

Research Article

Petrography and geochemistry of volcanic rocks in the Siahouki copper-gold deposit: An example of deposits with shoshonitic host rock in the north of Bam

Ali Shahabinejad¹ , Hossein-Ali Tajeddin^{2✉} , Majid Ghaderi³ 

¹ Ph.D. student, Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ali.shahabi@modares.ac.ir

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

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

ARTICLE INFO

Received: 02 June 2024

Accepted: 15 October 2024

Keywords

Petrography

Geochemistry

Shoshonitic volcanic rock

Siahouki

Urumieh-Dokhtar magmatic arc



 10.22108/jjp.2024.141708.1335

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, alkaline rocks are a more important perspective for the largest gold deposits relative to normal calc-alkaline andesites (Müller and Groves, 1993; Sillitoe 1993, 1997, 2002). Specifically, four of the nine largest epithermal gold-silver deposits and four of the ten largest porphyry copper-gold deposits are associated with high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks (Sillitoe, 1997, 2002). The high-K igneous rocks only comprise between 5 and 10 vol.% of volcanic arc rocks and are associated with 40% of the largest epithermal and porphyry deposits, indicating their importance for mineral exploration (Müller and Groves, 2019). The Siahouki Cu-Au deposit is located 50 km north of Bam, in the southern part of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt of Iran. Considering the potential of shoshonitic volcanic rocks as suitable host rocks for epithermal Au-Cu deposits and also the vastness of the rocks in the area, the petrography, and geochemistry of volcanic rocks in the Siahouki Cu-Au deposit is chosen as the subject of the present research. It is hoped that the study of changes in the Cenozoic volcanism from the Siahouki area can reveal part of the geodynamic and subsequently metallogenic development in this part of Iran.

Research method

Field investigations including the preparation of a 1:5000 geological map (Figure 3) as well as collection of rock samples, were performed for this study. At this stage, over 50 specimens were taken, of which 25 samples were selected for preparation of thin sections. Using XRF and ICP-MS techniques, the abundance of major oxides, minor, and trace were determined on 22 representative samples. All the samples were then crushed in a jaw crusher in sizes smaller than 5 mm and were

then sent to the laboratories. The analysis of major oxides was carried out by XRF at the Geology Department of Tarbiat Modares University and the analysis of major, minor, and trace elements was performed using ICP-MS at the laboratory of Zarazma Minerals Studies Company. Excel, Minpet, and GCDkit 6.2 software were used to process and analyze the data obtained from the geochemical analyses of the major oxides, minor, and trace elements (Table 1) and drawing diagrams as well.

✉ Corresponding Author

To cite this article: Shahabinejad, A., Tajeddin, H.A., Ghaderi, M. (2024) Petrography and geochemistry of volcanic rocks at the Siahouki copper-gold deposit: An example of deposits with shoshonitic host rock in the north of Bam. *Petrological Journal*, 15(3), 89-112.

Regional Geology

The Siahouki deposit located in the Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt of Iran (Eftekhamejad et al., 1993), is mainly covered by Eocene volcano-sedimentary rocks and Quaternary alluvium, based on the 1:100,000 Bam geological map.

E^{v2d} unit: includes dacitic lavas, which are partly associated with rhyolitic and rarely andesitic lavas. The unit locally has undergone chlorite alteration. In the places where the argillic alteration is intense, the lavas are light gray to white, and appear cream to light brown in satellite images. The phenocrysts of the unit are mainly replaced by sericite or opaque minerals.

Unit (d) consists of banded-welded tuff associated with Eocene dacitic lava and well-layered sediments including conglomerate, sandstone, and siltstone.

Unit (t) is also mainly composed of dacite and partly associated with rhyolitic to andesitic lavas, tuff, and ash intercalations.

The Eocene volcano-sedimentary units are surrounded by Quaternary alluvial fans (Q^{fl} and Q^{f2}). These units are cut by younger faults.

Alteration and Mineralization

Based on field observations along with drilling core data, Cu-Au mineralization in the Siahouki area occurred as quartz and carbonate veins with stockwork and breccia textures, accompanied by silicic, carbonate, and argillic alteration types. The mineralization is exposed along NW-SE structures in the dacitic crystal tuff (E^d) and andesitic lithic tuff (E^{li}) units, as ore zones up to 200m length and 0.1-2m (average 1 meter) thickness. Field and microscopic studies indicate that ore mineralization is controlled by silicic, carbonate, argillic, and propylitic alteration features. Silicic and carbonate are the most important types of alteration associated with ore (sulfide)-bearing veins. The hypogene ore minerals formed with the quartz and carbonate veins including chalcopyrite, tetrahedrite, bornite, pyrite, and native gold, respectively. During supergene processes, oxidation, and decomposition of sulfide minerals gave

rise to the formation of malachite, azurite, chalcocite, and iron oxide-hydroxides as well.

Discussion

Based on the chemical analytical results of the host rock (E^d unit) in the Siahouki area, the composition of E^d unit plots on the dacite and rhyolite domains (i.e., 61.17 to 76.28 wt.% SiO₂) (Table 1). The samples are characterized by the high Al₂O₃ contents (0.9 to 17.33 wt.%), very high K₂O (> 4.26 wt.%), and a high ratio of K₂O/Na₂O, consistent with the chemical characteristics of typical shoshonitic rocks (Morrison, 1980). The studied samples show negative Ta anomalies, and low Nb/Ti ratios, as well as high contents of Al₂O₃ and P₂O₅ and the high LILE/HFSE ratios. Also, enrichment in Pb can be related to crustal contamination. The formation of potassic magmatism took place with the release of fluids from the subducted Neo-Tethyan crust, the metasomatism of the lithospheric mantle, and the subsequent melting of the metasomatized mantle, which is the result of an extension phase and fault systems in the region, the parent shoshonitic magma rose to the earth's surface.

Conclusion

The Eocene volcanic units at Siahouki are mainly composed of lavas and tuffs with an acidic to intermediate (rhyolite, dacite, and andesite) composition associated with intercalations of intermediate to basic (trachy-andesite, basaltic trachy-andesite and basaltic andesite) lavas. The chemical features of the host rocks (E^d unit) at the Siahouki deposit, which are dacite and rhyolite in composition, are comparable with typical shoshonitic rocks. Other geochemical characteristics of the volcanic-hosted Cu-Au mineralization in the Siahouki deposit (including low Nb/Ti ratios, negative Ta anomalies, and the high contents of Al₂O₃, P₂O₅, and LILE/HFSE ratios) suggest that the deposit generated in a continental volcanic arc environment and display close genetic relationship with shoshonitic composition.

سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی در محدوده کانسار مس - طلای سیاهوکی: نمونه‌ای از کانسارهای همراه با سنگ میزبان شوشونیتی در شمال بم

علی شهابی نژاد^۱، حسینعلی تاج‌الدین^۲، مجید قادری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ali.shahabi@modares.ac.ir

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، h.tajeddin@modares.ac.ir

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mghaderi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کانسار مس-طلای سیاهوکی در ۵۰ کیلومتری شمال بم و در بخش جنوبی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر جای گرفته است. بخش بزرگی از گستره سیاهوکی از سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و نهشته‌های کواترنری پوشیده شده است. واحدهای آتشفشانی ائوسن بیشتر با گدازه‌ها و توف‌های با ترکیب اسیدی تا حد واسط (ریولیت، داسیت و آندزیت) همراه با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های با ترکیب حد واسط تا بازیک (تراکی آندزیت، تراکی آندزیت بازالتی و آندزیت بازالتی) فراگرفته شده است. کانی‌سازی به صورت رگه-رگچه‌های کوارتز و کربنات در واحدهای کریستال توف داسیتی و لیتیک توف آندزیتی رخ داده است. بر پایه داده‌های تجزیه شیمیایی، مقدار K_2O (بیش از ۴/۲۶ درصدوزنی) و نسبت K_2O/Na_2O (بیشتر از ۲) در نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی بالاست. همچنین، داده‌های تجزیه نمونه‌ها گویای نسبت کم Nb/Ti و ناهنجاری منفی عنصر Ti و نیز مقدار بالای نسبت‌های K_2O ، Al_2O_3 ، P_2O_5 و LILE/HFSE هستند. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی واحدهای آتشفشانی میزبان کانه‌زایی مس-طلا در کانسار سیاهوکی نشان می‌دهد این کانسار در یک محیط کمان آتشفشانی قاره‌ای پدید آمده است و با سنگ‌های با سرشت شوشونیتی ارتباط زایشی نزدیکی نشان می‌دهند.

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

کلید واژه‌ها

سنگ‌نگاری

زمین‌شیمی

سنگ آتشفشانی شوشونیتی

سیاهوکی

کمان ماگمایی ارومیه-دختر



doi 10.22108/ijp.2024.141708.1335

میزبان‌ها و اهداف اکتشافی بهتری برای ذخایر

بزرگ مس و طلا به‌شمار می‌روند (Müller and Groves, 1993; Sillitoe, 1993, 1997, 2002).

ارزش فزاینده اقتصادی این سنگ‌ها به‌علت همراهی

مقدمه

امروزه، سنگ‌های آذرین قلیایی (آلکان) در مقایسه با سنگ‌های آندزیتی با سرشت کالک‌آلکان،

✉ نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: شهابی نژاد، ع.، تاج‌الدین، ح.ع.، قادری، م. (۱۴۰۳) سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی در محدوده کانسار مس-طلای سیاهوکی: نمونه‌ای از کانسارهای همراه با سنگ میزبان شوشونیتی در شمال بم. پتروولوژی، ۱۵(۳)، ۸۹-۱۱۲.

ماگمایی کمان آتشفشانی ارومیه- دختر انجام شده است، از آتشفشانی با سرشت غالب کالک‌آلکالن و گاه شوشونیتی و آداکیتی یاد شده است (*Jahangiri et al., 2007; Omrani et al., 2019*). از آنجایی که خاستگاه ماگماتیسم کالک‌آلکالن، شوشونیتی و به‌ویژه آداکیت‌ها متفاوت است، بررسی تغییرات سرشت آتشفشانی سنوزوئیک تا کواترنر ایران، کلید شناخت تحولات ژئودینامیک و فلزایی به‌شمار می‌رود. کانسار مس- طلای سیاهوکی در ۵۰ کیلومتری شمال بم و در بخش جنوبی کمر بند ماگمایی ارومیه- دختر جای دارد (شکل ۱). با توجه به توان سنگ‌های آتشفشانی با سرشت شوشونیتی در میزبانی کانسارهای طلا (و مس) اپی‌ترمال و نیز گستردگی بالای این نوع سنگ‌ها در محدوده سیاهوکی، بررسی این نوع از سنگ‌ها و پهنه‌های دگرسانی رخ داده در آنها، در اکتشاف کانسارهای بالقوه طلا (و مس) اپی‌ترمال منطقه کارآمد خواهد بود.

روش انجام پژوهش

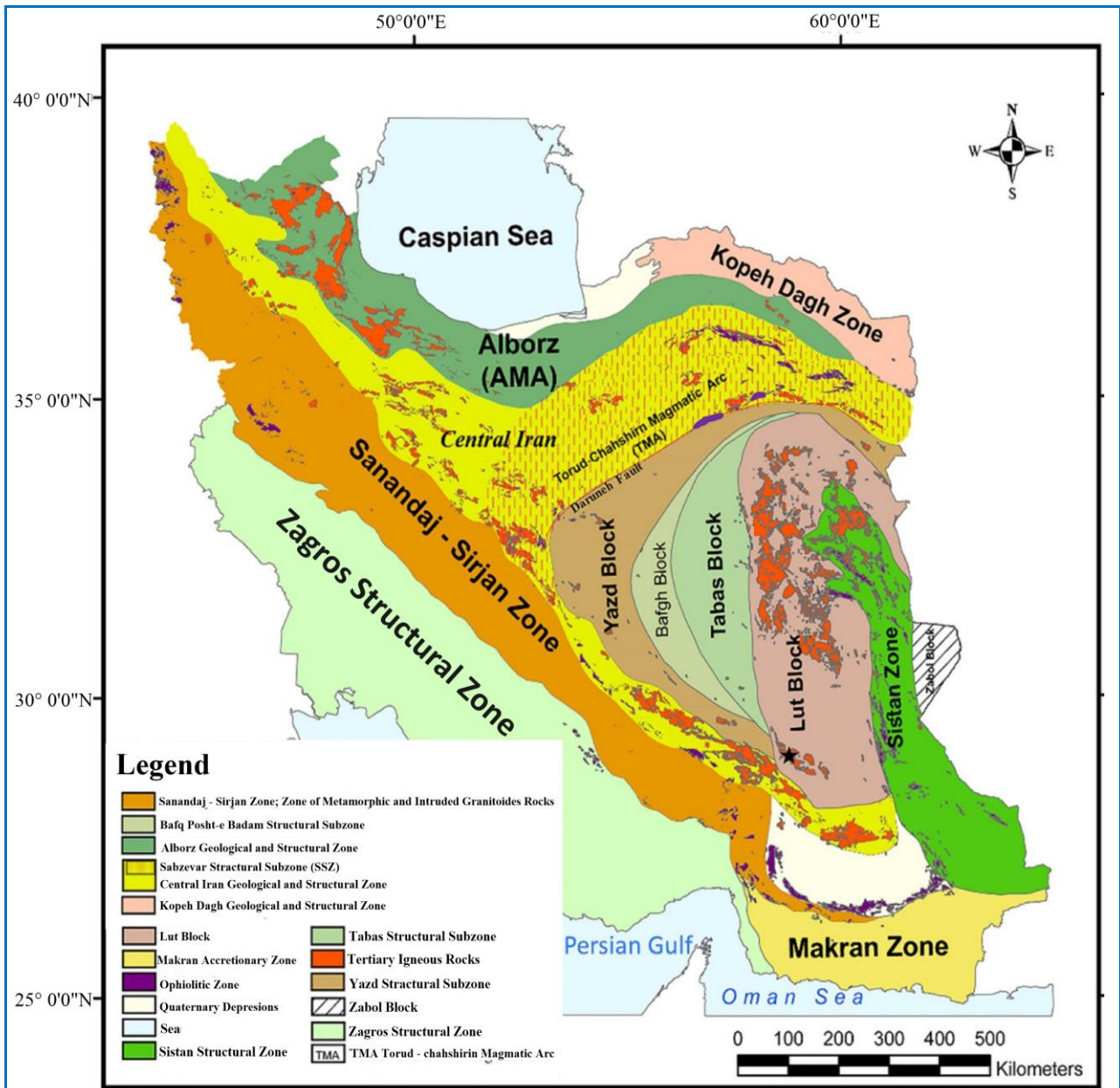
این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی است. بررسی‌های میدانی شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ (شکل ۲) همراه با برداشت نمونه‌های سنگی برای بررسی‌های آزمایشگاهی بوده است. در این مرحله هم‌زمان با تهیه نقشه زمین‌شناسی، بیش از ۵۰ نمونه برداشت شدند که از میان آنها شمار ۲۵ نمونه برای تهیه مقاطع نازک و بررسی‌های سنگ‌نگاری برگزیده شدند. پس از بررسی نمونه‌ها در مقیاس نمونه دستی و با میکروسکوپ پلاریزان، ۲۲ نمونه معرف، برای تعیین فراوانی عنصرهای اصلی، فرعی و کمیاب با روش‌های ICP-MS و XRF انتخاب و آماده‌سازی شدند. برای آماده‌سازی، همه نمونه‌ها با سنگ‌شکن فکی در اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر خرد و سپس به

