

Lithology and tectonomagmatic setting of volcanic and plutonic rocks from the Lak area, southwest Buin Zahra, NW Iran

Mohammadsaeid Firouzbakht¹, Majid Ghaderi² , Hossein-Ali Tajeddin³

¹ M.Sc. student, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, saeid.firouzbakht@gmail.com

² Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, mghaderi@modares.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, h.tajeddin@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 18 May 2022

Accepted: 20 February 2022

Keywords

Lithology

Geochemistry

Urumieh-Dokhtar

Lak area

Buin Zahra



 20.1001.1.22285210.1401.13.4.6.0

 10.22108/ijp.2023.133697.1278

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Urumieh-Dokhtar magmatic arc (UDMA) of Iran with a length of about 1700 km and a width of approximately 150 km is mainly composed of Tertiary volcanic rocks and acidic to basic intrusions (Berberian, 1981; Emami et al., 1992; Darvishzadeh, 2003; Ghorbani, 2003). The UDMA has been attributed to the subduction of the Neotethys oceanic crust under the Iranian plate, which occurred from the Triassic to the Eocene (Asiabanha et al., 2012; Pang et al., 2013). The UDMA extending NW-SE includes a large volume of Cenozoic magmatism, especially in the Eocene (Chiu et al., 2013; Kananian et al., 2014). The purpose of this research is to identify the petrographic and geochemical characteristics of the volcanic and intrusive rocks of the Lak area in NW Iran and also to determine the tectonomagmatic setting of these rocks.

Geology

The Lak area is situated 36 km southwest of Buin Zahra, in the northern part of the UDMA and the western part of the Central Iran zone (Aghanabati, 2006). The UDMA is an Andean magmatic arc with a NW-SE trend, which formed by the oblique subduction of the Neotethys oceanic plate under the central Iranian plate (Shearman et al., 1976; Berberian and King, 1981; Agard et al.,

2011; Gohari et al., 2022). One of the remarkable features of the UDMA is the emplacement of intrusive masses due to late Eocene and early Oligocene pressure phase (Pyrenean tectonic phase) in volcanic-sedimentary sequences of Eocene age (Delavari et al., 2017).

The main outcrops of the study area include Eocene volcanic and volcano-sedimentary rocks consisting of andesite, andesitic basalt, basalt, dacite, and rhyodacite. The volcano-sedimentary

 Corresponding Author

To cite this article: Firouzbakht, M., Ghaderi, M., Tajeddin, H. (2023) Lithology and tectonomagmatic setting of volcanic and plutonic rocks from the Lak area, southwest Buin Zahra, NW Iran. *Petrological Journal*, 13(4), 127-146.

rocks of the Lak area comprise alternating lava flows (basalt to andesite) and pyroclastic materials (various types of tuff and agglomerate).

Methods

The studies carried out in the Lak area include field and laboratory parts. During the field studies, a geological map with a scale of 1:5000 in an area of 20 square kilometers was prepared. Forty-five samples of volcanic rocks and intrusive masses for preparation of thin sections and petrographic studies (20 samples), measurement of main oxides by XRF method (14 samples), and analyzing minor and rare earth element contents by ICP-MS method (17 samples) were collected and sent to the relevant laboratories for analysis.

Petrography

In the Lak area and its surroundings, volcanic and intrusive rocks are exposed. These rocks mainly include andesite lavas, basaltic andesite, basalt and tuff, and pyroclastic deposits of lower Eocene age and intrusive masses and dykes with the composition of dacite, rhyodacite, microdiorite, and gabbro-diorite of upper Eocene-Oligocene age, which were injected into the Eocene volcanic rocks (Firouzbakht et al., 2018).

Geochemistry and tectonomagmatic setting of the volcanic and intrusive rocks

The amount of SiO₂ in the rocks under study varies from 42 to 71% and on K₂O versus SiO₂ diagram, those are in the range of andesite, basaltic andesite, basalt, dacite, and rhyodacite. The range of K₂O changes in these rocks as well as intrusive rocks is relatively wide so the investigated samples of volcanic and intrusive units are located in different groups of low- and medium-potassium rocks. According to the geochemical characteristics and also taking into account the temporal and spatial location of the volcanic rocks of the Lak area, it seems that these rocks are related to the magmatism caused by the subduction of the Neo-Tethys oceanic crust under the central Iranian plate and have been originated in a (magmatic arc) environment.

Possible origin of magma

The widespread distribution of plutonic rocks in

the study area, mineralogical similarity between these plutons and the volcanics as well as very similar chemical compositions of these two rock types in different geochemical and tectonomagmatic discrimination diagrams suggest that the plutonic and the volcanic rocks may have originated from the same source.

The volcanic and plutonic rocks of the area are very similar to calc-alkaline lavas based on major and trace element geochemical data. The Al₂O₃ content of these rocks is high, but they are low in Mg#, their Zr/Y ratio is greater than 3, similar to the volcanic rocks of continental arcs (Pearce and Norry, 1979). In the diagram of normalized trace elements relative to the enriched mid-ocean ridge basalts (E-MORB), Ti (except basalts), Nb, P, and Rb have negative anomalies, but Pb and K show positive anomalies, pointing to magmatic rocks from a subduction zone (Morata and Aguirre, 2003).


Magmas forming volcanic rocks in subduction zones usually originate from mantle wedges, fluids, and hydrous melts derived from subducting oceanic crust. The samples from the Lak area have high K₂O contents and the downward trend in MgO values of the volcanic rocks of the area indicating that the magma originated from the mantle wedge (Gourgaud and Vincent, 2003).

Acknowledgments

We would like to express our gratitude and appreciation to the Research Vice-Chancellor of Tarbiat Modares University as well as Mr. Poursaleh, CEO of Yazd Pejjouyan Industrial and Mining Company, for providing the facilities to carry out this research.



سنگ‌شناسی و جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک، جنوب‌باختری بویین‌زهره، شمال‌باختری ایران

محمدسعید فیروزبخت^۱، مجید قادری^۲ , حسینعلی تاج‌الدین^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، saeid.firoozbakht@gmail.com

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mghaderi@modares.ac.ir

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، h.tajeddin@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

منطقه لک در ۳۶ کیلومتری جنوب‌باختری بویین‌زهره، در بخش شمالی کمان ماگمایی ارومیه- دختر در شمال‌باختری ایران جای دارد. رخنمون‌های اصلی این منطقه را سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی به سن ائوسن، شامل آندزیت، آندزیت‌بازالتی، بازالت و نهشته‌های توفی و آذرآواری تشکیل داده‌اند. در این مجموعه سنگ‌ها، توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف با ترکیب داسیت، ریوداسیت، میکرودیوریت و گابرویدیوریت به سن ائوسن بالایی- الیگوسن تزریق شده‌اند. ویژگی‌های سنگ‌نگاری و ترکیب شیمیایی مشابه‌گدازه‌ها و توده‌های نفوذی در نمودارهای گوناگون زمین‌شیمیایی، نشان‌دهنده آنست که سری‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه احتمالاً خاستگاه مشترکی داشته‌اند. برپایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای اصلی و کمیاب، واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی منطقه در گستره کالک‌آلکال جای می‌گیرند. مقدار Al_2O_3 این سنگ‌ها بالاست (نزدیک به ۱۶ درصدوزنی) و عدد منیزیم (Mg#) کمی (۰/۳) دارند. نسبت Zr/Y در سنگ‌های یادشده از ۳ بیشتر است و از این‌رو به سنگ‌های آتشفشانی کمان‌های قاره‌ای شبیه هستند. در نمودار بهنجار شده به ترکیب پشته‌های میان اقیانوسی غنی‌شده، عنصرهای Ti (مگر بازالت‌ها)، Nb و Rb آنومالی منفی و برای عنصرهای Pb و K آنومالی مثبت نشان می‌دهند. این شواهد نشان می‌دهند سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک از پهنه‌های فرورانشی خاستگاه گرفته‌اند.

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

کلیدواژه‌ها

سنگ‌شناسی

زمین‌شیمی

ارومیه- دختر

منطقه لک

بویین‌زهره




20.1001.1.22285210.1401.13.4.6.0

10.22108/ijp.2023.133697.1278 

مقدمه

مهم‌ترین بررسی‌های انجام شده در کمان ماگمایی ارومیه- دختر می‌توان بررسی‌های عمرانی و همکاران (Omrani et al., 2008)، وردل و همکاران (Verdel et al., 2011) و قائدامینی‌هارونی و همکاران (Gaedamini Harouni et al., 2015) را نام برد که برپایه آنها کمان ماگمایی ارومیه- دختر پیامد فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران در

کمان ماگمایی ارومیه- دختر با درازای نزدیک به ۱۷۰۰ و پهنای نزدیک به ۱۵۰ کیلومتر بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی ترشیری تشکیل شده است و در آن توده‌های نفوذی اسیدی تا بازیک تزریق شده‌اند (Berberian, 1981; Emami et al., 1992; Darvishzadeh, 2003; Ghorbani, 2003). از

