

Original Research Paper

Geochemistry of rare earth elements of the Gano bauxite deposit, eastern Alborz zone, northern Iran

Maryam Khosravi^{1*}, Wenchao Yu², and Jintao Zhou²

¹Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

²School of Earth Sciences, China University of Geosciences-Wuhan, Wuhan, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 March 25

Accepted: 2023 May 03

Available online: 2023 September 23

Keywords:

Bauxite

Geochemistry

Rare earth elements

Precursor rock

Gano

Semnan

Eastern Alborz mountains

ABSTRACT

The Gano bauxite deposit is located 90 km northeast of Semnan city in the eastern Alborz Mountains, northern Iran. The bauxite ores occur as stratiform discrete lenses with a length of 6 km and thickness of 2–20 m along the contact between carbonates of the Elika Formation and shale, sandstone, siltstone, and coal of the Shemshak Formation. Mineralogical analyses revealed that the bauxite ores consist of diaspore, hematite, kaolinite, chlorite, anatase, illite, zunyite, goethite, quartz, and dolomite minerals. Fluctuations of the groundwater table level, acidic atmospheric waters, and an increase in pH of the weathering solutions close to carbonate bedrocks played an important role in the concentration of Fe-poor ores in the upper parts and Fe-rich ores in the lower parts of the studied profile. An increase in oxidation, the possible presence of secondary phosphate minerals, fluctuations of the groundwater table level, and the role of carbonate bedrock as an active buffer played an important role in the extent of Ce anomaly in the ores (0.79–12.25). The pH variations of weathering solutions, fluctuations of the groundwater table level, the role of carbonate bedrock as a geochemical barrier, and simultaneous precipitation of Fe-bearing minerals and preferential scavenging of LREE_(La-Eu) by hematite played an important role in the distribution and fractionation of rare earth elements in the bauxite ores. According to geochemical considerations (Eu/Eu* vs. TiO₂/Al₂O₃ and Sm/Nd bivariate diagrams), the Gano bauxite deposit probably derived from the weathering of intermediate igneous rocks.

1. Introduction

Bauxite as residual products is derived from weathering of parent rocks rich in aluminosilicate under tropical to subtropical climatic conditions (Bárdossy, 1982). In recent years, several studies have been carried out on geological features, parental affinity, mineralogy and petrography, genetic characteristics and weathering mechanisms, and mineralogical and geochemical controls the distribution of elements, especially rare earth elements, of the Iranian bauxite deposits

(among others: Esmaeily et al., 2010; Zarasvandi et al., 2010, 2012; Calagari et al., 2015; Ahmadnejad et al., 2017; Salamab-Ellahi et al., 2019; Kiaeshkevarian et al., 2020; Abedini et al., 2021, 2022; Ahmadnejad and Mongelli, 2022). However, no comprehensive studies have not been carried out on the Gano bauxite deposit, 90 km northeast of Semnan city in the eastern Alborz Mountains. The main goals of this study were

* Corresponding author: Maryam Khosravi; E-mail: maryamkhosravi@iut.ac.ir

Citation:

Khosravi, M., Yu, W., and Zhou, J., 2023. Geochemistry of rare earth elements of the Gano bauxite deposit, eastern Alborz zone, northern Iran. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 183-200. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.390681.2075>

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2023 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2023.390681.2075

 doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.8.9



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

to 1) clarify factors controlling mobilization, distribution, and concentration of REE along the selected profile, 2) determine the role of carbonate bedrocks in the development of the deposit, and 3) determine parental affinity of the deposit.

2. Research methodology

Major oxide and rare earth element contents of 20 samples from the Gano bauxite deposit were measured at the ALS Chemex Laboratory (Guangzhou, China) by Shimadzu 1800× X-ray fluorescence (XRF) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), respectively. Mineralogical compositions of 20 samples from the Gano bauxite deposit were determined by X'Pert PRO DY2198 diffractometer at the Geological and Environmental Institute of CUG (Wuhan) under the following conditions: an accelerating voltage of 40 kV, 40 mA-beam current with Ni-filtered Cu-K α radiation, 3° to 45° 2 θ at a scan rate of 4° per minute, and a step size of 0.02° 2 θ . Results of geochemical analyses of major oxides and REE of the Gano bauxite ores, eastern Alborz Mountains are presented in Table 1.

3. Geological setting of the deposit

The Gano bauxite deposit is located 90 km northeast of Semnan city in the eastern Alborz Mountains, northern Iran (Fig. 1). The bauxite ores occur as stratiform discrete lenses along the contact between carbonates of the Elika Formation (middle-late Triassic) and shale, sandstone, siltstone, and coal of the Shemshak Formation (late Triassic-early Jurassic) (Fig. 2). They have an overall NE-SW trend, a length of 6 km, and an overall thickness of 2–20 m. The major Cambrian rock units in the Gano area are sandstone of the Lalun Formation and sandstone, dolomite, and limestone of the Mila Formation (Fig. 2). These rock units are overlain by calcareous dolomite, dolomite, and sandstone of the Jeyrud Formation. The Mesozoic section in the Gano area is dominated by a thick sequence of sedimentary rocks. They include Triassic carbonates of the Elika Formation, late Triassic-early Jurassic shale, sandstone, siltstone, and coal of the Shemshak Formation, and carbonates of the Dalichai and Lar Formations. The youngest rock units are Neogene marl and marly limestone and recent alluvium and gravel fans. According to field observations and physical features, such as color and texture, within the studied profile, from base to top the profile, the ores are: (1) red to brownish red bauxite ores with fine-grained and massive texture, and (2) pea-colored bauxite ores with spheroidal shapes and banding and rhythmic texture (Fig. 3a).

4. Results and discussion

4.1. Mineralogy

Results of semi-quantitative mineralogical composition of 20 bauxite samples from the Gano deposit are presented in Table 2 and variations of mineralogy along the studied profile are shown in Fig. 3b. The Gano bauxite samples consist of a mineral assemblage of diasporite and hematite, with lesser amounts of anatase, illite, kaolinite, chlorite, goethite, quartz, zunyite, and dolomite (Figs. 3b and 4). In general, there is an increasing diasporite abundance from the lower parts to the upper parts of the studied profile, which is in contrast with hematite abundance along the profile (Fig. 3b). The inverse relationship between

diasporite and hematite abundances in the Gano bauxite ores gives the fact that hematite forms during wetter conditions than those promoting the accumulation of Al-oxy-hydroxides (Mongelli et al., 2014), related to climatic conditions. Moreover, the inverse relationship between diasporite abundance and hematite abundance along the profile indicates that Fe leaching played an important role in the development and evolution of the bauxite Gano deposit. Hematite is the main Fe oxide mineral in all the bauxite ores, whereas anatase occurs as a minor mineral phase in the studied bauxite ores. Hematite is generated as a result of the decomposition of primary Fe-bearing constituents of parent rock, and then concentrated under suitable Eh-pH conditions, and/or of the dehydration of goethite under tropical climates (Bárdossy and Aleeva, 1990). The increasing-decreasing alternating trends of hematite abundance along the studied profile (Fig. 3b) are related to climate changes and fluctuations of the groundwater table level during the development and evolution of the Gano bauxite deposit. The presence of hematite in bauxite deposits indicates climate changes and fluctuations of the groundwater table level during the development and evolution of the deposit (Solar and Lasaga, 2000). The lack of high amounts of silicate minerals in the studied bauxite ores (Fig. 3b) indicates that the bauxite ores are mature, and have undergone a good drainage during the evolution and formation of bauxitization. Plot of the Gano bauxite ores in the clays, Fe minerals, and Al + Ti minerals ternary diagram of Bárdossy (1982) and clays, Fe minerals, and Al minerals ternary diagram of Bárdossy and Aleeva (1990) is shown in Fig. 5. The presence of low Fe mineral types (bauxite, clayey bauxite, and low-iron bauxite) in the upper parts of the studied profile indicates the role of acidic atmospheric waters. In contrast, the presence of bauxitic iron ore, bauxitic clayey iron ore, iron-rich bauxite or their equivalents, aluminous ferrite, ferritic laterite, bauxitic laterite, and ferriferous bauxite in the lower parts of the studied profile indicates an increase in pH of the weathering solutions close to carbonate bedrocks.

4.2. Ce anomaly in the bauxite ores

In this study, Ce anomaly is calculated by the following formula: $Ce/Ce^* = (2 \times Ce_N) / (La_N + Pr_N)$ (Wang et al., 2010). The subscript "N" refers to normalized values to the chondrite of Sun and McDonough (1989). The Ce anomaly in the Gano bauxite ores is in the range of 0.79 to 12.25. A succession of varying periods of weathering intensity and redox conditions of the soil environment led to fluctuations of Ce anomaly, corresponding to climate changes (Braun et al., 1998). Strong positive Ce anomalies of the Gano bauxite ores indicate highly oxidizing conditions of the formation environment, the oxidation of Ce³⁺ into the less mobile Ce⁴⁺, and, probably, fluctuations of the groundwater table level (Meyer et al., 2002; Ma et al., 2007). Moreover, positive Ce anomalies of the Gano bauxite ores can be attributed to an increase in pH of the weathering environment and the role of carbonate bedrocks as a geochemical barrier. Variation trend of Ce/Ce*, Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅, and TiO₂ along the studied profile is shown in Fig. 6. Sample G6 is characterized by both the largest positive Ce anomaly (Ce/Ce* = 12.25) and the highest P₂O₅ contents, probably indicating the role of secondary phosphate minerals in strong positive Ce

anomaly in the bauxite ores. On the other hand, no relationship of anatase, hematite, goethite, kaolinite, illite, and chlorite abundance distribution (Fig. 3b) and Ce anomaly along the profile (Fig. 6a) indicates that clay minerals, Fe-oxy-hydroxides, and Ti oxides did not play an important role in concentration of Ce and positive Ce anomaly in the studied samples. As whole, strong positive Ce anomalies of the studied samples probably indicate the possible presence of Ce fixation minerals, such as secondary phosphate minerals, and an increase in oxidation during the evolution of the bauxite ores, or even fluctuations of the groundwater table level and the role of carbonate bedrocks as a geochemical barrier.

4.3. Factors controlling distribution of REE

Patterns and contents of $LREE_{(La-Eu)}$, $HREE_{(Gd-Lu)}$, $REE_{(La-Lu)}$, $(La/Yb)_N$, $(LREE/HREE)_N$, and La/Y in the Gano bauxite ores are given in Fig. 7 and Table 3. The $LREE_{(La-Eu)}$, $HREE_{(Gd-Lu)}$, and $REE_{(La-Lu)}$ in the studied samples are in the range of 10.64–673.45 ppm, 9.67–93.67 ppm, and 23.44–767.12 ppm, respectively. The $(La/Yb)_N$, $(LREE/HREE)_N$, and La/Y ratios in the Gano bauxite ores are in the range of 0.48–13.72, 0.29–13.72, and 0.05–2.19, respectively. Values of the mentioned parameters along the studied profile unevenly show upward or downward trends (Fig. 7). Such erratic trends of REE elemental ratios in bauxite deposits are generally attributed to fluctuations of the groundwater table during the development and generation of the bauxite ores, causing leaching and contraction of REE along the studied bauxite profile (Abedini et al., 2018). This point can be confirmed by a positive correlation between La/Y ratio and $(La/Yb)_N$ ($r = 0.92$) in the Gano bauxite ores (Fig. 8), which is indicative of pH fluctuations of soil solution in the distribution and fractionation of REE in the Gano bauxite ores. The Fe-bearing bauxite ores in the lower parts of the profile have higher $(La/Yb)_N$, $(LREE/HREE)_N$, and La/Y ratios than low-Fe bauxite ores in the upper parts of the profile, suggesting a more fractionation of $LREE_{(La-Eu)}$ from $HREE_{(Gd-Lu)}$ close to carbonate bedrocks of the Elika Formation. Therefore, it suggests that carbonate bedrock as a geochemical barrier, distribution of Fe, and concentration of Fe-bearing minerals, such as hematite, played an important role in distribution and fractionation of $LREE_{(La-Eu)}$ relative to $HREE_{(Gd-Lu)}$ in the lower parts of the profile from the Gano bauxite deposit. As a whole, enrichment and fractionation of $LREE_{(La-Eu)}$ relative to $HREE_{(Gd-Lu)}$ in the Gano bauxite ores is related to pH fluctuations of environment, fluctuations of the groundwater table level, the role of carbonate bedrocks as a geochemical barrier, deposition of Fe-bearing minerals, and preferential adsorption of $LREE_{(La-Eu)}$ by hematite.

4.4. Distribution pattern of REE in the bauxite ores

In the chondrite-normalized REE distribution diagram, the Gano bauxite ores are characterized by enrichment of $LREE_{(La-Eu)}$ compared to $HREE_{(Gd-Lu)}$, together with strong positive Ce anomalies and negative Eu anomalies (Fig. 9). Chondrite-normalized REE irregular patterns for the Gano bauxite ores can be attributed to differences in the stability of REE-bearing minerals, pH fluctuations of soil solution from weak acidic to alkaline conditions, and/or degree of

bauxitization (Beyala et al., 2009). Regular enrichment patterns of $LREE_{(La-Eu)}$ in the bauxite ores close to carbonate bedrocks of the Elika Formation represent the role of carbonate bedrock as a geochemical barrier in fractionation and distribution of REE in the basal parts of the weathered profile.

4.5. Parental affinity of the Gano bauxite deposit

On the Eu/Eu^* vs. TiO_2/Al_2O_3 bivariate diagram, the bauxite ores are far from basalt and granite rocks, and close to the average upper continental crust composition (Fig. 10a). On the Eu/Eu^* vs. Sm/Nd bivariate diagram, they are far from cratonic sandstone, but close to andesite rocks (Fig. 10b). As a result, it suggests that the Gano bauxite deposit derived from the weathering of intermediate igneous rocks. This assumption is consistent with the sporadic occurrence of intermediate–mafic igneous rocks as small intrusive masses and/or sills and dikes with different thicknesses at the base of siliciclastic sediments of the Shemshak Formation in different parts of the Alborz Mountains, including south Azadshahr, Talu, Tazareh, Astaneh, Kalateh, Fulad Mahaleh, Kamarbon, north Qazvin, and Sangrood (Shahabi, 2021). Moreover, a comparison of the studied bauxite ores and some bauxite deposits in the Alborz structural zone indicates this point that the Gano bauxite ores are similar to the Siahruddar bauxite ores (Fig. 10a and b).

