



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2023.80746.1065



Mineral chemistry, Thermobarometry, Geochemistry and tectonic setting of Tertiary andesitic lavas in the Shourestan area (west of Sarbisheh), Southern Khorasan

Seyyed Saeid Mohammadi ^{1*} , Sun-Lin Chung ² , Malihe Nakhaei ³ , Arash Islamipناه ⁴

¹ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran; Professor, Earth Sciences Research Group, University of Birjand, Birjand, Iran

² Professor, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan; Professor, Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

³ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Civil, Mining and Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

⁴ M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 23 January 2023
 Revised: 28 February 2023
 Accepted: 28 February 2023

Keywords

Pyroxene andesite
 thermobarometry
 spinel lherzolite
 lithospheric mantle
 Shourestan
 active continental margin
 Lut

*Corresponding author

Seyyed Saeid Mohammadi
 ✉ ssmohammadi@birjand.ac.ir

ABSTRACT

In the Shourestan area, 14 kilometers west of Sarbisheh city, in South Khorasan province, volcanic rocks with pyroxene-andesite composition belonging to Eocene-Oligocene are exposed. The constituent minerals of these rocks include plagioclase and pyroxene. The composition of plagioclases have range from Ab₃₂, An₆₈ to Ab₅₈, An₄₂ and are andesine-labradorite type. Clinopyroxene and orthopyroxene have diopside-like augite and enstatite composition, respectively. The crystallization temperature for clinopyroxene and orthopyroxene were about 1175 and 1200 °C respectively and the pressure (for both types) was 2 to 5 kb. The geochemical data of whole rocks show that the andesitic lavas of Shourestan have high potassium calc-alkaline nature and the amount of Mg# in them varies from 40.97 to 60.97, which indicates the role of mantle components in their formation. These rocks show signs of differentiation including LREE/HREE ((La/Yb)_N) between 9.95 to 12.42, LREE/MREE ((La/Sm)_N) between 3.53 to 6.55, MREE/HREE ((Sm/Yb)_N) between 1.89 to 2.99. High ratios of Zr/Nb (9.81-22.10), Th/Nb (0.68-1.79), Th/Ta (7.29-24), and Nb/Ta (9.69-15.66) along with the pattern of LIL elements, support the possibility of different degrees of crustal contamination-assimilation of magma during its ascent to the earth's surface. The studied rocks have low ratios of Ce/Y (2.44-3.48), (Tb/Yb)_N (1.17-1.39), Sm/Yb (1.92-2.78), and relatively flat MREE-HREE pattern that confirms the melting of the subcontinental lithospheric mantle in the field of spinel stability and at a depth of fewer than 75 kilometers.

How to cite this article

Mohammadi, S.S., Chung, S.L., Nakhaei, M. and Islamipناه, A., 2022. Mineral chemistry, Thermobarometry, Geochemistry and tectonic setting of Tertiary andesitic lavas in the Shourestan area (west of Sarbisheh), Southern Khorasan. *Journal of Economic Geology*, 14(4): 175–213. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2023.80746.1065>



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Calc-alkaline magmas are commonly active in convergent plate margins and their petrogenesis is crucial for understanding the origin and evolution of the andesitic continental crust. The generation of calc-alkaline magmatic series in oceanic subduction zones has been primarily attributed to the partial melting of enriched mantle sources with the involvement of fluids and/or melts from the subducted oceanic lithosphere or the partial melting of metasomatized sub-continental lithospheric mantle that had been modified by previous plate subduction (Cheng et al., 2020). Andesite is the second most common volcanic rock type on earth and provides abundant information about the interaction between the mantle and crust in the subduction zones. However, the petrogenesis of subduction-related andesite is being debated, since andesite can form via different processes, such as (1) magma mixing between felsic and mafic/ultramafic melt; (2) fractional melting or assimilation fractional crystallization from basaltic composition; (3) partial melting of the hydrated mantle wedge peridotite (Li et al., 2013). Experimental investigation demonstrates that plagioclase and clinopyroxene composition can be used to estimate the P-T condition of volcanic rock crystallization. The chemical composition of pyroxene in volcanic rocks shows the nature of the host lava and is used to determine the magmatic series, tectonic environment, and origin of the igneous rock (Putirka, 2008).

In the Shourestan area, 14 kilometers west of Sarbisheh city in South Khorasan province, Eocene-Oligocene volcanic rocks with pyroxene-andesite composition are exposed. Based on the results of previous studies, the Tertiary lavas in the Sarbisheh area have calc-alkaline nature and are related to active continental margins (Mohammadi and Nakhaei, 2022). In this research, the chemical composition of minerals has been used to determine the nature of magma, tectonic setting and evaluation of the temperature and pressure conditions for the crystallization of andesitic lavas. Also, by using the geochemical data of the whole rock, the geochemical characteristics, tectonic setting, and origin of these rocks have been investigated.

Materials and Methods

Microprobe analysis of pyroxene and plagioclase minerals was done at the institute of Earth sciences in Academia Sinica, Taipei, Taiwan. A scanning electron microscope (JEOL SEM JSM-6360LV) was used to observe micro-scale texture. Identification of mineral phases was done by an energy dispersive spectrometer equipped with SEM, under the beam conditions of 15 kV, and 0.2 nA for the acceleration voltage, and beam current, respectively. Mineralogical investigation was carried out by an electron probe micro analyzer (JEOL EPMA JXA-8900R) equipped with four wave-length dispersive spectrometers. For geochemical investigations, 8 samples were analyzed in Acme laboratory in Canada by ICP method (for major elements) and ICP-MS (for trace and rare earth elements) and 3 samples in ZarAzma Company (Tehran, Iran) by alkaline melting method (for major elements) and ICP-MS (for trace and rare earth elements).

Results

The constituent minerals of these rocks include plagioclase and pyroxene. The composition of plagioclases changes from $Ab_{32}An_{68}$ to $Ab_{58}An_{42}$ and are andesine-labradorite type. Clinopyroxene and orthopyroxene have diopside-like augite and enstatite composition, respectively. The crystallization temperature for clinopyroxene and orthopyroxene were about 1175 and 1200 °C respectively and the pressure was 2 to 5 kb. The geochemical data of whole rocks show that the andesitic lavas of Shourestan have high potassium calc-alkaline nature and the amount of Mg# in them varies from 40.97 to 60.97, which indicates the role of mantle components in their formation. These rocks show signs of differentiation including LREE/HREE $((La/Yb)_N)$ from 9.95 to 12.42, LREE/MREE $((La/Sm)_N)$ from 3.53 to 6.55, MREE/HREE $((Sm/Yb)_N)$ from 1.89 to 2.99. High ratios of Zr/Nb (9.81-22.10), Th/Nb (0.68-1.79), Th/Ta (7.29-24), and Nb/Ta (9.69-15.66) along with the pattern of LIL elements, support the possibility of different degrees of crustal contamination-assimilation of magma during its ascent to the earth's surface. The studied rocks have low ratios of Ce/Y (2.44-3.48), $(Tb/Yb)_N$ (1.17-1.39), Sm/Yb (1.92-2.78), and relatively flat MREE-HREE pattern that confirms the melting of the subcontinental

lithospheric mantle in the field of spinel stability and at a depth of fewer than 75 kilometers.

Discussion

Petrographic studies show that the volcanic rocks of the Shourestan area have pyroxene-andesite composition. After plagioclase, pyroxene is the most abundant mineral in Shourestan andesitic lavas. The values of Mg# in clinopyroxene and orthopyroxene are 72-78 and 71-77, respectively. High values of Mg# in pyroxenes indicate the role of mantle components in the magma source. Based on the chemistry of clinopyroxene, andesitic lavas of the Shourestan area have sub-alkaline nature and are located in the field of volcanic arc basalts. The anorthite content of plagioclases in andesitic lavas of Shourestan (52-66%) and Mg# of clinopyroxenes (72-78) indicate the low amount of water during the formation of these minerals from primary magma. The formation temperature of investigated clinopyroxene and orthopyroxene was about 1200 °C and the calculated pressure at the time of their crystallization was determined 2 to 5 kb. The volcanic rocks of Shourestan were located in the range of andesite with high potassium calc-alkaline

nature. The amount of Mg# in these rocks varies from 40.97 to 60.97, which indicates the role of mantle components in their formation. The presence of negative Ti, Nb, and P anomalies in trace element diagrams of the studied samples, confirms the formation of these rocks in subduction zones. Relatively low values of Yb_N in the samples (8.42 to 10.05 ppm) indicate low amounts of garnet in the source. Geochemical characteristics of the Shourestan andesitic rocks such as K₂O/P₂O₅ ratio >2 along with high Al₂O₃ and Th enrichment can be related to crustal contamination or magma formation from a heterogeneous metasomatized mantle source. In addition, Th/Ta (7.29-24), Nb/Ta (9.69-15.66) and Ta/La (0.02-0.05) ratios also indicate different degrees of the crustal contamination-assimilation of magma during the ascent to the surface of the earth. Based on various element ratios, the Shourestan andesitic lavas originated from a subcontinental lithospheric mantle that evolved during subduction. The geochemical characteristics of the investigated rocks, such as the high ratio of LILE/HFSE and LREE/HREE, as well as the different tectonic discriminant diagrams, confirm active continental margin tectonic setting.



شیمی کانی‌ها، دما- فشارسنجی، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی گدازه‌های آندزیتی ترشیری منطقه شورستان (غرب سریشه)، خراسان جنوبی

سید سعید محمدی^{۱*}، سون لین چانگ^۲، ملیحه نخعی^۳، آرش اسلامی پناه^۴

^۱ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران؛ استاد، گروه پژوهشی علوم زمین، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۲ استاد، انستیتو علوم زمین، آکادمیا سینیکا، تایپه، تایوان؛ استاد، دپارتمان علوم زمین، دانشگاه ملی تایوان، تایپه، تایوان
^۳ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده عمران، معدن و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران
^۴ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳	در منطقه شورستان در ۱۴ کیلومتری غرب شهرستان سریشه در استان خراسان جنوبی، سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب پیروکسن آندزیت متعلق به ائوسن-الیگوسن برون‌زد دارند. کانی‌های سازنده این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز و پیروکسن هستند. گستره ترکیبی پلاژیوکلازها بین Ab_{32} تا An_{68} ، An_{42} تغییر کرده و از نوع آندزین تا لابرادوریت هستند. کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن به ترتیب دارای ترکیب اوژیت متمایل به دیوپسید و انستاتیت هستند. دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی، به ترتیب حدود ۱۱۷۵ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار در زمان تبلور آنها (هر دو نوع) ۲ تا ۵ کیلوبار تعیین شد. داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ کل نشان می‌دهد که گدازه‌های آندزیتی شورستان دارای ماهیت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا بوده و میزان $Mg\#$ در آنها از ۴۰/۹۷ تا ۶۰/۹۷ متغیر است که بیانگر نقش اجزای گوشته در تشکیل آنهاست. این سنگ‌ها نشانه‌های تفریق شامل نسبت $LREE/HREE$ (La/Yb_N) بین ۹/۹۵ تا ۱۲/۴۲، $LREE/MREE$ (La/Sm_N) بین ۳/۵۳ تا ۶/۵۵ و نسبت $MREE/HREE$ (Sm/Yb_N) بین ۱/۸۹ تا ۲/۹۹ را نشان می‌دهند. نسبت‌های بالای Zr/Nb (۹/۲۲ تا ۸۱/۱۰)، Th/Nb (۰/۱ تا ۶۸/۷۹)، Th/Ta (۷ تا ۲۴/۲۹) و Nb/Ta (۹/۱۵ تا ۶۹/۶۶) همراه الگوی عناصر LIL، احتمال درجات مختلف آلودگی - هضم پوسته‌ای ماگما در هنگام صعود به سطح زمین را تقویت می‌کند. سنگ‌های بررسی شده دارای نسبت‌های پایین Ce/Y (۲/۳ تا ۴۴/۴۸)، $(Tb/Yb)_N$ (۱/۱ تا ۱۷/۳۹)، Sm/Yb (۱/۲ تا ۹۲/۷۸) و الگوی نسبتا تخت MREE-HREE هستند که ذوب گوشته لیتوسفری زیرقاره‌ای در قلمرو پایداری اسپنل و در عمق کمتر از ۷۵ کیلومتر را تأیید می‌کند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹	
واژه‌های کلیدی	
پیروکسن آندزیت	
دما- فشارسنجی	
اسپنل لزوولیت	
گوشته لیتوسفری	
شورستان	
حاشیه فعال قاره‌ای	
لوت	
نویسنده مسئول	
سید سعید محمدی	
ssmohammadi@birjand.ac.ir	

استناد به این مقاله

محمدی، سید سعید؛ چانگ، سون لین؛ نخعی، ملیحه و اسلامی پناه، آرش، ۱۴۰۱. شیمی کانی‌ها، دما- فشارسنجی، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی گدازه‌های آندزیتی ترشیری منطقه شورستان (غرب سریشه)، خراسان جنوبی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۴): ۱۷۵-۲۱۳.

مقدمه

آندزیت از نظر فراوانی، دومین نوع سنگ آتشفشانی روی زمین است و اطلاعات زیادی را درباره برهم کنش بین گهشته و پوسته در مناطق فرورانش اثبات می‌کند (Grove and Kinzler, 1986). با این وجود، پتروژن آندزیت‌های وابسته به فرورانش همچنان مورد بحث است (Reubi and Blundy, 2009; Li et al., 2013). زیرا آندزیت می‌تواند در اثر فرایندهای مختلف مانند: ۱- اختلاط ماگمایی بین مذاب‌های فلسیک و مافیک/ اولترامافیک (Streck et al., 2007; Reubi and Blundy, 2009; Li et al., 2013); ۲- ذوب بخشی یا هضم تبلور تفریقی از ترکیب‌های بازیک (Tiepolo et al., 2011) و ۳- ذوب بخشی پریدوتیت گوه گهشته‌ای آبدار (Kelemen, 1995) پدید آید. آندزیت‌ها و مجموعه‌های آتشفشانی بازالت- داسیت- ریولیت همراه، اطلاعات ارزشمندی در مورد بازسازی زمین ساخت قدیمی و جغرافیای دیرینه در کوه‌زاده‌های قدیمی که مراحل دگرشکلی متعدد را تحمل کرده‌اند، ارائه می‌کند (Bailey, 1981).

منطقه شورستان در ۱۴ کیلومتری غرب سریشه در استان خراسان جنوبی، بین طول‌های جغرافیایی $37^{\circ} 59'$ تا $42^{\circ} 59'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ} 32'$ تا $33^{\circ} 32'$ قرار دارد. دسترسی به محدوده مورد بررسی از دو مسیر شامل جاده سریشه- برکوه- شورستان و جاده بیرجند- مود- سه راهی پخت- گورید بالا- شورستان امکان پذیر است. این منطقه در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سریشه (Nazari and salamati, 1999) و از نظر تقسیم‌بندی ساختاری ایران در حاشیه شرقی بلوک لوت قرار دارد. در این محدوده، سنگ‌های گدازه‌ای و آذرآواری با گستره قابل ملاحظه‌ای رخنمون دارند. فعالیت ماگمایی در بلوک لوت در ژوراسیک میانی (۱۶۲ تا ۱۶۵ میلیون سال) شروع شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است؛ به طوری که ضخامت واحدهای ترشیری به خصوص ائوسن به ۲۰۰۰ متر می‌رسد و در اثر فرورانش، پیش از برخورد صفحه‌های عربی و آسیا تشکیل شده است (Karimpour et al., 2011). منطقه مورد بررسی، بخشی

از قسمت شمالی زمین درز سیستان در شرق ایران است. زون جوش خورده سیستان به عنوان بقایایی از یک سنگ کره اقیانوسی است که بین بلوک افغان و پهنه لوت وجود داشته است. این باریکه اقیانوسی به عنوان یکی از سرشاخه‌های نئوتتیس مطرح بوده که در ۸۶ میلیون سال قبل تحت رژیم زمین ساختی فشارشی شروع به بسته شدن کرده و از ۵۶ میلیون سال قبل، این رژیم زمین ساختی فشارشی به رژیم کششی تغییر یافته است که سرانجام به بروز آتشفشان عظیم در شرق ایران منجر شده است (Tirrul et al., 1983). سنگ‌های آتشفشانی ترشیری در برخی مناطق اطراف سریشه توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Nazari, 2011; Mohammadi, 2012; Pang et al., 2013; Goodarzi et al., 2014; Chahkandinejad, 2015; Malekian Dastjerdi et al., 2017; Mohammadi et al., 2017; Islamipناه, 2018; Mohammadi et al., 2021; Mohammadi and Nakhaei, 2022). گدازه‌های آندزیتی منطقه شورستان تاکنون مورد بررسی دقیق کانی شناسی و پترولوژیکی قرار نگرفته است. هدف این پژوهش، بررسی شیمی کانی‌ها، سنگ نگاری، زمین شیمی و موقعیت تکتونوماگمایی تشکیل آنهاست که این امر به تکمیل نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین و همچنین، شناخت ماهیت ماگماتیسزم شرق ایران کمک خواهد کرد. در این پژوهش، از ترکیب شیمیایی کانی‌ها برای تعیین ماهیت ماگما، موقعیت زمین ساختی و ارزیابی شرایط دما و فشار تبلور گدازه‌های آندزیتی شورستان استفاده شده است. با استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز می‌توان به شرایط دما و فشار تشکیل سنگ‌ها و کانی‌های تشکیل دهنده آنها پی برد (France et al., 2010). پیروکسن یکی از کانی‌های سنگ‌ساز است که ترکیب شیمیایی آن در سنگ‌های آتشفشانی، ماهیت گدازه میزبان را نشان داده و با بررسی شیمی این کانی، می‌توان سری ماگمایی، محیط زمین ساختی و منشأ توده آذرین را تعیین کرد. علاوه بر این، با استفاده از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، تعیین دما و فشار تبلور در سنگ‌های آتشفشانی امکان پذیر است (Putirka, 2008);

محدوده مورد بررسی، تناوبی از توف‌های ماسه‌ای مارنی زرد مایل به سبز، به شدت برش خورده (شکل ۲-۲) و دگرسان وجود دارد. این واحد آذرآواری در افق‌های بالاتر به توف‌های سفید رنگ و داسیتی تبدیل می‌شود. بالاترین بخش این مجموعه آذرآواری، توف سنگی است که در زیر گدازه‌های آندزیتی جای گرفته است. عملکرد گسل‌ها در منطقه سبب خردشدگی توف‌ها و در برخی موارد دگرسانی آنها به کانی‌های رسی از جمله بنتونیت شده است (شکل ۲-۲). واحدهای گدازه‌ای (Eo^{ap}) با گسترش زیاد و ترکیب کلی آندزیتی به رنگ خاکستری روشن (شکل ۲-۲) و تیره به صورت توده‌های گنبدی شکل (شکل ۲-۲) و به هم پیوسته رخنمون دارد. این گدازه‌ها که دارای بافت پورفیری با زمینه ریزدانه و در برگیرنده درشت بلورهای پلاژیو کلاز و پیروکسن هستند، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. رخنمون‌های محدودی از کنگلومرا (Q^{co}) در بخش‌های شمالی محدوده مورد بررسی وجود دارد که قطعه‌های تشکیل دهنده آن، اغلب از سنگ‌های آتشفشانی مانند آندزیت-بازالت هستند.

روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش، پس از پیمایش‌های صحرایی و نمونه‌برداری، تعداد ۶۵ مقطع نازک تهیه و بررسی شد. برای بررسی شیمی کانی‌های پیروکسن و پلاژیو کلاز در گدازه‌های آندزیتی، مقاطع نازک صیقلی تهیه و سپس تجزیه ریزپردازشی الکترونی کانی‌ها در انستیتو علوم زمین آکادمی سینیکا در شهر تایپه کشور تایوان انجام شد. شناسایی فازهای کانی‌ها با کمک طیف‌سنج پراکنده انرژی (EDS: Oxford Instruments Ltd.)، Xmax-50 with INCA-350 مجهز به SEM تحت شرایط پرتو ۱۵ کیلوولت و ۰/۲ نانومپرا انجام شد. تجزیه ریزپردازشی الکترونی کانی‌های پلاژیو کلاز (۵۳ نقطه) و پیروکسن (۲۸ نقطه) توسط دستگاه مدل JEOL EPMA JXA-8900R مجهز به چهار طیف‌سنج با طول موج انتشاری، با شتاب دهنده‌ای با ولتاژ ۱۵ کیلوولت و جریان پرتوی ۰/۲ نانومپرا انجام شد.

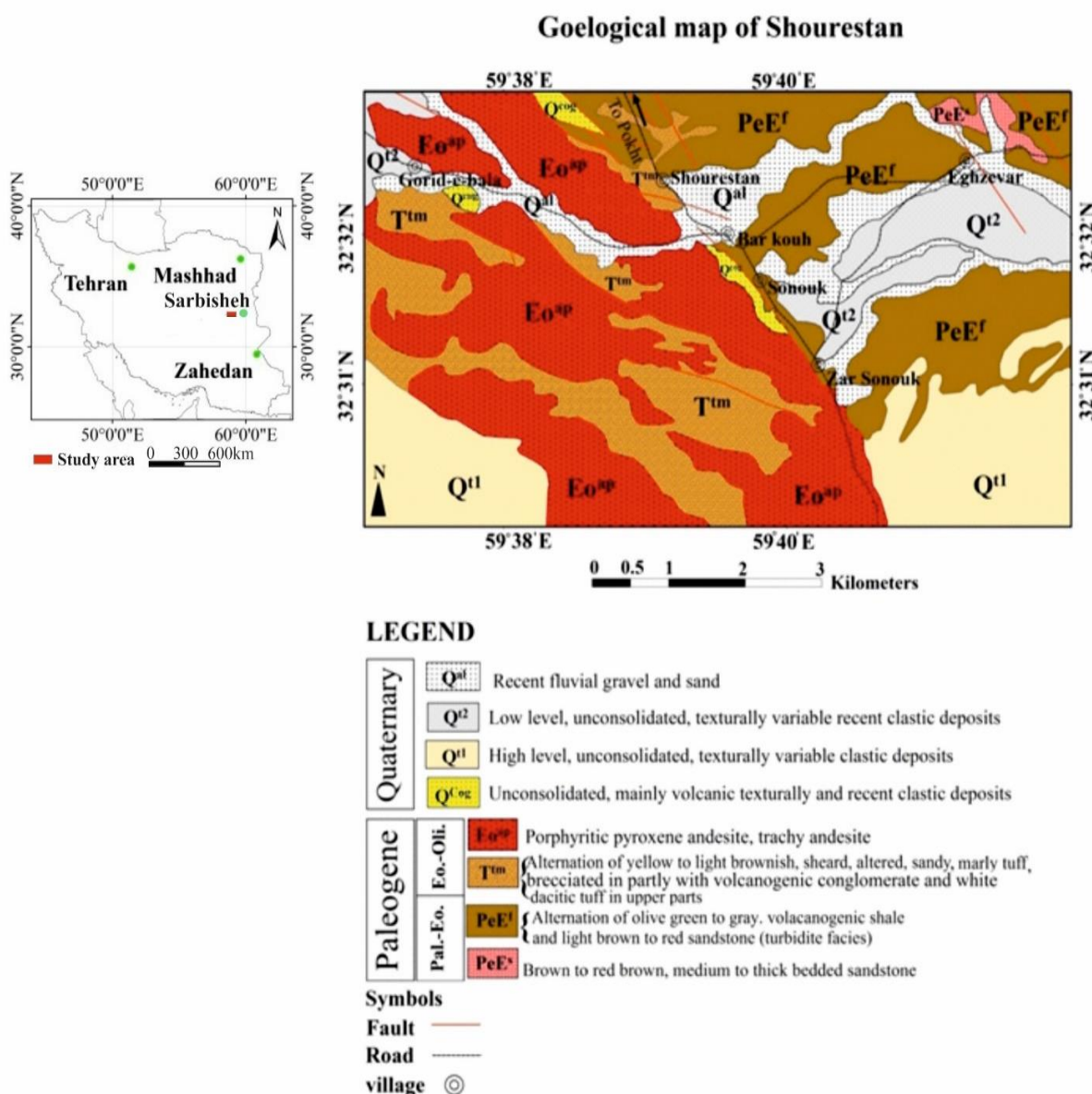
Ridolfi et al., 2010; Neave and Putirka, 2017; Cheng et al., 2020; Namnabat et al., 2021). در این پژوهش، علاوه بر بررسی ترکیب شیمیایی کانی‌ها، با بهره‌گیری از داده‌های زمین‌شیمیایی سنگ کل نیز به بررسی ماهیت ماگمای سازنده، جایگاه زمین‌ساختی و منشأ این سنگ‌ها پرداخته شده است.

زمین‌شناسی منطقه

بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سریشه (Nazari and Salamati, 1999) و بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام‌شده در این پژوهش، واحدهای سنگی منطقه از قدیم به جدید شامل نهشته‌های توریدایتی سبز و خاکستری زیتونی، تناوب شیل‌های سبز تیره تا خاکستری و ماسه‌سنگ قهوه‌ای (پالئوسن)، توف‌های اسیدی (ائوسن)، پیروکسن آندزیت تا تراکی آندزیت (ائوسن-لیگوسن)، کنگلومرا (پلیوسن)، نهشته‌های آبرفتی و آواری و مخروط‌افکنه‌ها هستند (شکل ۱). بخش وسیعی از محدوده مورد بررسی در برگیرنده نهشته‌های توریدایتی نازک لایه سبز و خاکستری زیتونی رنگ است که از تناوب شیل‌های سبز تیره تا خاکستری مایل به سبز آتشفشان‌زادی و ماسه‌سنگ‌های متوسط تا ضخیم لایه با رنگ قهوه‌ای و قهوه‌ای مایل به سبز تشکیل شده است (PeE^f). بخش قابل توجهی از توریدایت‌های پالئوژن در منطقه مورد بررسی، در برگیرنده ماسه‌سنگ‌های قهوه‌ای (شکل ۲-۲) تا قهوه‌ای مایل به قرمز است (PeE^s) که از ماسه‌سنگ‌های بسیار دانه ریز تا دانه درشت متغیر است. سنگ‌های یاد شده به دلیل همسانی با نهشته‌های مشابه در مناطق مجاور در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (Ohanian and Tatavosian, 1978) به پالئوسن-ائوسن نسبت داده شده‌اند (Nazari and Salamati, 1999). در زمان ائوسن پایانی-لیگوسن، افزایش تکاپوهای آتشفشانی با رخساره‌هایی متناوب از سنگ‌های آذرآواری (Ttm) و گدازه شامل توف، آگلومرا، آندزیت و دیگر سنگ‌های وابسته در گستره وسیعی از محدوده مورد بررسی رخنمون یافته است (شکل ۲-۲). در بخش غربی

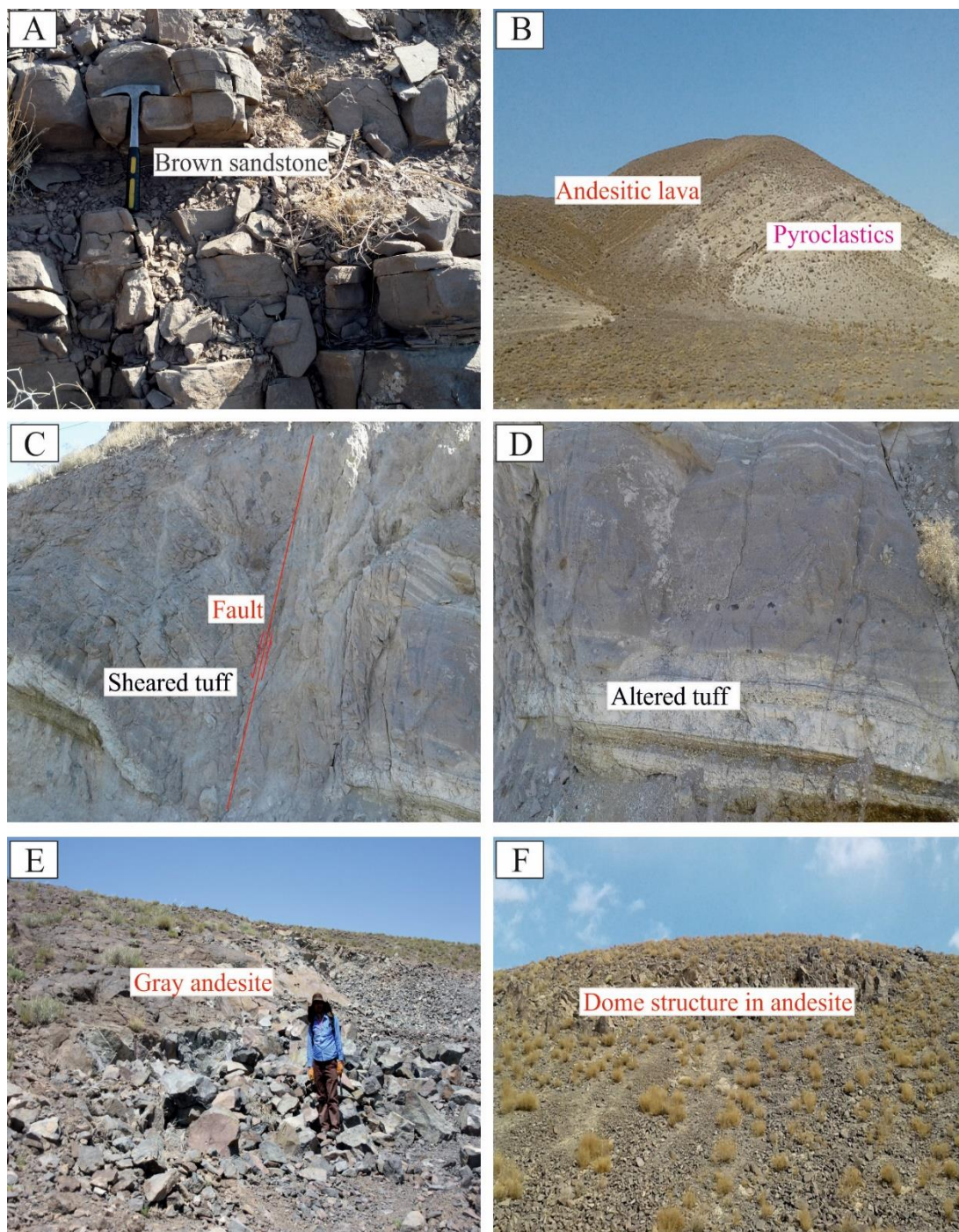
عناصر اصلی (کد AF-01) و ICP-MS (برای عناصر کمیاب و خاکی نادر) (کد MMS-01) تجزیه شدند. پس از آن، نمودارهای لازم با استفاده از نرم افزارهای Minpet، GCDkit و Corel Draw ترسیم شدند.

برای بررسی های زمین شیمیایی، تعداد ۸ نمونه مناسب در آزمایشگاه Acme کانادا به روش ICP (برای عناصر اصلی) و ICP-MS (برای عناصر کمیاب و خاکی نادر) و ۳ نمونه در شرکت زرآزما به روش ذوب قلیایی برای



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین شناسی منطقه شورستان با اصلاحات و ترسیم دوباره بر اساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سریشه (Nazari and Salamati, 1999)

Fig. 1. Geographical location and geological map of the Shourestan area, modified and redrawn based on 1:100000 geological map of Sarbisheh (Nazari and Salamati, 1999)



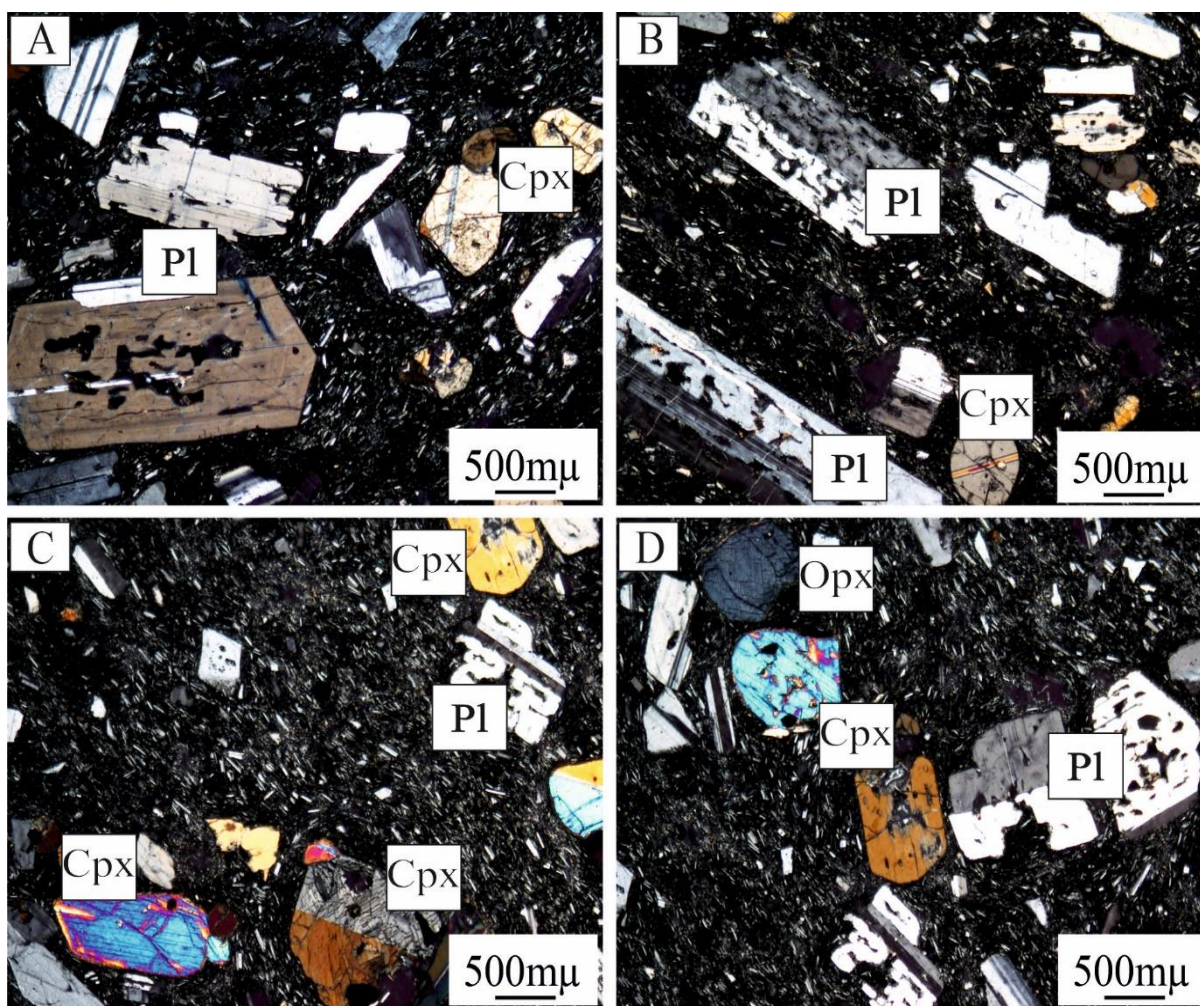
شکل ۲. تصویرهای صحرایی از واحدهای سنگی در منطقه شورستان A: ماسه‌سنگ قهوه‌ای، B: واحدهای آذرآواری در زیر گدازه‌ها (دید به شمال غرب)، C: توف‌های برش خورده (دید به جنوب غرب)، D: دگرسانی توف‌ها به بنتونیت (دید به جنوب غرب)، E: نمونه‌های تازه آندزیت به رنگ خاکستری (دید به شمال) و F: ساختار گنبدی آندزیت (دید به شمال)

Fig. 2. Field images of rock units in the Shourestan area. A: Brown sandstone, B: Pyroclastic units under the lavas (view to the northwest), C: Sheared tuffs (view to the southwest), D: Alteration of tuffs to bentonite (view to the southwest), E: Fresh samples of andesite in gray, and F: Dome structure of andesite (view to the north).

سنگ نگاری

حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. پلاژیو کلاز فراوان ترین کانی موجود در آندزیت‌های شورستان است که فنوکریست‌های شکل دار، نیمه شکل دار و بی شکل آن (شکل ۳-A تا D) حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده است.

سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده دارای بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی (شکل ۳-A تا D) و گاهی گلوپورفیری هستند. کانی‌های سازنده این سنگ‌ها شامل پلاژیو کلاز و پیروکسن هستند که به صورت فنوکریست و همچنین بلورهای ریز در زمینه سنگ حضور دارند. فنوکریست‌ها حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد حجمی و زمینه



شکل ۳. ویژگی‌های میکروسکوپی پیروکسن آندزیت‌های منطقه شورستان. A تا D: بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی، A، B و D: حضور فنوکریست‌های پلاژیو کلاز دارای منطقه بندی و بافت غربالی، A تا D: حضور کلینوپیروکسن و D: ارتوپیروکسن. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوئرز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpx: کلینوپیروکسن، Opx: ارتوپیروکسن، Pl: پلاژیو کلاز).

Fig. 3. Microscopic characteristics of pyroxene andesites in the Shourestan area. A to D: Porphyritic texture with microlitic groundmass, A, B and D: Plagioclase phenocrysts with zoning and sieve texture, A to D: Clinopyroxene, and D: Orthopyroxene. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cpx: Clinopyroxene, Opx: Orthopyroxene, Pl: Plagioclase).

ترکیب اعضای انتهایی کلینوپیروکسن ها و ارتوپیروکسن ها در آندزیت های شورستان به ترتیب برابر با $En_{42-46}Fs_{13-16}Wo_{41-43}$ و CaO و Al_2O_3 است. میزان تغییرات $En_{69-74}Fs_{23-28}Wo_{0-3}$ در کلینوپیروکسن ها به ترتیب $۲/۷۳$ تا $۳/۲۳$ و $۱۹/۳۴$ تا $۲۰/۴۲$ درصد وزنی است که تغییرات اندکی را نشان می دهد.

