



## Geology, petrography, geochemistry and petrogenesis of intermediate subvolcanic units in the south of Zahedan, Sistan and Baluchestan province, Iran

Hamid Rahmani <sup>1\*</sup> , Mansour Ghorbani <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 12 July 2022  
Revised: 14 November 2022  
Accepted: 15 November 2022

#### Keywords

Zahedan  
Subvolcanic  
Adakitic  
Subduction

#### \* Corresponding author

Hamid Rahmani  
✉ [h.rahmani.m@gmail.com](mailto:h.rahmani.m@gmail.com)

### ABSTRACT

The study area is located 12 km south of Zahedan city, Sistan and Baluchistan province. Rock units in this area include a series of slightly altered flysch facies units with Eocene age, subvolcanic rocks and basic to intermediate dikes with probably Oligocene-Miocene age. Subvolcanic rocks in the form of stocks and domes intruded into the flysch unit and were cut by intermediate dykes in the later stages. The subvolcanic units of the region have two main compositions diorite-monzodiorite and quartzdiorite-quartzmonzodiorite with porphyry texture. The subvolcanic units of this area are in the range of metalumin to slightly peralumin and I-type. This is consistent with the evidence such as the widespread presence of hornblende, apatite and sphene in the studied subvolcanic units, which indicates the oxidic conditions and high oxygen fugacity for these rocks at the time of formation. Spider diagrams drawn for trace and rare earth elements show the single origin and the role of fractional crystallization in the formation of these rocks. Based on the spider diagram of rare earth elements, the studied subvolcanic units of LREE elements show an enrichment toward HREE elements, which is one of the prominent characteristics of calc-alkaline rocks in the subduction zones of the continental margin. These rocks are placed in the tectonomagmatic environment diagrams in the adakitic range and in the category of shoshonite and high potassium calc-alkaline rocks, related to subduction environments.

### How to cite this article

Rahmani, R. and Ghorbani, M., 2022. Geology, petrography, geochemistry and petrogenesis of intermediate subvolcanic units in the south of Zahedan, Sistan and Baluchestan province, Iran. *Journal of Economic Geology*, 14(3): 155–183. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.77188.1048>



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The study area is located 12 km south of Zahedan, Sistan and Baluchestan province. This area includes the height south part of Zahedan city. The heights in this area are mainly mountain ranges with northwest-southeast direction (Fig. 1). The Zahedan magmatic belt is one of the most important magmatic belts in eastern Iran, and it includes Eocene-Oligocene intrusive rocks from the southeast of Khash to Chehelkoureh with northwestern trend that have intruded the flysch-Eocene sequences (Rezaei-Kahkhaei et al., 2010). After the Laramide orogenic phase and the closure of the Sistan Ocean, the Alpine orogenic phases are the major geological events in this area. The main effect of Middle Alpine tectonic events is the intrusion of the Zahedan granitoid masses in the Sistan flysch, which has had extensive alteration and mineralization effects. The magmatic units of this area are generally known as Zahedan granitoid batholiths. This batholith includes an intermediate to acidic complex consisting of diorite to granodiorite (Sadeghian et al., 2005). The Zahedan batholite granodiorites are associated with scattered and small masses of diorite, quartz-diorite rocks as well as dikes and aplite, pegmatite and quartz veins. It seems that the subvolcanic units in the study area are also relation to the diorite to quartz-diorite complex of the Zahedan granitoid batholith. Unfortunately, the types of these subvolcanic rocks are not separated on the geological maps, and only the names of granite, granodiorite and diorite rocks are given together in the form of a geological unit.

### Materials and methods

After collecting information, evaluating and validating previous data and information, field studies and sampling were conducted to prepare a geological map with a scale of 1:5,000 for an area of 5 square kilometers (Fig. 4). During these studies, 81 samples were collected for petrography and mineralogy studies and 32 samples were collected from the subvolcanic units of the region (fresh or with low alteration) for XRF and ICP-MS analysis (Table 1 and Table 2), as well as for checking the alteration in the area. A number of different samples were also collected for XRD studies. Chemical analyzes of all samples have been done in Iran Mineral Processing Research Center laboratory

(IMPRC).

### Result and Discussion

The rock units exposed in this area include a set of metamorphic flysch facies units (phyllite, shales and meta-sandstone) with Eocene age, subvolcanic rocks and basic to intermediate dikes up to probably mid-Oligocene-Miocene age. Subvolcanic rocks in the form of stocks and domes intruded to the flysch unit and were later cut by intermediate dikes with a northeast-southwest trend. All subvolcanic rocks in the study area have porphyry texture. The dikes in the study area in the petrographic studies contain a set of major minerals plagioclase and hornblende. The presence of phenocrysts of these minerals in the microlithic pulp has caused porphyry texture. Also, the accumulation of plagioclase crystals in some parts has caused glomeroporphyritic texture. The oldest rock units that are in the study area, include sandstone, sandy tuff, shale, siltstone, phyllite and meta-siltstones attributed to the facies of eastern Iran flysch. The subvolcanic units of the area have two main compositions of diorite-monzodiorite and quartzdiorite-quartz monzodiorite. These rocks generally have porphyry and sometimes glomeroporphyritic textures with fine-grained background. The main minerals of this unit are plagioclase, hornblende, with less abundance of biotite, potassium feldspar and quartz.

Based on geochemical diagrams, samples taken from subvolcanic units in the study area are in the range of quartz monzodiorite-diorite to monzonite-diorite, and samples of porphyry andesite dikes are in the range of gabbrodiorite to diorite (Fig. 8).

These results are in good agreement with microscopic studies performed on rock units in the area. Moreover, the rocks of the study area show magmatic fractionation and decrease of ferromagnesian minerals along with increase of felsic minerals during the process of fractional crystallization based on the diagrams of changes of elements in relation to each other. Subvolcanic units in this area range from meta-aluminous to slightly per-aluminous and I-Type. This is consistent with evidence such as the widespread presence of hornblende, apatite and sphene in the studied subvolcanic units, and they indicate the oxidic conditions and high oxygen fugacity for these rocks at the time of formation. The spider diagrams drawn for trace and rare earth elements in the samples of

this range have a close scattering pattern, which indicates the single origin and role of fractional crystallization in the formation of these rocks. Based on the spider diagram of rare earth elements, the studied subvolcanic units show an increase in LREE elements compared to HREE elements. This is a prominent feature of calc-alkaline rocks in the subduction zones of the continental margin. The presence of negative anomalies of Nb element as well as deficiency of other HFSE elements, the rod pattern and sharp spider diagrams which are an important feature of subduction-related magmas, can also be detected in geochemical studies of subvolcanic units in the area (Fig. 12). These

rocks are in the adakitic range in the diagrams of tectonomagmatic environments and fall in the category of high potassium shoshonitic and calc-alkaline calcareous rocks, related to subduction environments (Fig. 13 and Fig. 14).

#### **Acknowledgements**

This research has been carried out with the financial support of Iranian Mines & Mining Industries Development & Renovation Organization (IMIDRO), Exploration Empowerment Project. We hereby thank the managers of this collection for their efforts.



## زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و پتروژنز واحدهای نیمه عمیق با ترکیب حدواسط محدوده جنوب زاهدان، استان سیستان و بلوچستان، ایران

حمید رحمانی<sup>۱\*</sup>، منصور قربانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

محدوده مورد بررسی در ۱۲ کیلومتری جنوب شهر زاهدان، استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. واحدهای سنگی رخنمون یافته در این منطقه، شامل مجموعه‌ای از واحدهای رخساره فلیش کمی دگرگون شده با سن ائوسن، سنگ‌های نیمه عمیق و دایک‌های بازیک تا حدواسط با سن احتمالاً الیگوسن - میوسن است. سنگ‌های نیمه عمیق به شکل استوک و گنبد در واحد فلیشی نفوذ کرده و خود در مراحل بعدی توسط دایک‌های حد واسط قطع شده‌اند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

توده‌های نیمه عمیق منطقه دارای دو ترکیب اصلی دیوریت - مونزودیوریت و کوارتز دیوریت - کوارتز مونزودیوریت با بافت پورفیری هستند. واحدهای نیمه عمیق این منطقه در محدوده متآلومین تا کمی پرآلومین و نوع I قرار می‌گیرند. این امر با شواهدی همچون حضور گسترده هورنبلند، آپاتیت و اسفن در واحدهای نیمه عمیق مورد بررسی که بیانگر شرایط اکسیدی و فوگاسیته بالای اکسیژن برای این سنگ‌ها در زمان تشکیل است، مطابقت دارد. نمودارهای عنکبوتی رسم شده برای عناصر کمیاب و نادر خاکی، منشأ واحد و نقش تبلور تفریقی را در تشکیل این سنگ‌ها نشان می‌دهد. بر اساس نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی، توده‌های نیمه عمیق مورد بررسی از عناصر LREE نسبت به HREE غنی شدگی نشان می‌دهند که این موضوع از ویژگی‌های بارز سنگ‌های کالک آلکالن مناطق فرورانش حاشیه قاره است. این سنگ‌ها در نمودارهای محیط تکتونوماگمایی در محدوده آداکتی و در رده سنگ‌های شوشونیتی و کالک آلکالن پتاسیم بالا، مربوط به محیط‌های فرورانش قرار می‌گیرند.

### واژه‌های کلیدی

زاهدان

نیمه عمیق

آداکتی

فرورانش

### \* نویسنده مسئول

حمید رحمانی

h.rahmani.m@gmail.com ✉

### استناد به این مقاله

رحمانی، حمید و قربانی، منصور، ۱۴۰۱. زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و پتروژنز واحدهای نیمه عمیق با ترکیب حدواسط محدوده جنوب زاهدان، استان

سیستان و بلوچستان، ایران. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۳): ۱۵۵-۱۸۳. <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.77188.1048>

## مقدمه

محدوده مورد بررسی در ۱۲ کیلومتری جنوب شهر زاهدان، استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. دسترسی به این محدوده از طریق جاده آسفالت زاهدان-خاش و نیز جاده کمربندی زاهدان به میرجاوه، امکان‌پذیر است. این محدوده شامل ارتفاعات و ناهمواری‌های واقع در جنوب شهر زاهدان بوده و سرزمینی هموار و نسبتاً مسطح است و از رسوبات آبرفتی کواترنری که بیرون‌زدگی‌هایی از سنگ‌های آذرین در آن دیده می‌شود، تشکیل شده است. ارتفاعات موجود در این منطقه اغلب به صورت رشته‌کوه‌هایی با راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرقی برون‌زد دارند. این محدوده در برگه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ زاهدان (Baker and Griffiths, 1976)، واقع شده است. منطقه مورد بررسی و مناطق مجاور آن از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان و پژوهشگران مختلفی بوده است. نوار ماگمایی زاهدان از کمربندهای پلوتونیک مهم شرق ایران است که شامل توده‌های نفوذی ائوسن-اولیگوسن است که از جنوب‌شرقی شهرستان خاش تا چهل کوره در روند شمال‌غرب به درون توالی‌های فلیش به سن ائوسن با میان لایه‌های آهکی نفوذ کرده‌اند و با نهشته‌های ماسه‌سنگی و کنگلومرایی میوسن پوشیده می‌شوند. توده‌های ماگمایی این منطقه، به طور کلی، با عنوان باتولیت گرانیتوئیدی زاهدان شناخته می‌شوند (شکل ۱-۱ و B). این باتولیت از یک مجموعه گسترده حدواسط-اسیدی، متشکل از طیف ترکیبی دیوریت-گرانودیوریت تشکیل شده است. گرانودیوریت‌های باتولیت زاهدان با توده‌های پراکنده و کوچک از سنگ‌های دیوریتی-کوارتزدیوریتی و همچنین دایک‌ها و رگه‌های آپلیتی-پگماتیتی-کوارتزی همراه هستند. به نظر می‌رسد که توده‌های نیمه عمیق رخنمون‌یافته در محدوده مورد بررسی نیز به مجموعه دیوریت-کوارتزدیوریت‌های توده باتولیت گرانیتوئیدی زاهدان مرتبط باشند (شکل ۱-۱C). تا کنون درباره گرانیت زاهدان و منطقه مورد بررسی پژوهش‌های متعددی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش کشتگر

(Sadeghian et al., 2003)، صادقیان و همکاران (Sadehghian et al., 2005)، طهماسبی و همکاران (Tahmasebi et al., 2017)، حسینی (Hosseini, 2002)، مرادی (Moradi, 2012) و نارویی (Naroui, 2017) اشاره کرد. بر اساس این پژوهش‌ها، پس از فاز

کوه‌زایی لارامید و بسته‌شدن اقیانوس سیستان، فازهای کوه‌زایی آلپی، عمده رویداد شکل‌دهنده زمین‌شناسی این ناحیه بوده‌اند. اثر اصلی رویدادهای زمین‌ساختی آلپی میانی، نفوذ توده گرانیتوئیدی زاهدان در فلیش‌های سیستان است که آثار دگرشکلی و کانی‌سازی گسترده‌ای را به همراه داشته است.

باتولیت گرانیتوئیدی زاهدان به صورت توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی و اغلب بیوتیت گرانیت‌های دانه درشت همگن تشکیل شده‌اند؛ ولی این کمپلکس‌های گرانیتوئیدی شامل نسلی از گرانودیوریت‌های آلکالن، دیوریت و کوارتزدیوریت‌ها نیز هستند که نسبت به زمینه باتولیت بیوتیت گرانیتی تأخیری بوده و به صورت استوک و دایک در درون و حاشیه این باتولیت برون‌زد یافته‌اند و بدون برگ‌وارگی ناشی از نفوذ زمین‌ساختی هستند (Sadeghian et al., 2005).