5. Conclusions

The most important results of mineralogical and REE geochemical studies for the Gano bauxite deposit are the followings:

- 1- Based on X-ray diffraction (XRD) analysis, the Gano bauxite ores are composed of diasporite and hematite, along with accessory mineral phases of kaolinite, chlorite, anatase, illite, zunyite, goethite, quartz, and dolomite.
- 2- Fluctuations of the groundwater table level, acidic atmospheric waters, an increase in pH of the weathering solutions close to carbonate bedrocks, and consequently Fe leaching and its concentration as Fe minerals, such as hematite, played an important role in the formation of low Fe ores in the basal parts and Fe-rich ores in the upper parts of the profile.
- 3- Positive Ce anomalies of the bauxite ores (0.79–12.25) indicate an increase in oxidation during the development of the bauxite ores, the possible scavenging of Ce by secondary phosphate minerals, or even fluctuations of the groundwater table level, and buffering carbonate bedrocks.
- 4- Erratic variation of $(La/Yb)_N$, $(LREE/HREE)_N$, and La/Y ratios in the bauxite ores represents the role of fluctuations of the groundwater table and pH fluctuations of soil solution during the development and generation of the bauxite ores. The role of carbonate bedrocks as a geochemical barrier and simultaneous deposition of Fe-bearing minerals and preferential adsorption of $LREE_{(La-Eu)}$ by hematite played an important role in the distribution and fractionation of REE in the Gano bauxite ores.
- 5- Intermediate igneous rocks are the possible precursor rocks of the Gano bauxite ores, consistent with the sporadic occurrence of intermediate–mafic igneous rocks at the base of siliciclastic sediments of the Shemshak Formation in different parts of the Alborz Mountains.

زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی نهشته بوکسیتی گانو، زون البرز خاوری، شمال ایران

مریم خسروی^۱، ونچائو یو^۲ و جینائو ژو^۲

^۱دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲دانشکده علوم زمین، دانشگاه علوم زمین چین، ووهان، چین

چکیده

نهشته بوکسیتی گانو در ۹۰ کیلومتری شمال خاور سمنان در زون البرز خاوری، شمال ایران واقع شده است. کانسنگ‌های بوکسیتی به صورت عدسی‌های منفصل چینه‌سان با طول ۶ کیلومتر و سترایی از ۲ تا ۲۰ متر در طول مرز بین کربنات‌های سازند الیکا و شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و زغال‌سنگ سازند شمشک گسترش یافته است. تجزیه‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهند که کانسنگ‌های بوکسیتی حاوی کانی‌های دیاسپور، هماتیت، کائولینیت، کلریت، آاناتاز، اپلیت، زونیت، گوتیت، کوارتز و دولومیت هستند. نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی، آب‌های جوی فرورو با ماهیت اسیدی و افزایش pH محلول‌های هوازده‌کننده با نزدیک شدن به سنگ‌های بستر کربناتی نقش مهمی در تمرکز کانسنگ‌های فقیر از آهن در بخش‌های بالایی و کانسنگ‌های غنی از آهن در بخش‌های زیرین نیمرخ مورد مطالعه ایفا نموده‌اند. افزایش پتانسیل اکسیداسیون، حضور احتمالی کانی‌های فسفاتی ثانویه، نوسانات سطح سفره‌های آب‌های زیرزمینی و عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک بافر فعال نقش مهمی در تغییرات شدید بی‌هنجاری Ce (۱۲/۲۵-۰/۷۹) در کانسنگ‌ها داشته‌اند. تغییرات pH محلول‌های هوازده‌کننده، نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی، عملکرد سنگ بستر کربناتی به عنوان یک عامل زمین‌شیمیایی و ترسیب همزمان کانی‌های آهن‌دار و روبش ترجیحی $LREE_{(La-Eu)}$ توسط هماتیت نقش مهمی در توزیع و تحرک عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌های بوکسیتی داشته‌اند. با توجه به بررسی‌های زمین‌شیمیایی (نمودارهای دو متغیره بی‌هنجاری Eu در مقابل نسبت‌های TiO_2/Al_2O_3 و Sm/Nd)، نهشته بوکسیتی گانو احتمالاً از هوازده‌گی سنگ‌های آذرین حدواسط به‌وجود آمده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

بوکسیت

زمین‌شیمی

عناصر نادر خاکی

سنگ مادر

گانو

سمنان

البرز خاوری

۱- پیش‌نویس

بوکسیت یک ماده معدنی رسوبی غنی از مواد آلئیک است که در نتیجه هوازده‌گی سنگ مادر غنی از آلومینوسیلیکات در شرایط اقلیمی حاره‌ای تا نیمه حاره‌ای با بارش متوسط سالانه ۱/۲ متر و دمای بیش از ۲۲ درجه سانتی‌گراد با توجه به ریخت‌شناسی و زهکشی مناسب، تشکیل می‌شود (Bárdossy, 1982). تاکنون مطالعات زیادی بر روی توزیع و رفتار عناصر نادر خاکی در نهشته‌های بوکسیتی در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است. بر اساس این پژوهش‌ها، توزیع و رفتار عناصر نادر خاکی در نهشته‌های بوکسیتی توسط عواملی همانند ترکیب شیمیایی سنگ مادر، شرایط فیزیکی‌شیمیایی محیط تشکیل، نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی، وجود لیگاند‌های آلی و معدنی در خاک، فعالیت‌های باکتریایی، گونه‌های کانیایی موجود در سنگ‌های بستر، پایداری کانی‌های اولیه و ثانویه حامل لانتانیدها، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی عناصر طی فرایند هوازده‌گی، درجه کمپلکس‌سازی با لیگاند‌های مختلف

و عملکرد فرایندهای دیاژنتیک و دیرزاد کنترل می‌شود (Braun et al., 1990, 1998; Wang et al., 2010; Mongelli et al., 2014; Radusinović et al., 2017). در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر روی مسائل زمین‌شناسی و منشأ کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری، ویژگی‌های ژئوتیکی و مکانیسم‌های هوازده‌گی و کنترل‌های کانیایی و زمین‌شیمیایی موثر بر توزیع عناصر (به ویژه عناصر نادر خاکی) بر روی کنسارهای بوکسیتی ایران صورت گرفته است (کنگرانی‌فراهانی و همکاران، ۱۳۹۲a، ۱۳۹۲b، ۱۳۹۳؛ زمانیان و همکاران، ۱۳۹۸؛ قاسمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Esmaily et al., 2010, 2012; Zarasvandi et al., 2010, 2012; Calagari et al., 2015; Ahmadnejad et al., 2017; Salamab-Ellahi et al., 2019; Kiaeshkevarian et al., 2020; Abedini et al., 2021, 2022). تا به حال چنین مطالعات جامعی بر روی نهشته بوکسیتی گانو در ۹۰ کیلومتری شمال خاور سمنان در پهنه البرز خاوری انجام

* نویسنده مسئول: مریم خسروی؛ E-mail: maryamkhosravi@iut.ac.ir

ماخذنگاری:

خسروی، م، یو، و. و ژو، ج، ۱۴۰۲، زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی نهشته بوکسیتی گانو، زون البرز خاوری، شمال ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳ (۳)، ۱۲۹، ۱۸۳-۲۰۰. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.390681.2075>



doi: 10.22071/gsj.2023.390681.2075



doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.8.9



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

فیلتر شده با نیکل، ولتاژ ۴۰ کیلو ولت، جریان ۴۰ میلی آمپر، سرعت اسکن ۴ درجه در هر دقیقه و بازه اسکن ۳ الی ۴۵ درجه در موسسه زمین‌شناسی و محیط زیست CUG ووهان چین مورد تجزیه قرار گرفتند. سپس هر ۲۰ کانسنگ بوکسیتی به روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) برای تعیین مقادیر عناصر اصلی و به روش طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) برای تعیین مقادیر عناصر نادر خاکی در آزمایشگاه ALS Chemex گوانگژو، چین مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. محدوده آشکارسازی برای اکسیدها ۰/۱ درصد وزنی و برای عناصر نادر خاکی بین ۰/۱ الی ۰/۱ ppm بوده است. مقادیر LOI نمونه‌های تجزیه شده توسط آزمایشگاه یادشده بر اساس کاهش وزن یک گرم نمونه پس از حرارت دادن در ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه محاسبه شده‌اند. نتایج تجزیه‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و نادر خاکی کانسنگ‌های بوکسیتی گانو در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

نشده است. هدف از این پژوهش، تعیین فاکتورهای کنترل‌کننده توزیع و تحرک عناصر نادر خاکی در نیمرخ بوکسیتی، نقش سنگ‌های بستر کربناته در تکوین و توسعه نهشته و در نهایت شناسایی سنگ مادر نهشته است.

۲- روش پژوهش

این کار پژوهشی در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده است. در بخش صحرایی، پیمایش‌هایی به منظور بررسی هندسه ماده معدنی و نحوه ارتباط کانسنگ‌های بوکسیتی با سنگ‌های بستر و پوشش صورت گرفت. سپس از یک نیمرخ با جهت نمونه‌برداری عمود بر افق‌های بوکسیتی، تعداد ۲۰ نمونه کانسنگ بوکسیتی برداشت شد. در بخش آزمایشگاهی، جهت تعیین فازهای کانیاپی نامشخص، تعداد ۲۰ نمونه کانسنگ بوکسیتی با استفاده از دیفرانکومتر X'Pert PRO DY2198 تحت شرایط تشعشع CuKα

جدول ۱- نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی XRF و ICP-MS کانسنگ‌های بوکسیتی در منطقه گانو. مقادیر اکسیدها و عناصر نادر خاکی به ترتیب بر حسب درصد وزنی (wt%) و گرم بر تن (ppm) هستند.

Table 1. Results of XRF and ICP-MS geochemical analysis of the bauxite ores in the Gano area. Contents of major oxides and rare earth elements are presented as weight percent (wt%) and gram per tonne (ppm), respectively.

Sample no.	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
SiO ₂ (wt%)	3.06	8.24	4.66	4.64	5.71	3.65	3.52	6.86	8.80	4.09
Al ₂ O ₃	24.60	25.62	33.58	34.13	33.29	48.52	47.63	49.50	47.86	57.18
TiO ₂	1.60	2.31	2.30	2.27	2.57	2.63	2.78	2.71	3.23	3.13
CaO	0.10	0.17	0.14	0.08	0.10	0.17	0.07	0.07	0.19	0.08
Fe ₂ O ₃	59.46	52.16	47.90	44.20	45.44	30.84	32.42	25.90	26.38	22.44
K ₂ O	0.40	0.04	0.68	0.46	0.57	0.42	0.55	0.86	1.24	0.56
MgO	0.13	0.76	0.25	0.20	0.22	0.16	0.17	0.15	0.27	0.11
MnO	0.25	0.12	0.25	0.14	0.31	0.11	0.17	0.06	0.18	0.09
Na ₂ O	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01
P ₂ O ₅	0.12	0.08	0.06	0.13	0.05	0.81	0.05	0.18	0.17	0.03
LOI	9.69	9.45	9.96	13.31	11.17	11.99	12.23	13.30	11.36	11.79
Sum	99.43	98.95	99.79	99.56	99.45	99.30	99.59	99.59	99.71	99.50
La (ppm)	23.3	27.6	27.5	17.4	39.1	7.5	23.4	13.6	42.7	2.1
Ce	187.0	257.0	220.0	171.5	177.0	199.5	147.0	144.0	345.0	20.8
Pr	3.78	9.05	4.87	2.79	6.61	2.05	4.33	3.76	8.40	0.32
Nd	11.8	36.6	14.6	10.6	21.0	7.6	12.9	15.9	28.6	1.2
Sm	2.47	6.75	2.90	3.53	3.94	2.28	2.59	4.63	5.72	0.60
Eu	0.60	1.55	0.73	0.88	0.93	0.50	0.66	0.90	1.27	0.29
Gd	2.57	6.19	3.21	3.74	4.30	2.10	3.31	3.68	5.57	1.94
Tb	0.41	1.09	0.61	0.62	0.83	0.33	0.63	0.56	1.01	0.38
Dy	2.49	6.25	3.88	3.86	5.60	2.42	4.15	3.72	6.04	2.78
Ho	0.50	1.08	0.78	0.76	1.16	0.56	0.86	0.78	1.21	0.66
Er	1.56	2.81	2.40	2.22	3.58	1.78	2.65	2.47	3.55	2.14
Tm	0.25	0.39	0.36	0.33	0.55	0.29	0.41	0.37	0.53	0.34
Yb	1.63	2.53	2.35	2.19	3.51	2.01	2.60	2.49	3.33	2.35
Lu	0.26	0.37	0.37	0.33	0.55	0.32	0.42	0.39	0.53	0.39
Y	15.1	25.0	21.9	25.4	33.7	16.6	24.6	24.3	37.3	20.0

