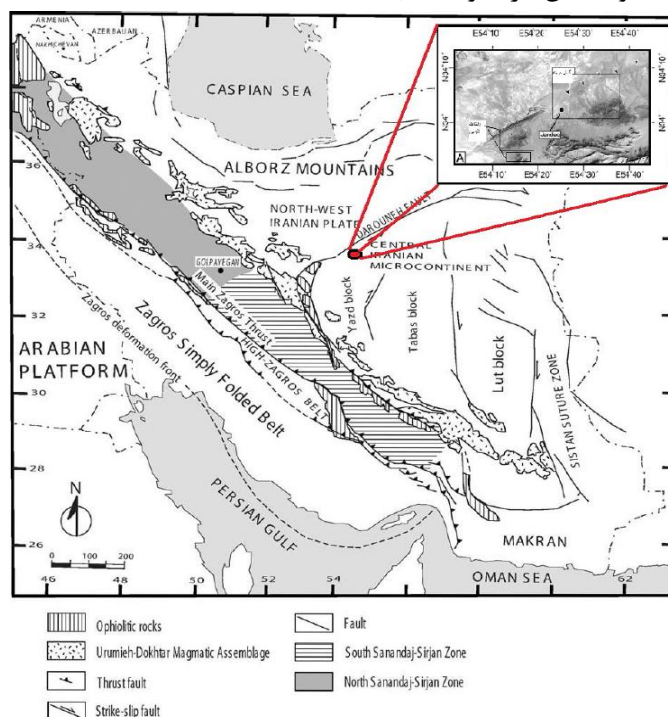
دستی و نیز میکروسکوپی به‌وضوح مشاهده می‌شود. در این نوشتار، پتروگرافی و شیمی کانی‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در منطقه جنوب‌غرب جندق بررسی می‌شود.

روش انجام پژوهش

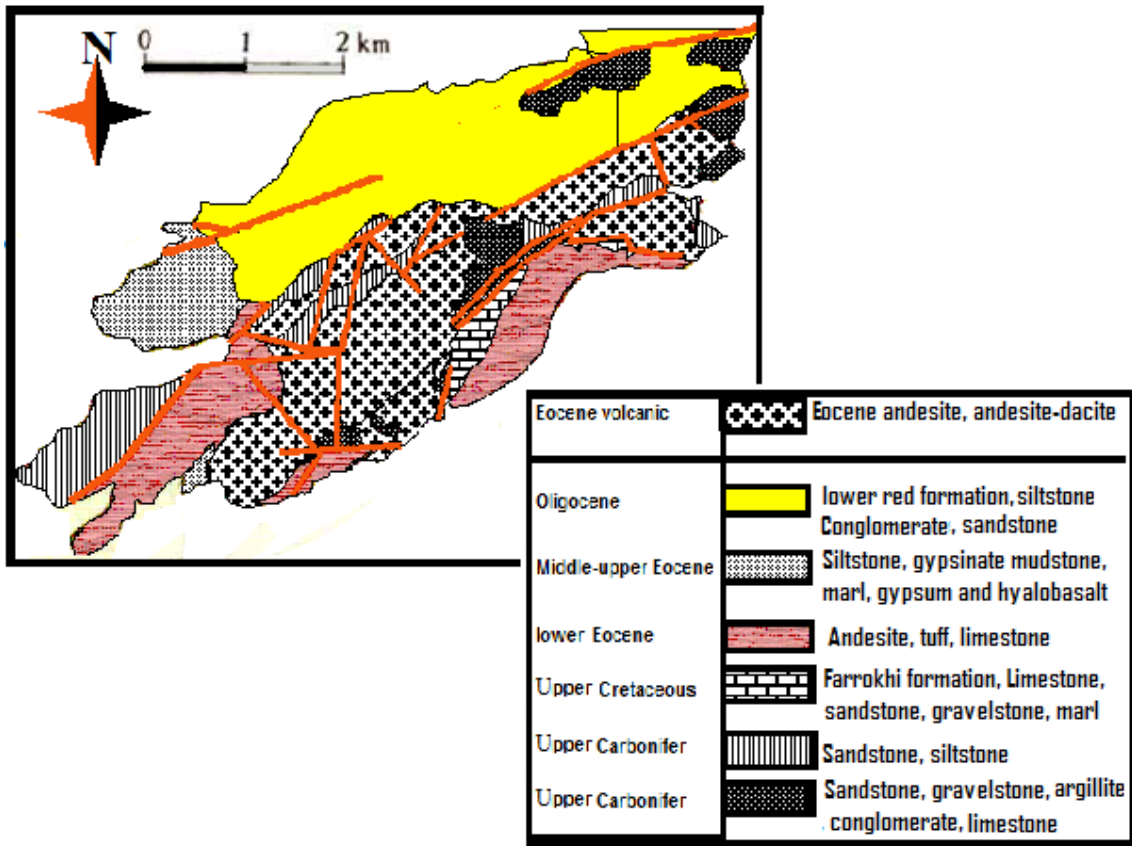
پس از نمونه‌برداری صحرائی و تهیه مقاطع نازک، پتروگرافی سنگ‌ها توسط میکروسکوپ پلاریزان المپوس مدل BH2 انجام شد. آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها با استفاده از دستگاه آنالیز الکترون مایکروپروب Cameca SX-100 با ولتاژ ۲۰kV و شدت جریان 15nA در دانشگاه هانور آلمان انجام شد (جدول‌های ۱ و ۲). در محاسبه مقدار Fe^{3+} جهت دسترسی به فرمول ساختاری کانی‌ها نیز از استوکیومتری کانی‌ها و روش‌های ارائه شده توسط Droop (۱۹۸۷) استفاده شد. در این نوشتار، فرمول ساختمانی کلینوپیروکسن بر اساس ۶ اکسیژن، پلاژیوکلاز ۸ اکسیژن و آمفیبول ۲۳ اکسیژن محاسبه شده است.

کم‌ژرفا تشکیل شده (معین‌وزیری، ۱۳۷۵) و با یک دگرشیبی بر روی رسوبات ائوسن زیرین و آهک‌های کرتاسه قرار گرفته‌اند (نبوی، ۱۳۵۵؛ امامی، ۱۳۷۶؛ درویش‌زاده، ۱۳۸۳). سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی در جنوب‌غرب جندق (شمال‌شرق اصفهان) با مختصات جغرافیایی طول $54^{\circ} 15'$ تا $54^{\circ} 30'$ شرقی و عرض $33^{\circ} 30'$ تا $33^{\circ} 51'$ شمالی واقع شده‌اند. رخنمون اصلی این سنگ‌ها در کوه گودار سیاه و در مجاورت گسل درونه قرار داشته و جزو پهنه زمین‌ساختی ایران مرکزی است (شکل ۱) (معین‌وزیری، ۱۳۷۵). در نقشه زمین‌شناسی منطقه، سنگ‌های آتشفشانی مورد نظر با ترکیب سنگ‌شناسی آندزیت، داسیت و به سن ائوسن معرفی شده‌اند (شکل ۲).