در نمودار $Q-J$ که بر اساس دو شاخص $Q = Ca + Mg + Fe^{+2}$ و $J = 2Na$ معرفی شده است (Morimoto et al., 1988)، پیروکسن های مورد بررسی در محدوده پیروکسن های کلسیم- منیزیم - آهن دار (Quad) قرار می گیرند (شکل ۵-A و B). از این رو، برای شناسایی نوع پیروکسن ها، از نمودار مثلثی Wo-En-Fs (Morimoto et al., 1988; Morimoto et al., 1989) استفاده شد. در این نمودار، کلینوپیروکسن های مورد بررسی، ترکیب اوژیت متمایل به دیوپسید و ارتوپیروکسن ها ترکیب انستاتیت را نشان می دهند (شکل ۵-C و D). مقادیر $Mg\#$ ، $[Mg\# = 100Mg/(Mg+Fe)]$ در کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن های بررسی شده به ترتیب بین ۷۲ تا ۷۸ و ۷۱ تا ۷۷ متغیر است. مقادیر بالای $Mg\#$ در پیروکسن ها بیانگر مشارکت اجزای گوشته در ناحیه منشأ ماگماست (Li et al., 2013). بررسی میزان MgO و FeO در برخی بلورهای کلینوپیروکسن نشان دهنده تغییرات جزئی مقدار این عناصر در بلور (حاشیه- مرکز - حاشیه) و وجود منطقه بندی ترکیبی است (شکل ۶-A و B) که می تواند به عنوان شواهد عدم تعادل در حین تبلور مطرح باشد (Yücel et al., 2014).

زمین شیمی

نتایج تجزیه شیمیایی نمونه های منطقه شورستان در جدول ۴ آمده است. میزان SiO_2 در این سنگ ها از $۵۷/۶۵$ تا $۶۲/۴۱$ درصد، Na_2O از $۳/۰۱$ تا $۴/۰۱$ درصد، K_2O از $۱/۹۳$ تا $۳/۲۹$ درصد، Fe_2O_3 از $۴/۲۶$ تا $۶/۸۳$ درصد، MgO از $۲/۲۶$ تا $۳/۶۷$ درصد، Al_2O_3 بین $۱۵/۴۵$ تا $۱۶/۹۷$ درصد، TiO_2 بین $۰/۶۲$ تا $۰/۸۸$ درصد، CaO بین $۴/۶۰$ تا $۶/۶۷$ درصد و P_2O_5 بین $۰/۲۷$ تا $۰/۳۳$ متغیر است (جدول ۴).

اندازه فنوکریست های پلاژیوکلاز از $۰/۳$ تا ۴ میلی متر متغیر و ترکیب آنها بر مبنای زاویه خاموشی (۲۴ تا ۲۹ درجه)، آندزین تا لابرادوریت است. برخی فنوکریست های پلاژیوکلاز دارای منطقه بندی و بافت غربالی (شکل ۳-A، B و D) بوده و گاهی در حاشیه آنها آثار خوردگی، گردشدگی و حاشیه واجذبی دیده می شود. کلینوپیروکسن به صورت بلورهای نیمه شکل دار تا بی شکل (شکل ۳-B، C و D) با حاشیه خلیجی (شکل ۳-D) تا ۵ تا ۱۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. کلینوپیروکسن در سنگ های آتشفشانی بررسی شده، انواع مختلفی از بافت های عدم تعادل شامل بلورهای گرد شده (شکل ۳-B) با حاشیه خلیجی (شکل ۳-D) را نشان می دهد. فنوکریست های بی شکل ارتوپیروکسن (شکل ۳-D) به مقدار کم (حدود ۵ درصد حجمی) وجود دارد. کانی کدر و سائیدین، کانی های فرعی سنگ هستند. بر پایه ویژگی های بافتی و کانی شناسی، ترکیب سنگ های آتشفشانی منطقه شورستان، پیروکسن آندزیت است. حضور درشت بلورهای شکل دار پلاژیوکلاز و پیروکسن های نیمه شکل دار تا بی شکل در سنگ های بررسی شده، نشان می دهد که تبلور با پلاژیوکلازها شروع شده و سپس با تغییر شرایط، پیروکسن ها متبلور شده اند.

شیمی کانی ها

پلاژیوکلاز

نتایج تجزیه ریزپردازشی الکترونی تعدادی از نقاط کانی پلاژیوکلاز به همراه محاسبه فرمول ساختاری آنها در جدول ۱ آورده شده است. گستره ترکیبی این کانی از $An_{68}Ab_{32}$ تا $An_{42}Ab_{58}$ تغییر می کند و از نوع آندزین تا لابرادوریت است (شکل ۴).

شیمی پیروکسن

پیروکسن پس از پلاژیوکلاز، فراوان ترین کانی در گدازه های آندزیتی شورستان است. نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی نقاط برگزیده از پیروکسن های مورد بررسی و محاسبه فرمول ساختاری آنها در جدول ۲ و جدول ۳ آمده است. مطابق این جدول ها،

جدول ۱. نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی نقاط برگزیده از پلاژیوکلازها در گدازه های آندزیتی شورستان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر مبنای ۸ اتم اکسیژن

Table 1. EPMA results of representative plagioclases from the Shourestan andesitic lavas with structural formula recalculation based on 8 oxygen atoms.

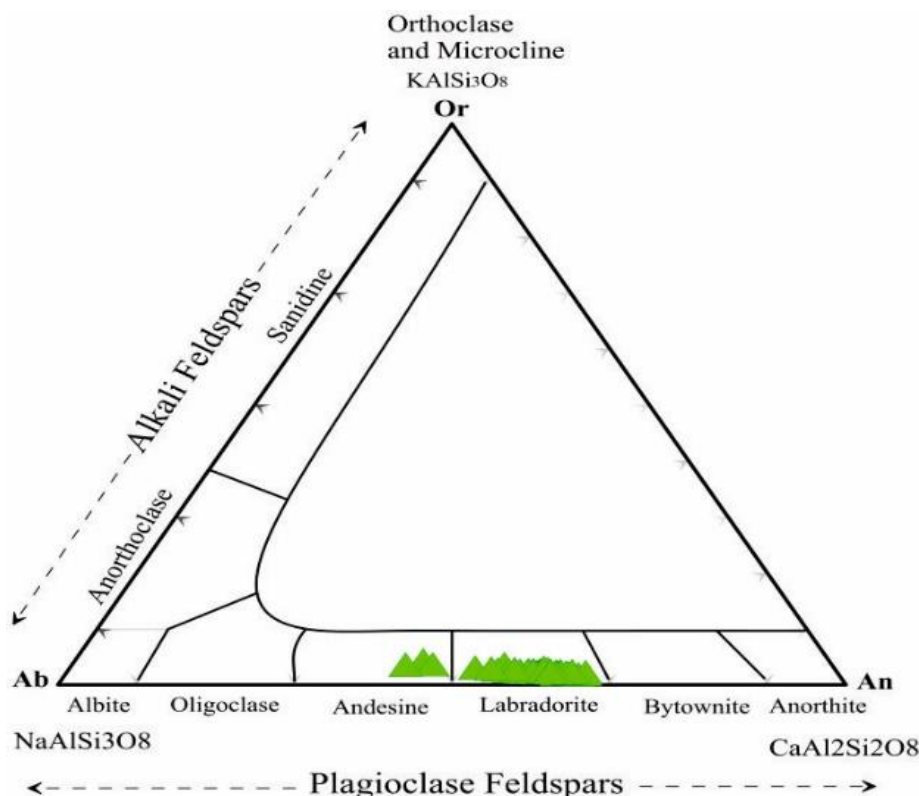
Sample	16-10-1	16-10-5	16-10-6	16-10-7	16-10-8	16-10-12	16-10-14	16-10-15	16-10-16
SiO₂	54.01	52.11	51.14	51.98	52.46	53.00	57.12	53.82	54.68
TiO₂	0.02	0.05	0.09	0.06	0.03	0.15	0.14	0.18	0.03
Al₂O₃	29.27	30.26	30.42	29.94	29.60	28.71	26.70	28.00	28.74
Cr₂O₃	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
FeO	0.41	0.30	0.33	0.26	0.27	0.71	0.87	1.25	0.28
MnO	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
MgO	0.05	0.07	0.15	0.06	0.06	0.06	0.03	0.33	0.08
CaO	12.01	12.66	13.15	12.73	12.07	11.34	8.57	11.14	10.46
Na₂O	4.44	4.02	3.70	3.70	4.29	5.01	5.51	4.67	5.12
K₂O	0.32	0.24	0.19	0.27	0.26	0.36	0.59	0.51	0.40
Total	100.53	99.71	99.20	99.05	99.04	99.32	99.53	99.95	99.79
Si	2.43	2.37	2.34	2.38	2.40	2.42	2.58	2.45	2.47
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Al	1.55	1.62	1.64	1.62	1.60	1.55	1.42	1.50	1.53
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe⁺⁺	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.05	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
Ca	0.58	0.62	0.65	0.62	0.59	0.56	0.41	0.54	0.51
Na	0.39	0.35	0.33	0.33	0.38	0.44	0.48	0.41	0.45
K	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
Total	4.99	5.00	5.00	4.98	5.00	5.03	4.97	5.01	5.00
X_{Ab}: Na/(Na+K+Ca)	0.39	0.36	0.33	0.34	0.39	0.44	0.52	0.42	0.46
X_{Or}: K/(Na+K+Ca)	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02
X_{An}: Ca/(Na+K+Ca)	0.59	0.63	0.66	0.64	0.60	0.54	0.45	0.55	0.52

ادامه جدول ۱. نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی نقاط برگزیده از پلاژیو کلازها در گدازه های آندزیتی شورستان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر

مبنای ۸ اتم اکسیژن

Table 1 (Continued). EPMA results of representative plagioclases from the Shourestan andesitic lavas with structural formula recalculation based on 8 oxygen atoms.

Sample	16-10-17	16-10-18	16-10-20	16-10-23	16-10-24	16-10-26	16-10-27	16-10-28	16-10-31
SiO ₂	53.16	52.43	53.79	53.33	52.19	55.61	51.16	52.05	51.84
TiO ₂	0.02	0.07	0.04	0.03	0.07	0.19	0.06	0.06	0.10
Al ₂ O ₃	29.79	29.62	28.60	29.51	30.38	26.97	30.52	29.95	30.65
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00
FeO	0.26	0.34	0.33	0.27	0.29	0.94	0.33	0.34	0.41
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00
MgO	0.06	0.03	0.09	0.07	0.06	0.03	0.03	0.10	0.05
CaO	12.21	12.07	11.23	12.04	12.45	9.48	13.15	12.54	12.69
Na ₂ O	4.28	4.35	4.89	4.48	4.12	5.79	3.84	3.97	3.94
K ₂ O	0.25	0.32	0.34	0.27	0.26	0.51	0.56	0.26	0.29
Total	100.03	99.22	99.31	99.99	99.81	99.61	99.39	99.27	99.97
Si	2.41	2.40	2.45	2.42	2.37	2.52	2.34	2.38	2.36
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Al	1.59	1.60	1.54	1.58	1.63	1.44	1.65	1.61	1.64
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ⁺⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.02
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Ca	0.59	0.59	0.55	0.58	0.61	0.46	0.65	0.61	0.62
Na	0.38	0.39	0.43	0.39	0.36	0.51	0.34	0.35	0.35
K	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Total	4.99	5.01	5.01	5.00	5.00	5.02	5.01	5.00	5.00
X _{Ab} : Na/(Na+K+Ca)	0.38	0.39	0.43	0.40	0.37	0.51	0.34	0.36	0.35
X _{Or} : K/(Na+K+Ca)	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
X _{An} : Ca/(Na+K+Ca)	0.60	0.59	0.55	0.59	0.62	0.46	0.64	0.63	0.63



شکل ۴. ترکیب پلاژیوکلازهای بررسی شده منطقه شورستان در نمودار تقسیم‌بندی فلدسپارها (Deer et al., 1991)

Fig. 4. The composition of the investigated plagioclases of the Shourestan area in the classification diagram of feldspars (Deer et al., 1991)

بی‌هنجاری مثبت عناصر ناسازگار بزرگ یون برای عناصری مانند Cs، Rb، Th، U، K و بی‌هنجاری منفی عناصر Nb، Ti و تا حدودی P دیده می‌شود (شکل ۸-A). میزان کل عناصر نادر خاکی در گدازه‌های شورستان ۱۲۶/۳۲ تا ۱۴۵/۰۱ ppm بوده و الگوی یکنواخت با غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE نشان می‌دهند (شکل ۸-B). این سنگ‌ها نشانه‌های تفریق شامل نسبت LREE/HREE ((La/Yb)_N) بین ۹/۹۵ تا ۱۲/۴۲، LREE/MREE ((La/Sm)_N) بین ۳/۵۳ تا ۶/۵۵، نسبت MREE/HREE ((Sm/Yb)_N) بین ۱/۸۹ تا ۲/۹۹، ((Gd/Yb)_N) بین ۱/۴۴ تا ۱/۸۴ و Dy/Yb بین ۱/۵۶ تا ۲/۴۰ نشان می‌دهند که بیانگر غنی‌شدگی LREE است.

برای نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی شورستان از نمودار مجموع آلکالن در مقابل سیلیس (Cox et al., 1979) استفاده شد. بر اساس این نمودار، نمونه‌ها در محدوده آندزیت قرار گرفتند (شکل ۷-A) که با نام‌گذاری این سنگ‌ها بر اساس سنگ‌نگاری مطابقت دارد. بر پایه نمودارهای ارائه‌شده توسط پکسریلو و تایلور (Peccerillo and Taylor, 1976) و لومتر (Le Maitre, 2002) نیز سنگ‌های آتشفشانی شورستان در محدوده آندزیت واقع شدند (شکل ۷-B). نمودارهای عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و عناصر خاکی نادر بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) برای نمونه‌های منطقه شورستان به ترتیب در شکل ۸-A و B نشان داده شده است. در نمودار چند عنصری بهنجار شده با گوشته اولیه،

جدول ۲. نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گدازه‌های آندزیتی شورستان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن

Table 2. EPMA results of clinopyroxenes from the Shourestan andesitic lavas with structural formula recalculation based on 6 oxygen atoms

Sample	16-10-39	16-10-40	16-10-41	16-10-42	16-10-43	16-10-44	16-10-45	16-10-51	16-10-52
SiO₂	51.26	51.56	52.27	51.49	51.56	50.19	51.70	50.81	51.05
TiO₂	1.03	0.98	0.71	0.74	0.87	0.96	0.86	0.87	0.98
Al₂O₃	2.99	2.77	2.73	2.93	2.88	3.72	2.93	2.97	2.78
Cr₂O₃	0.06	0.00	0.00	0.04	0.00	0.05	0.03	0.03	0.00
FeO	8.38	7.77	9.04	8.64	9.78	8.93	7.90	7.85	7.97
MnO	0.20	0.18	0.26	0.11	0.19	0.22	0.18	0.14	0.18
MgO	15.54	15.42	15.03	15.15	14.02	15.28	15.37	16.02	15.95
CaO	19.79	20.34	19.58	19.91	19.34	19.56	20.34	20.17	19.85
Na₂O	0.29	0.30	0.37	0.32	0.42	0.44	0.33	0.32	0.30
K₂O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	99.53	99.32	99.99	99.34	99.10	99.34	99.68	99.20	99.07
Si	1.91	1.92	1.94	1.92	1.92	1.89	1.92	1.90	1.91
Ti	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
Al	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.16	0.13	0.13	0.12
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe²⁺	0.26	0.24	0.28	0.27	0.31	0.28	0.24	0.25	0.25
Mn	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Mg	0.85	0.86	0.83	0.84	0.78	0.85	0.85	0.89	0.89
Ca	0.79	0.81	0.78	0.80	0.78	0.78	0.81	0.81	0.79
Na	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Mg#: Mg/(Mg+Fe²⁺)	0.77	0.78	0.75	0.76	0.72	0.75	0.78	0.78	0.78
Fe²⁺/(Fe^{tot})	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
En	0.45	0.45	0.44	0.44	0.42	0.44	0.45	0.46	0.46
Fs	0.14	0.13	0.15	0.14	0.16	0.15	0.13	0.13	0.13
Wo	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.43	0.42	0.41
Jd	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Ac	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aug	0.98	0.98	0.97	0.98	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98
X_{PT}	37.94	38.13	38.38	38.02	37.85	37.09	38.14	37.83	37.93
Y_{PT}	-27.92	-28.23	-27.87	-27.90	-26.79	-27.47	-28.34	-28.34	-28.17
F1	-0.83	-0.83	-0.82	-0.82	-0.84	-0.82	-0.83	-0.81	-0.82
F2	-2.49	-2.48	-2.51	-2.46	-2.49	-2.45	-2.48	-2.44	-2.46

ادامه جدول ۲. نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی کلینوپیروکسن‌های مورد بررسی در گدازه‌های آندزیتی شورستان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن

Table 2 (Continued). EPMA results of clinopyroxenes from the Shourestan andesitic lavas with structural formula recalculation based on 6 oxygen atoms

Sample	16-10-54	16-10-55	16-10-56	16-10-57	16-10-58	16-10-59	16-10-60	16-10-61
SiO ₂	50.88	51.57	50.54	51.54	50.60	51.01	51.22	51.36
TiO ₂	1.03	0.94	0.84	0.96	0.99	1.02	0.98	0.99
Al ₂ O ₃	2.74	2.83	3.08	2.88	3.23	2.98	3.02	3.09
Cr ₂ O ₃	0.09	0.02	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.05
FeO	7.97	8.00	8.86	8.22	8.52	8.28	7.91	7.90
MnO	0.15	0.17	0.26	0.17	0.19	0.17	0.18	0.19
MgO	15.71	16.13	15.34	15.15	15.69	15.79	15.67	15.61
CaO	20.41	19.68	19.89	20.42	20.17	20.38	20.33	19.76
Na ₂ O	0.33	0.35	0.43	0.36	0.42	0.34	0.36	0.32
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Total	99.30	99.69	99.27	99.75	99.84	99.98	99.67	99.27
Si	1.90	1.91	1.89	1.91	1.88	1.89	1.90	1.91
Ti	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Al	0.12	0.12	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.25	0.25	0.28	0.26	0.27	0.26	0.25	0.25
Mn	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.85	0.87	0.85	0.81	0.86	0.84	0.85	0.85
Ca	0.82	0.78	0.80	0.81	0.80	0.81	0.81	0.79
Na	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Mg#: Mg/(Mg+Fe ²⁺)	0.78	0.78	0.76	0.77	0.77	0.77	0.78	0.78
Fe ²⁺ /(Fe ^{tot})	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
En	0.45	0.46	0.44	0.44	0.45	0.45	0.45	0.46
Fs	0.13	0.13	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13
Wo	0.42	0.41	0.41	0.43	0.41	0.42	0.42	0.41
Jd	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
Ac	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aug	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.98	0.97	0.98
X _{PT}	38.03	38.11	37.63	38.16	37.75	38.10	37.97	37.77
Y _{PT}	-28.05	-28.46	-27.55	-28.01	-27.90	-28.11	-28.27	-28.21
F1	-0.83	-0.82	-0.82	-0.84	-0.83	-0.84	-0.83	-0.82
F2	-2.45	-2.45	-2.49	-2.45	-2.48	-2.46	-2.49	-2.45

جدول ۳. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی ارتوپروکسن‌های مورد بررسی در گدازه‌های آندزیتی شورستان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن

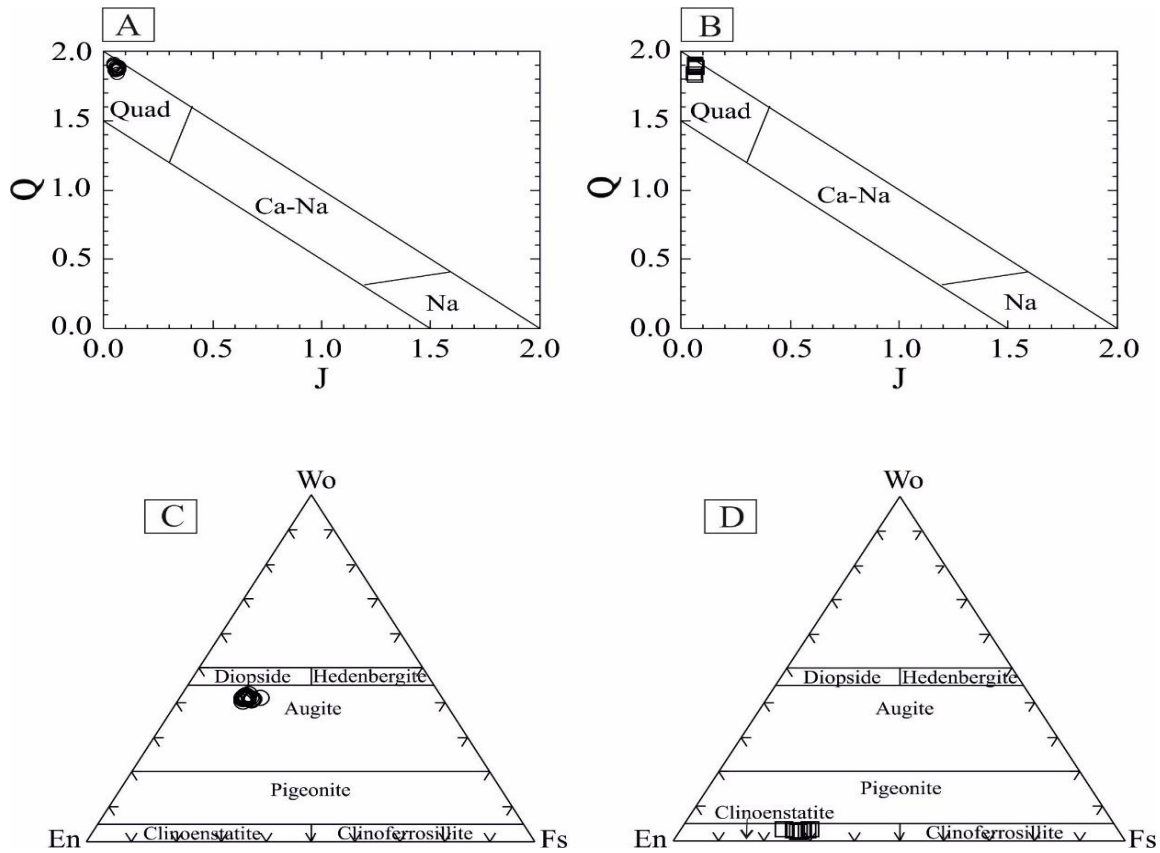
Table 3. EPMA results of orthopyroxenes from the Shourestan andesitic lavas with structural formula recalculation based on 6 oxygen atoms

Sample	16-10-86	16-10-87	16-10-88	16-10-89	16-10-90	16-10-91	16-10-92	16-10-93	16-10-94
SiO₂	52.44	53.08	53.24	52.76	53.38	52.37	52.02	51.76	52.77
TiO₂	0.39	0.37	0.38	0.41	0.47	0.41	0.37	0.43	0.34
Al₂O₃	2.42	1.59	1.53	1.64	1.80	3.03	1.26	1.66	1.65
Cr₂O₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	17.00	16.57	16.83	16.62	15.94	17.50	18.47	17.13	16.27
MnO	0.40	0.30	0.28	0.31	0.34	0.34	0.23	0.39	0.36
MgO	25.36	25.81	25.24	25.97	26.29	23.98	25.76	26.05	26.23
CaO	1.63	1.54	1.64	1.57	1.65	1.65	1.64	1.56	1.64
Na₂O	0.07	0.05	0.01	0.03	0.05	0.01	0.03	0.02	0.02
K₂O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.71	99.27	99.14	99.30	99.91	99.30	99.77	99.01	99.28
Si	1.92	1.94	1.95	1.93	1.94	1.93	1.92	1.91	1.93
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al	0.10	0.07	0.07	0.07	0.08	0.13	0.05	0.07	0.07
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe²⁺	0.50	0.51	0.52	0.51	0.48	0.54	0.57	0.53	0.50
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.38	1.40	1.38	1.40	1.41	1.31	1.38	1.40	1.41
Ca	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Mg#: Mg/(Mg+Fe²⁺)	0.73	0.74	0.73	0.74	0.75	0.71	0.71	0.73	0.74
Fe²⁺/(Fe^{tot})	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
En	0.70	0.71	0.70	0.71	0.72	0.69	0.69	0.71	0.72
Fs	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.28	0.28	0.26	0.25
Wo	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
X_{PT}	36.85	37.42	37.51	37.37	37.49	36.36	37.79	37.11	37.35
Y_{PT}	-27.69	-28.05	-27.72	-27.99	-28.64	-26.98	-26.95	-27.48	-28.29

ادامه جدول ۳. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی ارتوپروکسن های مورد بررسی در گدازه های آندزیتی شورهستان به همراه محاسبه فرمول ساختاری بر اساس ۶ اتم اکسیژن

Table 3 (Continued). EPMA results of orthopyroxenes from the Shourestan andesitic lavas with structural formula recalculation based on 6 oxygen atoms

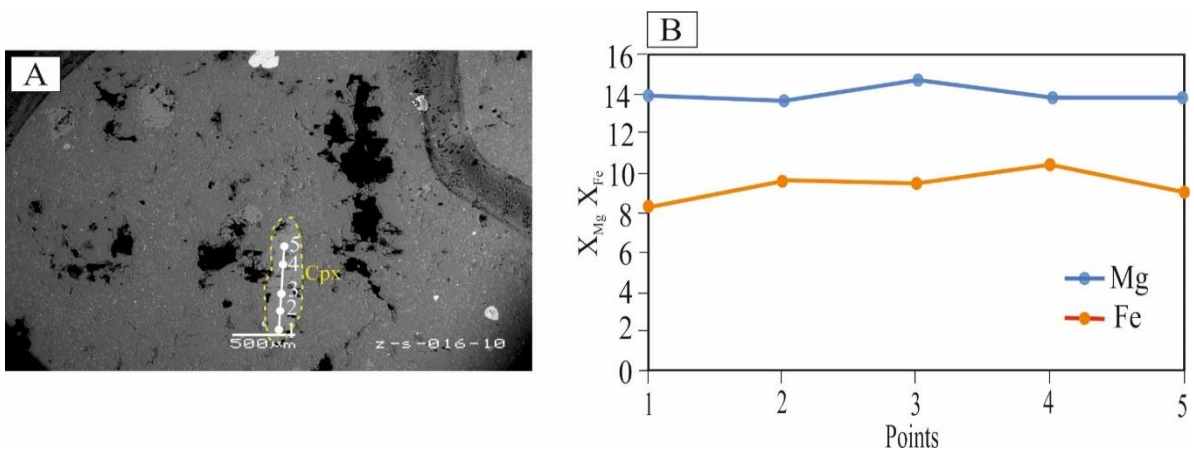
Sample	16-10-107	16-10-109
SiO₂	53.98	52.67
TiO₂	0.45	0.52
Al₂O₃	1.62	3.86
Cr₂O₃	0.00	0.09
FeO	14.74	16.35
MnO	0.24	0.25
MgO	27.00	25.30
CaO	1.70	1.33
Na₂O	0.06	0.03
K₂O	0.01	0.00
Total	99.80	100.40
Si	1.95	1.90
Ti	0.01	0.01
Al	0.07	0.16
Cr	0.00	0.00
Fe²⁺	0.45	0.49
Mn	0.01	0.01
Mg	1.44	1.36
Ca	0.07	0.05
Na	0.00	0.00
K	0.00	0.00
Total	4.00	4.00
Mg#: Mg/(Mg+Fe²⁺)	0.77	0.73
Fe²⁺/(Fe^{tot})	1.00	1.00
En	0.74	0.71
Fs	0.23	0.26
Wo	0.03	0.03
X_{PT}	37.64	36.05
Y_{PT}	-29.60	-28.32



شکل ۵. موقعیت کلینوپیروکسن‌ها (دایره) و ارتوپیروکسن‌های (مربع) گدازه‌های آندزیتی منطقه شورستان در A و B: نمودار Q-J (Morimoto et al., 1988)

C و D: نمودار رده‌بندی پیروکسن‌ها (al., 1988; Morimoto et al., 1988; Morimoto et al., 1989)

Fig. 5. The position of clinopyroxenes and orthopyroxenes of the Shourestan andesitic lavas in A and B: Q-J diagram (Morimoto et al., 1988), C and D: Pyroxene classification diagram (Morimoto et al., 1988; Morimoto et al., 1989)



شکل ۶. A: تصویر BSE و B: تغییرات مقادیر Mg و Fe در کلینوپیروکسن موجود در آندزیت‌های منطقه شورستان

Fig. 6. A: BSE image, and B: Variation of Mg and Fe values in clinopyroxene of the Shourestan area andesites

جدول ۴. نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی عناصر اصلی (درصد وزنی) و کمیاب (ppm) سنگ‌های آتشفشانی منطقه شورستان

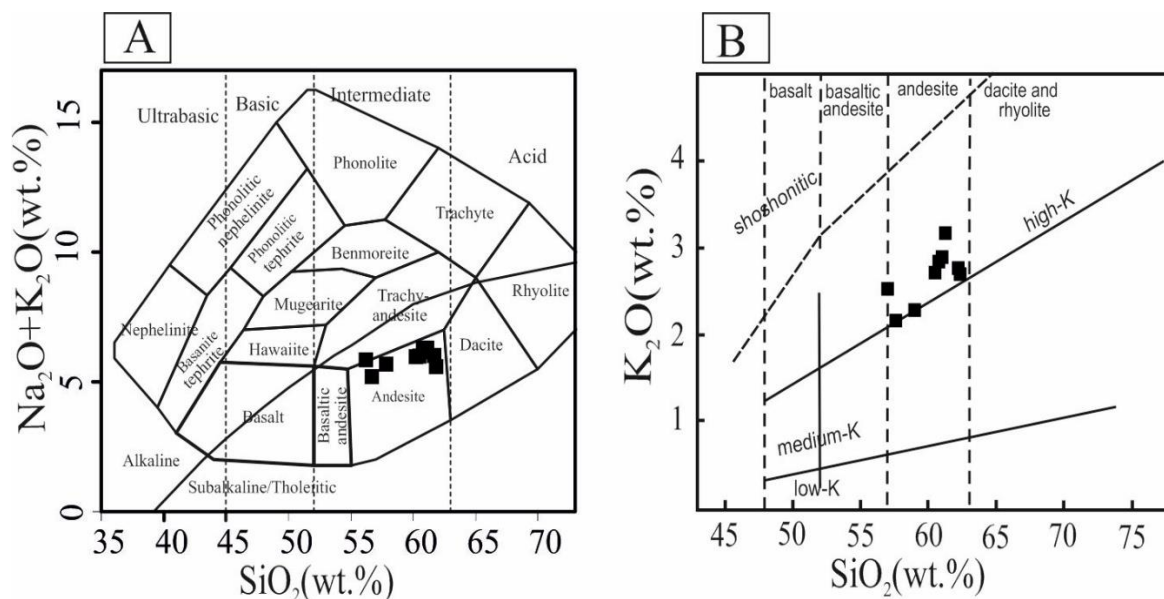
Table 4. Geochemical analyses of major (wt.%) and rare (ppm) elements for volcanic rocks of the Shourestan area

Sample No.	2	3	16	18	19	74
Rock type	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite
Long.	59° 38' 08"	59° 37' 30"	59° 38' 17"	59° 38' 10"	59° 37' 57"	59° 39' 58"
Lat.	32° 32' 02"	32° 32' 22"	32° 31' 49"	32° 30' 43"	32° 31' 29"	32° 30' 30"
SiO ₂	61.91	61.67	62.19	62.40	62.36	62.14
TiO ₂	0.68	0.67	0.73	0.87	0.85	0.73
Al ₂ O ₃	16.38	16.18	15.58	15.48	15.45	15.55
Fe ₂ O _{3t}	4.41	4.48	4.77	4.75	4.73	4.87
MnO	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18
MgO	2.98	2.95	3.38	3.67	3.61	3.2
CaO	4.8	4.77	4.91	5.01	4.89	4.94
Na ₂ O	3.28	3.43	3.37	3.09	3.01	3.46
K ₂ O	2.85	2.68	2.89	3.29	3.29	2.92
P ₂ O ₅	0.27	0.27	0.29	0.29	0.28	0.31
LOI	1.9	2.4	1.3	1.5	1.9	1.4
Sum	99.85	99.84	99.84	99.83	99.83	99.84
Ba(ppm)	533	508	474	537	596	486
Cs	4.1	4.4	4.6	4.5	4.9	4.7
Hf	4.5	4.1	4.4	4.5	4.4	4.6
Nb	9	9.4	10.6	11.3	11	10.7
Rb	94.1	96.3	94	106.1	108.5	90.8
Sr	355.5	3352.6	377.9	353.5	360.5	400.8
Ta	0.8	0.6	1	0.8	1	0.8
Th	14.6	14.4	14.3	14.1	14.3	13.8
Co	13.2	12.6	14.5	16	17.4	13.9
U	3.5	3.7	3.1	3	3.2	2.9
V	68	71	79	86	84	74
Zr	177	176.6	191	176.8	176.3	187.7
Y	17.3	17.4	17.4	18.8	18.1	18.3
La	30.5	30.7	31.5	30.5	31.1	31.7
Ce	55.2	51.9	56.1	53.9	55.7	55.5
Pr	5.64	5.57	5.87	5.96	5.92	5.88
Nd	20.3	21.2	20.9	21.7	20.3	21.5
Sm	3.7	3.77	3.8	4.15	3.74	3.76
Eu	0.92	0.97	0.97	0.94	0.95	0.89
Gd	3.57	3.53	3.51	3.72	3.79	3.46
Tb	0.55	0.52	0.56	0.56	0.54	0.52
Dy	3.29	3.06	3.47	3.32	3.45	3.29
Ho	0.69	0.66	0.69	0.66	0.62	0.62
Er	1.95	1.91	1.94	2.02	2.01	1.77
Tm	0.26	0.28	0.29	0.27	0.30	0.26
Yb	1.90	1.96	1.97	1.90	1.90	1.77
Lu	0.28	0.29	0.29	0.28	0.27	0.27
Mg#	57.24	56.61	58.40	60.49	60.19	56.55
(La/Yb) _N	10.82	10.56	11.18	10.82	11.85	12.14
Eu/Eu*	0.77	0.81	0.81	0.73	0.77	0.7

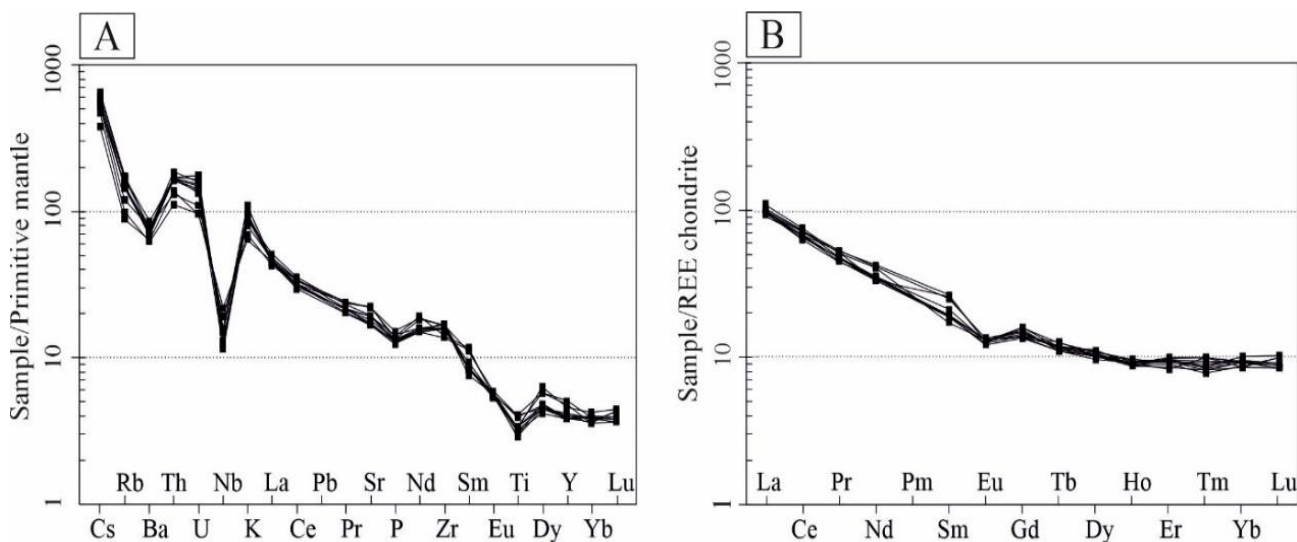
ادامه جدول ۴. نتایج تجزیه زمین شیمیایی عناصر اصلی (درصد وزنی) و کمیاب (ppm) سنگ های آتشفشانی منطقه شورستان

Table 4 (Continued) Geochemical analyses of major (wt.%) and rare (ppm) elements for volcanic rocks of the Shourestan area

Sample No.	10	16-10	M-020-74	M-020-75	M-020-76
Rock type	Trachy andesite	Trachy andesite	Andesite	Andesite	Andesite
Long.	59° 38' 42"	59° 38' 16"	59° 38' 19"	59° 37' 43"	59° 37' 39"
Lat.	32° 32' 04"	32° 32' 18"	32° 32' 14"	32° 32' 25"	32° 32' 24"
SiO ₂	57.65	59.34	58.46	62.41	62.28
TiO ₂	0.88	0.72	0.70	0.62	0.63
Al ₂ O ₃	16.97	16.39	16.84	16.16	16.40
Fe ₂ O _{3t}	6.83	6.24	6.45	4.26	4.36
MnO	0.2	0.08	0.09	0.08	0.09
MgO	2.93	2.37	2.26	3.36	3.39
CaO	6.14	6.67	6.66	4.60	4.76
Na ₂ O	3.84	4.01	3.80	3.13	3.34
K ₂ O	2.4	2.09	1.93	2.66	2.75
P ₂ O ₅	0.33	0.30	0.29	0.29	0.28
LOI	1.7	1.1	2.05	2.37	1.77
Sum	99.87	99.31	99.53	99.94	100.05
Ba(ppm)	544	432	444	529	498
Cs	4.1	3.7	3	5.2	4.5
Hf	4.5	3.7	4.74	4.84	4.8
Nb	13.5	13.8	15.6	8.8	8.1
Rb	75.9	63	56	111	93
Sr	461.3	461	472	407	406
Ta	1.2	1.01	1.61	0.76	0.76
Th	11.1	9.42	11.74	15.79	14.53
Co	17.8	19	18.5	15.3	15.1
U	2.3	2.04	2	3.3	2.8
V	144	153	155	81	83
Zr	185.5	158	153	187	179
Y	21.9	23	20.7	18.3	17.5
La	31.9	29.2	31	35	33
Ce	60.2	56.2	59	63	61
Pr	6.61	6.6	6.43	6.33	5.97
Nd	25	25.9	20.4	24.7	20.9
Sm	4.89	5.2	5.06	3.36	3.7
Eu	0.99	0.93	0.94	0.95	0.92
Gd	3.90	3.98	4.12	3.59	4.11
Tb	0.54	0.52	0.59	0.60	0.55
Dy	3.22	3.21	3.47	3.27	3.57
Ho	0.65	0.63	---	---	---
Er	2.08	2.04	2.02	1.72	1.87
Tm	0.32	0.32	0.28	0.32	0.25
Yb	1.76	1.93	2.10	1.90	1.80
Lu	0.32	0.28	0.33	0.27	0.32
Mg#	45.94	42.93	40.97	60.97	60.64
(La/Yb) _N	10.92	10.20	9.95	12.42	12.36
Eu/Eu*	0.87	0.75	0.63	0.84	0.72



