

Research Article

Mineralogy, geochemistry and origin of the Qarkhotlou bauxite deposit, southwest of Zanjan

Farzaneh Nouri Nav¹, Hossein Kouhestani^{1*}, Mir Ali Asghar Mokhtari¹, Afshin Zohdi¹

1- Department of Geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Keywords: Karst bauxite, Mineralogy, Geochemistry, Permo-Triassic, Qarkhotlou, Zanjan

1- Introduction

Bauxite resources are Al (Ga and REEs) economic concentrations formed from intense alteration and chemical weathering of aluminosilicate-rich parent rocks (Bárdossy, 1982; Laskou, 1991, 2003; Evans, 1993; Liu et al., 2010; Putzolu et al., 2018; Sinisi, 2018). These residual deposits are mainly formed under humid tropical to sub-tropical climates, with annual rainfalls exceeding 1.2m and average temperatures higher than 22°C (Bárdossy and Aleva, 1990). According to the mineralogy, geochemistry and host lithology, bauxite deposits can be grouped into three genetic types: lateritic, karst, and Tikhvin (Bardossy and Aleva, 1990). Lateritic bauxites are derived by in situ and direct lateralization of aluminosilicate rocks. Tikhvin bauxites are detrital and transported deposits overlying the eroded surface of aluminosilicate rocks without any relationship with the original residual profile rocks. They are the erosional product of pre-existing lateritic bauxite deposits. Karst bauxites are formed on the more or less karstified and/or eroded surfaces of carbonate rocks.

The most important known bauxite deposits in Iran belong to the Irano-Himalayan bauxite belt. They can be divided spatially and temporally into five age groups (Calagari and Abedini, 2007; Ahmadnejad et al., 2017; Khadivar and Taghipour, 2019):

1. Permian deposits in NW Iran and in some parts of the Central Plateau of Iran (CPI)
2. Permo-Triassic deposits in NW Iran, Alborz Mountain Chain (AMC), and in some parts of the CPI
3. Triassic deposits in CPI
4. Triassic to Lower Jurassic deposits in the AMC and in some parts of the CPI
5. Cretaceous deposits in the Zagros folded belt

They are similar to Mediterranean karst bauxites (Zarasvandi et al., 2008, 2010, 2012; Mongelli et al., 2014, 2015, 2016; Zamanian et al., 2016; Abedini et al., 2018).

Qarkhotlou and several other bauxite deposits and resources were recently explored in Soltanieh–Mahnesan Belt (SMB) by private companies. However, the final exploration reports show no published literature about these bauxite deposits' geological, mineralogical and geochemical characteristics in the SMB. In this contribution, we provide the first detailed petrographical, textural and geochemical studies in the Qarkhotlou deposit to reveal more details of the ore-forming process, identify the precursor rock(s), and conditions bauxite deposit formation.

2- Materials and methods

Detailed fieldwork has been carried out at different scales in the Qarkhotlou area. During the field works, detailed stratigraphic sections were measured, sampled and described. Forty samples were collected from different parts of the bauxite horizon in the Qarkhotlou deposit for mineralogical and geochemical analysis. In addition, samples were also collected from rock units below and above the deposit. Thirty-five samples were selected to prepare

* Corresponding author: kouhestani@znu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.36773.2210

Received 2021-02-26

Accepted 2021-06-26

thin and thin-polished sections in the University of Zanjan, Zanjan, Iran. Mineralogical and textural studies of these samples were carried out using optical microscopy and XRD. The latter was performed at the XRD Laboratory, Zarazma, Tehran. In addition, 13 representative samples from the bauxite horizon and 1 sample from trachy andesibasalt lava below the deposit were analyzed for major and trace elements using XRF and ICP-MS in the Zarazma Analytical Laboratories, Tehran.

3-Results and discussion

The Qarkhotlou bauxite deposit is located 25km southwest of Zanjan. Rock units exposed in this area include Cambrian dolomite and dolomitic limestone (Mila Fm.), lower Permian sandstone (Doroud Fm.), middle to late Permian limestone (Ruteh Fm.), lower Jurassic shale and sandstone (Shemshak Fm.) and Quaternary sediments. The bauxite occurs as a semi-continuous stratiform horizon occupying karst cavities near or at the boundary between the Ruteh and Shemshak Formations. It is trending NW-SE over 300m, dips 30-40° SW and varies in thickness from 15 to 30m. The small-scale strike-slip faults have offset the bauxite horizon (<10m). Based on colour, facies and textural features, three distinct bauxitic facies are distinguished in the Qarkhotlou deposit, which, from bottom to top, include (1) lower red-brown pisolitic bauxite, (2) middle red bauxite and (3) upper yellow bauxite. There are also irregular patches of trachyandesibasalt lavas between Ruteh and Shemshak Formations beneath the bauxite horizon.