تحقیقات دانشمندان روسی در پروژه تکنواکسپورت، ترکیب سنگ‌های آتشفشانی جندق-خور را بازلت‌های ملانوکرات تا آندزیت تعیین می‌نماید (Susov *et al.*, 1974). سنگ‌های آتشفشانی یاد شده دارای انکلاوهای تیره و روشن بوده و آثار اختلاط و آلیش در نمونه‌های



شکل ۱- نقشه تقسیمات زمین‌شناسی ایران و جایگاه منطقه مورد مطالعه در آن (Ghasemi and Talbot, 2006)



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه در جنوب‌غرب جندق (نقشه زمین‌شناسی خور، ۱۹۸۴)

جدول ۱- نتایج آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن و آمفیبول‌های منطقه (بر حسب درصد وزنی) به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها

Sample Mineral	62/1 Cpx	63/1 Cpx	64/1 Cpx	65/1 Cpx	66/1 Cpx	67/1 Cpx	76/1 Cpx	77/1 Cpx	78/1 Cpx	Av.Cpx	57/1 Amph	58/1 Amph	59/1 Amph	Av. Amph
SiO ₂	51.72	51.91	51.82	52.74	51.76	51.7	52.17	52.66	52.26	52.08	41.91	42.03	42.29	42.08
TiO ₂	0.19	0.44	0.41	0.31	0.28	0.3	0.4	0.42	0.36	0.35	2.49	2.35	2.42	2.42
Al ₂ O ₃	2.04	3.11	2.92	2.58	2.61	2.8	2.73	3.07	2.94	2.76	12.37	12.41	12.31	12.36
Cr ₂ O ₃	0	0.05	0	0.05	0	0.05	0.04	0	0	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02
FeO ⁺	9.97	6.51	6.43	5.99	8.23	8.28	6.94	6.31	6.11	7.2	10.18	9.8	9.7	29.68
MnO	0.41	0.21	0.19	0.14	0.32	0.36	0.21	0.19	0.23	0.25	0.14	0.12	0.11	0.12
MgO	14.4	15.43	15.54	16.62	14.92	14.8	16.09	16.32	16.54	15.63	14.87	15.53	15.29	15.23
CaO	20.7	22.14	21.89	21.81	20.71	20.71	21.11	20.98	21.01	21.23	11.51	11.36	11.47	11.45
Na ₂ O	0.48	0.43	0.38	0.48	0.62	0.58	0.6	0.7	0.56	0.54	2.3	2.34	2.26	2.3
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	1.25	1.2	1.27	1.24
Total	99.92	100.24	99.59	100.72	99.46	99.59	100.29	100.66	100.02	100.05	97.02	97.14	97.12	97.09
O#	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	23	23	23	23
Si	1.92	1.9	1.91	1.91	1.92	1.92	1.91	1.91	1.91	1.91	6.11	6.08	6.13	6.11
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.27	0.26	0.26	0.26
Al ^{IV}	0.08	0.1	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	1.89	1.92	1.87	1.89
Al ^{VI}	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.24	0.19	0.24	0.22
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
Fe ⁺²	0.22	0.13	0.14	0.1	0.18	0.19	0.12	0.12	0.11	0.15	0.61	0.37	0.51	0.5
Fe ⁺³	0.09	0.07	0.06	0.08	0.08	0.07	0.09	0.07	0.08	0.07	0.63	0.82	0.66	0.7
Mn	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
Mg	0.8	0.84	0.85	0.9	0.83	0.82	0.88	0.88	0.9	0.86	3.23	3.35	3.31	3.3
Ca	0.83	0.87	0.87	0.85	0.82	0.82	0.83	0.82	0.82	0.84	1.8	1.76	1.78	1.78
Na	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.65	0.66	0.64	0.65
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.22	0.24	0.23
Sum_cat	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	15.68	15.64	15.65	15.66

جدول ۲- نتایج آنالیز نقطه‌ای فلدسپات‌های منطقه (بر حسب درصد وزنی) به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها

Sample Mineral	54.1 Fld	55.1 Fld	56.1 Fld	60.1 Fld	68.1 Fld	69.1 Fld	70.1 Fld	71.1 Fld	72.1 Fld	73.1 Fld	74.1 Fld	75.1 Fld	Av.Feld
SiO ₂	55.73	53.7	55.03	52.82	57.59	57.55	58.31	59.31	55.82	55.93	56.65	57.08	56.29
TiO ₂	0.03	0.02	0.02	0.33	0	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04
Al ₂ O ₃	27.32	28.49	27.79	25.06	26.26	26.35	25.92	25.3	27.42	27.34	26.55	26.56	26.69
Cr ₂ O ₃	0.02	0	0.01	0	0.03	0	0	0	0.02	0.07	0.02	0	0.01
FeO [*]	0.49	0.64	0.47	3.82	0.37	0.32	0.27	0.34	0.48	0.46	0.55	0.5	0.72
MnO	0	0.03	0.02	0.02	0.02	0	0.08	0.02	0.03	0.01	0.03	0	0.02
MgO	0.03	0.02	0.01	1.47	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0	0.06	0.14
CaO	9.4	11.1	10.29	9.77	8.32	8.33	7.66	7.26	9.48	9.52	8.8	8.27	9.01
Na ₂ O	5.32	4.82	5.46	5.05	6.14	6.05	6.48	6.65	5.38	5.69	5.81	6.12	5.74
K ₂ O	0.69	0.48	0.35	0.5	0.85	0.79	0.99	1.06	0.67	0.71	0.81	0.79	0.72
Total	99.03	99.3	99.45	98.84	99.6	99.41	99.76	99.97	99.32	99.77	99.25	99.4	99.42
Si	2.53	2.45	2.5	2.46	2.6	2.6	2.62	2.66	2.53	2.53	2.57	2.58	2.55
Al	1.46	1.53	1.49	1.38	1.4	1.4	1.37	1.34	1.47	1.46	1.42	1.41	1.43
Ti	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ⁺³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ⁺²	0.02	0.02	0.02	0.15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0.46	0.54	0.5	0.49	0.4	0.4	0.37	0.35	0.46	0.46	0.43	0.4	0.46
Na	0.47	0.43	0.48	0.46	0.54	0.53	0.57	0.58	0.47	0.5	0.51	0.54	0.5
K	0.04	0.03	0.02	0.03	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
Cations	4.99	5.01	5.01	5.08	5	4.99	5	5	4.99	5.01	5	5	5

پتروگرافی و شیمی کانی

پتروگرافی

کلینوپیروکسن، آمفیبول و بیوتیت هستند که در زمینه دانه‌ریزی سرشار از پلاژیوکلاز و کانی‌های اوپاک قرار گرفته‌اند (شکل ۴). کوارتز و کانی‌های اوپاک از کانی‌های فرعی و کلریت، اپیدوت، سریسیت و کلسیت از کانی‌های ثانویه آندزیت‌های این منطقه هستند. پلاژیوکلازهای موجود در آندزیت‌ها از نوع آندزین-لابرادوریت بوده که گاهی به کلریت و سریسیت تبدیل شده و ماکل مکرر خود را از دست داده‌اند (شکل ۳- I). در برخی از پلاژیوکلازها منطقه‌بندی نوسانی به شکل حاشیه غنی از کلسیم و یا بافت‌های غربالی و غباری مشاهده می‌شود (شکل‌های ۵ و ۶) که می‌تواند ناشی از اختلاط ماگمایی باشد. ترکیب کانی‌شناسی کلینوپیروکسن‌ها از دیوپسید تا اوژیت تغییر می‌نماید (شکل ۱۰). جهت تعیین نوع آمفیبول موجود در آندزیت‌ها از نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ استفاده شد. فنوکریست‌های آمفیبول با کاهش کلسیم و آهن از مرکز به حاشیه مواجه هستند. حفرات موجود در آندزیت‌ها توسط کلسیت، کلریت و اوپاک که احتمالاً حاصل از تجزیه کانی‌های اصلی هستند، پر شده‌اند. کلسیت موجود به دو صورت، حاصل از محلول‌های

سنگ‌های منطقه مورد بررسی شامل بازالت، آندزیت، آندزیت کوارتزار، داسیت و لاتیت هستند که بافت‌های پورفیری، میکروولیتی پورفیری و هیالوپورفیری از بافت‌های غالب مشاهده شده هستند.

