

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، از صفحه ۴۷۹ تا ۴۹۴

## دما-فشارسنجدی و خاستگاه گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک (شمال شرق سربیشه، شرق ایران) بر پایه شیمی کانی‌ها

سید سعید محمدی<sup>۱\*</sup>، سون لین چانگ<sup>۲و۳</sup>، ملیحه نخعی<sup>۴</sup>، محمدحسین زرین‌کوب<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، ایران

۲- انسٹیتو علوم زمین، آکادمیا سینیکا، تایپه، تایوان

۳- گروه علوم زمین، دانشگاه ملی تایوان، تایپه، تایوان

۴- گروه مهندسی معدن، دانشکده عمران، معدن و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۶/۵، نسخه نهایی: ۹۹/۸/۱۷)

**چکیده:** در منطقه زولسک در ۱۱ کیلومتری شمال شرق شهرستان سربیشه در استان خراسان جنوبی، سنگ‌های آتشفسانی شامل آندزیت، داسیت و ریولیت بروزد دارند که گدازه‌های آندزیتی دارای بیشترین گسترش بوده و در این پژوهش بررسی شدند. بافت‌های غالب در آندزیت‌ها شامل پورفیری با خمیره میکرولیتی شیشه‌ای، گلومروپورفیری و حفره‌ای هستند. کانی‌های تشکیل‌دهنده آندزیت‌ها پلازیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و به ندرت سانیدین هستند. درشت بلورهای پلازیوکلاز در برخی نمونه‌ها منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی دارند و در لبه برخی بلورها، آثار خوردگی، گردشگی و حاشیه واجذبی دیده می‌شود. بر اساس نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی، پلازیوکلازها دارای گستره ترکیبی  $An_{46}Ab_{54}$  تا  $An_{33}Ab_{67}$  و از نوع آندزین هستند. درشت بلورهای کلینوپیروکسن ترکیب اوزربت مایل به دیوپسید (En<sub>39.41</sub> Fs<sub>13.17</sub> Wo<sub>43.47</sub>) و ارتوبیروکسن‌ها ترکیب انستابیت (En<sub>41.74</sub> Fs<sub>13.43</sub> Wo<sub>2.3</sub>) دارند. مقادیر #Mg در کلینوپیروکسن و ارتوبیروکسن به ترتیب از ۷۵-۷۶ و ۵۶-۷۶ متغیر است. دماسنجدی به روش‌های مختلف نشان داد که دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌ها ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای تشکیل ارتوبیروکسن ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. فشار تشکیل کلینوپیروکسن و ارتوبیروکسن در نمونه‌های مورد بررسی، کمتر از ۲ کیلوبار محاسبه شد.

**واژه‌های کلیدی:** آندزیت، آهکی قلیایی، پیروکسن، دما-فشارسنجدی، زولسک، بلوك لوت.

### مقدمه

گدازه و سنگ‌های آذرآواری رخمنون دارند، اوسن تا الیگوسن تعیین شده است [۴]. تاکنون، پژوهش‌های مختلفی پیرامون فعالیت ماغمایی ترشیری مناطق شرق و شمال شرق سربیشه انجام شده است (برای مثال، [۵-۹]). بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، گدازه‌های منطقه سربیشه دارای ماهیت آهکی قلیایی هستند و از نظر جایگاه زمین ساختی و استه به محیط فرورانش و حاشیه فعال قاره معرفی شده است. بررسی چگونگی تکامل فیزیکی و شیمیایی درشت بلورها برای درک فرایندهای ماغمایی شامل جدایی و صعود ماغما از عمق، انباشتگی و

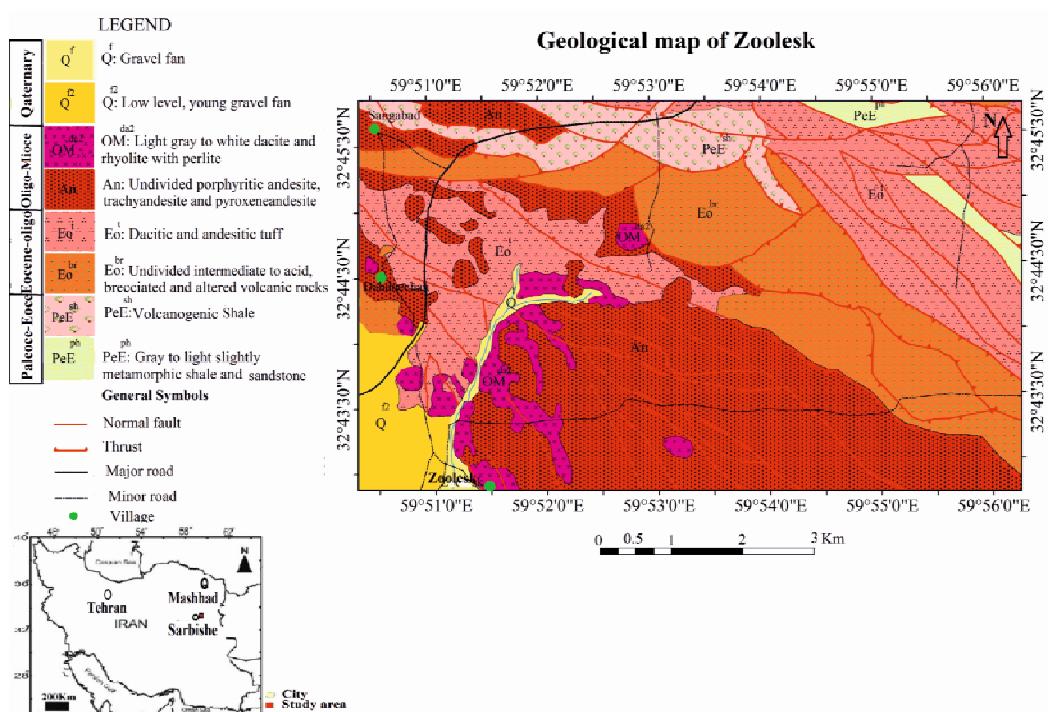
منطقه زولسک در ۱۱ کیلومتری شمال شرق شهرستان سربیشه بین طول‌های جغرافیایی  $59^{\circ} 59' 56''$  تا  $59^{\circ} 59' 59''$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $30^{\circ} 32' 45'$  تا  $30^{\circ} 43' 00''$  شمالی و در گستره نقشه زمین‌شناسی سربیشه [۱]، ۱/۱۰۰۰۰۰ در قرار دارد. این منطقه از نظر تقسیمات ساختاری در بخش شرقی بلوك لوت واقع است. فعالیت ماغمایی گستردگی در بلوك لوت از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است [۳، ۲]. سن فعالیت ماغمایی شرق ایران که بیشتر به صورت

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۶۳۲۰۲۰۴۱، نمبر: ۰۵۶۳۲۰۲۰۴۱، پست الکترونیکی: ssmohammadi@birjand.ac.ir

منطقه زولسک انجام نشده است، در این پژوهش شیمی کانی‌ها بررسی شد و بر پایه آن، موقعیت زمین‌ساختی و شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور سنگ‌های آتشفسانی منطقه تعیین شدند.

#### زمین‌شناسی منطقه

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه مورد بررسی، شیل و ماسه-سنگ دگرگون‌شده مربوط به اوایل ترشیری است [۱]. بخش گسترهای از این منطقه را سنگ‌های آتشفسانی وابسته به ترشیری همراه با توفهای آندزیتی- داسیتی تشکیل داده است. گدازه‌های آندزیتی از واحدهای مربوط به الیگو- میوسن هستند که با ترکیب پیروکسن آندزیت، آندزیت و تراکی آندزیت [۹] از شرق روستای زولسک تا جنوب شرقی روستای آندزیت گسترش دارند (شکل ۱). واحدهای آندزیتی با ساختار دهنگاه گسترش دارند (شکل ۱). واحدهای آندزیتی با ساختار گبدی به رنگ خاکستری روشن تا تیره رخنمون دارند. حضور درزهای انقباضی و قطعه‌بندی شدن از پدیده‌های راج در آندزیت‌هاست. بر روی این واحد، گدازه‌های اسیدی شامل داسیت و ریولیت (گاهی پرلیتی شده) قرار دارند (شکل ۱). وجود گسل‌های متعدد وابسته به پهنه گسلی سربیشه در منطقه مورد بررسی، سبب خردشدن گدازه‌ها و سنگ‌های آذرآواری همراه آن‌ها و ایجاد زمینه مناسب برای تشکیل پهنه‌های بتونیتی شده است [۹].



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه زولسک براساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ [۱] با اصلاحات توسط کوچی و همکاران [۹].

آمیختگی دسته‌هایی از ماقما در یک اتاق ماقمایی و همچنین چگونگی حرکت سامانه‌های آتشفسانی اهمیت دارد. شیمی کانی‌ها از ابزار کلیدی برای شناسایی تغییرات دما، فشار، مقدار آب، گریزندگی اکسیژن و شیمی مذاب در اتاق ماقمایی است [۱۰-۱۲]. پیروکسن از جمله کانی‌های سنگ‌ساز است که ترکیب شیمیایی آن، بویژه درشت بلورهای این کانی در سنگ‌های آتشفسانی، ماهیت گدازه میزان را نشان می‌دهد و با بررسی شیمی پیروکسن، می‌توان سری ماقمایی، محیط زمین-ساختی و خاستگاه توده آذرین را تعیین نمود. افزون بر این، بر پایه ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن و ارتپیروکسن، می‌توان دما و فشار تشکیل سنگ را ارزیابی کرد [۱۳-۲۰]. برای این منظور، از یک کانی یا زوج پیروکسنی در حال تعادل استفاده می‌شود [۱۱، ۲۰].