با کانه‌زایی و اهمیت زمین‌ساختی آنها به‌دلیل توانایی برای بازسازی محیط زمین‌ساختی قاره‌ای گذشته است. از دیدگاه اقتصادی، امروزه ارتباط زایشی سنگ‌های آذرین پتاسیم‌دار با کانسارهای فلزات پایه و طلا به اثبات رسیده است (*Müller and Groves, 1993; Sillitoe, 1997, 2002; Müller et al., 2001; Maughan et al., 2002; Kroll et al., 2002; Müller, 2002; Zhenhua et al., 2003; Mikulski, 2005; Lehmann et al., 2013; Fu et al., 2015; Jamali and Mehrabi, 2015; Liu et al., 2015b; Dwyer et al., 2025*). ذخایر طلای اپی‌ترمال و نیز مس و طلا پورفیری در موقعیت حاشیه صفحه‌های همگرا فراوان هستند که ارتباط زایشی مستقیم آنها با ماگماتیسم کالک‌آلکالن، شوشونیتی و پتاسیم بالا را نشان می‌دهد (*Müller, 2002*). به‌طور ویژه، چهار کانسار از نه ذخیره بزرگ طلا- نقره اپی‌ترمال و چهار کانسار از ده ذخیره بزرگ مس- طلای پورفیری دنیا با سنگ‌های کالک‌آلکالن و شوشونیتی با پتاسیم بالا مرتبط هستند (*Sillitoe, 1997*). سنگ‌های آذرین پتاسیم‌دار در محیط‌های زمین‌ساختی متفاوتی پدید می‌آیند (*Foley and Peccerillo, 1992; Rios et al., 2007; Costa et al., 2011; Torabi, 2011; Yang et al., 2012; Orozco-Garza et al., 2013; Hari et al., 2014; Nabatian et al., 2014; Rao et al., 2014; Ding et al., 2015; Liu et al., 2015a*) و انواع ترکیبات سنگی از شوشونیت‌های همراه با سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکالن تا لوسیتیت‌های فوق‌بازی را در بر می‌گیرند (*Foley and Peccerillo, 1992; Campbell et al., 2014*). گرچه سنگ‌های آذرین با پتاسیم بالا تنها ۵ تا ۱۰ درصد حجمی از سنگ‌های کمانی را در بر می‌گیرند، اما میزبان ۴۰ درصد از بزرگترین ذخایر اپی‌ترمال و پورفیری دنیا هستند که آشکارا اهمیت این دسته از سنگ‌ها به‌عنوان اهداف اکتشافی ذخایر یاد شده را نشان می‌دهد (*Müller and Groves, 2019*).

در بسیاری از پژوهش‌ها که روی سنگ‌های

به‌انجام رسید. برای پردازش و تحلیل داده‌های حاصل از آنالیز زمین‌شیمیایی، عنصرهای اصلی، فرعی و کمیاب (جدول ۱) و رسم نمودارها، نرم‌افزارهای Excel، Minpet و GCDkit 6.2 به کار برده شده‌اند.

آزمایشگاه‌های مربوطه فرستاده شدند. آنالیز اکسیدهای اصلی به روش XRF در آزمایشگاه بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و آنالیز عنصرهای فرعی و کمیاب به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی-ساختاری ایران (با تغییراتی پس از Stöcklin (1968) و Alavi (1991)) که در آن جایگاه محدوده کانسار سیاهوکی (ستاره سیاه‌رنگ) روی کمان ماگمایی ارومیه-دختر نشان داده شده است.

Figure 1. Geological-structural map of Iran (modified after Stöcklin (1968) and Alavi (1991)) and the location of Siahouki deposit (black star) in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc.

جدول 1. ادامه.

Table 1. Continued.

Sample No.	SVK-06	SVK-9-52	SVK-8-108	SVK-08	SVK-23-43	SVK-14-54	SVK-4-118	SVK-02	SVK-09	SVK-4-62
SiO ₂	63.11	63.64	64.75	65.40	67.90	68.17	71.37	71.70	76.28	72.86
TiO ₂	0.63	0.36	0.28	0.22	0.34	0.35	0.21	0.23	0.15	0.21
Al ₂ O ₃	16.88	15.16	15.44	17.12	14.36	14.08	14.98	13.77	10.90	13.41
Fe ₂ O ₃	3.59	2.58	2.41	2.35	2.39	2.21	2.03	2.05	1.93	1.80
CaO	3.77	5.51	5.11	4.00	2.81	3.40	1.61	1.39	1.76	1.32
MgO	0.67	0.51	0.53	0.44	0.75	0.62	0.61	0.23	0.15	0.36
Na ₂ O	2.58	1.48	0.97	0.16	2.77	2.32	1.83	2.65	3.86	2.72
K ₂ O	3.82	4.18	4.64	5.31	4.45	4.26	4.60	6.02	3.01	5.51
MnO	0.12	0.15	0.21	0.12	0.08	0.10	0.07	0.04	0.05	0.05
P ₂ O ₅	0.21	0.10	0.09	0.03	0.11	0.11	0.05	0.06	0.05	0.04
L.O.I.	4.49	6.14	5.47	4.73	3.92	4.19	2.54	1.63	1.62	1.56
Ba	140	444	163	122	608	559	352	829	445	708
Rb	98	124	134	134	126	124	131	139	93	136
Sr	66.6	76.8	52.1	26.1	115.4	106	55.6	127.4	143.3	101.8
Cs	2.7	5.8	6.1	4.6	4	4.3	3.7	2.9	1.6	3.5
Ta	0.4	0.7	0.6	0.7	1.7	0.7	0.7	0.8	0.6	0.4
Nb	8	9.7	9.6	12	13	9.3	13.7	12.5	10.1	8.6
Hf	1.3	2	1.9	2.3	2.2	1.8	2.2	4.3	0.7	2.4
Zr	80	66	66	82	61	65	60	148	20	105
Y	25.9	26.8	26.5	30	23.5	26.2	28.8	38	16.2	30.4
Th	5.5	12.8	13.2	16.2	13.7	12.2	16.6	16.4	13.4	16.2
U	1.3	3.5	3.7	2.8	3.4	6	2.6	3.8	1.7	2.7
Cr	6	9	7	5	10	8	6	8	13	8
Ni	1	4	2	1	4	3	10	3	7	8
Co	2.3	4	2.8	1.3	2.7	3	1.9	1.3	1.5	1.4
V	22	21	19	6	21	19	8	10	6	7
Pb	9	12	6	20	7	12	4	22	30	12
Zn	44	82	41	46	57	48	51	39	32	47
Ag	0.2	0.3	<0.1	0.4	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2
As	19.7	<0.5	3.1	2.8	4.1	3.7	4.2	13.2	2	9.2
Be	1.3	1.7	1.9	1.6	1.8	1.7	1.9	1.8	1.3	2.1
Cu	4	12	9	9	7	8	5	13	8	6
Li	7	7	6	6	6	6	8	7	7	7
Mo	0.8	6.5	1.4	1	1.2	1.1	1.4	1.6	2.4	1.2
Sc	8.9	5.8	5.6	4.2	5.5	5.5	4.5	4.7	3.7	4.8
Sn	5.4	2.3	2.8	2.9	2.7	2.7	2.6	3.7	2.7	3
Tl	0.4	0.9	1.4	1.1	1.1	1	1.1	1.2	0.4	0.7
La	15	25	26	31	23	23	34	34	27	35
Ce	39	53	54	70	50	53	71	78	59	75
Pr	5.46	6.36	6.45	8.1	6.67	6.64	8.25	9.13	7.33	8
Nd	22.9	23.1	23.1	28.7	23.3	22.8	30.1	31.3	26	29
Sm	5.1	4.1	4.3	5.5	5.3	4.9	6	7.4	5	6.2
Eu	1.06	0.85	0.74	0.64	1.2	1.06	0.59	1.16	0.72	0.69
Gd	4.68	4.49	4.47	5.53	4.73	4.99	5.6	6.62	4.83	4.86
Tb	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	1	0.7	0.9
Dy	5.2	4.7	4.4	5.2	4.5	4.6	5	5.9	3.5	4.7
Er	3.1	2.9	2.8	3.2	2.7	2.8	3.2	3.9	2.3	3.4
Tm	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	0.6	0.3	0.5
Yb	2.82	2.95	3.02	4.13	3.01	2.88	3.18	4.42	2.02	3.78
Lu	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	0.5

زمین‌شناسی محدوده

کانسار مس - طلای سیاهوکی در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب‌خاوری کرمان و در ۵۰ کیلومتری شمال بم جای دارد. از دیدگاه زمین‌شناسی، این محدوده با سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن پوشیده شده است. واحدهای سنگی ائوسن که در شمال و شمال‌باختری محدوده شهر بم برونزد دارند، بسیار همانند ردیف‌های سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری در پهنه ارومیه - دختر هستند. از دید ویژگی‌های سنگ‌شناختی و ترکیب شیمیایی، بخش بزرگی از این توالی را توف‌های با ترکیب داسیتی، ریولیتی تا آندزیتی در بر می‌گیرند که میان‌لایه‌ای از گدازه‌های با ترکیب بازیک تا اسیدی دارند. فعالیت‌های گرمابی در محدوده سیاهوکی، با گسترش دگرسانی‌های گرمابی و کانی‌سازی مس و طلا همراه شده است. پهنه‌های کانی‌سازی همروند با ساختارهای شمال‌باختری - جنوب‌خاوری در واحدهای کریستال توف داسیتی (واحد Ed) و لیتیک توف آندزیتی (واحد Eltd) پدید آمده‌اند (شکل ۲).

چینه‌شناسی این ناحیه بر پایه پیمایش‌های انجام‌شده در مقیاس ۱:۵۰۰۰، به پنج واحد سنگی ائوسن (واحدهای Ed, Elg, Eltd) و کواترنری (واحد Qt) دسته‌بندی می‌شود (شکل ۲). بر پایه ویژگی‌های سنگ‌شناختی، بخش بزرگی از واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن را توف‌های با ترکیب داسیتی تا آندزیتی در بر می‌گیرند که میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های با ترکیب بازیک، حد واسط تا اسیدی دارند. در ادامه به توصیف دقیق‌تر واحدهای سنگی محدوده از قدیم به جدید پرداخته می‌شود.