شکل ۷. A: رده‌بندی سنگ‌های آتشفشانی منطقه شورستان بر اساس نمودار مجموع آلکان در مقابل سیلیس (Cox et al., 1979) و B: تعیین سری ماگمایی با استفاده از نمودار K_2O در مقابل SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976; Le Maitre, 2002)



شکل ۸. A: نمودار عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و B: الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1984) برای گدازه‌های آندزیتی شورستان

Fig. 8. A: Primitive mantle-normalized trace elements diagram (Sun and McDonough, 1989), and B: Chondritenormalized REE diagram (Boynton, 1984) for andesitic lavas of Shourestan

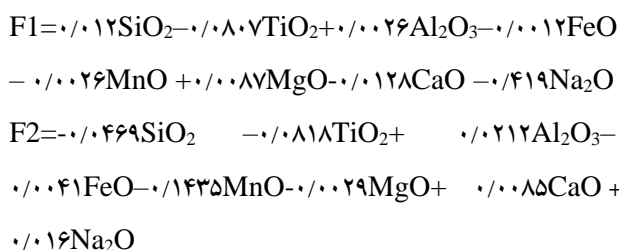
بحث

تعیین سری ماگمایی و محیط زمین ساختی

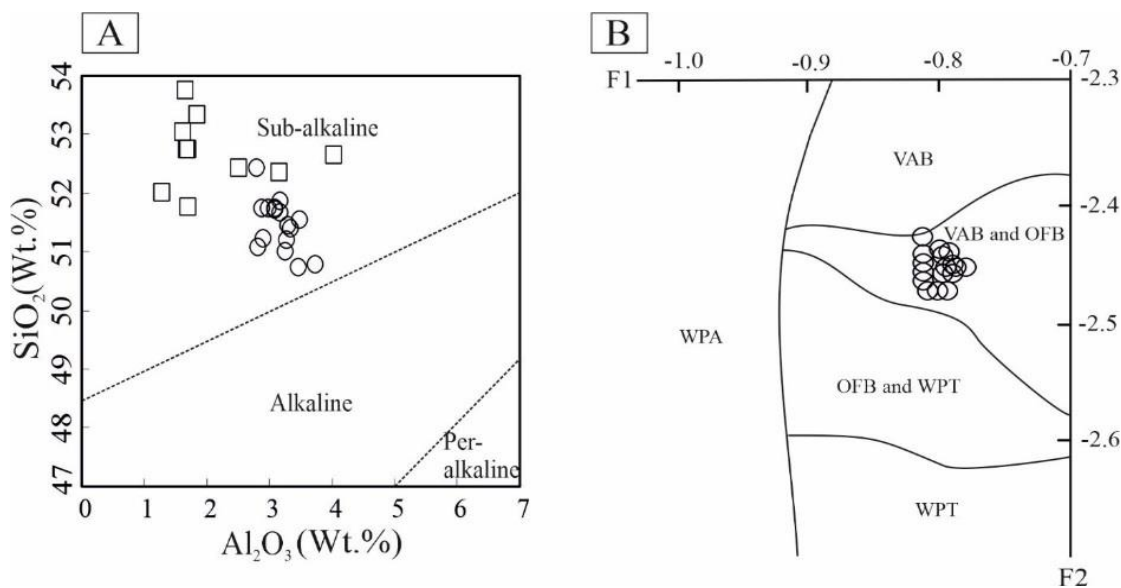
الف) بر اساس شیمی کانی پیروکسن

پیروکسن‌ها به ویژه کلینوپيروکسن‌ها می‌توانند همه عناصر موجود در ماگما را در خود جای دهند. بنابراین، ترکیب آنها می‌تواند بیانگر نوع ماگمایی باشد که این کانی‌ها از آن منشأ گرفته است. برای تعیین سری ماگمایی از نمودار SiO₂ در مقابل Al₂O₃ (Le Bas, 1962) استفاده شد که نمونه‌ها در این نمودار در محدوده ساب‌آلکالن واقع می‌شوند (شکل ۹-ا). ترکیب شیمیایی کلینوپيروکسن به عنوان معیاری مناسب برای تشخیص محیط تکتونوماگمایی سنگ‌های دربرگیرنده آن کاربرد دارد. نمودار F1-F2 برای تعیین محیط زمین ساختی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Nisbet and Pearce, 1977). فرمول محاسبه F1 و F2 بر اساس

تجزیه ریزکاو الکترونی کانی کلینوپيروکسن، به صورت زیر است:

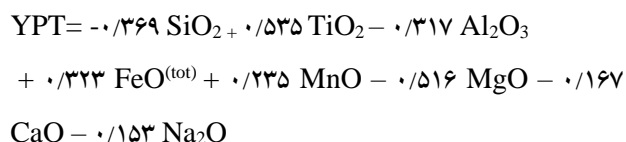
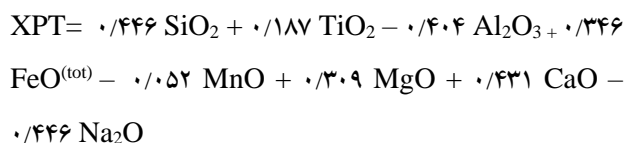


گدازه‌های آندزیتی منطقه شورستان در نمودار F1-F2 در محدوده مشترک بازالت‌های کمان آتشفشانی و بازالت‌های کف اقیانوس واقع شده‌اند (شکل ۹-ب) که با توجه به وضعیت زمین ساختی منطقه مورد بررسی و نتایج پژوهش‌های قبلی، محیط کمان آتشفشانی تأیید می‌شود.



شکل ۹. A: موقعیت کلینوپيروکسن‌ها (دایره) و ارتوپيروکسن‌ها (مربع) در سنگ‌های آتشفشانی منطقه شورستان در نمودار SiO₂ در مقابل Al₂O₃ برای تعیین سری ماگمایی (Le Bas, 1962) و **B:** تعیین محیط زمین ساختی گدازه‌های آندزیتی منطقه شورستان با استفاده از ترکیب کلینوپيروکسن در نمودار F1 در مقابل F2 (Nisbet and Pearce, 1977). OFB: بازالت‌های بستر اقیانوس؛ WPT: بازالت‌های میان صفحه‌ای؛ WPA: بازالت‌های آلکالن میان صفحه‌ای؛ VAB: بازالت‌های کمان آتشفشان

Fig. 9. A: The position of clinopyroxenes (circle) and orthopyroxenes (square) of the Shourestan volcanic rocks in SiO₂ versus Al₂O₃ to determine the magmatic series (Le Bas, 1962), and B: Determining the tectonic environment of andesitic lavas in the Shourestan area using clinopyroxene composition in the diagram of F1 versus F2 (Nisbet and Pearce, 1977). OFB: ocean floor basalt, WPT: within plate tholeiitic basalt, WPA: within plate alkaline basalt, VAB: volcanic arc basalt.

ب) بر اساس زمین شیمی سنگ گل

بر اساس این روش، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌ها و ارتوپیروکسن‌های مورد بررسی به ترتیب حدود ۱۱۷۵ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (شکل ۱۰-A و B). استفاده از مقدار کلسیم در ارتوپیروکسن یکی دیگر از روش‌های دماسنجی با بهره‌گیری از تک پیروکسن است. در این روش، درجه حرارت تبلور ارتوپیروکسن بر مبنای رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در این رابطه، درجه حرارت بر حسب کلین و فشار بر حسب کیلوبار است. بر اساس نتایج به دست آمده، درجه حرارت تبلور ارتوپیروکسن در گدازه‌های آندزیتی منطقه شورستان، در فشار ۱ و ۵ کیلوبار، به ترتیب ۱۱۱۴ و ۱۱۳۶ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که با نتایج به دست آمده از روش قبل مشابهت دارد. برای بررسی درستی نتایج، از دما- فشارسنج‌های دیگری نیز استفاده شد. با بهره‌گیری از نرم‌افزار SCG (Sayari and Sharifi, 2014)، دمای ۱۱۶۱ درجه سانتی‌گراد برای تبلور کلینوپیروکسن به دست آمد. ارزیابی فشار حاکم در زمان تبلور پیروکسن‌های بررسی شده، با بهره‌گیری از دو شاخص XPT و YPT (Soesoo, 1997) انجام شد. بر این اساس، فشار محاسبه شده برای تبلور کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن، ۲ تا ۵ کیلوبار تعیین شد (شکل ۱۰-C و D). با بهره‌گیری از نرم‌افزار SCG (Sayari and Sharifi, 2014) نیز فشار حاکم در زمان تبلور کلینوپیروکسن، ۳/۲۷ کیلوبار تعیین شد که با اعداد به دست آمده از روش (Soesoo, 1997) مطابقت دارد.

ب) دما- فشارسنجی پلاژیوکلاز

برای درک بهتر شرایط آشیانه ماگمایی در حین انجماد سنگ‌های

بر پایه نمودارهای ارائه شده توسط پکسریلو و تایلور (Peccerillo and Taylor, 1976) و لومتر (Le Maitre, 2002)، سنگ‌های آتشفشانی شورستان در محدوده سری ماگمایی کالک آلکالن پتاسیم بالا واقع شدند (شکل ۷-B). بررسی‌های تجربی نشان داده است که Mg# شاخص مفیدی برای شناخت منشأ پوسته‌ای یا گوشته‌ای گدازه‌هاست، به طوری که آندزیت با Mg# بیش از ۴۵ در مناطق فرورانش، در اثر ذوب بخشی گوشته متاسوماتیزه شده یا فرایندهای اختلاط و هضم به وجود می‌آید (Beier et al., 2017). میزان Mg# در آندزیت‌های شورستان از ۴۰/۹۷ تا ۶۰/۹۷ متغیر است که بیانگر نقش اجزای گوشته‌ای در تشکیل آنهاست. غنی‌شدگی Th و U احتمالاً به آلودگی پوسته‌ای یا ویژگی‌های منشأ وابسته است (Kuscu and Geneli, 2010). تهی‌شدگی Ba می‌تواند بیانگر تفریق فلدسپارها (Arslan and Aslan, 2006)، منشأ فرورانش (Foley and Wheller, 1990) و نقش پوسته‌کاره‌ای بالایی در فرایندهای ماگمایی (Kuscu and Geneli, 2010) باشد.

وجود بی‌هنجاری منفی Ti، Nb و P در روند تغییرات عناصر کمیاب نمونه‌های مورد بررسی، بیانگر تشکیل این سنگ‌ها در مناطق فرورانش است (Wilson, 2007; Zulkarnain, 2009). آنومالی منفی ضعیف Eu (Eu/Eu* = ۰/۰-۶۳/۸۴) که در این سنگ‌ها دیده می‌شود، بیانگر جدایش پلاژیوکلاز و از ویژگی‌های گدازه‌های کالک آلکالن وابسته به فرورانش است (Yang and Li, 2008; Cai et al., 2020).

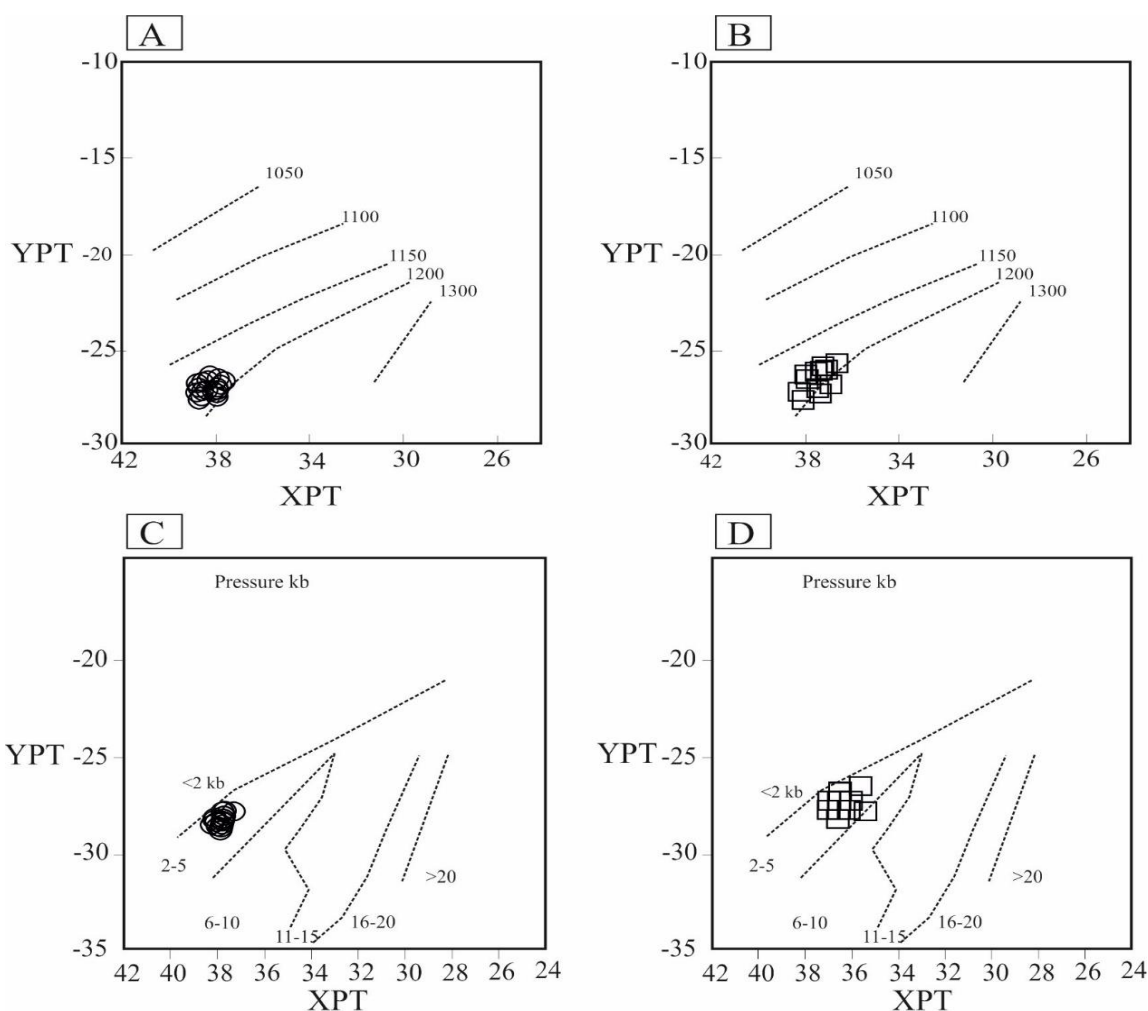
دما- فشارسنجی**الف) بر اساس ترکیب کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن**

برای بررسی دمای تشکیل پیروکسن‌ها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. در یکی از روش‌ها، تخمین دما بر اساس محاسبه دو شاخص XPT و YPT با کمک داده‌های آنالیز نقطه‌ای و بر مبنای روابط زیر انجام می‌شود (Soesoo, 1997):

مذاب، ترکیب مذاب باید در تعادل با پلاژیوکلاز باشد (Zhao et al., 2021). برای بررسی تعادل پلاژیوکلاز با مذاب میزبان از برخی عوامل شیمیایی مربوط به کانی و مذاب استفاده می‌شود. ضریب توزیع آلیت- آنورتیت (K_D) بین پلاژیوکلاز و مذاب که به صورت زیر تعریف شده است، می‌تواند به عنوان شاخصی از تعادل شیمیایی باشد (Putirka, 2008).

$$(K_D(\text{An-Ab}))^{\text{pl-liq}} = \frac{X_{\text{Ab}}^{\text{pl}} X_{\text{AlO1.5}}^{\text{liq}} X_{\text{CaO}}^{\text{liq}}}{X_{\text{An}}^{\text{pl}} X_{\text{NaO0.5}}^{\text{liq}} X_{\text{SiO2}}^{\text{liq}}}$$

آندزیتی شورستان و بررسی شرایط دما و فشار تبلور فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، از دما- فشارسنج پلاژیوکلاز- مذاب استفاده شد. اولین زمین دماسنج پلاژیوکلاز- مایع توسط کودو و ویل (Kudo and Weill, 1970) ارائه شد. با توجه به اینکه پلاژیوکلاز کانی رایج در بسیاری از سنگ‌های آذرین است، از آن زمان، دماسنجی با کمک این کانی بسیار مورد توجه قرار گرفت (Putirka, 2008). برای استفاده از دما- فشارسنج پلاژیوکلاز-



شکل ۱۰. A و B: تعیین دما، C و D: تعیین فشار تبلور پیروکسن‌ها در گدازه‌های آندزیتی منطقه شورستان با استفاده از نمودار YPT در مقابل XPT (Soesoo, 1997) (دایره: کلینوپروکسن؛ مربع: ارتوپروکسن)

Fig. 10. A and B: Determining the temperature, C and D: Determining the pressure for crystallization of pyroxenes in andesitic lavas of the Shourestan area using YPT versus XPT (Soesoo, 1997) (circle: clinopyroxene; square: orthopyroxene)

می توان گفت که میزان فوگاسیته اکسیژن در هنگام تشکیل این کانی کم بوده است، زیرا در صورت بالابودن فوگاسیته اکسیژن، مقدار آنورتیت پلاژیو کلازها بالا (حدود ۸۸ درصد) است (Berndt et al., 2005).

برای تبلور آمفیبول در گدازه‌های آندزیتی- بازالتی کالک آلکالن، شرایط خاصی از نظر میزان آب در مذاب مورد نیاز است. در این ارتباط، درصدهای متفاوتی بین ۱/۵ تا ۳ درصد وزنی (Claesson and Meurer, 2004) و کمتر از حدود ۶ درصد وزنی (Anderson, 1980) ذکر شده است. محتوای آب به دست آمده در حین انجماد برای سنگ‌های بررسی شده با استفاده از معادله ۲۵b (Putirka, 2008) بین ۰/۶ تا ۱/۳ درصد وزنی تعیین شد (جدول ۵) که نشان‌دهنده مقدار کم آب ماگماست. این نتیجه با نبود آمفیبول در سنگ‌های بررسی شده مطابقت دارد. در نمودار تغییرات مقدار آنورتیت پلاژیو کلاز در مقابل Mg# کلاینوپیروکسن‌ها (Kvassnes et al., 2004)، نمونه‌های بررسی شده در محدوده تفریق خشک قرار می‌گیرند (شکل ۱۲) که مقدار آب کم در ماگمای تشکیل‌دهنده را تأیید می‌کند.

ذوب گوشته و ویژگی‌های منشأ

نمودارهای عناصر خاکی نادر و نسبت‌های عناصر کمیاب ناسازگار برای درک شرایط ذوب گوشته بسیار مفید هستند (Teng and Santosh, 2015)؛ به نحوی که فراوانی نسبی آنها در مذاب‌های منشأ گرفته از گوشته بیانگر درجه ذوب‌بخشی و ماهیت فاز آلومینیم‌دار (اسپینل یا گارنت) در گوشته منشأ است (Manikyamba et al., 2015). پژوهش‌های مختلف پیشنهاد کرده‌اند که HREE به ویژه Yb با گارنت سازگار بوده و ضریب جدایش گارنت/ مذاب بالا دارد؛ در صورتی که (LREE) La، Sm و Gd (MREE) ناسازگار بوده و ضریب جدایش گارنت/ مذاب پایین دارند (Kelemen, 1990).

