



**Research Article**

## **Geothermobarometric of Uchbolaq trachyandesites' lavas, A research on the Early- Cenozoic volcanism of Tarom-Hashtjin magmatic zone**

**Monireh Kheirkhah\***, Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

[kheirkhah.monireh1@gmail.com](mailto:kheirkhah.monireh1@gmail.com)

**Azad Karimi** , Ph. D., Geochemical Exploration Department, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

[karimiazad@pgs.usb.ac.ir](mailto:karimiazad@pgs.usb.ac.ir)

### **Abstract**

The present study focuses on the mineral chemistry data of Early–Cenozoic volcanic rocks in the south of the Tarom-Hashtjin magmatic zone. The Uchbolaq lavas in the north of Zanzan are a part of Oligocene eruptions within the Turkish-Iranian plateau. The microprobe analysis of the andesite-trachyandesites' samples from this area indicates that the rocks under study composed of, labradorite ( $An_{55-66}$ ), augite ( $Wo_{44}En_{44}Fs_{12}$ ), Mg-hastingsite ( $(Na+K)_A \geq 0.50$  and  $Al^{vi} < Fe^{3+}$ ), and Mg-biotite ( $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) > 0.3$ ). Based on geo-thermometric calculations, the crystallization temperatures for amphiboles vary from 985 to 941 °C, and for biotites from 770 to 758 °C. According to geobarometric measurements, the pressure in amphiboles ranges between 5.3 and 6.5 kbar, and for biotites from 0.9 to 1.9 kbar. The mineral chemistry datasets consisting of amphiboles' and biotites' data indicate that the investigated rocks are derived from a calc-alkaline magma with approximately high  $fO_2$ , in a volcanic arc related to the subduction zone and the orogenic setting suites.

**Keywords:** trachyandesite, geothermobarometry, Tarom-Hashtjin magmatic zone, volcanic arc, Uchbolaq

\* Corresponding author



## زمین‌دما فشارسنجی گدازه‌های تراکی آندزیتی اوچ‌بلاغ، پژوهشی درباره ولکانیسم سنوزوییک آغازین پهنه ماگمایی طارم-هشتجین

منیره خیرخواه\*، دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

kheirkhah.monireh1@gmail.com

آزاد کریمی<sup>ID</sup>، دکتری، گروه اکتشافات ژئوشیمیایی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

karimiazad@pgs.usb.ac.ir

### چکیده

این پژوهش نتایج داده‌های شیمی کانی سنگ‌های آتشفشانی سنوزوییک آغازین در پهنه ماگمایی طارم-هشتجین را ارائه می‌کند. گدازه‌های اوچ‌بلاغ در شمال زنجان، بخشی از فوران‌های الیگوسن در فلات ایرانی-ترکی هستند. برپایه تجزیه ریزکاو الکترونی، لابرادوریت ( $An_{55-66}$ )، اوژیت ( $Wo_{44} En_{44} Fs_{12}$ )، هاستنگزیت منیزیم‌دار ( $Al^{vi} < Fe^{3+}$  و  $(Na+K)_A \geq 0.50$ ) و بیوتیت منیزیم‌دار ( $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) > 0.3$ ) از کانی‌های سازنده نمونه‌های آندزیت - تراکی آندزیتی این منطقه هستند. برپایه محاسبات زمین‌دماسنجی، تبلور آمفیبول‌ها در گستره دمایی ۹۸۵ تا ۹۴۱ درجه سانتیگراد و دمای تبلور بیوتیت‌ها برابر با ۷۵۸ تا ۷۷۰ درجه سانتیگراد رخ داده است. برپایه نتایج فشارسنجی، آمفیبول‌ها گستره فشاری ۵/۳ تا ۶ کیلوبار و بیوتیت‌ها، فشاری در بازه ۰/۹ تا ۱/۹ کیلوبار را تجربه کرده‌اند. نتایج داده‌های شیمی کانی‌های تراکی آندزیت‌های اوچ‌بلاغ نشان می‌دهند خاستگاه این سنگ‌ها ماگمایی کالک‌آلکان، با فوگاسیتته اکسیژن ( $fO_2$ ) کمابیش بالا، در کمان آتشفشانی مرتبط با پهنه فرورانش و محیط کوهزایی بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** تراکی آندزیت، زمین‌دما فشارسنجی، پهنه ماگمایی طارم-هشتجین، کمان آتشفشانی، اوچ‌بلاغ

### مقدمه

سنوزوییک را در خود ثبت کرده است. با تکاپوی فاز کوهزایی آلپی از ائوسن تا کواترنری، ماگماتیسم گسترده‌ای در پهنه البرز باختری-آذربایجان رخ داده است. از آغاز تریاس پایانی تا الیگوسن، همزمان با بسته‌شدن اقیانوس نئوتتیس، همگرایی کلی منطقه ادامه پیدا کرده است و صفحه ضخیم فلات ایران را پدید آورده است (Verdel et al.,

محدوده بررسی شده، در شمال زنجان و جنوب‌باختری طالش، در بلوک البرز باختری-آذربایجان و بخشی از زیر پهنه طارم-هشتجین است. زمین‌شناسی و زمین‌ساخت البرز باختری-آذربایجان در برابر دیگر مناطق ایران پیچیدگی‌های خاصی دارد و رویدادهای مهمی از مزوزوییک تا

\* نویسنده مسئول



به بحث درباره نتایج بررسی شیمی کانی‌های سنگ‌های حد واسط الیگوسن منطقه اوچ‌بلاغ می‌پردازد و با ارائه داده‌های تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها، سرشت ماگمایی و شرایط فیزیکیوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی میزبان آنها را بررسی می‌کند.

### روش انجام پژوهش

این پژوهش برپایه برداشت‌های صحرائی، بررسی‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل داده‌ها انجام شده است. پس از بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌ها و تجزیه اکسیدهای عنصرهای اصلی این سنگ‌ها در آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، از ۳ نمونه مناسب در موقعیت‌های جغرافیایی مشابه در شمال روستای اوچ‌بلاغ، مقاطع نازکی برگزیده و صیقل داده شد و به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران برای انجام تجزیه ریزکاو الکترونی روی کانی‌های گدازه‌های تراکی‌اندزیتی فرستاده شد. نمونه‌های برگزیده در این مرکز با دستگاه ریزپردازنده الکترونی مدل Cameca-SX100 تجزیه نقطه‌ای شدند. تجزیه کانی‌ها در ولتاژ ۱۵ Kev، فشار  $4 \times 10^{-7}$  Torr، آمپراژ ۲۰ nA و بزرگی طول موج ۲/۵ میکرومتر انجام شد. فرایند کالیبره‌شدن دستگاه نیز برپایه  $K/Or$ ،  $Na/Ab$ ،  $Ca/Wo$ ،  $Si/Wo$ ،  $Al/Crn$ ،  $Mn/MnSiO_3$ ،  $Fe/Hm$ ،  $Mg/Per$  و  $Ti/Rt$  بوده است. پردازش داده‌های به‌دست آمده و رسم نمودارها با نرم‌افزار AX انجام شده است.

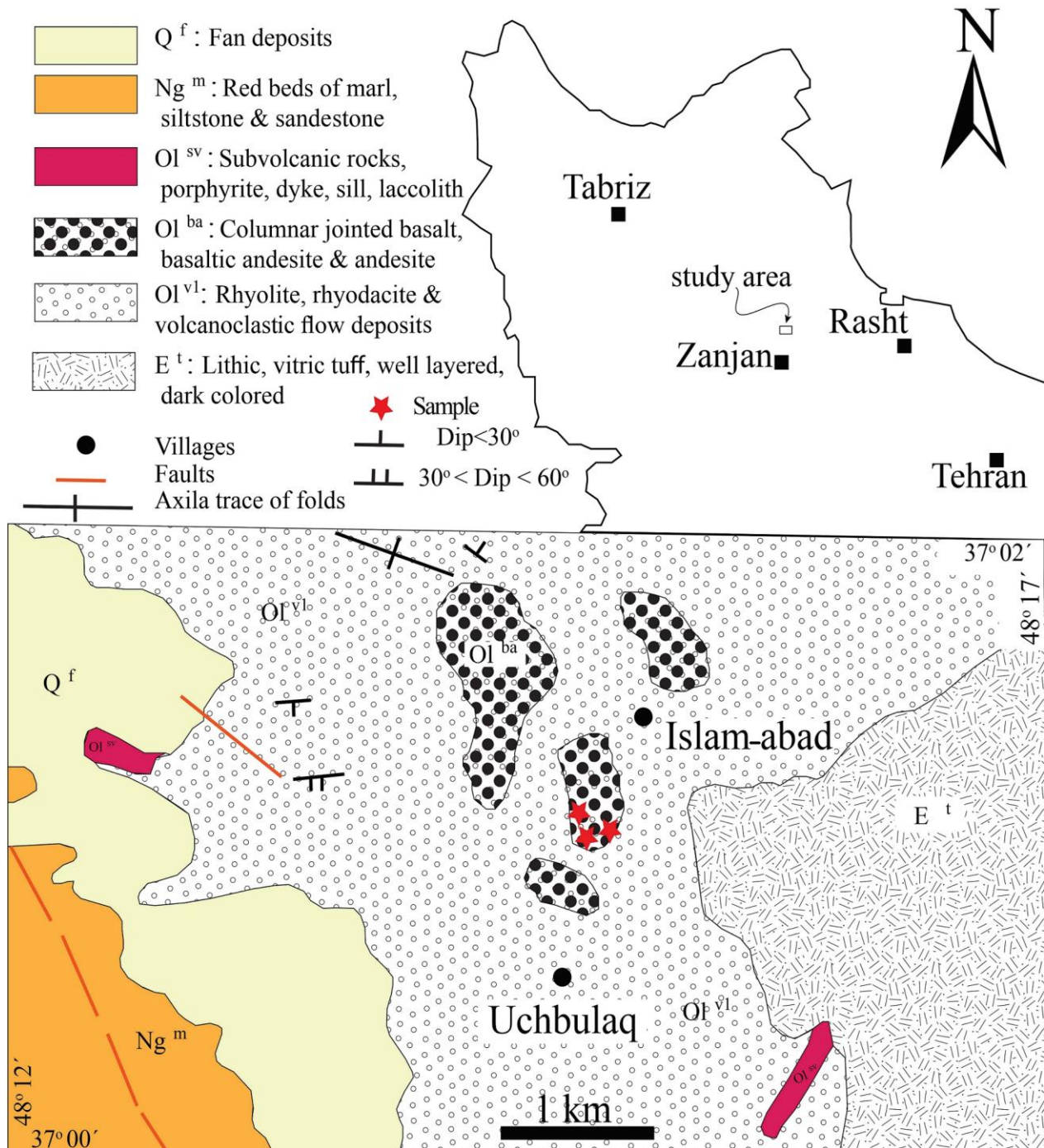
اکسیدهای کانی تجزیه شدند و مقادیر اتم هر اکسید در فرمول ساختاری کانی کلینوپیروکسن برپایه ۶ اتم اکسیژن، پلازیوکلاز برپایه ۸ اتم اکسیژن با روش Droop (۱۹۸۷) به‌دست آمد. مقدار  $Fe^{2+}$  و  $Fe^{3+}$  نیز برپایه روش Droop (۱۹۸۷) به‌دست آورده شده است.