Table 1. Continued

Sample no.	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20
SiO ₂ (wt%)	2.02	3.94	9.58	13.79	25.41	19.25	1.62	3.84	9.85	18.27
Al ₂ O ₃	59.20	56.58	47.41	49.60	46.48	50.20	64.26	64.00	64.03	57.88
TiO ₂	3.41	3.60	3.72	3.70	3.33	2.88	3.50	4.29	3.93	3.62
CaO	0.06	0.06	0.13	0.07	0.14	0.10	0.05	0.09	0.06	0.09
Fe ₂ O ₃	20.97	22.52	26.88	20.54	11.06	13.06	16.28	13.31	8.38	4.58
K ₂ O	0.30	0.65	0.10	0.99	0.78	1.59	0.22	0.62	1.81	1.36
MgO	0.10	0.14	0.20	0.19	0.28	0.14	0.10	0.14	0.15	0.29
MnO	0.07	0.08	0.05	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.02	0.01
Na ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.14	0.09	0.08	0.13	0.09	0.24	0.09	0.26	0.02	0.08
LOI	13.79	12.00	11.85	11.08	12.68	11.98	13.41	13.14	12.19	13.47
Sum	100.06	99.66	100.00	100.12	100.27	99.46	99.57	99.74	100.44	99.66
La (ppm)	35.6	2.5	26.8	156.5	113.0	4.1	61.6	28.9	1.2	9.1
Ce	264.0	58.2	174.0	269.0	264.0	80.7	176.5	201.0	7.6	63.2
Pr	7.71	0.56	5.74	43.60	19.70	1.12	15.10	5.10	0.22	2.00
Nd	26.2	2.3	21.2	165.0	64.8	4.7	46.5	19.4	0.9	7.3
Sm	4.95	1.71	4.35	32.30	11.75	1.47	6.62	6.96	0.49	1.95
Eu	1.01	0.69	1.09	7.05	2.53	0.41	1.33	1.76	0.23	0.56
Gd	4.38	3.97	4.72	24.90	9.63	1.93	5.34	7.02	1.76	3.11
Tb	0.76	0.69	0.84	4.17	1.70	0.37	0.91	1.29	0.41	0.58
Dy	4.68	4.22	5.57	25.70	11.25	2.84	5.48	8.48	3.33	4.08
Ho	0.97	0.87	1.13	5.04	2.35	0.67	1.08	1.71	0.80	0.90
Er	2.95	2.58	3.36	14.90	7.23	2.12	3.27	5.03	2.62	2.85
Tm	0.47	0.40	0.50	2.26	1.13	0.35	0.50	0.75	0.42	0.45
Yb	3.14	2.70	3.35	14.45	7.24	2.37	3.22	5.03	3.00	2.91
Lu	0.51	0.42	0.52	2.25	1.12	0.38	0.52	0.75	0.46	0.46
Y	28.7	27.8	32.6	103	51.6	20.3	34.5	50.9	23.3	26.1

۳- زمین‌شناسی نهشته

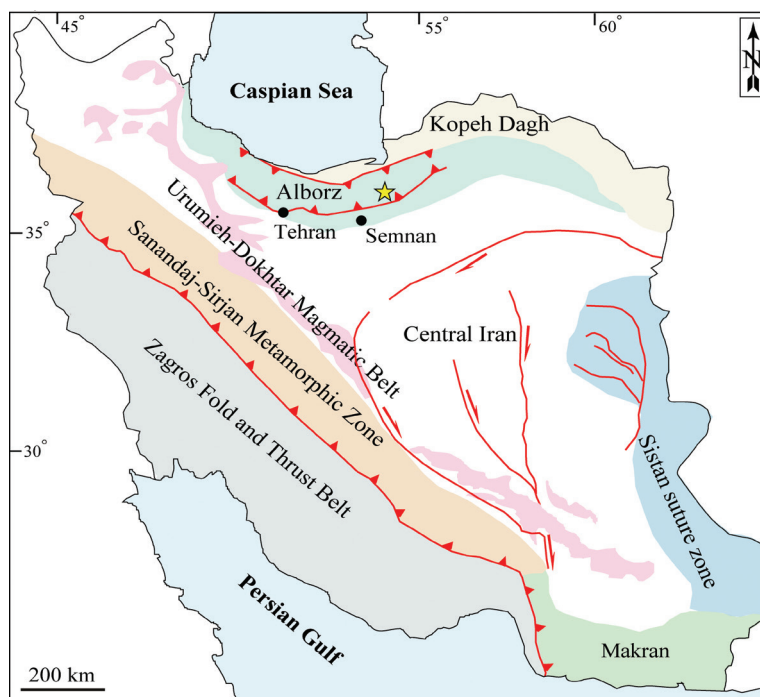
سازند دلیچای (ژوراسیک میانی)، آهک و آهک دولومیتی سازند لار (ژوراسیک پایانی)، مارن و آهک مارنی نوژن و رسوبات آبرفتی و مخروط افکنه‌های کواترنری است (Saidi and Akbarpour, 1992) (شکل ۲). سازند الیکا با آهک‌های نازک لایه دانه‌ریز آغاز و با دولومیت‌های آهکی و دولومیت‌هایی با لایه‌بندی خوب به رنگ‌های قهوه‌ای و زرد تداوم می‌یابد. افق‌های بوکسیتی در منطقه گانو با طولی بالغ بر ۶ کیلومتر و ستبرای متغیر از ۲ تا ۲۰ متر به رنگ‌های قهوه‌ای، نخودی، ارغوانی، خاکستری و گاهی سبز دیده می‌شوند. منطقه مورد مطالعه از یک منوکلین تشکیل شده که امتداد عمومی لایه‌ها در آن، شمال‌خاوری- جنوب‌باختری است. شیب لایه‌ها قائم بوده و در بسیاری از نقاط تا ۸۰ درجه به سمت شمال‌باختر برگشته می‌باشند (شرکت آلومینای ایران، ۱۳۸۴). با توجه به مشاهدات صحرایی و تغییر در ویژگی‌های فیزیکی مانند رنگ و بافت در یک نیم‌رخ انتخابی از لایه‌های بوکسیتی، کانسنگ‌ها به ترتیب از پایین به بالا شامل (۱) کانسنگ‌های بوکسیتی قرمز تا قرمز مایل به قهوه‌ای با بافت متراکم و دانه‌ریز و (۲) کانسنگ‌های بوکسیتی نخودی رنگ با اشکال اسفرویی و بافت نواری و ریمپیک هستند (شکل ۳-ا).

فازهای زمین‌ساختی پس از کامبرین پیشین در منطقه روی داده و جنبش‌های

وقفه رسوبگذاری طی تریاس تا ژوراسیک در ایران سبب توسعه و تشکیل افق‌های متعدد بوکسیتی در نواحی مختلف رشته‌کوه‌های البرز شده است. منطقه گانو به مختصات جغرافیایی ۴۴° ۵۳' تا ۴۶° ۵۳' طول خاوری و ۳۶° ۰۳' تا ۳۶° ۰۵' عرض شمالی، در ۹۰ کیلومتری شمال خاور سمنان در استان سمنان واقع است. بر اساس طبقه‌بندی زون‌های ساختاری ایران (Stöcklin, 1968)، نهشته بوکسیتی گانو متعلق به پهنه البرز خاوری است (شکل ۱). افق‌های بوکسیتی به صورت عدسی‌های منفصل چین‌سان در طول مرز بین آهک‌ها، دولومیت‌ها و دولومیت‌های آهکی سازند الیکا (تریاس میانی- پایانی) و شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و زغال‌سنگ سازند شمشک (تریاس پایانی- ژوراسیک ابتدایی) گسترش و توسعه یافته است. در منطقه گانو توالی کاملی از رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک، سنوزوئیک و کواترنری وجود دارد. واحدهای سنگی به ترتیب از قدیم به جدید شامل ماسه‌سنگ کواترنری قرمز رنگ سازند لالون (کامبرین زیرین)، دولومیت، آهک و ماسه‌سنگ سازند میلا (کامبرین)، ماسه‌سنگ، دولومیت و دولومیت آهکی سازند جیرود (دونین پایانی)، کربنات‌های سازند الیکا (تریاس میانی- پایانی)، شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و زغال‌سنگ سازند شمشک (تریاس پایانی- ژوراسیک ابتدایی)، تناوب مارن و آهک‌های آمونیت‌دار

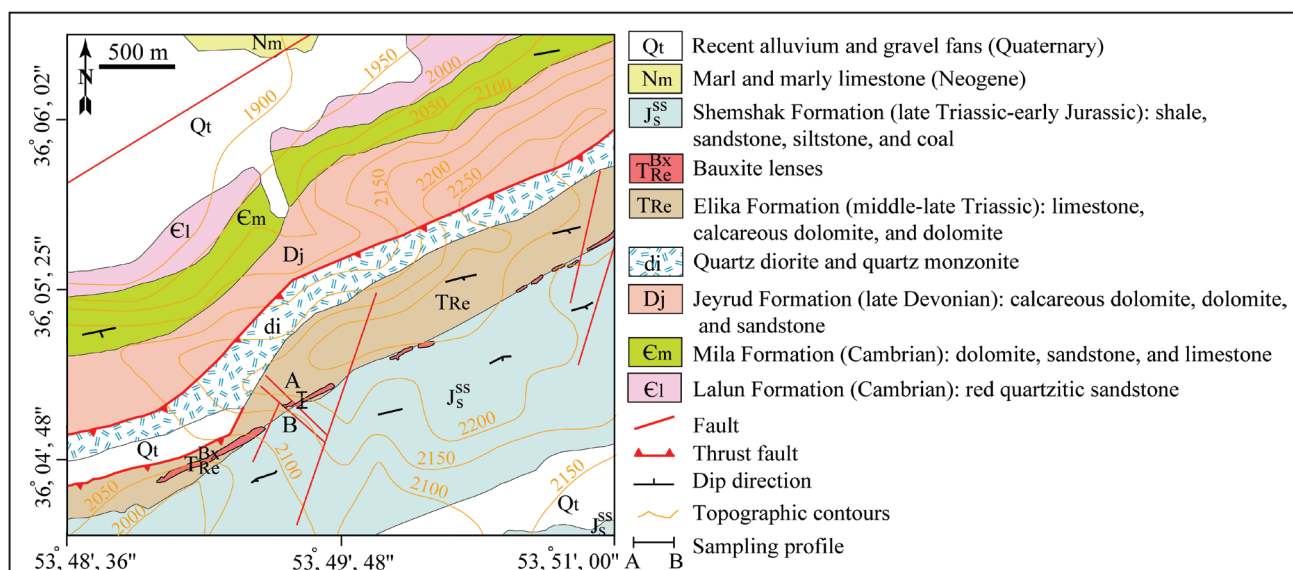
در جنوب قرار گرفته است. در بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه، گسل طولی به موازات گسل شه میرزاد لایه‌های سازند شمشک را به دو بخش تقسیم کرده است. گسل‌های بزرگ منطقه مورد مطالعه بیشتر طولی بوده و دارای روند عمومی شمال‌خاور- جنوب‌باختر هستند. گسل‌های متعدد عرضی، ماده معدنی را قطع کرده و سبب جابه‌جایی افق‌های بوکسیتی شده است (شرکت آلومینای ایران، ۱۳۸۴).

آنها باعث کوهزایی و گسل‌های زیادی شده است. زمین‌ساخت عمومی حاکم بر منطقه گانو حاکی از این امر است که پس از چین‌خوردگی‌ها، توالی‌های رسوبی توسط گسل‌های وارون به صورت صفحات رورانده جابه‌جا شده‌اند، به‌طوری که رسوبات کهن‌تر بر روی رسوبات جوان‌تر قرار گرفته‌اند. منطقه مورد مطالعه به شدت تکتونیزه بوده و بین دو گسل طولی بزرگ شه میرزاد در شمال و گسل تویه دروآر



شکل ۱- نقشه زمین‌ساختی ساده شده ایران (Stöcklin, 1968) که موقعیت نهشته بوکسیتی گانو، استان سمنان، رشته‌کوه‌های البرز خاوری، شمال ایران را نشان می‌دهد.

Figure 1. Simplified tectonic map of Iran (Stöcklin, 1968) showing the location of the Gano bauxite deposit, Semnan province, eastern Alborz Mountains, northern Iran.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده برای نهشته بوکسیتی گانو، استان سمنان، رشته‌کوه‌های البرز خاوری، شمال ایران (سعیدی و اکبرپور، ۱۳۷۱).

Figure 2. Simplified geological map for the Gano bauxite deposit, Semnan province, eastern Alborz Mountains, northern Iran (Saidi and Akbarpour, 1992).

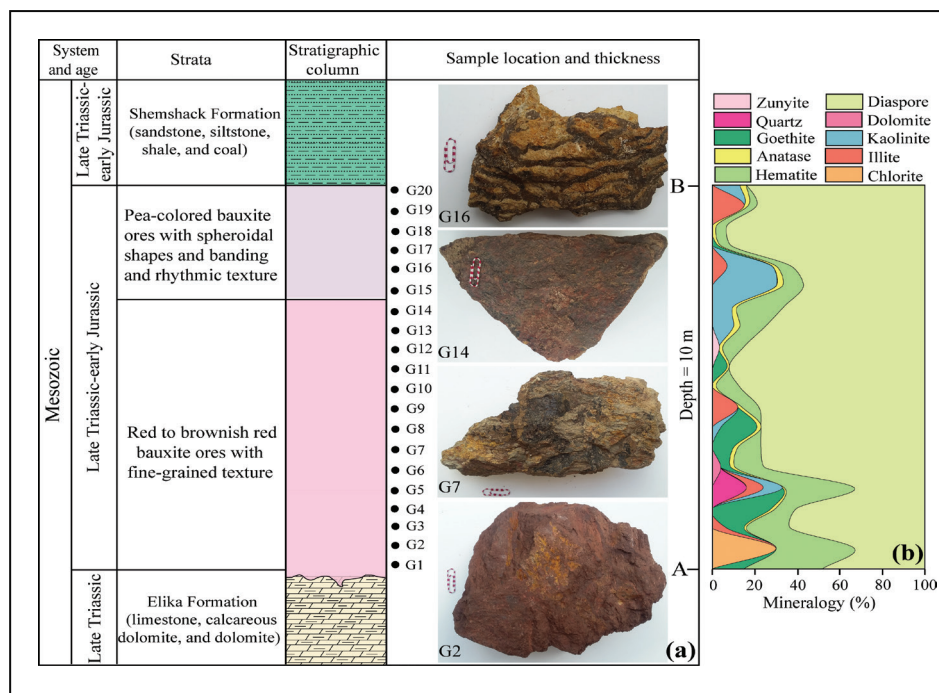
۴- نتایج و بحث

۴-۱- کانی‌شناسی

سیماهای کانی‌شناسی کانسنگ‌های بوکسیتی توسط محیط تشکیل آنها کنترل می‌گردند. به‌طور کلی تغییرات شیمیایی کانسنگ‌ها در طی فرایند بوکسیتی شدن می‌تواند به وسیله تغییرات کانی‌شناسی آنها بازتاب گردد (Tardy et al., 1990, 1991). به باور بابجوک و همکاران (Babechuk et al., 2014) کانی‌شناسی مواد هوازده شده و فراوانی نسبی آنها به ترکیب شیمیایی سنگ مادر، فعالیت‌های زیست زمین‌شناسی، شرایط آب و هوایی، حالت اکسیداسیون- احیا و مدت زمان زهکشی بستگی دارد. تجزیه‌های پراش پرتو X (XRD) نشان می‌دهند کانسنگ‌های بوکسیتی گانو ترکیب کانی‌شناسی به نسبت ساده‌ای دارند. نتایج تجزیه کانی‌شناسی نیمه کمی ۲۰ نمونه کانسنگ بوکسیتی گانو در جدول ۲ و تغییرات کانی‌شناسی در طول نیمرخ مورد مطالعه در شکل ۳- b ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، دیاسپور (متوسط فراوانی ۷۱ درصد) و هماتیت (متوسط فراوانی ۱۳ درصد) فازهای کانیایی اصلی هستند که توسط فازهای فرعی نظیر آاناتاز، ایلیت، کائولینیت، کلریت، گوتیت، کوآرتز، زونیت ($\text{Al}_{13}\text{Si}_5\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_{18}\text{Cl}$) و دولومیت همراهی می‌شوند (جدول ۲ و شکل‌های ۳- b و ۴).