تبادل پلاژیو کلاز و مذاب به دما وابسته است. اگر دما بیشتر از ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد، مقدار $K_D(\text{An-Ab})^{pl-liq}$ بین ۰/۱۱±۰/۰۲۷، بیانگر تعادل شیمیایی بلور و مذاب است؛ در صورتی که اگر نتایج دماسنجی پلاژیو کلاز، کمتر از ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داد، مقدار $K_D(\text{An-Ab})^{pl-liq}$ بین ۰/۰۵±۰/۱۱، حالت تعادل را نشان می‌دهد (Putirka, 2008; Yücel et al., 2014; Zhao et al., 2021). میانگین K_D برای پلاژیو کلازهای مورد بررسی، حدود ۰/۲۳ است (جدول ۵) که بیانگر وجود تعادل شیمیایی بین بلورهای پلاژیو کلاز با مذاب در دمای بالاتر از ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد است. نتایج محاسبه دما و فشار تبلور پلاژیو کلاز و همچنین محتوای آب برای سنگ‌های بررسی شده بر مبنای دما- فشارسنج پلاژیو کلاز- مذاب (Putirka, 2005; Putirka, 2008) در جدول ۵ و شکل ۱۱ آورده شده‌اند. در شکل ۱۱-A، نتایج دماسنجی بر مبنای تعادل پلاژیو کلاز- مذاب به روش پاتیرکا (Putirka, 2008) (با استفاده از معادله ۲۳) نشان داده شده است. دماهای به دست آمده در محدوده ۱۱۷۶ تا ۱۱۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارند. نتایج فشارسنجی پلاژیو کلاز با بهره‌گیری از معادله a-۲۵ معرفی شده توسط پاتیرکا (Putirka, 2008) نیز در شکل ۱۱-B نشان داده شده است. بر اساس این محاسبات، بلورهای پلاژیو کلاز در محدوده فشار ۶/۶ تا ۸/۷ کیلو بار متبلور شده است. حضور بلورهای درشت پلاژیو کلاز در آندزیت‌های شورستان بیانگر این است که تبلور این کانی در اعماق نسبتاً زیاد و قبل از تبلور پیروکسن‌ها شروع شده است.

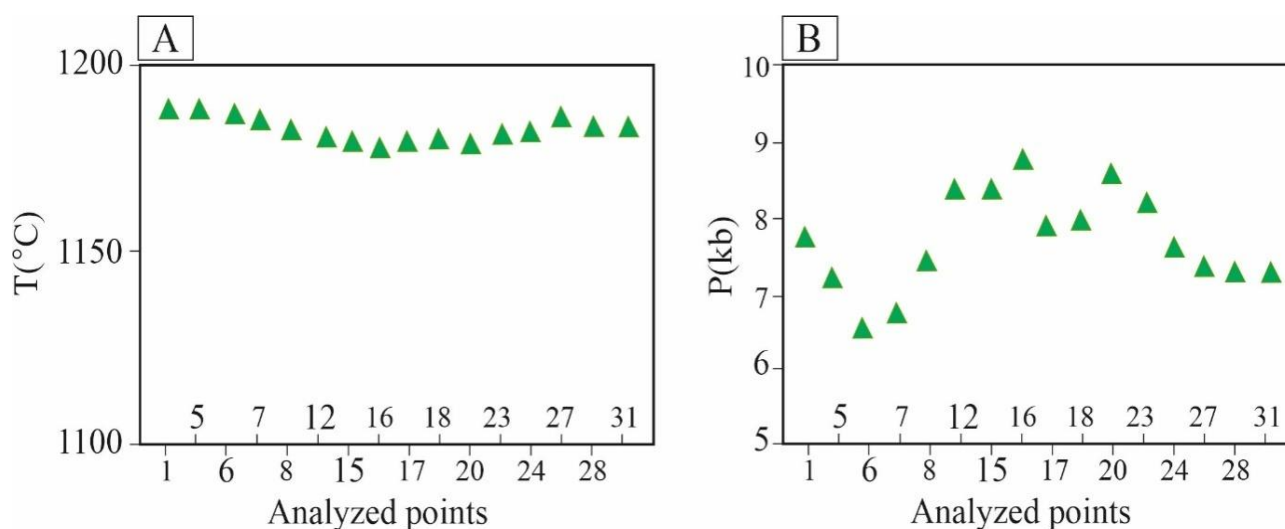
تعیین فوگاسیته اکسیژن و درصد تقریبی آب ماگما بر پایه ترکیب کانی‌های کلاینوپیروکسن و پلاژیو کلاز

میزان آنورتیت موجود در پلاژیو کلازهای گدازه‌های آندزیتی شورستان (۵۲ تا ۶۶ درصد) و عدد منیزیم کلاینوپیروکسن‌ها (۷۲ تا ۷۸)، بیانگر مقدار آب کم در هنگام تشکیل این کانی‌ها از ماگمای اولیه است (Piccardo and Gaurneri, 2011). با توجه به مقدار آنورتیت موجود در پلاژیو کلازها (۵۲ تا ۶۶ درصد)،

جدول ۵. نتایج محاسبات دما- فشارسنجی پلاژیوکلاز و محتوای آب برای آندزیت های منطقه شورستان بر مبنای دما- فشارسنج پلاژیوکلاز- مذاب (Putirka, 2005; Putirka, 2008)

Table 5. Results of thermobarometry calculations of plagioclase, and water content for the Shourestan area andesites based on plagioclase-liquid thermobarometr (Putirka, 2005; Putirka, 2008)

Analyzed point	Temperature (degrees Celsius) Based on equation23 (Putirka, 2008)	Pressure (kbar) Based on equation25a (Putirka, 2008)	Water content (weight percent) Based on equation25b (Putirka, 2008)	$K_D(\text{An-Ab})^{\text{pl-liq}}$
1	1184	7.8	0.8	0.22
5	1187	7.1	0.7	0.19
6	1189	6.6	0.7	0.16
7	1189	6.8	0.7	0.17
8	1184	7.6	0.7	0.21
12	1179	8.7	0.9	0.26
15	1170	8.4	1.3	0.38
16	1182	8.7	0.8	0.24
17	1176	8.7	1	0.29
18	1184	7.5	0.7	0.20
20	1184	7.7	0.7	0.21
23	1179	8.6	0.9	0.25
24	1183	7.8	0.8	0.22
27	1186	7.3	0.7	0.19
28	1191	7.2	1.3	0.36
31	1187	7.1	0.6	0.17

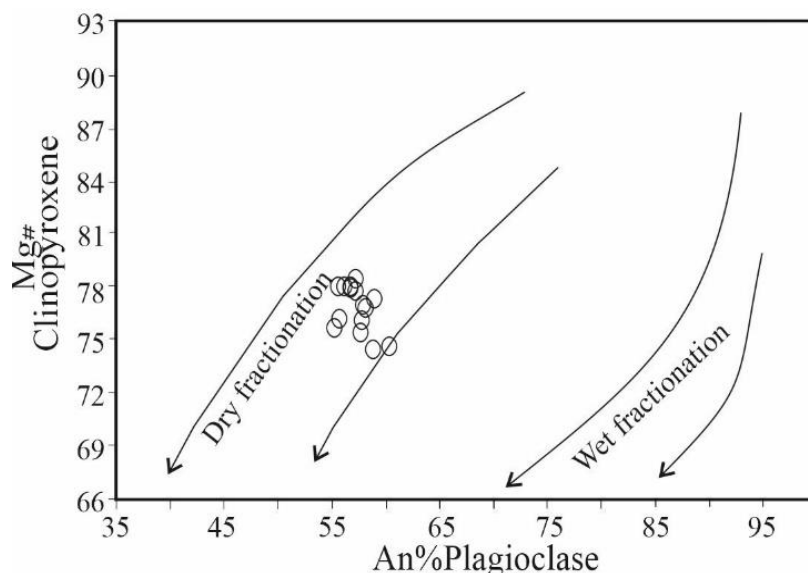


شکل ۱۱. A: نتایج دماسنجی و B: فشارسنجی پلاژیوکلاز در آندزیت های شورستان به روش پاتیرکا (Putirka, 2008)

Fig. 11. A: Results of thermometry, and B: barometry of plagioclase in andesites of Shourestan by the Putirkamethod (Putirka, 2008)

علاوه بر این، هنگامی که ذوب در محدوده پایداری گارنت رخ می‌دهد، Gd/Yb و Dy/Yb ، Sm/Yb ، La/Yb به شدت جدایش یافته هستند؛ در صورتی که در حین ذوب در محدوده اسپینل پریدوتیت، La/Yb جدایش ضعیف داشته و Sm/Yb تقریباً جدایش نیافته است (Davidson et al., 2013). نسبت بالای Dy/Yb (بیشتر از ۲/۵) به ذوب بخشی در محدوده پایداری گارنت نسبت داده می‌شود؛ در حالی که Dy/Yb کمتر از ۱/۵ در اثر ذوب در محدوده پایداری اسپینل ایجاد می‌شود (Yang et al., 2014). نسبت Dy/Yb در سنگ‌های بررسی شده (۲/۴۰-۱/۵۶) بیانگر این است که منشأ گوشته‌ای شواهدی از اسپینل و گارنت پریدوتیت نشان داده و مذاب والد در اثر ذوب بخشی محدود تحولی اسپینل - گارنت پریدوتیت ایجاد شده است (شکل ۱۳-A). نسبت $(La/Yb)_n$ در گدازه‌های آندزیتی شورستان (۹/۹۵ تا ۱۲/۴۲)، کمتر از مقدار آن در منشأ گوشته‌ای گارنت دار

$(La/Yb)_n$ (بیشتر از ۲۰) (Kay, 2001) است. مقادیر نسبتاً پایین Yb_N در نمونه‌ها (۸/۴۲ تا ۱۰/۰۵ ppm) بیانگر مقادیر کم گارنت در منشأ است (Machado et al., 2005). بررسی نسبت‌های برخی عناصر کمیاب دیگر شامل $(Gd/Yb)_n$ (۴۴/۸۴-۱/۱) و $(La/Sm)_n$ (۵۳/۵۵-۶/۶) در سنگ‌های بررسی شده نیز بیانگر غنی‌شدگی LREE بیش از MREE است (Saccani, 2015) که با قلمرو ذوب در محدوده اسپینل لرزولیت به سمت گارنت مطابقت دارد. این نتیجه، در نمودار La/Yb در مقابل Dy/Yb (شکل ۱۳-A) و همچنین نمودار Sm در مقابل Sm/Yb (شکل ۱۳-B) (با درجه ذوب بخشی حدود ۳۰ درصد) تأیید می‌شود. فراوانی بیشتر LILE و LREE (شکل ۸-A و B) می‌تواند به تشکیل ماگمای سازنده این سنگ‌ها از یک منشأ گوشته‌ای که در اثر آلودگی پوسته‌ای دچار غنی‌شدگی شده است، نسبت داده شود (Dwivedi et al., 2022).

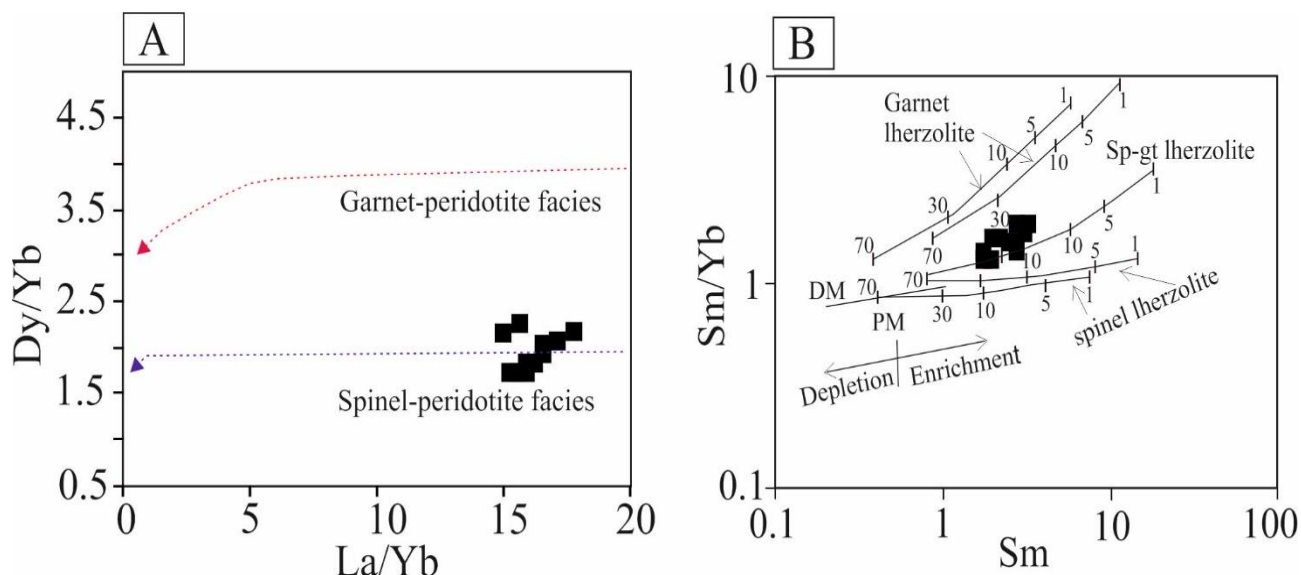


شکل ۱۲. نمودار تغییرات $Mg\#$ کلینوپیروکسن در مقابل درصد آنورتیت پلاژیوکلاز (Kvassnes et al., 2004) نشان‌دهنده تفریق خشک برای تشکیل سنگ‌های آندزیتی منطقه شورستان است.

Fig. 12. Diagram of variation of $Mg\#$ in clinopyroxene versus plagioclase $An\%$ (Kvassnes et al., 2004) show dry fractionation for genesis of the Shourestan area andesitic rocks.

نسبت Nb/La می‌تواند برای تفکیک منشأ گوشته لیتوسفری و آستوسفری مورد استفاده قرار گیرد (Morata et al., 2005). نسبت‌های پایین Nb/La در سنگ‌های آندزیتی شورستان (۰/۲۵ تا ۰/۵۰)، بیانگر منشأ گوشته لیتوسفری برای این سنگ‌هاست. علاوه بر این، مذاب‌های منشأ گرفته از گوشته آستوسفری عمیق به وسیله غنی‌شدگی شدید در LREE نسبت به HREE مشابه بازالت‌های جزایر اقیانوسی مشخص می‌شوند. الگوی REE سنگ‌های آندزیتی شورستان (شکل ۸-B) با منشأ گوشته آستوسفری عمیق مطابقت ندارد (Morata et al., 2005). به طور کلی، بر اساس نسبت‌های عنصری مختلف می‌توان ادعا کرد که گدازه‌های آندزیتی شورستان از یک گوشته لیتوسفری زیرقاره‌ای تحول‌یافته طی فرورانش منشأ گرفته است. نتایج بررسی‌های انجام‌شده درباره گدازه‌های آندزیتی گورید در مجاورت شرق منطقه مورد بررسی (Mohammadi and Nakhaei, 2022) و همچنین بررسی ماگماتیسیم ائوسن-لیگوسن شرق ایران (Omidianfar et al., 2022) همین منشأ را تأیید کرده است.

نسبت Nb/La می‌تواند برای تفکیک منشأ گوشته لیتوسفری و آستوسفری مورد استفاده قرار گیرد (Morata et al., 2005). نسبت‌های پایین Nb/La در سنگ‌های آندزیتی شورستان (۰/۲۵ تا ۰/۵۰)، بیانگر منشأ گوشته لیتوسفری برای این سنگ‌هاست. علاوه بر این، مذاب‌های منشأ گرفته از گوشته آستوسفری عمیق به وسیله غنی‌شدگی شدید در LREE نسبت به HREE مشابه بازالت‌های جزایر اقیانوسی مشخص می‌شوند. الگوی REE سنگ‌های آندزیتی شورستان (شکل ۸-B) با منشأ گوشته آستوسفری عمیق مطابقت ندارد (Morata et al., 2005).



شکل ۱۳. A: نمودار La/Yb در مقابل Dy/Yb (Yang et al., 2014) و B: نمودار Sm در مقابل Sm/Yb (Zhao and Zhou, 2007) برای گدازه‌های آندزیتی شورستان نشان‌دهنده ذوب در محدوده اسپینل-گارت لروزولیت است.

Fig. 13. A: La/Yb versus Dy/Yb (Yang et al., 2014), and B: Sm versus Sm/Yb (Zhao and Zhou, 2007) for andesitic lavas of the Shourestan, show melting in the spinel-garnet lherzolite field.

ذوب گوشته آبدار می‌تواند به تشکیل ماگماهای آندزیت بازالتی و آندزیت منجر شود (Grove et al., 2012). ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آندزیت‌های شورستان از قبیل نسبت پایین Ta/La (۰/۰۵ تا ۰/۲۵)، Yb/Th (۰/۲۰ تا ۰/۱۲)، Nb/La (۰/۵۰ تا ۰/۲۵) و (Tb/Yb)_N (۱/۱ تا ۱۷/۳۹) و الگوی نسبتا تخت MREE-HREE

ذوب گوشته آبدار می‌تواند به تشکیل ماگماهای آندزیت بازالتی و آندزیت منجر شود (Grove et al., 2012). ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آندزیت‌های شورستان از قبیل نسبت پایین Ta/La (۰/۰۵ تا ۰/۲۵)، Yb/Th (۰/۲۰ تا ۰/۱۲)، Nb/La (۰/۵۰ تا ۰/۲۵) و (Tb/Yb)_N (۱/۱ تا ۱۷/۳۹) و الگوی نسبتا تخت MREE-HREE

هستند (شکل ۸-B) که ذوب گوشته در قلمرو پایداری اسپینل را تأیید می‌کند (Adam et al., 2022). علاوه بر این، نسبت Sm/Yb در گدازه‌های آندزیتی شورستان بین ۱/۹۲ تا ۲/۷۸ است که بیانگر این است که ماگمای سازنده این سنگ‌ها در میدان پایداری اسپینل لرزولیت و در عمق کمتر از ۷۵ کیلومتر تشکیل شده است (Kay, 2001).