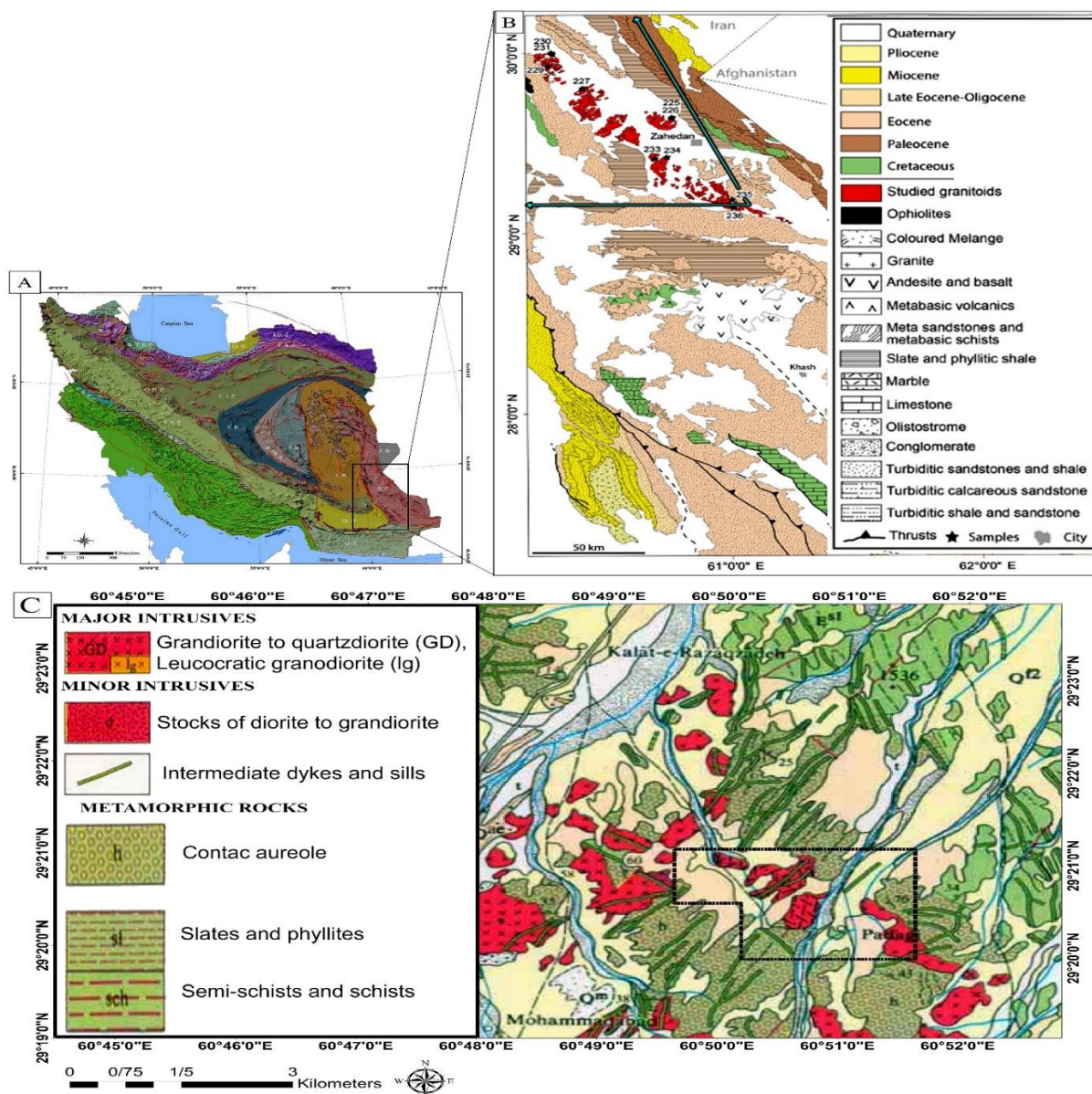
مشاهدات صحرایی از نحوه توزیع و مرز این واحدها نشان‌دهنده پدیده اختلاط ماگمایی است؛ به ویژه در جنوب زاهدان در گوشه جنوب‌شرقی ناحیه، سه استوک بزرگ دیوریتی در مرکز پلوتون زاهدان رخنمون دارند. این استوک‌ها سیاه تا سبز تیره با حاشیه سریع سرد شده دارای بافت دانه‌ریز هستند؛ ولی در برخی رخنمون‌ها بافت‌های پگماتیتی نیز در آنها دیده می‌شود. این سنگ‌ها حاوی هورنبلند منیزومی، بیوتیت، پلاژیوکلاز، مگنتیت، آپاتیت و زیرکن هستند (Sadeghian et al., 2005).

ماگمای تشکیل‌دهنده بخش دیوریتی-گرانودیوریتی این مجموعه، دارای گرایش آهکی-قلیایی پتاسیم متوسط-بالا و سرشت متآلومین است. روندهای تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی و کمیاب در مقابل سیلیس، نشان‌دهنده رابطه خویشاوندی و پیوستگی این مجموعه‌هاست. غنی‌شدگی این سنگ‌ها از لحاظ LILE و LREE و فقیرشدگی آنها از HFSE و HREE، بیانگر



هدف از انجام این پژوهش؛ شناسایی و تفکیک توده های نیمه عمیق، بررسی سنگ نگاری و زمین شیمی این توده ها و تعیین خاستگاه تکتونوماگمایی و منشأ آنها در منطقه مورد بررسی است.

ماگماتیسزم نفوذی متاآلمین نوع کمان های آتشفشانی حاشیه قاره ها در اثر فرایند مربوط به فروانش برای آنهاست (Sadeghian et al., 2005).



شکل ۱. A: موقعیت مجموعه باتولیت گرانیتوئید زاهدان بر روی نقشه تلفیقی پهله بندی لیتوتکتونیک ایران و B: نقشه نوار گرانیتوئیدی زاهدان که درون زمین درز سیستان نفوذ کرده است (Rezaei-Kakhkhaei et al., 2010) و C: نمایش محدوده مورد بررسی بر روی نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ زاهدان (Baker and Griffiths, 1976)

**Fig. 1.** A: Location of Zahedan granitoid batholith assemblage on the integrated map of Iranian lithotectonic zoning, B: Zahedan granitoid belt map that has intruded into the Sistan suture zone (Rezaei-Kakhkhaei et al., 2010), and C: Show the study area on a geological map with a scale of 1:100/000 Zahedan (Baker and Griffiths, 1976)

## روش مطالعه

در راستای انجام پژوهش در محدوده مورد بررسی، پس از جمع‌آوری اطلاعات، بررسی پژوهش‌های پیشین، ارزیابی و اعتبارسنجی داده‌ها و اطلاعات قبلی، بررسی‌های میدانی و برداشت صحرائی و نمونه‌برداری برای تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ با مساحت ۵ کیلومتر مربع انجام شد. در طی این بررسی‌ها، تعداد ۸۱ نمونه برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و مینرالوگرافی و ۳۲ نمونه از توده‌های نیمه عمیق منطقه (سالم و یا با کمینه دگرسانی) برای آنالیز XRF و ICP-MS و همچنین برای بررسی دگرسانی‌های منطقه، تعدادی از نمونه‌های دگرسان برای بررسی‌های XRD برداشت شده است. آنالیزهای شیمیایی تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران<sup>۱</sup> انجام شده است. آزمایش نمونه‌ها به روش XRF توسط دستگاه از دستگاه XRF Magix pro (PW 2440) و آزمایش ICP-MS با استفاده از دستگاه Agilent technologies-7900-ICP-MS spare parts-USA انجام شد. در ادامه، نقشه زمین‌شناسی منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد و نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگی توسط نرم‌افزار GCD.kit پردازش شد و از نمودارهای مختلف برای تعبیر و تفسیر سنگ‌شناسی سنگ‌های منطقه استفاده شده است.

## زمین‌شناسی

بر اساس بررسی‌ها و برداشت‌های انجام‌شده در قالب نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ از محدوده مورد بررسی، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این منطقه شامل مجموعه‌ای از واحدهای رخساره فلیش کمی دگرگون‌شده (فلیت، شیل‌های کمی دگرگونه و ماسه‌سنگ) با سن ائوسن، سنگ‌های نیمه عمیق و دایک‌های بازیک تا حدواسط با سن احتمالاً الیگوسن-میوسن هستند. سنگ‌های نیمه عمیق به شکل استوک و گنبد در واحد فلیشی نفوذ کرده و خود در مراحل بعدی توسط دایک‌های حد واسط با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب قطع

شده‌اند (شکل ۴). توده‌های نیمه عمیق از لحاظ ترکیب سنگ‌شناسی اغلب از نوع حدواسط و با بافت‌های شاخص پورفیری هستند. این واحدها در بیشتر بخش‌ها طی نفوذ به داخل پیکره اصلی باتولیت زاهدان سبب ایجاد دگرسانی در این مجموعه شده‌اند. از این رو، می‌توان گفت که این واحدها فازهای تأخیری و احتمالاً بارور از لحاظ کانی‌سازی در منطقه هستند.

توده‌های نیمه عمیق منطقه دارای دو ترکیب اصلی دیوریت-مونزودیوریت و کوارتزیدیوریت-کوارتزمونزودیوریت است. این واحدها به خصوص توده‌های با ترکیب کوارتزیدیوریت-کوارتزمونزودیوریت تحت تأثیر فرایندهای ثانویه، دگرسان و هوازده شده‌اند. بیشینه رخداد پدیده دگرسانی، در بخش مرکزی محدوده مورد بررسی و منطبق بر رخنمون توده‌های نیمه عمیق با ترکیب کوارتزیدیوریت-کوارتزمونزودیوریتی بوده است و به سمت حاشیه و در مرز تماس توده‌های دیوریت-مونزودیوریت از شدت دگرسانی کاسته می‌شود. تزریق دایک‌های آندزیتی، جوان‌ترین رخداد ماگمایی در محدوده مورد بررسی هستند. لیتولوژی این دایک‌ها هورنبلند آندزیت پورفیری بوده و روند عمومی آنها NW-SE و NE-SW است. ضخامت آنها از ۰/۵ متر تا ۵ متر متغیر بوده و طول برون‌زد پیوسته آنها گاه به ۳۰۰ متر نیز می‌رسد.

واحدهای منسوب به رخساره فلیش ( $E^{sst}$  و  $E^{sps}$ )

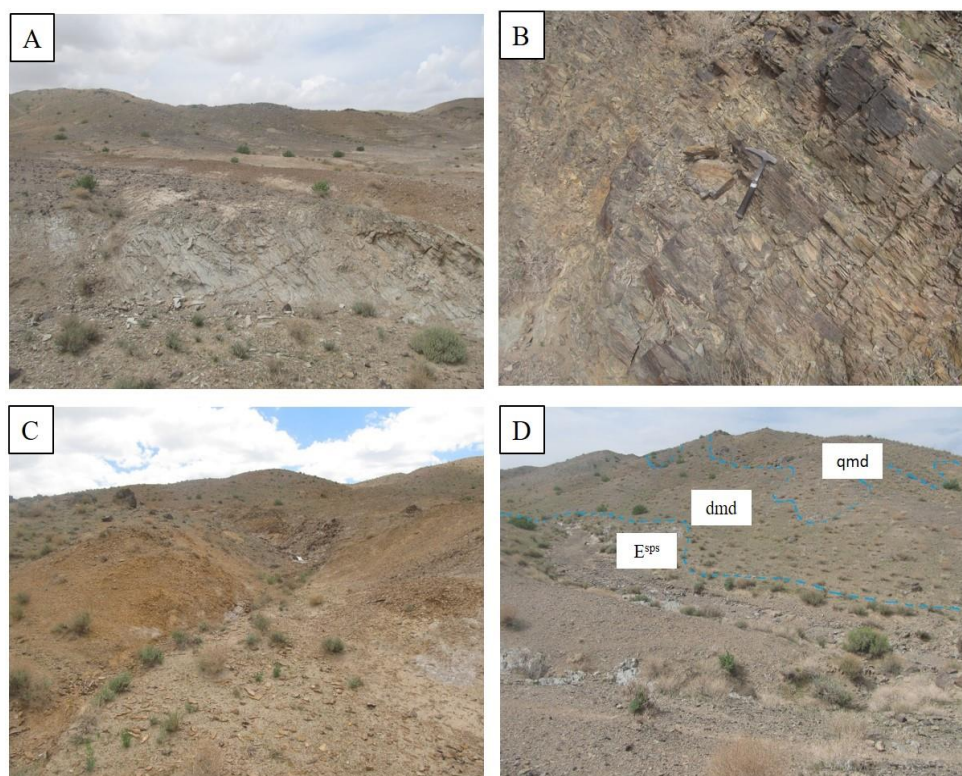
قدیمی‌ترین واحدهای سنگی که در محدوده مورد بررسی برون‌زد یافته‌اند، مشتمل بر ماسه سنگ، توف ماسه‌ای، شیل، سیلتستون، فلیت و متاسیلستون‌های منسوب به رخساره فلیش‌های شرق ایران هستند (شکل ۲- A و B). در این مجموعه رسوبی، واحدهای سنگی با ترکیب شیل، سیلتستون، فلیت و متاسیلستون از فراوانی و گسترش بیشتری برخوردار بوده و ماسه سنگ، توف ماسه‌ای و توف به صورت میان لایه‌هایی پراکنده قابل شناسایی هستند (شکل ۲- C). رخنمون این واحدهای سنگی اغلب در شرق منطقه حضور داشته و همچنین به صورت بقایایی در لابلای توده‌های نیمه عمیق

نیز بر جای مانده است (شکل ۲- D).

توده‌های نیمه عمیق با ترکیب حدواسط است. این توده‌های نیمه عمیق اغلب دارای ترکیب دیوریت تا مونزودیوریت پورفیری و کوارتز دیوریت تا کوارتز مونزودیوریت پورفیری هستند. توده‌های یادشده بخشی از مجموعه ماگمایی برون‌زد یافته در منطقه زاهدان هستند (شکل ۳- A و B).

