



Research Article

Petrography and geochemistry of volcanic rocks of the Natour area, southwest of Ardabil province

Gholamreza Ahmadzadeh¹, Zahra Hassani Soughi^{1*} , Fatemeh Hassani Soughi¹, Javad Shahalinejad², Reza Zamani³

1-Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2-Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3-Department of Geology, Meshkinshahr Branch, Islamic Azad University, Meshkinshahr, Iran

Received: 14 Aug 2025 Accepted: 10 Dec 2025

Extended Abstract

Introduction

The Natour area is located approximately 33 km south of Kowsar city, Ardabil province, northwestern of Iran. Based on the division of structural zones of Iran (Alavi, 1991), this area is considered a part of the Alborz magmatic arc. The Alborz sedimentary-structural zone includes the northern highlands of the Iranian plate, which continues in a compound anticline with a general east-west trend from Azarbaijan to Khorasan. Many of the stratigraphic units of Alborz and Central Iran are similar in terms of facies and formation conditions, so that Alborz can be considered as marginal folds of Central Iran, in whose formation the collision of the two Iranian and Turanian plates and its consequences played a fundamental role (Aghanbati, 2004). Alborz is more similar to Central Iran, especially in the southern slope, but there are some differences in the northern slope (Stocklin, 1968). The Alborz magmatic arc encompasses a wide range of tectonic environments, such as normal arc, back-arc, and post-collisional and extensional environments. The Alborz magmatic cycle during the Eocene-Oligocene has resulted in the formation of a wide range of intrusive igneous, subvolcanic, and volcanic-sedimentary rocks. These rocks show calc-alkaline and high-k calc-alkaline and shoshonitic magmatic series. These units include granitic, granodioritic intrusions, basaltic, andesitic, dacite, rhyolite lavas, and their associated tuffs. In the present study, an attempt is made to investigate the geological, petrographic, and geochemical characteristics of volcanic rocks in the Natour area. Also, in this research, based on the results of chemical analyses of major, trace, and rare earth elements, has determined the composition of the volcanic rocks of the area, the parent magma, and their tectonic setting.

Materials and Methods

In general, this research was conducted in two parts: field and laboratory. First, in the field part, a visit to the study area was carried out to investigate the condition of volcanic rocks, and in the next stage, samples of these rocks were taken for laboratory studies. In the laboratory part, a number of thin sections were prepared from the collected samples and then petrographic studies were performed on them. Also, in order to conduct geochemical studies, 12 fresh and less altered samples of these volcanic rocks were selected and analyzed at the Zanjan Zarazma Company. The major elements were analyzed by XRF method and the trace and rare earth elements were analyzed by ICP-MS method.

Citation: Ahmadzadeh, Gh.R. et al, 2026. Petrography and geochemistry of volcanic rocks of the Natour area, *Res. Earth. Sci.* 17(1), (25-42) DOI: 10.48308/esrj.2026.107027

* Corresponding author E-mail address: z.hassanisoughi@uma.ac.ir



Results and Discussion

Based on geological location, the Natour area is located on the 1:100000 geological map of the Kivi sheet (Hajalilou and Rezaei, 2001). The most important rock units of the study area are related to the Eocene, Oligocene, and Quaternary.

Eocene rock units in the area include E^{ab} , E^{ct} , E^{an} , and E^{tr} . The E^{ab} unit is the oldest Eocene rock unit in the area and is often observed in the northeast of the Natour area. This unit consists of gray basaltic andesite. The E^{ct} unit consists of lithic crystalline tuff in gray to reddish gray color and is mostly spread in the central part of Natour area. In some places, this unit itself has interlayers of pyroclastic units such as tuff, lithic tuff, and lithic tuff andesite. The E^{an} unit includes porphyry andesite to porphyry basaltic andesite, ranging in color from purple to gray, and is often exposed in the southwest of the Natour area. The youngest Eocene unit in the study area includes E^{tr} with trachytic composition and it is often visible in the area in bright color. The trachyte unit is mainly visible in the southwestern part of the Natour area. The Oligocene rock units in the area consist of the O_{1r}^c unit, which contains heterogeneous conglomerate (in red) and is usually seen in the north and northeast of the area and discontinuously overlying Eocene volcanic units. According to petrographic studies, the volcanic rocks of the Natour area mainly show a composition of basaltic andesite, andesite, and trachyte. Basaltic andesite rocks have porphyritic and glomeroporphyritic textures, composed of the main minerals plagioclase and pyroxene in a fine-crystalline matrix. Andesite rocks contain the main minerals plagioclase, amphibole, and biotite and have a porphyritic texture in a fine-crystalline matrix. Trachyte rocks also have a porphyritic texture, consisting of alkali feldspar, plagioclase, and biotite minerals in a fine-crystalline matrix. To determine the composition of volcanic rocks in the Natour area, the total alkali (Na_2O+K_2O) versus silica (SiO_2) diagram (Middlemost, 1994) and the Nb/Yb versus Zr/Ti diagram (Pearce, 1996) were used. In the total alkali versus silica diagram, the samples from the study area are in the range of rocks with a composition of andesite, basaltic andesite, basaltic trachyandesite, trachyandesite, trachyte, and trachydacite. In the Nb/Yb versus Zr/Ti diagram, samples from the Natour area are located in the range of andesite, basaltic andesite, trachyandesite, and alkali basalt rocks. In the Al_2O_3 - K_2O - Na_2O ternary diagram, samples from the Natour area are located in the metaluminous and peraluminous realms. Also, to determine the alumina saturation index of volcanic rocks in the study area, the diagram presented by Shand (1943) was used. In this diagram, the metaluminous, peraluminous, and peralkaline ranges are distinguished. According to this diagram, samples from the Natour area fall into two ranges: metaluminous and peraluminous. The magmatic series of volcanic rocks in the Natour area was initially determined using the diagram of total alkalis (Na_2O+K_2O) versus silica (SiO_2) (Irvine and Baragar, 1971). In this diagram, two ranges of alkaline and subalkaline are separated. Based on this diagram, all samples in the study area belong to the alkaline range. Then, Th/Yb versus Ta/Yb (Pearce, 1983), Co versus Th (Hastie et al, 2007), and SiO_2 versus K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976) diagrams were used to determine the magmatic series of the igneous rocks of the area. These diagrams are divided into the ranges of tholeiitic, calc-alkaline, high-k calc-alkaline, and shoshonitic magmatic series. Based on the Th/Yb versus Ta/Yb diagram, most of the samples in the study area are located in the calc-alkaline magmatic series. According to the Co versus Th diagram, the samples from the Natour area are within the range of calc-alkaline and high-k calc-alkaline and shoshonitic magmatic series. According to the SiO_2 versus K_2O diagram, the samples from the study area are mainly located in the range of shoshonitic magmatic series. The trend of changes in trace and rare earth elements in samples of volcanic rocks from the Natour area was determined using spider diagrams. In this regard, samples from the study area were normalized to the primitive mantle (Sun and McDonough, 1989) and chondrite (Nakamura, 1974). The spider diagram of the samples normalized to the primitive mantle shows a positive anomaly in large ion lithophile elements (LILE) such as Cs, K, and Pb, and a negative anomaly in high field strength stability elements (HFSE) such as Nb, Zr, and Ti. Positive anomalies of LILE elements and negative anomalies of HFSE elements are characteristics of arc-related regions, whose formation can be associated with subduction zones and contamination of magma with continental crust (Wilson, 1989; Rollinson, 1993; Thuy et al, 2004; Kuscu and Geneli, 2010; Yu et al, 2017). In the spider diagram of samples normalized to chondrite, enrichment of LREE relative to HREE can be identified. Also, a relatively weak depletion of the Ce element is observed in this diagram. The enrichment of LREE relative to HREE can indicate the formation of volcanic rocks in subduction zones or the contamination of magma by crustal materials (Kuster and Harms, 1998; Ulmer, 2001; Srivastava and Singh, 2004;


Peccerillo et al, 2004; Goss and Kay, 2009). The relatively weak depletion of Ce element can most likely be due to the high mobility of this element during the subduction process (Hoyle et al, 1984). Using $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ and Y-Zr diagrams (Muller et al, 1992), the tectonic setting of igneous rocks can be interpreted. In these diagrams, the within plate setting and the arc-related setting are separated. Based on these diagrams, all samples of volcanic rocks in the Natour area are placed in the arc-related tectonic setting. To determine the tectonic setting of the volcanic rocks of the Natour area, the Nb/Yb versus Th/Yb diagram (Pearce, 2008) was also used, in which the samples from the study area are located in the tectonic setting associated with volcanic arcs. To distinguish oceanic arc rocks from continental arc and post-collisional arc rocks, the ternary diagram $\text{TiO}_2/100\text{-La-Hf}\times 10$ (Muller et al, 1992) can be used. According to this diagram, samples of volcanic rocks from the Natour area are often located in the settings of continental and post-collisional arcs. Also, the $\text{Zr}\times 3\text{-Nb}\times 50\text{-Ce/P}_2\text{O}_5$ ternary diagram (Muller et al, 1992) was used to separate continental arc rocks from post-collisional arc rocks. According to this diagram, the samples related to volcanic rocks of the study area are mainly located in the post-collisional arcs.

Conclusion

Petrographically, the volcanic rocks of the Natour area represent a composition of basaltic andesite, andesite, and trachyte. These rocks are located in the chemical classification diagrams in the range of andesite, basaltic andesite, trachyandesite, trachyte, trachydacite, and alkali basalt. Volcanic rocks of the Natour area are located in the metaluminous and peraluminous ranges on alumina saturation index determination diagrams. In terms of magmatic series, these rocks represent high-k calc-alkaline and shoshonitic magmatic series. Spider diagrams related to volcanic rocks of the Natour area indicate a positive anomaly in large ion lithophile elements (LILE) and a negative anomaly in high field strength elements (HFSE) and enrichment of LREE relative to HREE, which can indicate the formation of volcanic rocks of the study area in subduction zones or contamination of magma by crustal materials. According to tectonic setting diagrams, the volcanic rocks of the study area were developed in arc-related tectonic settings. Also, in the diagrams of the separation of oceanic arc rocks from continental arc and post-collisional arc rocks, they are placed in the position of post-collisional arcs.

Keywords: Geochemistry, Petrography, Volcanic arc rocks, Natour, Ardabil.

سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناتور، جنوب‌غرب استان اردبیل

غلامرضا احمدزاده^۱، زهرا حسنی سوقی^{۱*} , فاطمه حسنی سوقی^۱، جواد شاه‌علی‌نژاد^۲، رضا زمانی^۳

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، واحد مشگین‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مشگین‌شهر، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

چکیده گسترده

مقدمه

منطقه ناتور در فاصله تقریباً ۳۳ کیلومتری جنوب شهرستان کوثر، استان اردبیل، شمال‌غرب ایران واقع شده است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران توسط علوی (Alavi, 1991)، بخشی از کمان ماگمایی البرز محسوب می‌شود. پهنه رسوبی-ساختاری البرز شامل بلندی‌های شمال‌صفحه ایران است که به شکل تاقدیسی مرکب با راستای عمومی شرقی-غربی از آذربایجان تا خراسان ادامه دارد. بسیاری از واحدهای چینه‌ای البرز و ایران مرکزی از دیدگاه رخساره و شرایط تشکیل مشابه هستند، به گونه‌ای که البرز را می‌توان چین‌های حاشیه‌ای ایران مرکزی دانست که در شکل‌گیری آن، برخورد دو صفحه ایران و توران و پیامدهای آن نقش اساسی داشته‌اند (Aghanbati, 2004). همسانی البرز با ایران مرکزی به‌ویژه در دامنه جنوبی بیشتر است، ولی در دامنه شمالی تفاوت‌هایی دارد (Stocklin, 1968). کمان ماگمایی البرز محدوده‌ای گسترده و ترکیبی از محیط‌های زمین‌ساختی از قبیل کمان نرمال، پشت کمانی و محیط‌های پس از برخورد و کششی را شامل می‌شود. چرخه ماگمایی البرز در زمان ائوسن-الیگوسن، سبب تشکیل مجموعه گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین نفوذی، نیمه‌آتشفشانی و همچنین مجموعه سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی شده است. این سنگ‌ها سری‌های ماگمایی کالک‌آلکان و کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی نشان می‌دهند. این واحدها، نفوذی‌های گرانیتی، گرانودیوریتی، گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی، ریولیتی و توف‌های وابسته به آن‌ها را در بر می‌گیرند. در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا ویژگی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه ناتور مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در این پژوهش با تکیه بر نتایج حاصل از آنالیزهای شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی، ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه، ماگمای مولد و موقعیت زمین‌ساختی آن‌ها مشخص شده است.

مواد و روش‌ها

در حالت کلی انجام این پژوهش در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. ابتدا در بخش صحرایی، بازدید از منطقه مورد مطالعه برای بررسی وضعیت سنگ‌های آتشفشانی انجام گرفت و در مرحله بعد نمونه‌هایی از این سنگ‌ها جهت مطالعات آزمایشگاهی برداشت گردید.

استناد: احمدزاده، غ. و همکاران، ۱۴۰۵. سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناتور، پژوهشهای دانش زمین: ۱۷(۱)،

DOI: 10.48308/esrj.2026.107027 (۲۵-۴۲)

E-mail: z.hassanisoughi@uma.ac.ir

* نویسنده مسئول:



در بخش آزمایشگاهی، از نمونه‌های برداشت شده تعدادی مقطع نازک تهیه و سپس بررسی‌های سنگ‌نگاری بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین به منظور انجام مطالعات زمین‌شیمی، تعداد ۱۲ نمونه سالم و کمتر دگرسان‌شده از این سنگ‌های آتشفشانی انتخاب و در شرکت زرآزمای زنگان مورد آنالیز قرار گرفتند. آنالیز عناصر اصلی به روش XRF و عناصر کمیاب و نادر خاکی به روش ICP-MS صورت گرفته است.

نتایج و بحث

بر اساس موقعیت زمین‌شناسی، منطقه ناطور بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه کیوی (Hajalilou and Rezaei, 2001) قرار دارد. مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه مربوط به ائوسن، الیگوسن و کواترنری هستند. واحدهای سنگی ائوسن در منطقه شامل E^{ab} ، E^{clt} ، E^{an} و E^{tr} هستند. واحد E^{ab} قدیمی‌ترین واحد سنگی ائوسن در منطقه بوده و اغلب در شمال‌شرق منطقه ناطور مشاهده می‌شود. این واحد متشکل از آندزیت بازالتی خاکستری رنگ می‌باشد. واحد E^{clt} عبارت از لیتیک توف کریستالی به رنگ خاکستری تا خاکستری قرمز بوده و اکثراً در بخش مرکزی منطقه ناطور گسترش دارد. در برخی نقاط، این واحد خود دارای میان‌لایه‌هایی از واحدهای آذرآواری مانند توف، لیتیک توف و آندزیت لیتیک توف می‌باشد. واحد E^{an} دربرگیرنده آندزیت پورفیری تا آندزیت بازالتی پورفیری به رنگ ارغوانی تا خاکستری بوده و غالباً در جنوب‌غرب منطقه ناطور رخمون دارد. جوان‌ترین واحد ائوسن در منطقه مورد مطالعه شامل E^{tr} با ترکیب تراکیتی بوده و اغلب به رنگ روشن در منطقه قابل رؤیت است. واحد تراکیتی به طور عمده در بخش جنوب‌غربی منطقه ناطور قابل مشاهده است. واحدهای سنگی الیگوسن در منطقه از واحد O_1^c تشکیل شده است که حاوی کنگلومرای هتروژنیته (به رنگ قرمز) بوده و معمولاً در شمال و شمال‌شرق منطقه و به صورت ناپیوسته بر روی واحدهای آتشفشانی ائوسن به چشم می‌خورد. با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری انجام گرفته، سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور عمدتاً ترکیب آندزیت بازالتی، آندزیت و تراکیتی را نشان می‌دهند. سنگ‌های آندزیت بازالتی دارای بافت پورفیری و گلوپورفیری هستند که از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و پیروکسن در یک زمینه ریزپلور تشکیل شده‌اند. سنگ‌های آندزیتی حاوی کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت بوده و دارای بافت پورفیری در یک زمینه ریزپلور می‌باشند. سنگ‌های تراکیتی نیز دارای بافت پورفیری بوده که از کانی‌های آلکالی‌فدسپار، پلاژیوکلاز و بیوتیت در یک زمینه ریزپلور تشکیل شده‌اند. برای مشخص کردن ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور از نمودار مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) در مقابل سیلیس (SiO_2) (Middlemost, 1994) و نمودار Nb/Yb در برابر Zr/Ti (Pearce, 1996) استفاده شد. در نمودار مجموع آلکالی‌ها در برابر سیلیس، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده سنگ‌هایی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت، تراکی داسیت قرار دارند. در نمودار Nb/Yb در برابر Zr/Ti نیز نمونه‌های منطقه ناطور در گستره سنگ‌های آندزیت، آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت و آلکالی‌بازالت واقع شده‌اند. در دی‌گرام سه‌تایی Al_2O_3 - K_2O - Na_2O ، نمونه‌های منطقه ناطور در قلمرو متآلومین و پراآلومین قرار دارند. همچنین برای تعیین شاخص اشباع از آلومین سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه از نمودار ارائه شده توسط شاند (Shand, 1943) استفاده شد. در این نمودار محدوده‌های متآلومین، پراآلومین و پراآلکان از هم متمایز می‌شوند. مطابق با این نمودار، نمونه‌های منطقه ناطور در دو محدوده متآلومین و پراآلومین جای می‌گیرند. سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در ابتدا با استفاده از نمودار مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) در برابر سیلیس (SiO_2) (Irvine and Baragar, 1971) تعیین شد. در این نمودار دو محدوده آلکان و ساب‌آلکان از هم تفکیک شده‌اند. بر پایه این نمودار، تمامی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه به محدوده آلکان تعلق دارند. سپس نمودارهای Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983)، Co در مقابل Th (Hastie et al, 2007) و SiO_2 در مقابل K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976) برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آذرین منطقه به کار گرفته شدند. این نمودارها به محدوده سری‌های ماگمایی تولیتی، کالک‌آلکان، کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی تقسیم شده‌اند. بر اساس نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb، اکثر نمونه‌های منطقه مورد بررسی در موقعیت سری‌های ماگمایی کالک‌آلکان قرار می‌گیرند. با توجه به نمودار Co در مقابل Th، نمونه‌های منطقه ناطور در محدوده سری‌های ماگمایی کالک‌آلکان و کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی جای دارند. طبق نمودار SiO_2 در مقابل K_2O نیز نمونه‌های منطقه مورد مطالعه عمدتاً در گستره سری‌های ماگمایی شوشونیتی واقع شده‌اند. روند تغییرات عناصر کمیاب و نادر خاکی نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور با استفاده از نمودارهای عنکبوتی

مشخص شد. در همین راستا، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و کندریت (Nakamura, 1974) نرمالیزه شدند. نمودار عنکبوتی نمونه‌های نرمالیزه شده نسبت به گوشته اولیه نشانگر آنومالی مثبت در عناصر لیتوفیل درشت یون (LILE) از جمله Cs، K و Pb و آنومالی منفی در عناصر با قدرت میدان پایداری بالا (HFSE) از قبیل Nb، Zr و Ti است. آنومالی مثبت LILE و آنومالی منفی HFSE از ویژگی‌های مناطق مرتبط با کمان هستند که تشکیل آن‌ها می‌تواند در ارتباط با مناطق فرورانش و آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای باشد (Wilson, 1989; Rollinson, 1993; Thuy et al, 2017; Kuscü and Genel, 2010; Yu et al, 2017). در نمودار عنکبوتی نمونه‌های نرمالیزه شده نسبت به کندریت، غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE قابل شناسایی است. همچنین در این نمودار تهی‌شدگی نسبتاً ضعیفی از عنصر Ce مشاهده می‌شود. غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE می‌تواند گویای تشکیل سنگ‌های آتشفشانی در مناطق فرورانش و یا آرایش ماگما توسط مواد پوسته‌ای باشد (Kuster and Harms, 1998; Ulmer, 2001; Srivastava and Singh, 2004; Peccerillo et al, 2004; Goss and Kay, 2009). تهی‌شدگی نسبتاً ضعیف عنصر Ce می‌تواند به احتمال زیاد به دلیل تحرک بالای این عنصر در طول فرآیند فرورانش باشد (Hoyle et al, 1984). با استفاده از نمودارهای $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ و Y-Zr (Muller et al, 1992) می‌توان به تفسیر موقعیت تکتونیکی سنگ‌های آذرین پرداخت. در این نمودارها، موقعیت درون صفحه‌ای و موقعیت مرتبط با کمان از هم جدا می‌شوند. بر پایه این نمودارها، تمامی نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در موقعیت تکتونیکی مرتبط با کمان جای می‌گیرند. برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور از نمودار Nb/Yb در مقابل Th/Yb (Pearce, 2008) نیز استفاده شد که در آن نمونه‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه در جایگاه زمین‌ساختی مرتبط با کمان‌های آتشفشانی واقع می‌شوند. به‌منظور تفکیک سنگ‌های کمان‌های اقیانوسی از سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم می‌توان از دیاگرام سه‌تایی $\text{TiO}_2/100\text{-La-Hf} \times 10$ (Muller et al, 1992) استفاده کرد. بر اساس این دیاگرام، نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور غالباً در موقعیت کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم قرار گرفته‌اند. همچنین از دیاگرام سه‌تایی $\text{Zr} \times 3\text{-Nb} \times 50\text{-Ce/P}_2\text{O}_5$ (Muller et al, 1992) جهت جدا کردن سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای از کمان‌های پس از تصادم استفاده شد. با توجه به این دیاگرام، نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه به‌طور عمده در موقعیت کمان‌های پس از تصادم واقع شده‌اند.