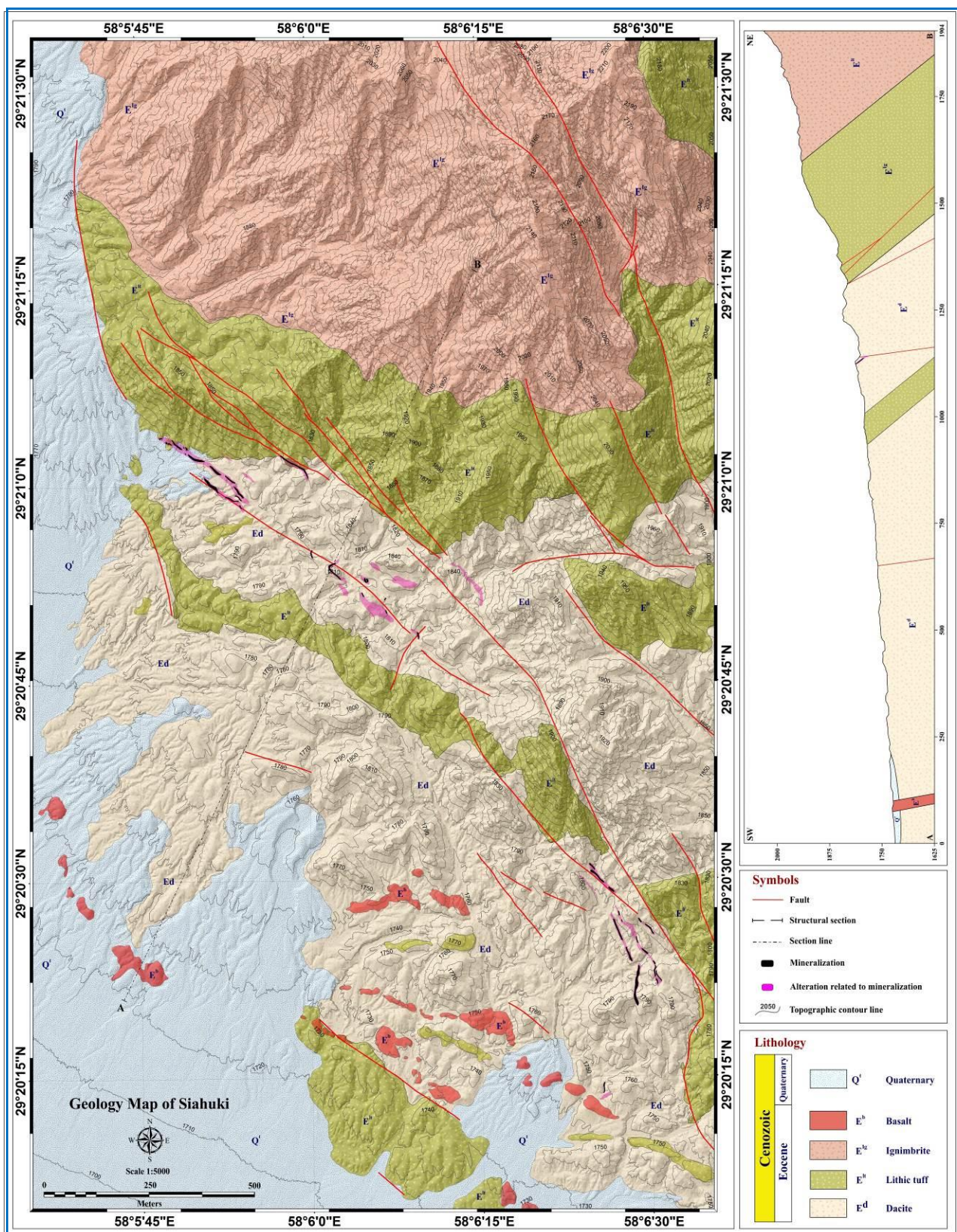
واحد گدازه بازالتی (Eb)

گدازه‌های بازالتی به‌صورت پراکنده و با ریخت‌شناسی نسبتاً برجسته و صخره‌ساز، در شمال و جنوب‌خاوری محدوده سیاهوکی برونزد دارند. این واحد با رنگ قهوه‌ای تیره تا خاکستری تیره، معمولاً با همبری عادی و گاه گسلی در زیر توف‌های داسیتی (واحد Ed) جای گرفته است (شکل‌های A-۳ و B-۳). واحد یادشده در مقیاس نمونه دستی سخت تست و بافت

پورفیری با خمیر | شیشه‌ای دارد و به رنگ سبز تا خاکستری تیره دیده می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی، فنوکریست‌های شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پیروکسن، الیوین و پلاژیوکلاز، ۴۰ تا ۵۰ درصد از حجم سنگ را در بر گرفته‌اند (شکل‌های A-۴ و B-۴). بیشتر فنوکریست‌های پیروکسن، به‌طور اندک تا چشمگیر با کلریت، اپیدوت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. فنوکریست‌های الیوین نیز کم و بیش دگرسان (ایدنگزیتی) شده‌اند و به‌طور اندک تا چشمگیر با کانی‌های دگرسانی کلریت، سرپانتین، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. خمیره دربردارنده فنوکریست‌ها نیز میکرولیتی تا شیشه‌ای است و بیشتر آن از ریزبلورهای پلاژیوکلاز، که کم و بیش به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند، پیروکسن، کلریت و کانی‌های کدر ساخته شده است (شکل C-۴).

واحد کریستال توف داسیتی (Ed)

این واحد با رنگ رخنمون خاکستری و ریخت‌شناسی تپه‌ماهوری نزدیک به نیمی از رخنمون‌های سنگی محدوده را پوشش داده و میزبان اصلی رگه‌های کانه‌دار مس و طلا است. بر پایه بررسی‌های سنگ‌نگارس در مقیاس‌های نمونه دستی و میکروسکوپی، واحد Ed از جنس کریستال توف با ترکیب داسیتی است و به‌طور اساسی از قطعات مختلف سنگی در اندازه‌های کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر، اجزای بلورین و خمیره‌ای از خاکستر (شیشه) و ریزبلورهای شکسته‌شده ساخته شده است (شکل‌های A-۵ و B-۵). بیشتر قطعات سنگی از جنس داسیتی با بافت پورفیری هستند که از بلورهای پلاژیوکلاز (و کوارتز) در یک خمیره شیشه‌ای تا نهان‌بلور پدید آمده‌اند (شکل C-۵). میکروپورفیرها شامل قطعات گاه شکسته کوارتز، پلاژیوکلاز و کمتر آلکالی‌فلدسپار، مسکوویت و شکل‌های دروغین بیوتیت و به‌ندرت آمفیبول هستند (شکل‌های A-۶ و B-۶). پلاژیوکلازها و آلکالی‌فلدسپارها، کم و بیش به کانی‌های رسی، سریسیت و کلسیت دگرسان شده‌اند و کانی‌های بیوتیت و آمفیبول نیز به‌طور کامل با کلریت، سریسیت، کلسیت، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر (اکسیدهای آهن) جانشین شده‌اند.

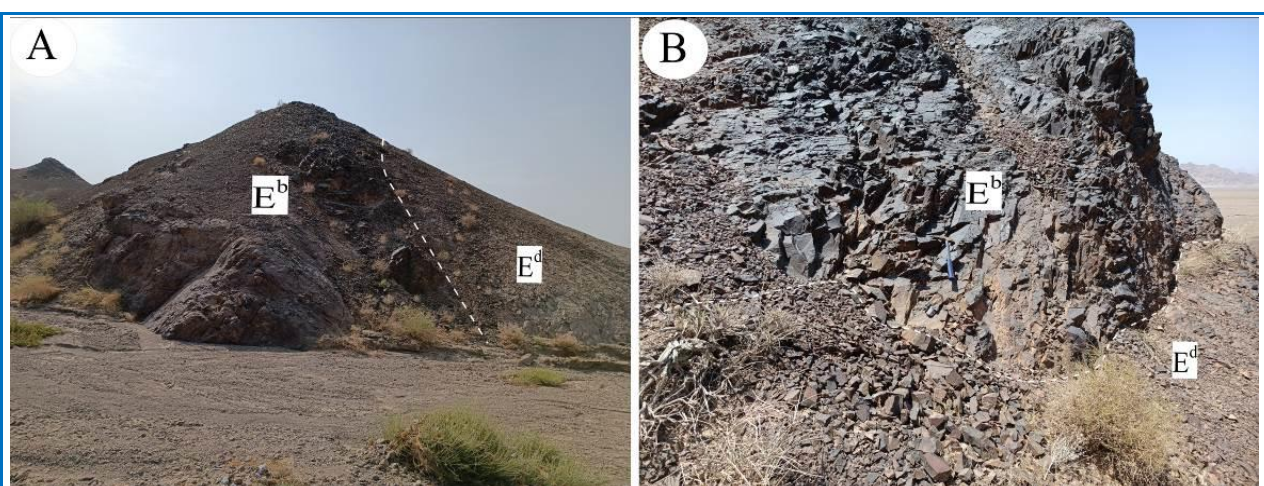


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده سياهوکی در مقیاس ۱:۵.۰۰۰.

Figure 2. Geological map of the Siahouki area, scale 1:5,000.

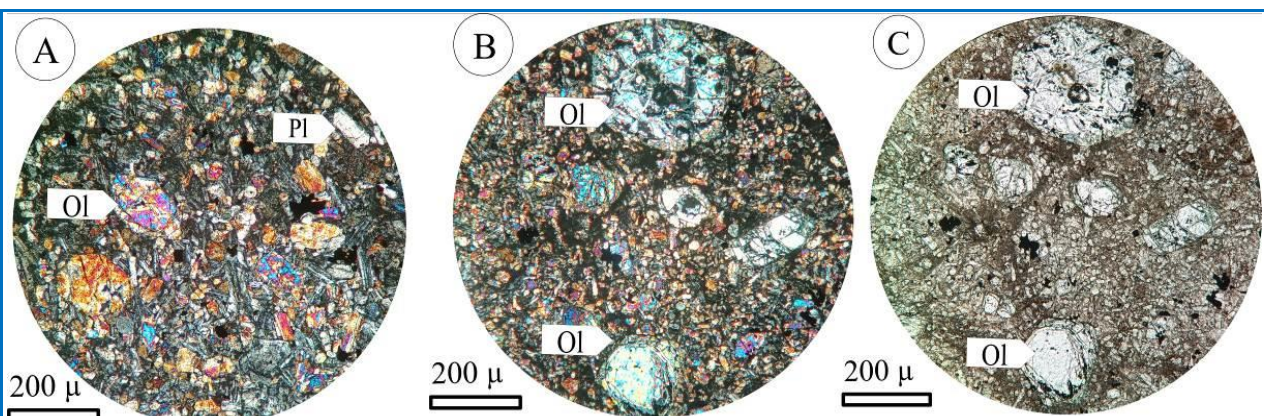
متوسط تا بالا در همراهی با کانی‌های فرعی دگرسانی از نوع سریسیت، کلسیت و کلریت است. کربناتی‌شدن در گستره این گروه سنگی ناهمگن است و در بخش‌هایی از واحد شدیدتر از دیگر دگرسانی‌هاست. در مقاطع بررسی شده قطعات سنگی انگشت‌شماری با ترکیب‌گذازة آندزیتی و توف داسیتی دیده می‌شوند.

خمیره سنگ از بقایای شیشه دگرسان و شیشه‌زدایی‌شده (دویتیره)، ریزبلورهای شکسته و دگرسان‌شده پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپارها، کوارتزهای بازبلورین‌شده و محصولات دگرسانی (شامل کانی‌های رسی، سریسیت، کلسیت، کلریت و اکسیدهای آهن) ساخته شده است (شکل ۶-۳). دگرسانی اصلی از نوع رسی (آرژیلی) با شدت



شکل ۳. A) نمایی از واحد‌گذازة بازالتی (Eb) که با همبری عادی در زیر واحد توف داسیتی (Ed) جای گرفته است (دید رو به شمال‌باختری)؛ B) تصویری از همبری گسلی واحدهای‌گذازة بازالتی و توف داسیتی.

Figure 3. A) A view of the andesitic lava unit (Eb) under the dacitic tuff (Ed) unit with normal contact (northwestward view); B) The andesitic lava (Eb) and dacitic tuff (Ed) units with fault contact.



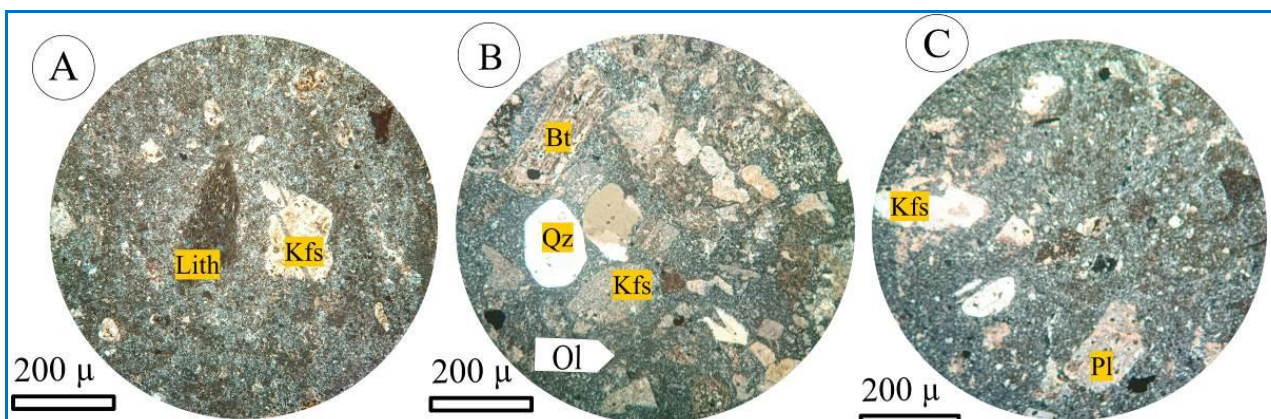
شکل ۴. A, B) تصویرهای میکروسکوپی (XPL) از واحد‌گذازة بازالتی (Eb) با بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار پیروکسن، الیوین (Ol) و پلاژیوکلاز (Pl) در زمینه‌ای از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، ریزبلورهای پیروکسن و شیشه که کم و بیش به کانی‌های کلریت، سرپانتین، کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن و اپیدوت دگرسان شده‌اند؛ C) همان تصویر "B" در نور PPL (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney and Evans, 2010).

Figure 4. A, B) Photomicrographs (transmitted crossed polarized-light (XPL)) of the basaltic lava unit (Eb) containing subhedral to euhedral crystals of pyroxene, olivine, and plagioclase in a groundmass of glass, plagioclase and pyroxene microcrystals. The microcrystals and glass are partially altered to chlorite, serpentine, clay, iron oxides, and epidote; C) Photomicrograph of the picture "B" in the transmitted plane polarized-light (PPL) (Abbreviations from Whitney and Evans, 2010).



شکل ۵. A) دورنمایی از واحد کریستال توف داسیتی (Ed) که با همبری عادی در زیر واحدهای توف ایگنمبریتی (Eig) و لیتیک توف آندزیتی (Elt) قرار گرفته است (دید رو به شمال)؛ B) تصویر نمونه دستی؛ C) تصویر مغزه حفاری از واحد کریستال توف داسیتی (Ed).

Figure 5. A) Panoramic photograph of the dacitic crystal tuff (Ed), under the ignimbrite tuff (Eig), and andesitic lithic tuff (Elt) units with normal contact (View to the north); B) A hand specimen; C) Drill core of the dacitic crystal tuff (Ed).



شکل ۶. A, B, C) تصویرهای میکروسکوپی (XPL) از واحد کریستال توف داسیتی (Ed) با بلورهای کوارتز (Qz)، پتاسیم‌فلدسپار (Kfs)، پلاژیوکلاز (Pl) و بیوتیت (Bt) در خمیره‌ای از خاکستر (شیشه) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney and Evans, 2010).