### واحد نیمه عمیق دیوریت- مونزودیوریت پورفیری (dmd)

بخش وسیعی از محدوده مورد بررسی شامل برون‌زدهایی از



**شکل ۲.** A و B: نمایی دور و نزدیک از برون‌زد واحد ماسه سنگی سبز تا کمی تیره در بخش شمال‌غربی محدوده جنوب زاهدان (دید به سمت شمال)، C: رخنمون واحد توف ماسه سنگی دگرگون‌شده و فیلیت دگرسان‌شده در بخش جنوب‌شرقی محدوده جنوب زاهدان (دید به سمت جنوب) و D: نمایی از واحد شیل و سیلتستون دگرگون‌شده و تزریق توده‌های نیمه عمیق دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری درون آنها در محدوده جنوب زاهدان (دید به سمت شمال)

**Fig. 2.** A and B: Far and near view from the outcrop of green to slightly dark sandstone unit in the northwestern part of south Zahedan area (view to the north), C: The outcrop of the metamorphic sandy tuff unit and the altered phyllite in the southeastern part of the south Zahedan area (view to the south), and D: View of the shale and meta-siltstone unit and injection of subvolcanic diorite and quartz diorite porphyry masses inside them in south Zahedan area (view to the north)

جنوب شرق محدوده مورد بررسی را به خود اختصاص داده است. این واحد سنگی دارای رنگ رخنمون روشن بوده و دارای ریخت‌شناسی نرم‌فرسا و تپه ماهوری است. واحد سنگی ذکرشده

### واحد نیمه عمیق کوارتز دیوریت- کوارتز مونزودیوریت پورفیری (qdm)

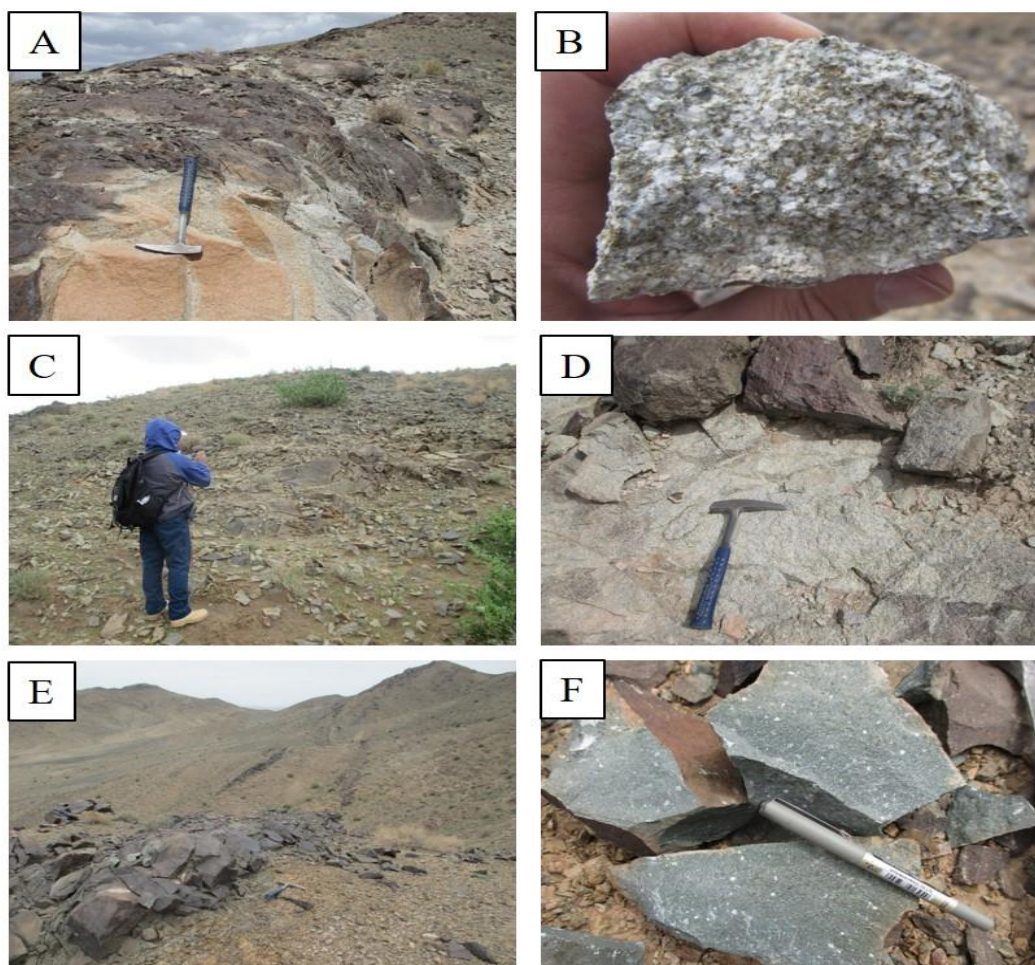
رخنمون این واحد سنگی بخش عمده‌ای از مرکز، شمال‌غرب و



**دایک آندزیتی (dy)**

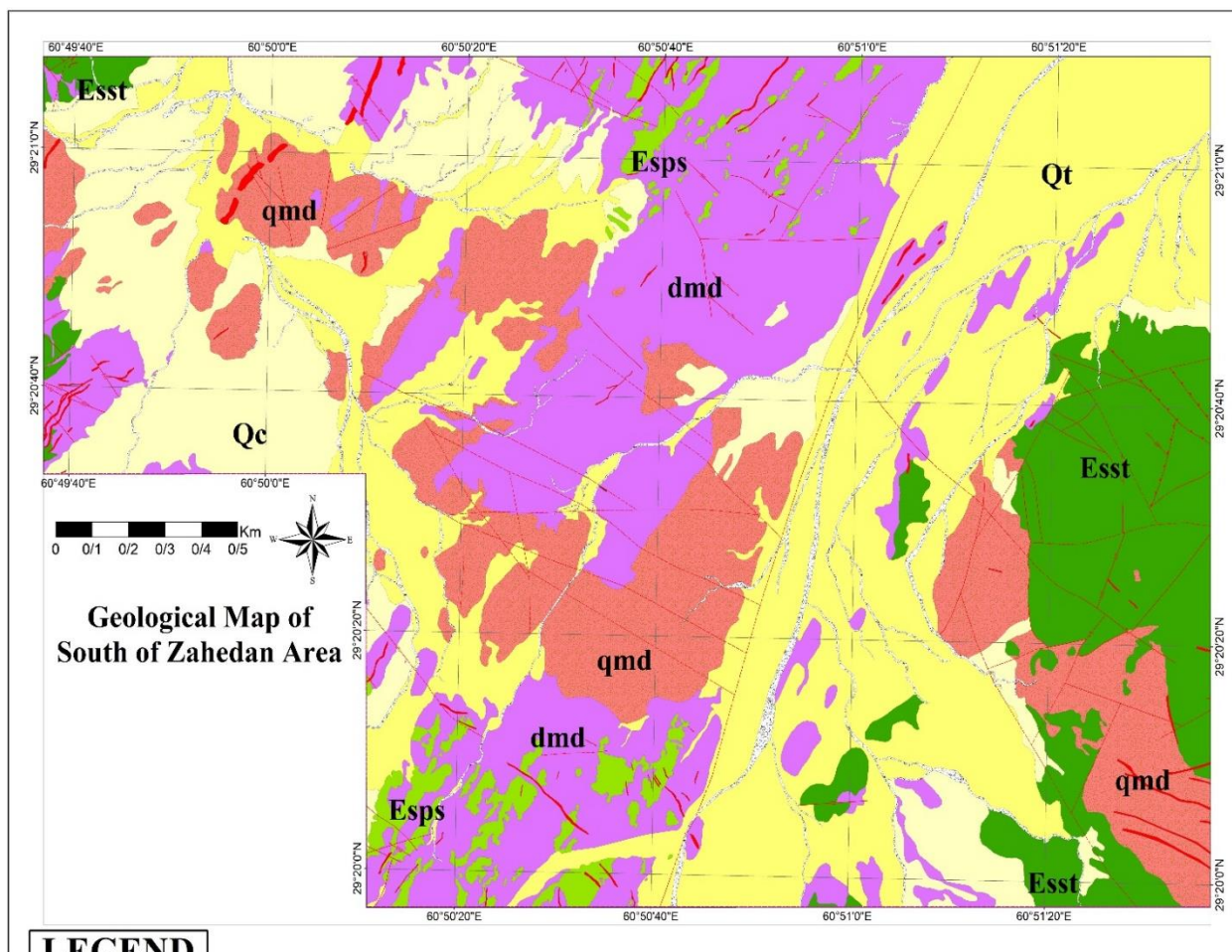
تزریق دایک‌های آندزیتی جوان‌ترین رخداد ماگمایی در محدوده هستند. این دایک‌ها از نوع هورنبلند آندزیت پورفیری بوده و روند آنها NW-SE و NE-SW است. ضخامت آنها از ۰/۵ متر تا ۵ متر متغیر بوده و طول برونزد پیوسته آنها گاه به ۳۰۰ متر نیز می‌رسد (شکل ۳- E و F).

تحت تأثیر فرایندهای ثانویه دگرسان و هوازده شده است. برونزد رخمون توده کوارتز دیوریت- کوارتز مونزودیوریت پورفیری دگرسان به صورت پهنه‌ای به عرض حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر و طولی در حدود ۱ تا ۱/۵ کیلومتر و با امتداد عمومی شمال غرب- جنوب شرق در بخش مرکزی محدوده مورد بررسی جای گرفته است (شکل ۳- C و D).



**شکل ۳.** A و B: نماهایی از نمونه دستی و سطح تازه رخمون واحد نیمه عمیق دیوریت- مونزودیوریت پورفیری در شمال شرق محدوده جنوب زاهدان (دید به سمت شمال شرق)، C و D: نماهایی از واحد کوارتز دیوریت- کوارتز مونزودیوریت پورفیری کمتر دگرسان در بخش جنوب شرق محدوده جنوب زاهدان (دید به سمت جنوب)، E و F: نماهایی از نمونه دستی و رخمون دایک‌های آندزیتی در غرب محدوده جنوب زاهدان (دید به سمت جنوب غرب)

**Fig. 3.** A and B: Views of the hand sample and the fresh surface outcrop of the diorite-monzodiorite porphyry subvolcanic unit in the northeast of the south Zahedan area (view to the northeast). C and D: Views of the quartz diorite-quartz monzodiorite less altered in the southeastern part of the south Zahedan area (southward view). E and F: Hand sample views and outcrops of andesitic dikes in the west of the south Zahedan area (southwest view)



**LEGEND**

<b>QUATERNARY</b>	Qal	Qal :Recent Alluvium	<b>Igneous Rocks</b>	Si	Si :Silica Vein
	Q <sup>c</sup>	Q <sup>c</sup> :Colluvium:scree and talus (Rock fragments are in size of boulder, pebbel & gravel).		dy	dy :Green andesitic dyke
	Qt	Qt :Quaternary alluvial terraces and fans.			
<b>Eocene</b>	E <sup>sps</sup>	Flysch Facies E <sup>sst</sup> :Dark gray to green, medium to thin bedded, sandstone, sandy tuff, tuff E <sup>sps</sup> :Gray to green, shale, phyllite and thin bedded metasilstone.	qdm	qdm :Light gray, porphyritic, micro quartz diorite to micromonzonite.	
	E <sup>sst</sup>		dmd	dmd :Gray to light green, porphyritic, microdiorite to micro monzodiorite	
<b>Symbols</b>			<b>Alteration</b>		
—	Fault(unknown mechanism)	1535	a	Altered rocks	
—	Strike slip fault (dextral)	1540			
—	Strike slip fault (sinistral)	—			
—	Reverse fault	—			
- - -	Probable fault	—			
		Cu			
		Indication			

شکل ۴. نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ محدوده جنوب زاهدان

Fig. 4. Geological map with a scale of 1:5.000 of the south Zahedan area

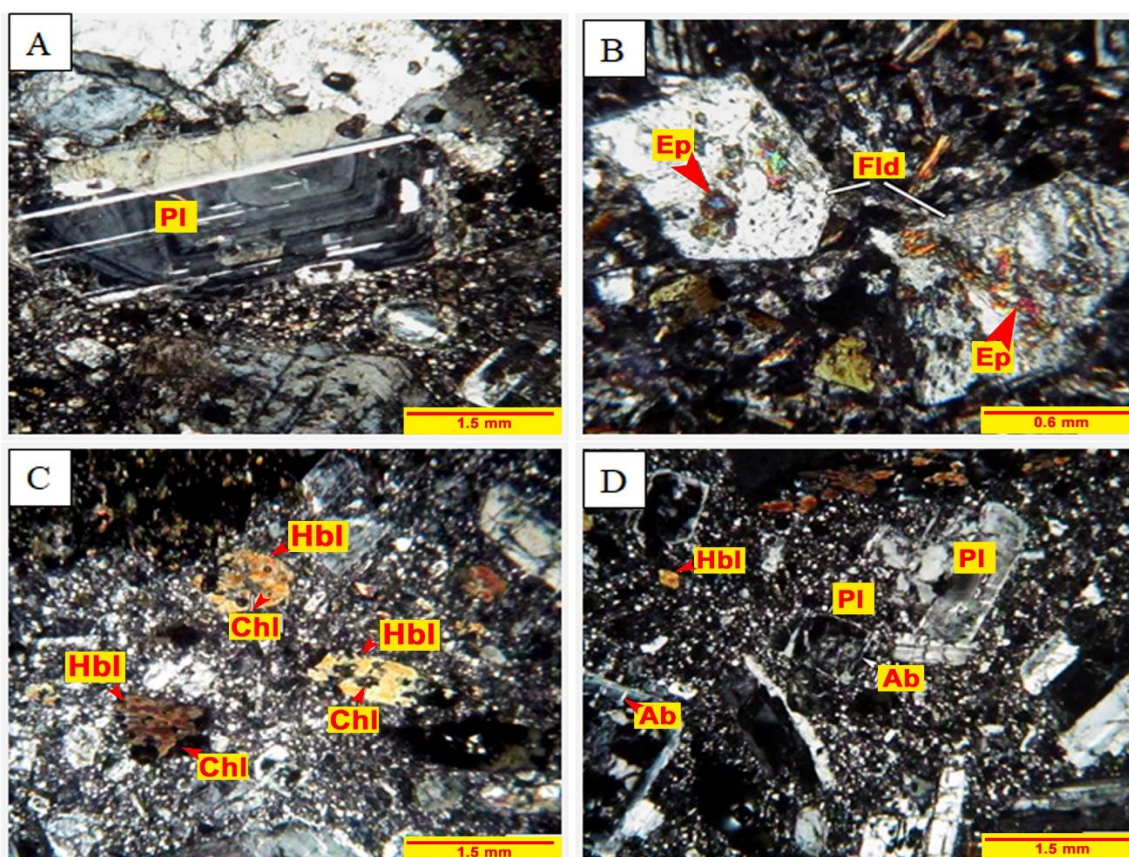


## سنگ‌نگاری توده‌های نیمه عمیق

## دیوریت و مونزودیوریت پورفیری

بافت این سنگ‌ها پورفیری و گاهی گلوپورفیری با زمینه دانه‌ریز است. کانی‌های اصلی سازنده این واحد را پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنستیک، هورنبلند، با فراوانی کمتر بیوتیت، فلدسپار پتاسیم و کوارتز تشکیل می‌دهند (شکل ۵-A و B). درصد فنوکریست به زمینه در این سنگ‌ها ۳۰ تا ۴۰ درصد است که ۱۵

تا ۲۰ درصد پلاژیوکلاز و کمتر از ۱۰ درصد فلدسپار پتاسیم و ۱۰ تا ۱۵ درصد کانی‌های فرومنیزین بیشتر از نوع هورنبلند است. زمینه سنگ متشکل از کانی‌های پلاژیوکلاز، فلدسپارها، کانی‌های فرومنیزین به همراه کانی‌های کدر، فرعی و ثانویه است. آپاتیت و زیرکن در رده کانی‌های فرعی این سنگ‌ها قرار دارند (شکل ۵-C و D).



شکل ۵. تصویرهای میکروسکوپی از واحدهای نیمه عمیق دیوریتی و مونزودیوریتی محدوده جنوب زاهدان: A: بلور پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنستیک و منطقه‌بندی در زمینه ریز بلور، B: نمایی از بلورهای فلدسپار اپیدوتی شده، C و D: بافت پورفیری شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند در زمینه ریز بلور. علائم اختصاری از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ep: اپیدوت، Chl: کلریت، Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز، Ab: آلیت، Fld: آلکالی فلدسپار).