نتیجه‌گیری

از لحاظ سنگ‌نگاری، سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور نشان‌دهنده ترکیب آندزیت بازالتی، آندزیت و تراکیت هستند. این سنگ‌ها در نمودارهای مربوط به طبقه‌بندی شیمیایی در گستره آندزیت، آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت، تراکیت، تراکی داسیت و آلکالی‌بازالت قرار دارند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در نمودارهای تعیین شاخص اشباع از آلومین در محدوده مت‌آلومین و پرآلومین واقع شده‌اند. از نظر سری ماگمایی نیز این سنگ‌ها بیانگر سری‌های ماگمایی کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی هستند. نمودارهای عنکبوتی مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور نشانگر آنومالی مثبت در عناصر لیتوفیل درشت یون (LILE) و آنومالی منفی در عناصر با قدرت میدان پایداری بالا (HFSE) و غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE هستند که این ویژگی‌ها می‌تواند گویای تشکیل سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در مناطق فرورانش و یا آرایش ماگما توسط مواد پوسته‌ای باشد. با توجه به نمودارهای تعیین جایگاه زمین‌ساختی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در محیط‌های تکتونیکی مرتبط با کمان توسعه یافته‌اند. همچنین در نمودارهای تفکیک سنگ‌های کمان‌های اقیانوسی از سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم، در موقعیت کمان‌های پس از تصادم جای گرفته‌اند.

واژگان کلیدی: زمین‌شیمی، سنگ‌نگاری، سنگ‌های کمان آتشفشانی، ناطور، اردبیل.

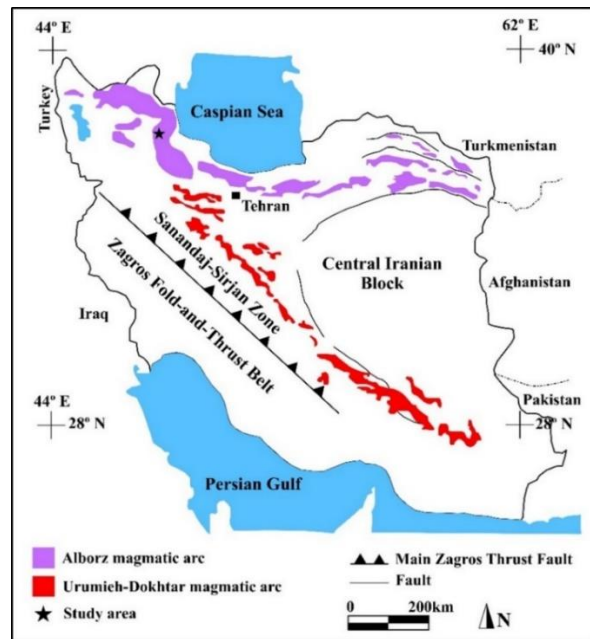
مقدمه

از نگاه زمین‌شناختی، مرز شمالی البرز محدود به زمین‌درز تتیس کهن است که از برخورد سنگ‌کره قاره‌ای البرز با صفحه توران در تریاس پسین به وجود آمده است، ولی در بیشتر نقاط، محل زمین‌درز با ورق‌های رانده شده از شمال به جنوب پوشیده شده است (Aghanbati, 2004). حد جنوبی البرز چندان روشن نیست. گسل تبریز (Alavi, 1991)، آنتی‌البرز (Riviere, 1934)، گسل گرمسار (Berberian, 1996)، گسل سمنان (Nabavi and Partoazar, 1977) و گسل عطاری (Alavi Naini, 1972) مرز جنوبی البرز دانسته شده‌اند؛ ولی چنین به نظر می‌رسد که مرز شاخصی در مرز جنوبی البرز وجود نداشته باشد و گذر از پهنه ایران مرکزی به پهنه البرز تدریجی باشد. از نظر کوه‌نگاری، مرز غربی البرز تا قفقاز کوچک و مرز شرقی آن تا کوه‌های پاراپامپسوس افغانستان (Alavi, 1991) گسترش دارد. بسیاری از واحدهای چینه‌ای البرز و ایران مرکزی از دیدگاه رخساره و شرایط تشکیل مشابه هستند، به‌گونه‌ای که البرز را می‌توان چین‌های حاشیه‌ای ایران مرکزی دانست که در شکل‌گیری آن، برخورد دو صفحه ایران و توران و پیامدهای آن نقش اساسی داشته‌اند (Aghanbati, 2004). همسانی البرز با ایران مرکزی به‌ویژه در دامنه جنوبی بیشتر است، ولی در دامنه شمالی تفاوت‌هایی دارد (Stocklin, 1968). کمان ماگمایی البرز محدوده‌ای گسترده و ترکیبی از محیط‌های زمین‌ساختی از قبیل کمان نرمال، پشت کمانی و محیط‌های پس از برخورد و کششی را شامل می‌شود. چرخه ماگمایی البرز در زمان ائوسن- الیگوسن، سبب تشکیل مجموعه گسترده‌ای از سنگ‌های آذرین نفوذی، نیمه‌آتشفشانی و همچنین مجموعه سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی شده است. این سنگ‌ها سری‌های ماگمایی کالک‌آلکالن و کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا و شوشونیتی نشان می‌دهند. این واحدها، نفوذی‌های گرانیتی، گرانودیوریتی، گدازه‌های بازالتی، آندزیتی، داسیتی، ریولیتی و توف‌های وابسته به آن‌ها را در بر می‌گیرند. کمان ماگمایی البرز بخش جدا شده از کمان ماگمایی واحد نئوتتیس می‌باشد (Axen et al, 2001). مجموعه ماگمایی البرز به فرورانش لیتوسفر اقیانوسی تتیس به زیر خرده قاره ایران مرکزی و به دنبال برخورد

قاره‌ای عربستان و خرده‌قاره ایران در کرتاسه پسین- سنوزوئیک پیشین نسبت داده می‌شود (Berberian et al, 1982). در واقع کمان ماگمایی البرز در یک حوضه کششی پشت کمانی ناشی از فرورانش عمیق صفحه عربستان به زیر صفحه ایران مرکزی تشکیل شده است. پژوهش‌های بسیاری در رابطه با ویژگی‌های زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی توده‌های آذرین درونی و سنگ‌های آتشفشانی موجود در بخش‌های مختلف کمان ماگمایی البرز صورت گرفته است (Ajalli et al, 2021; Asgari et al, 2023; Ebrahimi Nasirmahaleh et al, 2023; Ghasemi et al, 2023; Alavi et al, 2024; Noori KHeymehsari et al, 2024). در منطقه ناطور یکسری اکتشافات مقدماتی توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران انجام شده است (IMIDRO, 2018). تاکنون بررسی دقیق و چندان بر روی مشخصات زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور صورت نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا ویژگی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی موجود در منطقه ناطور مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در این پژوهش با تکیه بر نتایج حاصل از آنالیزهای شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی، ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه، ماگمای مولد و موقعیت زمین‌ساختی آن‌ها مشخص شده است. امید است نتایج حاصل از این پژوهش در درک بهتر شرایط زمین‌ساختی و تکامل ماگمایی البرز مؤثر واقع شود.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه ناطور در فاصله تقریباً ۳۳ کیلومتری جنوب شهرستان کوثر، استان اردبیل، شمال‌غرب ایران واقع شده است. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران توسط علوی (Alavi, 1991)، بخشی از کمان ماگمایی البرز محسوب می‌شود (شکل ۱). پهنه رسوبی- ساختاری البرز شامل بلندی‌های شمال صفحه ایران است که به شکل تاق‌دیزی مرکب با راستای عمومی شرقی- غربی از آذربایجان تا خراسان ادامه دارد. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی، مرز شمالی آن منطبق بر تپه‌ ماهورهای متشکل از نهشته‌های ترشیری و دشت ساحلی خزر است.



شکل ۱: موقعیت منطقه ناطور در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌شناسی - ساختاری ایران (Alavi, 1991).

Fig. 1: Location of the Natour area in the division of geological-structural zones of Iran (Alavi, 1991).

(شکل ۲). واحدهای سنگی ائوسن در منطقه شامل E^{ab} ، E^{clt} ، E^{an} و E^{tr} هستند. واحد E^{ab} قدیمی‌ترین واحد سنگی ائوسن در منطقه بوده و اغلب در شمال شرق منطقه ناطور مشاهده می‌شود. این واحد متشکل از آندزیت بازالتی خاکستری رنگ بوده و عمدتاً با راستای شمال غرب - جنوب شرق و شیب ۲۷ درجه به سمت جنوب غرب در منطقه رخنمون دارد. واحد مذکور در بیشتر نقاط منطقه توسط واحدهای جوان‌تر پوشیده شده است و تنها در محل بریدگی آبراهه‌ها به صورت تقریباً صخره‌ساز قابل رؤیت می‌باشد (شکل ۳ A). واحد E^{clt} عبارت از لیتیک توف کریستالی به رنگ خاکستری تا خاکستری قرمز بوده و اکثراً در بخش مرکزی منطقه ناطور گسترش دارد. در برخی نقاط، این واحد خود دارای میان‌لایه‌هایی از واحدهای آذرآواری مانند توف، لیتیک توف و آندزیت لیتیک توف می‌باشد. واحد یادشده با راستای شمال غرب - جنوب شرق و شیب ۲۷ درجه به سمت جنوب غرب در منطقه دیده می‌شود و در اغلب موارد سنگ‌های این واحد حالت لایه‌بندی نشان می‌دهند (شکل ۳ B). واحد E^{an} دربرگیرنده آندزیت پورفیری تا آندزیت بازالتی پورفیری به رنگ ارغوانی تا خاکستری بوده و غالباً در جنوب غرب منطقه ناطور رخنمون دارد. این واحد در بیشتر نقاط دارای سیمای صخره‌ساز بوده و در برخی رخنمون‌ها به دلیل

مواد و روش‌ها

در حالت کلی انجام این پژوهش در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. ابتدا در بخش صحرایی، بازدید از منطقه مورد مطالعه برای بررسی وضعیت سنگ‌های آتشفشانی انجام گرفت و در مرحله بعد نمونه‌هایی از این سنگ‌ها جهت مطالعات آزمایشگاهی برداشت گردید. در بخش آزمایشگاهی، از نمونه‌های برداشت شده تعدادی مقطع نازک تهیه و سپس بررسی‌های سنگ‌نگاری بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین به منظور انجام مطالعات زمین‌شیمی، تعداد ۱۲ نمونه سالم و کمتر دگرسان شده از این سنگ‌های آتشفشانی (۳ نمونه آندزیت بازالتی، ۵ نمونه آندزیت و ۴ نمونه تراکیت) انتخاب و در شرکت زرآزمای زنجان مورد آنالیز قرار گرفتند. آنالیز عناصر اصلی به روش XRF و عناصر کمیاب و نادر خاکی به روش ICP-MS صورت گرفته است.