پلازیوکلاز یک درشت بلور تقریباً فراگیر در سنگ‌های آتشفسانی بازالتی تا ریولیتی در مناطق فروزانش است که در طیف گسترهای از شرایط فیزیکی- شیمیایی پایدار بوده و نسبت به تغییر پارامترهای ترمودینامیکی طی رشد در اتاق ماقمایی و همچنین صعود ماقما حساس است [۲۱-۲۳]. بنابراین، به عنوان متداول‌ترین فاز برای ثبت فرآیندهای ماقمایی و مقیاس زمانی آن‌ها استفاده می‌شود [۲۴]. از آنجا که تاکنون هیچ پژوهشی پیرامون شیمی کانی‌ها در گدازه‌های

پلازیوکلازها بر پایه زاویه خاموشی، آندزین تا الیکوکلاز است. برخی درشت بلورهای پلازیوکلاز دارای منطقه‌بندی و بافت غربالی هستند (شکل ۲ پ) و گاهی در حاشیه آن‌ها آثار خوردگی، گردش‌گی و حاشیه واحدی دیده می‌شود که می‌توان آن را به تغییرات فشار و یا عدم تعادل شیمیایی درشت بلورها با مآگمای سازنده طی خروج گدازه نسبت داد [۲۵].

کلینوپیروکسن شکل‌دار (شکل‌های ۲ پ و ت) تا بی‌شکل با حاشیه خلیجی (شکل ۲ ث) است و ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم سنگ را شامل می‌شود. درشت بلورهای بی‌شکل ارتوبیروکسن همراه با پلازیوکلاز و کلینوپیروکسن در انباسته‌هایی که بافت گلومرولوپورفیری را بوجود آورده‌اند، دیده می‌شوند (شکل ۲ ب). هورنبلند با اندازه  $0.5 \times 1/2$  میلی‌متر به مقدار کم وجود دارد. بیوتیت به مقدار کمتر از  $10 \times 1/2$  میلی‌متر به صورت درشت بلور (شکل ۲ ج) و بلورهای ریز در زمینه سنگ دیده می‌شود. کانی کدر و سانیدین سازای فرعی سنگ هستند.

#### شیمی کانی‌ها

ترکیب درشت بلورها در سنگ‌های آتشفسانی به شناسایی فرآیندهای مآگمایی پیش و پس از فوران کمک می‌نماید. برای پی‌بردن به ترکیب شیمیایی کانی‌ها و شرایط انجام مآگما، کانی‌های پلازیوکلاز و پیروکسن در گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک با ریزکاو الکترونی تجزیه شدند.

#### شیمی پلازیوکلاز

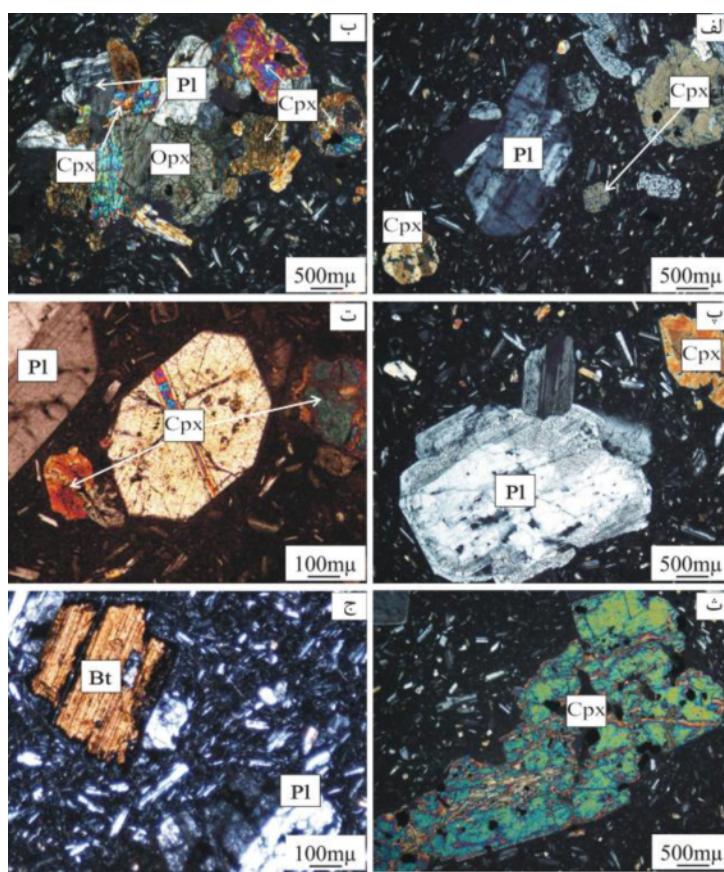
بر پایه بررسی‌های سنگ نگاری، پلازیوکلاز فراوان‌ترین کانی تشکیل‌دهنده آندزیت‌های منطقه زولسک است. برای پی‌بردن به ترکیب شیمیایی این کانی، بلورهای پلازیوکلاز در  $43 \times 43$  نقطه با ریزکاو الکترونی تجزیه شدند که گزیده‌ای از نتایج به همراه محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. پلازیوکلازها در این سنگ‌ها دارای گستره ترکیبی  $Ab_{67}An_{23}Ca_{0.1}$  تا  $Ab_{54}An_{46}$  و از نوع آندزین هستند (شکل ۳ الف). طیف EDS برگزیده‌ای از کانی پلازیوکلاز در شکل ۳ ب نشان داده شده است؛ دیده می‌شود که در ترکیب آن پلازیوکلاز شدت قله Na در مقایسه با Ca بیشتر بوده که بیانگر ترکیب حدواسط و مایل به سدیمی برای آن است.

#### روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش، نخست پیمایش‌های صحرایی به مدت ۶ روز انجام گردید و طی آن، از رخمنون‌های سنگی، نمونه‌برداری شد. سپس از نمونه‌های مناسب، ۸۰ مقطع نازک برای سنگنگاری تهیه شد. به منظور بررسی شیمی کانی‌های پیروکسن و پلازیوکلاز در گدازه‌های آندزیتی، ۵ مقطع نازک صیقلی تهیه گردید و پس از مراحل آماده‌سازی، در انتیتو علوم زمین آکادمیا سینیکا در شهر تایپه کشور تایوان بررسی شدند. برای مشاهده بافت‌های ریزمقیاس و تهیه تصاویر الکترونی پس پراکنده (BSE) از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مدل JEOL JSM-6360LV استفاده گردید. فازهای کانی‌ها با طیف سنج پراکنده‌گیری (EDS) اکسفورد مدل INCA-350، Xmax-50 کیلوولت و  $20 \text{ nA}$  میکرومتر شناسایی شدند. تجزیه ریزپردازشی الکترونی کانی‌های پلازیوکلاز و پیروکسن توسط دستگاه JEOL EPMA JXA-8900R مجهز به چهار طیف‌سنج با طول موج انتشاری، با شتاب دهنده‌ای با ولتاژ  $15 \text{kV}$  و جریان پرتوی  $12 \text{nA}$  انجام شد. پس از آن، نمودارهای لازم با استفاده از نرم افزار Minpet رسم و تفسیر شدند.

#### سنگنگاری

گدازه‌های منطقه زولسک شامل آندزیت، داسیت، ریولیت (گاهی پرلیتی) و توف‌های داسیتی – آندزیتی هستند که در این پژوهش، گدازه‌های آندزیتی مورد بررسی دقیق سنگنگاری و کانی شناسایی قرار گرفتند. گدازه‌های آندزیتی شامل پیروکسن آندزیت و آندزیت هستند. بافت‌های غالب در این سنگ‌ها پورفیری با خمیره میکرولیتی شیشه‌ای (شکل ۲ الف)، گلومرولوپورفیری (شکل ۲ ب)، پوئی‌کلیتیک و حفره‌ای هستند. آندزیت‌ها از کانی‌های پلازیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت و به ندرت سانیدین تشکیل شده‌اند. پلازیوکلاز فراوان‌ترین کانی موجود در آندزیت‌هاست که حدود  $55 \text{ to } 65$  درصد حجم سنگ را شامل می‌شود. این کانی به صورت درشت بلورهای بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار (شکل ۲ الف) و ریزسنگ در زمینه سنگ وجود دارد و اندازه آن از  $0.1 \text{ to } 0.7 \text{ mm}$  متغیر است. ترکیب



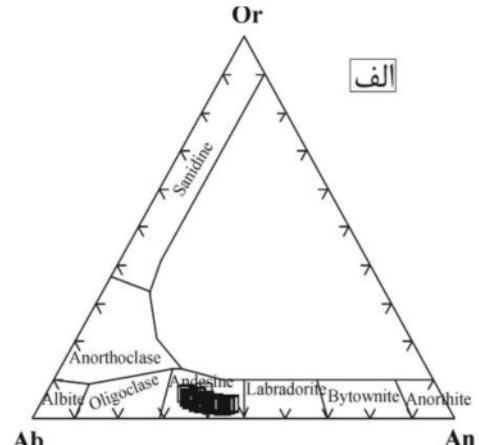
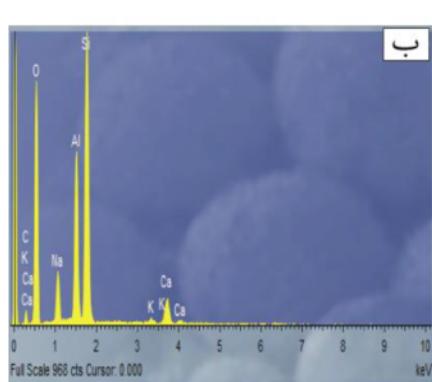
شکل ۲ ویژگی‌های میکروسکوپی آندزیت‌های منطقه زولسک: (الف) بافت پورفیری با خمیره میکرولیتی شیشه‌ای، (ب) بافت گلومروپورفیری و حضور کانی‌های پلازیوکلاز، کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن، (پ) درشت بلورهای پلازیوکلاز دارای منطقه‌بندی و بافت غربالی در حاشیه، (ت) کلینوپیروکسن شکل‌دار، (ث) کلینوپیروکسن بی‌شکل و دارای حاشیه خلیجی و (ج) درشت بلور بیوتیت (همه شکل‌ها در نور قطبیده متقاطع، XPL ثبت شده‌اند) نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۲۶] هستند.