Allen et al., 2011; 2011). در البرز باختری، رخداد فاز کششی ائوسن تا الیگوسن، آغاز فعالیت‌های ماگمایی گسترده‌ای را به دنبال داشته است. در پی رخداد فاز کوهزایی پیرنه (الیگوسن زیرین)، سری‌های ائوسن در البرز باختری چین خورده و گسل‌های کششی به موازات محور چین‌خوردگی‌ها پدید آمده‌اند. در آذربایجان شرقی و طارم، به‌ویژه در شمال زنجان، چین‌هایی با روند خاوری-باختری پدید آمده‌اند. در خاور البرز، تکاپوی ماگمایی پهنه تالش در ائوسن-الیگومیوسن رخ داده است. در منطقه بررسی‌شده، گدازه‌های الیگوسن-میوسن روی نهشته‌های ائوسن رخنمون چشمگیری یافته‌اند که با ولکانیسم مشابه در البرز قابل مقایسه هستند. از این‌رو، سنگ‌های آتشفشانی ناحیه زنجان و کوه‌های طارم به سازند کرج نسبت داده شده‌اند (Ghorbani et al., 2013; Nabatian et al., 2013). در پهنه طارم، بیشتر بررسی‌ها برپایه کانه‌زایی‌های موجود هستند و در آنها به بررسی سنگ‌شناختی و زمین‌شیمیایی ماگماتیسم منطقه کمتر پرداخته شده است (Ebrahimi et al., 2016). Moayyed (۲۰۰۱) با بررسی دقیق سنگ‌های ماگمایی پهنه ماگمایی ولکانو-پلوتونیک ترشیری البرز باختری-آذربایجان، سری سنگ‌های آذرین آتشفشانی و درونی ائوسن-الیگوسن منطقه هشتجین را کالک آلکالین پتاسیم بالا و شوشونیتی دانسته است و محیط زمین‌ساختی آن را به کمان ماگمایی پس از برخورد نسبت داده است. برپایه پژوهش‌های Sadri Efsanjani و همکاران (۲۰۱۵)، سنگ‌های آتشفشانی شمال سلیمان بلاغی (جنوب‌باختری هشتجین) و شمال منطقه بررسی‌شده، سرشت شوشونیتی و پرآلومین دارند و ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای در پیدایش ماگماتیسم اسیدی در این مناطق مؤثر بوده است. این پژوهش

زمین‌شناسی منطقه

منطقه اوچ‌بلاغ در زیرپهنهٔ طارم- هشتجین و در جنوب ورقهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین (Faridi

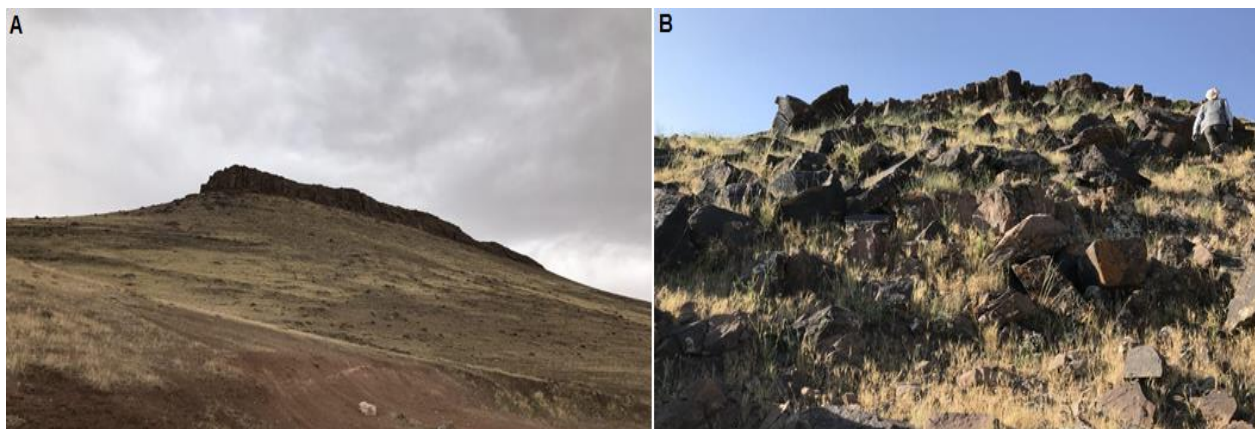
and Anvari, 2000) جای دارد و در مقیاس بزرگ‌تر بخشی از چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ بندر انزلی (Clark and Davis, 1975) به‌شمار می‌رود (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه اوچ‌بلاغ، در بخش جنوبی ورقهٔ ساده‌شدهٔ ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین، برگرفته از Faridi و Anvari (۲۰۰۰). نقاط نمونه‌برداری از سنگ‌های حد واسط شمال اوچ‌بلاغ با ستاره‌های سرخ‌رنگ نمایش داده شده‌اند.

حد واسط-اسیدی و نهشته‌های آذرآواری ایگوسن به صورت ناهمساز و با دگرشیبی زاویه‌ای اندک واحدهای ائوسن ( $E^1$  و  $E^{b2}$ ) را پوشانده‌اند (Faridi and Anvari, 2000). تکاپوی ماگمایی ایگوسن در جنوب ورقه هشتجین شامل واحدهای ( $Olv^1$ ) و ( $Olv^{ba}$ ) است که واحد ( $Olv^1$ ) از گدازه‌های ریولیتی و ریوداسیتی و نهشته‌های آذرآواری موجی ساخته شده است و واحد ( $Olv^{ba}$ ) آندزی‌بازالت و تراکی آندزیت به صورت دبی منشوری و گدازه‌های بلوکی رخنمون یافته است. گاه برخی گدازه‌ها لایه‌بندی دارند که هر لایه افقی نشان‌دهنده پالسی از فوران است. در زیر لایه‌های ریولیتی و داسیتی منطقه، افق‌هایی از شیشه‌های اسیدی سیاه رنگ (ابسیدین) دیده می‌شود که با گذشت زمان پرلیتی شده‌اند. گدازه‌های حد واسط منطقه ( $Olv^{ba}$ ) در شمال اوچ‌بلاغ (شکل‌های ۱ و ۲-A)، شامل گدازه‌های تراکی آندزیتی هستند که بلوکی شکل هستند و روی واحدهای آذرآواری ائوسن ( $E^1$ ) برون ریخته‌اند.

برپایه پژوهش‌های Riou و Lescuyer (۱۹۷۶)، منطقه آذربایجان در مزوزوییک، پلات‌فرم بوده است؛ اما در ائوسن، فعالیت‌های گسترده آتشفشانی درون‌قاره‌ای داشته است. این پژوهشگران جایگاه حوضه‌های رسوبی نئوژن زنگان و میانه را در پهنه طارم مشخص کرده‌اند. Nabavi (۱۹۷۶)، جایگاه منطقه هشتجین را بخشی از پهنه البرز باختری-آذربایجان و Aghanabati (۲۰۰۵)، این محدوده را بخشی از پهنه ایران مرکزی دانسته است. پهنه ماگمایی البرز-آذربایجان که در بخش باختری پهنه ماگمایی البرز جای دارد، تکاپوی ماگمایی گسترده‌ای، به‌ویژه در سنوزوییک و بیشتر با سرشت کالک‌آلکان داشته است (Moayyed, 2001). در منطقه بررسی‌شده، گدازه‌های ایگوسن ترکیب اسیدی و حد واسط دارند؛ به‌گونه‌ای که در بخش‌های شمالی منطقه، گدازه‌های اسیدی به شکل گنبدی روی توف‌های ائوسن جای گرفته‌اند (Sadri Esfanjani et al., 2015). در جنوب هشتجین، گدازه‌های



شکل ۲- A) نمای کلی از تراکی آندزیت‌های شمال اوچ‌بلاغ که روی واحدهای آذرآواری منطقه برون ریخته‌اند (دید رو به جنوب)؛ B) نمای از بلوک‌های آندزیتی تراکی آندزیتی منطقه.