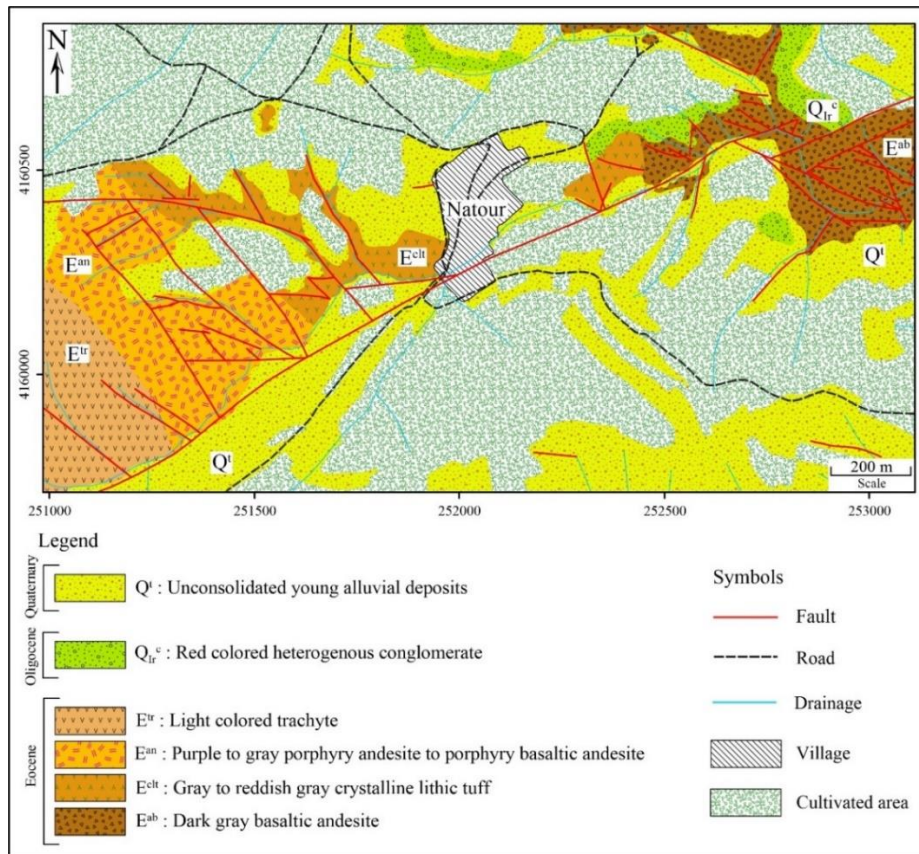
بحث و نتایج

زمین‌شناسی

بر اساس موقعیت زمین‌شناسی، منطقه ناطور بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه کیوی (Hajalilou and Rezaei, 2001) قرار دارد. مهم‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه مربوط به ائوسن، الیگوسن و کواترنری هستند

O_{ir}^c تشکیل شده است که حاوی کنگلومرای هتروژنیته (به رنگ قرمز) بوده و معمولاً در شمال و شمال شرق منطقه و به صورت ناپیوسته بر روی واحدهای آتشفشانی ائوسن به چشم می‌خورد. این واحد معادل سازند قرمز زیرین می‌باشد که در این منطقه رخنمون یافته و در بیشتر نقاط توسط رسوبات آبرفتی کواترنری پوشیده شده است.

عملکرد دگرسانی‌ها، به شدت فرسایش یافته است (شکل ۳ جوان‌ترین واحد ائوسن در منطقه مورد مطالعه شامل E^{tr} با ترکیب تراکیته بوده و اغلب به رنگ روشن در منطقه قابل رؤیت است. واحد تراکیته به طور عمده در بخش جنوب غربی منطقه ناطور قابل مشاهده است. این واحد در بیشتر رخنمون‌های خود دچار فرآیند دگرسانی شده است (شکل ۳ D). واحدهای سنگی الیگوسن در منطقه از واحد



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ منطقه ناطور (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیوی (Hajalilou and Rezaei, 2001)).
 Fig. 2: 1:5000 geological map of the Natour area (adapted from the 1:100,000 geological map of Kivi (Hajalilou and Rezaei, 2001)).

زمینه ریزپلور تشکیل شده‌اند (شکل ۴ A). پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی در این نوع سنگ‌ها بوده و عمدتاً به صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار مشاهده می‌شود. این کانی معمولاً دارای ماکل پلی‌سنتتیک بوده و بعضاً حالت منطقه‌بندی نشان می‌دهد. پلاژیوکلاز در اغلب موارد به کربنات، سریسیت و کانی‌های رسی تجزیه شده است (شکل ۴ B و C). پیروکسن به طور کلی به صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار در زمینه ریزپلور قابل رؤیت می‌باشد. این کانی گاهاً در نتیجه

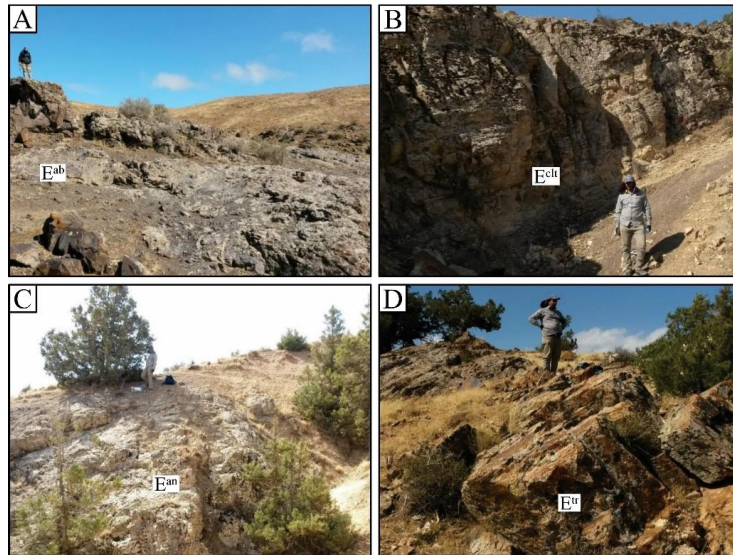
سنگ‌نگاری

با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری انجام گرفته، سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور عمدتاً ترکیب آندزیت بازالتی، آندزیت و تراکیته را نشان می‌دهند. در این بخش، سنگ‌نگاری این سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

آندزیت بازالتی: این سنگ‌ها بر اساس مطالعات میکروسکوپی دارای بافت پورفیری و گلومروپورفیری هستند که از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و پیروکسن در یک

در این سنگ‌ها مشاهده می‌شوند. کوارتز نیز به صورت ثانویه در این نوع سنگ‌ها تشکیل شده و اغلب به صورت بلورهای بسیار ریز قابل رؤیت می‌باشد.

فرآیندهای دگرسانی توسط کلریت جانشین شده است (شکل ۴ D). کانی‌های اپک کمتر از ۵ درصد این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند و معمولاً به صورت پراکنده



شکل ۳: تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی منطقه ناطور. A: برون‌زد صحرایی از واحد آندزیت بازالتی خاکستری رنگ (دید به سمت شمال). B: نمای صحرایی از واحد لیتیک توف کریستالی به رنگ خاکستری (دید به سمت غرب). C: برون‌زد واحد آندزیت پورفیری تا آندزیت بازالتی پورفیری (دید به سمت جنوب غرب). D: نمایی از واحد تراکیتی (دید به سمت شمال غرب).

Fig. 3: Field images of the rock units of the Natour area. A: Field outcrop of the gray andesitic basalt to andesite basalt unit (view toward north). B: Field view of the gray crystalline lithic tuff unit (view toward west). C: Outcrop of the porphyry andesite to porphyry andesite basalt unit (view toward southwest). D: View of the trachyte unit (view toward northwest).

تراکیت: این سنگ‌ها در مطالعات میکروسکوپی دارای بافت پورفیری بوده که از کانی‌های آلکالی‌فلسپار، پلاژیوکلاز و بیوتیت در یک زمینه ریزبلور تشکیل شده‌اند (شکل ۴ I و J). آلکالی‌فلسپار فراوان‌ترین کانی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها محسوب می‌شود و در برخی موارد دارای ماکل کارلسباد می‌باشد. این کانی معمولاً به صورت بلورهای ریز تا درشت بی‌شکل تا شکل‌دار قابل رؤیت است. آلکالی‌فلسپار به‌طور عمده به سرسیت و کانی‌های رسی دگرسان شده است (شکل ۴ K و L). پلاژیوکلاز به صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار و اغلب با ماکل پلی‌سنتتیک دیده می‌شود (شکل ۴ I). در برخی موارد فرآیند دگرسانی باعث تجزیه پلاژیوکلاز به سرسیت و کانی‌های رسی شده است. بیوتیت عمدتاً به مقدار کم و به صورت بلورهای ریز در این سنگ‌ها به چشم می‌خورد. کوارتز از جمله کانی ثانویه در این سنگ‌ها می‌باشد که بیشتر به صورت بلورهای بسیار ریز در زمینه یافت می‌شود (شکل ۴ J). کانی‌های اپک کمتر از ۵ درصد این سنگ‌ها را