Figure 6. A, B, C) Photomicrographs (transmitted XPL) of the dacitic crystal tuff (Ed) composed of quartz (Qz), potassium feldspar (Kfs), plagioclase (Pl), and biotite (Bt) in a groundmass of glass (Abbreviations from Whitney and Evans, 2010).

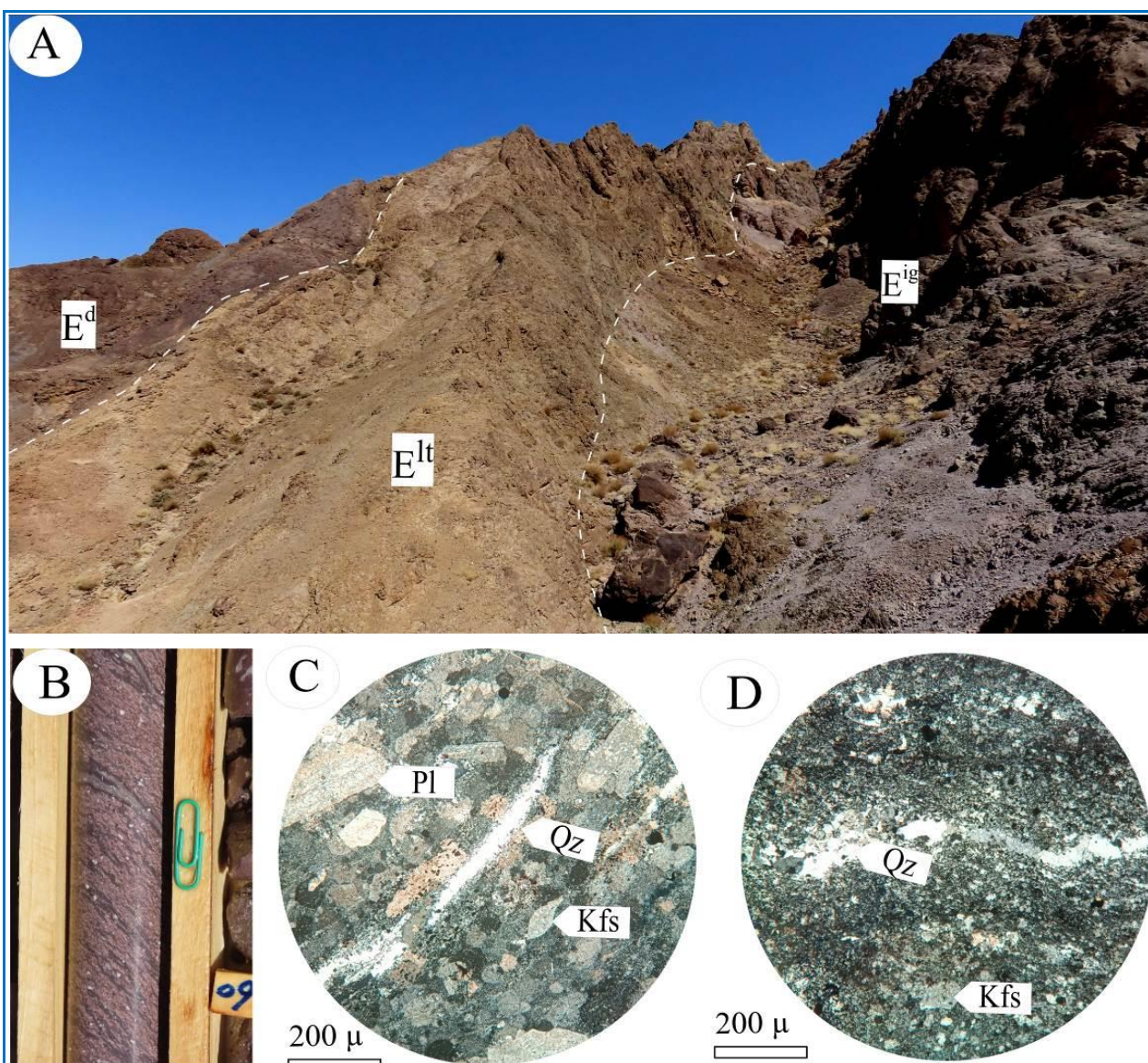
واحد توف ایگنمبریت (Eig)

نواری-جریانی (ایگنمبریتی) دارد و از نوارهای جریانی ناپیوسته با ضخامت‌های کمتر از یک سانتیمتر ساخته شده است. در مقیاس رخنمون، موازی جهت‌یافتگی نوارهای یادشده، سطوح درزه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۷-B). ترکیب سنگ‌شناسی این واحد ریولیتی است و از بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، مسکوویت و بیوتیت در همراهی با قطعات سنگی با ماهیت ریولیت تا ریوداسیت در خمیره‌ای از خاکستر

این واحد سنگی در برابر دیگر سنگ‌های آذرآواری سخت‌تر است و از این‌رو ریخت‌شناسی برجسته و تا اندازه‌ای صخره‌ساز دارد. همبری واحد ایگنمبریتی (Eig) با واحد لیتیک توف داسیتی (Elt) بیشتر ناهمشیب است (شکل ۷-A). از آنجایی که واحد ایگنمبریتی از نهشت خاکسترهای داغ و جوش‌خورده ساخته شده است، این واحد گاه ساخت و بافت‌های

شده و مسکوویت و بیوتیت نیز به‌طور چشمگیری با کلسیت، کلریت و کانی‌های رسی جانشین شده‌اند. دگرسانی اصلی از نوع رسی (آرژیلی) و سریسیتی با شدت ضعیف تا متوسط در همراهی با مقدار فرعی کلسیت است که بیشتر به‌صورت ریزرگچه‌های انباشته از کلسیت مقطع را قطع کرده‌اند.

(شیشه) ساخته شده است (شکل‌های C-۷ و D-۷). خمیره کم و بیش متحمل دگرسانی و شیشه‌زدایی (دویتره) شده است. فراوان‌ترین کانی‌های دگرسانی در مقطع کلریت و کانی‌های رسی همراه با مقدار فرعی زئولیت هستند. پلاژیوکلازها و آلکالی‌فلدسپارها، کم و بیش به کانی‌های رسی، سریسیت و کلسیت دگرسان



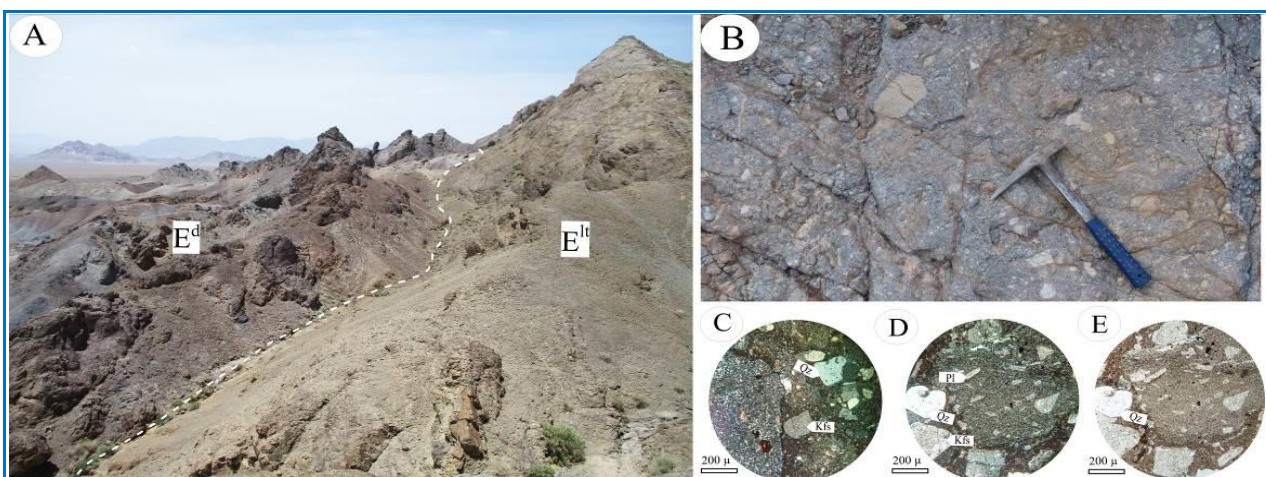
شکل ۷. A دورنمایی از همبری واحدهای کریستال توف داسیتی (Ed)، لیتیک توف آندزیتی (Elt) و توف ایگنمبریتی (Eig) در محدوده سیاهوکی (دید رو به شمال)؛ **B** تصویری از واحد توف ایگنمبریتی (Eig) با ساخت نواری-جریانی در بخشی از مغزه‌های حفاری؛ **C, D** تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از واحد توف ایگنمبریتی که از شکل‌های شعله‌مانند کوارتز (Qz) و پتاسیم‌فلدسپار (Kfs) ساخته شده است (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از [Whitney and Evans \(2010\)](#)).

Figure 7. A A view of the dacitic tuff (Ed), andesitic lithic tuff (Elt), and ignimbrite tuff (Eig) units in Siahouki area (view to the north); **B** A picture of the banded-welded ignimbrite tuff (Eig) structure in a part of drill core specimen; **C, D** Photomicrographs (in XPL) of the ignimbrite tuff which consists of shard glass quartz (Qz) and potassium feldspar (Kfs) (Mineral abbreviations from [Whitney and Evans \(2010\)](#)).

واحد لیتیک توف با ترکیب آندزیت تا تراکی آندزیت (Elt)

این واحد که با رنگ خاکستری تیره در بخش شمال‌باختری محدوده رخنمون دارد، از قطعات سنگی با ابعاد ۵ میلیمتر تا ۵ سانتیمتر (و به‌ندرت تا ۱۰ سانتیمتر) و اجزای بلورین در خمیره‌ای از خاکستر آتشفشانی ساخته شده است (شکل‌های ۸- A و B). بیشتر قطعات سنگی از جنس گدازه آندزیتی تا تراکی آندزیتی با بافت پورفیری هستند و بیشترشان با شکل‌های کشیده و بیضوی شکل دیده می‌شوند. بیشتر فنوکریست‌های درون قطعات سنگی شامل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کمتر هورنبلندهای دگرسان‌شده (به کلریت و اکسیدهای آهن) هستند. اجزای بلورینی که در سنگ شناسایی می‌شوند بیشتر پلاژیوکلازها در همراهی با مقدارهای فرعی از کانی‌های مافیک (بیشتر هورنبلند و گاه بیوتیت) هستند. پلاژیوکلازها کم و بیش به سرسیت، کانی‌های رسی و کلسیت دگرسان شده‌اند.

بیشتر کانی‌های مافیک نیز به‌طور کامل با کلسیت، سرسیت، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن جانشین شده‌اند. با توجه به شکل کانی دگرسان‌شده و نوع محصولات جانشینی، چه‌بسا کانی‌های مافیک از نوع بیوتیت و آمفیبول بوده‌اند (شکل ۸- C). قطعات سنگی با سرشت غالب آندزیتی، توف و آندزیت بازالتی در زمینه سنگ یافت می‌شوند. خمیره سنگ نهان‌بلور تا شیشه‌ای است و از شیشه آتشفشانی دگرسان‌شده، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، کانی‌های کدر و کانی‌های دگرسانی (مانند کلسیت، کانی‌های رسی، سرسیت و ترکیبات هیدروکسیدی آهن) ساخته شده است (شکل‌های ۸- D و E). مقطع با چند رگچه کلسیتی قطع شده است و حفره‌ها نیز با ریزبلورهای کوارتز و کلسیت انباشته شده‌اند. دگرسانی غالب در سنگ از نوع آرژیلی (با شدت متوسط) همراه با کانی‌های با فراوانی کمتر از نوع کلسیت و سرسیت هستند.



شکل ۸. A) نمای از واحد لیتیک توف با ترکیب آندزیت تا تراکی آندزیت (Elt) در همبری با واحد لیتیک توف داسیتی (Ed) (دید رو به شمال‌باختری)؛ **B)** نمای نزدیک از واحد لیتیک توف یادشده که به‌طور بنیادین از قطعات سنگی در اندازه‌های کوچک‌تر از ۱۰ سانتیمتر در خمیره‌ای از خاکستر ساخته شده است؛ **C، D)** تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از واحد لیتیک توف آندزیتی (Elt) که از قطعات لیتیک با ترکیب آندزیتی و داسیتی در زمینه‌ای از کانی‌های کوارتز (Qz)، پتاسیم‌فلدسپار (Kfs) و پلاژیوکلاز (Pl) و خاکستر ساخته شده است؛ **E)** همان تصویر "D" در نور عبوری PPL (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney and Evans (2010)).

Figure 8. A) A view of the dacitic tuff (Ed) and andesitic lithic tuff (Elt) units (view to NW); **B)** Close-up view of the Elt unit outcrop, which is mainly composed of lithic fragments smaller than 10 cm in a groundmass of volcanic ash; **C, D)** Photomicrographs (transmitted XPL) of the andesitic lithic tuff (Elt) which mostly consists of andesite and dacite lithic fragments, quartz (Qz), potassium feldspar (Kfs) and plagioclase (Pl) in a groundmass of glass; **E)** The same image as "D" in transmitted PPL (Abbreviations from Whitney and Evans (2010)).