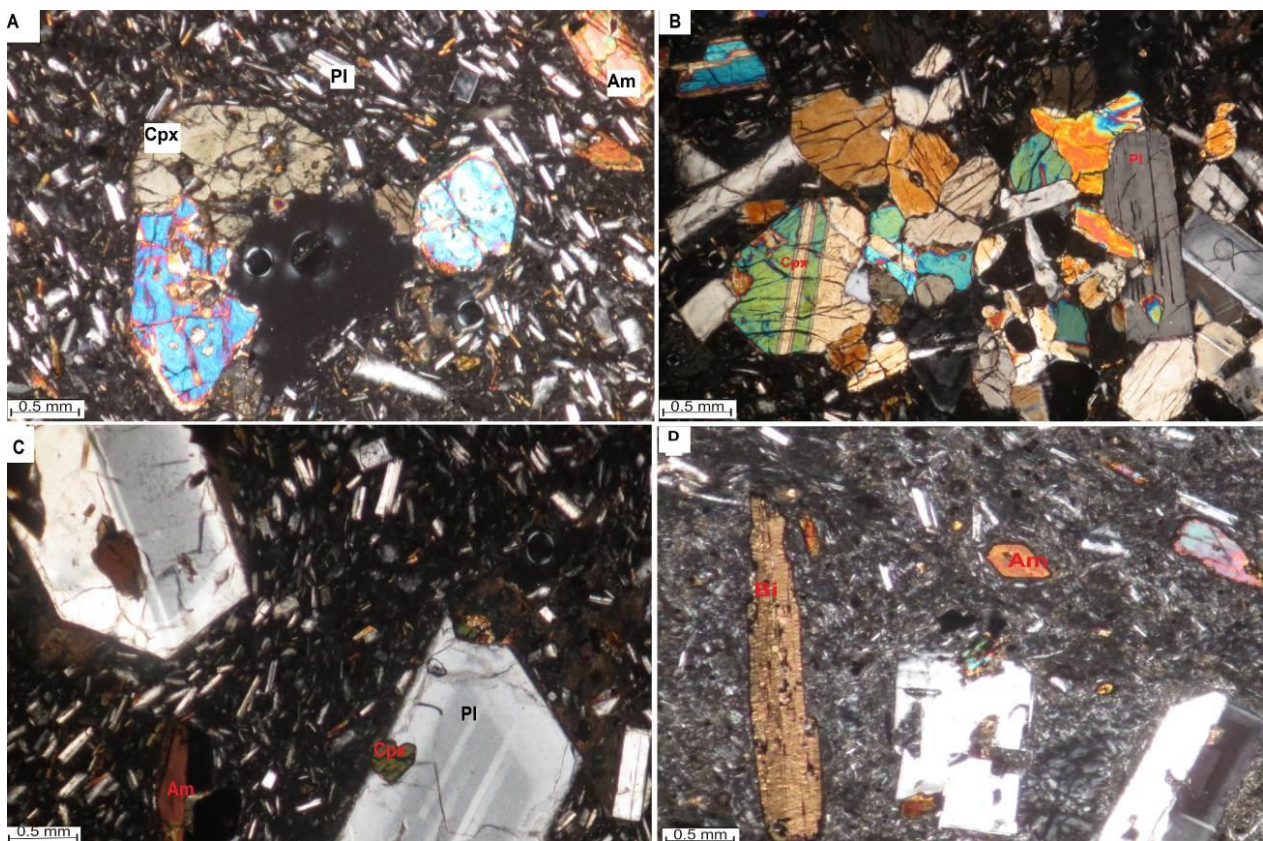
## سنگ‌نگاری

سنگ‌های آتشفشانی شمال اوج‌بلاغ از گدازه‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی ساخته شده‌اند. بافت بیشتر این سنگ‌ها میکرولیتیک پورفیری، هیالومیکرولیتیک پورفیری (شکل ۳- A) و بافت‌های گلومروپورفیری (شکل ۳- B) است. مهم‌ترین کانی فلسیک دیده‌شده در این سنگ‌ها فلدسپار (پلاژیوکلاز و آلکالی فلدسپار) است. پلاژیوکلازها با ماکل‌های کارلسباد، پلی‌سینتتیک و پهنه‌بندی (شکل ۳- C)، حاشیه‌های خورده‌شده و بافت اسکلتی (شکل ۳- D) دیده می‌شوند. فنوکریست‌های آمفیبول شکل‌دار از نوع هورنبلند

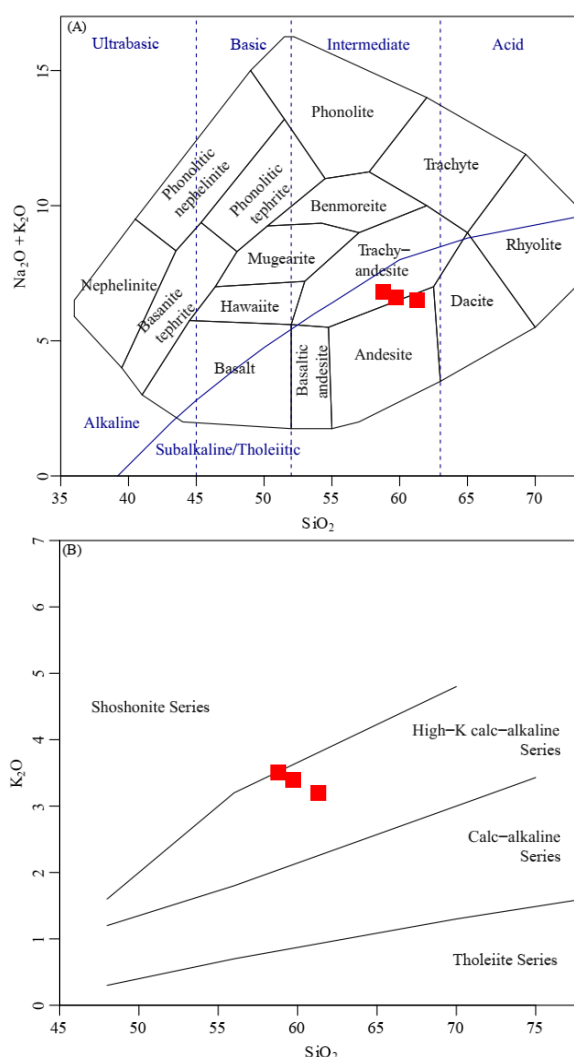
سبز هستند (شکل ۳- D)

در این سنگ‌ها، فنوکریست‌های اوژیت (شکل ۳- A) با بیرفرنژانس متوسط تا بالا (رنگ‌های تداخلی سری دوم) و فنوکریست‌های بیوتیت (شکل ۳- D) نیز دیده می‌شوند. تجمعاتی از کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز، با بافت گلومروپورفیری (شکل ۳- B) تفریق ماگمایی منطقه را نشان می‌دهند.

شیشه، میکرولیت‌های فلدسپار و ریزبلورهای از کانی‌های فلسیک و مافیک سازندهٔ خمیرهٔ این سنگ‌ها هستند.



شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از گدازه‌های حد واسط اوج‌بلاغ. A) فنوکریست‌های اوژیت و آمفیبول در تراکی آندزیت‌های منطقه؛ B) بافت گلومروپورفیری با تجمعاتی از کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز با پهنه‌بندی در خمیره هیالومیکرولیتیک پورفیری؛ C) فنوکریست‌های فلدسپار با بافت اسکلتی، آمفیبول خودشکل و بیوتیت در سنگ‌های آندزیتی منطقه (تصویرها در XPL هستند. نام اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) برگرفته شده است).



شکل ۴- نمونه‌های منطقه اوج‌بلاغ در: (A) نمودار نامگذاری سنگ‌های آذرین (Cox et al., 1979)؛ (B) نمودار تعیین سری ماگمایی (Peccerillo and Taylor, 1976).

### شیمی کانی

فلدسپار، پیروکسن، آمفیبول و میکا از مهم‌ترین کانی‌های سازنده سنگ‌های حد واسط منطقه اوج‌بلاغ هستند. برپایه داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه ریزکاوالکترونی کانی‌های شاخص در نمونه‌ها و با محاسبه فرمول ساختاری آنها، ترکیب شیمیایی و دما-فشار تبلور و تعادل کانی‌ها بحث و بررسی شده است. از این‌رو، در ادامه محاسبات دما-فشارسنجی کانی‌ها به روش‌های مختلف انجام شده است.

داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نمونه‌هایی از گدازه‌های حد واسط منطقه اوج‌بلاغ به روش XRF در جدول ۱ آورده شده‌اند. در نمونه‌های بررسی‌شده بازه تغییرات  $\text{SiO}_2$  از ۶۱/۳ تا ۵۸/۸ درصدوزنی، میزان  $\text{K}_2\text{O}$  برابر با ۳/۲ تا ۳/۵ درصدوزنی و  $\text{Na}_2\text{O}$  در بازه ۳/۲ تا ۳/۳ درصدوزنی هستند.

جدول ۱- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی به روش XRF عنصرهای اصلی (برپایه درصدوزنی) سنگ‌های تراکی‌آندزیتی اوج‌بلاغ.

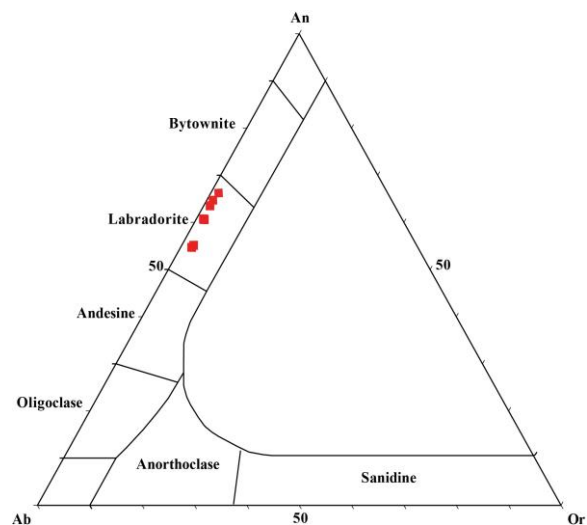
Sample Name	U.6	U.7	U.4
<b>SiO<sub>2</sub></b>	58.8	61.3	59.7
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.8	0.8	0.9
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14.6	15	15.8
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6.8	6.2	7.3
<b>MgO</b>	1.5	1.6	1.4
<b>MnO</b>	0.1	0.1	0.1
<b>CaO</b>	7.3	5.7	5.5
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3.3	3.3	3.2
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3.5	3.2	3.4
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.5	0.5	0.3
<b>LOI</b>	2.3	2.1	2
<b>Total</b>	99.5	99.8	99.8

این سنگ‌ها ویژگی ماگماهای پتاسیم‌دار (نسبت  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$ ) را نشان می‌دهند. مقدار  $\text{MgO}$  نمونه‌های آندزیتی از ۱/۴ تا ۱/۶ درصدوزنی نوسان دارد. از دیدگاه رده‌بندی این سنگ‌ها در گروه آندزیت-تراکی‌آندزیت (شکل ۴- A) و در سری کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی (شکل ۴- B) جای گرفته‌اند.

ترکیب شیمی پلاژیوکلازها از حاشیه به مرکز، به ترتیب از An<sub>55</sub> تا An<sub>66</sub> تغییر می‌کند و نشان‌دهنده‌ی پهنه‌بندی نوسانی است (شکل ۳- C).

میکا: داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه‌ی ریزکاوالکترونی و فرمول ساختاری به‌دست‌آمده برای میکاهای گدازه‌های حد واسط منطقه در جدول ۳ آورده شده‌اند. داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه‌ی شیمیایی میکاها، ترکیب میکاهای منطقه را بیوتیت نشان می‌دهند (شکل ۶- A). درصدوزنی MgO در مرکز بیوتیت‌های تراکی‌آندزیت منطقه از ۱۳/۱۹ در حاشیه تا ۱۵/۲۳ در نوسان است (جدول ۳) و با توجه به میزان بالای منیزیم این کانی در گروه بیوتیت‌های منیزیم دار جای گرفته است (شکل ۶- A). همچنین، بررسی تغییرات اکسید عنصرهای اصلی در نمودار سه‌تایی FeO+MnO-MgO-10\*TiO<sub>2</sub> اولیه‌بودن بیوتیت‌های منطقه را نشان می‌دهد (شکل ۶- B).

**فلدسپار:** فلدسپار فراوان‌ترین کانی در سنگ‌های آندزیتی-تراکی‌آندزیتی منطقه اوج‌بلاغ است که هم به‌صورت درشت‌بلور و هم به‌حالت میکرولیتی دیده می‌شود. داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه‌ی ریزکاوالکترونی پلاژیوکلازهای سنگ‌های منطقه (جدول ۲) نشان می‌دهند این کانی‌ها ترکیب لابرادوریت دارند (شکل ۵).



شکل ۵- ترکیب شیمیایی فلدسپارهای سنگ‌های حد واسط منطقه اوج‌بلاغ در نمودار رده‌بندی ارتوز-آلبیت-آنورتیت در فلدسپارها (Deer et al., 1992).

جدول ۲- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه‌ی پلاژیوکلازهای تراکی‌آندزیت‌های منطقه اوج‌بلاغ به روش ریزکاو الکترونی، به‌همراه فرمول ساختاری به‌دست‌آمده برپایه‌ی ۸ اتم اکسیژن.