Mineralogical compositions are essentially similar in all the bauxite samples. Detailed textural and mineralogical analysis based on optical microscopy and XRD data revealed that hematite, goethite, boehmite, diasporite, kaolinite, and pyrophyllite are the major mineral components in the Qarkhotlou bauxite ores; sericite-illite, anatase, rutile, and chlorite are minor minerals. The matrix-forming minerals in the bauxite ores are cryptocrystalline boehmite, diasporite, kaolinite, and pyrophyllite. Petrographic observations indicate that panidiomorphic, microgranular, pelitomorphitic, pisolitic, and oolitic are the main texture-forming components in the Qarkhotlou ores. These ores textures suggest that the bauxite material has an authigenic origin (Gu et al., 2013; Ahmadnejad et al., 2017). However, the clastic assemblages in the pelitomorphitic matrix, the ore flow, and breccia textures indicate that the bauxite at Qarkhotlou experienced transportation and re-deposition.

Geochemical data indicate that the Qarkhotlou bauxite deposit has bauxite and bauxitic clay compositions and suggests that trachyandesibasalt lavas are the main component of their parent material. The data reveals that the Qarkhotlou bauxite horizon has formed in pH 4 to 7 and Eh of 0.4 to 0.6 and a moderate degree of lateralization. The bauxite samples and trachy andesibasalt lava show similar chondrite-normalized REE patterns indicating that they are genetically related. Geochemical investigations reveal that the main components of the ores are Al_2O_3 , Fe_2O_3 and TiO_2 . In addition, immobile elements like Zr, Cr, Hf, V, Th, U and Ta were distinctly enriched during the bauxitization.

4- Conclusions

The petrographical, textural and geochemical studies of the Qarkhotlou deposit indicate that this deposit can be classified as Mediterranean karst bauxite.

Acknowledgment

This research was funded by the office of the Vice Chancellor for Research and Technology, University of Zanjan. We acknowledge their support. The journal of Advanced Applied Geology reviewers and editors are also thanked for their constructive suggestions on the manuscript alterations.

References

- Abedini, A., Calagari, A.A., Rezaei Azizi, M., 2018. The tetrad-effect in rare earth elements distribution patterns of titanium-rich bauxites: Evidence from the Kanigorgeh deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 186, 129–142.



- Ahmadnejad, F., Zamanian, H., Taghipour, B., Zarasvandi, A., Buccione, R., 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 Geology Reviews* 86, 755–783.
- Bárdossy, G., 1982. *Karst bauxites*, Elsevier Scientific Publication, Amsterdam. p. 441.
- Bárdossy, G., Aleva, G.J.J., 1990. Lateritic bauxites. *Developments in Economic Geology* 27, Elsevier Scientific Publication, Amsterdam, p. 624.
- Calagari, A.A., Abedini, A., 2007. Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 94(1–3), 1–18.
- Evans, A.M., 1993. *Ore Geology and industrial minerals: An introduction*, Blackwell, London, p. 389.
- Khadivar, Sh., Taghipour, B., 2019. Geochemistry, genesis and behavior of the rare elements in Chah-Gheib laterite deposit, Ghader Abad, Fars Province. *Advanced Applied Geology* 9(2), 120–132.
- Laskou, M., 1991. Concentrations of rare earths in Greek bauxites. *Acta Geologica Hungarica* 34(4), 195–404.
- Laskou, M., 2003. Geochemical and mineralogical characteristics of the bauxite deposits of Western Greece. *Mineral Exploration and Sustainable Development* 77(1), 93–96.
- Liu, X., Wang, Q., Deng, J., Zhang, Q., Sun, S., Meng, J., 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. *Journal of Geochemical Exploration* 105(3), 137–152.
- Mongelli, G., Boni, M., Buccione, R., Sinisi, R., 2014. Geochemistry of the Apulian karst bauxites (southern Italy): Chemical fractionation and parental affinities. *Ore Geology Reviews* 63, 9–21.
- Mongelli, G., Buccione, R., Gueguen, E., Langone, A., Sinisi, R., 2016. Geochemistry of the Apulian allochthonous karst bauxite, southern Italy: Distribution of critical elements and constraints on Late Cretaceous Peri-Tethyan palaeogeography. *Ore Geology Reviews* 77, 246–259.
- Mongelli, G., Buccione, R., Sinisi, R., 2015. Genesis of autochthonous and allochthonous Apulian karst bauxites (southern Italy): Climate constraints. *Sedimentary Geology* 325, 168–176.
- Putzolu, F., Papa, A.P., Mondillo, N., Boni, M., Balassone, G., Mormone, A., 2018. Geochemical characterization of bauxite deposits from the Abruzzi mining district (Italy). *Minerals* 8 (298), 1–24.
- Sinsi, R., 2018. Mineralogical and geochemical features of Cretaceous bauxite from San Giovanni Rotondo (Apulia, southern Italy): A provenance tool. *Minerals* 8(567), 1–19.
- Zamanian, H., Ahmadnejad, F., Zarasvandi, A., 2016. Mineralogical and geochemical investigations of the Mombi bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Chemie der Erde (Geochemistry)* 76(1), 13–37.
- Zarasvandi, A., Carranza, E.J.M., Ellahi, S.S., 2012. Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Deh-now bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 48, 125–138.
- Zarasvandi, A., Charchi, A., Carranza, E.J.M., Alizadeh, B., 2008. Karst bauxite deposits in the Zagros mountain belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 34(4), 521–532.
- Zarasvandi, A., Zamanian, H., Hejazi, E., 2010. Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 107(1), 77–85.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Nouri Nav, F., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Zohdi, A., 2022. Mineralogy, geochemistry and origin of the Qarkhotlou bauxite deposit, southwest of Zanjan. *Adv. Appl. Geol.* 12(3), 424-451.