جدول ۱ نتایج تجزیه ریز پردازشی پلازیوکلازها در گدازه‌های آندزیتی زولسک (بر حسب درصد وزنی) به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر پایه ۸ اتم اکسیژن.

نمونه	D5-14	D5-16	D5-17	D5-18	D5-19	D5-20	D5-24	D5-25	D5-26
SiO <sub>2</sub>	۶۰.۲۳	۵۸.۸۴	۵۸.۰۹	۵۷.۰۵	۵۷.۰۱	۵۸.۸۹	۵۷.۹۹	۵۸.۷۸	۵۸.۹۳
TiO <sub>2</sub>	...	۰.۰۶	...	۰.۰۳	...	۰.۰۷	۰.۰۳	...	...
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۴.۹۱	۲۵.۶۷	۲۵.۲۵	۲۶.۸۶	۲۶.۴۲	۲۵.۶۰	۲۶.۰۱	۲۵.۸۱	۲۵.۶۶
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰.۰۱	...	...	...	...	...	۰.۰۳	...	۰.۰۲
FeO	۰.۲۳	۰.۱۷	۰.۲۳	۰.۲۵	۰.۱۹	۰.۲۲	۰.۱۹	۰.۲۸	۰.۲۹
MnO	...	۰.۰۱	...	...	۰.۰۴	۰.۰۱	...	...	۰.۰۱
MgO	...	۰.۰۱	...	۰.۰۳	...	۰.۰۱	...	...	...
CaO	۶.۹۲	۷.۷۸	۷.۹۰	۸.۹۹	۸.۸۲	۷.۷۷	۸.۲۵	۷.۹۸	۷.۶۴
Na <sub>2</sub> O	۶.۶۶	۶.۴۳	۶.۴۷	۵.۸۱	۵.۹۷	۶.۵۳	۶.۰۳	۶.۳۸	۶.۳۰
K <sub>2</sub> O	۰.۹۷	۰.۷۹	۰.۷۰	۰.۶۰	۰.۵۸	۰.۷۴	۰.۶۹	۰.۷۵	۰.۷۸
مجموع	۹۹.۹۳	۹۹.۷۶	۹۹.۱۵	۹۹.۶۳	۹۹.۰۴	۹۹.۸۴	۹۹.۲۲	۹۹.۹۸	۹۹.۶۳
Si	۲۶.۹	۲۶.۴	۲۶.۵	۲۵.۷	۲۵.۸	۲۶.۴	۲۶.۲	۲۶.۳	۲۶.۴
Ti	...	۰.۰۰	...	۰.۰۰	۰.۰۰	...	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Al	۱.۳۱	۱.۳۶	۱.۲۴	۱.۴۳	۱.۴۱	۱.۳۵	۱.۳۸	۱.۳۶	۱.۳۶
Cr	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Fe <sup>2+</sup>	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
Mn	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Mg	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Ca	۰.۳۳	۰.۳۷	۰.۳۸	۰.۴۳	۰.۴۳	۰.۳۷	۰.۴۰	۰.۳۸	۰.۳۷
Na	۰.۰۸	۰.۰۶	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۷	۰.۰۳	۰.۰۵	۰.۰۵
K	۰.۱۶	۰.۰۵	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۴
مجموع	۴.۹۷	۴.۹۸	۴.۹۹	۴.۹۹	۴.۹۹	۴.۹۹	۴.۹۷	۴.۹۹	۴.۹۷
Na/(Na+K+Ca)	۰.۶۰	۰.۵۷	۰.۵۷	۰.۵۲	۰.۵۳	۰.۵۸	۰.۵۵	۰.۵۷	۰.۵۷
K/(Na+K+Ca)	۰.۰۶	۰.۰۵	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۴	۰.۰۵
Ca/(Na+K+Ca)	۰.۲۴	۰.۲۸	۰.۲۹	۰.۴۴	۰.۴۳	۰.۳۸	۰.۴۱	۰.۳۹	۰.۳۸

ادامه جدول ۱

نمونه	D5-27	D5-28	D5-30	D5-31	D5-32	D5-33	D5-34	D5-35	D5-36
SiO <sub>2</sub>	۵۹.۴۳	۵۹.۵۰	۵۴.۸۶	۵۷.۶۷	۵۹.۹۳	۵۹.۲۱	۵۹.۶۲	۵۷.۱۳	۵۸.۳۲
TiO <sub>2</sub>	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۵.۲۴	۲۴.۹۴	۲۸.۵۰	۲۶.۱۲	۲۴.۶۵	۲۵.۲۱	۲۴.۷۴	۲۶.۷۱	۲۵.۹۹
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
FeO	۰.۲۱	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۲۱	۰.۱۳	۰.۳۱	۰.۱۷	۰.۲۰	۰.۱۷
MnO	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۲
MgO	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۰
CaO	۷.۴۴	۷.۲۷	۱۰.۹۹	۸.۵۶	۶.۶۸	۷.۷۹	۷.۲۲	۹.۲۳	۸.۳۵
Na <sub>2</sub> O	۶.۲۵	۶.۳۷	۴.۸۳	۵.۹۲	۶.۵۰	۶.۲۴	۶.۴۹	۵.۷۰	۶.۰۸
K <sub>2</sub> O	۰.۸۴	۱.۰۷	۰.۵۰	۰.۷۰	۱.۱۹	۰.۹۳	۱.۰۱	۰.۷۲	۰.۷۹
مجموع	۹۹.۴۷	۹۹.۴۲	۹۹.۹۰	۹۹.۲۱	۹۹.۱۸	۹۹.۹۲	۹۹.۳۶	۹۹.۷۲	۹۹.۸۵
Si	۲۶۷	۲۶۷	۲۴۸	۲۶۰	۲۷۰	۲۶۶	۲۸۸	۲۵۷	۲۶۲
Ti	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Al	۱.۳۳	۱.۳۲	۱.۰۲	۱.۳۹	۱.۳۱	۱.۳۴	۱.۳۱	۱.۴۲	۱.۳۷
Cr	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Fe <sup>2+</sup>	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱
Mn	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Mg	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰
Ca	۰.۳۶	۰.۳۵	۰.۵۳	۰.۴۱	۰.۳۲	۰.۳۷	۰.۳۵	۰.۴۵	۰.۴۰
Na	۰.۵۴	۰.۵۶	۰.۴۲	۰.۵۲	۰.۵۷	۰.۵۴	۰.۵۷	۰.۵۰	۰.۵۳
K	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۷	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۰۵
مجموع	۴.۹۶	۴.۹۷	۴.۹۹	۴.۹۸	۴.۹۷	۴.۹۷	۴.۹۸	۴.۹۹	۴.۹۸
Na/(Na+K+Ca)	۰.۵۷	۰.۵۷	۰.۴۳	۰.۵۳	۰.۵۹	۰.۵۶	۰.۵۸	۰.۵۱	۰.۵۴
K/(Na+K+Ca)	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۰۷	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۰۴	۰.۰۵
Ca/(Na+K+Ca)	۰.۳۸	۰.۳۶	۰.۵۴	۰.۴۳	۰.۳۴	۰.۳۹	۰.۳۶	۰.۴۵	۰.۴۱

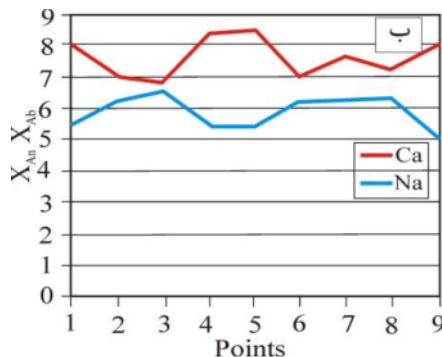


شکل ۳ (الف) نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها [۲۷] و ترکیب پلاژیوکلازهای مورد بررسی براς اس آن (ب) یک طیف EDS از کانی پلاژیوکلاز.

بیرونی آن تقارن بیشتری دارد که این بیانگر باز تعادل حاشیه بلور طی اقامت طولانی در اتاق ماقمایی است [۲۲، ۲۰]. تغییر مقدار کلسیم در بخش‌های مختلف بلور (حاشیه-مرکز-حاشیه) می‌تواند نشان‌دهنده تغییر ترکیب ماغما باشد، زیرا ترکیب ماغما و درشت بلورها از نظر ترمودینامیکی به هم وابسته هستند [۲۹]. ترکیب پلاژیوکلاز به عوامل فیزیکی چون دما و فشار و همچنین گستره وسیعی از کنترل کننده‌های ترکیبی از جمله مقدار آب مذاب بستگی دارد، به طوری که غلظت آنورتیت در پلاژیوکلاز با دو عامل دما و غلظت آب مذاب به شدت افزایش می‌یابد [۳۰]. از طرف دیگر، افزایش فشار سبب تشکیل پلاژیوکلاز با آلیت بیشتر می‌شود [۲۹]. بر این اساس،

درک ماهیت و مقیاس زمانی فرایندهای ماقمایی، از اهداف اصلی آتششناسی مدرن بوده و منطقه‌بندی شیمیایی در کانی‌ها از کارآمدترین ابزار آن است [۲۸، ۲۴]. نتایج تجزیه نقطه‌ای انجام شده در بلورهای پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی، از درک ماهیت و مقیاس زمانی فرایندهای ماقمایی، از اهداف اصلی آتششناسی مدرن بوده و منطقه‌بندی شیمیایی در کانی‌ها از کارآمدترین ابزار آن است [۲۸، ۲۴]. نتایج تجزیه نقطه‌ای انجام شده در بلورهای پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی، از این نتایج تجزیه شده و نیمرخ زمین شیمیایی تغییر مقدار موقعیت نقاط تجزیه شده و نیمرخ زمین شیمیایی تغییر مقدار Na و Ca در یک بلور پلاژیوکلاز نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ (الف و ب)، تغییر سازی آنورتیت و آلیت بیانگر وجود منطقه‌بندی نوسانی در کانی است. همچنین، بررسی نیمرخ یادشده نشان می‌دهد که در مقایسه با مرکز بلور، بخش‌های

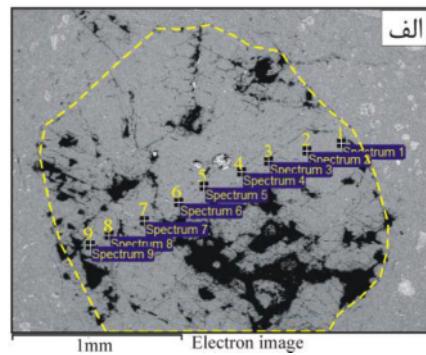
ریزپردازشی نقاط برگزیده از بین ۴۵ نقطه از پیروکسن‌های موردن بررسی و محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. بر پایه نمودار Q-J، پیروکسن‌ها به چهار گروه پیروکسن‌های سدیمی، پیروکسن‌های سدیمی-کلسیمی، پیروکسن‌های کلسیمی-منیزیم-آهن‌دار (Quad) و پیروکسن‌های دیگر تقسیم می‌شوند [۳۴، ۳۵]. نمودار Q-J بر اساس دو شاخص  $\text{J} = 2\text{Na} - \text{Ca} + \text{Mg} + 2\text{Fe}$  رسم شده است. ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های موردن بررسی بر پایه این نمودار، در گستره پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن‌دار قرار دارد (شکل ۵).