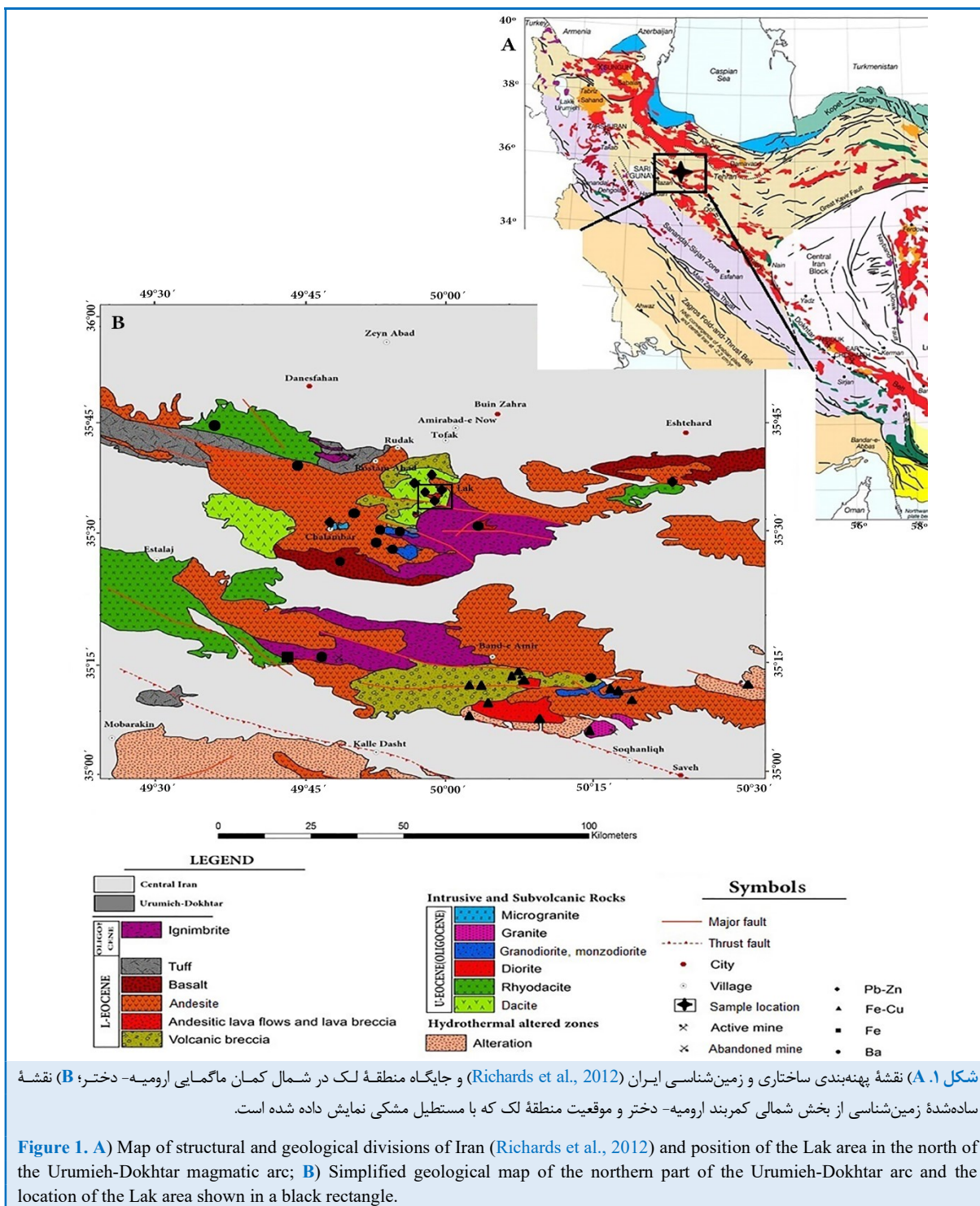
 نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: فیروزبخت، م.، قادری، م.، تاج‌الدین، ح. (۱۴۰۱) سنگ‌شناسی و جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک، جنوب‌باختری بویین‌زهره، شمال‌باختری ایران. پتروژئولوژی، ۱۳(۴)، ۱۲۷-۱۴۶.



می‌گیرد (Chiu et al., 2013; Kananian et al., 2014). منطقه لک در ۳۶ کیلومتری جنوب‌باختری بوبین‌زهره، در شمال‌باختری کمان ماگمایی ارومیه-دختر (Aghanabati, 2006) و در بخش باختری پهنه ایران مرکزی جای دارد (شکل ۱).

تریاس تا ائوسن دانسته شده است (Asiabanha et al., 2012; Chiu et al., 2013; Pang et al., 2013). ارومیه-دختر با امتداد شمال‌باختری-جنوب‌خاوری بخش بزرگی از ماگماتیسم سنوزویک به‌ویژه در ائوسن را دربر



شکل ۱. A) نقشه پهنه‌بندی ساختاری و زمین‌شناسی ایران (Richards et al., 2012) و جایگاه منطقه لک در شمال کمان ماگمایی ارومیه-دختر؛ B) نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی از بخش شمالی کمربند ارومیه-دختر و موقعیت منطقه لک که با مستطیل مشکی نمایش داده شده است.

Figure 1. A) Map of structural and geological divisions of Iran (Richards et al., 2012) and position of the Lak area in the north of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc; B) Simplified geological map of the northern part of the Urumieh-Dokhtar arc and the location of the Lak area shown in a black rectangle.

شدند. از آنجایی که شناخت واحدهای سنگی و ساختارهای زمین‌شناسی منطقه، نخستین گام برای فراهم کردن اطلاعات پایه در بررسی‌های تفصیلی است، بر پایه تصویرهای ماهواره‌ای از منطقه، پیمایش‌های صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری، نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۵۰۰۰ تهیه شد (شکل ۲).

نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) است.

زمین‌شناسی بخش شمالی کمان ماگمایی ارومیه - دختر

مجموعه کمان ماگمایی ارومیه - دختر^۲ (UDMA)، کمر بند ماگمایی نوع آندی با روند شمال‌باختری - جنوب‌خاوری است که در پی فرورانش مورب پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی تشکیل شده است (Shearman et al., 1976; Berberian and King, 1981; Agard et al., 2011). از ویژگی‌های کمان ماگمایی ارومیه - دختر، جایگیری توده‌های نفوذی در پی فاز فشاری ائوسن پایانی و الیگوسن آغازین (فاز زمین‌ساختی پیرنئن) در توالی‌های آتشفشانی - رسوبی به سن ائوسن است (Aghanabati, 2006; Delavari et al., 2017). توده نیمه‌ژرف لک که از جنس داسیت تا ریوداسیت است و در مرکز نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش زمین‌شناسی ساوه (Amidi, 1984) و نیز در کرانه جنوب‌خاوری نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ ورقه دانشفهان (Eghlimi and Mosavvari, 2006) برونزد دارد، در واحدهای آتشفشانی - رسوبی ائوسن با ترکیب غالب آندزیت تا آندزیت‌بازالتی تزریق شده است و هاله دگرگونی حرارتی محدودی را در سنگ‌های میزبان پدید آورده است. این مجموعه خود با توده‌های گابرویدیوریتی و نیز دایک‌های مگاپورفیری و میکرویدیوریتی قطع شده است (شکل ۲).

این منطقه از دیرباز مورد توجه معدن‌کاران بوده است. وجود حفاری‌های قدیمی به صورت تونل‌ها و عملیات معدن‌کاری به صورت برداشت‌های سطحی در محدوده کانسار، استخراج کانسنگ‌های سرب در سال‌های ۱۳۲۳ و ۱۳۲۴ را نشان می‌دهد. در فاصله سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۴ بررسی‌های زمین‌شناسی، اکتشافی و استخراجی توسط شرکت معادن لک به صورت حفر تونل و چندین ترانشه اکتشافی و استخراجی و حفر یک گمانه به ژرفای ۴۰ متر انجام شد. بسیاری از ترانشه‌های حفر شده دستخوش عوامل فرسایشی شده‌اند و در بیشتر موارد تنها آثاری از آنها به جای مانده است. در سال ۱۳۸۲ شرکت پی‌جویان یزد، عملیات اکتشافات زمین‌فیزیکی با روش‌های پتانسیل‌القایی^۱ (IP) و مغناطیس‌سنجی همراه با عملیات اکتشافات زمین‌شیمیایی در منطقه لک را به انجام رسانده است.

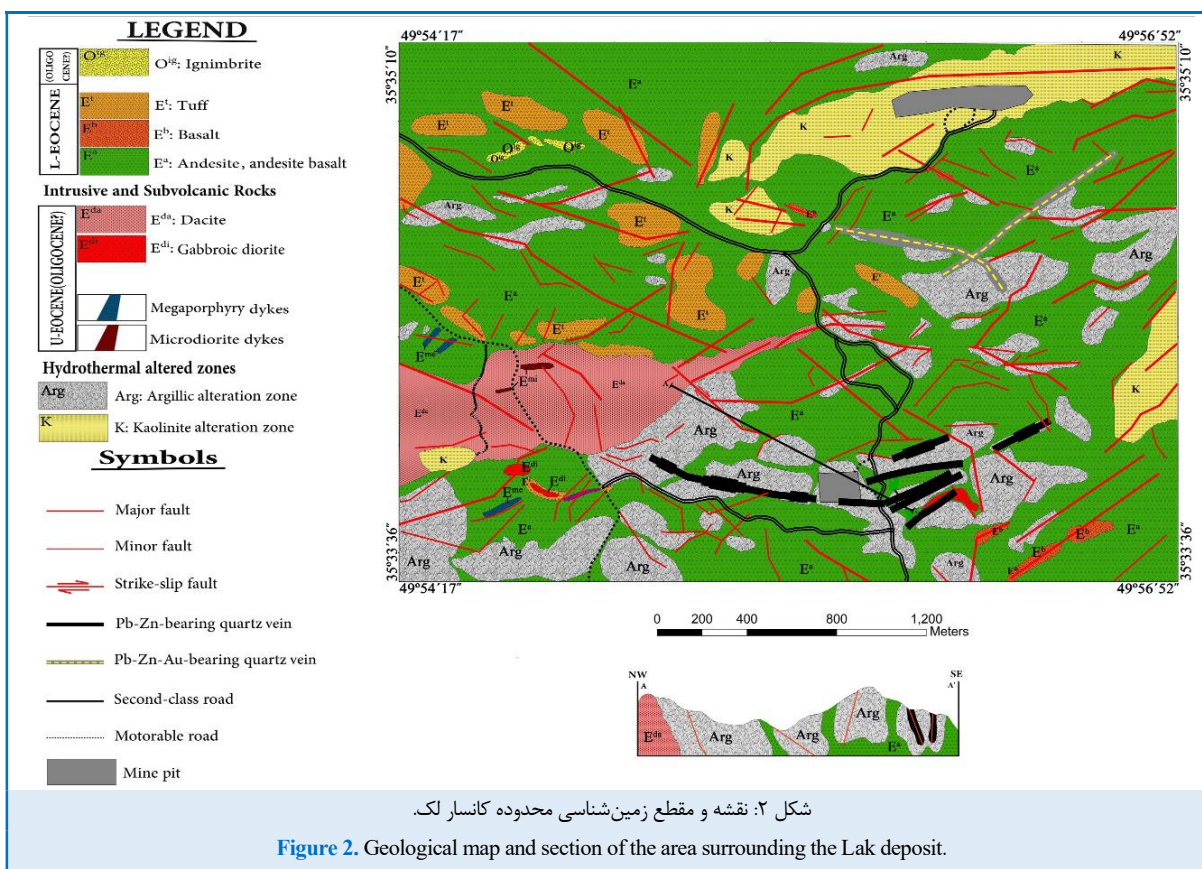
هدف از انجام این پژوهش، شناسایی ویژگی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک و همچنین، تعیین جایگاه نکتونوماگمایی این سنگ‌هاست.