بازالت‌ها در نمونه‌دستی، رنگی خاکستری تا سیاه داشته و همچنین با وجود فنوکریست‌های روشن پلاژیوکلاز در زمینه‌ای تیره و یکنواخت کاملاً مشخص هستند. بیشتر کلینوپیروکسن‌ها کلریتی شده‌اند (شکل ۳- C). پلاژیوکلازهای بازیک، فراوان‌ترین کانی بازالت‌ها بوده و گاهی دارای حاشیه‌های غباری (شکل ۳- A) و بافت‌های غربالی (شکل ۳- K) بوده و یا منطقه‌بندی نوسانی و معکوس نشان می‌دهند. آمفیبول، کلریت، سوسوریت، کلسیت و کانی‌های اوپاک از کانی‌های ثانویه بازالت‌ها هستند.

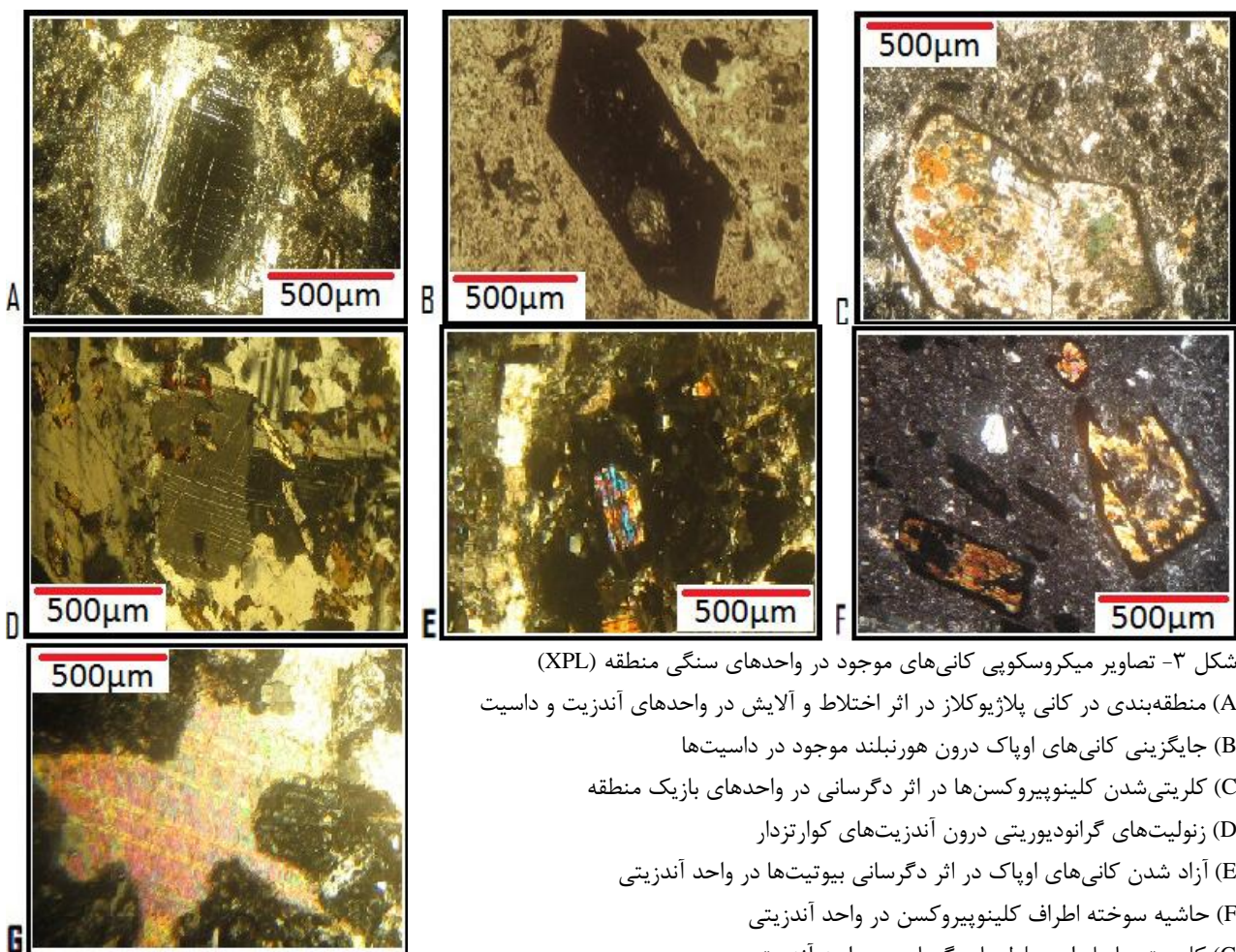
آندزیت‌ها در نمونه‌دستی، به رنگ خاکستری روشن تا متمایل به قرمز بوده که دارای رگه‌های سفید رنگی از کوارتز هستند. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با دو اندازه متفاوت،

بافت‌های پورفیری و هیالوپورفیری از خود نشان می‌دهند. پلاژیوکلاز موجود در داسیت‌ها غالباً دارای منطقه‌بندی بوده، سریسیتی شده‌اند (شکل ۳- A) و ضمن از دست دادن ماکل مکرر، تجمع آن‌ها بافت گلوپورفیری ایجاد نموده است. پلاژیوکلازها گاهی دارای حاشیه‌های غباری و بافت‌های غربالی هستند.

در این سنگ‌ها نیز ترکیب کانی‌شناسی کلینوپیروکسن‌ها از دیوپسید تا اوژیت تغییر می‌نماید. هورنبلند موجود در داسیت‌ها از نوع مگزیوهاستینگزیت بوده و در برخی موارد به‌طور کامل توسط کانی‌های اوپاک جایگزین شده است (شکل ۳- B).

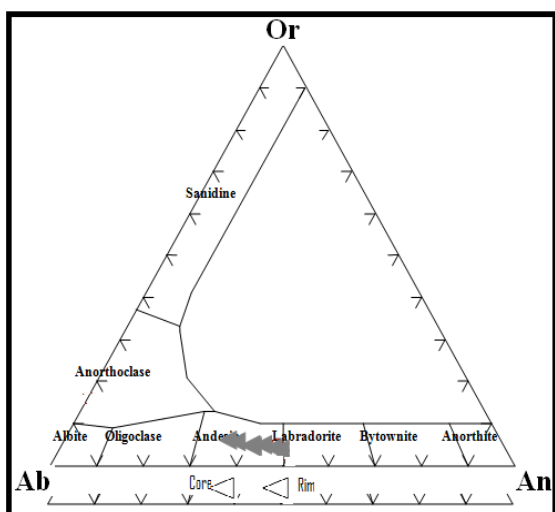
هیدروترمال و همچنین کلسیت‌های حاصل از تجزیه کانی‌های کلسیم‌دار مشاهده می‌شود (شکل ۳- G). کانی‌های فرومنیزین مثل پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت، غالباً کلریتی شده و دارای حاشیه سوخته هستند (شکل ۳- F).