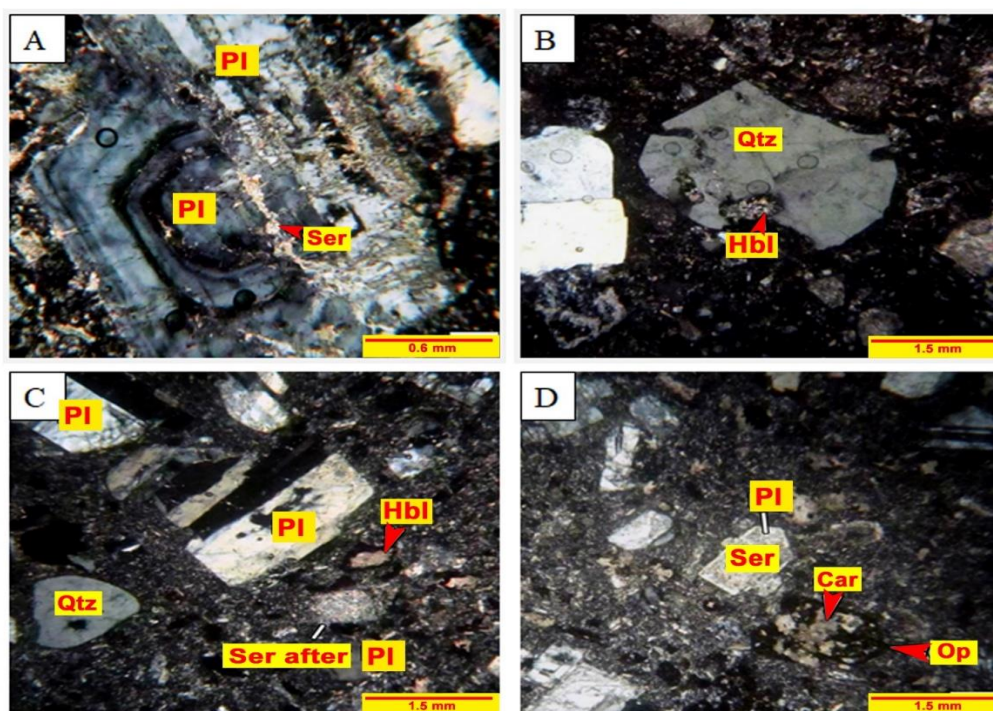
**Fig. 5.** Microscopic images of subvolcanic diorite and monzodiorite units in the south of Zahedan area: A: Plagioclase crystal with polysynthetic and zoning twinning with microcrystals background, B: View of epidural feldspar crystals, C and D: Porphyry texture including plagioclase phenocrysts, Hornblende in the pulp of microcrystals. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ep: Epidote, Chl: Chlorite, Hbl: Hornblende, Pl: Plagioclase, Ab: Albite, Fld: Alkaline feldspar).

فرومنیزین و بیشتر از ۵ درصد کانی کوارتز و گاهی خلیجی و گرد است (شکل ۶- C).

زمینه این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار، کانی‌های فرومنیزین و کوارتز به همراه کانی‌های کدر و سایر کانی‌های فرعی و ثانویه است. گاهی در این سنگ‌ها بلورهای هورنبلند و بیوتیت با درجه‌های مختلف، توسط کلریت و کربنات به همراه اپیدوت جانشین شده‌اند. کانه‌های کدر گاهی در امتداد سطوح رخ بلورهای بیوتیت تمرکز یافته‌اند. کانه‌های کدر، زیرکن، تورمالین و آپاتیت اجزای فرعی سازنده سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۶- D).

### کوارتز دیوریت و کوارتز مونزودیوریت پورفیری

بافت اصلی این سنگ‌ها از نوع پورفیری و گاهی گلوپورفیری است. کانی‌های اصلی سازنده این واحد را پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتتیک و منطقه‌بندی، هورنبلند، بیوتیت و کوارتز به صورت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل و گاهی با حاشیه خلیجی تشکیل می‌دهند (شکل ۶- A و B). فلدسپارها گاهی واجد شکستگی و لبه‌های تیز بوده و ماکل آنها به صورت ناقص مشاهده می‌شود. درصد فنوکریست‌های موجود در زمینه ریز بلور این سنگ‌ها بین ۲۵ تا ۳۵ درصد است. ۱۰ تا ۱۵ درصد این بلورهای درشت از نوع پلاژیوکلاز، کمتر از ۱۰ درصد فلدسپار، تا ۵ درصد کانی‌های



**شکل ۶.** تصاویرهای میکروسکوپی از واحدهای نیمه عمیق کوارتز دیوریتی و کوارتز مونزودیوریتی محدوده جنوب زاهدان: A: بلور پلاژیوکلاز منطقه‌بندی، سریسیتی‌شده، B: ادخال هورنبلند در فنوکریست کوارتز با حاشیه خلیجی، C و D: نماهایی از بافت پورفیری شامل فنوکریست‌های پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتتیک، کوارتز و هورنبلند کربناتی‌شده در زمینه ریز بلور. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز، Qtz: کوارتز، Ser: سریسیت، Car: کربنات، Op: اوپک).

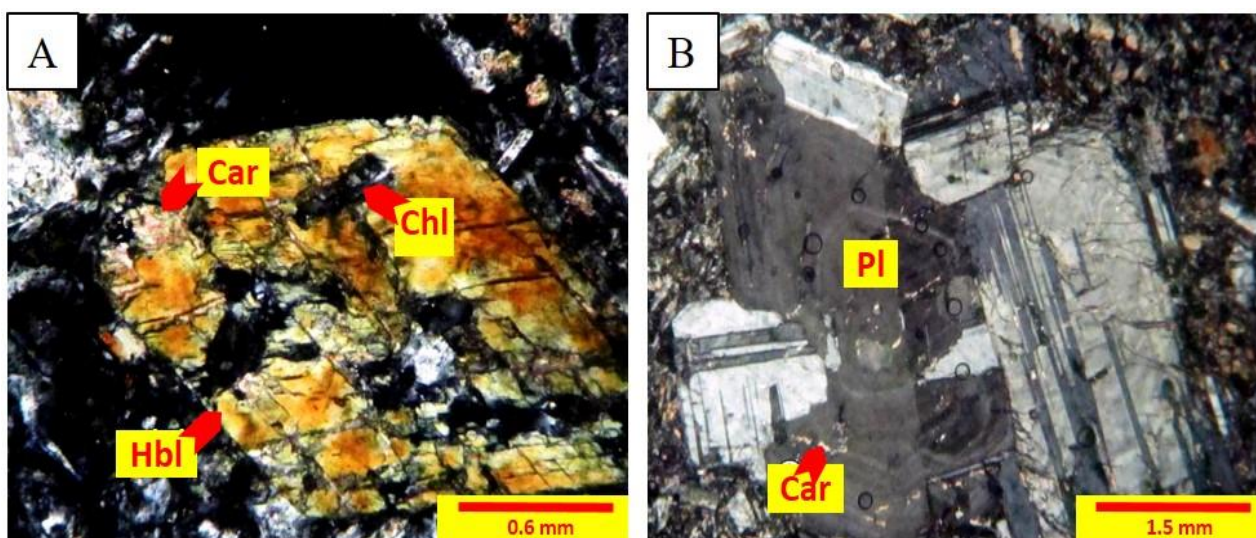
**Fig. 6.** Microscopic images of subvolcanic quartz diorite and quartz monzodiorite units in the south of Zahedan area: A: zoning plagioclase crystallized, sericitic alteration, B: Hornblende inclusion in quartz phenocryst with gulf corrosion, C and D: Views of porphyry texture including plagioclase phenocrysts with polysynthetic twinning, quartz and carbonated hornblende in the microcrystalline background. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Hbl: Hornblende, Pl: Plagioclase, Qtz: Quartz, Ser: Sericite, Car: Carbonate, Op: Opaque).



## دایک‌های آندزیت پورفیری

نمونه‌های دایک‌های موجود در محدوده مورد بررسی در بررسی‌های سنگ‌نگاری شامل مجموعه‌ای از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و کانی فرومنیزین هورنبلند قهوه‌ای هستند (شکل ۷-۷). حضور فنوکریست‌های این کانی‌ها در زمینه میکروولیتی،

بافت‌های پورفیری را سبب شده است. همچنین تجمع بلورهای پلاژیوکلاز در بخش‌هایی از زمینه بافت گلوامروپورفیری را نشان می‌دهد. درصد فنوکریست‌های موجود در این نمونه‌ها کمتر از ۱۰ است که بیشتر شامل کانی‌های پلاژیوکلاز نوع آندزین و هورنبلند هستند (شکل ۷-۷B).



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپی از دایک‌های آندزیتی محدوده جنوب زاهدان: A: جانشینی کلریت و کربنات در بلور هورنبلند و B: فنوکریست پلاژیوکلاز منطقه‌بندی در متن دایک آندزیتی با بافت پورفیری. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Hbl: هورنبلند، Pl: پلاژیوکلاز، Car: کربنات).

**Fig. 7.** Microscopic images of andesitic dike in the south of Zahedan area: A: Chlorite and carbonate substitution in Hornblende crystal, and B: Zoning plagioclase phenocryst in andesitic dike with porphyry texture. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: Chlorite, Hbl: Hornblende, Pl: Plagioclase, Car: Carbonate).

## زمین‌شیمی توده‌های نیمه عمیق

نتایج آنالیز اکسیدهای اصلی، فرعی و نادر خاکی توده‌های نیمه عمیق و دایک‌های منطقه در (جدول ۱ و جدول ۲) آمده است.

## زمین‌شیمی

برای نام‌گذاری واحدهای نیمه عمیق محدوده مورد بررسی از نمودارهای زمین‌شیمیایی مختلفی همچون نمودار  $K_2O+Na_2O$  (wt.%) در مقابل  $SiO_2$  (wt.%) (Middlemost, 1985) (شکل

۸-۸A) و نمودار کاتیون‌های دولاروش و همکاران (De la Roche et al., 1980)، استفاده شده است (شکل ۸-۸B).

بر اساس این نمودارها، نمونه‌های برداشت شده از واحدهای نیمه عمیق منطقه مورد بررسی در محدوده کوارتز مونزودیوریت-دیوریت تا مونزونیت-دیوریت قرار می‌گیرند و نمونه‌های دایک‌های آندزیت پورفیری در محدوده گابرویدیوریت تا دیوریت قرار می‌گیرند. این نتایج با بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده بر روی واحدهای سنگی منطقه، تطابق مناسبی نشان می‌دهد.

جدول ۱. نتایج آنالیز عناصر اصلی نمونه‌های برداشت شده از محدوده جنوب زاهدان به روش XRF (مقادیر بر حسب %)

**Table 1.** Results of oxide analysis of the major elements of the samples taken from the South of Zahedan area by XRF method (values in%)

Geology Field No	dmd SZ-007- XF	dmd SZ-012- XF	dmd SZ-026- XF	dmd SZ-033- XF	dmd SZ-035- XF	dy SZ-040- XF	dmd SZ-044- XF	dy SZ-061- XF
SiO <sub>2</sub>	58.8	52.6	56.4	60.0	60.3	58.2	54.0	55.1
TiO <sub>2</sub>	0.6	0.7	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.0	15.8	15.8	17.2	16.1	16.8	17.4	15.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	5.9	7.7	6.7	4.8	5.1	5.1	6.6	7.1
MnO	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
MgO	2.6	4.3	3.7	2.4	2.2	2.7	2.7	4.1
CaO	4.7	8.0	7.4	4.6	6.6	5.5	6.7	7.3
Na <sub>2</sub> O	2.9	2.8	3.1	2.8	2.9	2.9	2.8	2.9
K <sub>2</sub> O	3.6	2.5	2.3	3.5	2.6	3.3	3.2	2.6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
L.O.I.*	3.1	5.1	3.2	3.8	3.2	4.0	5.2	3.9
Geology Field No	dmd SZ-064- XF	dmd SZ-066- XF	dmd SZ-068- XF	dy SZ-071- XF	dmd SZ-081- XF	dy SZ-083- XF	dy SZ-087- XF	dmd SZ-090- XF
SiO <sub>2</sub>	59.9	54.6	56.7	57.0	57.4	52.5	52.0	54.9
TiO <sub>2</sub>	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	0.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.5	15.5	16.5	16.4	16.4	16.1	16.2	16.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	5.1	6.9	5.6	5.9	5.1	7.6	7.5	7.0
MnO	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MgO	2.1	4.3	2.1	2.7	2.3	3.8	4.2	2.9
CaO	5.9	7.4	7.5	6.5	7.4	8.9	8.2	8.1
Na <sub>2</sub> O	3.4	3.3	2.8	2.9	2.8	2.9	2.7	3.1
K <sub>2</sub> O	2.7	2.4	3.2	3.2	3.0	2.4	2.3	2.7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
L.O.I.*	3.2	4.3	4.4	3.9	4.5	4.5	5.5	3.6

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز عناصر اصلی نمونه‌های برداشت شده از محدوده جنوب زاهدان به روش XRF (مقادیر بر حسب %)

**Table 1 (Continued).** Results of oxide analysis of the major elements of the samples taken from the South of Zahedan area by XRF method (values in%)

Geology	dy	dmd	dmd	dmd	dmd	dmd	qdm	dy
Field No	SZ-095-XF	SZ-113-XF	SZ-130-XF	SZ-141-XF	SZ-160-XF	SZ-169-XF	SZ-179-XF	SZ-181-XF
SiO <sub>2</sub>	52.2	58.4	57.6	57.7	60.3	52.1	61.9	47.6
TiO <sub>2</sub>	0.9	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.5	1.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.8	15.8	15.9	16.1	17.5	18.2	15.9	16.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	8.0	6.1	6.0	6.4	5.5	6.5	4.6	8.9
MnO	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2
MgO	4.2	2.2	2.5	2.5	2.6	2.4	1.8	5.2
CaO	8.2	7.4	7.5	6.7	3.2	7.4	5.5	9.6
Na <sub>2</sub> O	2.7	2.7	3.3	3.5	3.2	2.9	3.6	2.1
K <sub>2</sub> O	2.6	2.9	3.2	3.0	2.9	3.1	3.3	2.5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
L.O.I.*	4.8	3.0	2.4	2.6	3.3	5.9	2.6	6.2
Geology	dmd	qdm	dy	dy	dmd	qdm	dy	dmd
Field No	SZ-184-XF	SZ-189-XF	SZ-211-XF	SZ-213-XF	SZ-216-XF	SZ-225-XF	SZ-229-XF	SZ-233-XF
SiO <sub>2</sub>	55.9	62.0	52.3	53.8	57.6	63.8	50.5	55.6
TiO <sub>2</sub>	0.6	0.6	0.9	0.6	0.7	0.6	0.9	0.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.3	16.9	16.5	17.1	16.8	16.4	16.5	16.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	5.0	3.9	8.2	6.6	6.2	4.3	7.8	6.4
MnO	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.5	0.2
MgO	1.8	2.5	4.0	5.4	2.7	0.7	4.4	3.4
CaO	6.5	3.0	7.7	7.1	6.0	1.4	8.6	7.8
Na <sub>2</sub> O	2.6	4.0	2.8	2.9	3.0	1.8	2.4	2.7
K <sub>2</sub> O	3.9	3.5	2.6	2.0	2.9	4.1	2.3	2.7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
L.O.I.*	5.9	3.1	4.0	3.8	3.4	5.3	4.8	3.4