شامل قطعه سنگ‌های بزرگ، شن، ماسه، سیلت و رس ساخته شده است که در امتداد آبراهه‌ها انباشته شده‌اند. خاستگاه نهشته‌های یادشده، واحدهای آتشفشانی با ترکیب اسیدی تا

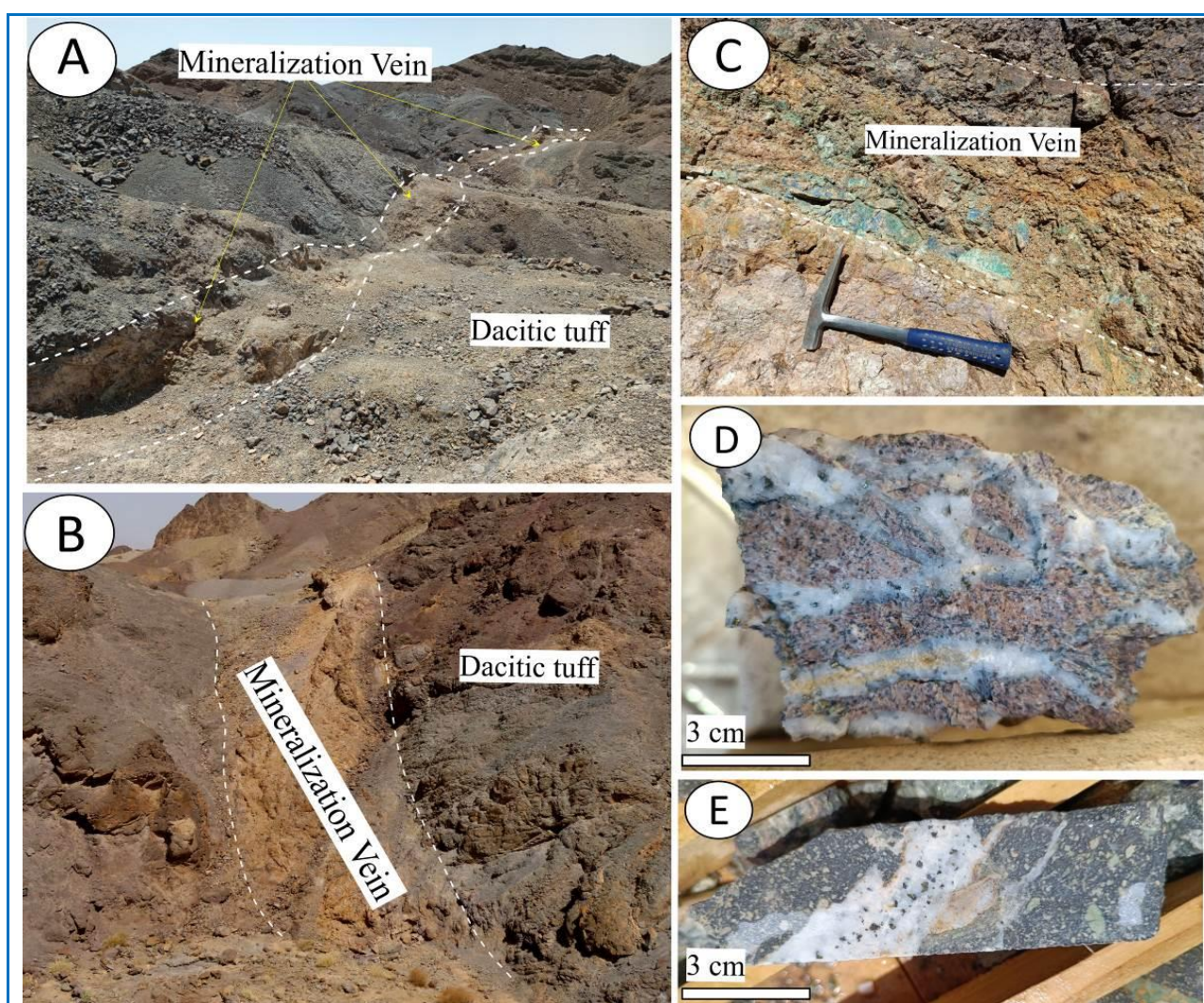
نهشته‌های کواترنری (Qt)

نهشته‌های کواترنری بیشتر در بخش باختری محدوده سیاهوکی گسترش دارند. این نهشته‌ها از رسوبات سخت‌نشده

بر پایه بررسی‌های میدانی و مغزه‌های حفاری، کانی‌سازی به‌صورت رگه-رگچه‌های کوارتز و کربنات با ساخت‌های استوکورک و گاه برشی، در همراهی با پهنه‌های دگرسانی سیلیسی-کربناتی و آرژیلی رخ داده است. رگه (پهنه)‌های اصلی کانه‌دار در راستای ساختارهای گسلی با راستای غالب شمال‌باختری-جنوب‌خاوری برونزد دارند و با طول‌های چند ده تا ۲۰۰ متر و ضخامت‌های ۱۰ سانتیمتر تا ۲ متر (میانگین ۱ متر)، واحدهای کریستال توف داسیتی (Ed) و لیتیک توف آندزیتی (Elt) را قطع کرده‌اند (شکل‌های A-۹ و B-۹).

بازیک هستند که در سراسر محدوده رخنمون دارند. گمان می‌رود راستای شماری از آبراهه‌ها، از راستای گسل‌های جوان پیروی می‌کند و فعالیت گسل‌های یادشده باعث جابجایی مسیر برخی از آنها شده است. در کرانه بخش شمال‌باختری محدوده، لایه‌های کم شیب تا افقی از تراورتن با ضخامت‌های ۱/۵ تا ۱ متر برونزد دارند. کربنات کلسیم در فضای میان قطعات سخت‌نشده نهشت یافته‌اند و از این رو، گاه تراورتن‌ها، سیمان کنگلومراهای نهوژن را پدید آورده‌اند.

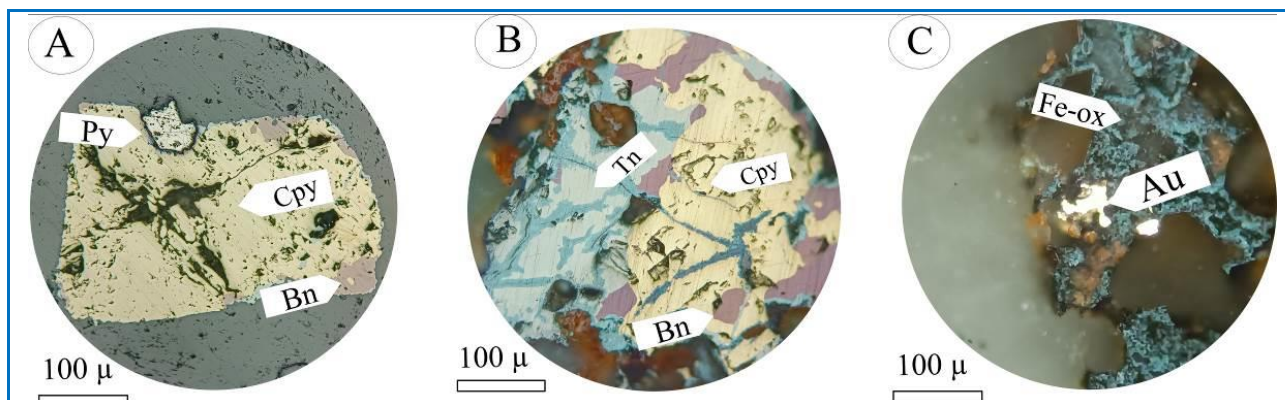
دگرسانی و کانه‌زایی



شکل ۹.۹. A) نمای دور از یک رگه (پهنه) کوارتز-کربنات با کانه‌زایی مس و طلا، که با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری واحد توف داسیتی (Ed) را قطع کرده است (دید رو به جنوب‌خاوری)؛ **B)** تصویر دیگری از پهنه دگرسانی سیلیسی-کربناتی که با کانی‌سازی مس و طلا همراه است (دید رو به شمال‌باختری)؛ **C)** تصویر نزدیک از رگه سیلیسی با کانه‌زایی مس و طلا؛ **D, E)** تصویری از کانه‌زایی مس و طلا با ساخت رگه-رگچه‌ای (استوکورک). **Figure 9. A)** Photographs of quartz-carbonate veins hosted in the dacitic tuff (Ed) unit (View to SE); **B)** A quartz-carbonate veins hosted with gold and copper mineralization (View to NW); **C)** Close-up view of quartz vein containing copper and gold mineralization; **D, E)** Copper and gold-bearing quartz stockwork veins in the andesitic lithic tuff (Elt) unit.

دگرسانی‌های میزبان (سیلیسی، کربناتی و آرژیلی) دیده می‌شود. کانی‌های فلزی سازنده کانسنگ‌ها، که در همراهی با رگه-رگچه‌های کوارتزی و کربناتی پدید آمده‌اند (شکل‌های ۹-C، ۹-D و ۹-۹-E)، به ترتیب فراوانی شامل کالکوپیریت، کالکوسیت، تتراهدریت، بورنیت، پیریت و طلای آزاد هستند. گفتنی است بخش بزرگی از کانه‌های سولفیدی در اثر فرایندهای برونزاد حاصل از هوازدگی، اکسایش یافته‌اند و به‌صورت کانی‌های سولفیدی، اکسیدی و کربناتی (مانند مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت و هیدروکسیدهای آهن) نمود دارند (شکل‌های ۱۰-A، ۱۰-B و ۱۰-C).

بررسی‌های میدانی و سنگ‌نگاری نمونه‌های برداشت‌شده از پهنه‌های کانی‌سازی و سنگ‌های میزبان آنها، رخداد دگرسانی‌های گوناگون سیلیسی، کربناتی، آرژیلی و پروپیلیتی در همراهی با کانی‌سازی را نشان می‌دهند. دگرسانی‌های سیلیسی و کربناتی از مهم‌ترین دگرسانی‌های همراه با رگه‌های کانسنگی هستند و مقدار فراوانی کانه‌های سولفیدی را نیز در بر دارند. دگرسانی آرژیلی گستره بزرگی را در پیرامون پهنه‌های کانی‌سازی و نیز در سطح محدوده پوشش داده است. دگرسانی پروپیلیتی نیز گسترده و فراگیر است و در سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانی‌سازی و



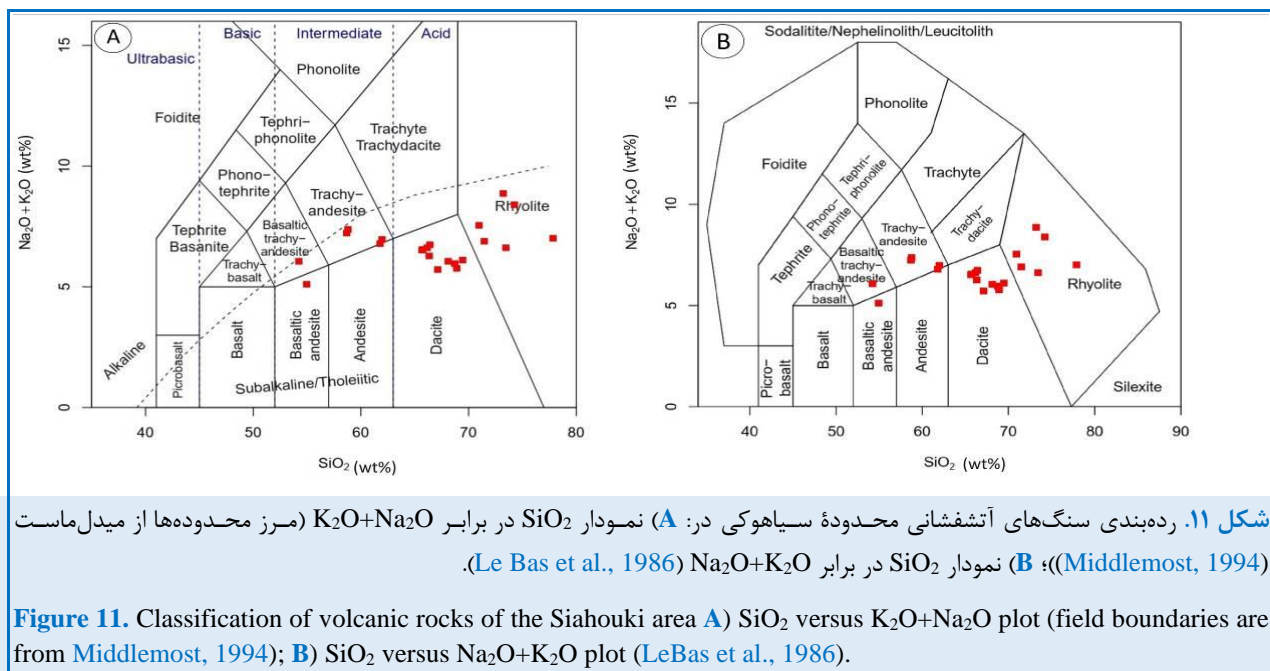
شکل ۱۰. تصویرهای میکروسکوپی (نور انعکاسی) از کانه‌های پدیدآمده در رگه‌های سیلیسی - کربناتی محدوده سیاهوکی. **A، B** کانه‌های درونزاد کالکوپیریت (Cpy)، بورنیت (Bn) و تتراهدریت-تنانتیت (Tn)، به‌طور بخشی توسط کانی‌های برونزاد کالکوسیت (Cc) و کوولیت (Cv) جانشین شده‌اند؛ **C** رخداد ذرات طلا (Au) در نمونه‌های کانسنگی (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney and Evans (2010)).

Figure 10. Photomicrographs (reflected light) of ore minerals in the quartz-carbonate veins at the Siahouki area. **A, B** Hypogen ore minerals consist of chalcopyrite (Cpy), bornite (Bn), and tetrahedrite-tennantite (Tn) replaced by chalcocite (Cc) and covellite (Cv); **C** Gold grains associated with iron oxide minerals (Mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010)).

آنها به‌کار برده شد که از مهم‌ترین آنها می‌توان نمودارهای (Middlemost, 1994; Le Bas et al., 1986) TAS را نام برد. بر پایه این دو نمودار، نمونه‌های برداشت‌شده از سنگ‌های آتشفشانی سیاهوکی بیشتر در گستره سنگ‌های اسیدی (ریولیت و داسیت) و کمتر در گستره سنگ‌های حد واسط و بازیک (تراکی‌آندزیت، تراکی‌آندزیت بازالتی و آندزیت بازالتی) جای می‌گیرند (شکل‌های ۱۱-A و ۱۱-B).