داسیت‌ها، سنگ‌هایی روشن و مزوکرات بوده و دارای فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت و کوارتز قابل مشاهده با چشم غیر مسلح هستند. پلاژیوکلاز، کوارتز، بیوتیت و آمفیبول از جمله کانی‌های اصلی و آلکالی‌فلدسپار از کانی‌های فرعی این سنگ‌هاست. اپیدوت، سریسیت، کلسیت، آل‌بیت، کلریت و کوارتز را می‌توان به‌صورت کانی‌های ثانویه مشاهده کرد. این سنگ‌ها

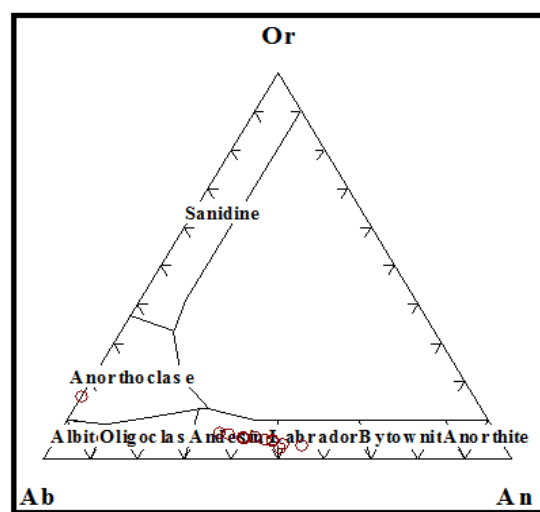


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی کانی‌های موجود در واحدهای سنگی منطقه (XPL)

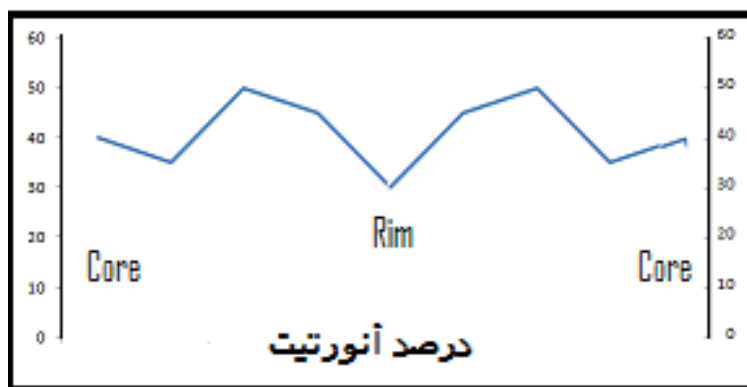
- (A) منطقه‌بندی در کانی پلاژیوکلاز در اثر اختلاط و آرایش در واحدهای آندزیت و داسیت جایگزینی کانی‌های اوپاک درون هورنبلند موجود در داسیت‌ها
 (B) کلریتی شدن کلینوپیروکسن‌ها در اثر دگرسانی در واحدهای بازیک منطقه
 (C) زونلیت‌های گرانودیوریتی درون آندزیت‌های کوارتزدار
 (D) آزاد شدن کانی‌های اوپاک در اثر دگرسانی بیوتیت‌ها در واحد آندزیتی
 (E) حاشیه سوخته اطراف کلینوپیروکسن در واحد آندزیتی
 (G) کلسیت حاصل از محلول‌های گرمابی در واحد آندزیتی



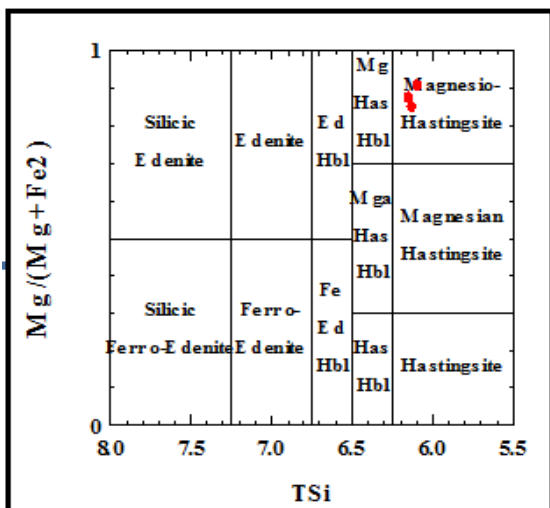
شکل ۵- نوسانات ترکیب پلاژیوکلاز در آندزیت‌ها از مرکز به حاشیه (Deer et al., 1966)



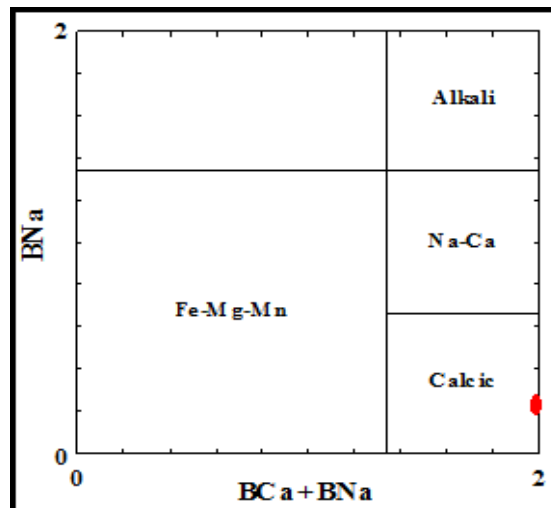
شکل ۴- ترکیب پلاژیوکلازها در آندزیت و داسیت‌های منطقه از آندزین تا لابرادوریت و ترکیب آلکالی فلدسپار در محدوده آنورتوکلاز است (Deer et al., 1966)



شکل ۶- نوسانات منطقه‌بندی پلاژیوکلاز در یک آندزیت پورفیر



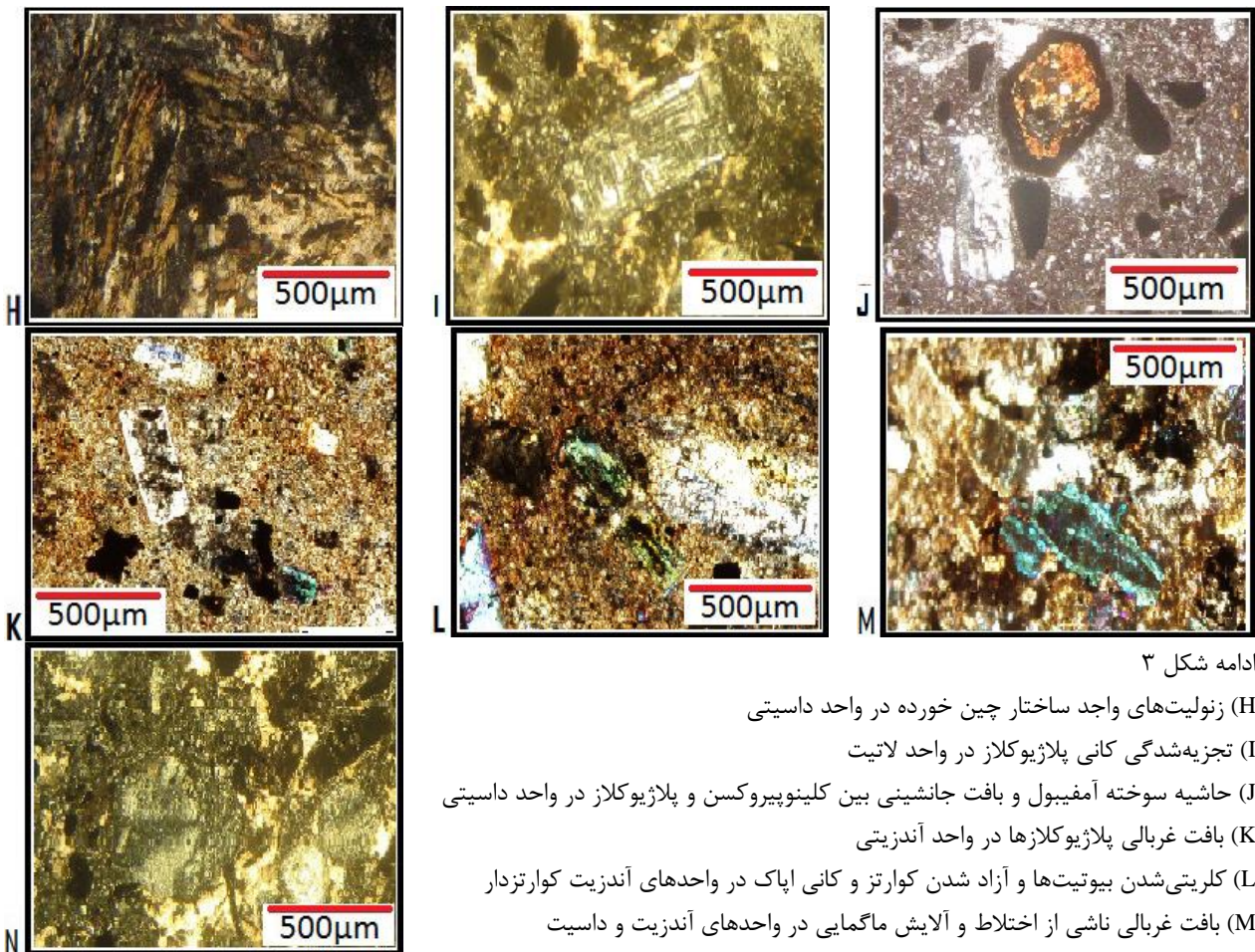
شکل ۸- در نمودار $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ در برابر Si (موجود در سایت T)، ترکیب کانی‌شناسی آمفیبول‌ها مگنزیوهایستینگزیت تعیین شده است (Hawthorne et al., 2007)