روش انجام پژوهش

بررسی‌های انجام‌شده در منطقه لک شامل دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی هستند. در هنگام بررسی‌های صحرایی، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ و به مساحت ۲۰ کیلومتر مربع تهیه شد. همزمان با آن، ۴۵ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی برای تهیه مقاطع نازک و بررسی‌های سنگ‌نگاری (۲۰ نمونه)، سنجش اکسیدهای اصلی با روش XRF (۱۴ نمونه در دانشگاه تربیت مدرس) و اندازه‌گیری مقادیر عنصرهای فرعی و خاکی نادر با روش ICP-MS (۱۷ نمونه در آزمایشگاه کانساران بینالود) برداشت شدند. نمونه‌ها برای بررسی و یا تجزیه به آزمایشگاه‌های مربوطه فرستاده شدند. در این پژوهش، نمونه‌های سنگی با کمترین میزان دگرسانی و هوازدگی برای تجزیه اکسیدهای اصلی و بررسی‌های سنگ‌نگاری برگزیده

^۲ Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc

^۱ Induced Potential



میزبان اصلی کانی‌سازی در منطقه است، به‌صورت گدازه‌ها و گنبد‌های آتشفشانی به رنگ خاکستری تیره میل به سبز با بافت پورفیریتیک برونزد دارد. در بخش شمالی منطقه، واحد E^a به‌صورت برونزدهای کوچک با ترکیب هورنبلند آندزیت رخنمون دارد. به‌طور کلی، ۵۰ تا ۶۰ درصد مقاطع میکروسکوپی بررسی شده از این واحد را درشت‌بلورهایی متشکل از پلاژیوکلاز و آمفیبول تشکیل داده‌اند. پلاژیوکلازها در اندازه‌های ۱ تا ۵ میلی‌متر، ۱۰ تا ۲۰ درصد از سطح مقطع را پوشش می‌دهند و با بلوره‌های هورنبلند و مقادیر کم بیوتیت همراه هستند (شکل ۳-ب). پلاژیوکلازها به‌صورت بلوره‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با ماکل‌های کارلسباد و پلی‌سینتیک دیده می‌شوند. هورنبلندها در اندازه‌های ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر بیشتر به‌صورت بلوره‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند. زمینه به‌صورت شیشه‌ای (بیشتر شیشه‌زایی شده) یا میکروولیتی است و با ریزبلوره‌های فراوان آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز به‌همراه کانی‌های کدر (بیشتر مگنتیت) همراه است.

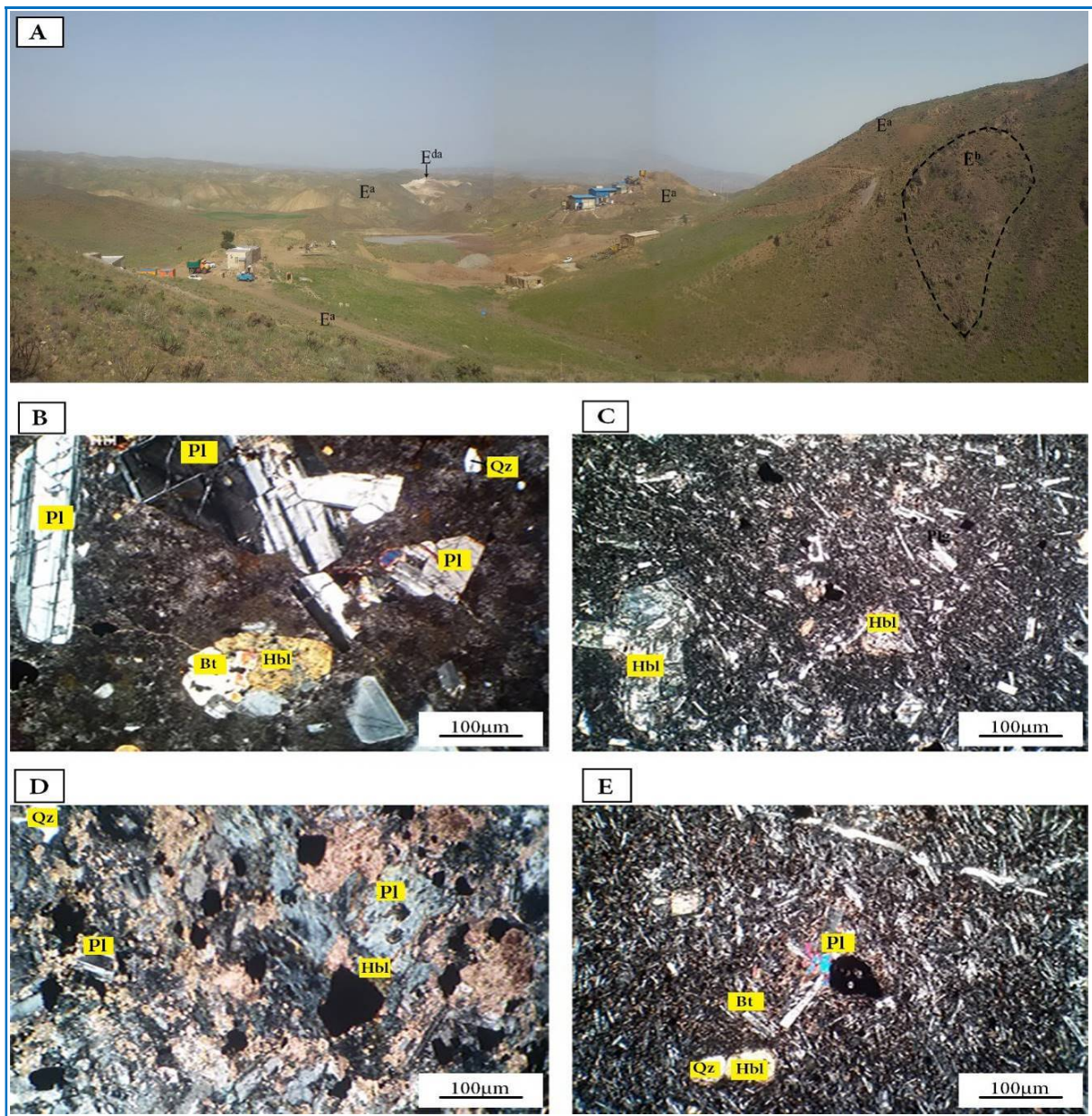
سنگ‌نگاری

در منطقه لک و پیرامون آن، سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی رخنمون دارند. این سنگ‌ها غالباً شامل گدازه‌های آندزیت، آندزیت‌بازالتی، بازالت و نهشته‌های توفی و آذرآواری به سن ائوسن پایینی و توده‌های نفوذی و دایک‌ها با ترکیب داسیت، ریوداسیت، میکرودیوریت و گابرویدیوریت به سن ائوسن بالایی-الگوسن هستند (شکل‌های ۲ و ۳-ا) که در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تزریق شده‌اند (Firouzbakht et al., 2018). به‌طور کلی، واحدهای سنگی در منطقه لک، سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی هستند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۱- واحدهای آتشفشانی

۱-الف- آندزیت تا آندزیت‌بازالتی (E^a)

واحد گدازه‌ای آندزیت تا آندزیت‌بازالتی نخستین فاز فعالیت‌های آتشفشانی در منطقه لک است و حجم اصلی سنگ‌های آتشفشانی منطقه را تشکیل می‌دهد. این واحد که



شکل ۳. A نمای از زمین‌شناسی منطقه لک، دید رو به شمال‌باختری. ارتفاعات بلند واحدهای آندزیت‌بازالتی هستند و واحدهای اسیدی‌تر به‌صورت تپه‌های کم‌ارتفاع در بخش مرکزی رخنمون دارند (E^a: گدازه آندزیت‌بازالتی؛ E^b: گدازه بازالتی؛ E^{da}: توده نفوذی داسیتی)؛ **B, C** تصویر میکروسکوپی (در XPL) از واحد آندزیت‌بازالتی که در آن درشت‌بلورهای فراوان پلاژیوکلاز و هورنبلند در زمینه‌ای شیشه‌ای همراه با ریزبلورهای آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز دیده می‌شوند؛ **D** تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های نفوذی داسیتی-ریوداسیتی منطقه با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز نیمه‌گرد، هورنبلند و بیوتیت با آغشتگی اکسید آهن که در زمینه‌ای ریزبلور با پلاژیوکلاز و کوارتز دیده می‌شوند؛ **E** تصویر میکروسکوپی (در XPL) از گدازه بازالتی منطقه با ریزبلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و مقدار کمی هورنبلند و بیوتیت درون زمینه‌ای ریزبلور با پلاژیوکلاز و کوارتز.

Figure 3. A A view of the geology of the Lak area, looking NW. High elevations are basaltic andesite units. The more acidic units are outcropped as low hills in the central part (E^a: basaltic andesite lava, E^b: basaltic lava, E^{da}: dacite intrusive mass); **B, C** XPL microscopic image of the basaltic andesite unit where abundant plagioclase and hornblende macrocrystals are observed in a glassy background along with alkali feldspar and plagioclase microcrystals; **D** Microscopic image of dacite-rhyodacite intrusions in the area with plagioclase, semi-rounded quartz, hornblende and biotite with iron oxide observed in a microcrystal field with plagioclase and quartz; **E** XPL microscopic image of basaltic lava in the area with plagioclase, quartz microcrystals, and a small amount of hornblende and biotite within the plagioclase and quartz microcrystal background.

چندان نمی‌توان شناسایی کرد (شکل ۳-D). در این سنگ‌ها، بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز بیشتر از ۴۰ درصد فنوکریست‌های سنگ را پوشش داده‌اند. کوارتز نیز به‌صورت ریزبلور در زمینه فلسیتی حضور دارد و تا ۱۰ درصد از فنوکریست‌ها را تشکیل داده است. ریوداسیت‌ها با داسیت‌ها آمیخته‌اند و همبری واضح و متمایزی نشان نمی‌دهند.

۲-ب- دایک‌های با ترکیب میکرودیوریت (E^{md}) تا

گابرودیوریت (E^{gd}): دایک‌ها در منطقه لک از گسل‌های با راستای عموماً شمال‌خاوری- جنوب‌باختری پیروی می‌کنند. دایک‌های یادشده درون سنگ‌های آندزیتی و آندزیت‌بازالتی و همچنین، درون توده‌های نفوذی داسیتی و ریوداسیتی تریق شده‌اند. ضخامت این دایک‌ها معمولاً ۱ تا ۳ متر است و ترکیب آنها در محدوده میکرودیوریت و گابرودیوریت است. پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند و بیوتیت از کانی‌های اصلی سازنده دایک‌ها هستند. دایک‌های یادشده بافت‌های پورفیریتی، میکروگرانولار، اینترگرانولار، افیتیک و ساب‌افیتیک دارند. در دایک‌های گابرودیوریتی، پلاژیوکلازهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و با فراوانی ۴۰ تا ۶۰ درصد حجمی معمولاً ماکل پلی‌سینتتیک یا منطقه‌بندی ساختاری/ترکیبی دارند و گاه به سرسیت دگرسان شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها با فراوانی ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی و به‌صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار در دایک‌های گابرودیوریتی و کمتر از ۱۰ درصد حجمی در دایک‌های میکرودیوریتی حضور دارند. آمفیبول‌ها (هورنبلند) به‌صورت کانی‌های نیمه‌شکل‌دار که کمابیش به کلریت دگرسان شده‌اند، با فراوانی ۵ تا ۱۵ درصد حجمی در دایک‌های گابرودیوریتی و ۲۰ تا ۳۵ درصد حجمی در دایک‌های میکرودیوریتی حضور دارند.