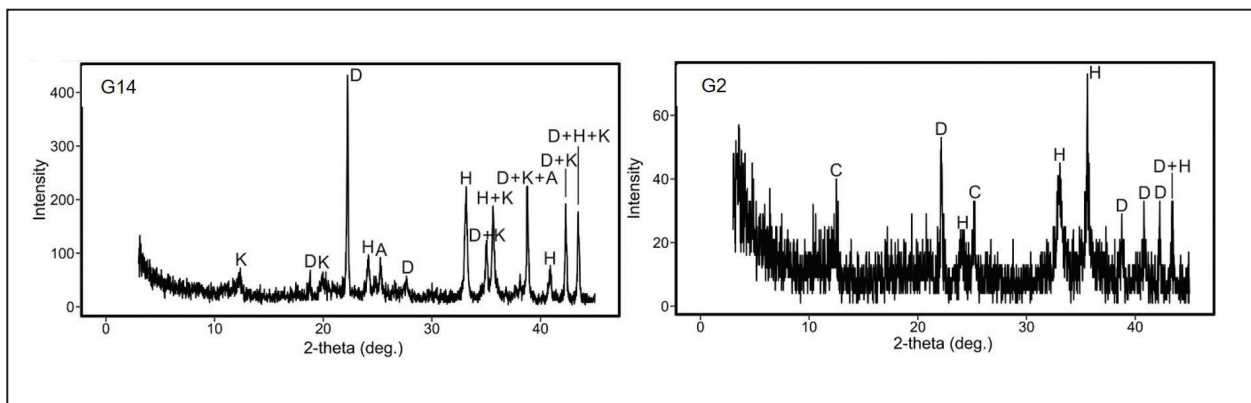
بیشتر کانی‌های شناسایی شده در طول نیمرخ مورد مطالعه یک توزیع غیریکنواختی را از خود نشان می‌دهند (شکل ۳- b). این توزیع غیریکنواخت کانی‌ها می‌تواند در ارتباط با ناهمگنی ترکیب شیمیایی سنگ مادر و یا اختلاف در شدت فرایند بوکسیتی شدن در طی تکوین و تکامل نهشته بوکسیتی باشد (Radusinović et al., 2017). در حالت کلی، مقدار دیاسپور یک روند افزایشی از بخش‌های زیرین به سمت بخش‌های بالایی نیمرخ مورد مطالعه را نشان می‌دهد (شکل ۳- b). این در حالی است که تغییرات فراوانی هماتیت در طول نیمرخ گانو کاملاً بر عکس تغییرات فراوانی دیاسپور است (شکل ۳- b). این ارتباط وارونه حاکی از این مطلب است که فرایند آهن‌زدایی نقش مهمی در تکوین و تکامل نهشته بوکسیتی گانو

دارد. از آن جایی که هماتیت در شرایط آب و هوایی مرطوب‌تری در مقایسه با اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیم تمرکز می‌یابد (Mongelli et al., 2014)، رابطه وارونه توزیع فراوانی هماتیت و دیاسپور در نیمرخ مورد مطالعه می‌تواند بازتاب‌کننده شرایط آب و هوایی در زمان تشکیل و تکامل نهشته بوکسیتی گانو باشد. تشکیل اکسیدهای آهن بین تغییرات محیطی دیرینه همانند شرایط آب و هوایی در حال تغییر و فعالیت آب در محیط خاک‌زاد است (Mameli et al., 2007). حضور هماتیت نشانگر تغییرات آب و هوایی فصلی و وجود نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی در طی تکوین نهشته است (Solar and Lasaga, 2000) که تشکیل اشکال اسفرویدی در کانسنگ‌های بوکسیتی (شکل ۳- a) خود نشانگر این مطلب است. هماتیت در این نهشته از تجزیه تشکیل‌دهنده‌های حاوی آهن اولیه یا آب‌زدایی گوتیت در آب و هوای گرمسیری و مرطوب تشکیل و سپس تحت شرایط Eh-pH مناسب رسوب کرده است (Bárdossy and Aleva, 1990). وجود روندی متناوب افزایشی-کاهشی توزیع فراوانی هماتیت در طول نیمرخ مورد مطالعه (شکل ۳- b) احتمالاً می‌تواند در ارتباط با نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی و تغییرات شرایط آب و هوایی در زمان تشکیل نهشته بوکسیتی گانو باشد. به عبارت بهتر، انحلال بخشی سنگ‌های بستر کربناته توسط آب‌های زیرزمینی سبب افزایش pH این آب‌ها شده و شرایط لازم برای ترسیب آهن و تشکیل کانسنگ‌های غنی از آهن مهیا شده است. حضور همزمان هماتیت و گوتیت در برخی از کانسنگ‌های بوکسیتی مورد مطالعه (شکل ۳- b) احتمالاً حاکی از این مطلب است که آب‌زدایی گوتیت در منطقه گانو به طور کامل رخ نداده است. نبود مقادیر بالایی از کانی‌های سیلیکاتی در کانسنگ‌ها (شکل ۳- b) حکایت از آن دارد که کانسنگ‌های بوکسیتی مورد مطالعه از نظر تکوینی بالغ بوده و در طی مراحل تشکیل و تکامل خود از هوازدگی سنگ‌های اولیه، زهکشی به نسبت خوبی دارند. آاناتاز تنها کانی است که به صورت فاز فرعی در تمامی کانسنگ‌های بوکسیتی به جز نمونه G2 حضور دارد.



شکل ۳- a) ستون چینه‌شناسی نهشته بوکسیتی گانو، استان سمنان، رشته‌کوه‌های البرز خاوری، شمال ایران. موقعیت نمونه‌های بوکسیت معرف با دوایر توپر مشخص شده است. b) تغییرات کانی‌شناسی در طول نیمرخ مورد مطالعه نهشته بوکسیتی گانو.

Figure 3. a) Stratigraphic column of the Gano bauxite deposit, Semnan province, eastern Alborz Mountains, northern Iran. The position of representative bauxite samples is marked by the filled circles; b) Variations of mineralogy along the studied profile of the Gano bauxite deposit.



شکل ۴- الگوهای PXRD کانسنگ‌های معرف نهشته بوکسیتی گانو. A = آنتاز، C = کلریت، D = دیاسپور، H = هماتیت، K = کائولینیت.

Figure 4. PXRD patterns of representative ores of the Gano bauxite deposit. A = anatase, C = chlorite, D = diaspor, H = hematite, K = kaolinite.

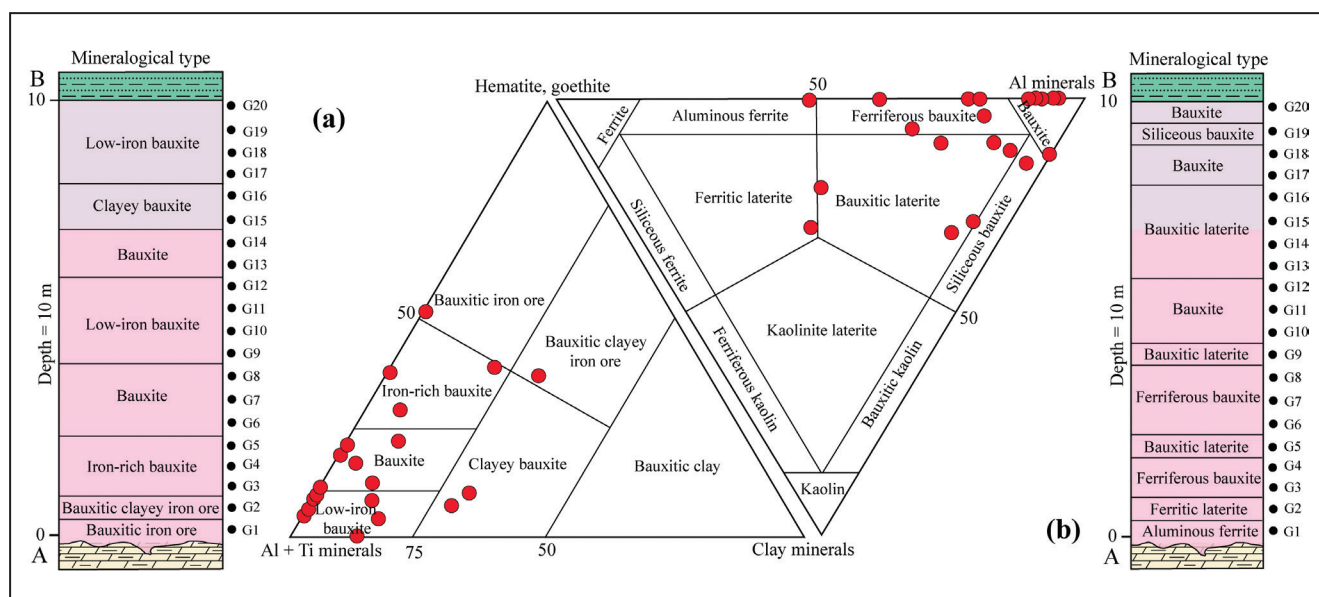
جدول ۲- نتایج تجزیه کانی‌شناسی نیمه کمی (درصد وزنی) برای نمونه‌های کانسنگ بوکسیتی از نیمرخ مورد مطالعه در منطقه گانو. اختصارات: Ant = آنتاز، Chl = کلریت، Dol = دولومیت، Dsp = دیاسپور، Gth = گوئیت، Hem = هماتیت، Ilt = ایلیت، Kln = کائولینیت، Qz = کوآرتز، Zun = زونیت؛ اختصارات کانی از ویتنی و ایوانز (Whitney and Evans, 2010).

Table 2. Results of semi-quantitative mineralogical analysis (weight percent, wt%) for the bauxite ore samples of the studied profile in the Gano area. Abbreviations: Ant = anatase, Chl = chlorite, Dol = dolomite, Dsp = diaspor, Gth = goethite, Hem = hematite, Ilt = illite, Kln = kaolinite, Qz = quartz, Zun = zunyite; mineral abbreviations from Whitney and Evans (2010).

Sample no.	Dsp	Hem	Ant	Gth	Kln	Ilt	Chl	Zun	Qz	Dol
G1	48	37	—	15	—	—	—	—	—	—
G2	33	37	—	—	—	—	30	—	—	—
G3	63	21	1	8	—	7	—	—	—	—
G4	60	10	2	28	—	—	—	—	—	—
G5	33	33	1	—	9	8	—	—	16	—
G6	75	14	2	5	—	—	—	—	—	4
G7	77	11	2	10	—	—	—	—	—	—
G8	77	—	2	17	4	—	—	—	—	—
G9	78	8	2	—	—	12	—	—	—	—
G10	87	11	2	—	—	—	—	—	—	—
G11	92	—	1	7	—	—	—	—	—	—
G12	85	10	2	—	—	—	—	3	—	—
G13	75	12	3	—	10	—	—	—	—	—
G14	66	22	2	—	10	—	—	—	—	—
G15	57	10	3	—	30	—	—	—	—	—
G16	63	7	2	—	21	7	—	—	—	—
G17	91	5	1	3	—	—	—	—	—	—
G18	93	5	2	—	—	—	—	—	—	—
G19	79	4	2	—	—	15	—	—	—	—
G20	84	—	3	—	13	—	—	—	—	—

نیمرخ مورد مطالعه نشان می‌دهد که آب‌های جوی فرورو با ماهیت اسیدی تأثیر زیادی در تشکیل بخش‌های بالایی در نهشته بوکسیتی گانو داشته‌اند. همچنین تشکیل کانسنگ آهن بوکسیتی، کانسنگ آهن رسی بوکسیتی، بوکسیت غنی از آهن و یا معادل آن‌ها فریت آلومینیومی، لاتریت فریتی، بوکسیت آهن‌دار و لاتریت بوکسیتی در نیمرخ مورد مطالعه حکایت از آن دارند که افزایش pH محلول‌های هوازه‌کننده با نزدیک شدن به سنگ‌های بستر کربناتی نقش مهمی در تمرکز کانی‌های آهن‌دار و به تبع آن تیپ‌های کانیایی یادشده در این نهشته داشته‌اند. با توجه به مطالب یادشده در بالا، در کل چنین به نظر می‌رسد سازوکارهای آهن‌زدایی-آهن‌افزایی نقش مهمی در شکل‌گیری این نهشته ایفا کرده‌اند.

بر اساس نمودار سه متغیره کانی‌های رسی، آلومینیم‌دار، تیتانیم‌دار و آهن‌دار (Bárdossy, 1982)، کانسنگ‌های بوکسیتی گانو به ترتیب از پایین به بالا نیمرخ مورد مطالعه شامل تیپ‌های کانیایی (۱) کانسنگ آهن بوکسیتی، (۲) کانسنگ آهن رسی بوکسیتی، (۳) بوکسیت غنی از آهن، (۴) بوکسیت، (۵) بوکسیت آهن پایین و (۶) بوکسیت رسی می‌شوند (شکل ۵-ا). همچنین، استفاده از نمودار سه متغیره کانی‌های رسی، آلومینای آزاد و آهن‌دار (Bárdossy and Aleva, 1990) نشان می‌دهد که کانسنگ‌های بوکسیتی گانو از ۶ تیپ کانیایی (۱) فریت آلومینیومی، (۲) لاتریت فریتی، (۳) بوکسیت آهن‌دار، (۴) لاتریت بوکسیتی، (۵) بوکسیت و (۶) بوکسیت سیلیسی تشکیل شده‌اند (شکل ۵-ب). حضور تیپ‌های کانیایی با مقدار آهن پایین (بوکسیت، بوکسیت رسی و بوکسیت آهن پایین) در



شکل ۵- موقعیت کانسنگ‌های بوکسیتی گانو در (a) نمودار سه متغیره رس‌ها، کانی‌های آهن و کانی‌های آلومینیم و تیتانیم (Bárdossy, 1982) و (b) نمودار سه متغیره رس‌ها، کانی‌های آهن و کانی‌های آلومینیم (Bárdossy and Aleva, 1990).