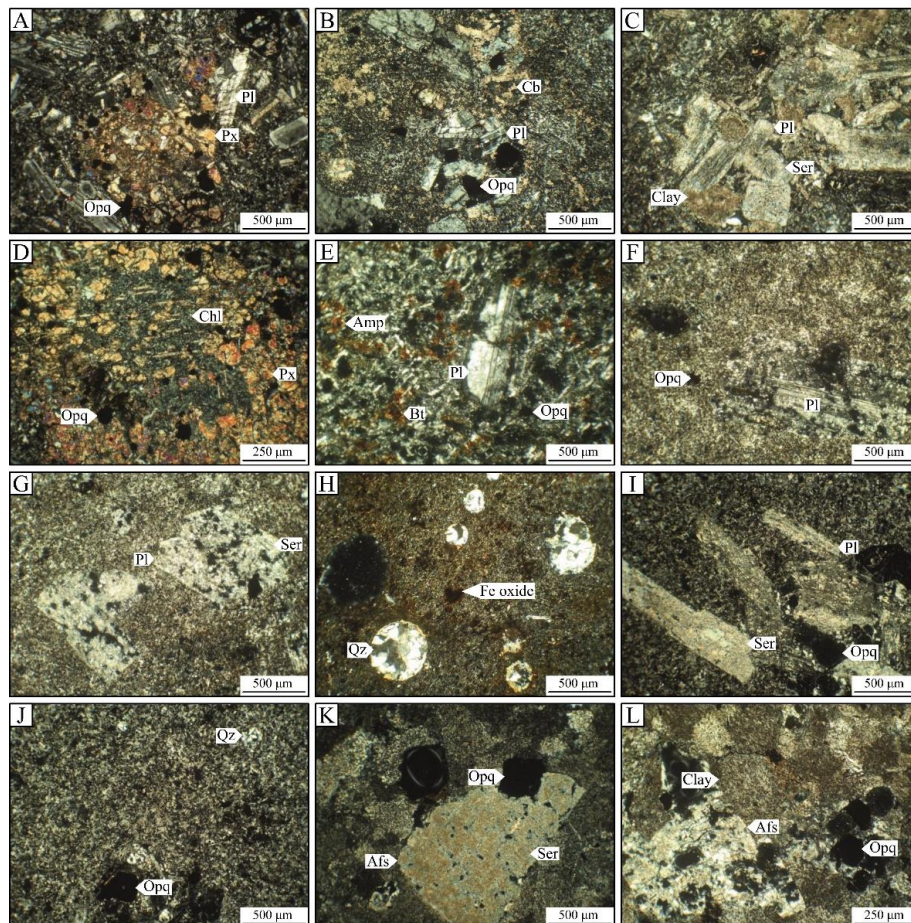
آندزیت: این سنگ‌ها در زیر میکروسکوپ حاوی کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت بوده و دارای بافت پورفیری در یک زمینه ریزبلور می‌باشند (شکل ۴ E). پلاژیوکلاز به‌وفور و به صورت بلورهای ریز تا درشت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار غالباً با ماکل پلی‌سنتتیک در این سنگ‌ها یافت می‌شود (شکل ۴ E و F). در برخی موارد حالت منطقه‌بندی نیز در بلورهای پلاژیوکلاز قابل مشاهده است. این کانی عمدتاً توسط کانی‌های ثانویه سرسیت و کانی‌های رسی جانشین شده است (شکل ۴ G). آمفیبول و بیوتیت به صورت بلورهای ریز تا متوسط نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار در این سنگ‌ها حضور دارند (شکل ۴ E). این کانی‌ها معمولاً در نتیجه فرآیندهای دگرسانی به کلریت تجزیه شده‌اند. کوارتز و اکسیدهای آهن از جمله کانی‌های ثانویه هستند که در این سنگ‌ها مشاهده می‌شوند (شکل ۴ H). اکسیدهای آهن عمدتاً به صورت پراکنده و رگچه‌ای حضور دارند. کوارتز اغلب به صورت رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی در این سنگ‌ها دیده می‌شود.

سنگ‌هایی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت، تراکیت و تراکی داسیت قرار دارند. در نمودار Nb/Yb در برابر Zr/Ti نیز نمونه‌های منطقه ناپور در گستره سنگ‌های آندزیت، آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت و آلکالی بازالت واقع شده‌اند (شکل ۵ B). شاخص اشباع از آلومین: در دیاگرام سه‌تایی $Al_2O_3-K_2O-Na_2O$ ، نمونه‌های منطقه ناپور در قلمرو مت‌آلومین و پرآلومین قرار دارند (شکل ۶ A). همچنین برای تعیین شاخص اشباع از آلومین سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه از نمودار ارائه شده توسط شاند (Shand, 1943) استفاده شد. در این نمودار محدوده‌های مت‌آلومین، پرآلومین و پراآلکان از هم متمایز می‌شوند. مطابق با این نمودار، نمونه‌های منطقه ناپور در دو محدوده مت‌آلومین و پرآلومین جای می‌گیرند (شکل ۶ B).

شامل می‌شوند و اکثراً به صورت پراکنده در این سنگ‌ها قابل مشاهده هستند (شکل ۴ L).

زمین‌شیمی

به منظور انجام بررسی‌های زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناپور تعداد ۱۲ نمونه از این سنگ‌ها (۳ نمونه آندزیت بازالتی، ۵ نمونه آندزیت و ۴ نمونه تراکیت) که اغلب کمترین دگرسانی را نشان می‌دادند، مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج آنالیزها در جدول ۱ آورده شده است. رده‌بندی ترکیبی: برای مشخص کردن ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناپور از نمودار مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) در مقابل سیلیس (SiO_2) (Middlemost, 1994) و نمودار Nb/Yb در برابر Zr/Ti (Pearce, 1996) استفاده شد. در نمودار مجموع آلکالی‌ها در برابر سیلیس (شکل ۵ A)، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی (XPL) از سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناپور. A: بافت پورفیری در سنگ آندزیت بازالتی. B: تبدیل بلورهای پلاژیوکلاز به کربنات در سنگ آندزیت بازالتی. C: جانشینی پلاژیوکلاز توسط سریسیت و کانی‌های رسی در سنگ آندزیت بازالتی. D: تجزیه پیروکسن به کلریت در سنگ آندزیت بازالتی. E: بافت پورفیری در سنگ آندزیتی که در آن بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت در زمینه ریزبلور مشاهده می‌شوند. F: پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتتیک در سنگ آندزیتی. G: دگرسانی پلاژیوکلاز به سریسیت در سنگ آندزیتی. H: حضور اکسیدهای آهن و کوارتز (به صورت پرکننده فضاهای خالی) در سنگ آندزیتی. I: بافت پورفیری در سنگ تراکیتی. J: زمینه ریزبلور

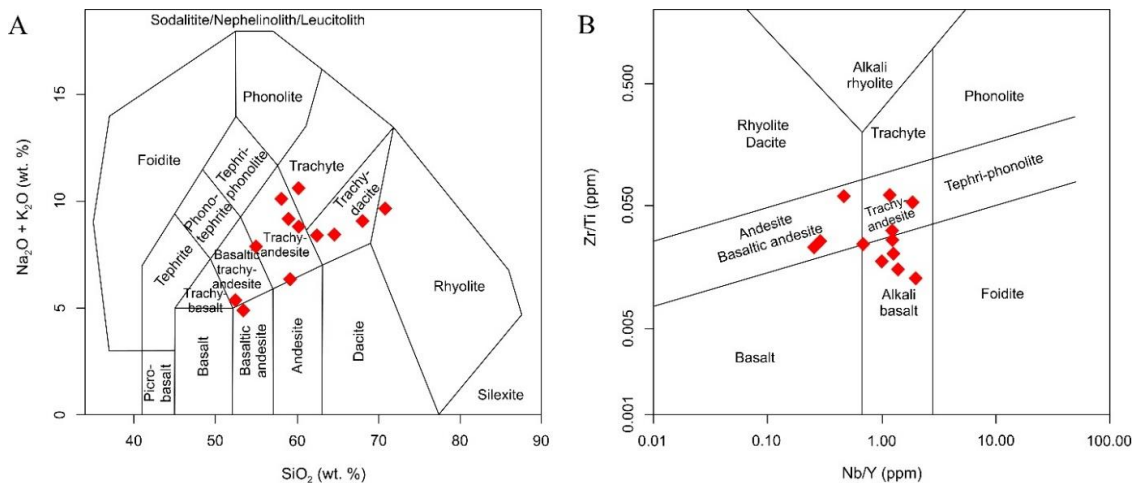
سنگ تراکیتی و حضور کوارتز به صورت ثانویه در آن. K: تجزیه آلکالی‌فلدسپار به سریسیت در سنگ تراکیتی. L: جانشینی آلکالی‌فلدسپار توسط کانی‌های رسی در سنگ تراکیتی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Afs: آلکالی‌فلدسپار، Bt: بیوتیت، Cb: کربنات، Chl: کلریت، Clay: کانی‌های رسی، Fe oxide: اکسید آهن، Opq: کانی اپک، Pl: پلاژیوکلاز، Px: پیروکسن، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت).

Fig. 4: Microscopic images (XPL) of volcanic rocks in the Natour area. A: Porphyry texture in basaltic andesite. B: Alteration of plagioclase crystals to carbonate in basaltic andesite. C: Replacement of plagioclase by sericite and clay minerals in basaltic andesite. D: Alteration of pyroxene to chlorite in basaltic andesite. E: Porphyry texture in andesite where plagioclase, amphibole, and biotite crystals are observed in a microcrystalline matrix. F: Plagioclase with polysynthetic twinning in andesite. G: Plagioclase alteration to sericite in andesite. H: Presence of iron oxides and quartz (as vug infill) in andesite. I: Porphyry texture in trachyte. J: Microcrystalline matrix of trachyte and presence of secondary quartz. K: Alkali feldspar alteration to sericite in trachyte. L: Replacement of alkali feldspar by clay minerals in trachyte. Mineral abbreviations are adapted from Whitney and Evans (2010) (Afs: alkali feldspar, Amp: amphibole, Bt: biotite, Cb: carbonate, Chl: chlorite, Clay: clay minerals, Fe oxide: iron oxide, Opq: opaque mineral, Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Qz: quartz, Ser: sericite).

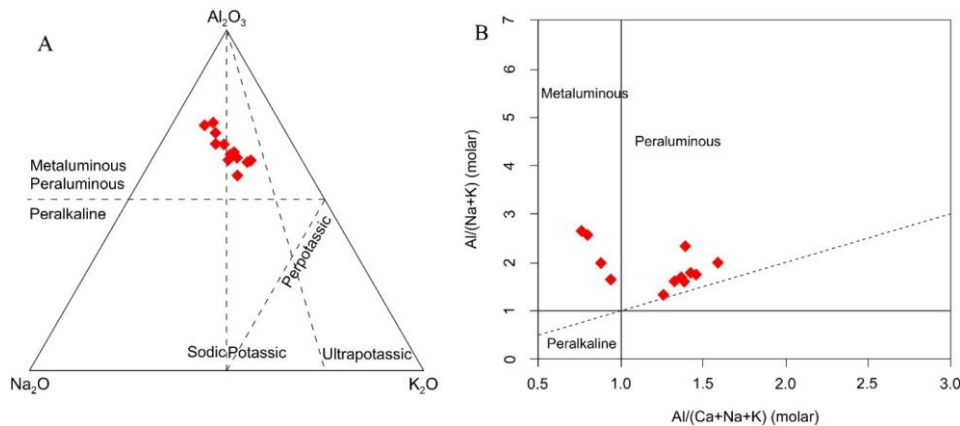
جدول ۱: نتایج آنالیز شیمیایی برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور (مقادیر اکسیدهای اصلی بر اساس درصد وزنی و مقادیر عناصر جزئی و نادر خاکی بر اساس ppm می‌باشد؛ DL: حد تشخیص، n.d: زیر حد تشخیص).