DOI: 10.22055/AAG.2021.36773.2210

url: https://aag.scu.ac.ir/article_17045.html?lang=en

©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.



کانی شناسی، زمین شیمی و منشاء نهشته بوکسیت قارخوتلو، جنوب باختر زنجان

فرزانه نوری ناو

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

حسین کوهستانی*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

میرعلی اصغر مختاری

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

افشین زهدی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان

*Kouhestani@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

چکیده

نهشته بوکسیت قارخوتلو در ۲۵ کیلومتری جنوب باختر زنجان واقع شده است. این نهشته به شکل یک افق چینه‌سان بین سازندهای روته و شمشک و درون سطوح فرسایشی و حفرات کارستی سازند روته تشکیل شده است. این افق حدود ۳۰۰ متر درازا و بین ۱۵ تا ۳۰ متر ضخامت داشته و با شیبی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (متوسط ۳۵ درجه) به سمت جنوب باختر، با لایه‌های دربرگیرنده خود هم‌شیب می‌باشد. نهشته بوکسیت قارخوتلو دارای تناوب لایه‌ای بوده و از پایین به بالا به سه بخش بوکسیت پیروئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی، بوکسیت قرمز میانی و بوکسیت زرد بالایی قابل تفکیک است. هماتیت، گوتیت، بوهمیت، دیاسپور، کائولینیت و پیروفیلیت کانی‌های اصلی موجود در بوکسیت قارخوتلو هستند که با سریسیست - ایلیت، آاناتاز، روتیل و کلریت همراهی می‌شوند. بافت‌های پان‌ایدیومورفیک، میکروگرانولار، پلیتومورفیک، پیروئیدی و اووئیدی، از مهم‌ترین بافت‌های موجود در نهشته بوکسیت قارخوتلو هستند. این بافت‌ها بیانگر تشکیل برجای مواد بوکسیتی از سنگ منشاء خود است. با این وجود، حضور قطعات پلوئیدی و آواری و ساخت‌های جریان‌ی و پرشی نشان‌دهنده حمل و جابه‌جایی کوتاه مواد بوکسیتی از محیط اولیه تشکیل و ته‌نشست مجدد در محیط‌های رسوبی کارستی و یا سطوح فرسایشی می‌باشد. فرایند آهن‌شویی از مهم‌ترین فرایندهای اپی‌ژنتیک در نهشته بوکسیت قارخوتلو است. بر اساس مطالعات زمین‌شیمیایی، نهشته بوکسیت قارخوتلو از نوع بوکسیت و رس بوکسیتی بوده و دارای سنگ منشاء تراکی آندزی‌بازالتی می‌باشد. این نهشته در pH بین ۴ تا ۸ و Eh حدود ۰/۴ تا ۰/۶ تشکیل شده و درجات متوسطی از فرایند لاتریتی‌شدن را متحمل شده است. نمونه‌های بوکسیتی و گدازه تراکی آندزی‌بازالتی دارای الگوهای مشابه و پرشیب عناصر کمیاب خاکی با نسبت بالای عناصر کمیاب خاکی سبک به عناصر کمیاب خاکی سنگین ($LREE/HREE=1/62$) هستند. این الگو با تفکیک این عناصر طی فرایند بوکسیت‌زایی هم‌خوان بوده و بیانگر ارتباط ژنتیکی افق بوکسیتی با گدازه‌های تراکی آندزی‌بازالتی است. داده‌های زمین‌شیمیایی نشان دهنده غنی‌شدن Fe_2O_3 ، Al_2O_3 و TiO_2 و عناصر نامتحرک مانند U، Th، V، Hf، Cr، Zn و Ta طی فرایند بوکسیت‌زایی است. نهشته قارخوتلو بیشترین شباهت را با نهشته‌های بوکسیت کارستی (زیرتیپ مدیترانه‌ای) دارد