تصویر ۷- ترکیب آمفیبول‌ها بر روی نمودار Na در برابر Ca+Na (موجود در سایت B) که غنی‌بودن از کلسیم را نشان می‌دهد (Hawthorne et al., 2007)

داسیت‌های موجود در منطقه که واجد فنوکریست‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز هستند شامل پلاژیوکلازهای خودشکل با ترکیب آندزین همراه فنوکریست‌های هورنبلند آلتره نشده هستند. فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در جایی ظاهر می‌شوند که هورنبلندهای آن کاملاً اپاسیتی شده باشد و با هورنبلندهای تجزیه نشده همراه نمی‌شوند. کوارتز هم به طور معمول با هورنبلند اپاسیتی شده مشاهده می‌شود و با هورنبلندهای سالم مشاهده نمی‌شود. گاهی داسیت‌هایی با زنولیت‌های گرانودیوریتی با حاشیه‌ای دارای ساختارهای چین خورده مشاهده می‌شود (شکل ۳- D و H).

کوارتزها به صورت فنوکریست، در زمینه و هم در امتداد حاشیه و رخ کانی‌هایی از قبیل بیوتیت و پیروکسن دیده می‌شود و بعضاً دارای خوردگی خلیجی هستند. خوردگی خلیجی می‌تواند در نتیجه کاهش ناگهانی فشار در حین فوران سریع و یا بر اثر عدم تعادل به دلیل اختلاط و آرایش ایجاد شود. آمفیبول‌های موجود در داسیت‌ها دارای دو نسل هستند. نسل اول، آمفیبول‌های شش‌گوش هستند که به راحتی قابل شناسایی بوده و گاهی با حفظ شکل اولیه خود سوخته شده و به مجموعه اپیدوت، کلسیت، آلبیت، کلریت و کوارتز دگرسان شده‌اند. آمفیبول‌های نسل دوم، ثانویه بوده و از دگرسانی پیروکسن‌ها به وجود آمده‌اند (شکل ۳- J).



ادامه شکل ۳

(H) زنولیت‌های واجد ساختار چین خورده در واحد داسیتی

(I) تجزیه‌شدگی کانی پلاژیوکلاز در واحد لاتیت

(J) حاشیه سوخته آمفیبول و بافت جانیشینی بین کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در واحد داسیتی

(K) بافت غربالی پلاژیوکلازها در واحد آندزیتی

(L) کلریتی شدن بیوتیت‌ها و آزاد شدن کوارتز و کانی اپاک در واحدهای آندزیت کوارتزدار

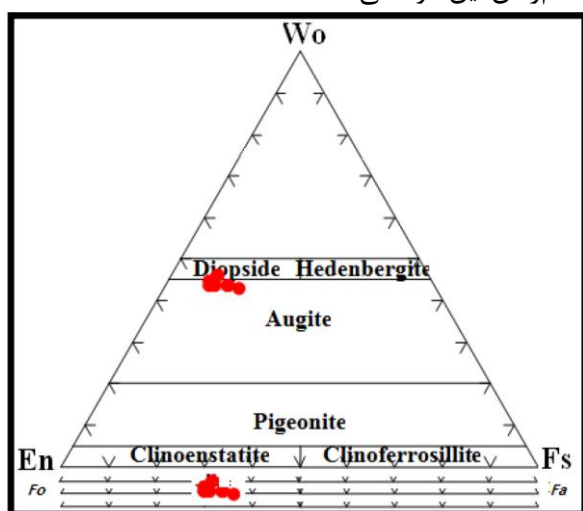
(M) بافت غربالی ناشی از اختلاط و آرایش ماگمایی در واحدهای آندزیت و داسیت

(N) شیشه‌های با بافت اسفرولیتی بر اثر سرد شدن سریع

۳- E).

فنوکریست‌های کلینوپیروکسن به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و بعضاً اورالیتی شده در تمام سنگ‌های این منطقه به فراوانی قابل مشاهده هستند (شکل ۳- C).

همه پیروکسن‌های مورد مطالعه بر روی نمودار Morimoto و همکاران (۱۹۸۸) در قلمرو پیروکسن‌های Quad و در نمودار $Q=Ca$ و $Mg+Fe^{+2}$ در برابر $J=2Na$ به دلیل کمبود سدیم در بین نقاط $Q=1.8$ تا $Q=2$ جای گرفته‌اند (شکل ۹). با توجه به شکل ۱۰ پیروکسن‌ها از نوع دیوپسید و اوژیت هستند. با توجه به ترکیب کلینوپیروکسن‌ها، اولیوین‌های موجود در این سنگ‌ها دارای ترکیبی متشکل از حدود ۷۰ درصد فورستریت و ۳۰ درصد فیالیت هستند (شکل ۳- C). در برخی از مقاطع، حضور فنوکریست‌های پیروکسن همراه با پلاژیوکلاز در زمینه بسیار ریز از همان کانی‌ها مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل تبلور این فنوکریست‌ها قبل از میکروکریستال آن‌ها باشد و وجود اذخال‌های پیروکسن در پلاژیوکلاز ناشی از تبلور تقریباً هم‌زمان این دو کانی است.