پلازیوکلаз می‌تواند به عنوان رطوبت‌سنج یا دما‌سنج در سنگ‌های آتشفشاری استفاده شود [۳۱، ۳۰، ۱۷]. بر این اساس، تغییر ترکیب شیمیایی و ایجاد منطقه‌بندی نوسانی در پلازیوکلاز‌های موجود در گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک را می‌توان وابسته به تغییر عواملی چون ترکیب مذاب، غلظت آب محلول، دما و فشار طی صعود ماگما در پوسته دانست.

### شیمی پیروکسن

ترکیب شیمیایی پیروکسن در ارتباط با نوع ماقمای در برگیرنده آن است و بررسی شیمی این کانی اطلاعات ارزشمندی در مورد خاستگاه ماقمای سازنده گدازه‌های میزبان در اختیار قرار می‌دهد [۳۳، ۳۲، ۲۰، ۱۱، ۱۴]. نتایج تجزیه



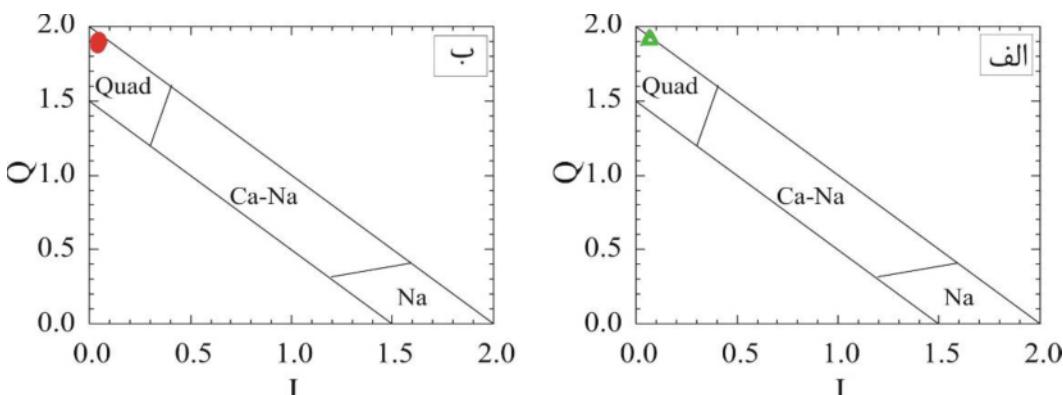
شکل ۴ (الف) تصویر BSE همراه با موقعیت نقاط تجزیه شده، (ب) نیمرخ زمین شیمیایی تغییر مقدار Ca و Na در یک بلور پلازیوکلاز.

جدول ۲ نتایج تجزیه ریزپردازشی نقاط برگزیده از کلینوپیروکسن‌های موردن بررسی در سنگ‌های آتشفشاری منطقه زولسک (بر حسب درصد وزنی) به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن.

نمونه	D5-90	D5-91	D5-92	D5-93	D5-104	D5-105	D5-106	D5-107	D5-108
SiO <sub>2</sub>	52.39	52.36	52.94	52.15	52.07	51.91	52.88	51.82	52.24
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.20	0.19	0.29	0.12	0.23	0.18	0.23	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	0.89	0.72	1.35	0.87	1.35	0.83	0.68	0.92
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.02
FeO	9.70	9.70	10.67	9.72	9.61	10.35	10.47	10.89	9.95
MnO	0.32	0.20	0.34	0.20	0.29	0.34	0.34	0.32	0.22
MgO	14.06	13.92	13.70	13.96	13.94	13.40	13.66	13.82	14.03
CaO	21.30	21.74	21.70	21.59	21.63	21.91	21.72	20.75	21.62
Na <sub>2</sub> O	0.28	0.29	0.21	0.30	0.26	0.22	0.27	0.30	0.23
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
مجموع	99.23	99.29	100.48	99.55	99.90	99.96	100.16	99.62	99.64
Si	1.97	1.97	1.97	1.95	1.98	1.94	1.98	1.99	1.96
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Al	0.04	0.04	0.03	0.06	0.04	0.06	0.03	0.03	0.04
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.07	0.03	0.00	0.05
Fe <sup>2+</sup>	0.26	0.27	0.19	0.27	0.28	0.25	0.30	0.34	0.26
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.79	0.78	0.76	0.78	0.78	0.75	0.76	0.76	0.78
Ca	0.86	0.88	0.87	0.87	0.87	0.88	0.87	0.84	0.87
Na	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
مجموع	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Mg(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	0.75	0.74	0.72	0.75	0.73	0.75	0.72	0.69	0.75
En	0.41	0.41	0.40	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.41
Fs	0.14	0.14	0.15	0.14	0.15	0.13	0.16	0.17	0.14
Wo	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.47	0.45	0.43	0.45
Jd	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01
Ac	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Aug	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98

جدول ۳ نتایج تجزیه ریزپردازشی نقاط برگزیده از ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی در سنگ‌های آتشفسانی منطقه زولسک (برحسب درصد وزنی) به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن

نمونه	D5-51	D5-53	D5-54	D5-55	D5-56	D5-57	D5-58	D5-59	D5-60
SiO <sub>2</sub>	۵۱,۹۷	۵۲,۲۹	۵۲,۳۶	۵۲,۶۹	۵۲,۰۰	۵۲,۴۷	۵۱,۴۵	۵۲,۰۶	۵۲,۱۰
TiO <sub>2</sub>	۰,۰۹	۰,۰۹	۰,۰۵	۰,۰۹	۰,۰۲	۰,۱۴	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۰۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۳۸	۰,۳۳	۰,۲۸	۰,۳۹	۰,۳۰	۰,۳۱	۰,۳۸	۰,۲۹	۰,۲۹
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۲	۰,۰۰	۰,۰۰
FeO	۲۶,۱۷	۲۶,۰۰	۲۵,۶۶	۲۴,۸۸	۲۵,۸۵	۲۵,۶۷	۲۵,۶۷	۲۵,۸۷	۲۶,۱۰
MnO	۰,۷۸	۰,۷۲	۰,۷۲	۰,۷۷	۰,۷۹	۰,۷۳	۰,۸۰	۰,۷۵	۰,۸۳
MgO	۱۸,۹۶	۱۹,۸۷	۱۹,۶۷	۲۰,۰۶	۱۹,۴۶	۲۰,۱۷	۲۰,۰۶	۲۰,۰۲	۱۹,۴۷
CaO	۰,۹۶	۰,۹۶	۰,۹۳	۰,۹۹	۰,۸۴	۰,۸۳	۰,۹۴	۰,۹۲	۰,۸۴
Na <sub>2</sub> O	۰,۰۵	۰,۰۴	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۶	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۴
K <sub>2</sub> O	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
مجموع	۹۹,۳۶	۱۰۰,۲۹	۹۹,۶۷	۹۹,۸۷	۹۹,۲۶	۱۰۰,۳۹	۹۹,۴۲	۹۹,۹۹	۹۹,۷۳
Si	۱,۹۹	۱,۹۸	۱,۹۹	۱,۹۹	۱,۹۹	۱,۹۸	۱,۹۶	۱,۹۷	۱,۹۸
Ti	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Al	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱
Cr	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
Fe <sup>3+</sup>	۰,۰۰	۰,۰۳	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۴	۰,۰۲
Fe <sup>2+</sup>	۰,۸۴	۰,۷۹	۰,۸۲	۰,۸۰	۰,۸۲	۰,۷۸	۰,۷۶	۰,۷۸	۰,۸۱
Mn	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۳	۰,۰۲	۰,۰۳
Mg	۱,۰۸	۱,۱۲	۱,۱۲	۱,۱۳	۱,۱۱	۱,۱۳	۱,۱۴	۱,۱۳	۱,۱۱
Ca	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۳
Na	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
K	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰
مجموع	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰	۴,۰۰
Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> )	۰,۵۶	۰,۵۹	۰,۵۸	۰,۵۹	۰,۵۸	۰,۵۹	۰,۶۰	۰,۵۹	۰,۵۸
En	۰,۵۵	۰,۵۷	۰,۵۷	۰,۵۷	۰,۵۷	۰,۵۸	۰,۵۹	۰,۵۸	۰,۵۷
Fs	۰,۴۳	۰,۴۱	۰,۴۱	۰,۴۱	۰,۴۲	۰,۴۰	۰,۳۹	۰,۴۰	۰,۴۲
Wo	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲	۰,۰۲



شکل ۵ (الف) موقعیت کلینوپیروکسن‌ها و (ب) ارتوپیروکسن‌های منطقه زولسک در نمودار Q-J (۳۵، ۳۴) (y=2Na و Q=Ca+Mg+Fe+2).