Point. No	Rim 11 / 1.	Core 12 / 1.	Rim 13 / 1.	Rim 18 / 1.	Core 19 / 1.	Core 20 / 1.	Core 21 / 1.	Core 22 / 1.
SiO <sub>2</sub>	52.30	51.81	53.55	51.41	52.55	51.89	52.81	50.04
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.02	0.01	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.59	30.10	28.28	30.97	29.64	30.03	29.94	32.08
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
FeO	0.45	0.54	0.43	0.43	0.51	0.63	0.54	0.63
MgO	0.07	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08
CaO	12.33	13.37	12.10	13.30	12.69	13.23	12.75	13.17
Na <sub>2</sub> O	5.25	4.61	5.25	3.88	4.38	4.06	4.40	3.57
K <sub>2</sub> O	0.37	0.27	0.37	0.20	0.23	0.21	0.28	0.22
NiO	0.00	0.00	0.11	0.00	0.11	0.00	0.00	0.18
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.14	0.32	0.51	0.24	0.61	0.18	0.00
Total	100.60	100.93	100.49	100.80	100.43	100.74	100.98	100.06



جدول ۲- ادامه.

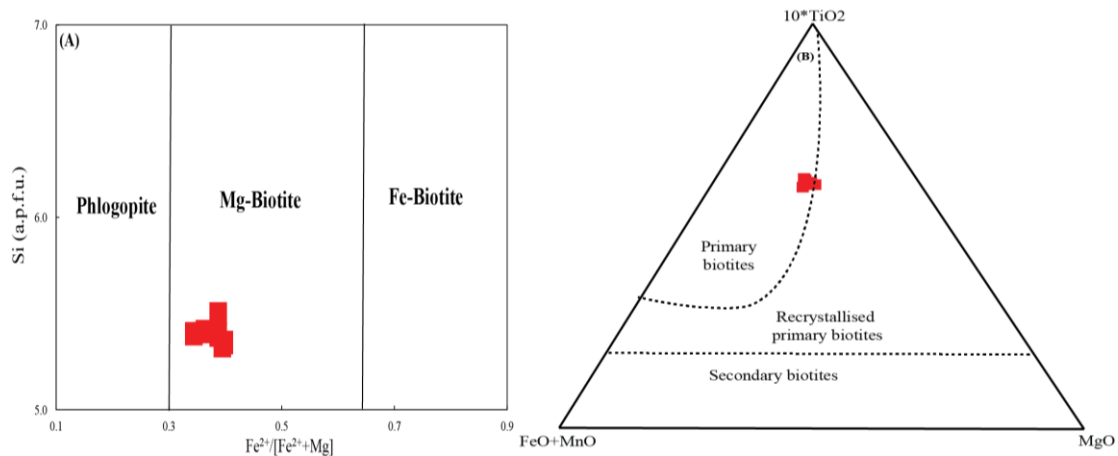
Point. No	Rim 11 / 1.	Core 12 / 1.	Rim 13 / 1.	Rim 18 / 1.	Core 19 / 1.	Core 20 / 1.	Core 21 / 1.	Core 22 / 1.
Si	2.37	2.35	2.43	2.32	2.38	2.35	2.38	2.28
Al	1.58	1.61	1.51	1.65	1.58	1.60	1.59	1.72
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Ca	0.60	0.65	0.59	0.64	0.62	0.64	0.62	0.64
Na	0.46	0.41	0.46	0.34	0.39	0.36	0.38	0.32
K	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
P	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00
Total	5.07	5.05	5.04	5.00	5.01	5.00	5.02	5.02
Or (%)	1.98	1.46	2.00	1.16	1.31	1.20	1.58	1.32
Ab (%)	42.66	37.86	43.10	34.15	37.94	35.28	37.83	32.48
An (%)	55.36	60.68	54.90	64.69	60.75	63.52	60.58	66.21

جدول ۳- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه بیوتیت‌های موجود در سنگ‌های حد واسط منطقه به روش ریزکاو الکترونی، به‌همراه فرمول ساختاری به‌دست‌آمده بر پایه ۲۲ اتم اکسیژن.

Point. No	RIM 14 / 1.	CORE 15 / 1.	RIM 16 / 1.	RIM 22 / 1.	CORE 23 / 1.	RIM 24 / 1.
SiO <sub>2</sub>	36.78	36.77	37.99	36.32	36.32	36.8
TiO <sub>2</sub>	5.02	4.67	4.61	4.54	4.52	4.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.63	14.79	14.31	15.38	14.66	14.62
FeO	16.54	16.93	15.98	14.87	14.25	14.18
MnO	0.27	0.31	0.24	0.34	0.29	0.26
MgO	14.22	14.35	14.18	13.19	15.23	13.96
CaO	0.02	0	0.33	0	0.03	0
Na <sub>2</sub> O	0.86	0.93	0.78	0.82	0.77	0.89
K <sub>2</sub> O	10.69	10.78	10.56	10.82	10.33	10.42
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	0.29	0.27	0.28	0.23	0.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.69	0.26	0.42	0.56	0.11	1.4
Total	100	100.08	99.67	97.12	96.74	97.18
Si	5.33	5.35	5.50	5.39	5.39	5.41
Al <sup>IV</sup>	2.50	2.54	2.44	2.69	2.57	2.53
Al <sup>VI</sup>	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00
Ti	0.55	0.51	0.50	0.51	0.51	0.49
Fe <sup>+2</sup>	2.01	2.06	1.93	1.85	1.77	1.74
Mn	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03
Mg	3.07	3.11	3.06	2.92	3.37	3.06
Ca	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00
Na	0.24	0.26	0.22	0.24	0.22	0.25
K	1.99	2.01	1.96	2.06	1.97	1.96
P	0.09	0.03	0.05	0.07	0.01	0.17
V	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Total	15.84	15.94	15.78	15.86	15.88	15.67

جدول ۳- ادامه.

Point. No	RIM 14 / 1.	CORE 15 / 1.	RIM 16 / 1.	RIM 22 / 1.	CORE 23 / 1.	RIM 24 / 1.
Mg#	0.61	0.60	0.61	0.61	0.66	0.64
Fe#	0.40	0.40	0.39	0.39	0.34	0.36
Mn#	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$\Sigma Al$ (a.p.f.u.)	2.50	2.54	2.44	2.77	2.57	2.53
Si (a.p.f.u.)	5.33	5.35	5.50	5.39	5.39	5.41



شکل ۶- میکاهای نمونه‌های سنگ‌های آندزیت-تراکی آندزیتی اوج‌بلاغ در: (A) نمودار  $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$  برابر Si (Rieder et al., 1998); (B) نمودار سه‌تایی  $FeO+MnO-MgO-10*TiO_2$  (Nachit et al., 2005).

۱۹۹۷) در گروه آمفیبول‌های کلسیک جای می‌گیرند (شکل ۷- A). این آمفیبول‌های کلسیک با  $(Na+K)_A \geq 0.5$ ، از نوع هاستینگزیت منیزیم‌دار به‌شمار می‌روند (شکل ۷- B).

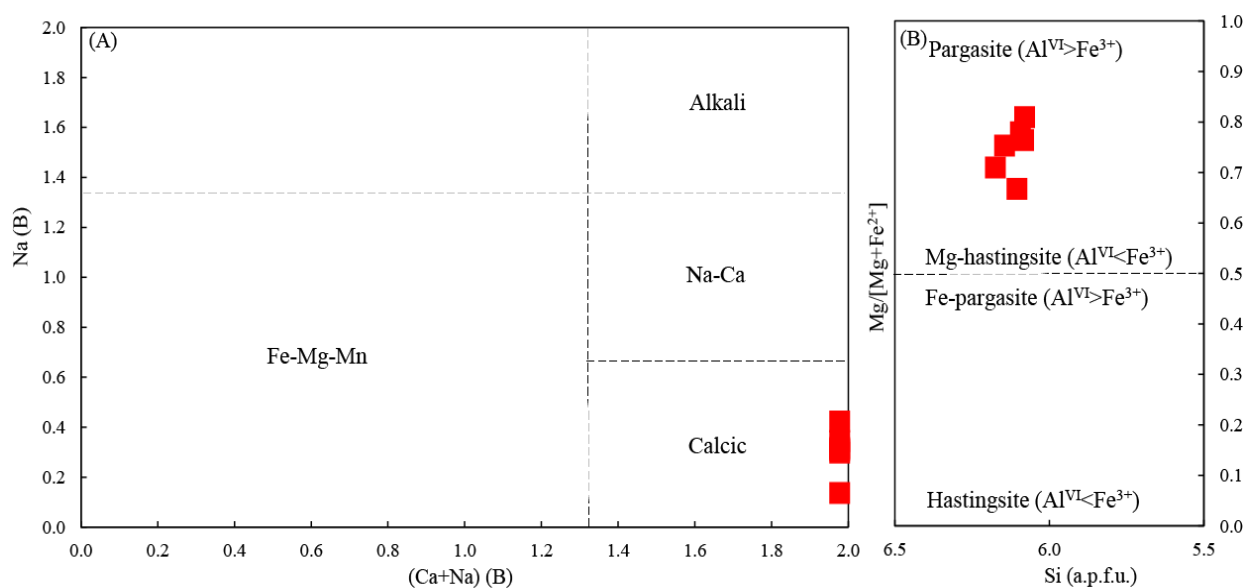
آمفیبول: داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیهٔ ریزکاو الکترونی و فرمول ساختاری به‌دست‌آمده (جدول ۴) نشان می‌دهند آمفیبول‌های سنگ‌های منطقه با دارا بودن  $(Ca+Na) \geq 1$  و  $Ca_B \geq 1/5$  (Leake et al., )

جدول ۴- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیهٔ آمفیبول‌های بررسی‌شدهٔ اوج‌بلاغ به روش ریزکاو الکترونی، به‌همراه فرمول ساختاری به‌دست‌آمده بر پایهٔ ۲۳ اتم اکسیژن.

Point. No	Rim 4 / 1.	Core 5 / 1.	Rim 6 / 1.	Core 7 / 1.	Core 9 / 1.	Rim 10 / 1.
SiO <sub>2</sub>	41.98	42.48	42.01	42.12	42.04	42.24
TiO <sub>2</sub>	3.46	3.24	3.16	3.27	3.54	3.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.24	12.54	12.19	11.82	12.15	12.53
FeO	12.09	13	11.33	11.97	11.6	11.78
MnO	0.12	0.19	0.21	0.15	0.14	0.13
MgO	13.51	12.64	12.76	13.24	13.74	13.81
CaO	10.88	10.18	10.82	11.87	10.98	10.74
Na <sub>2</sub> O	2.64	2.76	2.65	2.46	2.69	2.6
K <sub>2</sub> O	0.83	0.9	0.83	0.79	0.93	0.84
NiO	0	0	0.08	0.16	0	0

جدول ۴- ادامه.