زمین‌شیمی و جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی

برای بررسی زمین‌شیمی واحدهای آتشفشانی و سنگ‌های نفوذی منطقه لک، ۱۴ نمونه برای تجزیه اکسیدهای اصلی به روش XRF و ۱۷ نمونه برای تجزیه به روش ICP-MS برداشت شدند و تجزیه شدند. نمونه‌های مناسب برای XRF شامل ۸ نمونه از واحدهای آتشفشانی و ۶ نمونه از توده‌های نفوذی هستند. این نمونه‌ها شامل

۱-ب- بازالت (E^b): این واحد گدازه‌ای که روی واحد گدازه‌ای E^a جای گرفته است، از بلورهای کلینوپیروکسن، پلاژیوکلاز و گاه الیوین ساخته شده است. بافت اصلی این سنگ‌ها را درشت‌بلورهای با بافت پورفیریتی با زمینه شیشه‌ای تشکیل می‌دهد؛ اما در بخش‌هایی نیز بافت آفانیتیک دیده شده است. درشت‌بلورها ۳۰ تا ۴۵ درصد از سطح مقطع را پوشش داده‌اند. زمینه از میکرولیت‌های پلاژیوکلاز و ریزبلورهای پیروکسن و گاه الیوین ساخته شده است. پلاژیوکلازها در اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر، نزدیک به ۳۰ درصد حجمی فنوکریست‌ها را در بر گرفته‌اند و کمابیش به سرسیت دگرسان شده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها در اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر نزدیک به ۱۰ درصد حجمی از فنوکریست‌ها را در بر دارند. درشت‌بلورهای الیوین که بیشتر به سرپانتین و ایدینگزیت دگرسان شده‌اند، گاه کمتر از ۵ درصد حجمی از فنوکریست‌ها را تشکیل داده‌اند (شکل ۳-C).

۱-پ- ویتریک توف (E^t): سنگ‌های توفی که روی واحد گدازه‌ای E^t جای گرفته‌اند از نوع شیشه‌ای هستند و ترکیب اسیدی (سیلیسی) دارند. این واحد مربوط به نهایی‌ترین فعالیت آتشفشانی ائوسن پسین است و با ایگنبریت‌ها (O^ig) هم‌ارز است. بافت آنها ویتروکلاستیک و ترکیب آنها اسیدی است. درشت‌بلورها شامل پلاژیوکلازهای سدیک، آلکالی‌فلدسپار و کمی کوارتز است و زمینه آنها شیشه‌ای دویتره (شیشه‌زدایی) است.

۱-ت- ایگنبریت (O^ig): جوان‌ترین واحد آتشفشانی در منطقه لک ایگنبریت‌ها هستند. این واحد شامل توف‌های داسیتی یا ریوداسیتی است که بافت کلاستیک دارند و بیشتر از خاکسترهای شیشه‌ای به هم چسبیده تشکیل شده‌اند. در مقاطع میکروسکوپی، فنوکریست‌ها از فلدسپار و بلورهای تجزیه‌شده ساخته شده‌اند که در زمینه شیشه‌ای پراکنده‌اند. اساس زمینه را کوارتزهای ریزبلور با رشد توأم تشکیل داده است.

۲- سنگ‌های نفوذی

۲-الف- داسیت تا ریوداسیت (E^{da}): داسیت‌ها بیشتر به‌صورت گنبدی‌شکل درون واحد آندزیت‌بازالتی (E^a) نفوذ کرده‌اند. این سنگ‌ها به‌طور چشمگیری دچار دگرسانی‌های آرزلی و کاتولینیتی شده‌اند و از این‌رو، بافت اولیه سنگ را

تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی بیشتر روی ویژگی‌های عنصرهایی تأکید شود که در محیط‌های دگرسانی گرمایی، کمابیش کم‌تحرک و غیرفعال بجای می‌مانند. داده‌های تجزیه شیمیایی ۸ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی گوناگون منطقه لک در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

سنگ‌های آندزیت، آندزیت‌بازالت، بازالت، ویتریک‌توف و سنگ‌های نفوذی نیز داسیت، ریوداسیت و دایک هستند. با توجه به دگرسانی نسبتاً گسترده سنگ‌های آتشفشانی منطقه و حضور چشمگیر کانی‌های اپیدوت، کلریت، کلسیت و همتایت، بررسی‌های زمین‌شیمیایی روی نمونه‌های کمتر دگرسان شده متمرکز شد. همچنین، در

جدول ۱. داده‌های تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (بر پایه wt%) و عنصرهای فرعی (بر پایه ppm) در سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک به روش XRF.

Table 1. The chemical analytical data of major oxides (in wt%) and minor elements (in ppm) for the volcanic and intrusive rocks from the Lak area using XRF.

Rock type	Andesite			Basaltic Andesite			Basalt		Dacite		Microdiorite Dyke		Gabbro-Diorite Dyke	
Sample No.	A4	B11	A345	E1	3D2	346	E4	E9	D4	344	C345	B345	E2	E7
SiO ₂	56.33	58.09	53.91	51.95	52.00	41.91	51.35	67.81	69.34	70.69	52.42	51.14	53.25	46.64
Al ₂ O ₃	15.16	16.94	16.01	15.77	15.63	15.21	15.39	24.02	0.64	1.44	16.17	16.14	15.97	18.34
Fe ₂ O ₃	9.21	8.34	10.81	9.50	9.00	11.26	9.10	0.13	0.96	0.49	10.97	11.36	10.79	10.17
MnO	0.16	0.30	0.23	0.19	0.16	0.22	0.28	0.00	0.01	0.00	0.21	0.17	0.19	0.21
MgO	3.98	3.92	4.29	4.09	5.28	4.69	4.17	0.05	0.10	0.07	4.49	4.89	4.38	2.09
CaO	6.28	5.91	7.62	10.30	7.96	14.88	8.87	0.11	0.34	0.08	8.44	8.36	7.66	12.15
Na ₂ O	2.80	3.38	2.70	2.17	2.23	1.08	2.73	5.18	5.20	5.26	2.59	2.54	2.71	2.12
K ₂ O	2.16	1.81	1.65	0.88	1.69	0.079	0.94	1.04	1.08	1.24	1.08	0.69	1.57	0.58
TiO ₂	1.14	0.86	1.27	0.94	0.71	0.85	0.65	0.36	0.28	0.32	1.26	1.30	1.323	1.35
P ₂ O ₅	0.29	0.18	0.33	0.18	0.23	0.09	0.18	0.11	0.01	0.02	0.28	0.30	0.36	0.19
SO ₃	0.24	0.04	0.09	0.04	0.13	0.05	0.05	0.27	0.35	0.09	0.06	0.06	0.08	0.03
L.O.I.	2.12	0.00	0.95	3.81	4.79	9.60	5.99	6.87	0.75	0.37	1.86	2.86	1.57	5.98
Cl	6	12	14	12	17	9	16	7	6	8	10	12	16	11
Cr	0	45	0	0	15	13	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0	57	6	0	11	9	13	5	4	0	0	6	0	0
Cu	7	0	20	16	14	13	21	3	4	0	15	18	22	21
Zn	12	12	10	14	8	7	41	0	2	0	14	11	10	16
Ga	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
Rb	5	3	5	0	3	0	2	0	0	0	3	0	3	0
Sr	30	37	37	36	39	26	40	77	2	4	39	40	36	49
Zr	14	15	20	12	11	0	188	32	15	18	18	21	20	17
Cd	0	0	0	35	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
I	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	50	53	45	56	68	0	44	15	0	0	38	43	50	42
Nd	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Pb	0	5	0	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0

جدول ۲. داده‌های تجزیه شیمیایی عنصرهای فرعی (برپایه ppm) در سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک به روش ICP-MS.

Table 2. The chemical analytical data of minor elements (in ppm) in the volcanic and intrusive rocks from the Lak area using ICP-MS.

Rock type	Andesite					Basaltic Andesite			Basalt	
Sample No.	A4	B11	A345	2B17	346	E4	E1	3D2	337	B17
Li	3.3	1.5	2.2	8.7	12.1	2.9	15.0	6.2	1.7	22.4
Be	0.59	0.67	1.04	0.50	0.05	0.39	0.67	0.37	0.62	1.47
Na	10623	16232	11729	16518	5317	13139	10723	11115	778	540
Mg	11084	13404	16186	12468	12863	11952	14176	14215	1129	575
Al	40566	55565	49192	49781	48036	48705	52430	49981	37842	28870
P	1067	1020	1518	1116	384	707	829	967	622	429
S	33	65	833	776	30	40	20	2341	344	525
K	10427	11528	8443	28465	324	5862	5139	9108	21045	6772
Ca	22138	26908	31568	10012	54283	33432	44445	30703	3305	2838
Ti	4216	4119	5517	3519	3176	3201	4120	3283	2658	1570
V	150	132	177	104	206	180	160	170	74	60
Cr	4	3	12	6	38	12	27	9	14	9
Mn	688	972	1001	3939	753	970	651	642	4027	2888
Fe	37607	41003	48588	35941	42156	42988	40891	42139	37209	35174
Co	13.2	14.3	19.5	13.4	18.0	18.3	18.8	17.8	60.2	13.3
Ni	21.27	4.09	15.78	5.84	17.41	9.94	24.75	12.15	8.09	8.38
Cu	29	14	108	66	61	127	87	82	12594	288
Zn	78	98	95	1049	60	135	75	74	3573	1575
Ga	18.00	22.09	22.69	27.25	14.12	20.77	19.73	20.77	21.30	18.69
Ge	0.24	0.03	0.18	0.12	0.08	3.99	0.11	0.16	0.38	0.19
As	6	4	15	8	4	1	9	10	14	67
Se	37.18	25.27	32.18	32.21	25.42	18.62	16.33	23.51	29.13	22.67
Rb	59.25	50.98	52.40	147.1	1.45	20.63	25.86	37.38	117.5	42.42
Sr	193	275	250	204	168	254	237	247	57	31
Y	23	25	34	19	10	27	23	15	16	8
Zr	111	111	188	125	45	52	100	25	92	30
Nb	11.29	11.95	19.04	14.56	1.70	6.10	12.53	7.65	10.53	4.89
Mo	0.24	0.02	0.29	0.44	0.39	0.20	0.70	0.34	18.39	1.54
Ag	0.65	0.67	1.02	3.05	0.05	0.79	0.84	0.13	3.49	74.3
Cd	1.70	1.01	1.95	3.55	1.49	2.06	1.67	2.22	28.2	6.45
In	0.08	0.10	0.08	0.06	0.09	0.08	0.12	0.11	0.11	0.06
Sn	1.75	1.98	2.17	3.44	0.29	1.75	1.80	1.28	1.45	1.51
Sb	0.57	0.22	0.62	6.13	0.01	0.31	0.81	0.34	4.49	45.92
Te	0.53	0.58	0.57	0.54	0.54	0.54	0.02	0.57	0.56	0.02
Cs	0.97	1.15	1.45	1.32	2.79	1.79	1.45	2.19	1.48	1.31
Ba	216	326	260	807	32	226	198	301	786	363
La	15.60	16.54	20.90	15.77	3.51	12.40	15.75	13.72	14.60	8.45
Ce	32.39	33.27	45.48	33.18	8.38	24.85	32.78	27.43	31.35	17.89
Pr	4.8	4.77	6.75	4.58	1.4	3.71	4.93	3.8	4.02	2.5
Nd	19.86	20.02	27.58	18.54	5.65	15.50	18.83	15.18	16.22	8.61
Sm	4.48	4.81	6.68	3.67	1.68	3.62	4.65	3.68	3.07	1.88