**جدول ۲.** نتایج آنالیز عناصر کمیاب نمونه‌های برداشت‌شده از محدوده جنوب زاهدان به روش ICP-MS (مقادیر بر حسب ppm)

**Table 2.** Results of trace element analysis of samples taken from the South of Zahedan area by ICP-MS method (values in ppm)

Geology	dmd	dmd	dmd	dmd	dmd	dy	dmd	dy
Field No	SZ-007-XF	SZ-012-XF	SZ-026-XF	SZ-033-XF	SZ-035-XF	SZ-040-XF	SZ-044-XF	SZ-061-XF
As	5.99	12.73	6.10	16.58	6.32	18.62	4.68	7.51
Ba	840.90	713.70	630.10	556.20	716.80	720.90	559.80	618.40
Be	0.10	1.07	0.10	0.10	0.10	0.55	0.55	0.10
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Co	6.79	15.55	7.97	6.72	6.92	7.68	6.78	13.49
Cr	28.90	79.84	49.16	37.83	33.98	34.34	28.68	85.10
Cu	36.00	31.00	77.17	45.61	18.47	175.00	8.85	55.43
Mo	1.00	1.00	1.00	1.04	1.00	1.24	1.00	1.66
Rb	24.12	34.31	17.97	22.68	29.30	17.07	33.24	31.11
Sb	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.25
Zn	40.50	54.70	62.50	42.80	52.60	36.50	44.70	28.00
Ni	11.40	43.00	39.70	12.20	10.90	17.10	13.60	49.60
Pb	10.60	10.70	4.90	4.20	1.00	1.00	4.60	12.00
Li	7.30	27.98	13.38	1.00	9.73	12.16	15.81	8.51
Ga	52.56	61.39	35.02	43.96	63.99	57.38	44.19	47.89
Hf	1.00	2.30	1.74	1.61	1.59	1.83	1.36	1.91
Nb	9.49	8.90	7.55	8.30	11.93	12.07	10.26	10.21
Zr	13.40	35.10	47.00	22.00	17.00	25.80	17.60	30.00
Cs	1.80	6.01	1.03	1.80	1.50	1.00	3.96	3.93
Sr	446.20	427.40	450.90	317.20	445.40	344.20	360.30	481.10
Ta	0.50	0.60	0.50	0.80	1.00	1.00	1.00	0.50
Th	3.62	3.72	2.37	3.81	4.62	3.48	4.33	3.31
U	2.30	1.74	1.21	2.60	2.38	2.56	2.20	1.69
V	57.75	80.72	82.48	54.70	53.62	59.57	58.89	81.98
W	11.94	7.25	5.29	4.94	4.18	5.10	4.35	4.31
Sc	3.92	7.25	6.07	3.64	4.15	3.58	4.21	7.51
Y	1.75	3.15	2.15	1.31	2.26	1.30	1.95	2.46
La	4.87	8.53	5.33	4.07	6.62	4.54	6.06	7.08
Ce	9.06	16.61	10.24	8.29	12.68	8.80	11.22	13.68
Pr	4/67	8.40	4.95	3.94	5.98	4.26	5.73	6.79
Nd	15.30	28.71	16.18	13.85	22.46	15.70	20.75	25.82
Sm	1.66	2.56	1.57	1.35	2.15	1.45	1.87	2.39
Eu	0.26	0.48	0.29	0.24	0.33	0.31	0.31	0.43
Gd	1.00	1.52	1.00	1.00	1.06	1.00	1.05	1.28
Dy	1.00	1.12	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ho	0.12	0.21	0.15	0.10	0.18	0.11	0.16	0.20
Er	0.41	0.57	0.40	0.36	0.48	0.30	0.46	0.56
Yb	0.31	0.52	0.35	0.35	0.41	0.29	0.41	0.44
Lu	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10



ادامه جدول ۲. نتایج آنالیز عناصر کمیاب نمونه‌های برداشت شده از محدوده جنوب زاهدان به روش ICP-MS (مقادیر بر حسب ppm)

**Table 2 (Continued).** Results of trace element analysis of samples taken from the South of Zahedan area by ICP-MS method (values in ppm)

Geology	dmd	dmd	dmd	dy	dmd	dy	dy	dmd
Field No	SZ-064-XF	SZ-066-XF	SZ-068-XF	SZ-071-XF	SZ-081-XF	SZ-083-XF	SZ-087-XF	SZ-090-XF
As	4.05	9.87	4.38	5.91	3.19	6.58	3.86	11/51
Ba	622.00	643.00	483.20	563.40	632.10	648.00	1194.00	536.60
Be	2.11	0.55	1.59	0.10	1.59	0.10	1.59	1.07
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Co	7.83	12.13	5.13	8.41	5.95	10.53	9.04	7.47
Cr	41.52	72.49	26.77	42.10	27.20	43.77	47.10	38.51
Cu	13.69	23.48	2.72	29.16	4.70	24.82	11.78	33.74
Mo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Rb	25.45	32.72	36.81	33.03	23.74	32.91	26.31	23.34
Sb	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Zn	15.00	72.10	68.80	56.60	49.10	53.60	70.50	55.90
Ni	13.00	36.60	9.60	13.30	5.80	18.20	16.80	14.40
Pb	37.60	23.50	21.90	39.00	15.40	1.60	23.70	5.10
Li	1.22	37.71	2.43	12.16	17.03	19.46	17/03	1.00
Ga	50.35	53.28	41.25	44.23	49.29	52.05	77.75	40.46
Hf	1.47	2.32	1.00	1.55	1.76	2.02	1.84	1.36
Nb	11.84	9.90	5.62	10.74	9.24	10.39	8.88	11.99
Zr	15.60	36.00	3.90	22.00	25.90	29.90	35.10	20.40
Cs	1.44	4.56	3.71	4.00	2.26	4.63	2.38	2.67
Sr	429.10	486.70	321.30	326.10	331.10	453.70	442.80	365.20
Ta	0.90	1.00	0.60	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00
Th	4.57	4.32	4.67	3.94	3.73	4.38	4.39	4.58
U	2.23	1.81	1.84	2.29	2.29	2.17	1.91	2.62
V	49.40	80.13	47.86	57.25	50.74	86.22	76.00	68.81
W	4.01	3.47	3.42	4.29	3.57	3.41	3.43	4.30
Sc	3.75	7.66	3.48	4.29	3.64	6.99	6.48	4.67
Y	1.86	3.08	2.18	2.24	1.76	2.94	2.37	2.02
La	5.89	8.98	6.31	5.79	4.73	7.61	7.20	5.63
Ce	11.41	16.74	11.66	10.80	8.98	14.35	13.15	10.27
Pr	5.48	8.16	5.79	5.67	4.69	7.14	6.49	5.18
Nd	19.23	29.32	20.46	19.10	15.89	25.41	24.24	18.58
Sm	1.65	2.84	1.85	1.83	1.60	2.78	1.96	1.74
Eu	0.32	0.46	0.31	0.29	0.29	0.41	0.36	0.26
Gd	1.00	1.47	1.16	1.05	1.00	1.29	1.16	1.00
Dy	1.00	1.06	1.00	1.00	1.00	1.08	1.00	1.00
Ho	0.14	0.22	0.15	0.17	0.14	0.21	0.17	0.13
Er	0.40	0.64	0.47	0.45	0.35	0.63	0.46	0.42
Yb	0.40	0.52	0.40	0.40	0.41	0.59	0.40	0.34
Lu	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

ادامه جدول ۲. نتایج آنالیز عناصر کمیاب نمونه‌های برداشت شده از محدوده جنوب زاهدان به روش ICP-MS (مقادیر بر حسب ppm)

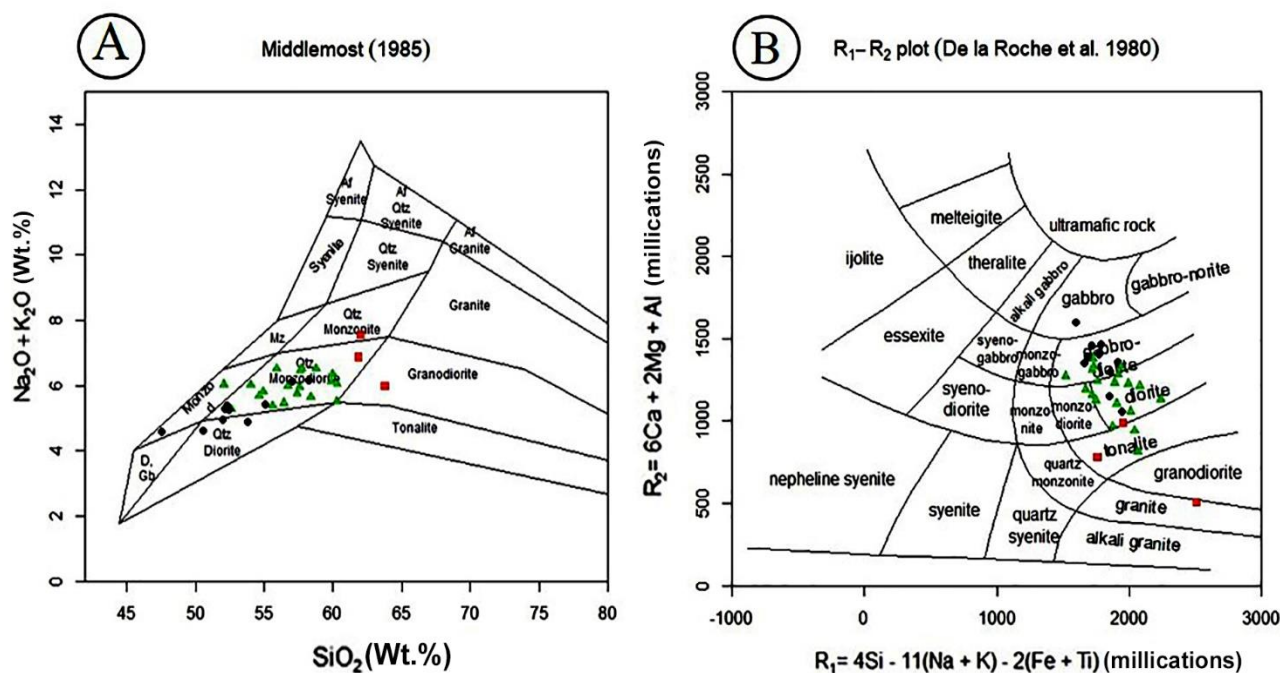
**Table 2 (Continued).** Results of trace element analysis of samples taken from the South of Zahedan area by ICP-MS method (values in ppm)

Geology	dy	dmd	dmd	dmd	dmd	dmd	qdm	dy
Field No	SZ-095-XF	SZ-113-XF	SZ-130-XF	SZ-141-XF	SZ-160-XF	SZ-169-XF	SZ-179-XF	SZ-181-XF
As	3.43	6.23	8.10	5.24	9.08	4.99	4.99	2.97
Ba	763.40	663.30	726.70	486.80	297.70	662.70	670.30	1761.00
Be	2.11	0.10	2.11	2.62	1.07	0.10	1.59	0.55
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Co	8.72	7.08	6.64	8.07	17.96	6.58	5.18	16.33
Cr	44.65	23.18	47.32	47.40	28.16	24.28	31.43	74.84
Cu	23.98	13.57	10.30	15.17	157.10	21.00	11.56	31.69
Mo	1.00	1.00	1.33	1.43	1.96	1.00	1.00	1.20
Rb	16.43	19.71	24.43	17.83	11.35	35.07	29.11	42.86
Sb	1.00	1.00	1.81	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Zn	51.90	61.30	84.80	60.60	24.00	74.10	56.20	56.40
Ni	38.70	14.30	14.20	11.30	27.00	7.00	8.10	35.10
Pb	1.00	5.50	16.50	18.00	10.00	7.80	25.10	13.10
Li	1.00	10.95	9.73	6.08	7.30	31.63	1.00	24.33
Ga	38.05	48.27	52.87	40.13	26.73	51.09	47.48	124.20
Hf	1.22	1.61	1.33	1.12	1.00	1/36	1.00	1.82
Nb	6.22	10.82	10.31	10.81	10.61	8.39	11.50	8.81
Zr	29.40	24.50	13.20	14.00	4.90	22.00	1.00	37.10
Cs	1.86	1.17	1.00	2.21	1.26	6.42	3.55	4.75
Sr	620.30	476.50	510.00	387.20	206.80	401.90	382.40	713.00
Ta	0.90	0.70	1.00	1.00	1.00	0.90	0.80	0.50
Th	2.15	3.83	5.00	4.05	2.98	3.76	3.45	5/39
U	1.31	1.90	1.90	2.02	2.31	1.67	1.74	2.22
V	88.55	62.67	75.04	75.81	59.95	55.80	48.36	117.40
W	2.28	3.56	2.52	3.07	3.87	2/20	3.08	2.80
Sc	6.65	4.37	5.63	4.87	3.00	4.08	3.22	11.06
Y	1.56	2.03	2.94	1.95	1.24	2.31	1.73	4.17
La	4.43	5.43	6.82	5.24	2.67	7.75	4.43	11.63
Ce	8.39	10.36	12.70	9.92	4.97	14.85	8/19	22.01
Pr	4.18	5.35	6.23	5.02	2.66	7.42	4.00	10.91
Nd	14.60	18.19	22.44	17.80	9.52	26.58	13.99	37.77
Sm	1.69	1.92	2.18	1.78	1.06	2.36	1.45	3.31
Eu	0.27	0.30	0.39	0.32	0.16	0.43	0.24	0.63
Gd	1.00	1.11	1.33	1.02	1.00	1.34	1.00	2.02
Dy	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.45
Ho	0.12	0.15	0.21	0.16	0.10	0.17	0.13	0.28
Er	0.34	0.43	0.61	0.46	0.28	0.42	0.39	0.85
Yb	0.33	0.42	0.57	0.41	0.21	0.37	0.36	0.75
Lu	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

ادامه جدول ۲. نتایج آنالیز عناصر کمیاب نمونه‌های برداشت شده از محدوده جنوب زاهدان به روش ICP-MS (مقادیر بر حسب ppm)

**Table 2 (Continued).** Results of trace element analysis of samples taken from the South of Zahedan area by ICP-MS method (values in ppm)