Point. No	Rim 4 / 1.	Core 5 / 1.	Rim 6 / 1.	Core 7 / 1.	Core 9 / 1.	Rim 10 / 1.
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	0.24	0.2	0.22	0.27	0.25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.16	2.03	0.01	0.38	0.16
Total	98.03	98.33	98.27	98.08	98.46	98.35
Si	6.093	6.144	6.104	6.173	6.082	6.079
Al <sup>IV</sup>	1.907	1.856	1.896	1.827	1.918	1.921
Al <sup>VI</sup>	0.187	0.282	0.191	0.215	0.154	0.204
Ti	0.378	0.352	0.345	0.361	0.385	0.354
Fe <sup>+3</sup>	0.641	0.680	0.000	0.284	0.488	0.722
Fe <sup>+2</sup>	0.827	0.892	1.377	1.183	0.916	0.696
Mn	0.015	0.023	0.026	0.019	0.017	0.016
Mg	2.923	2.725	2.764	2.893	2.964	2.963
Ca	1.692	1.578	1.684	1.864	1.702	1.656
Na	0.743	0.774	0.747	0.699	0.755	0.725
K	0.154	0.167	0.155	0.148	0.172	0.155
Ni	0.000	0.000	0.009	0.019	0.000	0.000
P	0.002	0.020	0.250	0.001	0.047	0.019
V	0.030	0.028	0.023	0.026	0.031	0.029
Total	15.592	15.521	15.571	15.712	15.631	15.540
(Ca+Na) <sub>B</sub>	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Na <sub>B</sub>	0.308	0.422	0.316	0.136	0.298	0.344
(Na+K) <sub>A</sub>	0.589	0.518	0.586	0.712	0.629	0.537
Mg <sup>#</sup>	0.780	0.753	0.668	0.710	0.764	0.810
Fe <sup>3+</sup> <sup>#</sup>	0.774	0.707	0.000	0.569	0.760	0.779
T (°C) (Equation 1)	958	946	941	952	959	957
T (°C) (Equation 2)	979	962	969	967	985	976
P (kbar) (Equation 3)	5.8	6.1	5.9	5.4	5.7	6.0
P (kbar) (Equation 4)	6.0	6.5	6.2	5.5	5.9	6.4
P (kbar) (Equation 5)	5.7	5.9	5.8	5.4	5.6	5.8



شکل ۷- A) تعیین نوع آمفیبول‌های منطقه اوج‌بلاغ بر پایه نمودار رده‌بندی ترکیب شیمیایی (Leake et al., 1997).

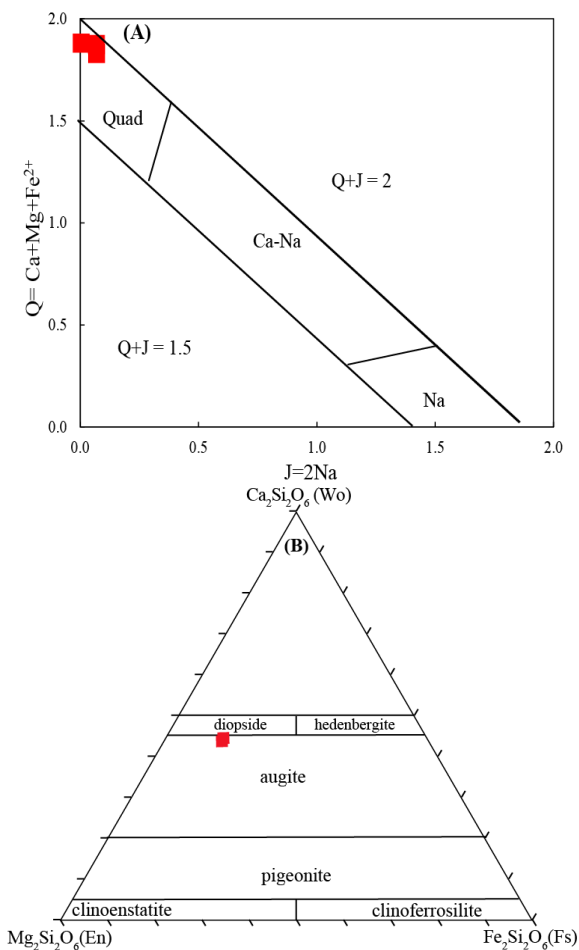
جدول ۵- ادامه.

Point. No	Core	Core
	26 / 1.	27 / 1.
Ca	0.820	0.834
Na	0.034	0.035
K	0.001	0.000
Cr	0.004	0.004
P	0.043	0.000
V	0.001	0.002
Total	3.994	4.000
Mg#	0.780	0.822
Fe <sup>3+</sup> #	0.000	0.225
Cr#	0.027	0.024
Q	1.873	1.830
J	0.069	0.070
Wo (%)	44	44
En (%)	44	44
Fs (%)	12	12

**پیروکسن:** برپایه فرمول ساختاری به دست آمده برای

پیروکسن‌های منطقه (جدول ۵)، این پیروکسن‌ها با توجه به مقادیر Mg (۰/۸۱۹ تا ۰/۸۲۲)، Fe<sup>2+</sup> (۰/۱۷۷ تا ۰/۲۳۱)، Ca (۰/۸۲۰ تا ۰/۸۳۴)، و Na (۰/۰۳۴ تا ۰/۰۳۵) در بازه ترکیبی پیروکسن‌های سرشار از منیزیم-کلسیم-آهن (محدوده Quad در نمودار Q-J) جای گرفته‌اند (شکل ۸- A). از این رو، نمودار سه‌تایی En-Wo-Fs برای رده‌بندی این پیروکسن‌ها به کار برده شد (شکل ۸- B) که در آن مقدار En، Wo و Fs به ترتیب برابر ۴۴، ۴۴ و ۱۲ درصد است (جدول ۵) و مرکز کانی‌ها ترکیب اوژیتی نشان می‌دهد.

جدول ۵- داده‌های دو نقطه تجزیه شده از مرکز پیروکسن‌های آندزیت‌های منطقه اوچ‌بلاغ به روش ریزکاو الکترونی، به همراه فرمول ساختاری به دست آمده برپایه ۶ اتم اکسیژن.



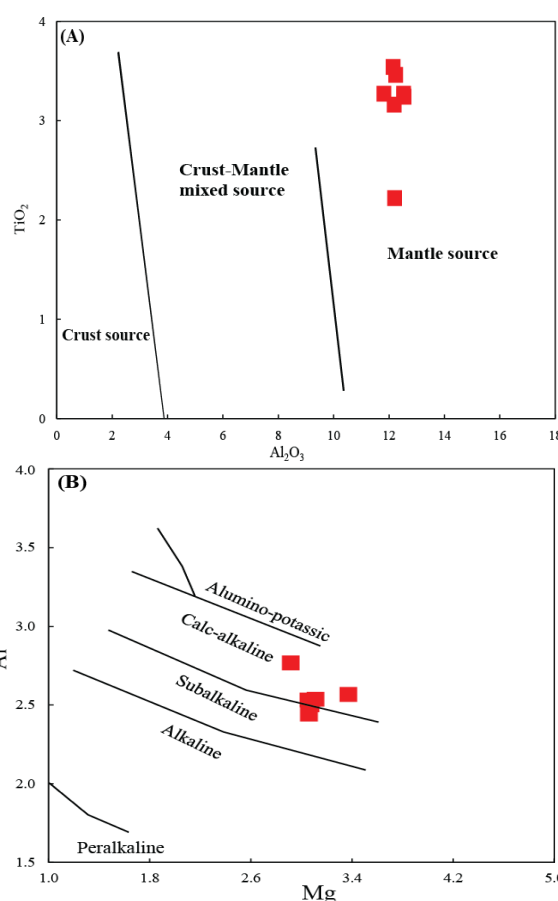
شکل ۸- A، B) فرمول ساختاری پیروکسن‌ها در نمودارهای رده‌بندی پیروکسن‌ها (Morimoto et al., 1988).

Point. No	Core	Core
	26 / 1.	27 / 1.
SiO <sub>2</sub>	50.46	50.47
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.39	3.82
FeO	7.47	7.26
MnO	0.19	0.19
MgO	14.89	14.68
CaO	20.68	20.81
Na <sub>2</sub> O	0.48	0.48
K <sub>2</sub> O	0.02	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.14
NiO	0	0
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.37	0
Total	99.68	98.52
Si	1.868	1.888
Al <sup>iv</sup>	0.132	0.112
Al <sup>vi</sup>	0.016	0.056
Ti	0.015	0.017
Fe <sup>+3</sup>	0.000	0.050
Fe <sup>+2</sup>	0.231	0.177
Mn	0.006	0.006
Mg	0.822	0.819

## بحث

## شیمی کانی و سرشت ماگما

با بررسی شیمی کانی‌های سازنده سنگ‌ها، سرشت ماگمای مادر استنباط می‌شود. برای بررسی خاستگاه ماگمای اولیه، تغییرات درصدوزنی  $Al_2O_3$  در برابر  $TiO_2$  در آمفیبول‌های تراکی‌آندزیت‌های اوچ‌بلاغ (شکل ۹- A) به کار برده شده است. این نمودار آشکارا نشان می‌دهد ماگمای مادر نمونه‌های بررسی شده از گوشته خاستگاه گرفته است. تغییرات Mg و Al بیوتیت‌ها در نمودار Mg-Al کالک‌آلکان تا نزدیک به ساب‌آلکان ماگمای مادر این سنگ‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۹- B).



شکل ۹- A) نمودار تغییرات درصدوزنی  $Al_2O_3$  در برابر  $TiO_2$  آمفیبول‌ها برای تفکیک خاستگاه ماگمای اولیه این کانی (Jiang and An, 1984)؛ B) تعیین سری ماگمایی به روش پیشنهادی Nachit (۱۹۸۶) بر پایه نسبت ترکیبی Mg و Al در فرمول ساختاری بیوتیت‌های منطقه اوچ‌بلاغ.

## دما-فشارسنجی

آمفیبول: آمفیبول از کانی‌هایی است که در طیف گسترده‌ای از سنگ‌های مافیک تا فلسیک یافت می‌شود. پژوهشگران بسیاری (Ridolfi et al., 2010; Ridolfi and Renzulli, 2012; Mutch et al., 2016; Putirka, 2016) از این کانی برای بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی ماگما و دما و فشار تبلور آن استفاده کرده‌اند. در این مقاله از روش‌های پیشنهادی Mutch و همکاران (۲۰۱۶) و Putirka (۲۰۱۶) بهره گرفته شده است.