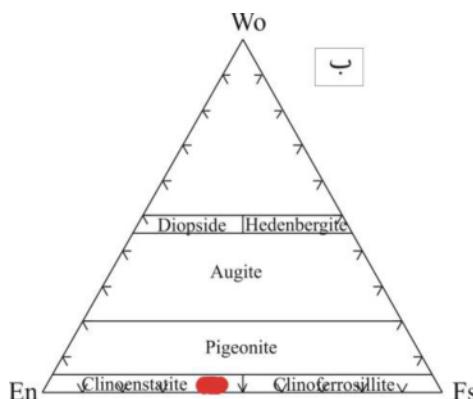
ارتوپیروکسن‌های بررسی شده به ترتیب در گستره ۶۹-۷۵ و ۵۶-۷۶ است.

تعیین سری ماقمایی بر اساس شیمی پیروکسن از بین کانی‌های موجود در سنگ‌های آتشفسانی، پیروکسن‌ها

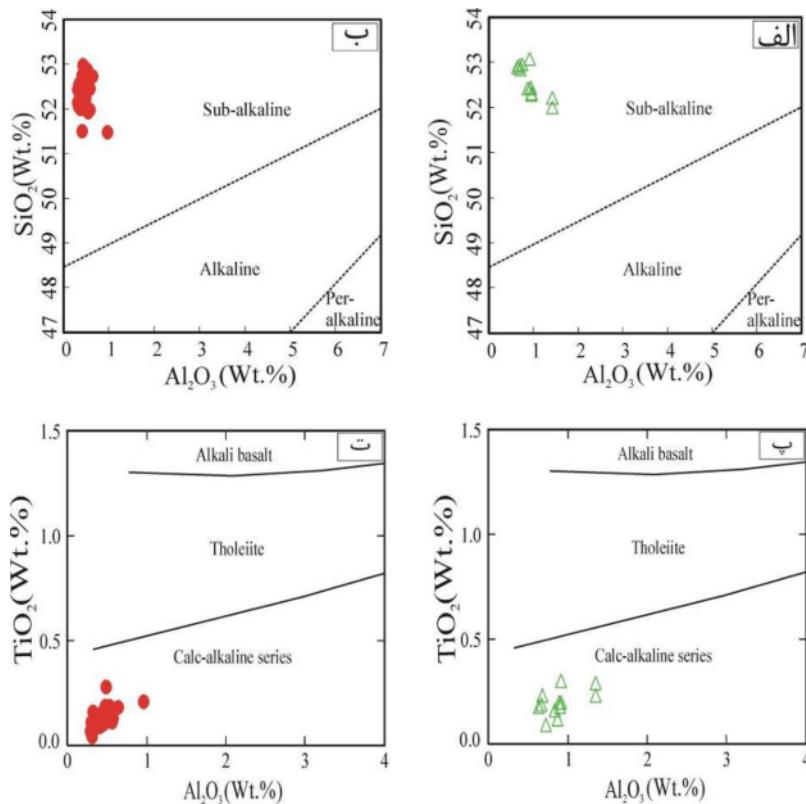
با توجه به جای گرفتن پیروکسن‌ها در گستره Quad، می‌توان از نمودار مثلثی Wo-En-Fs [۳۴] برای شناسایی نوع آن‌ها بهره گرفت. در این نمودار، کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی ترکیب اوژیت متمایل به دیوپسید (En<sub>39-41</sub> Fs<sub>13-17</sub>) و ارتوپیروکسن‌ها ترکیب انسنتاتیت (En<sub>41-43</sub> Fs<sub>13-43</sub>) (Wo<sub>43-47</sub>) را نشان می‌دهند (شکل ۶). مقدار (Wo<sub>2-3</sub>)

ماگماهای تولئیتی و آهکی قلیایی قابل تفکیک هستند [۳۶]. براساس نمودارهای تعیین سری ماگمایی پیروکسن‌های مورد بررسی (شکل ۷)، پیروکسن‌های منطقه، در گستره نیمه‌قلیایی و آهکی قلیایی قرار دارند. حضور ارتوبیروکسن در ماگماهای کمان به دلیل فعالیت بالای سیلیس در این ماگماهاست. واکنش‌های آب-سنگ در گوشهٔ سری ماگمایی نیمه‌قلیایی آب‌دار می‌تواند باعث غنی‌شدن ارتوبیروکسن شوند [۳۷].

به ویژه کلینوپیروکسن می‌تواند همه عناصر موجود در ماگما را در خود جای دهد، بنابراین ترکیب آن می‌تواند بیانگر نوع ماگمایی باشد که این کانی از آن شکل گرفته است. مقدار Si و Al درون شبکه ساختاری پیروکسن به درجه قلیایی بودن بستگی دارد. براساس مقدار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{SiO}_2$  موجود در پیروکسن‌ها، سه سری ماگمایی نیمه‌قلیایی، قلیایی و فوق-قلیایی و همچنین بر پایه نمودار  $\text{TiO}_2$  نسبت به  $\text{Al}_2\text{O}_3$



شکل ۶ الف) موقعیت کلینوپیروکسن‌ها و ب) ارتوبیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفسانی منطقه زولسک در نمودار رده‌بندی پیروکسن‌ها [۳۴].



شکل ۷ الف و ب) نمودارهای  $\text{SiO}_2$  نسبت به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و پ و ت) نمودارهای  $\text{TiO}_2$  برای تعیین سری ماگمایی [۳۶] و موقعیت کلینوپیروکسن‌ها و ارتوبیروکسن‌های موجود در سنگ‌های آتشفسانی منطقه زولسک در آنها.

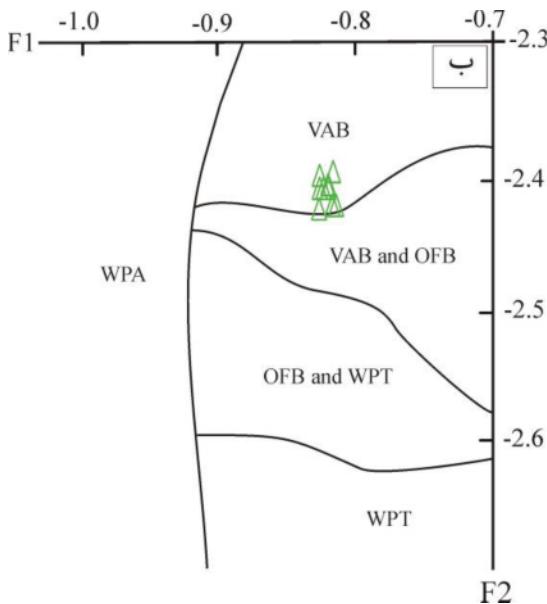
برپایه این نمودار (شکل ۸ ب)، گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک در گستره قوس آتشفسانی واقع هستند. این جایگاه زمین ساختی با نتیجه پژوهش کوچی و همکاران [۹] در مورد گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک بر اساس شیمی سنگ کل همخوانی دارد.

#### دما-فشارسنگی

با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، می‌توان دما و فشار تشکیل سنگ‌های در بر دارنده آنها را برآورد کرد. با گسترش کاربرد تجزیه نقطه‌ای، این امکان فراهم شده است که برپایه تغییرات فراوانی و مقدار کاتیون‌ها به دما و فشار تبلور کانی‌ها بی‌برد که این امر به شناسایی شرایط فیزیکی تبلور کمک می‌نماید. برای بررسی دمای تشکیل پیروکسن‌ها، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در یک روش، دما با محاسبه دو شاخص XPT و YPT بر پایه داده‌های تجزیه نقطه‌ای و روابط زیر برآورد می‌شود [۳۳]:

$$\text{XPT} = 0.446\text{*SiO}_2 + 0.187\text{*TiO}_2 - 0.404\text{*Al}_2\text{O}_3 + 0.346\text{*FeO}^{(\text{tot})} - 0.052\text{*MnO} + 0.309\text{*MgO} + 0.431\text{*CaO} - 0.446\text{*Na}_2\text{O} \quad (3)$$

$$\text{YPT} = -0.369\text{*SiO}_2 + 0.535\text{*TiO}_2 - 0.317\text{*Al}_2\text{O}_3 + 0.323\text{*FeO}^{(\text{tot})} + 0.235\text{*MnO} - 0.516\text{*MgO} - 0.167\text{*CaO} - 0.153\text{*Na}_2\text{O}. \quad (4)$$



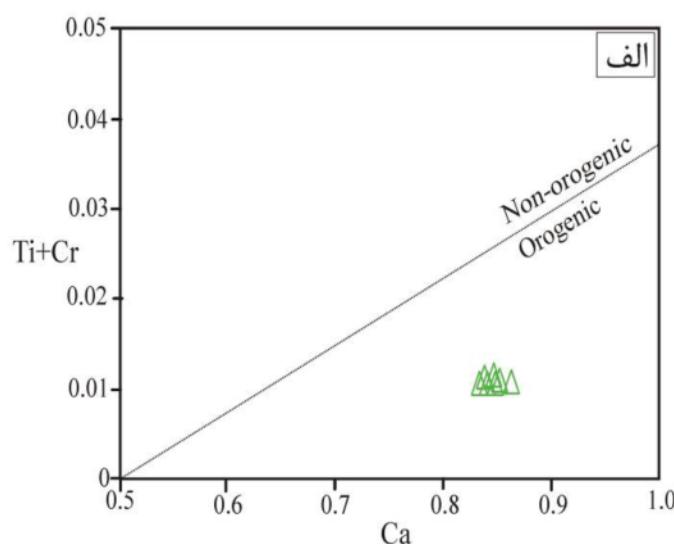
شکل ۸ (الف) نمودار  $\text{Ti+Cr}$  نسبت به  $\text{Ca}$  [۱۴] و (ب) نمودار  $\text{F2}$  نسبت به  $\text{F1}$  [۱۳] برای تعیین محیط زمین ساختی گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک بر اساس ترکیب کلینوپیروکسن: OFB: بازالت‌های بستر اقیانوس، WPT: بازالت‌های میان صفحه‌ای، WPA: بازالت‌های قلایی میان صفحه‌ای و VAB: بازالت‌های کمان آتشفسان).