Table 1: Results of chemical analysis for volcanic rocks of the Natour area (the amounts of major oxides are based on weight percent and the amounts of minor and rare earth elements are based on ppm; DL: Detection Limit, n.d: not detected).

Sample	DL	NA-01	NA-02	NA-03	NA-04	NA-05	NA-06	NA-07	NA-08	NA-09	NA-10	NA-11	NA-12
Rock type		Basaltic andesite	Basaltic andesite	Basaltic andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Andesite	Trachyte	Trachyte	Trachyte	Trachyte
SiO ₂	0.05	56.8	50.6	51	57.9	57	62.9	59.9	58.2	69.4	51.3	66.5	56.6
Al ₂ O ₃	0.05	16.2	18.6	16.9	21.7	19.8	18	17	20	15.9	23	17.2	20.8
CaO	0.05	5.6	9.5	8	1.4	1.4	1	4.2	1.4	0.3	3.6	0.8	1.5
Fe ₂ O ₃	0.05	6.9	8.1	10.1	4.6	7	5.3	4.7	4.6	2	5.4	3	6.3
K ₂ O	0.05	3.2	2.5	1.9	5	5.8	5.2	5	7.7	6.3	3.8	6.5	6.6
MgO	0.05	3.3	3.5	3.3	0.6	0.9	0.5	0.7	0.6	0.2	1.1	0.5	0.4
MnO	0.05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Na ₂ O	0.05	2.9	2.7	2.8	3.5	3.1	3	3.1	2.6	3.2	3.6	2.4	3.3
P ₂ O ₅	0.05	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	0.4	0.4	0.7	0.1	0.8	0.2	0.9
TiO ₂	0.05	0.8	0.6	1.1	0.8	0.8	1	0.9	1	0.6	0.8	0.6	1.1
LOI	0.05	3.4	3.4	4.1	3.7	3.2	2.5	3.9	2.9	1.6	6.4	2.1	2.1
Total		99.75	100.15	99.95	100.15	100.15	100.05	100.05	99.95	99.85	100.05	100.05	99.85
Ag	0.1	0.1	0.1	0.7	1.3	0.1	1.5	0.1	0.1	0.2	0.6	0.3	0.3
Al	100	37834	86922	69150	89212	91967	84308	87609	62451	24188	72916	90530	44281
As	1.1	17	114.2	23.6	228.8	36.6	65.1	10.5	64.7	61.6	76.8	148.7	40.5
Ba	1	312	1186	1638	596	1841	1315	1366	882	286	2459	910	1158
Be	0.2	1.7	5	2.6	2	2.6	1.7	2.7	2.5	1.5	1.9	6.7	6.3
Bi	0.1	n.d.	n.d.	n.d.	0.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.3
Ca	100	>10%	8697	3511	37618	26069	3485	19937	5038	>10%	1180	5245	94906
Cd	0.1	0.1	0.4	0.1	1	0.3	0.2	0.1	0.2	0.7	0.2	0.7	0.4
Co	1	16.2	9.9	2.9	17.8	9	3.1	9.5	2.7	13.8	1.4	26.5	11.1
Cr	1	29	15	27	12	9	12	17	33	30	13	32	19
Cs	0.5	4.4	29.5	14.1	29.2	12.4	5.6	5.5	4.6	5.8	7.7	34.9	9.9
Cu	1	35	202	57	38	131	10716	150	43	83	2351	250	27
Fe	100	50908	71474	12540	45871	36915	21752	35727	35405	37224	10916	92578	43995
HF	0.5	1.77	4.44	6.85	1.81	2.54	3.01	3.4	4.24	0.59	7.26	1.44	2.28
In	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
K	100	8353	55881	45071	23949	63056	72332	50851	26919	7281	54841	35116	16826
Li	1	22	7	9	18	7	11	18	35	18	7	17	17
Mg	100	9543	2053	1074	5502	2321	1761	1858	2369	3116	1219	3436	>2%
Mn	5	2087	187	202	898	489	69	1033	206	3258	60	3017	4692
Mo	0.1	1.3	2.3	1.6	2	0.5	0.3	0.5	3	2.3	1	4.7	3.3
Na	100	5940	17218	12639	14664	17901	2153	22758	1122	3639	1429	19874	2031
Nb	1	5.2	26.3	27	14.7	26.4	14.9	24.6	17.7	2.5	36.9	21.9	11.6
Ni	1	10	14	2	8	3	2	8	1	10	1	23	7
P	10	630	2409	495	1359	2636	2837	1907	1156	396	442	2069	312
Pb	1	18	40	17	22	21	28	22	18	29	18	51	45
Rb	1	31	162	139	103	205	255	149	111	35	197	144	73
S	50	3956	160	299	98	96	509	91	1394	154	398	253	612
Sb	0.5	3.5	7.7	4.2	10	11.4	9.9	5.7	55.1	3.6	12.3	7.9	7.4
Sc	0.5	16.2	10.3	6.3	16.5	9.1	9.1	9.9	9.3	5.7	7.3	9.3	5.1
Se	0.5	2.38	1.26	1.14	1.72	1.68	1.56	1.08	0.81	0.89	1.24	0.76	1.37
Sn	0.1	1.2	2	3	1.5	2	1.4	1.9	1.8	0.8	2.1	1.5	1.5
Sr	1	417	343	230	330	405	24.31	331	200	199	574	272	272
Ta	0.1	0.5	1.43	1.35	1.04	1.48	0.84	1.35	1.12	0.35	1.79	1.22	0.79
Te	0.1	0.19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.21	n.d.	n.d.	0.11	n.d.	n.d.	n.d.
Th	0.1	3.36	9.7	12.6	4.28	6.84	10.21	7.26	8.21	1.71	13.71	5.71	6.39
Ti	10	2304	5435	3413	3765	5727	4847	5331	4102	998	3919	4255	1152
Tl	0.1	0.18	0.49	0.99	0.96	1.07	2.61	0.54	0.47	0.3	1.27	0.8	1.38
U	0.1	1.3	3	2.8	0.9	1.6	3.5	1.9	3.02	0.7	2.9	3.1	2
V	1	128	167	20	157	137	115	104	65	58	14	125	27
W	1	1.1	2.1	2.5	1.3	3.7	n.d.	1.2	1.7	n.d.	2.2	1.5	n.d.
Y	0.5	19.9	21.1	23	14.7	18.9	21.5	19.4	14.2	8.6	19.8	11	24.6
Zn	1	48	100	34	77	72	35	81	39	81	27	121	205
Zr	5	54	145	212	67	88	117	110	130	26	212	55	70
La	1	33	37	42	21	39	55	37	29	11	47	32	26
Ce	0.5	59	69	86	41	73	103	73	57	20	97	50	49
Pr	0.05	8.79	9.41	10.18	5.94	9.93	13.64	9.25	6.78	2.58	12.09	6.38	6.14
Nd	0.5	35.5	36.5	39	25.2	38.7	35.7	36.6	26.8	12.3	47.2	24.8	24.9
Sm	0.02	7.67	6.99	7.75	5.19	7.41	11.05	7.33	5.38	2.52	10.5	4.62	5.64
Eu	0.1	3.53	1.65	1.46	1.38	1.9	2.53	1.85	1.28	1.29	2.12	1.42	2.18
Gd	0.05	7.82	6.11	6.84	4.71	6.21	8.88	6.35	4.55	2.41	8.67	3.86	5.87
Tb	0.1	1.03	0.85	0.94	0.68	0.83	1.03	0.86	0.67	0.41	0.99	0.55	0.93
Dy	0.02	5.87	5.42	6	4.17	5.17	5.92	5.27	4.14	2.44	5.76	3.3	5.88
Er	0.05	2.79	3.33	3.58	2.36	2.97	3.43	2.97	2.44	1.35	3.4	1.84	3.29
Tm	0.1	0.33	0.44	0.47	0.31	0.37	0.45	0.39	0.32	0.19	0.45	0.24	0.41
Yb	0.05	1.9	2.7	2.3	1.9	2.1	2.4	2.1	1.8	1	2.1	1.8	2.5
Lu	0.1	0.3	0.45	0.49	0.29	0.36	0.48	0.38	0.32	0.15	0.49	0.22	0.41



شکل ۵: موقعیت نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور بر روی نمودارهای تعیین رده‌بندی ترکیبی. A: نمودار مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) در مقابل سیلیس (SiO_2) (Middlemost, 1994). B: نمودار Nb/Yb در برابر Zr/Ti (Pearce, 1996).



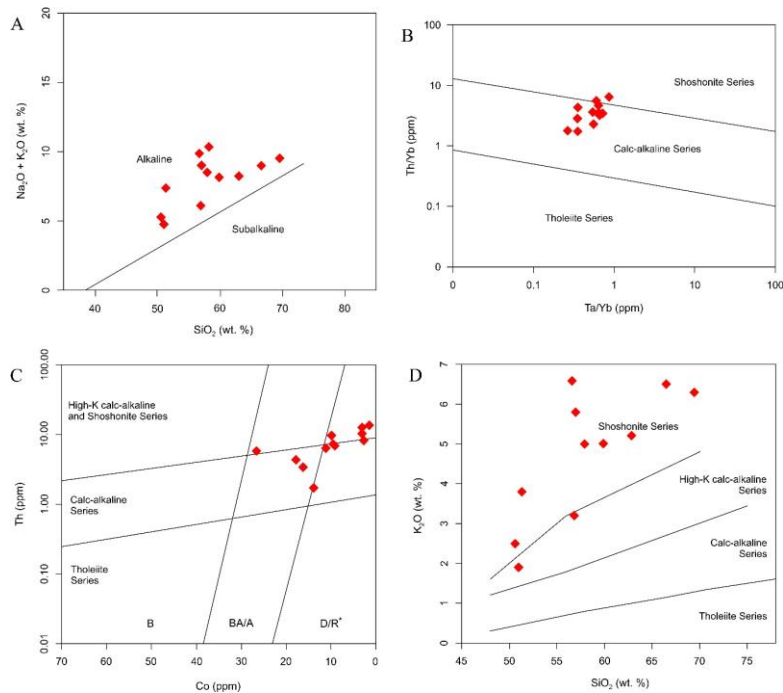
شکل ۶: موقعیت نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور بر روی نمودارهای تعیین شاخص اشباع آلومین. A: دی‌گرام $Al_2O_3-K_2O-Na_2O$. B: نمودار تعیین شاخص اشباع آلومین (Shand, 1943).