جدول ۲. ادامه

Table 2. Continued.

Rock type	Dacite			Microdiorite Dyke		Gabbro-Diorite Dyke		
	Sample No.	E9	D4	344	C345	B345	E2	E7
Li		43.4	1.1	0.8	3.0	7.6	0.9	11.0
Be		0.22	0.08	0.18	0.97	0.64	1.06	0.85
Na		649	819	603	12062	13238	12496	10288
Mg		403	401	366	15929	15601	16045	7462
Al		61688	4554	6188	51784	55343	50792	56423
P		465	35	69	1535	1413	1645	1061
S		1402	2371	631	437	351	517	44
K		524	365	258	6658	3761	8599	3389
Ca		830	1738	574	34222	36729	32383	43688
Ti		2540	942	1457	5550	5743	5832	4976
V		26	11	14	177	176	177	177
Cr		1	28	22	10	11	10	11
Mn		16	48	33	914	731	849	799
Fe		998	6020	3481	49365	50478	49384	41883
Co		2.8	2.6	2.8	18.9	20.6	19.3	16.3
Ni		5.66	7.82	13.96	19.04	16.02	14.02	13.10
Cu		19	15	17	99	102	108	98
Zn		23	26	33	91	85	94	132
Ga		26.56	0.64	0.91	15.77	22.00	23.20	21.06
Ge		1.24	1.14	1.14	0.10	0.09	0.21	0.28
As		6	2	4	1	1	1	2
Se		24.78	21.21	34.48	61.33	20.76	29.86	27.20
Rb		0.65	1.07	4.28	28.23	14.93	48.52	9.68
Sr		676	14	36	268	285	257	304
Y		6	12	3	34	37	37	27
Zr		157	51	50	186	182	208	204
Nb		24.35	8.75	11.16	18.66	17.71	19.04	11.74
Mo		2.01	3.21	5.99	0.27	0.04	0.48	0.32
Ag		0.90	0.64	0.90	0.88	1.11	1.16	0.72
Cd		1.74	1.59	1.65	2.20	1.63	1.67	1.68
In		0.05	0.04	0.04	0.10	0.08	0.11	0.09
Sn		7.63	5.15	1.17	4.25	2.81	2.51	2.02
Sb		2.64	1.3	0.77	0.93	0.30	0.73	1.82
Te		0.54	0.54	0.02	0.73	0.57	0.53	0.02
Cs		0.60	0.59	0.76	1.20	1.10	1.09	1.70
Ba		109	29	43	227	193	279	194
La		25.12	3.34	6.93	17.44	21.46	22.60	15.27
Ce		45.31	6.30	13.37	37.62	45.78	48.47	33.29
Pr		5.74	0.72	1.71	5.63	7.16	7.35	4.94
Nd		19.38	2.41	5.55	23.32	29.92	30.65	20.31
Sm		2.42	0.39	0.76	5.59	6.78	7.55	5.00

۱- میزان Al_2O_3 نمونه‌ها بالا و نزدیک به ۱۶ درصدوزنی است؛

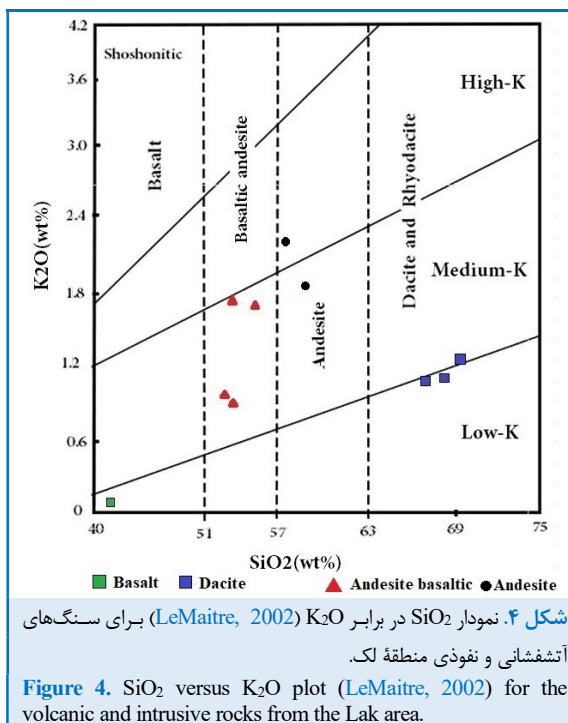
۲- عدد منیزیم $Mg\# (MgO/(MgO+FeO))$ این سنگ‌ها کم و نزدیک به ۰/۳ است.

مقدار بالای Al_2O_3 در بازالت‌ها نشان‌دهنده تبلور کانی‌های مافیک از مذاب اولیه سازنده آنها در فشارهای کمابیش بالاست (Yoder and Tilley, 1962; Gust and Perfit, 1987). این ویژگی موجب تمرکز آلومینیم در مذاب بجامانده و تبلور پلاژیوکلاز در فشارهای کمتر می‌شود. مقدار CaO نمونه‌ها با افزایش SiO_2 کمابیش کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به تحول ترکیب پلاژیوکلازها از کلسیک به سدیک هنگام تبلور بخشی ماگما بستگی داشته باشد (Morata and Aguirre, 2003). به‌طور کلی، ماگماهای اولیه‌ای که در تعادل با کانی‌شناسی شاخص گوشته بالایی (الیون + ارتوپیروکسن + گارنت + اسپینل) هستند باید مقدار Mg یا عدد منیزیم بالا ($>0/7$)، Ni بالا (۱۴۰۰- ppm) Cr (>1500)، مقادیر بالای Cr (>1000 ppm) و مقدار SiO_2 از ۵۰ درصدوزنی کمتر باشند (Gaetani, 2004). البته اگر ماگمای بازیک به‌جای جدایش از گوشته‌ای عادی از گوشته دگرنهاد^۳ خاستگاه گرفته باشد، این معیارها دیگر کاربردی نخواهند داشت (Wilson, 1989). همچنین، به تناسب افزایش تحولات ماگمایی از میزان Mg آنها کاسته می‌شود. برای رده‌بندی ماگماهای اولیه، نمونه‌های تجزیه‌شده با داشتن مقدار میانگین MgO برابر با ۱۰ درصدوزنی، کروم برابر با ۲۰ ppm و نیکل برابر با ۷ ppm، در تعادل با گوشته بالایی به‌شمار نمی‌روند. از این‌رو می‌توان گفت پس از پیدایش در گوشته عادی، این مذاب‌ها دچار تحولات ماگمایی شده‌اند و یا اینکه ماگماهایی هستند که از گوشته دگرنهاد جدا شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد سنگ‌های اسیدی، بازیک و حدواسط به یک مجموعه تعلق ندارند.

بر پایه شکل ۶ و جدول ۱، مقدار Zr در سنگ‌های بازالتی، دامنه‌ای از ۵۲ تا ۸۰ ppm را دربر گرفته است که از این‌رو، به سنگ‌های سری کالک‌آلکان شباهت دارند. در

میزان SiO_2 این سنگ‌ها از ۴۲ تا ۷۱ درصدوزنی متغیر است و برپایه نمودار تغییرات K_2O در برابر SiO_2 (شکل ۴) در محدوده آندزیت، آندزیت‌بازالتی، بازالت، داسیت و ریوداسیت جای می‌گیرند. دامنه تغییرات K_2O این سنگ‌ها و نیز سنگ‌های نفوذی کمابیش گسترده است؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های واحدهای آتشفشانی و نفوذی در گروه سنگ‌های کم‌پتاسیم و با پتاسیم متوسط واقع می‌شوند (شکل ۴).

در شکل ۵ تغییرات برخی عنصرهای اصلی در برابر SiO_2 برای سنگ‌های منطقه لک نمایش داده شده است. مقدار FeO ، TiO_2 و MgO با افزایش SiO_2 روند کاهشی نشان می‌دهد. این ویژگی چه‌بسا نشانه تبلور بخشی پیروکسن است که در برخی سنگ‌های منطقه هنگام تبلور ماگما به‌خوبی دیده می‌شود (Gourgaud and Vincent, 2003).