بر پایه معادله  $T(^{\circ}C) = 1977 - 165[Si]$  (معادله ۱) و با استفاده از تغییرات Si (Putirka, 2016)، آمفیبول‌های بررسی شده دامنه دمایی برابر با ۹۴۱ تا ۹۵۹ درجه سانتیگراد (جدول ۴) را نشان می‌دهند. همچنین، با به کارگیری دماسنج مستقل از فشار که به صورت معادله معادله ۲ (Putirka, 2016) است، دمایی در بازه ۹۶۲ تا ۹۸۵ به دست آمد (جدول ۳):

$$T (^{\circ}C) = 1781 - 132.74[Si^{Amp}] + 116.6[Ti^{Amp}] - 69.41[Fe_t^{Amp}] + 101.62[Na^{Amp}]$$

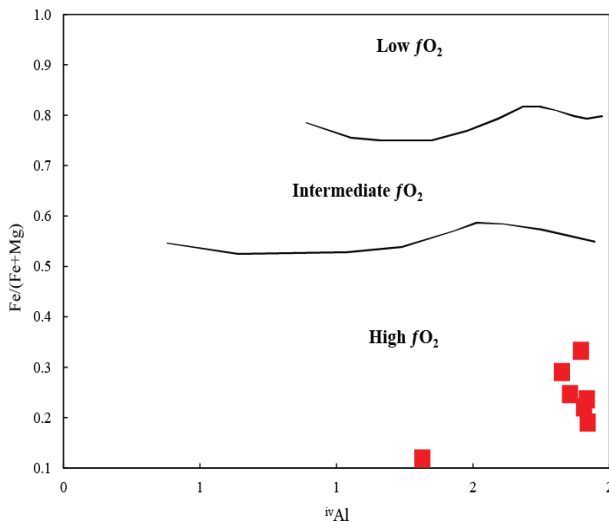
برای تعیین فشار بر پایه توزیع Al در آمفیبول به روش پیشنهادی Putirka (۲۰۱۶) و تصحیحات بعدی آن در بررسی‌های پیشین (Hammerstrom and Zen, 1986)، دو معادله (به ترتیب معادله‌های ۳ و ۴) پیشنهاد شده است:

$$P (kbar) = -30.93 - 42.74[\ln(D_{Al})] - 42.16[\ln(X_{Al_2O_3}) + X_{P_2O_5}] + 12.64[X_{H_2O}] + 24.57[Al^{Amp}] + 18.6[K^{Amp}] + 4.0[\ln(D_{Na})]$$

$$P (kbar) = -64.79 - 6.064[\ln(D_{Al})] - 61.75[\ln(X_{SiO_2}) + 682[X_{P_2O_5}] + 101.9[X_{CaO}] + 7.85[Al^{Amp}] - 46.46[\ln(X_{SiO_2})] - 4.81[\ln(X_{Na_2O} + X_{K_2O})]$$

اکسیدی متبلور می‌شوند نسبت به آنهایی که از ماگماهای احيایی تبلور می‌یابند نسبت‌های  $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$  بالاتر و  $Fe/(Fe+Mg)$  کمتری دارند (Wones, 1981). نسبت  $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$  در آمفیبول‌های بررسی‌شده برابر با ۰/۵۵ تا ۰/۷۸ و نسبت  $Fe/(Fe+Mg)$  برابر با ۰/۱۱ تا ۰/۳۳ است که نشان‌دهندهٔ پیدایش آمفیبول‌ها در شرایط کمابیش اکسیدی هستند (Wones, 1981; Clowe et al., 1988).

برای ارزیابی میزان فوگاسیتهٔ اکسیژن، تغییرات  $Al^{iv}$  در برابر  $Fe/(Fe+Mg)$  در آمفیبول‌ها (Anderson and Smith, 1995) به کار برده می‌شود. این نمودار در تأیید نتیجهٔ یادشده نشان می‌دهد آمفیبول‌های منطقهٔ اوج‌بلاغ در محدودهٔ فوگاسیتهٔ اکسیژن بالا جای گرفته اند (شکل ۱۰) و شرایط اکسیدی حاکم هنگام تبلور آمفیبول‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- تعیین فوگاسیتهٔ اکسیژن برپایهٔ تغییرات  $Al^{iv}$  در برابر  $Fe/(Fe+Mg)$  در فرمول ساختاری آمفیبول‌ها (Anderson and Smith, 1995).

بیوتیت: مقدار Ti موجود در کانی بیوتیت،

نتایج به‌دست‌آمده از دو معادلهٔ بالا برای برآورد فشار آمفیبول‌های منطقه، به ترتیب دامنهٔ فشاری ۵/۳ تا ۶ و ۵/۳ تا ۶/۵ کیلو بار را نشان می‌دهند (جدول ۴). همچنین، برپایهٔ فشارسنج پیشنهادی Mutch و همکاران (۲۰۱۶)  $P(kbar) = 0.5 + 0.331(8) \times Al^{total} + 0.995(4) \times (Al^{total})^2$  که توزیع Al کل  $(Al^{total})$  را در آمفیبول مشخص می‌کند (معادلهٔ ۵)، فشاری نزدیک به ۵/۴ تا ۵/۹ کیلو بار برای آمفیبول‌های تراکی آندزیت منطقه به‌دست آمد (جدول ۴). از آنجایی که میانگین چگالی ۲/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب پوستهٔ قاره‌ای، ضخامت نزدیک به ۳/۷ کیلومتر برای هر ۱ کیلو بار فشار در نظر گرفته می‌شود؛ پس با داشتن فشار می‌توان ژرفای تبلور کانی را به‌طور حدودی به‌دست آورد. با تطبیق فشارهای به‌دست‌آمده از بررسی شیمی آمفیبول، ژرفای هم‌ارز ۲۰ تا ۲۴ کیلومتر (به‌طور میانگین: ۲۱/۴ کیلومتر) به‌دست می‌آید.

از آنجایی که فوگاسیتهٔ اکسیژن، نسبت  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  در سنگ‌کل (مانند: Blevin, 2004) است و نیز نسبت‌های  $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$  و  $Fe/(Fe+Mg)$  و به تبع آن ترکیب شیمیایی کانی‌های فرومنیزیم مانند پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت (Bogaerts et al., 2006; Ridolfi et al., 2010; Putirka, 2016) را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بسیاری از پژوهشگران ترکیب شیمیایی کانی‌های فرومنیزیم، مانند پیروکسن (Schweitzer et al., 1979) و آمفیبول (Anderson and Smith, 1995; Ridolfi et al., 2010) را برای تعیین فوگاسیتهٔ اکسیژن ماگما به کار برده‌اند.

آمفیبول‌هایی که از مذاب‌های با شرایط

### محیط زمین ساختی

با بررسی شیمی کانی تراکی آندزیت‌های منطقه اوج‌بلاغ (شکل ۸-B)، سرشت ماگمای کالک‌آلکان منطقه و وابستگی ماگمای سازنده این سنگ‌ها به محیط فرورانشی مشخص شد. ساختار بلورین بیوتیت به گونه‌ای است که بیشتر عنصرهای رایج در مذاب حد واسط را در خود جای می‌دهد؛ از این‌رو، از نمودارهای تغییرات اکسید عنصرهای اصلی مانند  $Al_2O_3$ ،  $FeO_{(Total)}$  و  $MgO$  در بیوتیت‌ها، برای تعیین سرشت و جایگاه تکتونوماگمایی ماگمای مادر سنگ‌ها به کار برده می‌شود (Abdel-Rahman, 1994). در همه این نمودارها بیوتیت‌های بررسی شده در محدوده C، یعنی مجموعه‌های کوهزایی کالک‌آلکان، جای گرفته‌اند (شکل‌های ۱۱-A تا ۱۱-D). برپایه این نمودارها، سنگ‌های حد واسط منطقه از ماگمایی با سرشت کالک‌آلکان و در جایگاه زمین ساختی کوهزایی مرتبط با فرورانش تشکیل شده‌اند.

از مقادیر  $Al^{iv}$  به دست آمده برای آمفیبول‌ها نیز می‌توان برای تعیین جایگاه زمین ساختی پیدایش این کانی‌ها استفاده کرد (Ghent et al., 1991). بر این اساس، آمفیبول‌های با مقادیر  $Al^{iv}$  بیشتر از ۱/۵ در محیط جزیره‌های کمانی و آمفیبول‌های با مقادیر  $Al^{iv}$  کمتر از ۱/۵ کیلوبار در محیط حاشیه قاره‌ای فعال پدید آمده‌اند (Ghent et al., 1991). مقادیر  $Al^{iv}$  به دست آمده برای آمفیبول‌های بررسی شده بیشتر از ۱/۵ است و از این‌رو، جایگاه زمین ساختی پیدایش این آمفیبول‌ها با محیط فرورانشی مرتبط است.

به شرایط فیزیکوشیمیایی یعنی دما، فشار و شیمی بلور کانی وابسته است (Henry and Guidotti, 2002; Henry et al, 2005). از این‌رو، Henry و همکاران (۲۰۰۵) مدلی را برای تعیین دما به کمک میزان Ti بیوتیت پیشنهاد دادند (معادله ۶):

$$T (^{\circ}C) = \{[\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3] / b\}^{0.333}$$

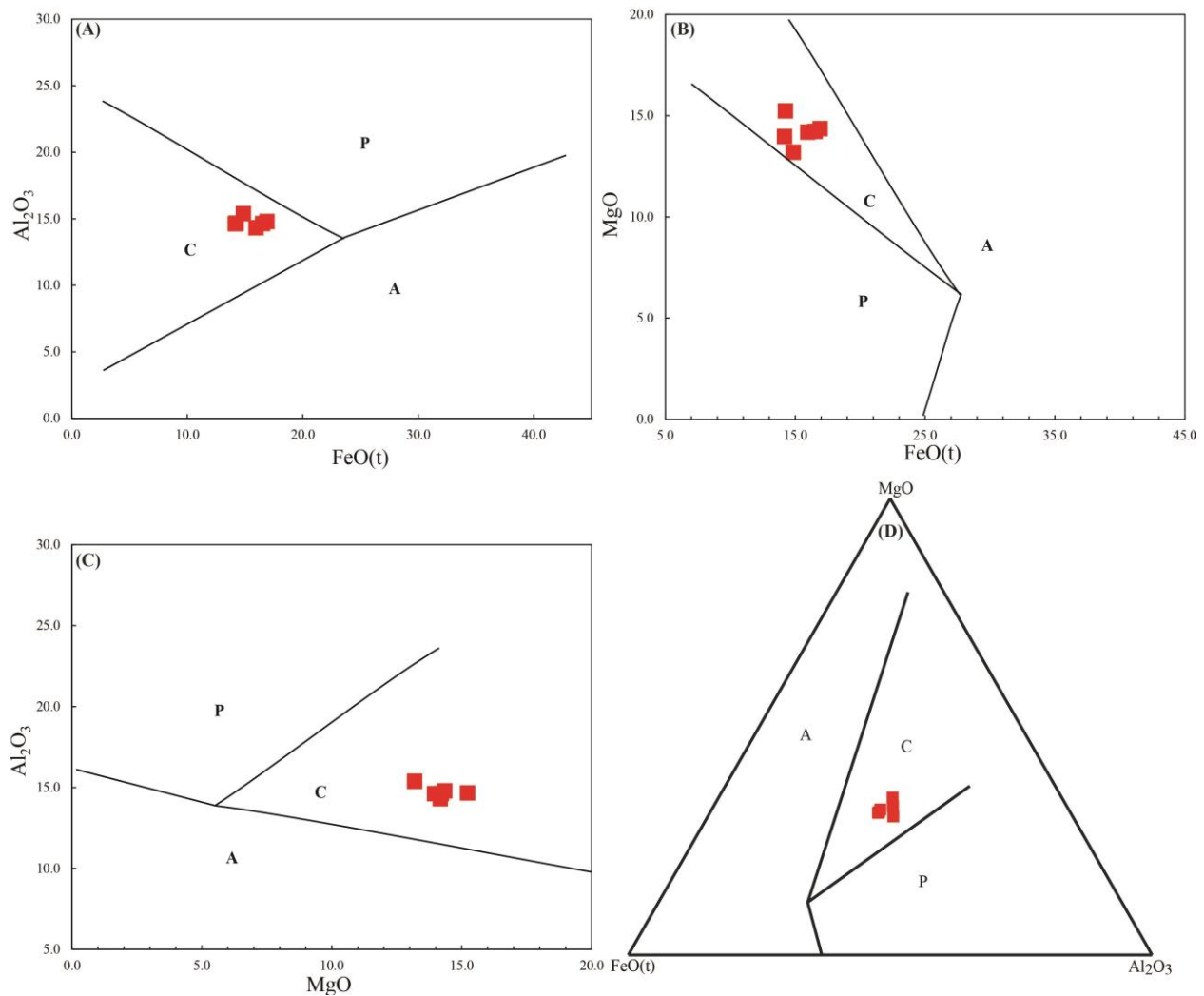
که در آن مقدار Ti برپایه ۲۲ اتم اکسیژن به دست آورده شده است.