رده‌بندی شیمیایی

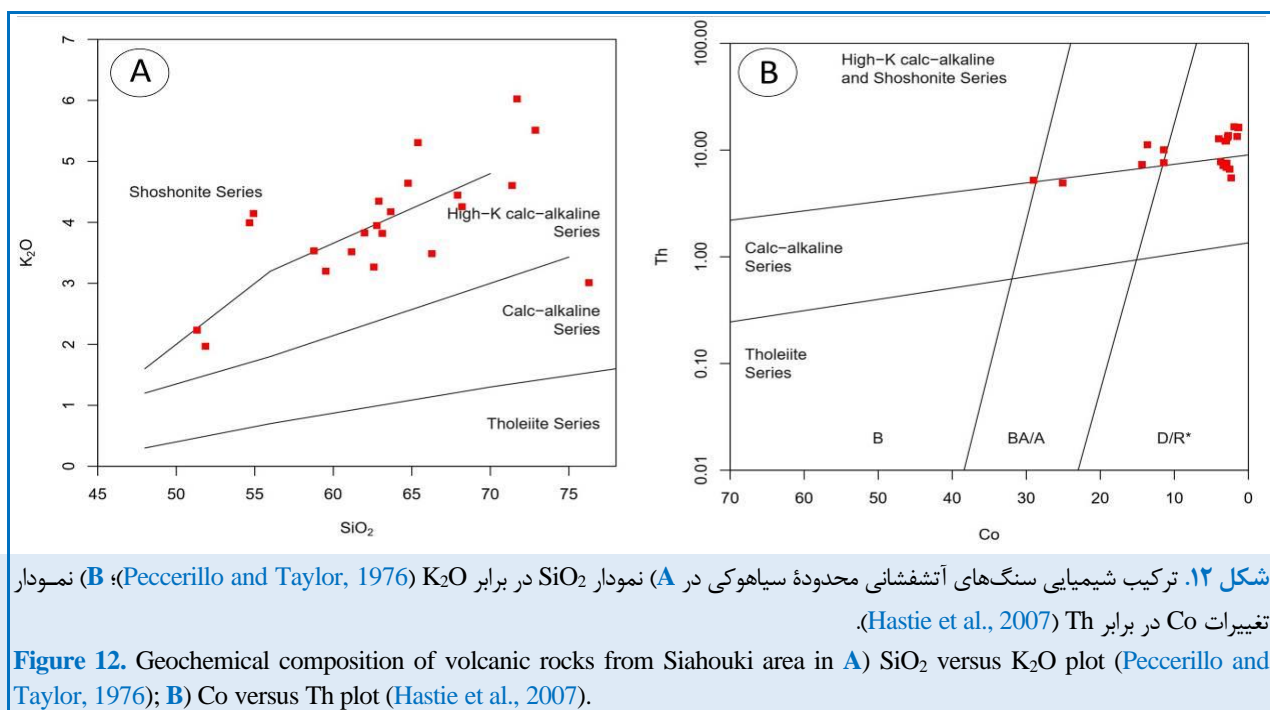
برای تعیین فراوانی اکسیدهای اصلی، عنصرهای فرعی و کمیاب، ۲۲ نمونه از واحدهای مختلف آتشفشانی برداشت و با به‌کارگیری روش‌های XRF و ICP-MS به‌ترتیب در آزمایشگاه‌های بخش زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس و شرکت مطالعات مواد معدنی زرآزما تجزیه شدند (جدول ۱). نمودارهای بسیاری برای نامگذاری سنگ‌های آتشفشانی بر پایه ترکیب شیمیایی



نمونه‌های سیاهوکی در محدوده سنگ‌های کالک‌آلکان پتاسیم متوسط تا بالا و شوشونیتی جای می‌گیرند (شکل ۱۲- A). همچنین، بر پایه نمودار تغییرات Co در برابر Th (Hastie et al., 2007)، نمونه‌های مربوط به سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی، سرشت کالک‌آلکان و شوشونیتی نشان می‌دهند (شکل ۱۲- B).

سری ماگمایی

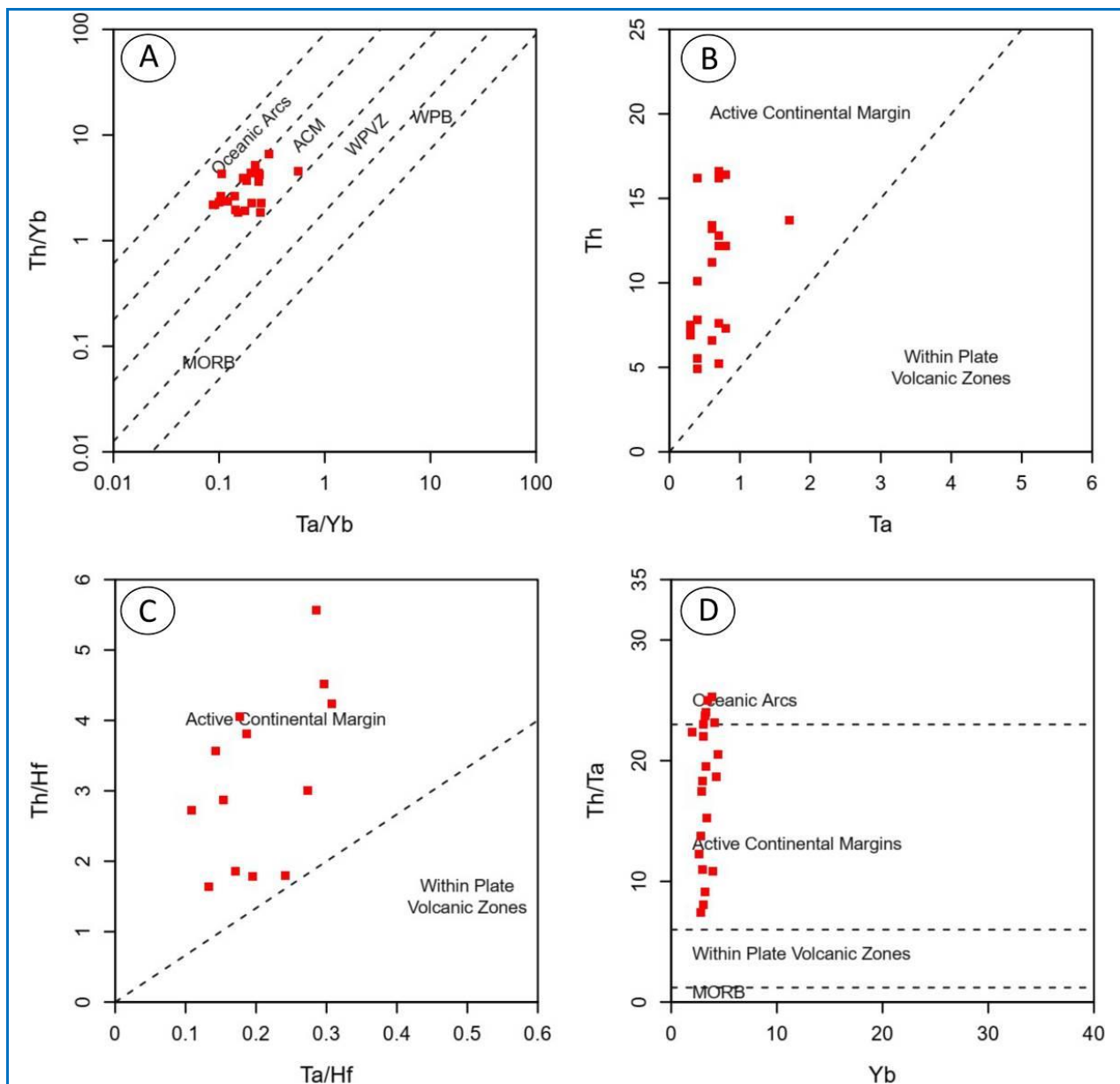
برای شناسایی سری‌های ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی در محدوده سیاهوکی، دو نمودار K_2O در برابر SiO_2 و Th در برابر Co به کار برده شدند. بر پایه نمودار SiO_2 در برابر K_2O که پسریلو و تایلور (Peccerillo and Taylor, 1976) پیشنهاد کرده‌اند،



جایگاه زمین‌ساختی

برای روشن کردن جایگاه تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی نمودارهای رده‌بندی Ta/Yb در برابر Th/Yb ، Ta در برابر Th ، Ta/Hf در برابر Th/Hf و Yb در برابر Th/Ta به کار برده شد. بر پایه این نمودارها، محیط پیدایش بیشتر نمونه‌های

سیاهوکی با محیط زمین‌ساختی حاشیه فعال قاره‌ای همخوانی دارد (شکل‌های ۱۳-A، ۱۳-B، ۱۳-C و ۱۳-D). همچنین، بر پایه نمودار تغییرات La/Yb در برابر Th/Nb جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی با محیط زمین‌ساختی کمان آتشفشانی همخوانی دارد (شکل ۱۴).



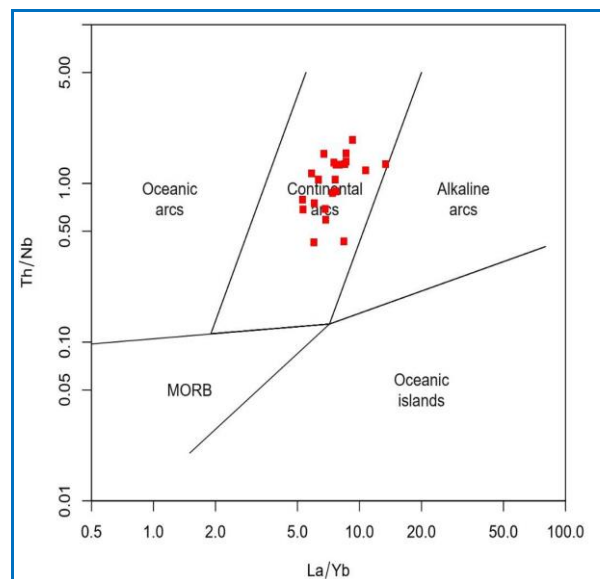
شکل ۱۳. جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی در (A) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb ؛ (B) نمودار Ta در برابر Th ؛ (C) نمودار Ta/Hf در برابر Th/Hf ؛ (D) نمودار Yb در برابر Th/Ta (نمودارها از Schandl and Giorton (2002)).

Figure 13. Tectonic setting of volcanic rocks from Siahouki area in (A) Ta/Yb versus Th/Yb ; (B) Ta versus Th ; (C) Ta/Hf versus Th/Hf ; (D) Yb versus Th/Ta (diagrams from Schandl and Gorton (2002)).

CaO وابسته باشد (Wilson, 1989). در نمودار تغییرات P_2O_5 در برابر SiO_2 ، نمونه‌های محدوده سیاهوکی روند کاهشی نشان می‌دهند. روند کاهشی این اکسید چه‌بسا پیامد تبلوربخشی آپاتیت باشد که از کانی‌های فرعی و میزبان اصلی این عنصر در سنگ‌های آذرین است. در نمونه‌های سیاهوکی با افزایش SiO_2 مقدار K_2O افزایش می‌یابد و این روند افزایشی با روندی که در فرایند جدایش بلورین برای عنصر ناسازگاری مانند پتاسیم پیش‌بینی می‌شود، همخوانی دارد. در نمودار CaO برابر SiO_2 ، با افزایش SiO_2 مقدار CaO کاهش می‌یابد. روند کاهشی CaO در سنگ‌های سیاهوکی را می‌توان پیامد تحول ترکیب پلاژیوکلازها از کلسیک به سدیک در هنگام تبلور ماگما دانست که در پی آن با تبلور پلاژیوکلازهای کلسیک در مراحل آغازین تبلور، میزان کلسیم ماگما رو به کاهش گذاشته است و با ادامه روند تبلور، بلورهای آل بیت متبلور شده‌اند (Morata and Aguirre, 2003). همان‌گونه که در نمودار تغییرات TiO_2 در برابر SiO_2 دیده می‌شود، با پیشرفت جدایش بلورین ماگمایی و افزایش SiO_2 ، مقدار TiO_2 روند کاهشی آشکاری را نشان می‌دهد. این اکسید می‌تواند در پیدایش اسفن، بیوتیت و تیتانومگنتیت مصرف شود و در فازهای اسیدی، از مقدار آن کاسته شود. در نمونه‌های سیاهوکی اکسید آهن روند کاهشی روشنی همراه با افزایش سیلیس نشان می‌دهد. این روند با تبلور و جدایش بلورین کانی‌های مافیک آهن‌دار مانند هورنبلند، بیوتیت، پیروکسن و مگنتیت و کاهش میزان Fe_2O_3 در مایع به‌جامانده سازگار است (شکل ۱۵).

زمین‌شیمی عنصرهای کمیاب

گوشتۀ اولیه در حقیقت ترکیب گوشته پیش از پیدایش پوستۀ قاره‌ای است. وود و همکاران (Wood et al., 1979) یکی از ترکیبات تخمینی برای گوشتۀ اولیه را پیشنهاد کرده‌اند و آن را برای مقایسه تغییرات ترکیب گدازه‌های بازالتی به کار برده‌اند. از ویژگی‌های سنگ‌های قاره‌ای بی‌هنجاری منفی عنصر نیوبیم است؛ به‌گونه‌ای که



شکل ۱۴. جایگاه زمین‌ساختی نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی در نمودار تغییرات Th/Nb در برابر La/Yb (Hollocher et al., 2012).