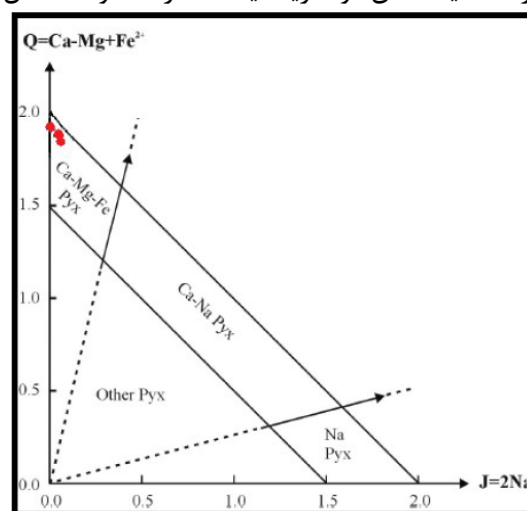


شکل ۱۰- تغییر ترکیب کانی‌شناسی کلینوپیروکسن‌ها از دیوپسید تا اوژیت (Floran et al., 1978)

آندزیت‌های کوارتزار از نظر کانی‌شناسی و بافت، مشابه آندزیت‌ها بوده با این تفاوت که مقدار کوارتز آن‌ها بیشتر است (شکل ۳- L). پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز، کانی‌های اصلی محسوب می‌شوند. کلریت، اپیدوت، کلسیت، آلبیت، کوارتز و کانی‌های اوپاک کانی‌های ثانویه را تشکیل می‌دهند.

لاتیت‌ها با بافت غالب پورفیری و ترکیب کانی‌شناسی مگاکریست‌های پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، بیوتیت و هورنبلند به عنوان کانی‌های اصلی و کانی‌های فرعی اوپاک و کوارتز مشخص می‌شوند. کانی‌های ثانویه از کلسیت، کلریت، اکسید آهن، سریسیت و کائولینیت تشکیل شده که حفرات فراوان این سنگ‌ها را پر کرده‌اند (شکل ۳- I).

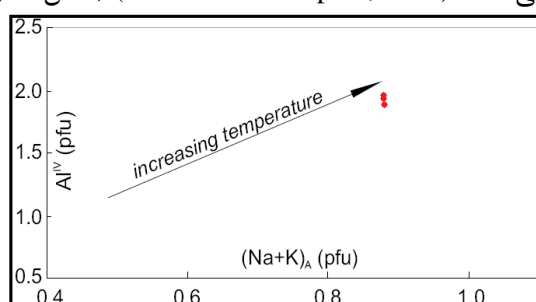
دیوریت پورفیری‌ها سنگ‌هایی با بافت پورفیری و فنوکریست‌هایی از پلاژیوکلاز نیمه‌شکل‌دار و هورنبلند سبز خودشکل هستند. در دیوریت پورفیری‌ها، پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی روشن سنگ و آمفیبول فراوان‌ترین کانی تیره است که غالباً به کلریت دگرسان شده است. مسکوویت و اکسید آهن، کانی‌های فرعی بوده و از کانی‌های ثانویه می‌توان به کلسیت، کلریت، کانی اوپاک (به‌ویژه اکسید آهن) و سریسیت اشاره نمود (شکل



شکل ۹- قرارگیری پیروکسن‌های مورد مطالعه در محدوده Quad (Morimoto et al., 1988)

زمین دماسنجی

مجموعه کانی‌ها و ترکیب آن‌ها در سنگ‌های آذرین در ارتباط نزدیک با ترکیب مذاب مولد آن‌هاست. این نکته مبنای استفاده از ترکیب کانی‌های معین جهت آگاهی از شاخص‌های فیزیکی شیمیایی (فشار، دما و فوگاسیته اکسیژن) حاکم بر محیط تبلور ماگمایی است. با در نظر داشتن ترکیب آمفیبول‌ها، مقادیر Al^{IV} و $(Na+K)_A$ با افزایش دمای تبلور تطابق مستقیم نشان می‌دهند (Cameron and Papike, 1981) (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- با افزایش دمای تبلور، روند افزایش در Al^{IV} و $(Na+K)_A$ آمفیبول‌ها مشاهده می‌شود (Cameron and Papike, 1981)

برای ارزیابی دمای تبلور کانی‌ها، می‌توان از دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز و دماسنجی کلینوپیروکسن‌ها استفاده نمود. بر مبنای شواهد پتروگرافی زوج کانی آمفیبول و پلاژیوکلاز دارای عدم حاشیه واکنشی و مرز تعادلی بوده و یک زمین‌دماسنج تبادلی فاقد تأثیر فشاری است.

- A) edenite + 4quartz = tremolite + albite
B) edenite + albite = richeterite + anorthite

واکنش اول در شرایطی استفاده می‌شود که آمفیبول و پلاژیوکلاز در همراهی با کوارتز باشند در حالی که واکنش دوم برای سنگ‌های فاقد کوارتز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Holland and Blundy, 1994). با توجه به زمین‌دماسنجی زوج کانی هورنبلند-پلاژیوکلاز برای فشارهای ۱ تا ۱۰ کیلوبار، دمای ۸۵۸ تا ۹۴۱ درجه سانتیگراد برآورد می‌شود.

روش دیگر استفاده از زمین‌دماسنجی کلینوپیروکسن‌ها با استفاده از فرمول Nimis و Taylor wayne (۲۰۰۰) است که دمای تبلور پیروکسن‌ها را در فشارهای ۱ تا ۱۰ کیلوبار، ۸۵۸ تا ۹۴۵ درجه سانتیگراد تعیین می‌نماید.

$$T(k) = \frac{23166 + (39.28 \times P(kbar))}{13.25 + (15.35 \times (Ti + 4.50)) \times (Fe - 1.55) \times (Al + Cr - Na - K) + (\ln a_{em}^{Cpx})^2}$$

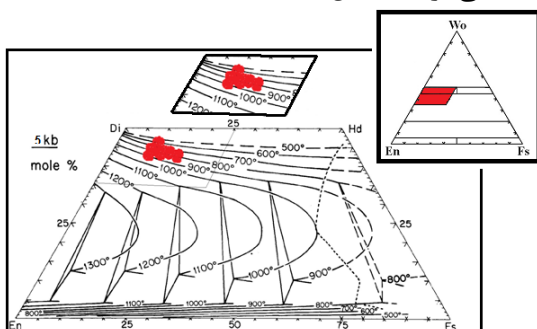
$$a_{em}^{Cpx} = (1 - Ca - Na - K) \times (1 - \frac{1}{2}(Al + Cr + Na + K)).$$

طبق مطالعات Kertz (۱۹۹۴)

$$T(^{\circ}C) = \left[\frac{1000}{0.054 + 0.608X^{Cpx} - 0.304Ln(1 - 2[Ca]^{Cpx})} \right] - 273$$

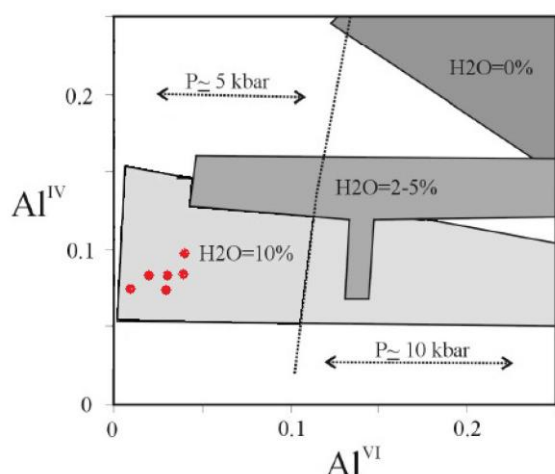
$$X^{Cpx} = [Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)]^{Cpx}$$

Lindsley (۱۹۸۳) بر اساس درصد مولکولی ولاستونیت-انستاتیت-فروسیلیت، در چهار ضلعی ولاستونیت-انستاتیت-فروسیلیت-هدنبرژیت، دماسنجی ترسیمی معرفی نمود (شکل ۱۲) که برای دماسنجی زوج‌های دیوپسید-اوزیت و دیوپسید-پیژونیت کاربرد گسترده‌ای دارد. همچنین برای دماسنجی کلینوپیروکسن‌ها از منحنی‌های هم‌دما مثلث تقسیم‌بندی کلینوپیروکسن‌ها نیز می‌توان استفاده نمود. دماسنجی کلینوپیروکسن‌ها در نمودار دوزنقه‌ای Di-Hd-En-Fs، دمای ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد را تعیین نموده است. نکته قابل توجه از محاسبات زمین‌دماسنجی کانی‌ها آن است که نتایج حاصله از روش‌های متفاوت با یکدیگر هم‌خوانی داشته و بر صحت داده‌ها می‌افزاید (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- دماسنجی کلینوپیروکسن‌ها از منحنی هم‌دما و مثلث تقسیم‌بندی کلینوپیروکسن‌ها که دمای ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد را تعیین نموده است (Lindsley, 1983).