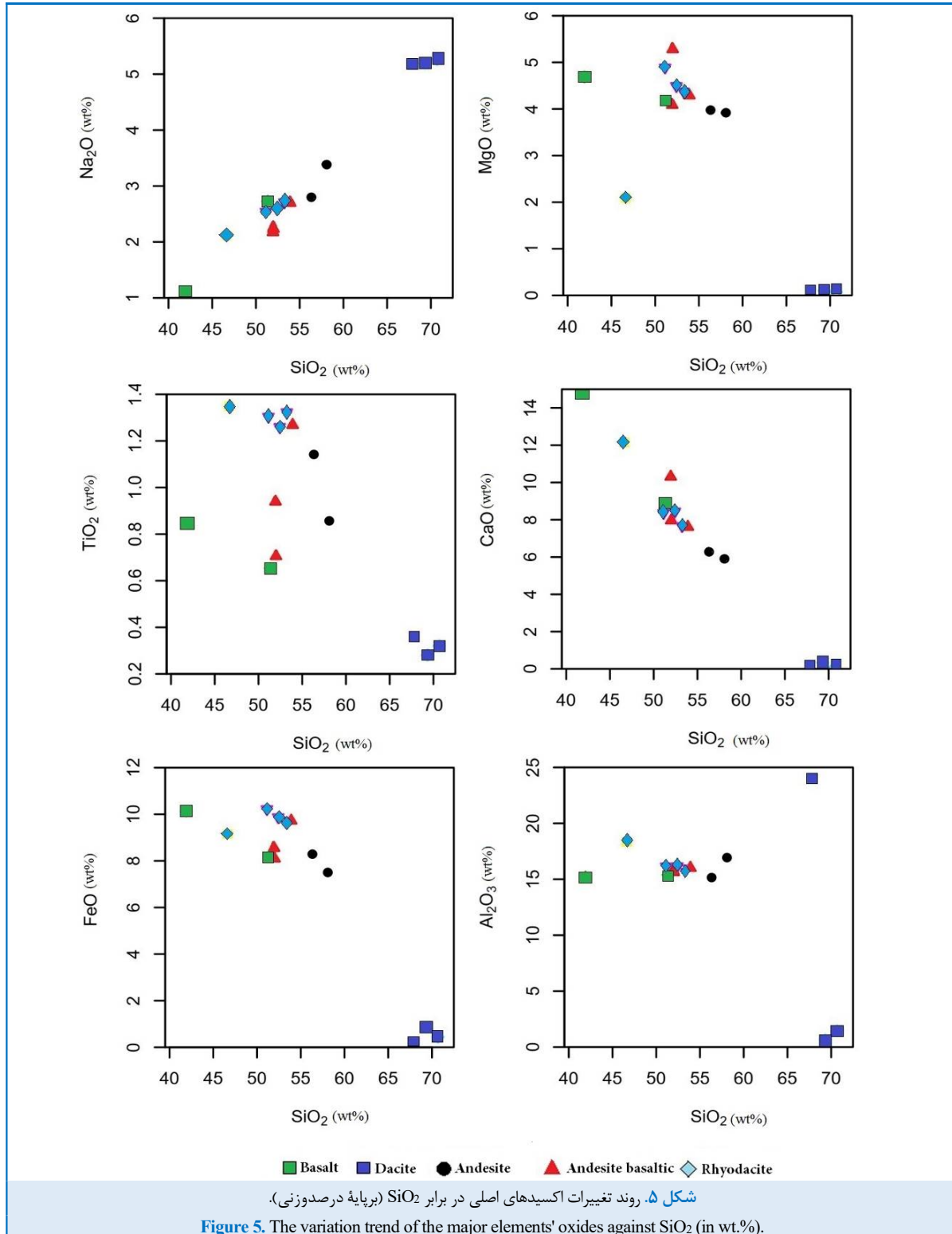


برپایه داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه، دو ویژگی شیمیایی قابل توجه است:

³ Metasomatized

محدوده مذاب‌های کمان‌های ماگمایی ناشی از فرورانش جای می‌گیرند (شکل ۷).

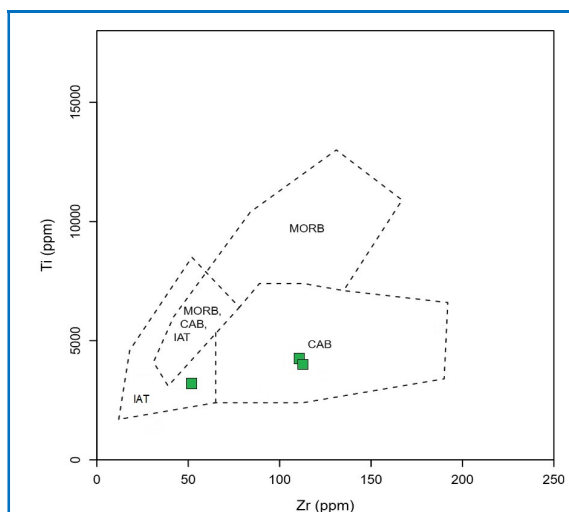
نمودارهای پیشنهادی مولر و گرووز (Muller and Groves, 1997)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه لک در



منطقه لک، گمان می‌رود پیدایش این سنگ‌ها با ماگماتیسم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی در ارتباط است و در محیط کمان ماگمایی^۴ پدید آمده‌اند. برای شناخت ماگماهای کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای از ماگماهای کمان ماگمایی جزیره‌های کمانی از نمودار پیشنهادی پیرس (Pearce, 1983) بهره گرفته شد. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، کمان ماگمایی سازنده سنگ‌های منطقه لک پیامد فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر پوسته قاره‌ای بوده است. نسبت عنصرهای کمیاب Zr/Y نیز برای شناخت رژیم زمین‌ساختی به کار برده می‌شود (Pearce and Norry, 1979)؛ بدین‌گونه که اگر در گدازه‌ها نسبت $Zr/Y > 3$ باشد، سنگ‌ها در کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای پدید آمده‌اند و اگر این نسبت از ۳ کوچک‌تر (< 3) باشد، به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی وابسته‌اند. بررسی این ویژگی درباره سنگ‌های بازالتی منطقه لک نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی منطقه (Zr=111 ppm; Y=23 ppm) نسبت $Zr/Y > 3$ دارند و در گروه کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای جای می‌گیرند. از این‌رو، محیط تکتونوماگمایی پیدایش سنگ‌های آذرین منطقه لک را می‌توان محیط حاشیه فعال قاره‌ای^۵ به‌شمار آورد.

⁴ magmatic arc

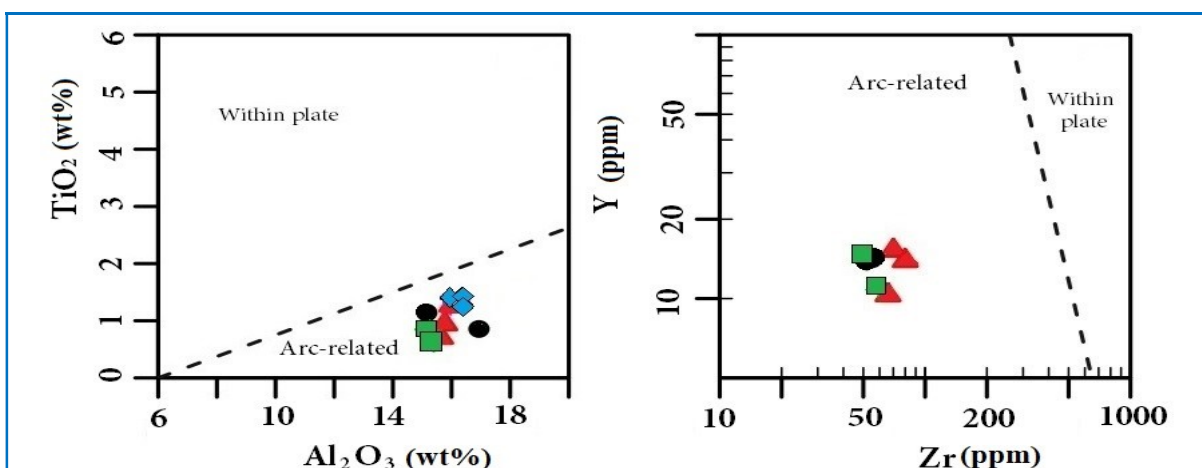
⁵ active continental margin



شکل ۶. ترکیب سنگ‌های بازالتی منطقه لک در نمودار Zr در برابر Ti (Pearce and Cann, 1973) (A: محدوده توله‌ایت جزیره‌های کمانی؛ B: محدوده MORB توله‌ایت جزیره‌های کمانی و بازالت‌های کالک‌آلکالین؛ C: محدوده بازالت‌های درون‌صفحه‌ای؛ D: محدوده توله‌ایت جزیره‌های کمانی و بازالت‌های کالک‌آلکالین. نماد نمونه‌ها همانند شکل ۵ است).

Figure 6. Composition of basaltic rocks of the Lak area on Zr versus Ti diagram (Pearce and Cann, 1973) (A: Island arc tholeiites; B: MORB island arc tholeiites and calc-alkaline basalts; C: Intraplate basalts; D: Island arc tholeiites and calc-alkaline basalts. The symbols are the same as Fig. 5).

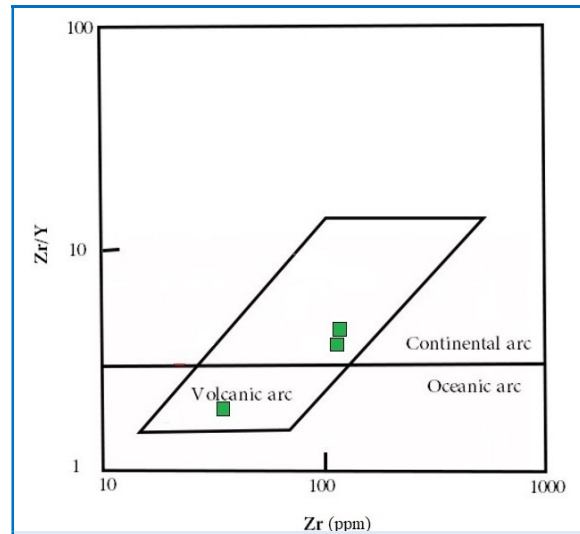
با توجه به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و همچنین، با در نظر گرفتن موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آتشفشانی



شکل ۷. ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه لک در نمودارهای تعیین محیط زمین‌ساختی پیشنهادی مولر و گرووز (Muller and Groves, 1997) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۵ است).

Figure 7. Composition of volcanic rocks from the Lak area in the tectonic setting discrimination diagrams of Muller and Groves (1997) (The symbols are the same as Fig. 5).