Fig. 6: Location of samples of volcanic rocks from the Natour area on the alumina saturation index determination diagrams. A: $Al_2O_3-K_2O-Na_2O$ diagram. B: Alumina saturation index determination diagram (Shand, 1943).

سری‌های ماگمایی تولیتی، کالک‌آلکان، کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی تقسیم شده‌اند. بر اساس نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb ، اکثر نمونه‌های منطقه مورد بررسی در موقعیت سری‌های ماگمایی کالک‌آلکان قرار می‌گیرند (شکل ۷ B).

با توجه به نمودار Co در مقابل Th، نمونه‌های منطقه ناطور در محدوده سری‌های ماگمایی کالک‌آلکان و کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی جای دارند (شکل ۷ C). طبق نمودار SiO_2 در مقابل K_2O نیز نمونه‌های منطقه مورد مطالعه عمدتاً در گستره سری‌های ماگمایی شوشونیتی واقع شده‌اند (شکل ۷ D).

سری ماگمایی: سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در ابتدا با استفاده از نمودار مجموع آلکالی‌ها (Na_2O+K_2O) در برابر سیلیس (SiO_2) (Irvine and Baragar, 1971) تعیین شد. در این نمودار دو محدوده آلکان و ساب‌آلکان از هم تفکیک شده‌اند. بر پایه این نمودار، تمامی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه به محدوده آلکان تعلق دارند (شکل ۷ A). سپس نمودارهای Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983)، Co در مقابل Th (Hastie et al, 2007) و SiO_2 در مقابل K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976) برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آذرین منطقه به کار گرفته شدند. این نمودارها به محدوده

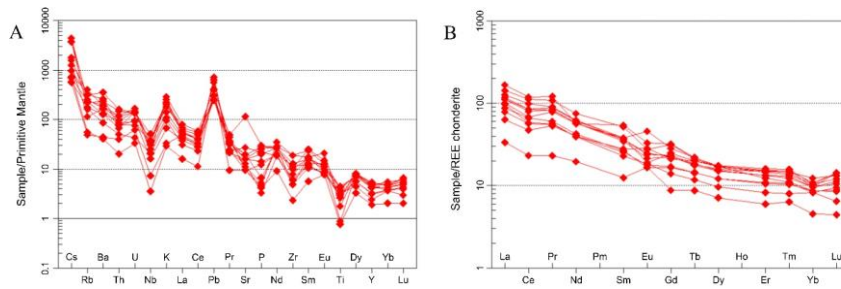


شکل ۷: موقعیت نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور بر روی نمودارهای تعیین سری ماگمایی. A: نمودار مجموع آلکالی‌ها ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) در مقابل سیلیس (SiO_2) (Irvine and Baragar, 1971). B: نمودار Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1983). C: نمودار Co در مقابل Th (Hastie et al, 2007). D: نمودار SiO_2 در مقابل K_2O (Peccerillo and Taylor, 1976).

Fig. 7: Location of samples from the Natour volcanic rocks on magmatic series diagrams. A: Alkali total ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) versus Silica (SiO_2) diagram (Irvine and Baragar, 1971). B: Th/Yb versus Ta/Yb diagram (Pearce, 1983). C: Co versus Th diagram (Hastie et al, 2007). D: SiO_2 versus K_2O diagram (Peccerillo and Taylor, 1976).

Ce مشاهده می‌شود (شکل ۸ B). غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE می‌تواند گویای تشکیل سنگ‌های آتشفشانی در مناطق فرورانش و یا آلیش ماگما توسط مواد پوسته‌ای باشد (Kuster and Harms, 1998; Ulmer, 2001; Srivastava and Singh, 2004; Peccerillo et al, 2004; Goss and Kay, 2009). تهی‌شدگی نسبتاً ضعیف عنصر Ce می‌تواند به احتمال زیاد به دلیل تحرک بالای این عنصر در طول فرآیند فرورانش باشد (Hoyle et al, 1984). در حالت کلی به نظر می‌رسد که ماگمای اولیه سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در نتیجه ذوب‌بخشی سنگ‌کره گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده زیرقاره‌ای و به دنبال فرآیند فرورانش ایجاد شده است. در نتیجه فرورانش، افزایش گرادیان گرمایی حاصل از صعود جریان‌ات سست‌کره‌ای سبب ذوب‌بخشی سنگ‌کره زیرقاره‌ای شده است. ماگمای بازیک حاصله به سمت سطوح بالاتر و پوسته قاره‌ای حرکت کرده و در طول مسیر با مواد پوسته‌ای آلیش حاصل کرده است. در نهایت، تفریق ماگمای حاصله باعث تشکیل سنگ‌هایی با ترکیب حدواسط و نسبتاً اسیدی در منطقه ناطور شده است.

الگوی چند عنصری (نمودارهای عنکبوتی): روند تغییرات عناصر کمیاب و نادر خاکی نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور با استفاده از نمودارهای عنکبوتی مشخص شد. در همین راستا، نمونه‌های منطقه مورد مطالعه نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و کندریت (Nakamura, 1974) نرمالیزه شدند. نمودار عنکبوتی نمونه‌های نرمالیزه شده نسبت به گوشته اولیه نشانگر آنومالی مثبت در عناصر لیتوفیل درشت یون (LILE) از جمله K، Cs، Pb و آنومالی منفی در عناصر با قدرت میدان پایداری بالا (HFSE) از قبیل Nb، Zr و Ti است (شکل ۸ A). آنومالی مثبت LILE و آنومالی منفی HFSE از ویژگی‌های مناطق مرتبط با کمان هستند که تشکیل آن‌ها می‌تواند در ارتباط با مناطق فرورانش و آلیش ماگما با پوسته قاره‌ای باشد (Wilson, 1989; Rollinson, 1993; Thuy et al, 2004; Kucsu and Geneli, 2010; Yu et al, 2017). در نمودار عنکبوتی نمونه‌های نرمالیزه شده نسبت به کندریت، غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE قابل شناسایی است (شکل ۸ B). همچنین در این نمودار تهی‌شدگی نسبتاً ضعیفی از عنصر

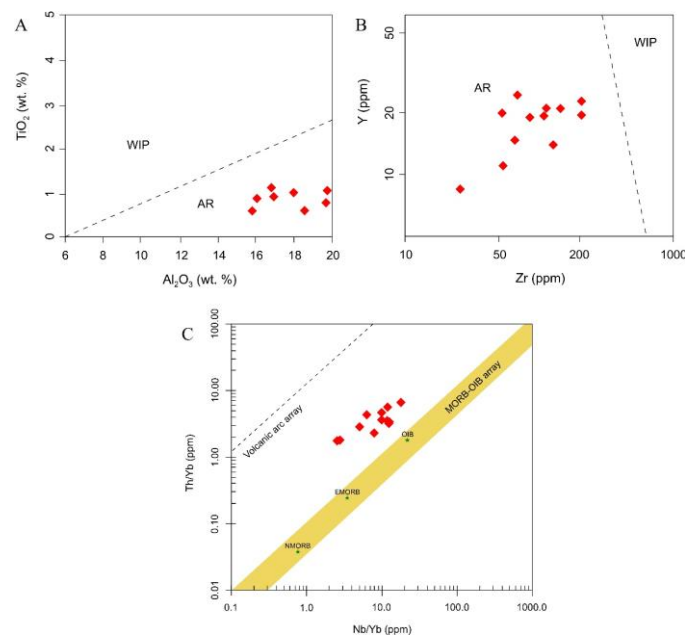


شکل ۸: نمودارهای عنکبوتی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور. A: نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده مقادیر عناصر نادر خاکی نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989). B: نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده چندعنصری نسبت به کندریت (Nakamura, 1974).

Fig. 8: Spider diagrams of volcanic rocks from the Natour area. A: Normalized spider diagram of rare earth element values relative to the primitive mantle (Sun and McDonough, 1989). B: Normalized multi-element spider diagram relative to chondrite (Nakamura, 1974).

تکتونیکی مرتبط با کمان جای می‌گیرند (شکل ۹ A و B). برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور از نمودار Nb/Yb در مقابل Th/Yb (Pearce, 2008) نیز استفاده شد که در آن نمونه‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه در جایگاه زمین‌ساختی مرتبط با کمان‌های آتشفشانی واقع می‌شوند (شکل ۹ C).

جایگاه زمین‌ساختی: با استفاده از نمودارهای TiO_2 - Al_2O_3 و Y-Zr (Muller et al, 1992) می‌توان به تفسیر موقعیت تکتونیکی سنگ‌های آذرین پرداخت. در این نمودارها، موقعیت درون صفحه‌ای و موقعیت مرتبط با کمان از هم جدا می‌شوند. بر پایه این نمودارها، تمامی نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در موقعیت



شکل ۹: موقعیت نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در نمودارهای تعیین جایگاه زمین‌ساختی. A: نمودار دو متغیره TiO_2 - Al_2O_3 (Muller et al, 1992). B: نمودار دو متغیره Y-Zr (Muller et al, 1992). C: نمودار Nb/Yb در مقابل Th/Yb (Pearce, 2008). (WIP within plate, AR: arc-related).

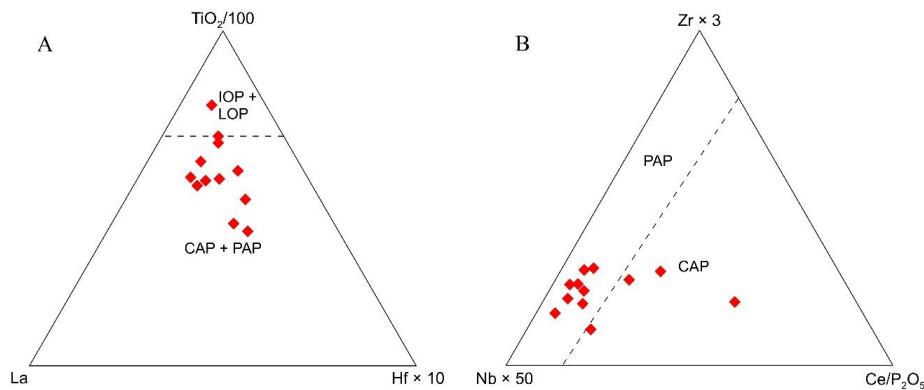
Fig. 9: Location of samples from the Natour volcanic rocks in tectonic setting diagrams. A: Bivariate TiO_2 - Al_2O_3 diagram (Muller et al, 1992). B: Bivariate Y-Zr diagram (Muller et al, 1992). C: Nb/Yb versus Th/Yb diagram (Pearce, 2008). (WIP within plate, AR: arc-related).