Figure 5. Position of the Gano bauxite ores in the a) clays, Fe minerals, and Al + Ti minerals trivariate diagram (Bárdossy, 1982), and b) clays, Fe minerals, and Al minerals trivariate diagram (Bárdossy and Aleva, 1990).

۴-۲- تفسیر بی‌هنجاری Ce کانسنگ‌ها

شود (Braun et al., 1990). مقایسه روند تغییرات بی‌هنجاری Ce با Al_2O_3, Fe_2O_3 در شکل ۶ نمایش داده شده است. بزرگترین بی‌هنجاری مثبت Ce P_2O_5 و TiO_2 در نمونه G6 است، بیشترین تمرکز P_2O_5 را از خود نشان می‌دهد. این رابطه خود بیانگر نقش احتمالی کانی‌های فسفاتی ثانویه در رخداد بی‌هنجاری مثبت Ce در کانسنگ‌ها است. از طرف دیگر، عدم انطباق رفتار توزیع فراوانی کانی‌های آنتاز، هماتیت، گوتیت، کائولینیت، ایلیت و کلریت (شکل ۳-ب) با روند تغییرات بی‌هنجاری Ce (شکل ۶-ا) در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو بیانگر عدم نقش کانی‌های رسی، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و اکسیدهای تیتانیم در روبش عنصر Ce و رخداد بی‌هنجاری مثبت Ce در نیمرخ مورد مطالعه است. با توجه به مطالب مطروحه، به نظر می‌رسد که رخداد بی‌هنجاری مثبت Ce در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو مبین حضور احتمالی کانی‌های تثبیت‌کننده این عنصر همانند کانی‌های فسفاتی ثانویه و افزایش پتانسیل اکسیداسیون در زمان تشکیل و توسعه کانسنگ‌های بوکسیتی و یا حتی نوسانات سطح سفره‌های آب‌های زیرزمینی و بافر بودن سنگ‌های بستر کربناته است.

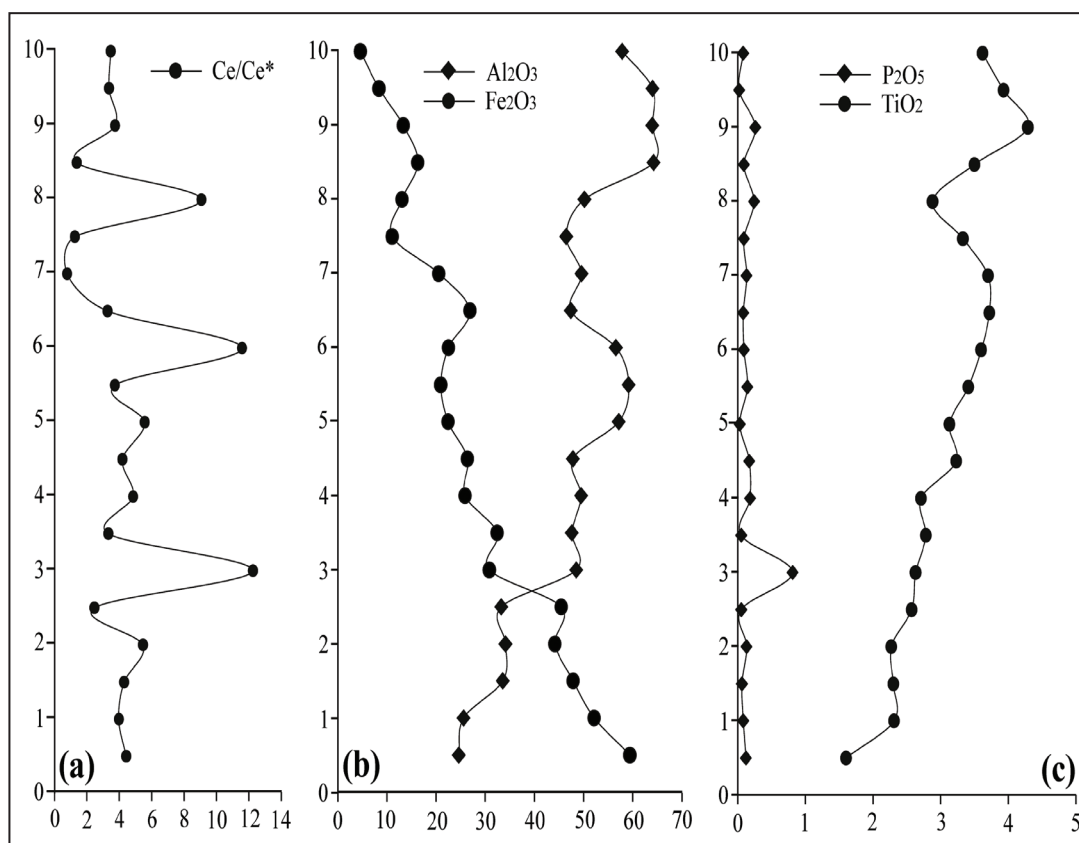
مقادیر بی‌هنجاری Ce در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو با استفاده از رابطه $Ce/Ce^* = (2 \times Ce_N)/(La_N + Pr_N)$ (Wang et al., 2010) محاسبه شده و در جدول ۳ نمایش داده شده است. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که مقادیر بی‌هنجاری Ce در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو دارای بازه تغییراتی از ۰/۷۹ الی ۱۲/۲۵ است. براساس مطالعات انجام‌شده، بی‌هنجاری Ce به عنوان یک ابزار بالقوه ارزشمند برای شناسایی شرایط و یا فرایندهای مختلف زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود (Mongelli et al., 2014). به باور براون و همکاران (Braun et al., 1998) توالی از دوره‌ها با شدت هوازدگی متفاوت و شرایط اکسیداسیون محیط تشکیل سبب نوسانات بی‌هنجاری Ce در کانسنگ‌های بوکسیتی می‌شود که این مسئله خود در انطباق با تغییرات آب و هوایی است. رخداد بی‌هنجاری‌های مثبت قوی Ce در کانسنگ‌های بوکسیتی مبین شرایط به شدت اکسیدان محیط تشکیل، تبدیل Ce^{3+} به Ce^{4+} به واسطه افزایش پتانسیل اکسیداسیون و احتمالاً نوسانات سطح سفره‌های آب‌های زیرزمینی می‌باشد (Meyer et al., 2002; Ma et al., 2007). افزایش pH آب‌های زهکشی‌شده توسط سنگ‌های بستر کربناتی، سازوکار احتمالی دیگری است که می‌تواند باعث ایجاد چنین بی‌هنجاری‌های مثبت قوی Ce در کانسنگ‌های بوکسیتی

جدول ۳- متغیرهای زمین‌شیمیایی محاسبه شده کانسنگ‌های بوکسیتی در منطقه گانو.

Table 3. The calculated geochemical parameters of the bauxite ores in the Gano area.

Sample no.	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
LREE _(La-Eu)	228.95	338.55	270.60	206.70	248.58	219.43	190.88	182.79	431.69	25.31
HREE _(Gd-Lu)	9.67	20.71	13.96	14.05	20.08	9.81	15.03	14.46	21.77	10.98
REE _(La-Lu)	238.62	359.26	284.56	220.75	268.66	229.24	205.91	197.25	453.46	36.29
(LREE/HREE) _N	13.72	9.47	11.23	8.53	7.17	12.96	7.36	7.33	11.49	1.34
(La/Yb) _N	10.25	7.83	8.39	5.70	7.99	2.68	6.46	3.92	9.20	0.64
Eu/Eu*	0.72	0.72	0.73	0.74	0.69	0.69	0.69	0.64	0.68	0.75
Ce/Ce*	4.43	3.97	4.30	5.45	2.47	12.25	3.33	4.85	4.20	5.56
Sm/Nd	0.21	0.18	0.20	0.33	0.19	0.30	0.20	0.29	0.20	0.50
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	0.07	0.09	0.07	0.07	0.08	0.05	0.06	0.05	0.07	0.05

Sample no.	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20
LREE _(La-Eu)	339.47	65.96	233.18	673.45	475.78	92.50	307.65	263.12	10.64	84.11
HREE _(Gd-Lu)	17.86	15.85	19.99	93.67	41.65	11.03	20.32	30.06	12.80	15.34
REE _(La-Lu)	357.33	81.81	253.17	767.12	517.43	103.53	327.97	293.18	23.44	99.45
(LREE/HREE) _N	11.01	2.41	6.76	4.17	6.62	4.86	8.77	5.07	0.48	3.18
(La/Yb) _N	8.13	0.66	5.74	7.77	11.20	1.24	13.72	4.12	0.29	2.24
Eu/Eu*	0.65	0.78	0.73	0.73	0.71	0.74	0.66	0.76	0.67	0.69
Ce/Ce*	3.73	11.57	3.28	0.79	1.26	9.07	1.38	3.74	3.37	3.47
Sm/Nd	0.19	0.74	0.21	0.20	0.18	0.31	0.14	0.36	0.54	0.27
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.07	0.06	0.06



شکل ۶- روند تغییر (a) Ce/Ce*؛ (b) Al₂O₃، Fe₂O₃؛ (c) P₂O₅ و TiO₂ برای کانسنگ‌های بوکسیتی گانو.

Figure 6. Variation trend of a) Ce/Ce*; b) Al₂O₃, Fe₂O₃; c) P₂O₅, and TiO₂ for the Gano bauxite ores.

۳-۴- عوامل موثر در تغییرات عناصر نادر خاکی

در این مطالعه برای محاسبه مقادیر $(La/Yb)_N$ و $(LREE/HREE)_N$ در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو به ترتیب از روابط زیر استفاده شد:

$$(La/Yb)_N = (La/Yb)_{\text{bauxite ore}} / (La/Yb)_{\text{chondrite}}$$

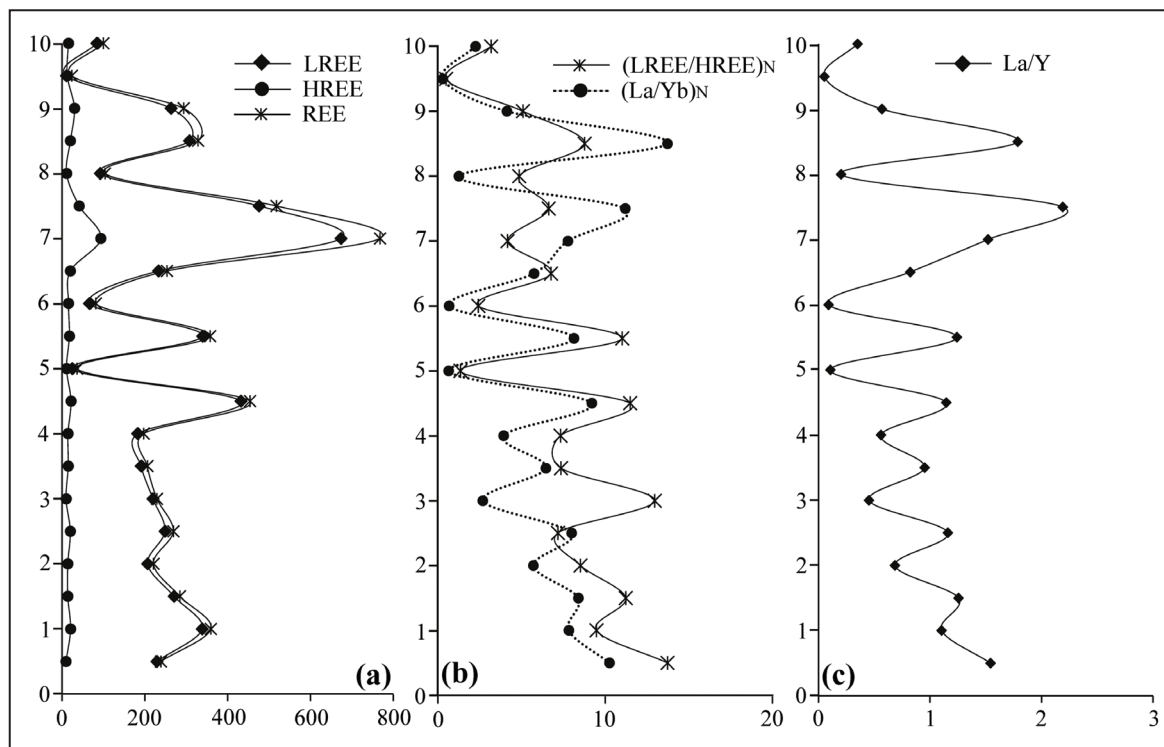
$$(LREE/HREE)_N = (LREE/HREE)_{\text{bauxite ore}} / (LREE/HREE)_{\text{chondrite}}$$