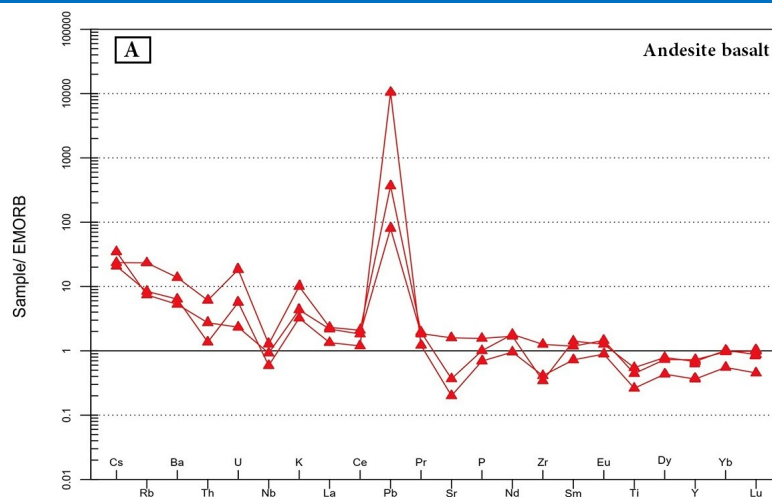
Dy, Th, Eu, Sm, Zr و Lu در نمونه‌ها تقریباً همانند فراوانی این عناصر در ترکیب E-MORB است. همچنین، عنصرهای کمیاب با پتانسیل یونی کم (LILE) پراکندگی بیشتری نسبت به عنصرهای با پتانسیل یونی بالا (HFSE) نشان می‌دهند. این پراکندگی پیامد تحرک کمابیش بالای عنصرهای LILE در هنگام دگرسانی است (Morata and Aguirre, 2003). روند تغییرات عنصرهای کمیاب در سنگ‌های مختلف کمابیش موازی است که این ویژگی گویای هم‌خاستگاه بودن آنهاست. آنومالی منفی عنصرهای Ti (مگر بازالت‌ها)، Nb و Rb در روند تغییرات عنصرهای کمیاب نمونه‌ها الگوی زیگزاگی پدید آورده است. این پدیده می‌تواند نشان‌دهنده پیدایش سنگ‌ها در پهنه فرورانش باشد؛ زیرا در پهنه‌های فرورانش، سیال‌های آزادشده از سنگ‌کره فرورو که از Nb فقیر و از LILE غنی هستند در گوه گشته‌ای افزایش می‌یابند (Borg et al., 1997). در شکل ۹ آنومالی مثبت Pb گویای دگرنهادشدن گوه گشته‌ای توسط سیال‌های برخاسته از پوسته اقیانوسی فرورو و یا آلیش ماگما با پوسته قاره‌ای است (Kamber et al., 2002).



شکل ۸. تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی (بازالتی) منطقه لک بر پایه نمودار Zr در برابر Zr/Y (Pearce, 1983) (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۵ است).

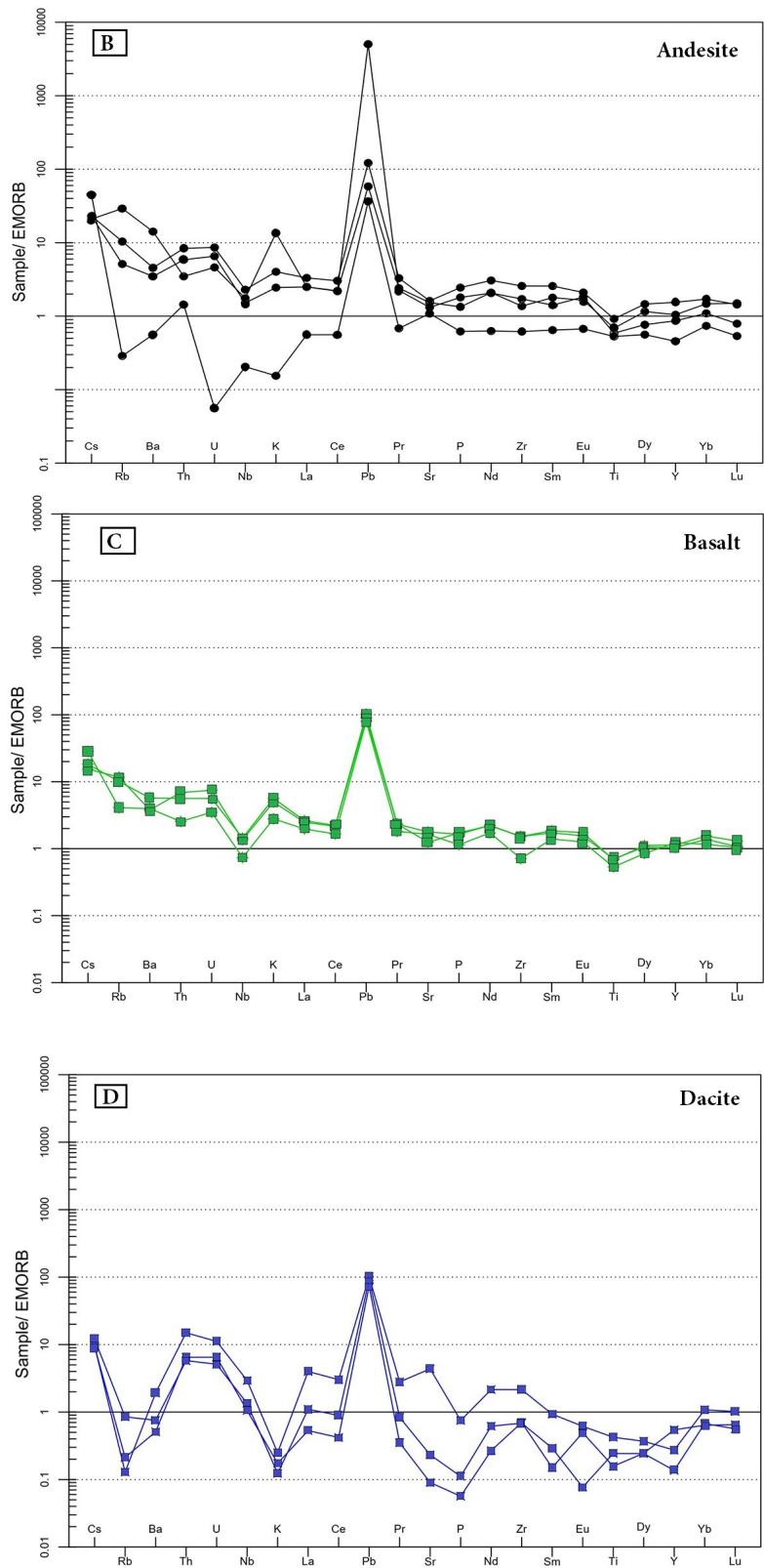
Figure 8. The tectonic setting discrimination of the volcanic rocks (basalt) in the Lak area based on Zr versus Zr/Y diagram (Pearce, 1983) (Symbols are the same as Fig. 5).

ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی لک نسبت به بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی غنی شده یا E-MORB بهنجار شده است (شکل ۹). همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، فراوانی عنصرهای کمیاب Y, Yb,



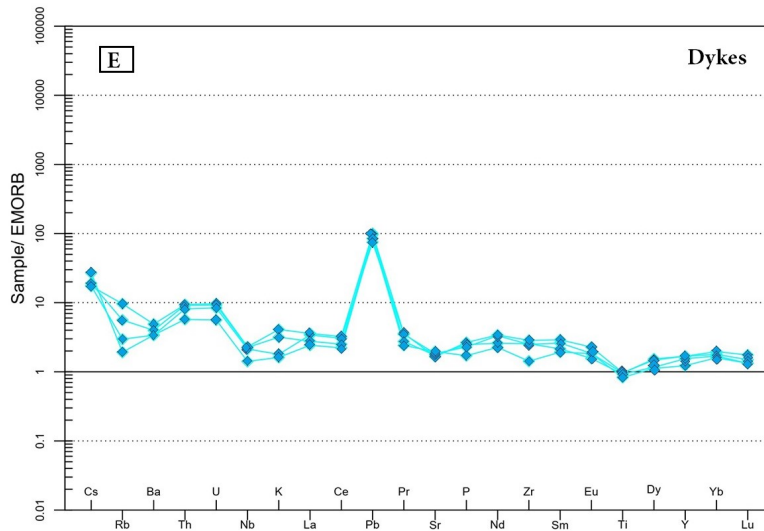
شکل ۹. نمودار عنکبوتی بهنجارشده به ترکیب E-MORB (Sun and McDonough, 1989) برای سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه لک (نماد نمونه‌ها همانند شکل ۵ است).

Figure 9. Spider diagram normalized to the E-MORB composition (Sun and McDonough, 1989) for the volcanic and intrusive rocks of the Lak area (The symbols are similar to those in Fig. 5).



شکل ۹. ادامه.

Figure 9. Continued.

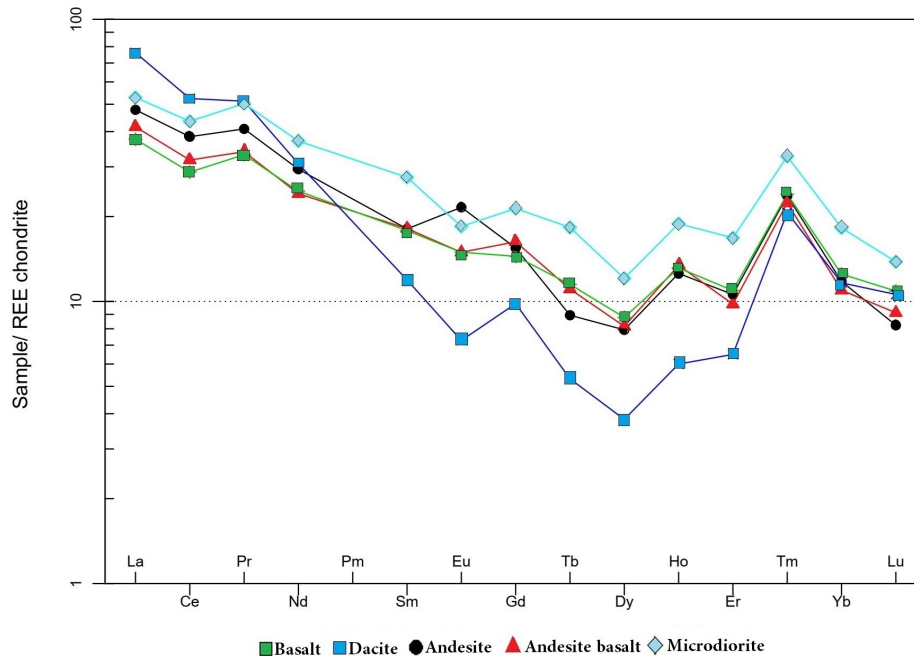


شکل ۹. ادامه.

Figure 9. Continued.

خاکی نادر سنگین (HREE) به چشم می‌خورند. بر این اساس، فراوانی عنصرهای خاکی نادر سبک (LREE) تقریباً نزدیک به ۹ تا ۶۰ برابر فراوانی این عنصرها در ترکیب کندریت است؛ اما فراوانی عنصرهای HREE ۴ تا ۸ برابر ترکیب کندریت است.