بررسی آرایش پوسته‌ای در گدازه‌های منطقه شورستان
آندزیت دومین نوع سنگ آتشفشانی روی زمین بوده و اطلاعات زیادی درباره برهم کنش بین گوشته و پوسته در مناطق فرورانش اثبات می‌کند (Grove and Kinzler, 1986; Li et al., 2013). غیر یکنواختی ترکیبی در ماگمای منشأ گرفته از گوشته در اثر درجات مختلف آلودگی - هضم پوسته‌ای در حین صعود در پوسته قاره‌ای رخ می‌دهد (Song et al., 2008; Ghosh et al., 2019; Dwivedi et al., 2022). ویژگی‌های زمین شیمیایی سنگ‌های آندزیتی شورستان مانند نسبت K_2O/P_2O_5 بیشتر از ۲ (دامنه تغییرات از ۶/۵۶ تا ۱۱/۷۵) همراه با Al_2O_3 بالا (۱۶/۹۷-۱۵/۴۵) و غنی شدگی Th در نمودار چندعنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (شکل ۸-A) می‌تواند به درجات مختلف آلودگی پوسته‌ای یا تشکیل ماگما از یک منشأ گوشته‌ای متاسوماتیزه شده غیر یکنواخت مرتبط باشد. Ta و Th، Nb شاخص‌های زمین شیمیایی مناسبی برای درک ماهیت اجزای پوسته‌ای (هضم و آلودگی) در حین صعود ماگما (برهم کنش ماگما- پوسته) در مناطق فرورانش هستند (Pearce, 2008). نسبت Nb/Th در سنگ‌های بررسی شده (۱/۴۶-۰/۵۶) کمتر از مقدار این نسبت در گوشته اولیه (۸) است. این ویژگی همراه با نسبت La/Nb (۱/۴-۹۹/۰۷)، نشان‌دهنده احتمال آلودگی پوسته‌ای ماگمای سازنده این سنگ‌ها در حین صعود آن به طرف سطح است (Song et al., 2001). علاوه بر این، نسبت‌های بالای Zr/Nb (۹/۲۲-۸۱/۱۰)، Th/Nb (۰/۱-۶۸/۷۹) همراه الگوی عناصر LIL و آنومالی منفی HFSE می‌تواند به وسیله آلودگی

پوسته‌ای توجیه شود (Dwivedi et al., 2022). برای شناخت بهتر رخداد آلودگی پوسته‌ای در ماگمای سازنده گدازه‌های آندزیتی شورستان، از نسبت‌های Nb/Yb در مقابل Th/Yb (Pearce, 2008) استفاده شد. نمونه‌های بررسی شده دارای نسبت Th/Yb بالا بوده و در نمودار یاد شده در نزدیکی محدوده کمان آتشفشانی با تأثیر برهم کنش پوسته‌ای در تشکیل ماگمای والد قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴-A) که توسط نمودار Ce در مقابل Nd (Ahmad and Tarney, 1991) (شکل ۱۴-B) که در آن نمونه‌ها در امتداد خط AFC (هضم- تبلور بخشی) واقع شده‌اند، تأیید می‌شود. علاوه بر این، نسبت‌های Th/Ta (۷/۲۴-۲۹) و Nb/Ta (۹/۱۵-۶۹/۶۶) و Ta/La (۰/۰-۰۲/۰۵) نیز احتمال درجات مختلف آلودگی - هضم پوسته‌ای ماگما در هنگام مهاجرت به سطح زمین را نشان می‌دهد (Dwivedi et al., 2022).

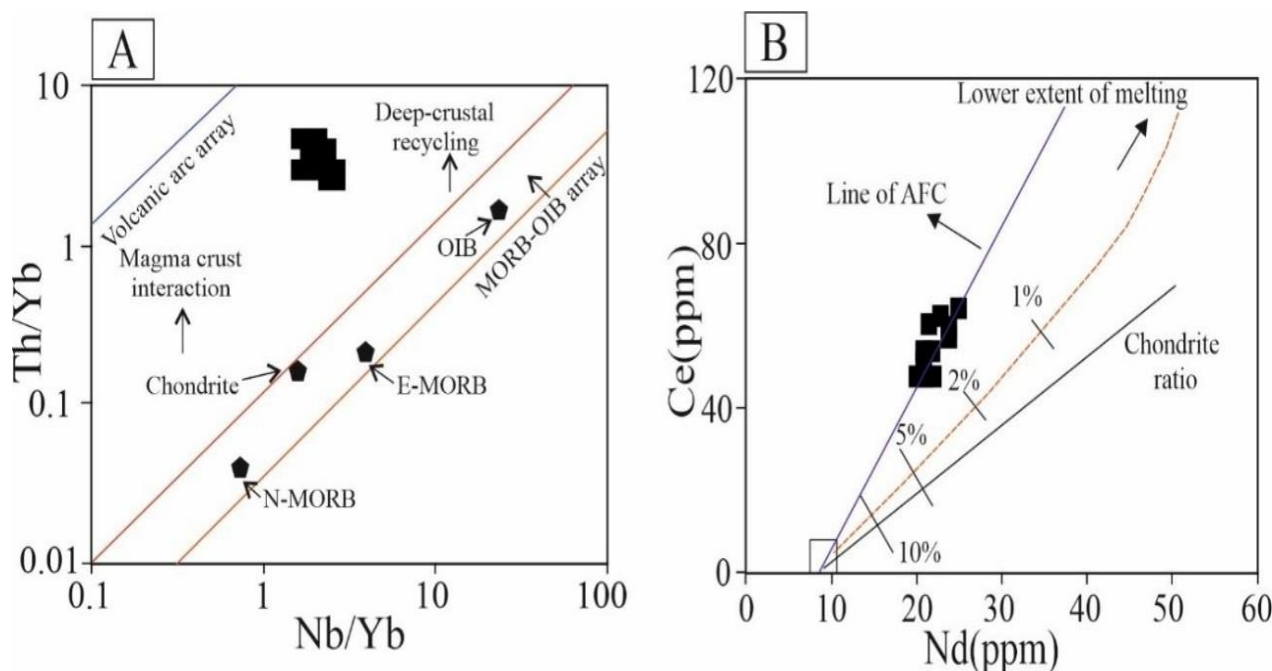
جایگاه زمین ساختی

بررسی‌ها درباره آندزیت‌ها نشان داده است که این سنگ در جایگاه‌های زمین ساختی مختلف تشکیل می‌شود (Liu et al., 2022).

با این وجود، آندزیت‌ها به سه دلیل به ندرت به عنوان شاخص برای شناخت محیط‌های زمین ساختی مختلف مورد توجه قرار می‌گیرند که عبارتند از: ۱- توجه به آندزیت‌های یافت شده در جاهایی غیر از مرزهای هم‌گرایی صفحه‌ها؛ ۲- آندزیت‌ها بر خلاف بازال‌ها و گرانیت‌ها، پتروژنز پیچیده‌تر و منابع ماگمای متغیرتری دارند؛ ۳- بیشتر بررسی‌ها بر روی آندزیت‌های وابسته به فرورانش متمرکز بوده است (Chen and Zhao, 2017; Liu et al., 2022). در دهه گذشته، برخی از پژوهش‌ها، آندزیت‌هایی را گزارش کرده‌اند که در جایگاه‌های زمین ساختی غیر از محیط‌های هم‌گرا تشکیل شده‌اند (Verma and Verma, 2013). پتروژنز آندزیت‌های وابسته به فرورانش مورد بحث بوده و این سنگ می‌تواند در اثر فرایندهای مختلف مانند: ۱- اختلاط

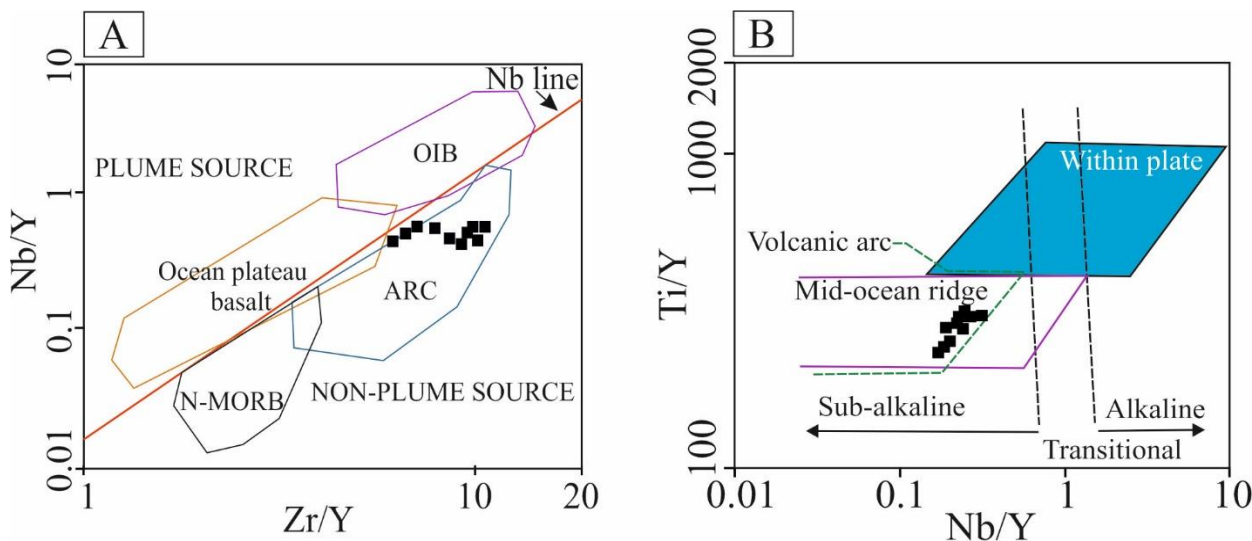
نمی‌گیرند، برای پی بردن به منشأ احتمالی مذاب و شناخت ویژگی‌های آن مناسب هستند (Pearce, 2008). برای تشخیص محیط زمین ساختی تشکیل آندزیت‌های کوه‌زایی با کمک داده‌های زمین شیمیایی، نمودارهای تمایز مختلف پیشنهاد شده است (Verma and Verma, 2013). در نمودار Zr/Y در مقابل Nb/Y (Condie, 2005)، سنگ‌های بررسی شده، در محدوده کمان آتشفشانی قرار می‌گیرند (شکل ۱۵- A). نمودار Nb/Y در مقابل Ti/Y (Pearce, 1982) نیز نشان‌دهنده جایگاه زمین ساختی کمان آتشفشانی و ماهیت ساب‌آلکالن ماگماست (شکل ۱۵- B) که با نتایج به دست آمده از بررسی شیمی پیروکسن‌ها (شکل ۹- A و B) و سنگ کل (شکل ۷- B) همخوانی دارد.

ماگمایی بین مذاب‌های فلسیک و مافیک / اولترامافیک (Reubi and Blundy, 2009)؛ ۲- ذوب جزئی یا هضم، تبلور تفریقی (AFC) از ترکیبات بازیک (Tiepolo et al., 2011)؛ ۳- ذوب بخشی پریدوتیت گوه گوشته‌ای آبدار بالای صفحه فرورونده (Kelemen, 1995; Liu et al., 2022)؛ ۴- ذوب بخشی پوسته اقیانوسی در صفحه فرورونده شده (Carmichael, 2002)، به وجود آید. سیال حاصل آب‌زدایی کانی‌های آبدار (مانند آمفیبول‌ها و کلریت‌ها) نقش کلیدی در منشأ آندزیت‌های کمان که غنی شده در LREE و LILE و تهی شده در HFSE هستند، ایفا می‌کند (Chiaradia et al., 2011).
به دلیل اینکه نسبت‌های HFSE در اثر دگرسانی تحت تأثیر قرار



شکل ۱۴. A: نمودار Nb/Yb در مقابل Th/Yb (Pearce, 2008) نشان‌دهنده قرارگیری نمونه‌ها در محدوده نزدیک به کمان آتشفشانی و برهم‌کنش ماگما- پوسته در حین تکامل ماگمای سازنده است و B: نمودار Nd در مقابل Ce (Ahmad and Tarney, 1991) و موقعیت نمونه‌های شورستان در امتداد خط AFC (هضم- تبلوربخشی).

Fig. 14. A: Nb/Yb versus Th/Yb diagram (Pearce, 2008) indicates the location of the samples close to the volcanic arc field, and magma-crust interaction during the evolution of the magma, and B: Nd versus Ce (Ahmad and Tarney, 1991) and position of Shourestan samples on AFC line (Assimilation-Fractional Crystallization).

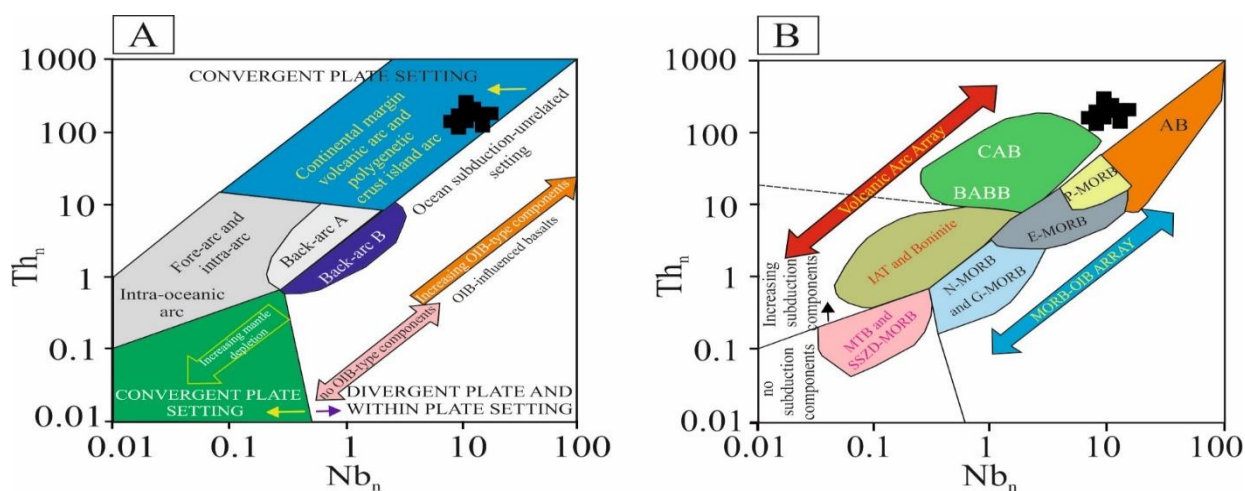


شکل ۱۵. A: نمودار Zr/Y در مقابل Nb/Y (Condie, 2005) و B: نمودار Nb/Y در مقابل Ti/Y (Pearce, 1982) و موقعیت سنگ‌های آندزیتی منطقه شورستان با ترکیب ساب‌آلکالن در محدوده کمان آتشفشانی

Fig. 15. A: Zr/Y versus Nb/Y (Condie, 2005), and B: Nb/Y versus Ti/Y (Pearce, 1982) and position of the Shourestan area andesitic rocks with subalkaline composition in volcanic arc field

جایگاه صفحه‌های هم‌گرا و قلمرو کمان آتشفشانی حاشیه قاره جای می‌گیرند.

از نمودار Th_n در مقابل Nb_n (Saccani, 2015) نیز برای تعیین جایگاه زمین ساختی سنگ‌های آندزیتی شورستان استفاده شد. چنان‌که در شکل ۱۶-A و B مشاهده می‌شود، این سنگ‌ها در



شکل ۱۶. A و B: نمودار Th_n در مقابل Nb_n (Saccani, 2015) برای تمایز جایگاه‌های زمین ساختی مختلف سنگ‌های ماگمایی و موقعیت آندزیت‌های شورستان. بهنجارسازی مقادیر Th و Nb بر مبنای گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) انجام شده است.

Fig. 16. A and B: Th_n versus Nb_n (Saccani, 2015) to discrimination of different tectonic setting of magmatic rocks and position of the Shourestan andesites. Normalization of Th and Nb values done based on primitive mantle (Sun and McDonough, 1989).

آنها ۶/۶ تا ۸/۷ کیلو بار محاسبه شد. بر اساس نتایج تجزیه ریز کاو الکترونی، پیروکسن‌ها در رده پیروکسن‌های کلسیم- منیزیم- آهن دار قرار دارند. ترکیب شیمیایی پیروکسن بیانگر ماهیت ساب‌آلکانل نمونه‌ها و جایگاه کمان آتشفشانی است. میزان آنورتیت موجود در پلاژیو کلازاها (۵۲ تا ۶۶ درصد) و عدد منیزیم کلینوپيروکسن‌ها (۷۲ تا ۷۸)، بیانگر فوگاسیته پایین اکسیژن و مقدار آب کم (تفریق خشک) در هنگام تشکیل این کانی است. نمودار چند عنصری بهنجار شده با گوشته اولیه برای گدازه‌های آندزیتی کالک‌آلکانل منطقه شورستان، بی‌هنجاری مثبت عناصر ناسازگار بزرگ یون برای عناصری مانند Cs, Rb, Th, U, K و بی‌هنجاری منفی عناصر Ti, Nb, Ta و حدودی P را نشان می‌دهد. وجود بی‌هنجاری منفی Ti, Nb, Ta و در روند تغییرات عناصر کمیاب نمونه‌های مورد بررسی، بیانگر تشکیل این سنگ‌ها در مناطق فرورانش است. میزان کل عناصر نادر خاکی در گدازه‌های شورستان ۱۲۶/۳۲ تا ۱۴۵/۰۱ ppm بوده و الگوی یکنواخت با غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE نشان می‌دهند. ویژگی‌های زمین شیمیایی سنگ‌های آندزیتی شورستان مانند نسبت K_2O/P_2O_5 بیشتر از ۲ (۶/۵۶ تا ۱۱/۷۵) همراه با Al_2O_3 بالا (۱۶/۹۷-۱۵/۴۵) و غنی‌شدگی Th می‌تواند به درجات مختلف آلودگی پوسته‌ای یا تشکیل ماگما از یک منشأ گوشته‌ای متاسوماتیزه شده مرتبط باشد. علاوه بر این، مقادیر پایین نسبت Nb/Th در سنگ‌های بررسی شده (۱/۴۶-۰/۵۶) نسبت به گوشته اولیه (۸) همراه با نسبت La/Nb (۹۹/۰۷-۱/۴)، احتمال رخداد آلودگی پوسته‌ای ماگمای سازنده این سنگ‌ها در حین صعود را تقویت می‌کند. نسبت $(La/Yb)_n$ در گدازه‌های آندزیتی شورستان بین ۹/۹۵ تا ۱۲/۴۲ متغیر است که کمتر از مقدار آن در منشأ گوشته‌ای گارنت‌دار (>20) است. همچنین، بررسی نسبت‌های برخی عناصر کمیاب دیگر شامل $(Gd/Yb)_n$ (۴۴/۸۴-۱/۱) و (La/Sm) (۵۳/۵۵-۶/۶) در سنگ‌های بررسی شده، بیانگر غنی‌شدگی LREE بیش از MREE است که با قلمرو ذوب در محدوده اسپینل، متمایل به گارنت لرزولیت مطابقت دارد.

به طور کلی، ویژگی‌های زمین شیمیایی سنگ‌های بررسی شده، مانند نسبت بالای LILE/HFSE و LREE/HREE که قبلاً به آن اشاره شد و همچنین نمودارهای مختلف تمایز زمین ساختی، بیانگر جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای برای آنهاست (Castillo, 2006). متاسوماتیسم مرتبط با فرورانش باعث غنی‌شدگی گوه گوشته‌ای از LILE و LREE و صعود ماگما از میان پوسته قاره‌ای، باعث رخداد آلودگی شده است. بر اساس داده‌های زمین شیمیایی این پژوهش و نتایج پژوهش‌های قبلی درباره ماگماتیسیم شرق ایران، می‌توان چنین پیشنهاد کرد که فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نتوتیس به زیر فلات ایران، سبب اضافه شدن سیالات/ مذاب‌های منشأ گرفته از اسلب به درون گوشته لیتوسفری زیرقاره‌ای شده است. در مرحله بعد، برگشت به عقب صفحه لیتوسفر اقیانوسی و بالاآمدگی آستوسفری به درون گوشته سبب نازک‌شدگی لیتوسفری، ذوب‌بخشی گوشته لیتوسفری زیرقاره‌ای متاسوماتیزه شده و ایجاد ماگماتیسیم وابسته به فرورانش شده است. سپس، مذاب‌های منشأ گرفته از گوشته لیتوسفری زیرقاره‌ای در حین صعود با پوسته قاره‌ای دچار برهم‌کنش (فرایند هضم- تبلوربخشی؛ AFC) شده است.