تغییرات $Al^{IV}+Na$ در برابر $Al^{VI}+2Ti+Cr$ محاسبه می‌شود. بر همین اساس در ترکیب پیروکسن، Fe^{+3} در موقعیت اکتاندری جانشین عناصر سه ظرفیتی همچون Al^{VI} ، Ti و Cr می‌شود. بنابراین مقدار Al^{VI} مقیاسی برای میزان Fe^{+3} است. به این ترتیب، در نمودار $Al^{IV}+Na$ در برابر $Al^{VI}+2Ti+Cr$ منحنی $Fe^{+3}=0$ خط موازنه $Al^{IV}+Na$ با $Al^{VI}+2Ti+Cr$ است. بر این اساس قرارگیری نمونه‌ها در بالا یا زیر خط $Fe^{+3}=0$ معرف بالا یا پایین بودن فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل پیروکسن‌هاست. در ضمن هر چه فاصله نمونه از خط بیشتر باشد فوگاسیته اکسیژن محیط تشکیل پیروکسن بیشتر بوده است (Cameron and Papike, 1981; Marcelot *et al.*, 1983).

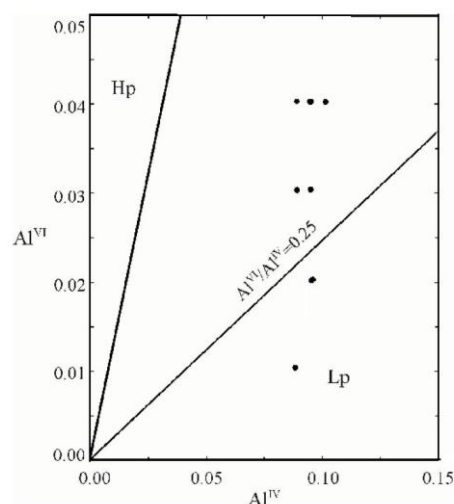


شکل ۱۴- شرایط تبلور تقریبی برای پیروکسن‌های منطقه Helz, (1973).

بررسی محیط زمین‌ساختی

وابستگی ترکیب کلینوپیروکسن‌ها به ترکیب شیمیایی گدازه میزبان، باعث شده تا محققین مختلفی از ترکیب این کانی مخصوصاً انواع فنوکریست آن، در تعیین موقعیت زمین‌ساختی و سری ماگمایی گدازه‌ها استفاده نمایند. بر اساس نمودار Al_2O_3 در برابر SiO_2 (Le Bas, 1962)، کلینوپیروکسن‌های ماگمای به‌وجود آورنده سنگ‌های آتشفشانی یاد شده در قلمرو بازالتهای ساب‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۱۵). با

توزیع آلومینیوم در موقعیت‌های تترااندری و اکتاندری کلینوپیروکسن‌ها در وابستگی به فشار و همچنین میزان آب موجود در محیط تبلور پیروکسن‌هاست. در کلینوپیروکسن‌های منطقه استفاده از نمودار توزیع Al^{IV} در مقابل Al^{VI} فشارسنج مناسبی جهت تعیین فشار است. با این روش پیروکسن‌ها در فشارهای متوسط تا کم تشکیل شده‌اند. این مطلب گویای آن است که تبلور کلینوپیروکسن‌ها در طی صعود و از اعماق به سمت بالا بوده است (معین‌وزیری و احمدی، ۱۳۷۱) (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- زمین‌فشارسنجی و ترسیم نمودار Al^{IV} در برابر Al^{VI} با توجه به ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها، نشان‌دهنده تشکیل کلینوپیروکسن‌ها در فشارهای متوسط تا کم است (Aoki and shiba, 1973).

میزان Al^{IV} به تبعیت از افزایش میزان آب موجود در محیط تبلور پیروکسن‌ها، کاهش می‌یابد (شکل ۱۴). وفور کانی‌های آبدار مانند هورنبلند و بیوتیت، خرد شدن برخی کانی‌ها و همچنین همراهی توف‌ها بیان‌کننده آبدار بودن ماگما و انفجاری بودن ولکانیسم در منطقه جنوب‌غرب جندق است. برای تعیین فوگاسیته اکسیژن در محیط از روش Marcelot و همکاران (۱۹۸۳) استفاده شد. نامبردگان معتقدند میزان آهن Fe^{+3} در محیط تشکیل سنگ‌ها وابسته به فوگاسیته اکسیژن بوده و مقدار آن توسط نمودار

نتیجه‌گیری

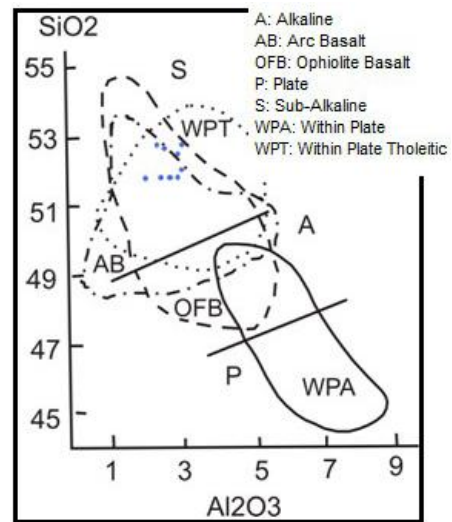
سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در جنوب غرب جندق و در جنوب گسل درونه، گستره وسیعی را پوشش می‌دهند. این سنگ‌ها عمدتاً شامل بازالت، آندزیت، آندزیت کوارتزار، داسیت و لاتیت هستند. با توجه به مطالعات پتروگرافی و شیمی کانی‌ها پلاژیوکلازهای موجود در سنگ‌های بازالتی، آندزیتی و داسیتی غالباً دارای بافت غربالی با حاشیه غباری هستند. وجود دو نوع پلاژیوکلاز در بعضی از داسیت‌ها، باز جذب پلاژیوکلازها و اوپاسیتی شدن هورنبلندها، منطقه‌بندی نوسانی در پلاژیوکلاز آندزیت‌ها، حاشیه خلیجی در بعضی از فنوکریستال‌های کوارتز، مشاهده حاشیه‌های غبارآلود در کانی پلاژیوکلاز که احتمالاً ناشی از قرارگیری پلاژیوکلازهای حرارت پایین در مذاب حرارت بالاتر و عدم تعادل این کانی پس از تبلور است (Shelley, 1993) و وفور ادخال‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی در این سنگ‌ها، احاطه شدن کانی‌هایی از قبیل بیوتیت، هورنبلند و حتی آپاتیت توسط فلدسپات آلکالن (خدای، ۱۳۷۷ و ۱۳۸۵) می‌تواند نشان‌دهنده رخداد آلیش و اختلاط ماگمایی باشد (معین‌وزیری و احمدی، ۱۳۷۱). پلاژیوکلاز موجود در آندزیت‌ها و داسیت‌ها ترکیب آندزین تا لابرادوریت داشته و همچنین آلکالی‌فلدسپارها در محدوده آنورتوکلاز قرار می‌گیرند. آمفیبول این سنگ‌ها در محدوده مگنزیوهایستینگزیت واقع شده و پیروکسن‌های محدوده کم‌سدیم نمودار Quad، بر روی نمودار مثلثی Woll-En-Fs از دیوپسید تا اوژیت تغییر می‌نمایند.