مقادیر و روند تغییرات $REE_{(La-Lu)}$ ، $HREE_{(Gd-Lu)}$ ، $REE_{(La-Lu)}$ ، $(LREE/HREE)_N$ ، $(La/Yb)_N$ و La/Y در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۷ نمایش داده شده است. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که مقادیر $REE_{(La-Lu)}$ در کانسنگ‌های مورد مطالعه دارای بازه تغییراتی از ۲۳/۴۴ الی ۷۶۷/۱۲ ppm می‌باشد (شکل ۷- a). بازه تغییرات برای $LREE_{(La-Eu)}$ شدید (۶۷۳/۴۵-۱۰/۶۴ ppm) و برای $HREE_{(Gd-Lu)}$ ضعیف (۹۳/۶۷-۹/۶۷ ppm) است (شکل ۷- a). مقادیر نسبت‌های $(La/Yb)_N$ ، $(LREE/HREE)_N$ و La/Y در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو به ترتیب در بازه‌ای از ۰/۴۸ الی ۱۳/۷۲، ۰/۲۹ الی ۱۳/۷۲ و ۰/۰۵ الی ۲/۱۹ متغیر است (شکل ۷- b و c). برخلاف این که مقادیر تمرکز REE در کانسنگ‌های بوکسیتی به pH محیط تشکیل وابسته است (Patino et al., 2003)، مقادیر بالای REE در بخش‌های بالایی و میانی نیمرخ مورد مطالعه نهشته بوکسیتی گانو می‌تواند در ارتباط با پایداری کانی‌های اولیه حامل لانتانیدها باشد. با توجه به مطالب مطروحه، از آنجایی که درجه تفریق $LREE_{(La-Eu)}$ از $HREE_{(Gd-Lu)}$ با افزایش pH روند صعودی به خود می‌گیرد (Ronov et al., 1967)، نسبت‌های $(La/Yb)_N$ و $(LREE/HREE)_N$ می‌توانند شاخصی مناسبی برای ارزیابی pH محلول‌های هوازده‌کننده مورد استفاده قرار گیرند (Patino et al., 2003). طبق مطالعات انجام شده، مقادیر متغیرهای یادشده در کانسنگ‌های بوکسیتی تحت شرایط اسیدی، پایین و با افزایش pH محیط تشکیل کانسنگ‌ها روند افزایشی از خود نشان می‌دهند (Crinci and Jurkowic, 1990). مقادیر نسبت‌های یادشده در نیمرخ مورد مطالعه به صورت ناموزونی روندهای صعودی و یا نزولی از خود نشان می‌دهند (شکل ۷). معمولاً چنین روندهای نامنظمی در کانسنگ‌های بوکسیتی دیده می‌شود که در طی تکوین و توسعه خود با نوسانات شدید سطح سفره آب‌های زیرزمینی همراه بوده‌اند (Abedini et al., 2018). از آنجایی که تمرکز عناصر نادر خاکی به pH محیط تشکیل کانسنگ‌ها وابسته است، در طی بالا آمدن سطح سفره آب‌های زیرزمینی به دلیل انحلال سنگ‌های بستر کربناته مقدار pH محلول بالا رفته و شرایط لازم برای ترسیب این عناصر مهیا می‌گردد. در مقابل با پایین رفتن سطح سفره آب‌های زیرزمینی و با ورود آب‌های جوی فروری اسیدی شرایط لازم برای شستشوی بخشی این عناصر فراهم می‌شود. با توجه به روند تغییرات نسبت‌های عنصری یاد شده می‌توان به این نتیجه رسید که در طی تکوین و توسعه کانسنگ‌های بوکسیتی گانو نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی شدید بوده است، به طوری که شرایط لازم برای شستشو و یا ترسیب لانتانیدها در نیمرخ مورد مطالعه به صورت ناموزون فراهم بوده است. افزون‌بر این، مسئله دیگری که می‌تواند نقش کنترلی pH محیط تشکیل را در شستشو و یا تمرکز عناصر نادر خاکی آشکار سازد، بررسی روند تغییرات نسبت La/Y در برابر نسبت

$(La/Yb)_N$ در نیمرخ مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۸). بررسی‌ها نشان داده است که نسبت La/Y در نهشته‌های بوکسیتی متغیر مناسبی برای تشخیص pH محیط تشکیل نهشته بوکسیتی است. مقادیر کمتر و بیشتر از ۱ نسبت La/Y به ترتیب بیانگر حاکم بودن شرایط اسیدی و قلیایی در تشکیل و توسعه نهشته‌های بوکسیتی است (Crinci and Jurkowic, 1990). در نمودار دو متغیره نسبت La/Y در برابر نسبت $(La/Yb)_N$ (شکل ۸)، همبستگی قوی و مثبت بین نسبت‌های یاد شده ($r = ۰/۹۲$) می‌تواند دلیلی بر نقش تغییرات pH محلول‌های هوازده‌کننده در توزیع و تحرک عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو باشد.

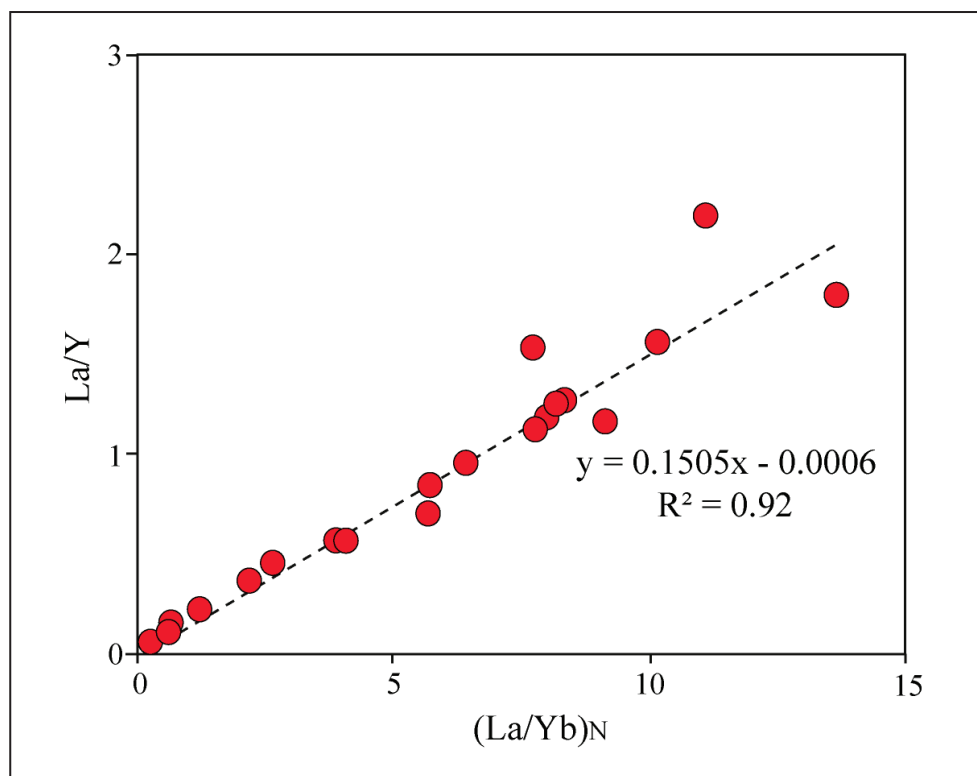
پژوهش‌های انجام شده آشکار نموده است که ترکیب محلول خاک، بر جذب REE روی کانی‌های ثانویه موثر است و تعادل غلظت REE بین محلول خاک و سطوح کانی، توسط واکنش‌های جذب/وا جذب مبتنی بر pH کنترل می‌شود (De Luca et al., 2020). هنگامی که pH محیط تشکیل افزایش می‌یابد، REE تمایل دارند به طور ترجیحی روی سطح کانی‌ها جذب شوند و $LREE_{(La-Eu)}$ نسبت به $HREE_{(Gd-Lu)}$ به‌طور موثرتری در فازهای کانیایی جذب می‌شوند (Deluca et al., 2020). تحت شرایط قلیایی $HREE_{(Gd-Lu)}$ به واسطه تشکیل کمپلکس‌های کربناتی پایدار و خنثی‌سازی محلول‌های تراوش‌کننده سطحی از سیستم‌های بازماندی خارج می‌شوند (Cantrell and Byrne, 1987; Johannesson et al., 1996). در حالی که در شرایط قلیایی، $LREE_{(La-Eu)}$ نسبت به $HREE_{(Gd-Lu)}$ از بین اکسیدهای فلزی و کانی‌های رسی ترجیحاً به اکسیدهای فلزی همانند هماتیت جذب می‌شوند (White, 2000; Coppin et al., 2002). مقایسه چگونگی تغییرات نسبت‌های $(LREE/HREE)_N$ ، $(La/Yb)_N$ و La/Y در کانسنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر تفریق و غنی‌شدگی $LREE_{(La-Eu)}$ نسبت به $HREE_{(Gd-Lu)}$ در کانسنگ‌های غنی از آهن واقع در بخش‌های زیرین نسبت به کانسنگ‌های فقیر از آهن در بخش‌های بالایی بیشتر است. با توجه به چگونگی توزیع کانسنگ‌ها در نهشته بوکسیتی گانو می‌توان ادعا کرد که میزان تفریق $LREE_{(La-Eu)}$ از $HREE_{(Gd-Lu)}$ در محل کنتاکت نهشته با سنگ‌های بستر کربناته بیشتر می‌باشد. با در نظر گرفتن نحوه پراکندگی کانی هماتیت و حاکم بودن شرایط اسیدی در بخش‌های بالایی و شرایط قلیایی در تکوین بخش‌های تحتانی نیمرخ به نظر می‌رسد که عملکرد سنگ بستر کربناته به عنوان یک بافر فعال و توزیع آهن و به تبع آن توزیع فراوانی هماتیت نقش مهمی در تفریق و غنی‌شدگی $LREE_{(La-Eu)}$ نسبت به $HREE_{(Gd-Lu)}$ در بخش‌های تحتانی نیمرخ بوکسیتی گانو ایفا نموده‌اند.

با توجه به مطالب یادشده می‌توان چنین استنباط کرد که تفریق و غنی‌شدگی $LREE_{(La-Eu)}$ نسبت به $HREE_{(Gd-Lu)}$ در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو متأثر از نوسان pH محیط تشکیل، نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی، اختلاف در میزان انحلال سنگ‌های بستر کربناته توسط آب‌های زیرزمینی، خنثی‌سازی آب‌های فروری اسیدی توسط عملکرد سنگ‌های بستر کربناته به عنوان یک عامل زمین‌شیمیایی و ترسیب همزمان کانی‌های آهن‌دار و روبش ترجیحی $LREE_{(La-Eu)}$ توسط هماتیت بوده است.



شکل ۷- روند تغییر (a) $REE_{(La-Lu)}$, $HREE_{(Gd-Lu)}$, $LREE_{(La-Eu)}$; (b) $(LREE/HREE)_N$, $(La/Yb)_N$; و (c) La/Y برای کانسنگ‌های بوکسیتی گانو.

Figure 7. Variation trend of a) $REE_{(La-Lu)}$, $HREE_{(Gd-Lu)}$, $LREE_{(La-Eu)}$; b) $(LREE/HREE)_N$, $(La/Yb)_N$; and c) La/Y for the Gano bauxite ores.



شکل ۸- نمودار دو متغیره نسبت $(La/Yb)_N$ در برابر نسبت La/Y برای کانسنگ‌های بوکسیتی گانو.

Figure 8. Bivariate plot of $(La/Yb)_N$ ratio vs. La/Y ratio for the Gano bauxite ores.

۴-۴- الگوی توزیع عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌ها

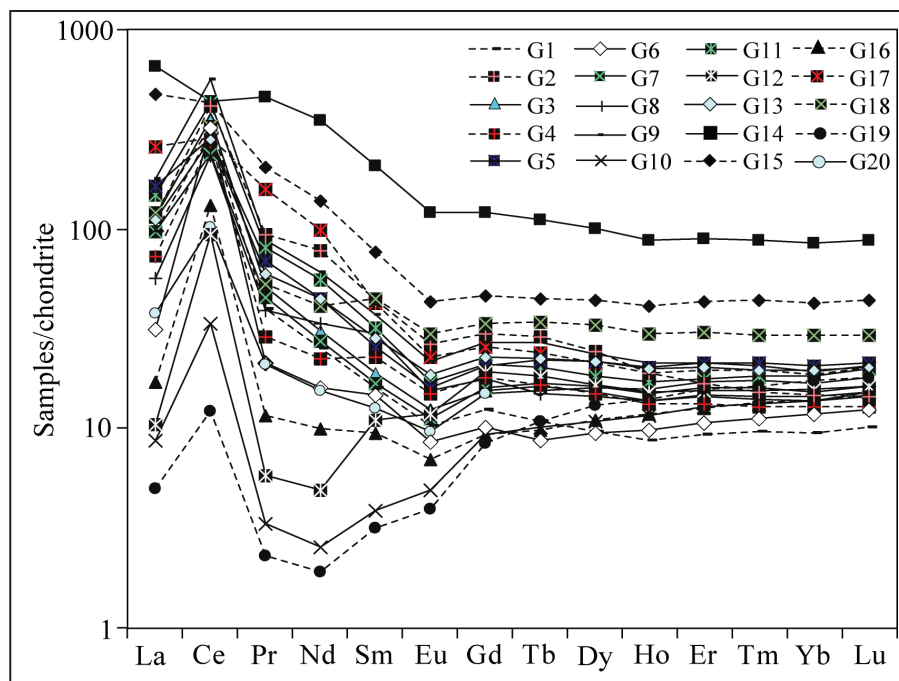
الگوی توزیع REE به‌هنجار شده نسبت به ترکیب کندریت (Sun and McDonough, 1989) برای کانسنگ‌های بوکسیتی گانو نشان از غنی‌شدگی $LREE_{(La-Eu)}$ نسبت به $HREE_{(Gd-Lu)}$ دارد (شکل ۹). محتوای بیشتر REE در مقایسه با ترکیب کندریت، درجه بیشتر هوازدهگی شیمیایی را در سنگ مادر پیشنهاد می‌کند (Lopez et al., 2005). این تفریق با رخداد بی‌هنجاری‌های شدید و مثبت Ce و بی‌هنجاری‌های ضعیف و منفی Eu همراه بوده است. این رفتار غیر عادی الگوی توزیع REE در کانسنگ‌های بوکسیتی گانو که به ندرت از کانسارهای بوکسیتی گزارش شده است، می‌تواند در ارتباط با عواملی مانند اختلاف در پایداری کانی‌های حامل لانتانیدها، تغییر pH محلول‌های هوازده‌کننده از اسیدی ضعیف تا قلیایی و یا درجه تکاملی متوسط نیمرخ مورد مطالعه باشد (Beyala et al., 2009). الگوی توزیع REE به‌هنجار شده نسبت به ترکیب کندریت نشان می‌دهند که کانسنگ‌های غنی از آهن واقع در بخش‌های زیرین نیمرخ مورد مطالعه نزدیک به سنگ بستر کربناته نسبت به کانسنگ‌های فقیر از آهن در بخش‌های بالایی، الگوهای غنی‌شدگی منظم‌تری برای $LREE_{(La-Eu)}$ از خود نشان می‌دهند که مبین عملکرد سنگ بستر کربناته به عنوان یک عامل زمین‌شیمیایی در تفریق و توزیع لانتانیدها در بخش‌های تحتانی نیمرخ هوازده می‌باشد.