می‌توان از دیاگرام سه تایی $\text{TiO}_2/100\text{-La-Hf}\times 10$ (Muller et al, 1992) استفاده کرد. بر اساس این دیاگرام،

به منظور تفکیک سنگ‌های کمان‌های اقیانوسی از سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم

مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه به‌طور عمده در موقعیت کمان‌های قاره‌ای پس از تصادم واقع شده‌اند (شکل ۱۰ B). این موقعیت زمین‌ساختی با دیگر بررسی‌های انجام شده بر روی سنگ‌های آتشفشانی کمان ماگمایی البرز مشابهت دارد (Ajjali et al, 2021; Asgari et al, 2023; Ebrahimi Nasirmahaleh et al, 2023).

نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور غالباً در موقعیت کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم قرار گرفته‌اند (شکل ۱۰ A). همچنین از دیگرام سه‌تایی $Zr \times 3-Nb \times 50-Ce/P_2O_5$ (Muller et al, 1992) جهت جدا کردن سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای از کمان‌های پس از تصادم استفاده شد. با توجه به این دیگرام، نمونه‌های



شکل ۱۰: موقعیت نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در دیگرام‌های سه‌تایی تفکیک کمان‌های اقیانوسی از کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم (Muller et al, 1992). A: دیگرام سه‌تایی $TiO_2/100-La-Hf \times 10$. B: دیگرام سه‌تایی $Zr \times 3-Nb \times 50-Ce/P_2O_5$. IOP: initial oceanic arc potassic rocks, LOP: late oceanic arc potassic rocks, CAP: continental arc potassic rocks, PAP: post-collisional arc potassic rocks.

Fig. 10: Location of samples from the Natour volcanic rocks in the ternary diagrams separating oceanic arcs from continental arcs and post-collisional arcs (Muller et al, 1992). A: $TiO_2/100-La-Hf \times 10$ ternary diagram. B: $Zr \times 3-Nb \times 50-Ce/P_2O_5$ ternary diagram. (IOP: initial oceanic arc potassic rocks, LOP: late oceanic arc potassic rocks, CAP: continental arc potassic rocks, PAP: post-collisional arc potassic rocks).

میدان پایداری بالا (HFSE) و غنی‌شدگی از LREE نسبت به HREE هستند که این ویژگی‌ها می‌تواند گویای تشکیل سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در مناطق فرورانش و یا آرایش ماگما توسط مواد پوسته‌ای باشد. (۴) با توجه به نمودارهای تعیین جایگاه زمین‌ساختی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در محیط‌های تکتونیکی مرتبط با کمان توسعه یافته‌اند. همچنین در نمودارهای تفکیک سنگ‌های کمان‌های اقیانوسی از سنگ‌های کمان‌های قاره‌ای و کمان‌های پس از تصادم، در موقعیت کمان‌های پس از تصادم جای گرفته‌اند.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از: (۱) از لحاظ سنگ‌نگاری، سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور نشان‌دهنده ترکیب آندزیت بازالتی، آندزیت و تراکیت هستند. این سنگ‌ها در نمودارهای مربوط به طبقه‌بندی شیمیایی در گستره آندزیت، آندزیت بازالتی، تراکی آندزیت، تراکیت، تراکی داسیت و آکالی بازالت قرار دارند. (۲) سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور در نمودارهای تعیین شاخص اشباع از آلومین در محدوده مت‌آلومین و پرآلومین واقع شده‌اند. از نظر سری ماگمایی نیز این سنگ‌ها بیانگر سری‌های ماگمایی کالک‌آلکان با پتاسیم بالا و شوشونیتی هستند.

(۳) نمودارهای عنکبوتی مربوط به سنگ‌های آتشفشانی منطقه ناطور نشانگر آنومالی مثبت در عناصر لیتوفیل درشت یون (LILE) و آنومالی منفی در عناصر با قدرت

References

- Aghanabati, A., 2004. The Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 586 p (In Persian).
- Ajalli, N., Torkian, A. and Tale Fazel, E., 2021. Geochemistry of basaltic rocks of Meshkin-Rasht Abad area (North of Zanjan). *Petrological Journal*, v. 12(1), p. 1-18. <http://doi.org/10.22108/IJP.2020.120869.1158> (In Persian).
- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East (scale 1:5,000,000). Geological Survey of Iran.
- Alavi, S.G., Kazemi Rad, M., Moayyed, M. and Hosseinzadeh, M.R., 2024. Geochemistry and emplacement environment of intrusive bodies of Shele Boran Mo-Cu deposit (Northeast of Ahar, East Azarbaijan). *Petrological Journal*, v. 15(4), p. 47-68. <http://doi.org/10.22108/IJP.2024.140542.1320> (In Persian).
- Alavi Naini, M., 1972. Etude geologique de la region de Djam. Geological Survey of Iran, Tehran, 288 p.
- Asgari, F., Mokhtari, M.A.A. and Kouhestani, H., 2023. Lithological sequence, geochemistry and Sr, Nd and Pb isotopic data of Marshoun volcanic rocks, North Abhar (Tarom-Hashtjin subzone). *Petrological Journal*, v. 14(1), p. 81-108. <http://doi.org/10.22108/IJP.2021.128687.1231> (In Persian).
- Axen, G.J., Lam, P.S., Grove, M., Stockli, D.F. and Hassanzadeh, J., 2001. Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics. *Geology*, v. 29(6), p. 559-562. <https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- Berberian, M., 1996. New research and study of tectonics, seismicity, and earthquake-fault hazard in the Semnan area. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Report v. 63 (In Persian).
- Berberian, F., Muir, I.D., Pankhurst, R.J. and Berberian, M., 1982. Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society*, v. 139(5), p. 605-614. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.139.5.0605>
- Ebrahimi Nasirmahaleh, E., Salavati, M., Hakimi Asiabar, S. and Taki, S., 2023. Geochemistry and tectonic setting of Paleogene volcanic rocks of Rudbar in the south of Guilan, northern Iran: Implications for adakitic volcanism. *Petrological Journal*, v. 14(1), p. 53-80. <http://doi.org/10.22108/IJP.2022.131551.1258> (In Persian).
- Ghasemi, A., Mirlohi, A. and Farahmandian, M., 2023. Geochemistry, petrogenesis, and tectonic setting of Nepheline syenite intrusive rocks in Razgah Sarab, East of Azerbaijan Province. *Petrological Journal*, v. 14(3), p. 119-162. <http://doi.org/10.22108/IJP.2023.136655.1300> (In Persian).
- Goss, A.R. and Kay, S.M., 2009. Extreme high field strength element (HFSE) depletion and near-chondritic Nb/Ta ratios in Central Andean adakite-like lavas (~ 28° S, ~ 68° W). *Earth and Planetary Science Letters*, v. 279(1-2), p. 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.035>
- Hajalilou, B. and Rezaei, H., 2001. Geological map of Kivi, scale 1:100000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (In Persian).
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A. and Mitchell, S.F., 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of petrology*, v. 48(12), p. 2341-2357. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- Hoyle, J., Elderfield, H., Gledhill, A. and Greaves, M., 1984. The behaviour of the rare earth elements during mixing of river and sea waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48(1), p. 143-149. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90356-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90356-9)
- IMIDRO, 2018. Final report of preliminary explorations of ore minerals in the Natour and Qotursoei areas. Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization, Iran, 162 p (In Persian).
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, v. 8(5), p. 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Kuscu, G.G. and Geneli, F., 2010. Review of post-collisional volcanism in the Central Anatolian Volcanic Province (Turkey), with special reference to the Tepekoy Volcanic Complex. *International Journal of Earth Sciences*, v. 99(3), p. 593-621. DOI 10.1007/s00531-008-0402-4
- Kuster, D. and Harms, U., 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen: a review. *Lithos*, v. 45(1-4), p. 177-195. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00031-0)
- Middlemost, E.A., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, v. 37(3-4), p. 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Muller, D., Rock, N.M.S. and Groves, D.I., 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. *Mineralogy and Petrology*, v. 46, p. 259-289. <https://doi.org/10.1007/BF01173568>
- Nabavi, M.H. and Partoazar, H., 1977. Discovery of Lower Cretaceous (Neocomian) series in the

- Beyarjomand (Biar) area. Internal report, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (In Persian).
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et cosmochimica acta*, v. 38(5), p. 757-775. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(74\)90149-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(74)90149-5)
- Noori KHeymehsari, S., Rashidnejad Omran, N., Ghorbani, M. and Yang, H.J., 2024. Petrology and Geochemistry of the Aroud Granitoid Pluton, North of Alam Kuh, Central Western Alborz. *Petrological Journal*, v. 15(4), p. 29-46. <http://doi.org/10.22108/IJP.2024.141344.1331> (In Persian).
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, v. 100(1-4), p. 14-48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce, J.A., 1996. A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. In: Wyman, D.A. (ed.), *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*, Geological Association of Canada, Short Course Notes, v. 12, p. 79-113.
- Pearce, J.A., 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth, C.J and Norry, M.J. (eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths*, Nantwich, Cheshire: Shiva Publications, p. 230-249.
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Rare earth elements in East Carpathian volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 32(2), p. 121-126. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90050-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90050-9)
- Peccerillo, A., Dallai, L., Frezzotti, M.L. and Kempton, P.D., 2004. Sr–Nd–Pb–O isotopic evidence for decreasing crustal contamination with ongoing magma evolution at Alicudi volcano (Aeolian arc, Italy): implications for style of magma-crust interaction and for mantle source compositions. *Lithos*, v. 78(1-2), p. 217-233. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.040>
- Riviere, A., 1934. Contribution a l'etude geologique de l'Elbourz. *Revue de geographie physique et de geologie Dynamique* 7, 144 p.
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman, Scientific and Technical, London, 352 p.
- Shand, S.J., 1943. Eruptive rocks: their Genesis, composition, classification, and their relation to ore deposits with a chapter on meteorite. John Wiley and Sons, New York (v. 552.1).
- Srivastava, R.K. and Singh, R.K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 23(3), p. 373-389. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00150-0)
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 52(7), p. 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 42(1), p. 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Thuy, N.T.B., Satir, M., Siebel, W., Vennemann, T. and Van Long, T., 2004. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of granitoids from the Dalat zone, southern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 23(4), p. 467-482. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.06.001>
- Ulmer, P., 2001. Partial melting in the mantle wedge—the role of H₂O in the genesis of mantle-derived 'arc-related' magmas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 127(1-4), p. 215-232. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00229-1)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v. 95(1), p. 185-187. <http://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilson, M., 1989. *Igneous petrogenesis: a global tectonic approach*. Unwin Hyman Ltd, London, 466 p.
- Yu, Q., Ge, W.C., Zhang, J., Zhao, G.C., Zhang, Y.L. and Yang, H., 2017. Geochronology, petrogenesis and tectonic implication of Late Paleozoic volcanic rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China. *Gondwana Research*, v. 43(2), p. 164-177. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.01.010>