همچنین،  $a = -2/3594$ ،  $b = 4/6482 \times 10^{-9}$  و  $c = 1/7283$  هستند. نتایج به دست آمده از این روش دمای برابر با ۷۵۸ تا ۷۷۰ درجه سانتیگراد (میانگین: ۷۶۲) را نشان می‌دهد (جدول ۶).

همچنین، به کمک Al کل موجود در ترکیب شیمیایی بیوتیت، Uchida و همکاران (۲۰۰۷)، فرمول  $P \text{ (kbar)} = 3.03 \times T Al - 6.53 \pm 0.33$  (معادله ۷) را برپایه ۲۲ اتم اکسیژن پیشنهاد کرده‌اند که برپایه آن فشار پیدایش بیوتیت‌های تراکی آندزیت‌های اوج‌بلاغ در بازه ۰/۹ تا ۱/۹ کیلوبار و در ژرفای ۳/۲ تا ۶/۹ کیلومتری به دست آمده است (جدول ۶).

جدول ۶- داده‌های تعیین دما، فشار و ژرفای هم‌ارز به دست آمده برپایه شیمی کانی بیوتیت.

	Rim	Core	Rim	Rim	Core	Rim
Point. No	14 / 1.	15 / 1.	16 / 1.	22 / 1.	23 / 1.	24 / 1.
T (°C) (Equation 6)	767	758	758	759	770	761
P (Kb) (Equation 7)	1.1	1.2	0.9	1.9	1.3	1.1
H (Km)	3.87	4.27	3.20	6.85	4.61	4.22



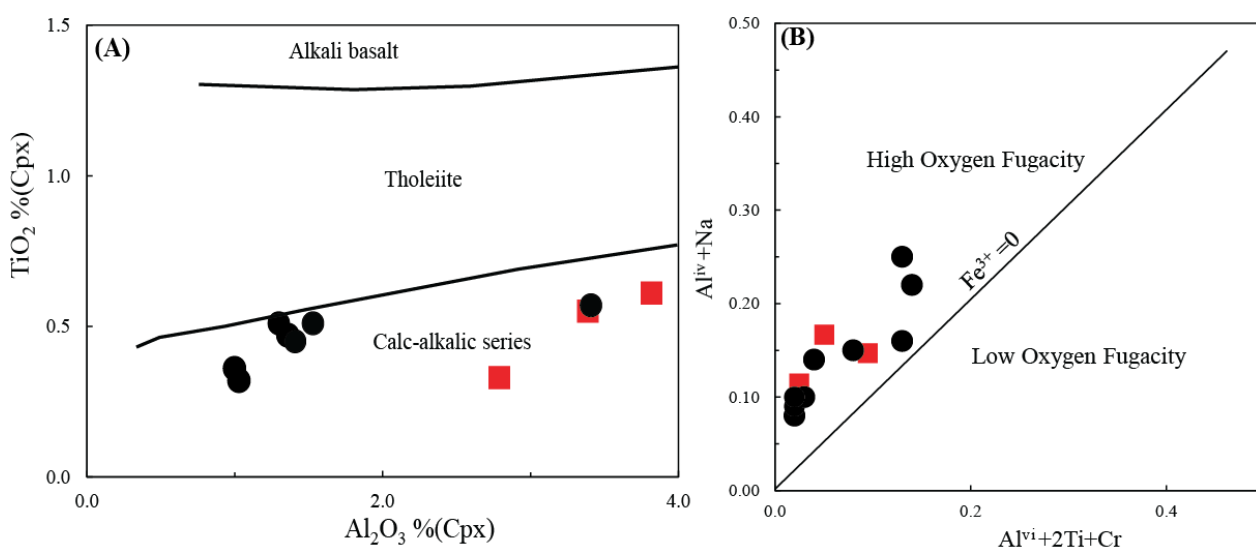
شکل ۱۱- تعیین سری ماگمایی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های حد واسط منطقه اوج‌بلاغ بر پایه ترکیب شیمی بیوتیت‌ها ( Abdel-Rahman, 1994). محدوده A سنگ‌های با خاستگاه آکالن محیط غیرکوهزایی، محدوده C سنگ‌های با خاستگاه ماگمای کالک‌آکالن در محیط کوهزایی مرتبط با فرورانش و محدوده P سنگ‌های با خاستگاه ماگمایی پرآلومین در محیط کوهزایی برخوردار را نشان می‌دهند.

داده‌های به‌دست‌آمده از بررسی پیروکسن‌های منطقه با داده‌های شیمیایی کانی‌های بیوتیت و آمفیبول سازگار است؛ به گفتهٔ دیگر، این داده‌ها نیز سرشت کالک‌آکالن ماگمای مادر (شکل ۱۲- A) و فوگاسیتته اکسیژن بالا (شکل ۱۲- B) را نشان می‌دهند. از دیدگاه جایگاه زمین‌ساختی نیز با نشان‌دادن محیط کوهزایی (شکل ۱۳- A) و از نوع کمان آتشفشانی (شکل ۱۳- B) با داده‌های به‌دست‌آمده از شیمی کانی بیوتیت و آمفیبول این گدازه‌ها سازگار است.

### مقایسه شیمی کانی‌های منطقه اوج‌بلاغ و منطقه گنجین

با توجه به هم‌زمانی فوران، نزدیکی مکانی و مشابهت ترکیبی گدازه‌های حد واسط دو منطقه اوج‌بلاغ (جنوب هشتجین) و گنجین (شمال‌باختری هشتجین) (Kheirkhah and Mobashergarmi, 2021)، برای شناخت سرشت ماگمایی این دو منطقه، از مقایسه ترکیب شیمیایی کانی‌های پیروکسن تراکی آندزیت‌های آنها استفاده شده است.

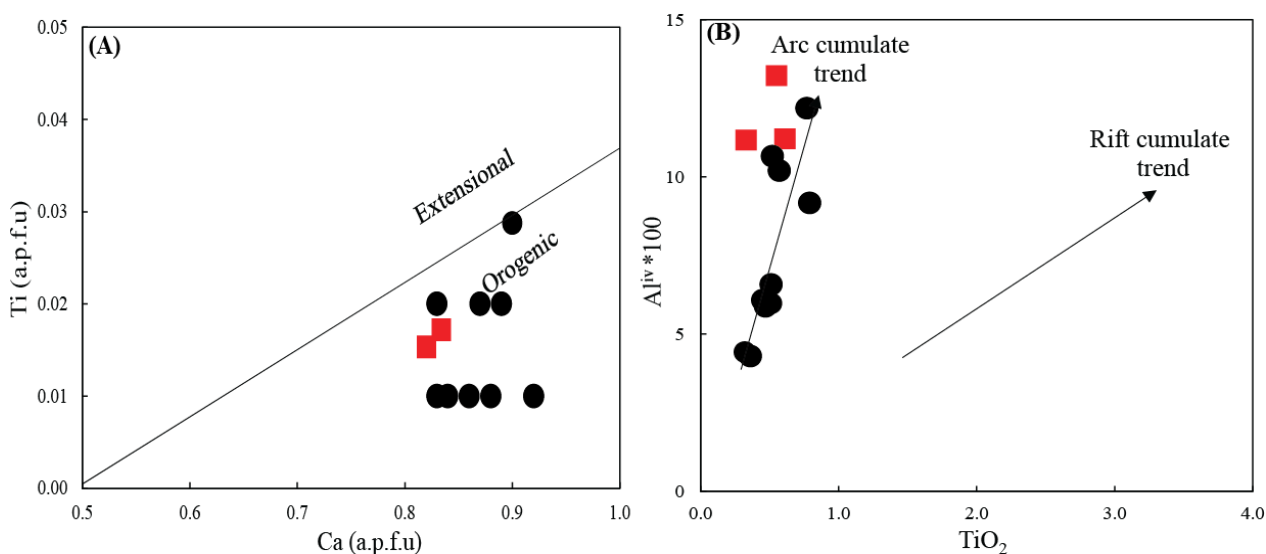




شکل ۱۲- (A) تعیین سرشت ماگما بر پایه ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های نمونه‌های حد واسط منطقه در نمودار تغییرات  $Al_2O_3$  در برابر  $TiO_2$  (Schweitzer et al., 1979) (دایره‌های سیاه: ترکیب Tholeiite، مربع‌های قرمز: ترکیب Calc-alkalic series) (B) تعیین فوگاسیته اکسیژن در نمودار  $Al^{IV}+Na$  در برابر  $Al^{IV}+2Ti+Cr$  (Le Bas, 1962)؛ (دایره‌های سیاه: ترکیب High Oxygen Fugacity، مربع‌های قرمز: ترکیب Low Oxygen Fugacity) پیروکسن‌های منطقه گنجین در شمال منطقه اوج‌بلاغ.

(A). ماگمای اولیه این دو منطقه فوگاسیته اکسیژن بالایی داشته است (شکل ۱۲- B). ویژگی زمین‌ساختی مشابه در نمودارهای تغییرات Ca در برابر Ti و  $TiO_2$  در برابر  $Al^{IV} * 100$  (شکل‌های ۱۳- A و ۱۳- B) نشان می‌دهند سنگ‌های دو منطقه با محیط زمین‌ساختی مشابه‌ای مرتبط بوده‌اند.