۴-۵- سنگ مادر نهشته بوکسیتی گانو

تاکنون روش‌های مختلفی برای تعیین سنگ مادر نهشته‌های بوکسیتی پیشنهاد شده است. تعیین سنگ مادر نهشته‌های بوکسیتی و تکامل روابط سنگ مادر و توده معدنی طی تشکیل بوکسیت یکی از موضوعات مهم در بررسی این نهشته‌ها است. از آنجایی که بوکسیت‌زایی در کانسارهای با سنگ میزبان کربناته کارستی غالباً با تفکیک قابل توجه عناصر اصلی، جزئی و نادر خاکی همراه است، بوکسیت‌های کارستی بر خلاف بوکسیت‌های لائتریتی، پیچیدگی‌های خاستگاهی زیادی دارند و ارتباط آشکاری با سنگ مادر نشان نمی‌دهند (Bárdossy and Aleva, 1990). با توجه به وجود مرزهای کاملاً تند بین کانسنگ‌های بوکسیتی گانو با سنگ‌های بستر کربناته الیکا نمی‌توان شانس را برای سنگ‌های بستر به عنوان سنگ مادر این نهشته قائل شد. مطالعات انجام شده نشان داده است که برخی از نسبت‌های عنصری از جمله بی‌هنجاری Eu در طی فرایندهای هوازدهگی تقریباً ثابت باقی می‌مانند. از این رو می‌توان از این نسبت‌های عنصری در تعیین سنگ مادر نهشته‌های بوکسیتی استفاده کرد (Mongelli et al., 2014). مقادیر بی‌هنجاری Eu در کانسنگ‌های بوکسیتی با استفاده از رابطه $Eu/Eu^* = (2 \times Eu_N) / (Sm_N + Gd_N)$ (Taylor and MacLennan, 1985) محاسبه و در جدول ۳ نمایش داده شده است. این محاسبات نشان می‌دهند که مقادیر بی‌هنجاری‌های Eu در کانسنگ‌ها دارای بازه تغییراتی از ۰/۶۴ الی ۰/۷۸ است. مقادیر یکسان بی‌هنجاری‌های Eu در کانسنگ‌های فقیر از آهن در بخش‌های بالایی و کانسنگ‌های غنی از آهن در بخش‌های زیرین نیمرخ مورد مطالعه بیانگر این مطلب است که کانسنگ‌های بوکسیتی گانو احتمالاً از یک منشأ واحد نشأت گرفته‌اند. از طرف دیگر عناصری مانند Al و Ti در طی

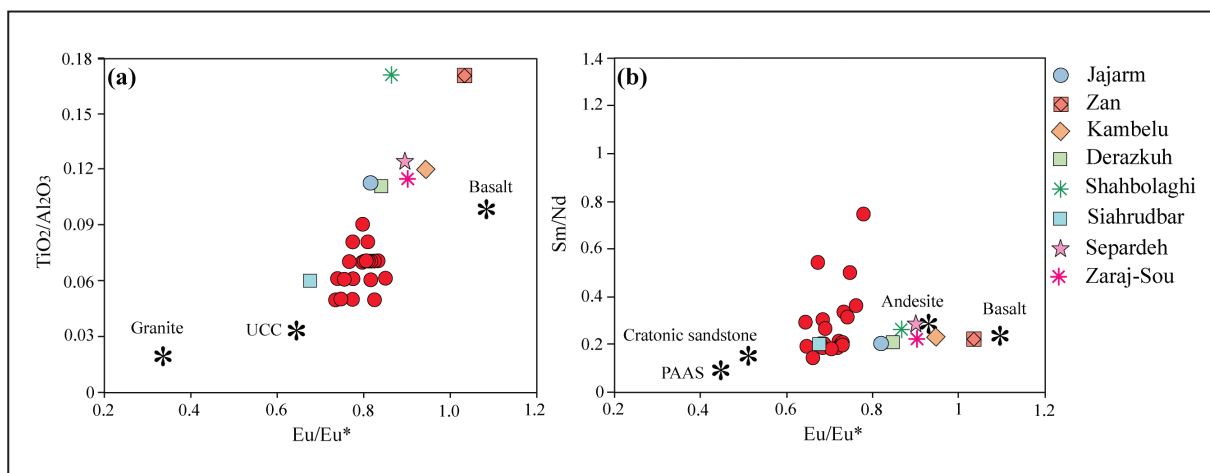
فرایند هوازدهگی و بوکسیتی شدن به صورت عناصر کم تحرک عمل می‌نمایند و پتانسیل بالایی برای انتقال به سنگ‌های رسوبی دارند (MacLean et al., 1997; Mameli et al., 2007; Haniçli, 2013). بنابراین، نسبت TiO_2/Al_2O_3 یک شاخص عنصری مفید و کارآمد در جهت تعیین سنگ مادر محصولات هوازده منجمله نهشته‌های بوکسیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Haniçli, 2013). موقعیت ترکیب میانگین پوسته قاره‌ای بالایی (UCC)، بازالت و گرانیت (Mameli et al., 2007)، کانسنگ‌های بوکسیتی گانو و برخی از نهشته‌های بوکسیتی در زون ساختاری البرز در نمودار دو متغیره بی‌هنجاری Eu در مقابل نسبت TiO_2/Al_2O_3 ارائه شده توسط ماملی و همکاران (Mameli et al., 2007) در شکل ۱۰-a رسم شده است. رسم کانسنگ‌های بوکسیتی گانو در نمودار یاد شده نشان می‌دهد که کانسنگ‌های بوکسیتی مورد مطالعه در محدوده دور از سنگ بازالت و گرانیت و نزدیک به محدوده ترکیب میانگین پوسته قاره‌ای بالایی قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-a). همچنین با توجه به موقعیت قرارگیری کانسنگ‌های مورد مطالعه نسبت به برخی از نهشته‌های بوکسیتی در پهنه ساختاری البرز چنین به‌نظر می‌رسد که از نظر نوع سنگ مادر، کانسنگ‌های بوکسیتی گانو به کانسنگ‌های بوکسیتی سیاه‌رودبار بیشترین شباهت را دارند (شکل ۱۰-a).

نسبت Sm/Nd منعکس‌کننده تفریق عناصر Sm و Nd در طی تبلور تفریق ماگمایی است. از آنجایی که تفریق کمی در مقادیر عناصر Sm و Nd در طی فرایند هوازدهگی حتی در درجات شدید صورت می‌گیرد (Viers and Wasserburg, 2004)، نسبت Sm/Nd مشابه نسبت Eu/Eu^* می‌تواند شاخص عنصری مفید و کارآمد در جهت تعیین سنگ مادر نهشته‌های بوکسیتی مورد استفاده قرار گیرد. موقعیت ترکیب میانگین ماسه‌سنگ کراتونی (Condie, 1993)، آندزیت، شیل آرکئن پسین استرالیا (Taylor and McLennan, 1995) (PAAS)، بازالت (Taylor, 1964)، کانسنگ‌های بوکسیتی گانو و برخی از نهشته‌های بوکسیتی در زون ساختاری البرز بر روی نمودار دو متغیره بی‌هنجاری Eu در برابر نسبت Sm/Nd در شکل ۱۰-b رسم شده است. کانسنگ‌های بوکسیتی گانو در نمودار یاد شده در محدوده دور از ماسه‌سنگ کراتونی و نزدیک به محدوده سنگ مادر آندزیتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-b). با مقایسه موقعیت قرارگیری کانسنگ‌های بوکسیتی مورد مطالعه با برخی از نهشته‌های بوکسیتی در زون ساختاری البرز چنین به نظر می‌رسد که از نظر نوع سنگ مادر، کانسنگ‌های بوکسیتی گانو به کانسنگ‌های بوکسیتی سیاه‌رودبار بیشترین شباهت را دارند (شکل ۱۰-b). در مجموع با توجه به یافته‌های زمین‌شیمیایی چنین به‌نظر می‌رسد که نهشته بوکسیتی گانو از هوازدهگی سنگ‌های آذرین حدواسط به‌وجود آمده است. نتیجه حاصله با رخنمون سنگ‌های آذرین حدواسط تا بازیک به صورت توده‌های نفوذی کوچک، انواع سیل و دایک با ضخامت‌های مختلف در قاعده توالی شیل، ماسه‌سنگ، سیلستون و زغال‌سنگ سازند شمشک در زون ساختاری البرز در مناطقی مانند جنوب آزادشهر، تالو، طرره، آستانه، کلاته، فولادمحل، کمرین، شمال قزوین و سنگرود سازگاری و همخوانی دارد (شهابی، ۱۳۹۹).



شکل ۹- الگوهای عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده به کندریت برای کانستگ‌های بوکسیتی گانو. داده‌های کندریت از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989) است.

Figure 9. Chondrite-normalized REE patterns for the Gano bauxite ores. Data for the chondrite are from Sun and McDonough (1989).



شکل ۱۰- موقعیت کانستگ‌های بوکسیتی گانو در (a) نمودار دو متغیره بی‌هنجاری Eu در برابر TiO_2/Al_2O_3 (Mameli et al., 2007) و (b) نمودار دو متغیره بی‌هنجاری Eu در برابر Sm/Nd و مقایسه آن با برخی از نهشته‌های بوکسیتی در پهنه ساختاری البرز. ترکیب میانگین پوسته قاره‌ای بالایی (UCC)، بازالت و گرانیت از ماملی و همکاران (Mameli et al., 2007)، ماسه‌سنگ کراتونی از کاندی (Condrie, 1993)، آندزیت و شیل آرکن پسن استرالیا (PAAS) از تیلور و مک‌لنن (Taylor and McLennan, 1985) و بازالت از تیلور (Taylor, 1964) است. داده‌های نهشته بوکسیتی جاجرم از اسماعیلی و همکاران (Esmaily et al., 2010)، نهشته شاه‌بلاغی از کنگرانی‌فراهانی و همکاران (۱۳۹۲ا)، نهشته درازکوه از کنگرانی‌فراهانی و همکاران (۱۳۹۲ب)، نهشته کمبلو از کنگرانی‌فراهانی و همکاران (۱۳۹۳)، نهشته بوکسیتی زان از کلاگری و همکاران (Calagari et al., 2015)، نهشته زرج‌سو از قاسمی و همکاران (۱۳۹۸) و نهشته‌های سیاه‌رودبار و سپارده از کیااشکوریان و همکاران (Kiaeshkevarian et al., 2020) است.

Figure 10. Position of the Gano bauxite ores in the a) Eu/Eu^* vs. TiO_2/Al_2O_3 bivariate diagram (Mameli et al., 2007) and b) Eu/Eu^* vs. Sm/Nd bivariate diagram and its comparison with some bauxite deposits in the Alborz structural zone. The average composition of upper continental crust (UCC), basalt, and granite are from Mameli et al. (2007), the cratonic sandstone from Condrie (1993), the andesite and Australian Post-Archean Shale (PAAS) from Taylor and McLennan (1985), and the basalt from Taylor (1964). Data of the Jajarm bauxite deposit are from Esmaily et al. (2010), the Shahbolaghi deposit from Kangarani Farahani et al. (2014a), the Derazkuh deposit from Kangarani Farahani et al. (2014b), the Kambelu deposit from Kangarani Farahani et al. (2015), the Zan deposit from Calagari et al. (2015), the Zaraj-Sou deposit from Ghasemi et al. (2019), and the Siahroddar and Separdeh deposits from Kiaeshkevarian et al. (2020).

۵- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی نهشته بوکسیت گانو عبارتند از:

- ۱- بر اساس تجزیه‌های پراش پرتو X (XRD) کانسنگ‌های بوکسیتی گانو از فازهای کانیایی اصلی دیاسپور و هماتیت، به همراه فازهای کانیایی فرعی کائولینیت، کلریت، آاناتاز، ایلیت، زونیت، گوتیت، کوارتز و دولومیت تشکیل شده‌اند.
- ۲- نوسانات سطح سفره آب‌های زیرزمینی، آب‌های جوی فرورو با ماهیت اسیدی و افزایش pH محلول‌های هوازه‌کننده با نزدیک شدن به سنگ‌های بستر کربناته و متعاقباً سازوکارهای آهن‌زدایی - آهن‌افزایی نقش مهمی در شکل‌گیری کانسنگ‌های فقیر از آهن در بخش‌های بالایی و کانسنگ‌های غنی از آهن در بخش‌های زیرین نیمرخ مورد مطالعه ایفا کرده‌اند.
- ۳- رخداد بی‌هنجاری مثبت Ce بین افزایش پتانسیل اکسیداسیون در زمان تشکیل و توسعه کانسنگ‌های بوکسیتی، روبش احتمالی عنصر Ce توسط کانی‌های سفاتی

ثانویه و یا حتی نوسانات سطح سفره‌های آب‌های زیرزمینی و بافر بودن سنگ‌های بستر کربناته می‌باشد.

۴- تغییرات ناموزون نسبت‌های $(La/Yb)_N$ ، $(LREE/HREE)_N$ و La/Y در کانسنگ‌های بوکسیتی نقش نوسانات آب‌های زیرزمینی و تغییرات pH محلول‌های هوازه‌کننده را در طی تکوین کانسنگ‌های بوکسیتی آشکار می‌سازد. عملکرد سنگ بستر کربناته به عنوان یک عامل زمین‌شیمیایی و ترسیب همزمان کانی‌های آهن‌دار و روبش ترجیحی $LREE_{(La-Eu)}$ توسط هماتیت نقش مهمی در توزیع و تحرک عناصر نادر خاکی در کانسنگ‌های بوکسیتی داشته‌اند.

۵- سنگ‌هایی آذرین با ماهیت حدواسط را می‌توان به عنوان محتمل‌ترین سنگ مادر کانسنگ‌های بوکسیتی گانو در نظر گرفت که نتیجه حاصله با رخنمون سنگ‌های آذرین حدواسط تا بازیک در قاعده توالی شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و زغال سنگ سازند شمشک در زون ساختاری البرز همخوانی دارد.