Geology	dmd	qdm	dy	dy	dmd	qdm	dy	dmd
Field No	SZ-184-XF	SZ-189-XF	SZ-211-XF	SZ-213-XF	SZ-216-XF	SZ-225-XF	SZ-229-XF	SZ-233-XF
As	3.41	16.64	13.12	10.28	9.57	5.27	8.12	7.02
Ba	623.30	746.90	918.20	561.60	617.30	725.40	798.20	638.50
Be	2.11	2.11	1.07	2.11	0.10	0.10	1.07	1.07
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	7.19	0.10
Co	6.19	6.83	11.17	19.12	8.16	1.36	13.90	9.26
Cr	32.27	42.70	47.91	95.99	35.95	55.58	65.55	42.11
Cu	50.40	257.30	45.42	17.32	9.01	94.94	92.02	17.79
Mo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.66	5.22	1.36
Rb	34.22	26.83	29.25	40.65	18.14	56.59	31.53	28.90
Sb	1.00	1.00	1.00	2.43	1.00	1.00	1.15	1.00
Zn	45.80	45.50	53.60	22.00	14.00	5.60	30.00	87.50
Ni	9.80	11.70	18.50	40.40	14.20	1.00	28.70	13.40
Pb	16.80	17.80	24.40	17.00	88.10	2.90	20.00	21.50
Li	9.73	12.16	12.16	12.16	1.00	1.00	29.19	9.73
Ga	52.56	54.37	70.09	45.46	47.36	59.14	61.31	53.56
Hf	1.00	1.00	1.97	1.96	1.18	1.00	2.01	1.86
Nb	7.40	8.05	11.99	10.49	10.49	2.78	10.08	11.14
Zr	6.40	1.00	3.00	34.80	13.50	1.00	33.50	23.10
Cs	4.34	4.69	4.37	3.89	2.07	4.23	3.83	2.10
Sr	311.90	361.40	566.80	575.70	406.50	552.30	726.90	468.80
Ta	1.15	1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Th	4.80	2.83	14.70	4.90	4.57	4.91	5.23	5.36
U	1.75	2.05	3.86	2.40	2.48	2.29	2.43	2.23
V	48.51	55.17	112.90	116.40	69.54	43.12	109.10	77.66
W	1.86	1.71	3.21	2.93	2.81	2.72	3.74	2.64
Sc	3.63	2.91	9.05	10.84	5.50	3.33	9.86	5/65
Y	2.14	1.11	3.65	3.33	1.91	0.64	3.57	2.59
La	6.27	3.40	16.19	9.80	5.46	3.50	10.89	7.99
Ce	12.00	6.63	27.95	18.57	10.41	7.08	20.25	14.93
Pr	5.53	3.24	13.28	9.16	5.07	3.67	9.65	7.35
Nd	20.42	10.97	45.28	32.48	18.34	12.73	35.55	27.48
Sm	2.15	1.26	4.01	3.03	1.89	1.23	3.05	2.24
Eu	0.34	0.20	0.54	0.52	0.34	0.28	0.53	0.41
Gd	1.02	1.00	1.94	1.67	1.00	1.00	1.61	1.34
Dy	1.00	1.00	1.32	1.24	1.00	1.00	1.23	1.00
Ho	0.16	<0.1	0.27	0.25	0.14	0.10	0.25	0.19
Er	0.49	0.31	0.71	0.70	0.46	0.18	0.69	0.60
Yb	0.40	0.28	0.61	0.61	0.40	0.12	0.62	0.46
Lu	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10



شکل ۸. A: نمایش نمونه‌های محدوده جنوب زاهدان بر روی نمودار  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (wt.%) در مقابل  $\text{SiO}_2$  (wt.%) (Middlemost, 1985) و B: نمودار کاتیون‌های دولاروش و همکاران (De la Roche et al., 1980) (مربع قرمز رنگ: qmd؛ مثلث سبز رنگ: dmd؛ نقاط مشکی: dy)

**Fig. 8.** A: Shows the samples of the study area on the diagram of  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (wt.%) vs.  $\text{SiO}_2$  (wt.%) (Middlemost, 1985), and B: Diagram of cations by De la Roche et al., (1980) (red square: qmd; green triangle: dmd; Black dots: dy)

هضم پوسته‌ای ناشی می‌شوند (Wilson, 1989; Rollinson, 1993).

برای بررسی تحولات پترولوژیکی در جریان توسعه تبلور ماگما، نمودارهای گوناگونی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به نمودارهای درصد اکسیدهای عناصر اصلی و کمیاب در مقابل  $\text{SiO}_2$  (Harker, 1909) اشاره کرد که تحولات ماگمایی را از زمان تشکیل تا جای گیری نشان می‌دهد. بر این اساس، در نمودارهای دو بعدی رسم شده برای نمونه‌های مورد بررسی با افزایش  $\text{SiO}_2$ ، مقادیر  $\text{CaO}$ ،  $\text{P}_2\text{O}_5$ ،  $\text{FeO}$ (t)،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{MgO}$  کاهش و مقادیر  $\text{K}_2\text{O}$  افزایش یافته است. این تغییرات با تفریق ماگمایی و کاهش کانی‌های فرومیزین همراه با افزایش کانی‌های فلسیک در طی روند تبلور تفریقی انجام شده در طی تشکیل سنگ‌های مورد بررسی سازگار است (شکل ۱۰).

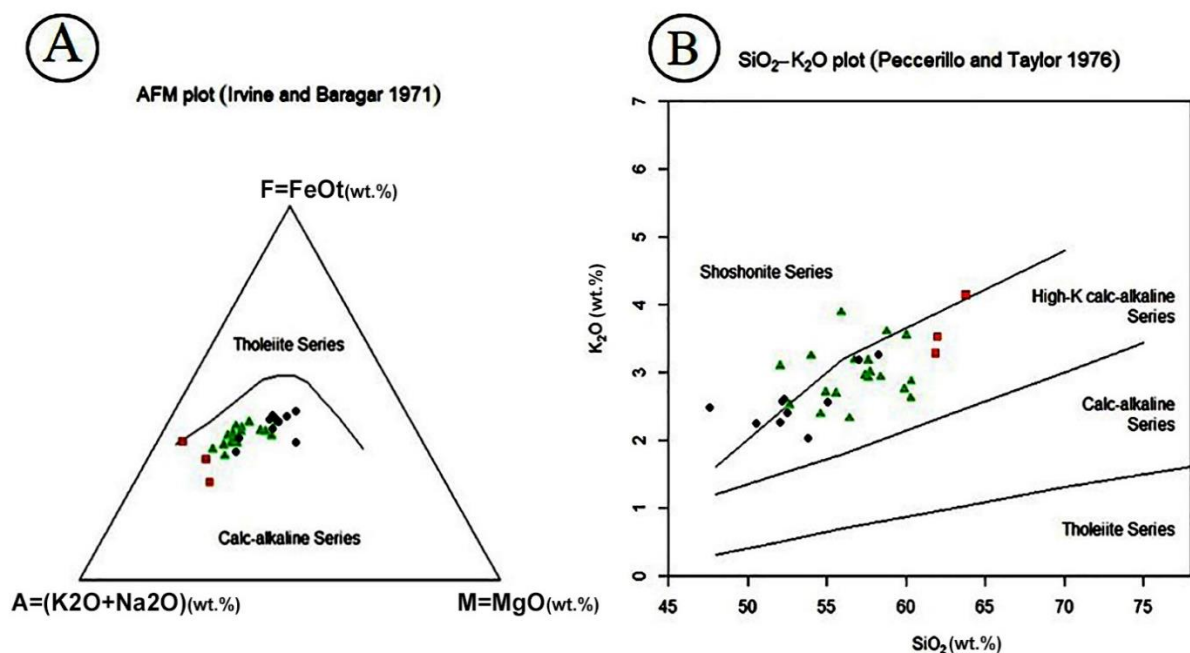
### تعیین سری ماگمایی

برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های نیمه عمیق محدوده مورد بررسی، از نمودارهای ایروین و باراگار (Irvine and Baragar, 1971) (شکل ۹-۱) و پسریلو و تبلور (Peccherillo and Taylor, 1976) استفاده شده است (شکل ۹-۲). طبق این نمودار، همه نمونه‌ها در محدوده کالک‌آلکان، کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی قرار می‌گیرند.

### زمین‌شیمی عناصر اصلی و کمیاب

با استفاده از نمودارهای تغییرات عناصر نسبت به یکدیگر می‌توان روابط زمین‌شیمیایی و پترولوژیکی بین سنگ‌های مورد مطالعه را بررسی کرد. تغییرات مشاهده شده در این نمودارها از فرایندهایی مانند تبلور تفریقی، ذوب‌بخشی، اختلاط ماگمایی یا آرایش و





شکل ۹. A: نمایش نمونه‌های سنگی محدوده جنوب زاهدان بر روی نمودارهای ابروین و باراگار (Irvine and Baragar, 1971) و B: نمودار پسریلو و تیلور (Peccerillo and Taylor, 1976)  $K_2O$  (wt.%) در مقابل  $SiO_2$  (wt.%) (مربع قرمز رنگ: qmd؛ مثلث سبز رنگ: dmd؛ نقاط مشکی: dy)

**Fig. 9.** A: Display of south of Zahedan area rock samples on diagrams by Irvine and Baragar (Irvine and Baragar, 1971), and B: diagrams by Peccerillo and Taylor (Peccerillo and Taylor, 1976)  $K_2O$  (wt.%) vs.  $SiO_2$  (wt.%) (Red square: qmd; green triangle: dmd; black dots: dy)

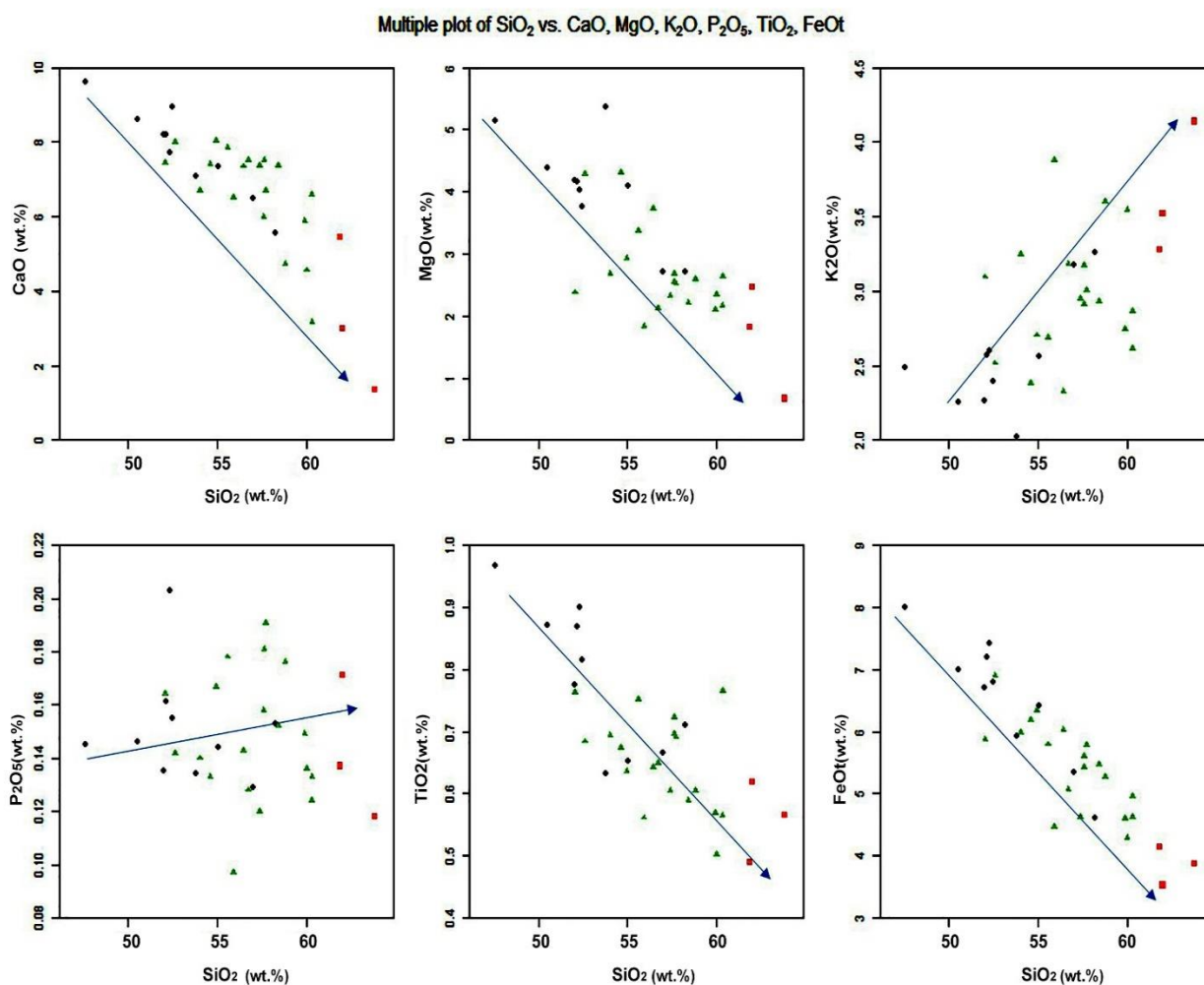
ژنتیکی آنها بسیار مناسب است. با بررسی تغییرات نمودارهای عناصر کمیاب (بهنجار شده به گوشته اولیه) (شکل ۱۲-A) و نادر خاکی (شکل ۱۲-B) واحدهای نیمه عمیق محدوده مورد بررسی که نسبت به کندریت بهنجار شده است، مشخص شد که الگوی پراکندگی این عناصر در نمونه‌های این منطقه نزدیک به هم بوده و این امر نشان‌دهنده منشأ واحد و نقش تبلور تفریقی در تشکیل سنگ‌های مورد بررسی است.

همچنین بر اساس نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی مشخص شد که این نمونه‌ها از عناصر LREE نسبت به HREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند که این موضوع از ویژگی‌های بارز سنگ‌های کالک‌آلکان مناطق فرورانش حاشیه قاره است. وجود آنومالی‌های منفی عنصر Nb و همچنین کمبود دیگر عناصر

با توجه به نمودارهای A/NK در مقابل A/CNK (Shand, 1943) (شکل ۱۱-A) و نمودار  $Na_2O$  (wt.%) در مقابل  $K_2O$  (wt.%) (Chappell and White, 2001)، واحدهای نیمه عمیق منطقه اکتشافی جنوب زاهدان، اغلب در محدوده متاآلومین تا کمی پراآلومین و نوع I قرار می‌گیرند (شکل ۱۱-B). این امر با شواهد زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری، نظیر حضور گسترده هورنبلند، اسفن، آپاتیت که بیانگر شرایط اکسیدی و فوگاسیته بالای اکسیژن برای این سنگ‌ها در زمان تشکیل است، گویای منشأ ماگمایی نوع I برای سنگ‌های منطقه است (Clarke, 1992; Chappell and White, 2001).