فراوانی عنصرهای خاکی نادر نمونه‌ها، نسبت به ترکیب کندریت (Nakamura, 1974) بهنجار شده است (شکل ۱۰). در این شکل، الگوهای یکنواخت غنی‌شدگی از عنصرهای خاکی نادر سبک (از La تا Sm) در مقایسه با عنصرهای



شکل ۱۰. الگوی عنصرهای خاکی نادر بهنجارشده به ترکیب کندریت (Nakamura, 1974) برای سنگ‌های آتشفشانی (آندزیت‌بازالتی، بازالت و آندزیت) و نفوذی (داسیت و میکرودیوریت) بازیک منطقه لک.

Figure 10. Chondrite-normalized (Nakamura, 1974) rare earth element patterns for volcanic (basaltic andesite, basalt, and andesite) and intrusive (dacite and microdiorite) basic rocks from the Lak area.

برداشت

سنگ‌های آتشفشانی برونزدیافته در منطقه لک در جنوب‌باختری بوبین‌زهر شامل تناوبی از گدازه‌های با ترکیب بازالت، آندزیت‌بازالت و آندزیتی همراه با سنگ‌های آذرآواری و توفی متعلق به ائوسن پایینی هستند. سنگ‌های نفوذی نیمه‌ژرف منطقه لک با ترکیب داسیت و ریوداسیت و نیز دایک‌های میکرودیوریتی با سن ائوسن بالایی (الیگوسن)، به درون سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی ائوسن تزریق شده‌اند و منجر به دگرسانی اپیدوتی و کلریتی در آنها شده‌اند. برپایه داده‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای اصلی و کمیاب، سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی لک از سری کالک‌آلکالان به‌شمار می‌روند. نسبت Zr/Y نشان می‌دهد سنگ‌های یادشده ویژگی‌های مربوط به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای را دارند. کم‌بودن مقدار عدد Mg در نمونه‌ها گویای نقش فرایندهای تحول ماگمایی در پیدایش گدازه‌های این ناحیه است. در نمودار عنصرهای کمیاب به‌نجرار شده به ترکیب پشته‌های میان اقیانوسی غنی شده (E-MORB)، عنصرهای Ti (مگر بازالت‌ها)، Nb و Rb آنومالی منفی نشان می‌دهند؛ اما Pb و K آنومالی مثبت دارند. این شواهد از ویژگی‌های سنگ‌های ماگمایی پهنه‌های فرورانش هستند. بررسی زمین‌شیمیایی عنصرهای کمیاب و نیز موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آندزیتی، آندزیت‌بازالتی و بازالتی منطقه لک گویای آنست که سنگ‌های یادشده با ماگماتیسم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی همخوانی دارند. گمان می‌رود گدازه‌های منطقه لک از ذوب‌بخشی گوه گشته‌ای خاستگاه گرفته باشند که در پی تماس با سیال‌های جدادشده از پوسته اقیانوسی فرورو از عنصرهای کمیاب غنی شده است.

سپاس‌گزاری

از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و همچنین، آقای مهندس پورصالح مدیرعامل شرکت صنعتی و معدنی پی‌جویان یزد برای در اختیار گذاشتن امکانات انجام این پژوهش سپاس‌گزاری می‌شود.

غنی‌شدگی از عنصرهای LREE نسبت به عنصرهای HREE و مقدار کم Zr ، TiO_2 ، Nb وابستگی این سنگ‌ها به سری‌های کالک‌آلکالان را نشان می‌دهد (Machado et al., 2005). عنصر Eu در بازالت‌های منطقه، آنومالی منفی و در آندزیت‌ها و آندزیت‌های بازالتی، آنومالی مثبت نشان می‌دهد که این بی‌هنجاری چه‌بسا به تجمع پلاژیوکلاز در آندزیت‌ها هنگام تحولات ماگمایی مربوط است (McKenzie and O'Nions, 1991).

خاستگاه احتمالی ماگما

ماگماهای سازنده سنگ‌های آتشفشانی در پهنه‌های فرورانش معمولاً از گوه گشته‌ای، سیال‌ها و مذاب‌های آبدار جدادشده از پوسته اقیانوسی فرورو خاستگاه می‌گیرند (Pearce and Peate, 1995). ماگماهایی که از گوه گشته‌ای خاستگاه گرفته‌اند معمولاً K_2O بالا و MgO کمی دارند (Middlemost, 1986). همان‌گونه که گفته شد، نمونه‌های منطقه لک مقدار K_2O بالایی دارند و روند کاهش در مقادیر MgO سنگ‌های آتشفشانی منطقه لک نشان می‌دهد ماگما از گوه گشته‌ای خاستگاه گرفته است. نسبت بالای Ba/Th نیز گویای تأثیر رسوب‌ها هنگام زایش ماگماست (Morata and Aguirre, 2003). در سنگ‌های آتشفشانی منطقه لک، میزان K_2O در بازه گسترده‌ای نوسان دارد؛ اما نسبت Ba/Th در نمونه‌ها بالاست. هنگامی که پوشش رسوبی روی پوسته اقیانوسی به درون گشته فرورانده می‌شود، عنصرهای Ba و Sr توسط سیال‌های جدادشده از رسوبات آبدار و پوسته اقیانوسی به گوه گشته‌ای منتقل می‌شوند و ماگمایی با Ba و Sr بالا تولید می‌شود (Morata and Aguirre, 2003). بررسی زمین‌شیمیایی عنصرهای کمیاب و نیز موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آندزیتی، آندزیت‌بازالتی و بازالتی منطقه لک گویای آنست که سنگ‌های یادشده با ماگماتیسم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی همخوانی دارند.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. and Wortel, R. (2011) Zagros orogeny: A subduction-dominated process. Geological Magazine, 148(5-6),

692–725.

- Aghanabati, A. (2006) Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Amidi, S. M. (1984) Geological map of Saveh (1:250,000). Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A. and Rahimi, G. (2012) Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 79–94.
- Berberian, F. (1981) Petrogenesis of Iranian Plutons: A Study of the Natanz and Bazman Intrusive Complexes. Ph.D. thesis, Cambridge University, Cambridge, England.
- Berberian, M. and King, G. C. (1981) Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *The Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210–265.
- Borg, L. E., Clyne, M. A. and Bullen, T. D. (1997) The variable role of slab-derived fluids in the generation of a suite of primitive calc-alkaline lavas from the Southernmost Cascades, California. *The Canadian Mineralogist*, 35, 425–452.
- Chiu, H. Y., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Khatib, M. M. and Iizuka, Y. (2013) Zircon U–Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos*, 162–163, 70–87.
- Darvishzadeh, A. (2003) Geology of Iran. 5th edition, Amirkabir Publication, Tehran, Iran (in Persian).
- Delavari, M., Rezaei, P. and Dolati, A. (2017) Eocene magmatism of Urumieh- Dokhtar belt (north of Saveh): Variation of volcanic suites in an extensional tectonic setting. *Earth Science Researches*, 8(30), 1–18.
- Eghlimi, B. and Mosavvari, F. (2006) Geological map of Danesfahan (Khijarj), scale 1:100,000, sheet 5961. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Emami, M. H., Khalatbari-Jafari, M. and Vossoughi-Abedini, M. (1992) The Tertiary plutonism of Ardestan region, Central Iran. *Quarterly Journal of Geosciences*, 4, 2–14 (in Persian).
- Firouzbakht, M., Ghaderi, M. and Tajeddin, H. (2018) Geology and mineralization in the Lak base metal (-Au) deposit, south Buin Zahra. 10th National Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran, 2, 256–264 (in Persian).
- Gaedamini Harouni, M., Bagheri, H., Asadi Harooni, H. Mokhtari, A. R. and Ayati, F. (2015) Determination of Alishar Cu index (Markazi province) formation conditions using mineralogical and fluid inclusions data. *Petrological Journal*, 6(21), 1–18.
- Ghorbani, M. (2003) Principles of Volcanology with a View on the Volcanoes of Iran. Arian Zamin Publication, Tehran, Iran (in Persian).
- Gaetani, G. A. (2004) The influence of melt structure on trace element partitioning near the peridotite solidus. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147, 511–527.
- Gohari, H., Karimpour, M. H., Asadi Haroni, H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F. and Thomsen, T. B. (2022). Petrogenesis and tectonic setting of Aftabru-Qlichkandi High-K metaluminous intrusive bodies (South of Buin-Zahra): Evidences from Nd-Sr isotopic Data. *Petrological Journal*, 13(2), 151–176.
- Gourgaud, A. and Vincent, P. M. (2003) Petrology of two continental alkaline intraplate series at Emi Koussi volcano, Tibesti, Chad. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 129, 261–290.
- Gust, D. A. and Perfit, M. R. (1987) Phase relations of a high-Mg basalt from the Aleutian Island arc: Implications for primary island arc basalts and high-Al basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97, 7–18.
- Kamber, B. S., Ewart, A., Collerson, K. D., Bruce, M. C. and McDonald, G. D. (2002) Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144, 38–56.
- Kananian, A., Sarjoughian, F., Nadimi, A., Ahmadian, J. and Ling, W. (2014) Geochemical characteristics of

- the Kuh-e Dom intrusion, Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (Iran): Implications for source regions and magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90, 137–148.
- LeMaitre, R. W. (2002) *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Machado, A., Lima, E. F., Chemale, J. F., Morta, D., Oteiza, O., Almeida, D. P. M., Figueiredo, A. M. G., Alexandre, F. M. and Urrutia, J. L. (2005) Geochemistry constraints of Mesozoic-Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 18, 407–425.
- McKenzie, D. and O'Nions, R. K. (1991) Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32, 1021–1091.
- Middlemost, E. A. K. (1986) *Magma and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Morata, D. and Aguirre, L. (2003) Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range, Chile: Geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 459–476.
- Muller, D. and Groves, D. I. (1997) Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. *Lecture Notes in Earth Sciences*, No. 56.
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in Carbonaceous and Ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 757–775.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L. (2008) Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3-4), 380–398.
- 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.
- Pearce, J. A. (1983) Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* (Eds., Hawkesworth, C. J. and Nurry, M. L.) 230-249. Shiva, Nantwich.
- Pearce, J. A. and Cann, J. R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290–300.
- Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979) Petrogenetic implication of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69, 33–47.
- Pearce, J. A. and Peate, D. W. (1995) Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 251–285.
- Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A. and Fletcher, T. (2012) High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Economic Geology*, 107(2), 295–332.
- Shearman, D. J., Walker, G. P. L., Booth, B. and Falcon, N. L. (1976) The geological evolution of southern Iran; the report of the Iranian Makran expedition. *Geographical Journal*, 142(3), 393–410.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42, 313–345.
- Verdel, C., Wernicke, B. P., Hassanzadeh, J. and Guest, B. (2011) A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics*, 30, TC3008.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London.
- Yoder, H. S. and Tilley, C. E. (1962) Origin of basalt magmas: An experimental study of natural and synthetic rock systems. *Journal of Petrology*, 3, 342–532.