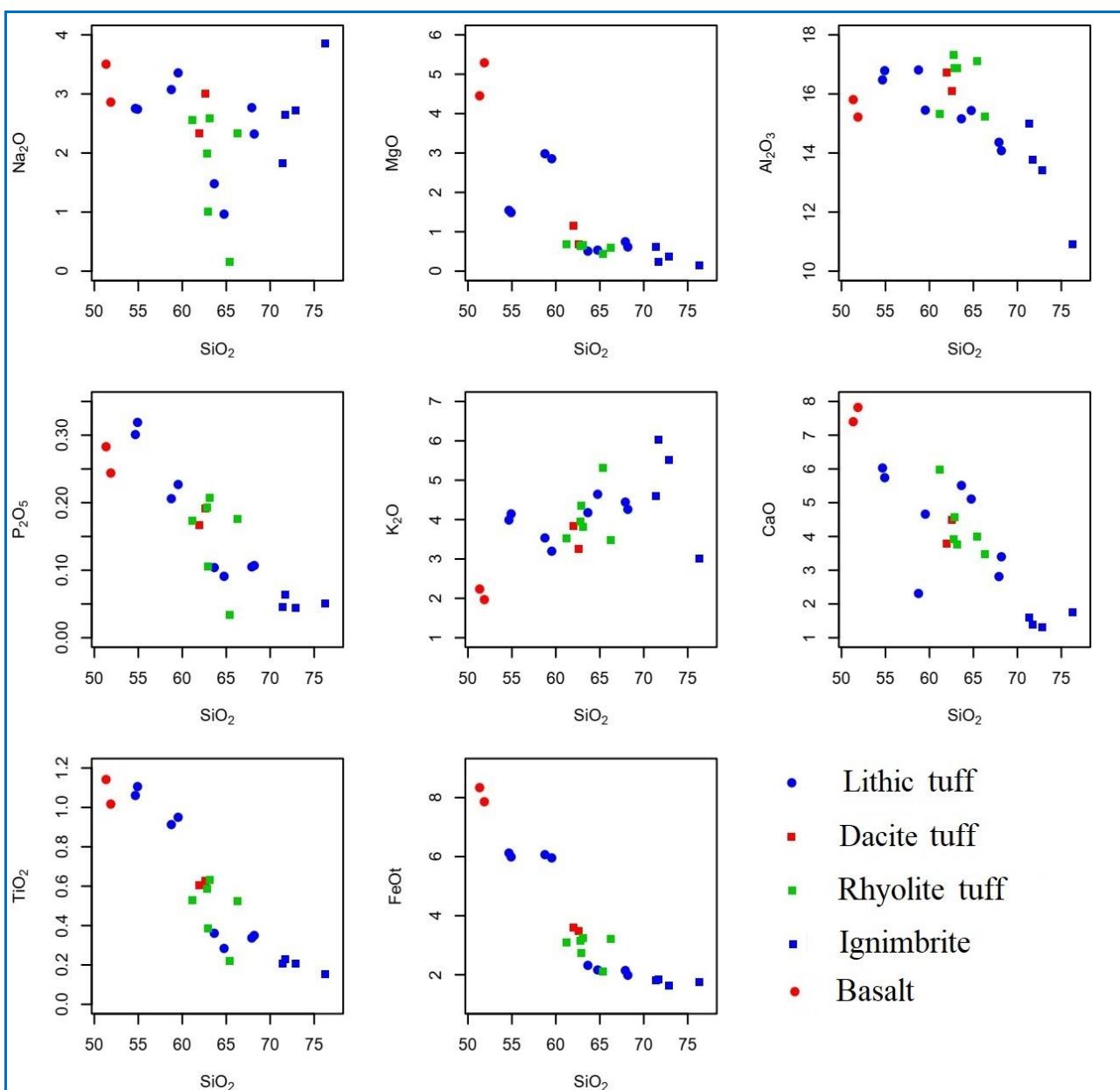
Figure 14. Tectonic setting diagrams for volcanic rocks of the Siahouki area in La/Yb versus Th/Nb plot (Hollocher et al., 2012).

زمین‌شیمی عنصرهای اصلی

برای بررسی روند تغییرات و خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی، نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی در برابر SiO_2 بررسی شد (شکل ۱۵). با افزایش SiO_2 میزان Na_2O در سنگ‌های آتشفشانی محدوده روند خاصی نشان نمی‌دهند. همان‌گونه که در نمودار MgO در برابر SiO_2 دیده می‌شود، محتوای MgO روند کاهشی آشکاری دارد. به باور پرابهاکر (Prabhakar et al., 2009)، تمرکز MgO در بلورهای الیوین و پیروکسن و جدایش آنها از ماگما، مقدار MgO در ماگمای به‌جامانده را کاهش می‌دهد و تمرکز آنها در بخش تبلور یافته بیشتر می‌شود. مقدار MgO با ادامه تبلور به سرعت کاهش می‌یابد و در سنگ‌های اسیدی به کمترین میزان خود می‌رسد (Carn and Pyle, 2001). با افزایش SiO_2 ، غلظت Al_2O_3 در نمونه‌های سیاهوکی کاهش می‌یابد. روند کاهشی Al_2O_3 در برابر SiO_2 چه‌بسا به جدایش و تبلور کانی‌های پلاژیوکلاز به‌همراه

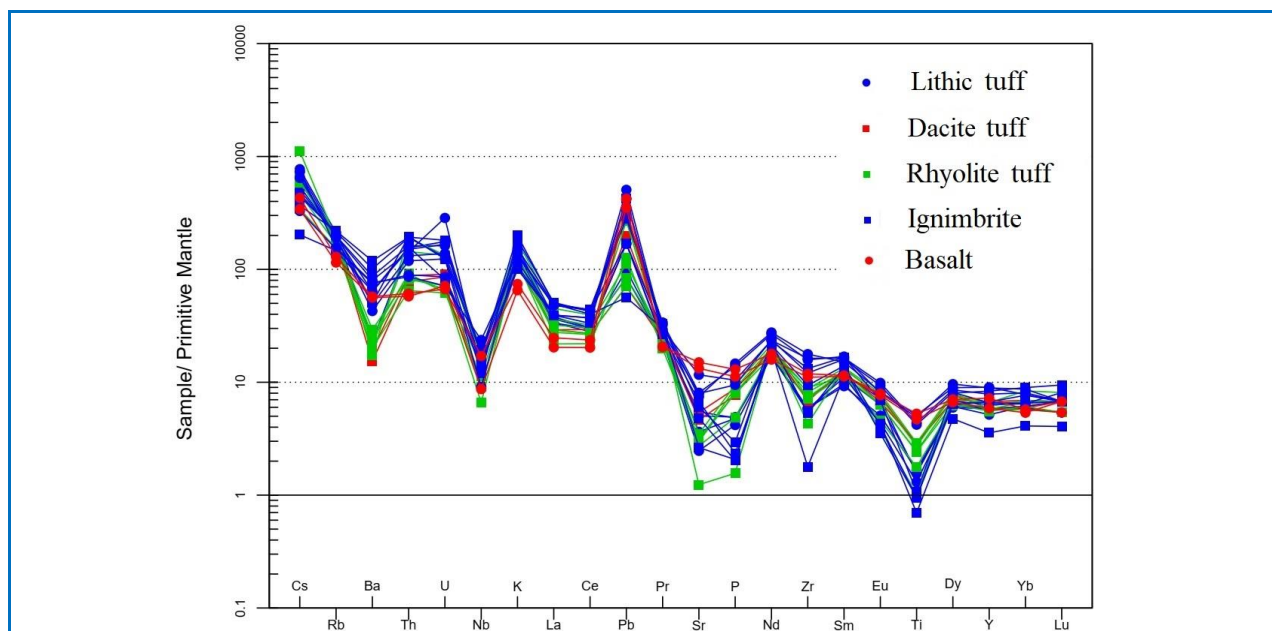
عنصرهای Ti و Nb را می‌توان مشارکت گوشته سنگ‌کره‌ای دگرنهادشده در هنگام رخداد فرایند ذوب بخشی و یا آلودگی پوسته‌ای دانست (Rollinson, 1993). بر پایه نمودار پیشنهادی سان و مک‌دوناه (Sun and McDonough, 1989) تپی‌شدگی آشکاری از عنصرهای Ti و Nb در نمونه‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی دیده می‌شود (شکل ۱۶).

بی‌هنجاری منفی ماگماهای گوشته‌ای از عنصر Nb می‌تواند پیامد آرایش ماگما با مواد پوسته‌ای در هنگام بالآمدگی، جایگزینی و یا غنی‌شدگی به کمک شاره‌ها در پهنه فرورانش باشد (Sun and McDonough, 1989). بی‌هنجاری منفی عنصرهای Ti و Nb در نمونه‌های اسیدی و حد واسط از ویژگی‌های پهنه‌های فرورانش است (Pearce, 2008; Gencalioglu, 2010). چرایی تپی‌شدگی



شکل ۱۵. نمودارهای تغییرات SiO_2 در برابر اکسید عنصرهای اصلی برای سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی.

Figure 15. SiO_2 versus major element oxides plots for the volcanic rocks from Siahouki area.



شکل ۱۶. نمودار عنکبوتی عنصرهای کمیاب بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای سنگ‌های آتشفشانی محدوده سیاهوکی.

Figure 16. Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (normalization values are from Sun and McDonough, 1989) for the volcanic rocks of the Siahouki area.

پی دارد (Edwards et al., 1994). نمونه‌های سیاهوکی از عنصرهای Th, K, و Cs غنی‌شدگی نشان می‌دهند که می‌تواند به فرایند دگرنهادشدن یا آلیش پوسته قاره‌ای وابسته باشد. همچنین، آنومالی منفی عنصرهای Nb و Ti در نمونه‌ها نشان‌دهنده تأثیر فرورانش بر منابع گوشته‌ای است (Soesoo, 2000). غنی‌شدگی آشکار در عنصر Pb نیز می‌تواند با نقش رسوبات فرورانده‌شده در خاستگاه این سنگ‌ها در ارتباط باشد.

بحث

شوشونیت‌ها سنگ‌های آذرین پتاسیم‌داری هستند که در پهنه‌های زمین‌ساختی وابسته به فرورانش پدید می‌آیند و از ویژگی‌های آشکار محیط‌های زمین‌ساختی همگرا هستند (Morrison, 1980). این سنگ‌ها معمولاً در مراحل پایانی فعالیت ماگمایی مرتبط با فرورانش و پس از توله‌ایست‌های کم‌پتاسیم و سری کالک‌آلکان در فاصله دورتری از گودال و بالای ژرف‌ترین بخش زون بنیوف پدیدار می‌شوند. بیشتر سری‌های شوشونیتی در پهنه‌های زمین‌ساختی مرزهای مخرب صفحه‌ها، در نخستین مرحله‌های پیدایش، یا مراحل پایانی و

شماری از پژوهشگران مانند ادواردز و همکاران (Edwards et al., 1994) این تهی‌شدگی را به بالابودن فوگاسیته اکسیژن در ماگماهای پهنه فرورانش وابسته می‌دانند؛ زیرا در شرایطی که فوگاسیته اکسیژن بالا باشد، دمای بیشتری برای ذوب کانی‌های تیتانیم‌دار نیاز است. نمودار عنصرهای کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه برای نمونه سنگ‌های محدوده سیاهوکی، غنی‌شدگی LILE و LREE نسبت به HFSE و HREE را نمایش می‌دهد. در این نمودار عنصرهای Nb, P, و Ti بی‌هنجاری منفی و عنصرهایی مانند Pb و U بی‌هنجاری مثبت نشان می‌دهند. ماگماهای جدا شده از گوشته به علت آغشتگی پوسته‌ای، که در هنگام صعود ماگما رخ می‌دهد، ناهنجاری‌های مشخص منفی در مقدار عنصرهای Ta و Nb دارند (Wilson, 1989; Alici, 2001). در پی افزوده شدن آب و مواد اکسیدنی به گوه گوشته‌ای، محیط اکسیدانی پدید می‌آید که پایداری کانی‌هایی مانند تیتان، روتیل، ایلمنیت و هورنبلند را افزایش می‌دهد و با مقادیر بالایی از عنصرهای Ta, Hf, Nb, Ti و Zr همراه است. در ماگماتیسیم مرتبط با فرورانش، فوگاسیته بالای اکسیژن تهی‌شدگی Ti در پهنه فرورانش را در

راه پیدا کرده است. گفتنی است ویژگی‌های شیمیایی ماگمای پدیدآمده بسیار همانند ویژگی‌های شاخص سنگ‌های شوشونیتی پدیدآمده در محیط کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای است (Müller and Groves, 2019).

برداشت

بر پایه نقشه‌های زمین‌شناسی، واحدهای سنگی برونزدیافته در کانسار مس - طلای سیاهوکی بیشتر دربردارنده سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی ائوسن و نهشته‌های کواترنری هستند که با سنگ‌های آتشفشانی و آذرآوری ائوسن پوشیده شده است. از دید ویژگی‌های سنگ‌شناختی و ترکیب شیمیایی، بخش بزرگی از این توالی را توف‌های با ترکیب داسیتی، ریولیتی تا آندزیتی در بر می‌گیرند که به‌صورت میان‌لایه، گدازه‌های با ترکیب بازیک تا اسیدی دارند. فعالیت‌های گرمایی در محدوده سیاهوکی، با گسترش دگرسانی‌های گرمایی و کانی‌سازی مس و طلا همراه شده است. پهنه‌های کانی‌سازی همروند با ساختارهای شمال‌باختری - جنوب‌خاوری در واحدهای کریستال توف داسیتی و لیتیک‌توف آندزیتی پدید آمده‌اند. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی واحدهای آتشفشانی میزبان کانه‌زایی مس - طلا در کانسار سیاهوکی (مانند نسبت کم Nb/Ti، ناهنجاری منفی Ti و نیز مقدار بالای نسبت‌های K_2O ، Al_2O_3 ، P_2O_5 و LILE/HFSE) نشان می‌دهد این کانسار در یک محیط کمان آتشفشانی قاره‌ای پدید آمده است و ارتباط زایشی نزدیکی با ماگمای شوشونیتی نشان می‌دهد.