نتیجه‌گیری

سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی متعلق به ترشیری در منطقه شورستان در غرب سریشه (خراسان جنوبی) با گسترش وسیع رخمون دارد. بافت غالب این سنگ‌ها، پورفیری با خمیره میکروولیتی و گاهی گلوپورفیری است. کانی‌های سازنده شامل پلاژیو کلاز و پیروکسن است که به صورت فنوکریست و همچنین بلورهای ریز در زمینه سنگ حضور دارند. فنوکریست‌های پلاژیو کلاز دارای منطقه‌بندی و بافت غربالی بوده و در برخی نمونه‌ها، آثار خوردگی، گردشدگی و حاشیه واجذبی دیده می‌شود که بیانگر عدم تعادل در حین انجماد ماگماست. با بهره‌گیری از دما- فشارسنج پلاژیو کلاز- مذاب، دمای به دست آمده برای تبلور پلاژیو کلازها در محدوده ۱۱۷۶ تا ۱۱۹۰ و فشار در زمان تبلور

همچنین نمودارهای مختلف تمایز زمین‌ساختی، بیانگر جایگاه حاشیه فعال قاره‌ای برای آنهاست.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی آندزیت‌های شورستان از قبیل نسبت پایین Nb/La، (۰/۰-۱۲/۲۰) Yb/Th، (۰/۰-۰۲/۰۵) Ta/La و (۰/۰-۲۵/۵۰) Nb/Zr و بیانگر ذوب آبدار گوشته لیتوسفری و نسبت بالای LILE/HFSE، LREE/HREE و

References

- Adam, M.M.A., Lv, X., Fathy, D., Abdel Rahman, A.R.A., Ali, A.A., Mohammed, A.S., Farahat, E.S. and Sami, M., 2022. Petrogenesis and tectonic implications of Tonian island arc volcanic rocks from the Gabgaba Terrane in the Arabian-Nubian Shield (NE Sudan). *Journal of Asian Earth Sciences*, 223: 105006. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105006>
- Ahmad, T. and Tarney, J., 1991. Geochemistry and petrogenesis of Garhwal volcanics: implications for evolution of the north India lithosphere. *Precambrian Research*, 50(1–2): 69–88. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90048-F](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90048-F)
- Anderson, A.T., 1980. Significance of hornblende in calc-alkaline andesites and basalts. *American Mineralogist*, 65(9–10): 837–851. Retrieved February 28, 2023 from <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/65/9-10/837/41189/Significance-of-hornblende-in-calc-alkaline?redirectedFrom=fulltext>
- Arslan, M. and Aslan, Z., 2006. Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 177–193. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.03.002>
- Bailey, J.C., 1981. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. *Chemical Geology*, 32(1–4): 139–154. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(81\)90135-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(81)90135-2)
- Beier, C., Haase, K.M., Brandl, P.A. and Krumm, S. K., 2017. Primitive andesites from the Taupo Volcanic Zone formed by magma mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(5): 33. <https://doi.org/10.1007/s00410-017-1354-0>
- Berndt, J., Koepke, J. and Holtz, F., 2005. An experimental investigation of the influence of water and oxygen fugacity on differentiation of MORB at 200 MPa. *Journal of Petrology*, 46(1): 135–167. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh066>
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, volume 2, pp.63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Cai, P.R., Wang, T., Wang, Z.Q., Li, L.M., Jia, J.L. and Wang, M.Q., 2020. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks from eastern Inner Mongolia, NE China: Implications for igneous petrogenesis, tectonic setting, and geodynamic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 362–363: 105480. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105480>
- Carmichael, I.S.E., 2002. The andesite aqueduct: perspectives on the evolution of intermediate magmatism in west-central (105–99° W) Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 641–663. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0370-9>
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51: 257–268. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-0257-7>
- Chahkandinejad, M., 2015. Petrology of Tertiary volcanic rocks in Asfich area (southwest of Sarbisheh) with emphasis on their economic potential. M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran. 90 pp. (in Persian with English abstract)
- Chen, L. and Zhao, Z.F., 2017. Origin of continental arc andesites: The composition of source rocks is the key. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145(Part 1): 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.04.012>
- Cheng, Zh., Guo, Zh., Dingwell, D.B., Li, X., Zhan, M., Liu, J., Zhao, W. and Lei, M., 2020. Geochemistry and petrogenesis of the post-collisional high-K calc-alkaline magmatic rocks in Tengchong, SE Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 193: 104309. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104309>
- Chiaradia, M., Müntener, O. and Beate, B., 2011. Enriched basaltic andesites from midcrustal fractional crystallization, recharge, and assimilation (Pilavo Volcano, Western Cordillera of Ecuador). *Journal of Petrology*, 52(6): 1107–1141. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr020>
- Claeson, D.T. and Meurer, W.P., 2004. Fractional crystallization of hydrous basaltic “arc-type” magmas and the formation of amphibole-bearing gabbroic cumulates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147:

- 288–304.
<https://doi.org/10.1007/s00410-003-0536-0>
- Condie, K.C., 2005. TTG and adakites: are they both slab melts? *Lithos*, 80(1–4): 33–44.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.11.001>
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen and Unwin, London, 450 pp.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>
- Davidson, J., Turner, S. and Plank, T., 2013. Dy/Dy*: Variations arising from mantle sources and petrogenetic processes. *Journal of Petrology*, 54(3): 525–537.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egs076>
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1991. *An introduction to the rock forming minerals*. Longman Scientific and Technical, New York, 528 pp.
- Dwivedi, S.K., Jafri, S.H., Srinivasa Sarma, D., Tripathi, P., Parthasarathy, G. and Pandey, O.P., 2022. Mineral chemistry, geochemistry and geophysical investigations of Simlipal volcanics from Eoarchean Singhbhum Craton (Eastern India): Geodynamic implications of pervasive plume–lithosphere interaction. *International Journal of Earth Sciences*, 111: 1149–1184.
<https://doi.org/10.1007/s00531-022-02170-9>
- Erdmann, S., Martel, C., Pichavant, M. and Kushnir, A., 2014. Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167: 1016.
<https://doi.org/10.1007/s00410-014-1016-4>
- Foley, S.F. and Wheller, G.E., 1990. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks: the role of residual titanites. *Chemical Geology*, 85(1–2): 1–18.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90120-V](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90120-V)
- France, L., Koepke, J., Ildefonse, B., Cichy, S. B. and Deschamps, F., 2010. Hydrous partial melting in the sheeted dike complex at fast spreading ridges: Experimental and natural observations. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160: 683–704.
<https://doi.org/10.1007/s00410-010-0502-6>
- Ghosh, R., Vermeesch, P., Gain, D. and Mondal, R., 2019. Genetic relationship among komatiites and associated basalts in the Badampahar greenstone belt (3.25–3.10 Ga), Singhbhum Craton, Eastern India. *Precambrian Research*, 327: 196–211.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.03.013>
- Goodarzi, M., Mohammadi, S.S. and Zarrinkoub, M.H., 2014. Petrography, geochemistry and tectonic setting of Salmabad Tertiary volcanic rocks, southeast of Sarbisheh, eastern Iran., *Journal of Economic Geology*, 6(2): 217–234. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ECONG.V6I2.24938>
- Grove, T.L. and Kinzler, R.J., 1986. Petrogenesis of andesites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 417–454.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002221>
- Grove, T.L., Till, C.B. and Krawczynski, M.J., 2012. The role of H₂O in subduction zone magmatism. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 413–439.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310>
- Islamipannah, A., 2018. *Petrology of Tertiary volcanic rocks in Shourestan area (west of Sarbisheh), Southern Khorasan*. M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran, 65 pp. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Farmer, L., Saadat, S., Malekezadeh, A., 2011. Review of age, Rb–Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block, Eastern Iran. *Geopersia*, 1(1): 19–36.
<https://doi.org/10.22059/jgeope.2011.22162>
- Kay, S.M., 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *Geological Society of America Today*, 11(3): 4–9.
[https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2001\)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2001)011<0004:CAODLT>2.0.CO;2)
- Kelemen, P., 1990. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic liquid I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite. *Journal of Petrology*, 31(1): 51–98.
<https://doi.org/10.1093/petrology/31.1.51>
- Kelemen, P.B., 1995. Genesis of high Mg# andesites and the continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120: 1–19.
<https://doi.org/10.1007/BF00311004>

- Kudo, A.M. and Weill, D.F., 1970. An igneous plagioclase thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 25: 52–65.
<https://doi.org/10.1007/BF00383062>
- Kuscu, G.G. and Geneli, F., 2010. Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepekey volcanic complex. *International Journal of Earth Sciences*, 99: 593–621.
<https://doi.org/10.1007/s00531-008-0402-4>
- Kvassnes, A.J.S., Anita Hetland Strand, A.H., Moen-Eikeland, H. and Pedersen, R.B., 2004. The Lyngen Gabbro: the lower crust of an Ordovician Incipient Arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 358–379.
<https://doi.org/10.1007/s00410-004-0609-8>
- Le Bas, M.J., 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *American Journal of Science*, 260(4): 267–288. Retrieved February 28, 2023 from <https://www.ajsonline.org/content/260/4/267>
- Le Maitre, R.W., 2002. *Igneous rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences. Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*, Cambridge University Press, Cambridge, 236 pp.
- Li, X.W., Mo, X.X., Yu, X.H., Ding, Y., Huang, X.F., Wei, P. and He, W.Y., 2013. Petrology and geochemistry of the early Mesozoic pyroxene andesites in the Maixiu Area, West Qinling, China: Products of subduction or syn-collision? *Lithos*, 172–173: 158–174.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.010>
- Liu, X., Zhang, Q. and Zhang, Ch., 2022. Identification of the original tectonic setting for oceanic andesite using discrimination diagrams: An approach based on global geochemical data synthesis. *Journal of Earth Science*, 33(3): 696–705.
<https://doi.org/10.1007/s12583-021-1507-y>
- Machado, A., Chemale, Jr.F., Conceicao, R.V., Kawaskita, K., Morata, D., Oteiza, O. and Schmus, W.R.V., 2005. Modeling of subduction components in the genesis of the Meso-Cenozoic igneous rocks from the South Shetland Arc, Antarctica. *Lithos*, 82(3–4): 435–453.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.026>
- Malekian Dastjerdi, M., Mohammadi, S.S., Nakhaei, M. and Zarrinkoub, M.H., 2017. Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks of the Kangan area, northeast of Sarbisheh, southern Khorasan. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 553–568. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v8i2.54029>
- Manikyamba, C., Ray, J.S., Ganguli, S., Singh, M.R., Santosh, M., Saha, A. and Satyanaraynan, M., 2015. Boninitic metavolcanic rocks and island arc tholeiites from the older metamorphic group (OMG) of Singhbhum craton, eastern India: Geochemical evidence for Archean subduction process. *Precambrian Research*, 271: 138–159.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.028>
- Mohammadi, S.S. and Nakhaei, M., 2022. Geometric properties, petrography, geochemistry and tectonic setting of columnar andesites of Goorid quarry rubble mine, west of Sarbisheh city (South Khorasan). *Petrological Journal*, 13(3): 33–62.
<https://doi.org/10.22108/ijp.2022.133573.1277>
- Mohammadi, S.S., 2012. Geology and Petrology of Tertiary volcanic rocks of Sarbisheh perlite mine area (eastern Iran) and industrial applications. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 59–76. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/ECONG.V4I1.13393>
- Mohammadi, S.S., Bayani, R., Nakhaei, M., Chung, S.L. and Zarrinkoub, M.H., 2017. Petrography, mineral chemistry, geochemistry and tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in Shoushk area (east of Sarbisheh), Southern Khorasan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(1): 167–186. (in Persian with English abstract) Retrieved January 20, 2023 from <http://ijcm.ir/article-1-50-fa.html>
- Mohammadi, S.S., Chung, S.L., Nakhaei, M. and Zarrinkoub, M.H., 2021. Thermobarometry and origin of andesitic lavas in Zoolesk area based on mineral chemistry (northeast of Sarbisheh, east of Iran). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 29(2): 479–494.
<https://doi.org/10.52547/ijcm.29.2.479>
- Morata, D., Oliva, C., De La Cruz, R. and Suárez, M., 2005. The Bandurrias gabbro: Late Oligocene alkaline magmatism in the Patagonian Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2): 147–162.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.09.001>

- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1989. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Journal*, 14(5): 198–221.
<https://doi.org/10.2465/minerj.14.198>
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A.K., Ginzburg, I.V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Aoki, K. and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 52(367): 535–550.
<https://doi.org/10.1180/minmag.1988.052.367.15>
- Namnabat, E., Ghorbani, M., Nakashima, K., Tabatabaei, S.H. and Tavakoli, N., 2021. Mineral chemistry and Petrology of the Andarian volcanic rocks: insight to the Ahar-Arasbaran magmatic zone, Northwestern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 1922.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-08246-1>
- Nazari, H. and Salamati, R., 1999. Geological map of Sarbisheh, scale 1:100000. Geological survey of Iran.
- Nazari, Z., 2011. Geology and Petrology of volcanic rocks in northwest of Sarbisheh (east of Iran). M.Sc. Thesis, University of Birjand, Birjand, Iran. 114 pp. (in Persian with English abstract)
- Neave, D.A. and Putirka, K.D., 2017. A new clinopyroxene-liquid barometer, and implications for magma storage pressures under Icelandic rift zones. *American Mineralogist*, 102: 777–794.
<https://doi.org/10.2138/am-2017-5968>
- Nisbet, E.G. and Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition of mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 149–160.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00398776>
- Ohanian, T. and Tatavosian, S., 1978. Geological map of Birjand, scale 1:100000. Geological survey of Iran.
- Omidianfar, S., Monsef, I., Rahgoshay, M., Shafaii Moghadam, H., Cousens, B., Ming Chen, M., Rajabpour, Sh. And Zheng, J., 2022. Neo-Tethyan subduction triggered Eocene–Oligocene magmatism in eastern Iran. *Geological Magazine*.
<https://doi.org/10.1017/S0016756822001066>
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H. Y., Chu, C.H., Lee, H.Y. and Lo, C.H., 2013. Eocene–Oligocene post-collisional magmatism in the Lut–Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180–181: 234–251.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.009>
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S. Thorpe (Editor), *Andesites: Orogenic andesites and related rocks*. John Wiley and Sons, Chichester, England, pp. 528–548. Retrieved January 20, 2023 from <https://www.researchgate.net/publication/304749002>
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1–4): 14–48.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce, J.A., Baker, P.E., Harvey, P.K. and Luff, I.W., 1995. Geochemical Evidence for Subduction Fluxes, Mantle Melting and Fractional Crystallization Beneath the South Sandwich Island Arc. *Journal of Petrology*, 36 (4): 1073–1109.
<https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.1073>
- 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.
<https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Piccardo, G. B. and Gaurneri, L., 2011. Gabbro-norite cumulate from strongly depleted MORB in the Alpine-Apennine ophiolites. *Lithos*, 124(3–4): 200–213.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.01.017>
- Putirka, K.D., 2005. Igneous thermometers and barometers based on plagioclase+ liquid equilibria: Tests of some existing models and new calibrations. *American Mineralogist*, 90(2–3): 336–346.
<https://doi.org/10.2138/am.2005.1449>
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 61–120.
<https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Reubi, O. and Blundy, J., 2009. A dearth of intermediate melts at subduction zone volcanoes and the petrogenesis of arc andesites. *Nature*, 461: 1269–1273.

- <https://doi.org/10.1038/nature08510>
- Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160: 45–66.
<https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>
- Saccani, E., 2015. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic. *Geoscience Frontiers*, 6(4): 481–501.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.03.006>
- Sayari, M. and Sharifi, M., 2014. SCG: A computer application for single clinopyroxene geothermobarometry. *Italian Journal of Geosciences*, 133(2): 315–322.
<https://doi.org/10.3301/IJG.2014.01>
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization PT estimations. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)*, 119(1): 55–60.
<https://doi.org/10.1080/11035899709546454>
- Song, X.Y., Qi, H.W., Robinson, P.T., Zhou M.F., Cao, Z.M. and Chen, L.M., 2008. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunan, Southwestern China. *Lithos*, 100(1–4): 93–111.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.023>
- Song, X.Y., Zhou, M.F., Hou, Z.Q., Cao, Z.M., Wang, Y.L. and Li, Y., 2001. Geochemical constraints on the Mantle source of the Upper Permian Emeishan Continental Flood Basalts, Southwestern China. *International Geology Review*, 43(3): 213–225.
<https://doi.org/10.1080/00206810109465009>
- Streck, M.J., Leeman, W.P. and Chesley, J., 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: a product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. *Geology*, 35(4): 351–354.
<https://doi.org/10.1130/G23286A.1>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematic of ocean basalts: implications for mantle composition and process. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313–345.
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Teng, X. and Santosh, M., 2015. A long-lived magma chamber in the Paleoproterozoic North China Craton. Evidence from the Damiao gabbro-anorthosite suites. *Precambrian Research*, 256: 79–101.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.018>
- Tiepolo, M., Tribuzio, R. and Langone, A., 2011. High-Mg andesite petrogenesis by amphibole crystallization and ultramafic crust assimilation: evidence from Adamello Hornblendites (Central Alps, Italy). *Journal of Petrology*, 52(5): 1011–1045.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egr016>
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 94(1): 134–156.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2)
- Verma, S.P. and Verma, S.K., 2013. First 15 probability-based multidimensional tectonic discrimination diagrams for intermediate magmas and their robustness against post emplacement compositional changes and petrogenetic processes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22(6): 931–995.
<https://doi.org/10.3906/yer-1204-6>
- Whitney, D. and Evans, B.D., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
<https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilson, M., 2007. *Igneous Petrogenesis*. Springer Verlag, London, 466 pp.
- Yang, Q.Y., Santosh, M., Shen, J.F. and Li, S.R., 2014. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiadong Peninsula. *Gondwana Research*, 25(4): 1445–1468.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.003>
- Yang, W. and Li, Sh., 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102(1–2): 88–117.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.09.018>
- Yücel, C., Arslan, M., Temizel, I. and Abdioğlu, E.,

2014. Volcanic facies and mineral chemistry of Tertiary volcanics in the northern part of the Eastern Pontides, northeast Turkey: implications for pre-eruptive crystallization conditions and magma chamber processes. *Mineralogy and Petrology*, 108: 439–467.
<https://doi.org/10.1007/s00710-013-0306-2>
- Zhao, J.J. and Zhou, M.F., 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152(1–2): 27–47.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.09.002>
- Zhao, X., Tian, L., Sun, J., Huang, P., Li, Y. and Gao, Y., 2021. Petrogenesis of volcanic rocks from Eastern Manus Basin: indications in mineralogy and geochemistry. *Journal of Oceanology and Limnology*, 39(1): 89–109.
<https://doi.org/10.1007/s00343-020-9308-1>
- Zulkarnain, I., 2009. Geochemical signature of Mesozoic volcanic and granitic rocks in Madina Regency area, North Sumatra, Indonesia, and its tectonic implication. *Jurnal Geologi Indonesia (The Indonesian Journal of Geology)*, 4(2): 117–131. Retrieved February 28, 2023 from <https://media.neliti.com/media/publications/66712-EN-geochemical-signature-of-mesozoic-volcan.pdf>