بر اساس ترکیب کلینوپیروکسن‌ها، ماگمای تشکیل دهنده این آتشفشانی‌ها، ساب‌آلکالن است و محیط زمین‌ساختی آن نیز کمان‌های آتشفشانی تعیین شد. با توجه به زمین‌دماسنجی‌های انجام شده، پیروکسن‌ها در فشارهای ۱ تا ۱۰ کیلوپار در محدوده دمای ۹۴۵ تا ۹۵۹ درجه سانتیگراد تشکیل شده‌اند.

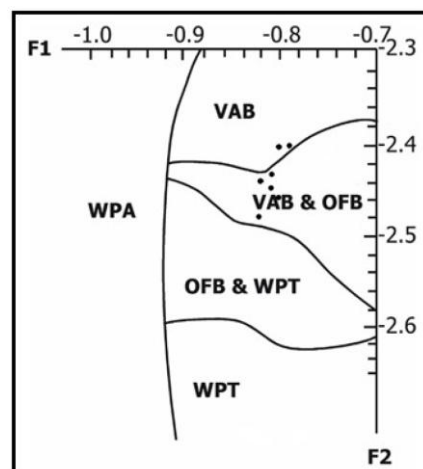
توجه به نمودار F1 و F2 که بر مبنای داده‌های حاصل از کلینوپیروکسن‌ها رسم می‌شود، محیط زمین‌ساختی تشکیل این سنگ‌ها یک کمان آتشفشانی پیشنهاد می‌شود (شکل ۱۶). روش محاسبه F1 و F2 (Nisbet and Pearce, 1977) به صورت زیر است:

$$F_1 = -(0.012 \text{ SiO}_2) - (0.0807 \text{ TiO}_2) + (0.0026 \text{ Al}_2\text{O}_3) - (0.0012 \text{ FeO}^*) - (0.0026 \text{ MnO}) + (0.0087 \text{ MgO}) - (0.0128 \text{ CaO}) - (0.0419 \text{ Na}_2\text{O})$$

$$F_2 = -(0.0469 \text{ SiO}_2) - (0.0818 \text{ TiO}_2) - (0.0212 \text{ Al}_2\text{O}_3) - (0.0041 \text{ FeO}^*) - (0.1435 \text{ MnO}) - (0.0029 \text{ MgO}) + (0.0085 \text{ CaO}) + (0.016 \text{ Na}_2\text{O})$$



شکل ۱۵- ترکیب کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی ماگمای سازنده سنگ‌های منطقه از نوع ساب‌آلکالن است (Le Bas, 1962)



شکل ۱۶- موقعیت قرارگیری کلینوپیروکسن‌های منطقه در نمودار F1 و F2 (Nisbet and Pearce, 1977)

شواهد و دلایل صحرائی و پتروگرافی نشان‌دهنده اختلاط و آرایش در منطقه است. پتروگرافی سنگ‌ها و شیمی‌کانی‌ها گویای تأثیر سیالات بر گوشته فوقانی و ذوب‌بخشی کم آن و سپس اختلاط و آرایش ماگما در حین عبور از بین سنگ‌های ضخیم قاره‌ای است. بنابراین منطقه مورد مطالعه حاصل یک فرورانش از شمال به جنوب است.

دماسنجی زوج هورنبلند-پلاژیوکلاز برای فشارهای ۱ تا ۱۰ کیلوبار، دمای ۸۵۸ تا ۹۴۱ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد و فشارسنجی کلینوپیروکسن‌ها نشان‌دهنده تبلور آن‌ها در حین صعود بوده است. پایین بودن Al^{IV} در پیروکسن‌ها نشانه افزایش میزان آب موجود در محیط تبلور این کانی بوده و با توجه به نمودار $Al^{IV}+Na$ در برابر $Al^{VI}+2Ti+Cr$ ، محیط تشکیل پیروکسن‌ها دارای فوگاسیته بالای اکسیژن بوده است.

منابع

- امامی، م. ه. (۱۳۷۶) ماگماتیسیم در ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- خدای، م. (۱۳۷۷) بررسی پتروگرافی سنگ‌های آتشفشانی شمال باتلاق گاوخونی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
- خدای، م. (۱۳۸۵) بافت و ترکیب پلاژیوکلازها شاهدهی بر اختلاط ماگمایی در سنگ‌های آتشفشانی پلیوکواتر جنوب شرق اصفهان، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران
- درویش‌زاده، ع. (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران. انتشارات امیرکبیر، تهران.
- معین‌وزیری، ح. (۱۳۷۵) دیباچه‌ای بر ماگماتیسیم در ایران. انتشارات دانشگاه تربیت معلم، تهران.
- معین‌وزیری، ح. و احمدی، ع. (۱۳۷۱) پتروگرافی و پتروولوژی سنگ‌های آذرین. انتشارات دانشگاه تربیت معلم، تهران.
- میدل‌موس، ا. ک. (۱۳۷۰) ماگماها و سنگ‌های ماگمایی. ترجمه درویش‌زاده، ع. و آسیابانها، ع.، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- نبوی، م. ح. (۱۳۵۵) دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- Aoki, K. and Shiba, I. (1973) Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome - Gata, Japan. *Lithos* 6: 41-51.
- Cameron, M. and Papike, J. J. (1981) Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist* 66:1-50.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1966) An introduction to the rock-forming minerals. Longman, London.
- Droop, G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogy Magazine* 51: 431-435.
- Ghasemi, A. and Talbot, C. J. (2006) A new tectonic Scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 26: 683-693.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Della Ventura, G. and Mottana, A. (2007) Amphiboles: crystal chemistry, occurrence and health issues. Mineralogical Society of America.
- Helz, R. T. (1973) Phase relations of basalts in their melting ranges at $pH_2O=5$ kb as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases. *Journal of Petrology* 14: 249-302.
- 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.

- Kretz, R. (1994) *Metamorphic crystallization*, John Wiley and Sons, London.
- Le Bas, M. J. (1962) The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science* 260: 267-288.
- Lindsley, D. H. (1983) Pyroxene thermometry. *American Mineralogist* 68: 477-493.
- Marcelot, G., Mauryand, R. C. and Lefevre, C. (1983) Mineralogy of erromango lava New Hebrides: evidence of an early stage of fractionation in island arc basalts. *Lithos* 16: 135-151.
- Morimoto, N., Fabrise, J., Ferguson, A., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G. (1988) Nomenclature of pyroxene. *Mineralogical Magazine* 52: 535-555.
- Nimis, P. and Taylor wayne, 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 139: 544-554.
- Nisbet, E. G. and Pearce, J. A. (1977) Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63: 149-160.
- Shelley, D. (1993) *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall, London.
- Susov, M., Dvoryankin, A. and Selivanov, E. (1974) *Geology of Jandaq Area (Central Iran)*. Geological Survey of Iran, Iran.