بلوغ کمان ماگمایی پدید می‌آیند (Morrison, 1980). این سنگ‌ها در محیط‌های کششی یا پس از برخورد نیز گزارش شده‌اند. میزان Na_2O+K_2O در این سنگ‌ها بالا و معمولاً از ۵ بیشتر است و نسبت K_2O/Na_2O در آنها نزدیک به ۱ است. مقدار TiO_2 این سنگ‌ها کم و از ۳/۱ درصدوزنی کمتر است. مقدار Al_2O_3 معمولاً بالا و در بازه ۱۴ تا ۱۹ درصدوزنی در نوسان است. این سنگ‌ها بیشترین غنی‌شدگی را در عنصرهای LILE و LREE نشان می‌دهند (Morrison, 1980). بالا بودن نسبت K_2O/Na_2O نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی از یک گوشته دگرنهادشده است. بر پایه داده‌های تجزیه شیمیایی سنگ میزبان کانی‌سازی در محدوده سیاهوکی (واحد Ed)، ترکیب سنگ‌شناسی این واحد در محدوده داسیت و ریولیت (یعنی درصدوزنی SiO_2 در بازه ۶۶/۱۶۶ تا ۷۶/۲۷۷) جای می‌گیرد (جدول ۱). این نمونه‌ها مقدارهای بالای Al_2O_3 (در بازه ۱۰/۹ تا ۱۷/۳۲۹ درصدوزنی)، K_2O بسیار بالا (بیش از ۴/۲۶ درصدوزنی) و نسبت بالای K_2O/Na_2O دارند که با ویژگی‌های شیمیایی سنگ‌های شاخص شوشونیتی همخوانی دارند (Morrison, 1980). نمونه‌های سیاهوکی در عنصر Ti آنومالی منفی و نسبت Nb/Ti کمی دارند. همچنین، مقدار بالای K_2O ، Al_2O_3 و P_2O_5 و نسبت بالای LILE/HFSE نشان می‌دهند. افزون‌براین، غنی‌شدگی آشکار در عنصر Pb می‌تواند پیامد آلیایش پوسته‌ای باشد. پیدایش ماگماتیسم پتاسیک در سنگ‌های میزبان کانسار سیاهوکی، چه‌بسا با آزادشدن سیال‌هایی از پوسته فرورونده نئوتتیس و نیز دگرنهادشدن گوشته سنگ‌کره‌ای و در ادامه ذوب‌بخشی گوشته دگرنهادشده رخ داده باشد که در پی عملکرد سامانه‌های گسلی منطقه، ماگمای تولیدشده با ترکیب شوشونیتی به سطح زمین

References

- Alavi, M. (1991) Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103 (8), 983-992. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2)
- Alici, P., Temel, A., Gourgaud, A., Vidal, P., and Gündoğdu, M.N. (2001) Quaternary tholeiitic to alkaline volcanism in the Karasu Valley, Dead Sea rift zone, southeast Turkey: Sr-Nd-Pb-O isotopic and trace-element approaches to crust-mantle interaction. *International Geology Review*, 43 (2), 120-138. <https://doi.org/10.1080/00206810109465004>
- Asadi, S. (2018) Triggers for the generation of post-collisional porphyry Cu systems in the Kerman magmatic copper belt, Iran: New constraints from elemental and isotopic (Sr-Nd-Hf-O) data. *Gondwana Research*, 64, 97-121. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.008>

- Bas, M.L., Maitre, R.L., Streckeisen, A., Zanettin, B., and IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27 (3), 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Campbell, I.H., Stepanov, A.S., Liang, H.Y., Allen, C.M., Norman, M.D., Zhang, Y.Q., and Xie, Y.W. (2014) The origin of shoshonites: new insights from the Tertiary high-potassium intrusions of eastern Tibet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167, 983–1005. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-0983-9>
- Carn, S.A., and Pyle, D.M. (2001). Petrology and geochemistry of the Lamongan volcanic field, East Java, Indonesia: Primitive Sunda arc magmas in an extensional tectonic setting? *Journal of Petrology*, 42 (9), 1643-1683. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.9.1643>
- Costa, F.G., Oliveira, E.P., and McNaughton, N.J. (2011) The Fazenda Gavião granodiorite and associated potassic plutons as evidence for Paleoproterozoic arc-continent collision in the Rio Itapicuru greenstone belt, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 32, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.012>
- Ding, H., Zhang, Z., Dong, X., Yan, R., Lin, Y., and Jiang, H. (2015) Cambrian ultrapotassic rhyolites from the Lhasa terrane, south Tibet: evidence for Andean-type magmatism along the northern active margin of Gondwana. *Gondwana Research*, 27, 1616–1629. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.02.003>
- Dwyer, R., Forster, D.B., Simpson, B., Blevin, P.L., and Huang, H. (2025) Relationships between high-K magmas and Cu-Au porphyry deposits in the Macquarie Arc, Australia. *Geological Society, London, Special Publications*, 551 (1), SP551-2024. <https://doi.org/10.1144/SP551-2024-65>
- Edwards, C.M., Menzies, M.A., Thirlwall, M.F., Morris, J.D., Leeman, W.P., and Harmon, R.S. (1994) The transition to potassic alkaline volcanism in Island Arcs: the Ringgit—Beser complex, East Java, Indonesia. *Journal of Petrology*, 35 (6), 1557-1595. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.6.1557>
- Eftekharnjad, J., Samimi, N., and Ershadi, S. (1993) Geological map of Bam, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Foley, S.F., Peccerillo, A. (1992) Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28, 181–185. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90005-J)
- Fu, Y., Sun, X., Lin, H., Zhou, H., Li, X., Ouyang, X., Jiang, L., Shi, G., and Liang, Y. (2015) Geochronology of the giant Beiya gold-polymetallic deposit in Yunnan province, southwest China, and its relationship with the petrogenesis of alkaline porphyry. *Ore Geology Reviews*, 71, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.016>
- Gencalioglu Kuscü, G., and Genel, 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*, 99, 593-621. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0402-4>
- Hari, K.R., Rao, N.V.C., Swarnkar, V., and Hou, G. (2014) Alkali feldspar syenites with shoshonitic affinities from Chhotaudepur area: implication for mantle metasomatism in the Deccan large igneous province. *Geoscience Frontiers*, 5, 261–276. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.06.007>
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F. (2007) Classification of altered volcanic arc rocks using immobile trace elements: development of the th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48 (12), 2341-2357. <http://www.doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E., and Roberts, D. (2012) Geochemistry of amphibolite -facies volcanics and gabbros of the Storen Nappe in extensions west and southwest of Trondheim, western Gneiss region, Norway: A key to correlations and paleotectonic settings. *American Journal of Science*, 312 (4), 357-416. <http://www.doi.org/10.2475/04.2012.01>
- Jahangiri, A. (2007). Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30 (3-4), 433-447. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.008>
- Jamali, H, and Mehrabi, B. (2015) Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran magmatic belt. *Ore Geology Reviews*, 65, 487–501. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.017>
- Kroll, T., Müller, D., Seifert, T., Herzig, P.M., and Schneider, A. (2002) Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries porphyry Cu-Au deposit, Chlalkidiki, Greece. *Mineralium Deposita*,

- 37, 137–144. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0235-6>
- Lehmann, St., Barcikowski, J., von Quadt, A., Gallhofer, D., Peytcheva, I., Heinrich, C.A., and Serafimovski, T. (2013) Geochronology, geochemistry and isotope tracing of the Oligocene magmatism of the Buchim-Damjan-Borov Dol ore district: Implications for timing, duration and source of the magmatism. *Lithos*, 181, 216–233. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.09.002>
- Liu, B., Liu, H., Zhang, C., Mao, Z., Zhou, Y., Huang, H., He, Z., and Su, G. (2015b) Geochemistry and geochronology of porphyries from the Beiya gold-polymetallic orefield, western Yunnan, China. *Ore Geology Reviews*, 69, 360–379. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.004>
- Liu, Z., Jiang, Y., Jia, R., Zhao, P., and Zhou, Q. (2015a) Origin of Late-Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Tibet Plateau, northwest China: implications for Paleo-Tethys evolution. *Gondwana Research*, 27, 326–341. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.022>
- Maughan, D.T., Keith, J.D., Christiansen, E.H., Pulsipher, T., Hattori, K., and Evans, N.J. (2002) Contributions from mafic alkaline magmas to the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, USA. *Mineralium Deposita*, 37, 14-37. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0228-5>
- Middlemost, E.A.K. (1994) Naming material in the magma - igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37 (3-4), 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Mikulski, S.Z. (2005) Geological, mineralogical and geochemical characteristics of the Radzimowice Au-As-Cu deposit from the Kaczawa Mountains (Western Sudetes, Poland): an example of the transition of porphyry and epithermal style. *Mineralium Deposita*, 39, 904-920. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0452-x>
- Morata, D., and Aguirre, L. (2003). Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20'–30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, 16 (6), 459-476. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2003.06.001>
- Morrison, G.W. (1980) Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13, 97-108. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(80\)90067-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(80)90067-5)
- Müller, D. (2002) Preface—gold-copper mineralization in alkaline rocks. *Mineralium Deposita*, 37, 1-3. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0226-7>
- Müller, D., Franz, L., Herzig, P.M., and Hunt, S. (2001) Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea. *Lithos*, 57, 163-186. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(01\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00035-4)
- Müller, D., and Groves, D.I. (1993) Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 8, 383-406. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(93\)90035-W](https://doi.org/10.1016/0169-1368(93)90035-W)
- Müller, D., and Groves, D.I. (2019). Direct associations between potassic igneous rocks and gold-copper deposits in volcanic arcs. *Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization*, 127-254. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92979-8_6
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Liu, X., Dong, Y., Jiang, S.Y., von Quadt, A., and Bernroider, M. (2014) Petrogenesis of Tarom high-potassic granitoids in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: geochemical, U-Pb zircon and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Lithos*, 187, 324-345. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.11.002>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.008>
- Orozco-Garza, A., Dostal, J., Keppie, J.D., and Paz-Moreno, F.A. (2013) Mid-Tertiary (25–21 Ma) lamprophyres in NW Mexico derived from subduction-modified subcontinental lithospheric mantle in an extensional backarc environment following steepening of the Benioff zone. *Tectonophysics*, 590, 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.013>
- Pearce, J.A. (2008) Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100, 14-48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.
- Prabhakar, B.C., Jayananda, M., Shareef, M., and Kano, T. (2009). Petrology and geochemistry of late

- archaean granitoids in the northern part of Eastern Dharwar Craton, Southern India: implications for transitional geodynamic setting. *Journal of the Geological Society of India*, 74, 299-317. <https://doi.org/10.1007/s12594-009-0137-2>
- Rao, N.V.C., Srivastava, R.K., Sinha, A.K., and Ravikant, V. (2014) Petrogenesis of Kerguelen mantle plume-linked Early Cretaceous ultrapotassic intrusive rocks from the Gondwana sedimentary basins, Damodar Valley, eastern India. *Earth-Science Reviews*, 136, 96-120. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.012>
- Rios, D.C., Conceição, H., Davis, D.W., Plá Cid, J., Rosa, M.L.S., Macambira, M.J.B., McReath, I., Marinho, M.M., and Davis, W.J. (2007) Paleoproterozoic potassic-ultrapotassic magmatism: Morro do Afonso Syenite Pluton, Bahia, Brazil. *Precambrian Research*, 154, 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.11.015>
- Rollinson, H.R. (1993) Using geochemical data Evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, 352 p. Wiley, New York, 352.
- Schandl, E.S., and Gorton, M.P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97, 629-642. <http://www.doi.org/10.2113/97.3.629>
- Sillitoe, R.H. (1993) Giant and bonanza gold deposits in the epithermal environment: assessment of potential genetic factors. In: Whiting BH, Hodgson CJ, Mason R (eds) Giant Ore Deposits. *Econ Geol Spec Publ 2*, 125-156. <https://doi.org/10.5382/SP.02.04>
- Sillitoe, R.H. (1997) Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44, 373-388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sillitoe, R.H. (2002) Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Mineralium Deposita*, 37, 4-13. <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0227-6>
- Soesoo, A. (2000) Fractional crystallization of mantle-derived melts as a mechanism for some I-type granite petrogenesis: an example from Lachlan Fold Belt, Australia. *Journal of the Geological Society*, 157 (1), 135-149. <https://doi.org/10.1144/jgs.157.1.135>
- Stöcklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 52 (7), 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, 42 (1), 313-345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Torabi, G. (2011) Middle Eocene volcanic shoshonites from the western margin of the Central-East Iranian microcontinent (CEIM), a mark of previously subducted CEIM-confining oceanic crust. *Petrology*, 19, 675-689. <https://doi.org/10.1134/S0869591111030039>
- Whitney, D.L., and Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95 (1), 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis, a Global Tectonic Approach*, 466 p. 2nd Edition, Unwin-Hyman, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>
- Wood, D.A. (1979) A variably veined suboceanic upper mantle: Genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence. *Geology*, 7 (10), 499-503. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1979\)7<499:AVVSUM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1979)7<499:AVVSUM>2.0.CO;2)
- Yang, W.B., Niu, H.C., Shan, Q., Luo, Y., Sun, W.D., Li, C.Y., Li, N.B., and Yu, X.Y. (2012) Late Paleozoic calc-alkaline to shoshonitic magmatism and its geodynamic implications, Yuximolegai area, western Tianshan, Xinjiang. *Gondwana Research*, 22, 325-340. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.008>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J.G., Asadi, S., and Lentz, D. (2019) Hydrothermal fluid evolution in collisional Miocene porphyry copper deposits in Iran: Insights into factors controlling metal fertility. *Ore Geology Reviews*, 105, 183-200. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.027>
- Zhenhua, Z., Xiaolin, X., Qiang, W., Zhiwei, B., Yuquan, Z., Yingwen, X., and Shuangkui, R. (2003) Alkali-rich igneous rocks and related Au and Cu large and superlarge deposits in China. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 46, 1-13. <https://doi.org/10.1360/03dz9023>