نمودارهای عنکبوتی برای بررسی میزان تغییر و تحولات ماگماهای مولد نسبت به ماگماهای اولیه و تعیین منشأ و همبستگی‌های

HFSE از دیگر ویژگی‌های سنگ‌های مرتبط با مناطق فرورانش است (Pearce et al., 1984). الگوی میله‌ای و نوک تیز نمودارهای عنکبوتی خود نیز از ویژگی‌های مهم ماگماهای مرتبط با فرورانش است (Wilson, 1989).



شکل ۱۰. نمودارهای تغییرات درصد اکسید برخی از عناصر اصلی در مقابل SiO<sub>2</sub> برای نمونه‌های سنگی محدوده جنوب زاهدان (Harker, 1909) (مربع قرمز رنگ: and; مثلث سبز رنگ: dmd; نقاط مشکی: dy)

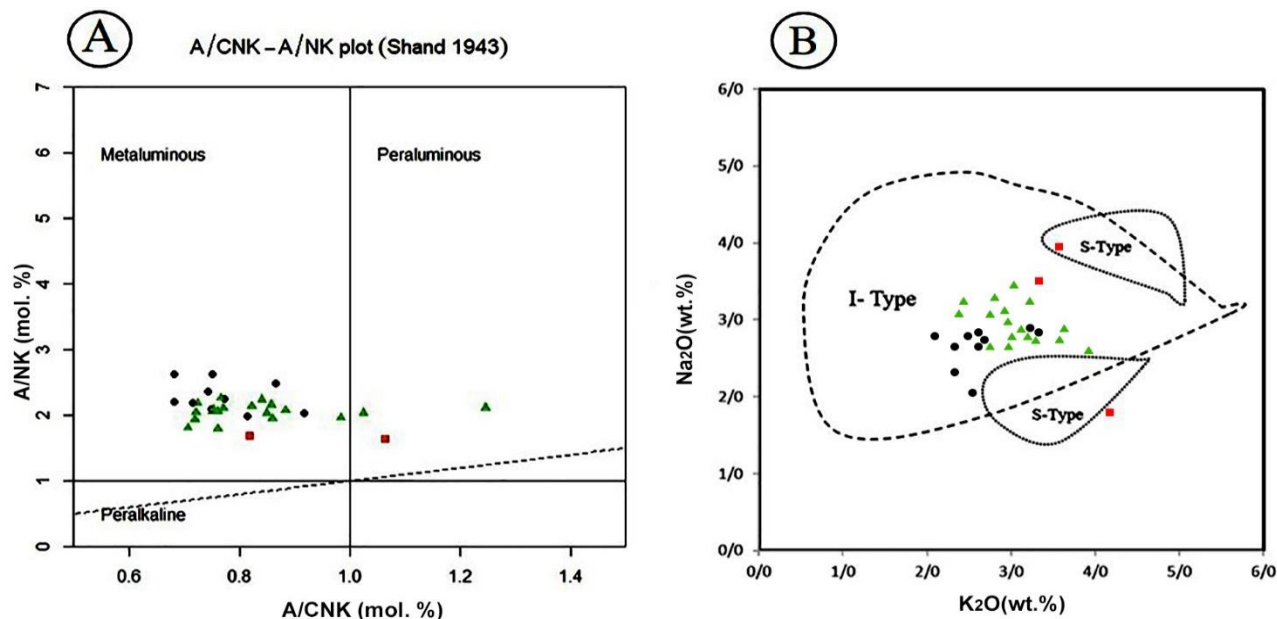
**Fig. 10.** Diagrams of changes in the percentage of oxide of some major elements against SiO<sub>2</sub> for rock samples in the south of Zahedan area (Harker, 1909) (Red square: and; green triangle: dmd; black dots: dy)

(al., 1984) و نمودار Nb/Yb در مقابل Th/Yb (شکل ۱۳-C)

پیرس و همکاران (Pearce et al., 2008) استفاده شد که بر این اساس واحدهای نیمه عمیق منطقه مورد بررسی همگی در محدوده گرانیت‌های کمان آتشفشانی<sup>۲</sup> قرار می‌گیرند.

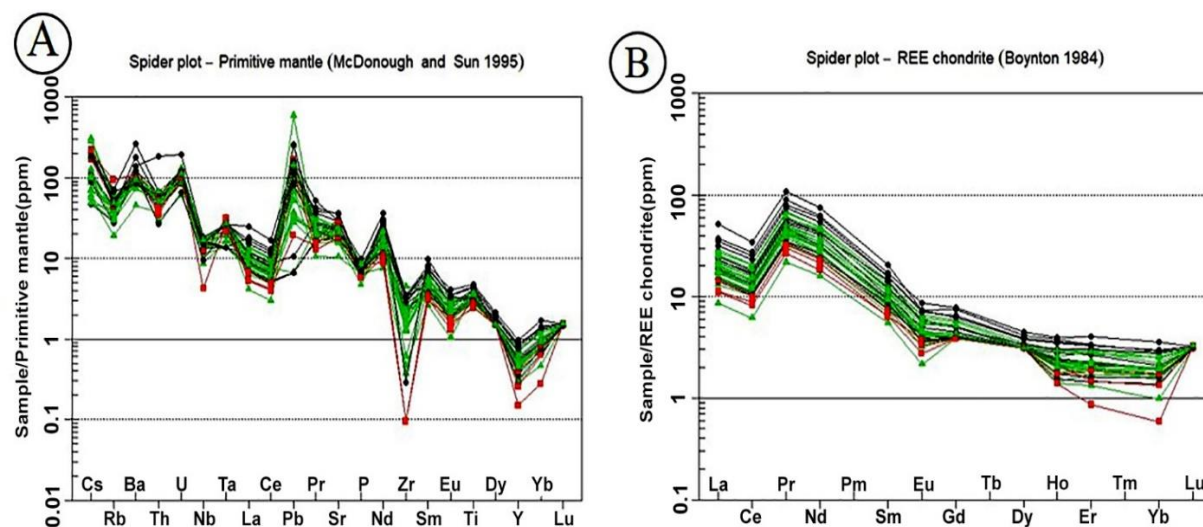
### محیط تکتونوماگمایی

برای تعیین محیط زمین‌ساختی واحدهای نیمه عمیق محدوده مورد بررسی از نمودارهای عناصر کمیاب شامل نمودارهای Nb-Y و (شکل ۱۳-A و B) پیرس و همکاران (Pearce et



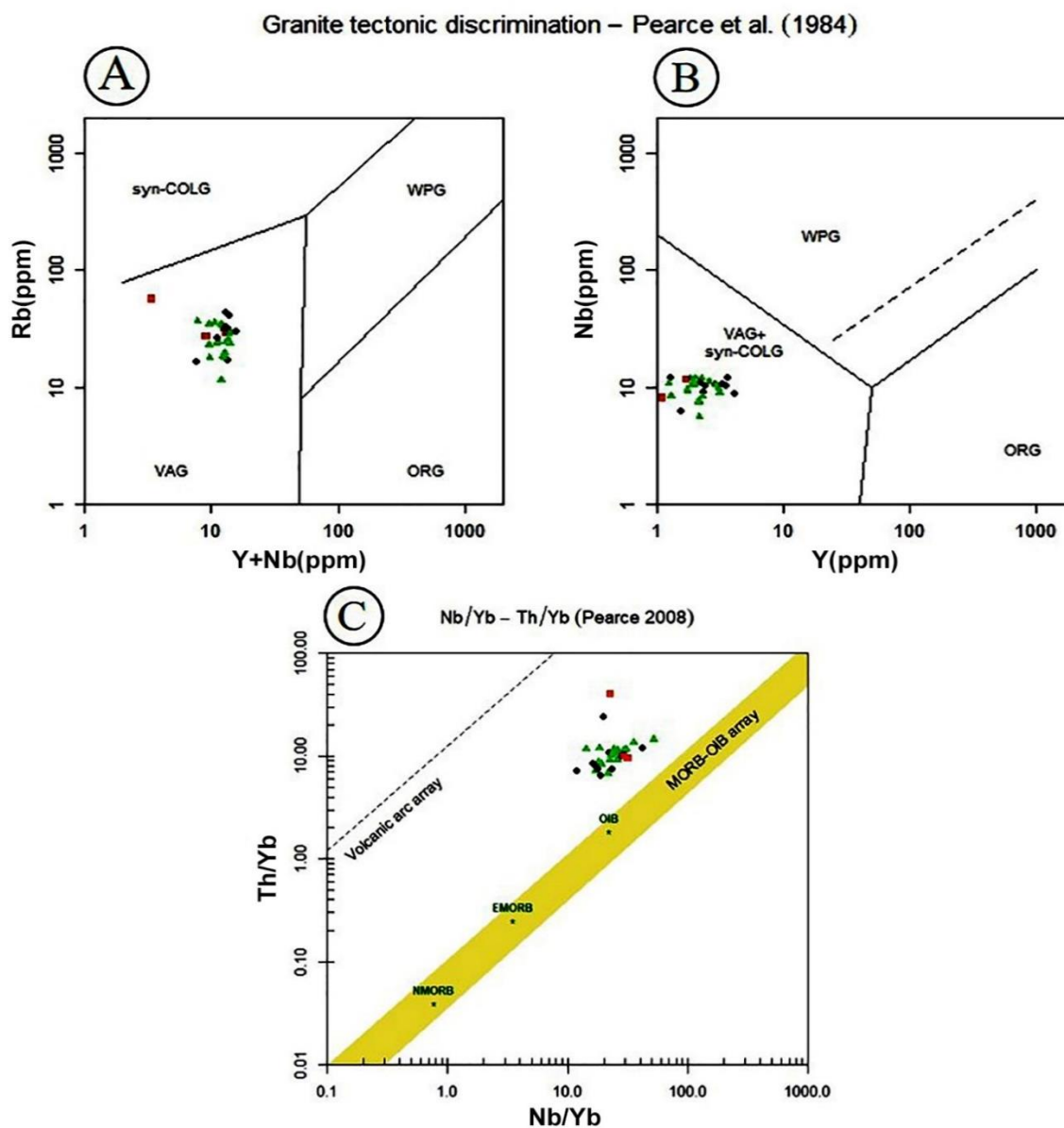
شکل ۱۱. A: نمودارهای A/NK در مقابل A/CNK (Shand, 1943) و B: نمودار Na<sub>2</sub>O (wt.%) در مقابل K<sub>2</sub>O (wt.%) (Chappell and White, 2001)، برای نمونه‌های سنگی محدوده جنوب زاهدان (مربع قرمز رنگ: qmd؛ مثلث سبز رنگ: dmd؛ نقاط مشکی: dy)

Fig. 11. A: A / NK vs. A / CNK diagrams (Shand, 1943), and B: Na<sub>2</sub>O vs. K<sub>2</sub>O diagrams (Chappell and White, 2001), for south of Zahedan area rock samples (red square: qmd; green triangle: dmd; dots Black: dy)



شکل ۱۲. A: نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب نرمالیز شده به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) و B: نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی (Boynton, 1984)، بهنجار شده به کندریت، رسم شده برای نمونه‌های سنگی محدوده جنوب زاهدان (مربع قرمز رنگ: qmd؛ مثلث سبز رنگ: dmd؛ نقاط مشکی: dy)

Fig. 12. A: Spider diagrams of trace elements (McDonough and Sun, 1995) normalized by primitive mantle, and B: Spider diagrams of rare earth elements (Boynton, 1984), normalized by chondrite, drawn for rock samples of the south of Zahedan area (red square: qmd; green triangle: dmd; Black dots: dy)



**شکل ۱۳.** A و B: نمودارهای (Nb-Y و Rb-Y + Nb) پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)؛ C: نمودار Nb/Yb در مقابل Th/Yb پیرس و همکاران (Pearce et al., 2008)، برای نمونه‌های محدوده جنوب زاهدان (مربع قرمز رنگ: qmd؛ مثلث سبز رنگ: dmd؛ نقاط مشکی: dy).  
**Fig. 13.** A and B: Diagrams (Nb-Y and Rb-Y + Nb) by pearce et al (Pearce et al., 1984)؛ C: Diagram of Nb / Yb versus Th / Yb by pearce et al (Pearce et al., 2008, for south of Zahedan area samples (Red square: qmd; green triangle: dmd; black dots: dy)

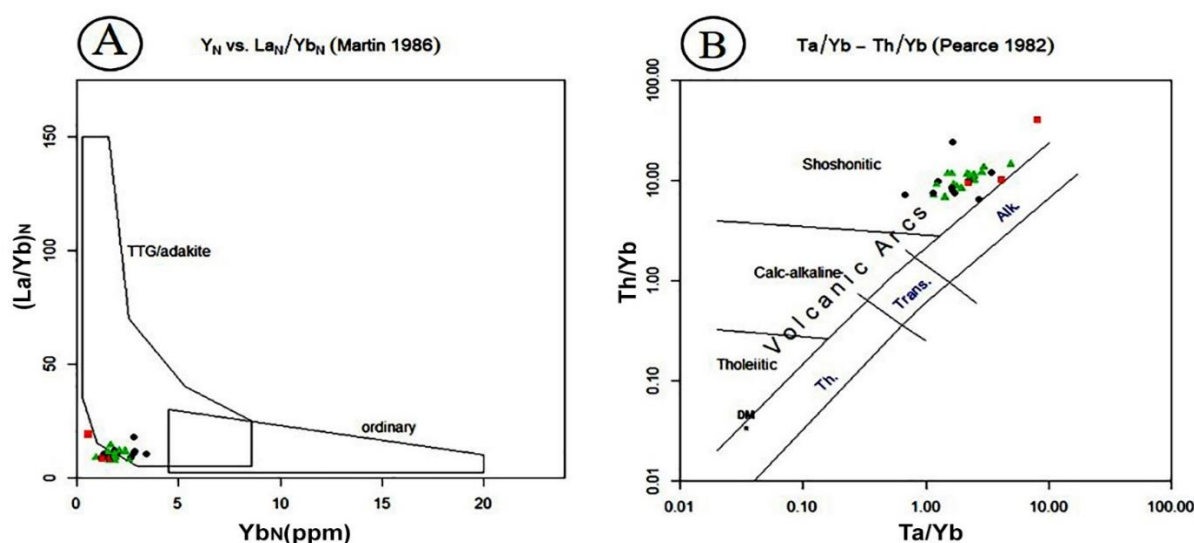
همچنین مقادیر بالای Sr ( $\geq 400$  ppm)، مقادیر پایین Y ( $\geq 5$  ppm)، مقادیر کم Yb ( $\geq 1$  ppm)، همراه با نسبت بالای St/Y و نسبت بالای La/Yb نسبت  $K_2O/Na_2O$  و مقدار  $SiO_2$

نمونه‌های برداشت شده از واحدهای نیمه عمیق محدوده اکتشافی جنوب زاهدان بر اساس نمودار مارتین (Martin, 1986) در محدوده ماگماتیسزم آداکتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۴- A).