مقایسه ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های دو منطقه برای تعیین سرشت ماگمای سازنده این سنگ‌ها نشان می‌دهد شیمی کانی پیروکسن‌های منطقه گنجین با سرشت آکالین تا کالک‌آکالین این سنگ‌ها (Kheirkhah and Mobashergarmi, 2021) و در منطقه اوج‌بلاغ با سرشت ماگمایی کالک‌آکالین همخوانی دارد (شکل ۱۲- B).



شکل ۱۳- نمودارهای تعیین جایگاه زمین‌ساختی (A) تغییرات Ti در برابر Ca (Sun and Bertrand, 1991) و (B)  $Al^{IV} * 100$  در برابر  $TiO_2$  (Ao et al., 2010). داده‌های منطقه گنجین به صورت دایره‌های سیاه نشان داده شده‌اند.

## برداشت

منطقه‌ی اوج‌بلاغ در شمال زنجان و در زیرپهنه طارم- هشتجین جای دارد. برپایه‌ی بررسی‌های سنگ‌شناختی و پترولوژیک، گدازه‌های حد واسط الیگوسن این منطقه ترکیب آندزیت - تراکی‌آندزیتی دارند و ماگمای مادر گدازه‌های کالک‌آلکالن پتاسیم بالا تا شوشونیتی از گوشته بالایی خاستگاه گرفته است (Kheirkhah and Aghaali, 2018) که در یک جایگاه زمین‌ساختی کوهزایی مرتبط با فرورانش برون ریخته‌اند. کانی‌های سازنده‌ی سنگ‌های تراکی‌آندزیتی اوج‌بلاغ ویژگی‌های زمین‌دما-فشارسنجی متفاوتی داشته‌اند. آمفیبول‌ها در بازه‌ی دمایی برابر با ۹۴۱ تا ۹۸۵ درجه‌ی سانتیگراد و فشاری در بازه‌ی ۵/۳ تا ۶/۵ کیلو بار و بیوتیت‌ها در دمایی برابر با ۷۵۸ تا ۷۷۰ درجه‌ی سانتیگراد و فشاری در بازه‌ی ۰/۹ تا ۱/۹ کیلو بار پدید آمده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد ماگمای اولیه این سنگ‌ها در شرایط فوگاسیته‌ی اکسیژن بالا و

محیط اکسیدان پدید آمده است. با مقایسه شیمی کانی کلینوپیروکسن‌های تراکی‌آندزیتی این منطقه و سنگ‌های مشابه و هم‌زمان در منطقه‌ی گنجین در شمال باختری اوج‌بلاغ، چنین می‌توان دریافت که گدازه‌های منطقه‌ی گنجین از ماگمایی غنی از مواد فرار با گریزندگی اکسیژن بالاتری نسبت به گدازه‌های تراکی‌آندزیتی اوج‌بلاغ پدید آمده‌اند. چنانچه این گدازه‌های کالک‌آلکالن تا شوشونیتی در هنگام پیدایش رژیم زمین‌ساختی مشابهی داشته‌اند که با شواهد زمین‌شناختی در مقیاس ناحیه‌ای، و بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی نمونه‌های بررسی‌شده هماهنگ است. در همین راستا، تغییر جایگاه ماگمای کالک‌آلکالن تا ساب‌آلکالن سنگ‌های حد واسط اوج‌بلاغ از مناطق کم‌ژرفتر، به جایگاه ماگمای آلکالن تا ساب‌آلکالن مناطق ژرفتر گدازه‌های منطقه‌ی گنجین را می‌توان پیامد فرورانش نئوتتیس، در یک کمان آتشفشانی دانست.

## منابع

- Abdel-Rahman, A. (1994) Nature of Biotites from Alkaline, Calcalkaline, and Peraluminous Magmas. *Journal of Petrology* 35(2): 525-541.
- Aghanabati, A. (2005) *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H. and Jones, S. J. (2011) Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International* 184: 555-574.
- Anderson, J. L. and Smith, D. R. (1995) The effects of temperature and  $fO_2$  on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist* 80: 549-559.
- Ao, S. J., Xiao, W. J., Han, C. M., Mao, Q. G. and Zhang, J. E. (2010) Geochronology and geochemistry of early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: implications for the late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altoids. *Gondwana Research* 18: 466-478.
- Blevin, P. L. (2004) Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of Eastern Australia: Implications for gold-rich ore system. *Resource Geology* 54: 241-252.
- Bogaerts, M., Scaillet, B. and Auwera, J. V. (2006) Phase equilibria of the Lyngdal granodiorite (Norway): implications for the origin of metaluminous ferroan granitoid. *Journal of Petrology* 47: 2405-2431.

- Clark G. C., Davis R. G. (1975) Explanatory text of the Bandar-e-Pahlavi quadrangle map 1:250000, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran
- Clowe, C. A., Popp, R. K. and Fritz, S. J. (1988) Experimental investigation of the effect of oxygen fugacity on ferric-ferrous ratios and unit-cell parameters of four natural clin amphiboles. *American Mineralogist* 73: 487-499.
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. (1979) Compositional variation in magmas. In: *The interpretation of igneous rocks*. 1<sup>st</sup> edition Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1992) *An introduction to the rock-forming minerals*. Longman Scientific and Technical, Hong Kong.
- Droop, G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe<sup>3+</sup> in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51: 431-437..
- Ebrahimi, M., Kouhestani, H., Mokhtari, M. and Feizi, M. (2016) Petrology and geochemistry of the Aqkand acidic volcanic rocks and perlites, North of Zanjan. *Journal of Geoscience* 26(101): 99-110 (in Persian).
- Faridi, M. and Anvari, A. (2000) Geological map of Hashtjin, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Ghent, E., Nicholls, J., Simony, P. S., Sevigny, J. H. and Stout, M. Z. (1991) Hornblende geobarometry of the Nelson Batholith, southeastern British Columbia: tectonic implications. *Canadian Journal of Earth Sciences* 28(12): 1982-91.
- Ghorbani, M. R., Ahmadi, A. R., Tiepolo, M. and Langone, A. (2013) Clinopyroxene chemistry in Tertiary alkaline volcanic rocks from Taleghan, Central Alborz, Iran: implications for two parental melts. *Chemie der Erde, Geochemistry* 73: 565-568.
- Hammerstrom, J. M. and Zen, E. (1986) Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist* 71: 1297-1313.
- Henry D. J. and Guidotti, C. V. (2002) Titanium in biotite from metapelites rocks: Temperature effects, crystal-chemical controls, and petrologic applications. *American Mineralogist* 87: 375-382.
- Henry, D. J., Guidotti, C. V. and Thomson, J. A. (2005) The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelites biotites: implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American mineralogist* 90(2-3): 316-28.
- Jiang, C. Y. and An, S. Y. (1984) On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance. *Journal of Mineralogy and Petrology* 03: 1-9 (in Chinese).
- Kheirkhah, M. and Mobashergarmi, M. (2021) Thermobarometry and tectonic magmatic setting of Genjin Paleogene intermediate lavas based on clinopyroxene crystals chemistry, An evidence for south of Tarom (eastern Azerbaijan) magmatism. *Researches in Earth Sciences* 12(4): 245-260 (in Persian).
- Kherikhah, M. and Aghaali, E. (2018) Petrographical investigation of the prismatic columns rocks in the North of Zanjan (NW Iran). 2<sup>nd</sup> Trigger International Conference, Tehran, Iran.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J. and Krivovichev, V. G. (1997) Report. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names. *Mineralogical Magazine* 61: 295-321.

- Le Bas, N. J. (1962) the role of aluminous in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science* 260: 267-88.
- Lescuyer, J. L. and Riou, R. (1976) *Geologie de la region de mianeh (Azerbaijan), contribution a letude du volcanisme tertiaire de lIran. These 3eme crycles, Grenoble.*
- Moayyed, M. (2001) Petrological studies of western Alborz-Azerbaijan Tertiary volcano-plutonic belt with emphasis on Hashtjin area. Ph. D. Thesis, Shahid Beheshti University Tehran, Iran.
- Morimoto, N., Fabrise, J., Ferguson, A., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Akoi, K. I., and Gottardi, G. (1988) Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine* 52: 535-555.
- Mutch, E. J. F., Blundy, J. D., Tattich, B. C., Cooper, F. J. and Brooker, R. A. (2016) An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 171(85): 1-27.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Liu, X., Dong, Y., Jiang, S. Y., Von Qaudt, A. and Bernroider, M. (2013) Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoid in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: Geochemical, U-Pb zircon and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Lithos* 184–187: 324-345.
- Nabavi, M. H. (1976) Introduction to the geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Nachit, H. (1986) Contribution à l'étude analytique et expérimentale des biotites des granitoïdes, applications typologiques, thèse, université de Bretagne occidentale, Brest.
- Nachit, H., Ibhi, A. B., Abia, El- H., El Hassan, A. and Ben Ohoud, M. (2005) Discrimination between primary magmatic biotites, reequilibrated biotites, and neoformed biotites. *Comptes Rendus Geoscience* 337: 1415-1420.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81
- Putirka, K. (2016) Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist* 101: 841-858.
- Ridolfi, F. and Renzulli, A. (2012) Calcic amphiboles in calc-Alkaline and alkaline magmas: Thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130°C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 163(5): 877-895.
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations, and applications to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 160: 45-66.
- Rieder, M., Cavazzini, G., D'yakonov, Y. S., Frank-Kamenetskii, V. A., Gottardi, G., Guggenheim, S., Koval', P. V., Mueller, G., Neiva, A. M., Radoslovich, E. W. and Robert, J. L. (1998) Nomenclature of the micas. *Clays and Clay Minerals* 46 (5): 586-595.
- Sadri Esfanjani, S., Amel, N. and Mokhtari, M. A. (2015) Petrology and geochemistry of acidic volcanic rocks in the north of Soleiman Bolaghi (southwest Hashtjin, north of Zanjan) with considering perlitization. *Petrology* 21: 139-156 (in Persian).
- Schweitzer, E. L., Papike, J. J. and Bence, A. E. (1979) Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Mineralogist* 64(5-6): 501-513.

- Sun, C. M. and Bertrand, J. (1991) Geochemistry of clinopyroxenes in plutonic and volcanic sequences from the Yanbian Proterozoic ophiolites (Sichuan province, China): Petrogenetic and geotectonic implications. *Schweiz Mineralogische Petrologische Mitteilungen* 71(2): 243-259.
- Uchida, E., Endo, S. and Makino, M. (2007) Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology* 57(1): 47-56.
- Verdel, C., Wernicke, B. P., Hassanzadeh, J. and Guest, B. (2011) A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics* 30: TC3008.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Wones, D. R. (1981) Mafic silicates as indicators of intensive variables in granitic magmas. *Mining Geology* 31: 191-212.