کتاب‌نگاری

- زمانیان، ح.، بیرانوند، ق. و احمدنژاد، ف.، ۱۳۹۸، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و منشا کانسار بوکسیت کارستی باگوشی، شمال غربی استان فارس، ایران. فصلنامه علوم زمین، شهریور ۱۳۹۸، سال بیست و هشتم، شماره ۱۱۲، ص ۲۶۹-۲۸۰. https://www.gsjournal.ir/article_92525.html.
- سعیدی، ع. و اکبرپور، م.، ۱۳۷۱، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شرکت آلومینای ایران، ۱۳۸۴، گزارش عملیات پایانی اکتشاف بوکسیت گانو، انتشار نیافته.
- شهابی، ش.، ۱۳۹۹، شیمی کانی، ژئوشیمی سنگ کل و ایزوتوپی و پتروژنز سنگ‌های آذرین موجود در سازند شمشک در پهنه البرز شرقی و مرکزی. رساله دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۳۸۱ ص.
- قاسمی، م.، عابدینی، ع. و کلاگری، ع.ا.، ۱۳۹۸، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عناصر خاکی نادر نهشته بوکسیت زرج‌سو، جنوب غرب رامسر، شمال ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، تابستان ۹۸، سال بیست و هفتم، شماره ۲، ص ۲۹۵-۳۰۶. <http://ijcm.ir/article-1-1266-fa.html>.
- کنگرانی‌فراهانی، ف.، عابدینی، ع. و کلاگری، ع.ا.، ۱۳۹۲b، سیماهای کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی نهشته لاتریت رسی تریاس-ژوراسیک در درازکوه، غرب دامغان، استان سمنان. نشریه رسوب‌شناسی کاربردی، پاییز و زمستان ۱۳۹۲، جلد ۲، ص ۵۱-۶۷. <https://www.magiran.com/paper/1238386>.
- کنگرانی‌فراهانی، ف.، کلاگری، ع.ا. و عابدینی، ع.، ۱۳۹۳، کانی‌شناسی و ژئوشیمی نهشته لاتریتی کمبلو، باختر دامغان، استان سمنان. فصلنامه علوم زمین، زمستان ۱۳۹۳، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴، ص ۳۴۹-۳۵۸. https://www.gsjournal.ir/article_42963.html.
- کنگرانی‌فراهانی، ف.، کلاگری، ع.ا. و عابدینی، ع.، ۱۳۹۲a، ویژگی‌های ژئوشیمیایی نهشته لاتریتی شاه بلاغی، جنوب خاور دماوند، استان تهران. فصلنامه علوم زمین، تابستان ۹۳، سال بیست و سوم، شماره ۹۲، ص ۱۶۵-۱۷۶. <https://doi.org/10.22071/gsj.2014.43697>.

References

- Abedini, A., Calagari, A.A., and Rezaei Azizi, M., 2018. The tetrad-effect in rare earth elements distribution patterns of titanium-rich bauxites: Evidence from the Kanigorgeh deposit, NW Iran, J. Geochem. Explor. 186, 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.12.007>.
- Abedini, A., Mongelli, G., and Khosravi, M., 2021. Geochemical constraints on the middle Triassic Kani Zarrineh karst bauxite deposit, Irano-Himalayan belt, NW Iran: Implications for elemental fractionation and parental affinity, Ore Geol. Rev. 133, 104099. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104099>.
- Abedini, A., Mongelli, G., and Khosravi, M., 2022. Geochemistry of the early Jurassic Soleiman Kandi bauxite deposit, Irano-Himalayan belt, NW Iran: Constraints on bauxite genesis and the distribution of critical raw materials, J. Geochem. Explor. 241, 107056. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107056>.
- Ahmadnejad, F., and Mongelli, G., 2022. Geology, geochemistry, and genesis of REY minerals of the late Cretaceous karst bauxite deposits, Zagros Simply Folded Belt, SW Iran: Constraints on the ore-forming process J. Geochem. Explor. 240, 107030. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107030>.
- Ahmadnejad, F., Zamanian, H., Taghipour, B., Zarasvandi, A., Buccione, R., and Ellahi, S.S., 2017. Mineralogical and geochemical evolution of the Bidgol bauxite deposit, Zagros Mountain Belt, Iran: Implications for ore genesis, rare earth elements fractionation and parental affinity, Ore Geol. Rev. 86, 755-783. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.006>.
- Babechuk, M.G., Widdowson, M., and Kamber, B.S., 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India, Chem. Geol. 363, 56-75. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.027>.

- Bárdossy, G., 1982. Karst bauxites. In: Elsevier Scientific, Amsterdam, 441 p.
- Bárdossy, G., and Aleva, G.J.J., 1990. Lateritic Bauxites. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam, 646 p.
- Beyala, V.K.K., Onana, V.L., Priso, E.N.E., Parisot, J.C., and Ekodeck, G.E., 2009. Behaviour of REE and mass balance calculations in a lateritic profile over chlorite schists in South Cameroon, Chem. Erde. 69, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2008.08.003>.
- Braun, J.J., Pagel, M., Muller, J.P., Bilong, P., Michard, A., and Guillet, B., 1990. Ce anomalies in lateritic profiles, Geochim. Cosmochim. Acta. 54, 781–795. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)7037-0016/S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)7037-0016/S).
- Braun, J.J., Viers, J., Dupre, B., Polve, M., Ndam, J., and Muller, J.P., 1998. Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: The implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions, Geochim. Cosmochim. Acta 62, 273–299. [https://doi.org/10.1016/S001600344\(97\)7037-X](https://doi.org/10.1016/S001600344(97)7037-X).
- Calagari, A.A., Farahani, F.K., and Abedini, A., 2015. Geochemical characteristics of a laterite: The Jurassic Zan deposit, Iran, Acta Geodyn. et Geomater. 12, 67–77.
- Cantrell, K.J., and Byrne, R.H., 1987. Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions, Geochim. Cosmochim. Acta. 51, 597–605. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)7037-0016/X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)7037-0016/X).
- Condie, K.C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales, Chem. Geol. 104(1–4), 1–37. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)2541-0009/E](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)2541-0009/E).
- Coppin, F., Berger, G., Castet, S., and Loubet, M., 2002. Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite, Chem. Geol. 182, 57–68. [https://doi.org/10.1016/S00092-00283\(01\)2541-](https://doi.org/10.1016/S00092-00283(01)2541-).
- Crinci, J., and Jurkowic, I., 1990. Rare earth elements in Triassic bauxites of Croatia, Yugoslavia. Travaux, 19, 239–248. <https://doi.org/10.3390/min1111260>.
- Deluca, F., Mongelli, G., Paternoster, M., and Zhu, Y., 2020. Rare earth elements distribution and geochemical behaviour in the volcanic groundwaters of Mount Vulture, southern Italy, Chem. Geol. 539, 119503. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119503>.
- Esmacily, D., Rahimpour-Bonab, H., Esna-Ashari, A., and Kananian, A., 2010. Petrography and geochemistry of the Jajarm karst bauxite ore deposit, NE Iran: Implications for source rock material and ore genesis, Turk. J. Earth Sci. 19, 267–284. <https://doi.org/10.3906/yer-080615->.
- Ghasemi, M., Abedini, A., and Calagari, A.A., 2019. Mineralogy and REEs geochemistry of the Zaraj-Sou bauxite deposit, southwest of Ramsar, north Iran. Iran, J. Crystallogr. Mineral. 27 (2), 295–306. <http://ijcm.ir/article-11266-fa.html>. (In Persian)
- Haniçli, N., 2013. Geological and geochemical evolution of the Bolkardagi bauxite deposits, Karaman, Turkey: Transformation from shale to bauxite, J. Geochem. Explor. 133, 118–137. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.04.004>.
- Iran Alumina Company, 2005. Final exploration report of the Gano bauxite, unpublished data. (In Persian)
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., and Lyons, W.B., 1996. Rare earth element complexation behavior in circumneutral pH groundwaters: Assessing the role of carbonate and phosphate ions, Earth Planet. Sci. Lett. 139, 305–319. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)000167-](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)000167-).
- Kangarani Farahani, F., Abedini, A., and Calagari, A.A., 2014b. Mineralogical and geochemical features of Triassic–Jurassic clayey laterite deposit in Derazkuh, west of Damghan, Semnan province, Appl. Sedimento. 1 (2), 51–67. <https://www.magiran.com/paper/1238386>. (In Persian)
- Kangarani Farahani, F., Abedini, A., and Calagari, A.A., 2015. Mineralogy and geochemistry of Kambelu laterite deposit, west of Damghan, Semnan province, J. Geosci. 24 (94), 349–358. https://www.gsjournal.ir/article_42963.html. (In Persian)
- Kangarani Farahani, F., Calagari, A.A., and Abedini, A., 2014a. Geochemical characteristics of Shahbolaghi laterite deposit, southeast of Damavand, Tehran province, J. Geosci. 23 (92), 165–176. <https://doi.org/10.22071/gsj.2014.43697>. (In Persian)
- Kiaeshkevarian, M., Calagari, A.A., and Shamanian, G., 2020. Geochemical and mineralogical features of karst bauxite deposits from the Alborz zone (Northern Iran): Implications for conditions of formation, behavior of trace and rare earth elements and parental affinity, Ore Geol. Rev. 125, 103691. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103691>.
- Lopez, J.M.G., Bauluz, B., Fernández-Nieto, C., and Oliete, A.Y., 2005. Factors controlling the trace element distribution in fine-grained rocks: The Albian kaolinite-rich deposits of the Oliete Basin (NE Spain), Chem. Geol. 214, 1–19.
- Ma, J., Wei, G., Xu, Y., Long, W., and Sun, W., 2007. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China, Geochim. Cosmochim. Acta. 71, 3223–3237. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.035>.
- MacLean, W.H., Bonavia, F.F., and Sanna, G., 1997. Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: Evidence from immobile elements geochemistry at the Olmedo deposit, Sardinia, Miner. Depos. 32, 607–616. <https://doi.org/10.1007/s001260050126>.
- Mameli, P., Mongelli, G., and Dinelli, E., 2007. Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits

- from Nurra (western Sardinia, Italy): Insights on conditions of formation and parental affinity, *Int. J. Earth Sci.* 96, 887–902. <https://doi.org/10.1007/s005312-0142-006->.
- Meyer, F.M., Happel, U., Hausberg, J., and Wiechowski, A., 2002. The geometry and anatomy of the Pijigaos bauxite deposit, Venezuela, *Ore Geol. Rev.* 20, 27–54. [https://doi.org/10.1016/S01699-00037\(02\)1368-](https://doi.org/10.1016/S01699-00037(02)1368-).
- Mongelli, G., Boni, M., Buccione, R., and Sinisi, R., 2014. Geochemistry of the Apulian karst bauxites (southern Italy): chemical fractionation and parental affinities, *Ore Geol. Rev.* 63, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.04.012>.
- Patino, L.C., Velbel, M.A., Price, J.R., and Wade, J.A., 2003. Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and Guatemala, *Chem. Geol.* 202, 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.01.002>.
- Radusinović, S., Jelenković, R., Pačevski, A., Simić, V., Božović, D., Holclajtner-Antunović, I., and Životić, D., 2017. Content and mode of occurrences of rare earth elements in the Zagrad karstic bauxite deposit (Nikšić area, Montenegro, *Ore Geol. Rev.* 80, 406–428. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.026>.
- Ronov, A.B., Balashov, Y.A., and Migdisov, A., 1967. Geochemistry of the rare earths in the sedimentary cycle, *Geochem. Int.* 4, 1–17.
- Saidi, A., and Akbarpour, M., 1992. *The 1:100,000 Geological map of Kiasar. Geological Survey of Iran. (In Persian)*
- Salamab-Ellahi, S., Taghipour, B., and Mongelli, G., 2019. Clayey bauxite from the Irano–Himalayan belt: Critical metals, provenance and palaeoclimate in the Upper Cretaceous Semirom ore deposit, Zagros Mountain, Iran, *J. Asian Earth Sci.* 172, 126–142. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.09.001>.
- Shahabi, S., 2021. *Mineral chemistry, whole rock and isotopic geochemistry and petrogenesis of igneous rocks of Shemshak Formation in eastern and central Alborz zone, PhD dissertation, Shahrood University of Technology, 381 p. (In Persian)*
- Solar, J.M., and Lasaga, A.C., 2000. The Los Pijiguas bauxite deposit (Venezuela): A compilation of field data and implications for the bauxitization process, *J. S. Am. Earth Sci.* 13, 47–65. [https://doi.org/10.1016/S08959-00007\(00\)9811-](https://doi.org/10.1016/S08959-00007(00)9811-).
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review, *AAPG Bull.*, 52, 1229–1258.
- Sun, S.S., and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, London, 313–345.
- Tardy, Y., Kolbisek, B., and Paquet, H., 1990. Influence of Periatlantic climates and paleoclimates on the distribution and mineralogical composition of bauxites and ferricretes, *Chem. Geol.* 84, 179–182. [https://doi.org/10.1016/0205-\(90\)2541-0009/L](https://doi.org/10.1016/0205-(90)2541-0009/L).
- Tardy, Y., Kolbisek, B., and Paquet, H., 1991. Mineralogical composition and geographical distribution old African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia, *J. Afr. Earth Sci.* 12, 283–295. [https://doi.org/10.1016/0077-\(91\)5362-0899/C](https://doi.org/10.1016/0077-(91)5362-0899/C).
- Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table, *Geochim. Cosmochim. Acta.* 196, 1273–1285. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)7037-0016/](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)7037-0016/).
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution.* Blackwell, Oxford.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust, *Rev. Geophys.* 33, 241–265. <https://doi.org/10.1029/1995RG00262>.
- Viers, J., and Wasserburg, G.J., 2004. Behavior of Sm and Nd in a lateritic soil profile, *Geochim. Cosmochim. Acta.* 68(9), 2043–2054. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.034>.
- Wang, Q.F., Deng, J., Liu, X.F., Zhang, Q.Z., Sun, S.L., Jiang, C.Z., and Zhou, F., 2010. Discovery of the REE minerals and its geological significance in the Quyang bauxite deposit, West Guangxi, China, *J. Asian Earth Sci.* 39, 701–712. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.05.005>.
- White, R.A., 2000. *The behaviour of the rare earth elements in Ochreous mine drainage.* Unpublished Ph.D. Thesis, University of Wales, Aberystwyth, UK.
- Zamanian, H., Beiranvand, G., and Ahmadnejad, F., 2019. *Mineralogy, geochemistry and the origin of the Bagoushi karst bauxite deposit, northwestern Fars province, Iran, J. Geosci.* 28 (112), 269–280. https://www.gsjournal.ir/article_92525.html. (In Persian)
- Zarasvandi, A., Carranza, E.J.M., and Ellahi, S.S., 2012. Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Dehnow bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran, *Ore Geol. Rev.* 48, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.02.010>.
- Zarasvandi, A., Zamanian, H., and Hejazi, E., 2010. Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains. Iran, *J. Geochem. Explor.* 107, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.06.007>.