آداکیتی است. نمونه‌های مورد بررسی بر اساس نمودار پیرس (Pearce, 1982)، همگی در رده سنگ‌های شوشونیتی و کالک‌آلکانل پتاسیم بالا، مربوط به محیط‌های فرورانش قرار می‌گیرند (شکل ۱۴-B).

نیز که از دیگر معیارهای شیمیایی تعریف شده برای ماگماتیسیم آداکیتی است (Richards and Kerrich, 2007)، در واحدهای نیمه عمیق منطقه دیده می‌شود. شیب منفی زیاد و نسبت زیاد LREE/HREE نیز که در نمونه‌های مورد بررسی قابل تشخیص است، یکی دیگر از ویژگی‌های اصلی مذاب‌های



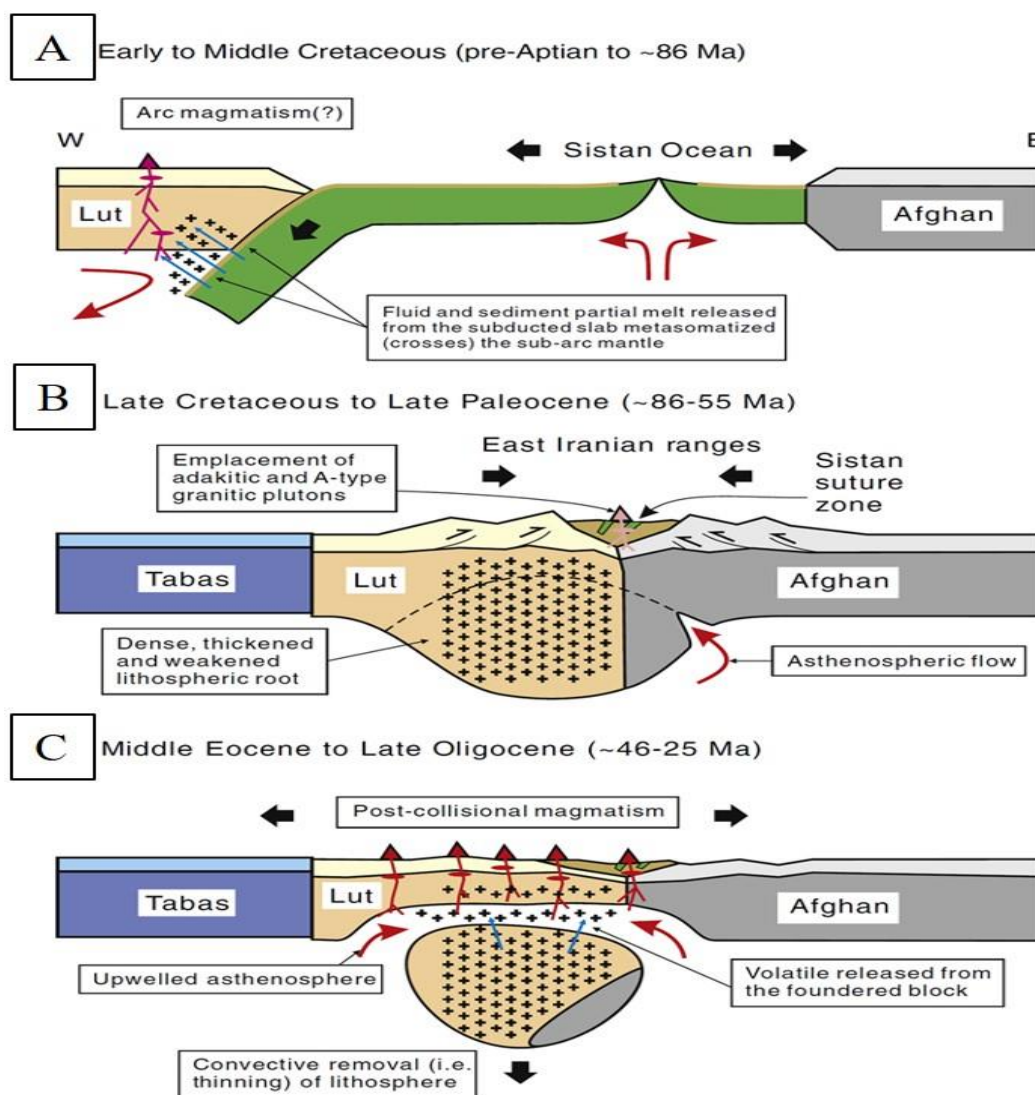
شکل ۱۴. A: نمایش نمونه‌های سنگی واحدهای نیمه عمیق محدوده جنوب زاهدان بر روی نمودار مارتین (Martin, 1986) و B: نمایش نمونه‌های واحدهای سنگی محدوده جنوب زاهدان بر روی نمودار محیط تکتونوماگمایی پیرس (Pearce, 1982) (مربع قرمز رنگ: qmd؛ مثلث سبز رنگ: dmd؛ نقاط مشکی: dy)

**Fig. 14.** A: Showing rock samples of subvolcanic units in the south of Zahedan area on the Martin diagram (Martin, 1986), and B: Showing samples of rock units in the south of Zahedan on the Pearce tectonomagmatic environment diagram (Pearce, 1982) (Red square: qmd; green triangle: dmd; black dots: dy)

لوت چنین بیان می‌دارد که در ادامه فشردگی‌های ناشی از رخداد کرتاسه پایانی (شکل ۱۵-B)، فازهای کششی سراسری موجب ماگمازایی گسترده ناشی از آب‌گیری گوشته در رژیم بعد از برخورد شده است و فوران روانه‌های آتشفشانی و ردیف‌های آذرآواری و در ادامه جای‌گیری توده‌های نفوذی حدواسط-اسیدی اتفاق افتاده است (Pang et al., 2014). این پژوهشگران سن فعالیت ماگماتیسیم شرق ایران را از ائوسن میانی (حدود ۴۶ میلیون سال پیش) تا الیگوسن پایانی (حدود ۲۵ میلیون سال پیش) تعیین کرده‌اند (شکل ۱۵-C).

### مدل ژئودینامیکی

به دنبال همه‌نظریایی که در مورد عدم فرورانش بین بلوک لوت و افغان طی بسته‌شدن اقیانوس سیستان وجود دارد، پژوهشگران زیادی بر روی فرورانش بین بلوک لوت و بلوک افغان تأکید کرده‌اند (شکل ۱۵-A)؛ به طوری که مسئله جهت فرورانش پوسته اقیانوسی شرق ایران به سمت شرق و به زیر بلوک افغان در مقابل جهت فرورانش به غرب و به زیر بلوک لوت یکی از ابهام‌های حل‌نشده زمین‌شناسی ایران بوده است. از جمله آخرین توجیه‌های معتبر ارائه‌شده، در مورد ماگماتیسیم گسترده سنوزوئیک بلوک



شکل ۱۵. مدل ژئودینامیکی تکامل ماگماتیسم پالئوژن بلوک لوت با فرورانش شرق به غرب (Pang et al., 2014)، A: اوایل تا اواسط کرتاسه: بازشدگی اقیانوس سیستان و در ادامه فرورانش به سمت غرب و به زیر بلوک لوت، B: کرتاسه پایانی تا پالئوسن پایانی: برخورد بلوک لوت و افغان، تشکیل رشته کوه‌های شرق ایران و ضخیم‌شدگی پوسته. این پدیده موجب جای‌گیری پلوتون‌های آداکیتی به سن ۸۶ میلیون سال در زمین‌درز سیستان و فوران ایگنیمبریت‌های پالئوسن در شمال غربی بلوک لوت شده است (Zarrinkoub, et al., 2012) و C: ائوسن میانی تا الیگوسن پایانی: برداشت فشار پوسته بالایی از روی ریشه پوسته قاره‌ای ضخیم‌شده همراه با فرونشست رشته کوه‌های شرق ایران که عامل صعود آستونسفر و تشکیل مذاب‌های با منشأ پوسته‌ای شده است.

**Fig. 15.** Geodynamic model of the evolution of Lute block Paleogene magmatism with east-west subduction (Pang et al., 2014); A: Early to mid Cretaceous; The opening of the Sistan Ocean and its subsequent subduction to the west and below the Lut block, B: Late Cretaceous to Late Paleocene: Collision of Lut and Afghan blocks, formation of mountains in eastern Iran and thickening of the crust. This phenomenon has led to the placement of 86-million-year-old adakitic plutons in the Sistan Valley and the eruption of Paleocene ignimbrites in the northwest of the Lut block (Zarrinkoub, et al., 2012), and C: Middle Eocene to Late Oligocene: Absorption of upper crustal pressure from the roots of thickened continental crusts along with subsidence of the mountains of eastern Iran, which has caused the ascent of the asthenosphere and the formation of melts of crustal origin

## نتیجه‌گیری

سنگ‌های نیمه عمیق منطقه به شکل استوک و گنبد در واحد فلیشی نفوذ کرده و خود در مراحل بعدی توسط دایک‌های حدواسط با روند شمال‌شرق - جنوب‌غرب قطع شده‌اند. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، این سنگ‌ها دارای بافت پورفیری و ترکیب سنگ‌شناسی دیوریت - مونزو دیوریت تا کوارتز دیوریت - کوارتز مونزو دیوریت هستند.

بر اساس نمودارهای نام‌گذاری زمین‌شیمیایی نیز نمونه‌های برداشت‌شده از واحدهای نیمه عمیق منطقه مورد بررسی در محدوده کوارتز مونزو دیوریت - دیوریت تا مونزونیت - دیوریت قرار می‌گیرند و نمونه‌های دایک‌های آندزیت پورفیری در محدوده گابرو دیوریت تا دیوریت قرار می‌گیرند.

تمامی این نمونه‌ها در نمودارهای سری ماگمایی ویژگی‌های کالک‌آلکان، کالک‌آلکان پتاسیم بالا تا شوشونیتی را نشان می‌دهند. این واحدهای نیمه عمیق، اغلب در محدوده متآلومین تا کمی پرآلومین و نوع I قرار می‌گیرند. بر اساس نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی مشخص شد که این نمونه‌ها از عناصر LREE نسبت به HREE غنی‌شدگی نشان می‌دهند که این موضوع از

ویژگی‌های بارز سنگ‌های کالک‌آلکان مناطق فرورانش حاشیه قاره است.

نمونه‌های برداشت‌شده از واحدهای نیمه عمیق محدوده اکتشافی جنوب زاهدان، در محدوده ماگماتیسیم آداکیتی قرار می‌گیرند. مقادیر بالای Sr ( $\geq 400$  ppm)، مقادیر پایین Y ( $\geq 5$  ppm)، مقادیر کم Yb ( $\geq 1$  ppm)، همراه با نسبت بالای Sr/Y و نسبت بالای La/Yb نیز که از دیگر معیارهای شیمیایی تعریف‌شده برای ماگماتیسیم آداکیتی است، در واحدهای نیمه عمیق منطقه دیده می‌شود.

## قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران<sup>۳</sup>، طرح توانمندسازی بخش اکتشاف، انجام شده است. بدین وسیله از زحمات مدیران این مجموعه قدردانی می‌شود.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

1. MPRC
2. VAG: volcanic arc granites
3. IMIDRO

## References

- Baker, M.C.W. and Griffiths, S.K., 1976. Geological map of Zahedan, scale 1:100.000. Geological Survey of Iran.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: P. Henderson (Editor), Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Chappell, B.W. and White, A.J., 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489–499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Clarke, D.B., 1992. Granitoid rocks. Chapman and Hall, London, 283 pp.
- De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. and Marchal, M., 1980. A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using R1-R2 Diagrams and Major Element Analyses-Its Relationships with Current Nomenclature. *Chemical Geology*, 29(1–4): 183–210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
- Harker, A., 1909. The natural history of igneous rocks. Methuen, London, 344 pp.
- Hosseini, M.R., 2002. Petrology and geochemistry of granitoids southwest of Zahedan. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran, 215 pp.
- Irvine, T.N.J. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Keshtgar, S., 2003. Petrogenesis and tectonic setting of granitoid and related dike in Lakhshak Area, NW Zahedan. M.Sc. Thesis, Tehran University, Tehran, Iran, 217 pp.
- Martin, H., 1986. The adakitic magmas: modern analogues of Achaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0)
- McDonough, W. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4): 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Middlemost, E.A.K., 1985. Naming materials in the magma and 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)
- Moradi, R., 2012. Style and origin of antimony and gold mineralization in Shorchah, southeast of Zahedan. M.Sc. Thesis, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran, 165 pp.
- Naroui, S., 2017. Mineralogy, alteration and mineralization of lead and zinc in Chah-e-Sarbi area in the south of Zahedan. M.Sc. Thesis, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran, 172 pp.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Chiu, H.Y. and Li, X.H., 2014. On the magmatic record of the Makran arc, southeastern Iran: Insights from zircon U-Pb geochronology and bulk-rock geochemistry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(6): 2151–2169. <https://doi.org/10.1002/2014GC005262>
- Pearce, J.A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R.S., (Editor), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, USA, pp. 528–548. In book: *Andesites*: (pp. 252–548). Retrieved November 14, 2022 from <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/8625/>
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100(3): 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pearce, J.A., Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- 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(7): 63–81. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>
- Rezaei-Kahkhaei M., Kananian A., Esmaeily D. and Asiabanha A., 2010. Geochemistry of the Zargoli Granite: Implications for development of the Sistan Suture Zone, southeastern Iran, Island Arc. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(2): 198–216. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00704.x>

- Richards, J.P. and Kerrich, R., 2007. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogensis. *Economic Geology*, 102(4): 537–576.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Rollinson, H., 1993. *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*, Longman Group UK Ltd., London, United Kingdom, 352 pp.
- Sadeghian, M., Bouchez, J.L., Ne'de'lecb, A., Siqueirab, R. and Valizadeh, M.V., 2005. The granite pluton of Zahedan (SE Iran): a petrological and magnetic fabric study of a syntectonic sill emplaced in a transtensional setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25 (2): 301–327.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.03.001>
- Shand, S.J., 1943. Eruptive rocks: Their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite. *Nature*, 120: 872. <https://doi.org/10.1038/120872a0>
- Tahmasebi, Z., Ghasemifard, H., Ahmadi khalaji, A. and Izadikian, L., 2017. Geochemistry and tectonic setting of basic dykes in the Boroujerd area (Sanandaj- Sirjan Zone). *Petrological Journal*, 8(29): 153–170.  
<https://doi.org/10.22108/IJP.2017.21586>
- 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*. *Mineralogical Magazine*, 53 (372): 514–515.  
<https://doi.org/10.1180/minmag.1989.053.372.15>
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. and Lee, H.Y., 2012. Zircon U/Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 154: 392–405.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007>