تعیین محیط زمین ساختی بر اساس شیمی کانی کلینوپیروکسن ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن به عنوان یک معیار مناسب برای تشخیص محیط زمین ساختی مگماهای سنگ‌های دربرگیرنده آن کاربرد دارد. نمودار  $\text{Ti+Cr}$  نسبت به  $\text{Ca}$  برای تفکیک محیط‌های کوهزایی و غیرکوهزایی استفاده می‌شود [۱۴]. چنان که در شکل ۸ الف دیده می‌شود، کلینوپیروکسن‌های موجود در گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک در گستره سنگ‌های کوهزایی جای دارند. نمودار F1-F2 برای تشخیص محیط‌های زمین ساختی مختلف به کار می‌رود [۱۳]. F1 و F2 با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{F1} = 0.012\text{*SiO}_2 - 0.0807\text{*TiO}_2 + 0.0026\text{*Al}_2\text{O}_3 - 0.0012\text{*FeO} - 0.0026\text{*MnO} + 0.0087\text{*MgO} - 0.0128\text{*CaO} - 0.419\text{*Na}_2\text{O} \quad (1)$$

$$\text{F2} = -0.0469\text{*SiO}_2 - 0.0818\text{*TiO}_2 + 0.0212\text{*Al}_2\text{O}_3 - 0.0041\text{*FeO} - 0.1435\text{*MnO} - 0.0029\text{*MgO} + 0.0085\text{*CaO} + 0.016\text{*Na}_2\text{O} \quad (2)$$

با اینکه در این نمودار، همپوشی بازالت‌های کف اقیانوس (OFB) با بازالت‌های تولئیتی میان‌صفحه‌ای (WPT) و همچنین بازالت‌های کمان آتشفسانی (VAB) با بازالت‌های کف اقیانوس دیده می‌شود، اما گدازه‌های کمان آتشفسان به خوبی از انواع دیگر تفکیک می‌شوند.



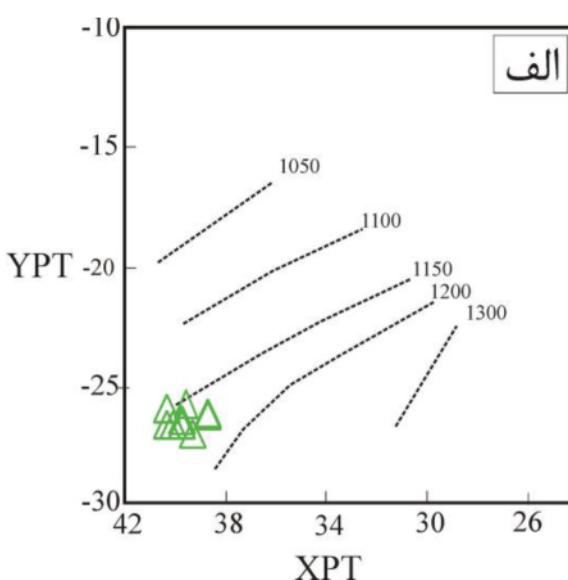
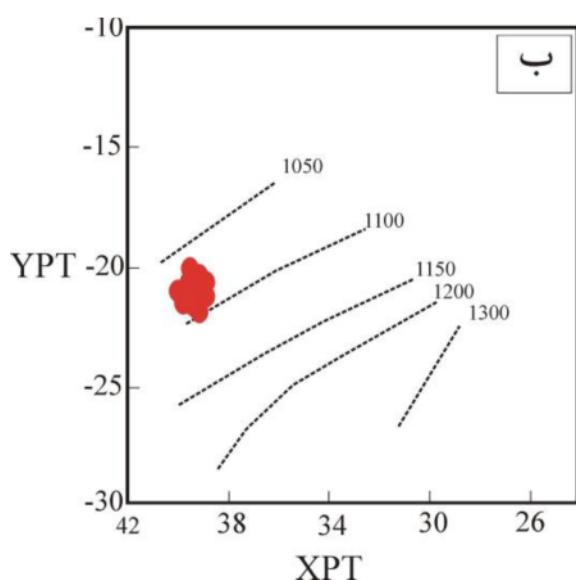
ترکیب دارای  $\text{Wo}+\text{En}+\text{Fs}$  بیش از ۹۰ قابل استفاده است. چنان که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، دمای تبلور کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌ها برای گدازه‌های آندزیتی بررسی شده به ترتیب ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ و ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد است که با دماهای محاسبه شده با روش‌های پیشین شباخت دارد. برای بررسی درستی نتایج، از دما-فشارسنج‌های دیگر نیز استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار SCG [۴۱] که نرم-افزار ویژه دما-فشارسنجی کلینوپیروکسن است و بر اساس دماسنج‌های معرفی شده در مراجع [۱۷، ۴۲]، دمای حدود ۱۱۲۷ درجه سانتیگراد برای تبلور کلینوپیروکسن برآورد شد. همچنین با دماسنجی به روش نیکل و همکاران [۴۳] بر اساس زوج پیروکسن، دمای ۱۰۵۰ تا ۱۱۲۰ درجه سانتیگراد بدست آمد که به دماهای محاسبه شده بر پایه دماسنج‌های کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن نزدیک است.

برآورد فشار تشکیل سنگ‌های دارای پیروکسن از روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. با روش سوئسو [۳۳] براساس دو شاخص XPT و YPT، فشار محاسبه شده برای کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن در نمونه‌های مورد بررسی، کمتر از ۲ کیلوبار برآورد شد (شکل ۱۱). افرون بر این، دما-فشارسنج معرفی شده در مرجع [۱۷] بر اساس تعادل مذاب با بلورهای پیروکسن نیز استفاده گردید. با این روش، دمای تشکیل کلینوپیروکسن ۱۱۶۶ تا ۱۱۷۸ درجه سانتیگراد و فشار محیط تشکیل آن ۲ تا ۳ کیلوبار بدست آمد که نتایج پیشین را تأیید می‌کند.

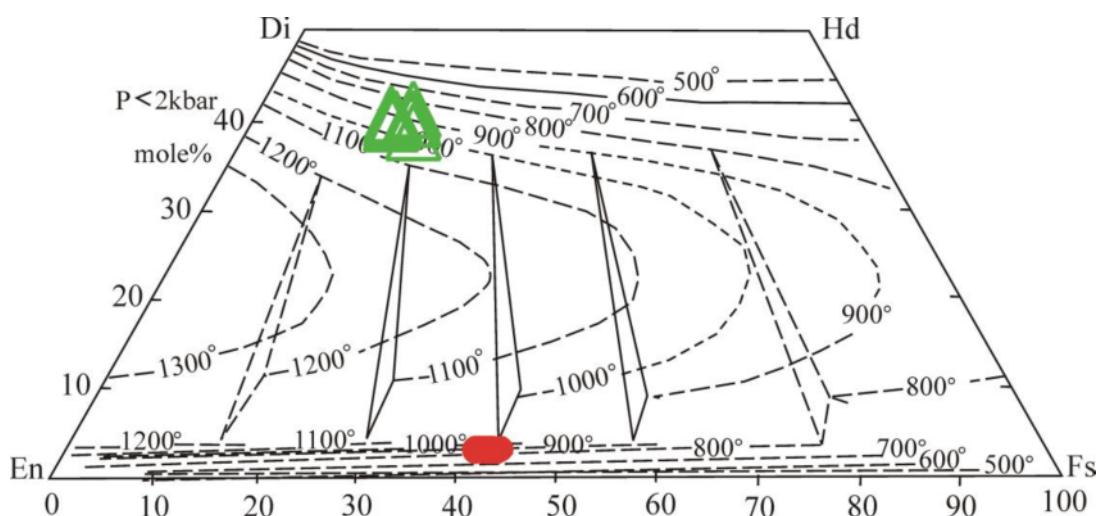
بر این اساس، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد (شکل ۹ الف) و دمای تشکیل ارتوپیروکسن ۱۰۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد تعیین گردید (شکل ۹ ب). دماهای در نظر گرفته شده برای زمین دماسنجی توسط کلینوپیروکسن بر اساس رابطه (۳۲) مرجع [۱۷]  $1172 \pm 9$  و  $1182 \pm 15$  درجه سانتیگراد و برای شروع تبلور ارتوپیروکسن برپایه رابطه ۲۸ الف مرجع [۱۷]، پایین‌تر و بین  $1042 \pm 10$  و  $1094 \pm 20$  درجه سانتیگراد است [۳۸]. کاهش دمای تشکیل ارتوپیروکسن‌ها با افزایش آهن در ساختار ارتوپیروکسن در ارتباط است [۳۹]. استفاده از مقدار کلسیم در ارتوپیروکسن از دیگر روش‌های دماسنجی تک پیروکسنی است. در این روش، دمای تبلور ارتوپیروکسن بر پایه رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_{\text{Ca in Opx}}(\text{K}) = 6425 + 26.4P(-\ln \text{Ca}^{\text{Opx}} + 1.843) \quad (5)$$

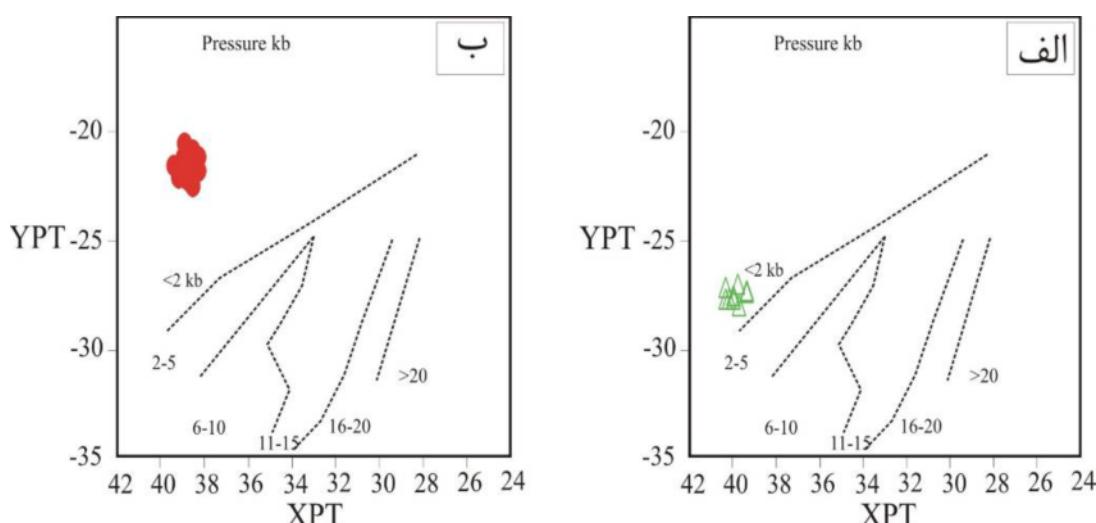
در این رابطه، دما بر حسب کلوین و فشار بر حسب کیلوبار است. به این ترتیب، دمای تبلور ارتوپیروکسن در گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک، در فشار ۱، ۵ و ۱۰ کیلوبار، به ترتیب  $1000$ ،  $1020$  و  $1050$  درجه سانتیگراد محاسبه گردید که به نتایج روش سوئسو [۳۳] نزدیک است. بر اساس درصد مولی ولاستونیت-انستایت-فروسیلیت در چهارضلعی انستابیت-فروسیلیت-دیوپسید-هدنبرگیت، نمودارهایی برای تعیین دمای پیروکسن‌ها در فشارهای مختلف (از کمتر از ۲ کیلوبار تا ۱۵ کیلوبار) معرفی شده است [۴۰]. این روش برای بلورهای با



شکل ۹ نمودارهای YPT نسبت به XPT [۳۳] برای تعیین دمای تبلور (الف) کلینوپیروکسن و (ب) ارتوپیروکسن منطقه زوالسک.



شکل ۱۰ تعیین دمای تشکیل پیروکسن‌ها در گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک بر اساس درصد مولی ولاستونیت-انستاتیت-فروسیلیت در ترکیب پیروکسن‌ها با استفاده از روش مرجع [۴۰]. نشانه‌ها مشابه شکل ۹ است.



شکل ۱۱ نمودارهای YPT نسبت به XPT [۳۳] برای تعیین فشار تبلور (الف) کلینوپیروکسن و (ب) ارتوبیروکسن منطقه زوالسک.

هشتوجهی شود. از این رو، فراوانی  $\text{Fe}^{3+}$  در پیروکسن‌ها به مقدار  $\text{Al}^{\text{VI}}$  بستگی دارد. قرارگیری نمونه‌ها در بالا یا زیر خط  $=0$   $\text{Fe}^{3+}$  بیانگر بالا یا پایین بودن گریزندگی اکسیژن در محیط تبلور کلینوپیروکسن‌هاست. چنان که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، نمونه‌های مورد بررسی در بالای خط  $=0$  قرار دارند که بیانگر تبلور کلینوپیروکسن‌ها از ماقمای با مقادیر متوسط تا بالای گریزندگی اکسیژن است که با جایگاه زمین ساختی وابسته به فورانش همخوانی دارد. حضور کانی کدر (مگنتیت) در این سنگ‌ها بالا بودن میزان گریزندگی اکسیژن در محیط تشکیل آن‌ها را تأیید می‌کند. مقادیر بالای  $\text{SiO}_2$  در

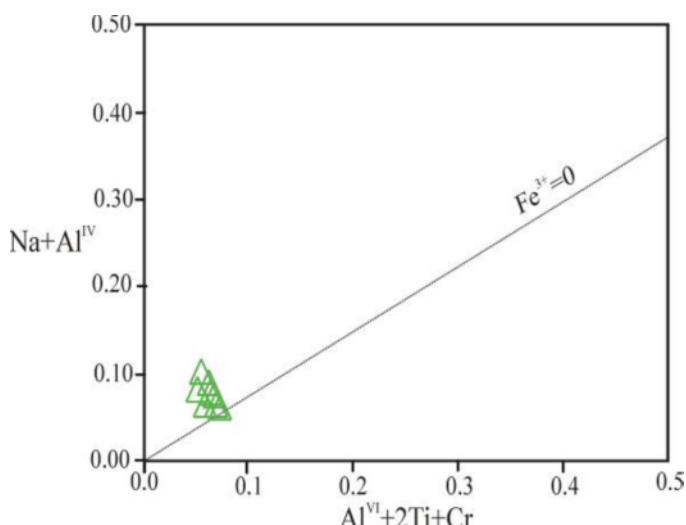
تعیین گریزندگی اکسیژن  
مقدار گریزندگی اکسیژن ماقما به خاستگاه و جایگاه زمین ساختی وابسته است و بر توالی تبلور و نوع کانی‌های متبلور شده اثر دارد [۴۴]. مقدار  $\text{Fe}^{3+}$  در پیروکسن‌ها به گریزندگی اکسیژن در محیط تشکیل آنها وابسته است و با استفاده از نمودار تغییر  $\text{Al}^{\text{IV}} + \text{Na} = \text{Al}^{\text{VI}} + 2\text{Ti} + \text{Cr}$  نسبت به  $\text{Al}^{\text{VI}}$  می‌شود [۴۵]. این نمودار بر اساس موازنی  $\text{Al}$  موجود در موقعیت چهاروجهی با  $\text{Al}$  و  $\text{Cr}^{3+}$  موجود در جایگاه هشت وجهی تنظیم شده است. در ترکیب پیروکسن‌ها،  $\text{Fe}^{3+}$  می‌تواند جانشین عناصر سه ظرفیتی چون  $\text{Ti}$ ,  $\text{Al}^{\text{VI}}$  و  $\text{Cr}$  در جایگاه

[۴۷]. بر اساس نمودار  $\text{Al}^{\text{VI}}$  نسبت به  $\text{Al}^{\text{IV}}$  کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گستره فشارهای متوسط تا پایین قرار دارند (شکل ۱۳ الف). بررسی توزیع آلومینیم در جایگاه‌های چهاروجهی و هشتوجهی کلینوپیروکسن، روشی مناسب برای برآورد درصد تقریبی آب ماغماست [۴۸]. برایه نمودار مقادیر  $\text{Al}^{\text{VI}}$  نسبت به  $\text{Al}^{\text{IV}}$  [۴۸]، که گسترهای برای مقادیر آب ماغما مشخص شده است، کلینوپیروکسن‌ها در گستره فشار پایین (کمتر از ۵ کیلوبار) و مقادیر آب ماغمایی ۵ تا ۱۰ درصد جای دارند (شکل ۱۳ ب).

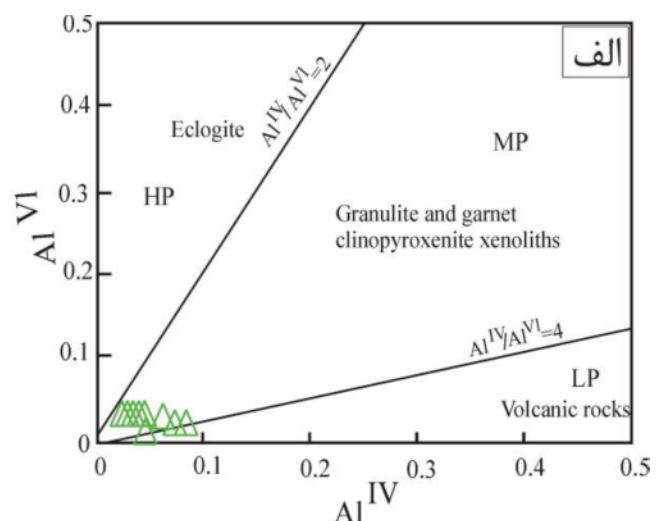
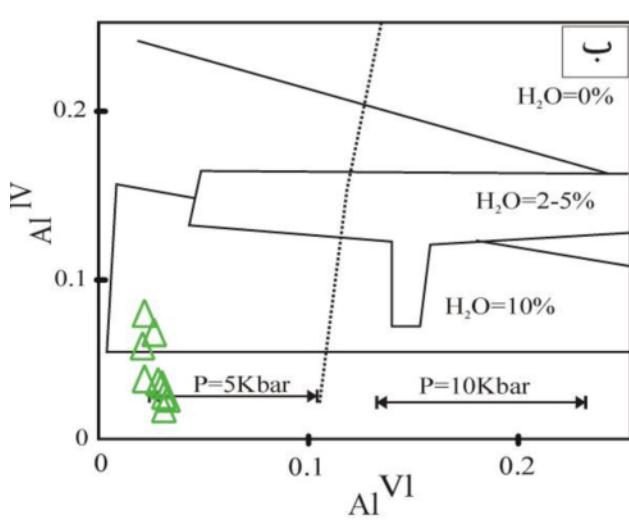
ترکیب پیروکسن‌های مورد بررسی (شکل‌های ۷ الف، ب) و مقدار  $\text{TiO}_2$  پایین در ترکیب آن‌ها (شکل‌های ۷ ب، ت)، ویژگی‌های پیروکسن‌های متبلور شده از مذاب‌های وابسته به کمان آتششانی را تأیید می‌کند [۳۲].

تعیین فشار و درصد تقریبی آب ماغما بر پایه ترکیب کانی کلینوپیروکسن

بر اساس بررسی‌های تجربی ذوب، مقدار  $\text{Al}^{\text{VI}}$  در کلینوپیروکسن‌ها به فشار وابسته است [۴۶]. مقادیر کم  $\text{Al}^{\text{VI}}$  در کلینوپیروکسن‌ها با فشارهای پایین تبلور همخوانی دارد



شکل ۱۲ برآورد مقدار گریزندگی اکسیژن در محیط تشکیل گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک براساس ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها [۴۵].



شکل ۱۳ موقعیت کلینوپیروکسن‌ها در نمودارهای توزیع آلومینیم در جایگاه‌های چهاروجهی و هشتوجهی؛ الف) برآورد فشار تعیین درصد آب ماغما [۴۷] و ب)

## برداشت

سنگ‌های آتشفسانی ترشیری در منطقه زولسک شامل گدازه‌های حدواسط تا اسیدی هستند که سنگ‌های آندزیتی بیشترین فراوانی را دارند. منطقه‌بندی نوسانی، بافت غربالی، حاشیه‌های گردشده و خلیجی در برخی درشت بلورهای پلازیوکلاز موجود در گدازه‌های بررسی شده دیده می‌شود که بیانگر نبود تعادل طی انجماد مagma است. تغییر ترکیب شیمیایی و ایجاد منطقه‌بندی نوسانی در پلازیوکلازهای موجود در گدازه‌های آندزیتی منطقه زولسک را می‌توان به تغییر عواملی چون ترکیب مذاب، غلظت آب محلول، دما و فشار طی صعود مagma در پوسته مربوط دانست. پپروکسن‌ها، شامل کلینوپپروکسن و ارتوبپپروکسن، از مهم‌ترین کانی‌های سازنده آندزیت‌ها هستند و در رده پپروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن‌دار قرار دارند. حضور ارتوبپپروکسن می‌تواند به دلیل فعالیت بالای سیلیس در magma سازنده این سنگ‌ها باشد. بررسی شیمی پپروکسن‌ها نشان داد که آندزیت‌های مورد بررسی دارای ماهیت آهکی قلیایی هستند که با نتایج پیشین بر پایه شیمی سنگ کل همخوانی دارد. بررسی مقدار گریزندگی اکسیژن بر پایه ترکیب کلینوپپروکسن‌ها بیانگر تبلور این کانی از magma با گریزندگی اکسیژن متوسط تا بالا در محیط زمین‌ساختی وابسته به فروزانش است. همچنین، پایین بودن مقدار  $TiO_2$  و بالا بودن مقدار  $SiO_2$  در ترکیب پپروکسن‌های بررسی شده تبلور آن‌ها از مذاب‌های وابسته به کمان آتشفسانی را تأیید می‌کند. بر پایه بررسی‌های انجام شده با استفاده از مقادیر  $Al^{IV}$ - $Al^{VI}$  نسبت به  $Ca$ ، فشار زمان تبلور کلینوپپروکسن‌ها پایین (کمتر از ۵ کیلوبار) و مقدار آب magma ای ۵ تا ۱۰ درصد برآورد شد. بالا بودن نسبی مقدار آب magma به تشکیل آن در مناطق فروزانش مربوط است.

## مراجع

- [1] Nazari H., Salamati R., "Geological map of Sarbisheh (1/100000)", Sheet 7955 Geological survey of Iran (1999).
- [2] Karimpour M. H., Stern C. R., Farmer L.,

- D., "Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar", Contributions to Mineralogy and Petrology 123(1996) 92-108.
- [19] Nimis P., Ulmer P., "Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. I. An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems", Contributions to Mineralogy and Petrology 133 (1998) 122-135.
- [20] Cheng Z., Guo Z., Dingwell D.B., Li X., Zhang M., Liu J., Zhao W., Lei M., "Geochemistry and petrogenesis of the post-collisional high-K calc-alkaline magmatic rocks in Tengchong, SE Tibet", Journal of Asian Earth Sciences193(2020) 104309.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104309>.
- [21] Martel C., Radadi Ali A., Poussineau S., Gourgaud A., Pichavant M., "Basalt inherited microlites in silicic magmas: evidence from Mount Pelée (Martinique, French West Indies)", Geology 34 (11)( 2006) 905-908.
- [22] Humphreys M.C., Blundy J.D., Sparks R.S., "Magma evolution and open-system processes at Shiveluch volcano: insights from phenocryst zoning", Journal of Petrology 47(2006) 2303-2334.
- [23] Shane P., Cocker K., Coote A., Stirling C.H., Reid M.R., "The prevalence of plagioclase antecrysts and xenocrysts in andesite magma, exemplified by lavas of the Tongariro volcanic complex, New Zealand", Contributions to Mineralogy and Petrology 174 (11)( 2019) 89.  
<https://doi.org/10.1007/s00410-019-1626-y>.
- [24] Viccaro M., Barca D., Bohrson W.A., D'Oriano C., Giuffrida M., Nicotra E., Pitcher B.D., "Crystal residence times from trace element zoning in plagioclase reveal changes in magma transfer dynamics at Mt. Etna during the last 400 years", Lithos248-251(2016) 309-323.
- [25] Tepley F.J., Davidson J.P., Clyne M.A., "Magmatic interactions as recorded in plagioclase phenocrysts of Chaos Crags,Lassen volcanic center, California", Journl of Petrology 40 Quarterly Journal, Geosciences28(110)(2019) 255-266.
- [10] Putirka K.D., "Igneous thermometers and barometers based on plagioclase + liquid equilibria: Tests of some existing models and new calibrations", American Mineralogist 90 (2-3) (2005) 336-346.
- [11] Köprübaşı N., Güctekina A., Celebia D., Kirmaci M.Z., "Mineral chemical constraints on the petrogenesis of mafic andintermediate volcanic rocks from the Erciyes and Hasandağ volcanoes,Central Turkey", Chemie der Erde 74 (2014) 585-600.
- [12] Kamaci Ö., Altunkaynak S., "Magma chamber processes and dynamics beneath northwestern Anatolia: Insights from mineral chemistry and crystal size distributions (CSDs) of the Kepsut volcanic complex (NW Turkey)", Journal of Asian Earth Sciences 181(2019)103889.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103889>.
- [13] Nisbet E. G., Pearce J. A., "Clinopyroxene composition of mafic lavas from different tectonic settings", Contributions to Mineralogy and Petrology 63(2) (1977) 161-173.
- [14] Leterrier J., Maury R. C., Thonon P., Girard D., Marchal M., "Clinopyroxene composition as method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series", Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 139-154.
- [15] Diou E., Beziat D., Gregoire M., Debat P., "Origin of rare earth element variations in clinopyroxene from plutonic and associated volcanic rocks from the Foulde basin, Northern Kedougou inlier, Senegal, West Africa", European Journal of Mineralogy 21(2009) 1029-1043.
- [16] Mollo S., Gaudio P.D., Ventura G., IezziG., Scarlato P., "Dependence of clinopyroxene composition on cooling rate in basaltic magmas: Implications for thermobarometry", Lithos118(2010) 302-312.
- [17] Putirka K.D., "Thermometers and barometers for volcanic systems", Reviews in Mineralogy and Geochemistry69(2008) 61-120.
- [18] Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Walker

- [36] Le Bas M. J., "The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage", American Journal of Science 260(4) (1962) 267-288.
- [37] Schneider M. E., Eggler D. H., "Fluids in equilibrium with peridotite minerals: implications for mantle metasomatism", Geochimica et Cosmochimica Acta 50(1986) 711-724.
- [38] Janoušek V., Holub F.V., Verner K., Čopjáková R., Gerdes A., Hora J.M., Košler J., Tyrrell S., "Two-pyroxene syenitoids from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif: peculiar magmas derived from a strongly enriched lithospheric mantle source", Lithos 342-343(2019) 239-262.
- [39] Shiaian K., Dabiri R., "Chemistry of mafic minerals and thermobarometry of Bazman Quaternary volcanic rocks", Quaternary Journal of Iran 5(2) 205-220.
- [40] Lindsley D.H., "Pyroxene thermometry", American Mineralogist 68 (1983) 477-493.
- [41] Sayari M., Sharifi M., "SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry", Italian Journal of Geosciences 133(2) (2014) 315-322.
- [42] Nimis P., Taylor W.R., "Single clinopyroxen thermobarometry for garnet peridotites. Part1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 139(2000) 541-554.
- [43] Nickel K.G., Brey G.P., Kogarko L., "Orthopyroxene-clinopyroxene equilibria in the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS): New experimental results and implications for two-pyroxene thermometry", Contributions to Mineralogy and Petrology 91(1985) 44-53.
- [44] Moretti R., "Polymerization, basicity, oxidation state and their role in ionic modelling of silicate melts", Geophysics 48 (2005) 583-608.
- [45] Schweitzer E. L., Papike J. J., bence A. E., "Statistical analysis of clinopyroxenes from deepsea basalts", American Mineralogist 64 (1979) 501-513.
- [46] Mahood G.A., Baker D.R., "Experimental (5)(1999) 787-806.
- [26] Whitney D., Evans B., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist 95(2010) 185-187.
- [27] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", Longman Scientific and Technical (1991) 528 P.
- [28] Davidson J.P., Morgan D.J., Charlier B.L.A., Harlou R., Hora J.M., "Microsampling and isotopic analysis of igneous rocks: implications for the study of magmatic systems", Annual Review of Earth and Planetary Sciences 35(2007) 273-311.
- [29] Lange R.A., Frey H.M., Hector J., "A thermodynamic model for the plagioclase-liquid hygrometer/thermometer", American Mineralogist 94(2009) 494-506.
- [30] Ustunisik G., Kilinc A., Nielsen R.L., "New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase", Lithos 200-201(2014) 80-93.
- [31] Waters L.E., Lange R.A., "An updated calibration of the plagioclase-liquid hygrometer-thermometer applicable to basalts through rhyolites", American Mineralogist 100(2015) 2172-2184.
- [32] Beccaluva L., Macciotta G., Piccardo G. B., Zeda O., "Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator", Chemical Geology 77(1989) 165-182.
- [33] Soesoo A., "A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation PT estimations", Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen) 119 (1997) 55-60.
- [34] Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I. V., Ross M., Seifert F. A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G., "Nomenclature of pyroxenes", Mineralogical Magazine 52 (1988) 535-550.
- [35] Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I. V., Ross M., Seifert F. A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G., "Nomenclature of pyroxenes", Mineralogical Journal 14(5)(1989) 198-221.

- [48] Helz R.T., "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(2)( 1973) 249-302.
- [47] Aoki K., Shiba I., "Pyroxene from lherzolite inclusions of Itinomegata, Japan", *Lithos* 6(1)( 1973) 41-51.
- constraints on depths of fractionation of mildly alkalic basalts and associated felsic rocks: Pantelleria, strait of Sicily", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 93(2)( 1986) 251–264.