کلمات کلیدی: بوکسیت کارستی، کانی شناسی، زمین شیمی، پرمو - تریاس، قارخوتلو، زنجان

مقدمه

بیشتر در آب و هوای گرم و مرطوب استوایی تا نیمه‌استوایی با میزان بارش بیش از ۱/۲ متر در سال و میانگین دمایی بیش از ۲۲ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند (Bárdossy, 1982, Bárdossy and Aleva, 1990). بوکسیت‌ها به دلیل ثبت رویدادهای اقلیمی، زیستی و خاک (Valeton, 1999) می‌توانند به عنوان یکی از شاخص‌های

بوکسیت‌ها از منابع اصلی آلومینیم (گالیم و عناصر کمیاب خاکی) هستند که از دگرسانی و هوازدگی شیمیایی شدید سنگ‌های غنی از کانی‌های آلومینیوسیلیکاتی تشکیل می‌شوند (Bárdossy, 1982; Laskou, 1991, 2003; Evans, 1993; Liu et al., 2010; Putzolu et al., 2018; Sinisi, 2018). این ذخایر برجامانده،

منشاء و خاستگاه آن تعیین شده است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگوی اکتشافی برای ذخایر بوکسیتی در محور سلطانیه - ماه‌نشان و دیگر نهشته‌های بوکسیتی ایران با سن پرمو - تریاس مورد استفاده قرار گیرد.

زمین‌شناسی منطقه قارخوتلو

بر اساس نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ زنجان (Babakhani and Sadeghi, 2004) و با توجه به پیمایش‌های صحرایی انجام شده در قالب تهیه نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۵۰۰۰ واحدهای سنگی موجود در منطقه مورد مطالعه شامل سازندهای میلادورود، روته، افق بوکسیتی، سازند شمشک و نهشته‌های کواترنری می‌باشند (شکل ۱). سازند میلادورود شامل واحدهای دولومیتی و سنگ آهک دولومیتی تیره رنگ است که بیشتر در بخش‌های شمال خاور تا خاور و جنوب خاور منطقه گسترش دارد (شکل ۱). واحدهای مزبور عمدتاً ضخیم‌لایه و چرت‌دار بوده و به‌طور هم‌شیب بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته و خود نیز به‌طور ناپیوسته توسط واحدهای ماسه‌سنگی سازند دورود پوشیده شده‌اند (شکل ۲). سازند دورود با ضخامت حدود ۲۰ متر، بیشتر در قسمت‌های مرکزی، شمال و جنوب خاوری منطقه قارخوتلو رخنمون دارد (شکل ۱). این سازند شامل تناوبی از ماسه‌سنگ‌های قرمز با میان‌لایه‌هایی از کنگلومرا بوده و در قسمت‌های فوقانی آن، بخش‌های کوارتزیتی سفید رنگ قابل مشاهده است. ماسه‌سنگ‌ها عمدتاً نازک تا متوسط‌لایه هستند. امتداد لایه‌های این سازند، شمال باختری - جنوب خاوری با شیب حدود ۳۰ درجه به سمت جنوب باختر می‌باشد. سازند دورود به‌صورت ناپیوسته با مرز فرسایشی بر روی واحدهای دولومیتی سازند میلادورود قرار گرفته و خود به‌صورت هم‌شیب توسط واحدهای سنگ آهکی سازند روته پوشیده شده است (شکل ۲ و ۳). سازند روته شامل سنگ آهک‌های ماسه‌ای کرم رنگ و سنگ آهک‌های خاکستری رنگ است که با ضخامت حدود ۵۲ متر، بیشتر در قسمت‌های مرکزی و شمالی منطقه گسترش دارد (شکل ۱). سنگ آهک‌های این سازند، نازک تا ضخیم‌لایه بوده و در بعضی بخش‌ها دارای نوارها و نودول‌های چرتی و آثار فسیلی هستند. امتداد لایه‌های این سازند، شمال باختری - جنوب خاوری با شیب حدود ۳۵ درجه به سمت جنوب باختر می‌باشد. وجود گسل‌های موجود در منطقه موجب تکرار این سازند شده است. سازند روته به‌صورت هم‌شیب بر روی سازند دورود قرار داشته (شکل ۲ تا ۳) و خود نیز به‌صورت پیوسته و هم‌شیب توسط گدازه‌های آتشفشانی پوشیده شده است (شکل ۲).

افق بوکسیتی در بخش‌های مرکزی منطقه قارخوتلو گسترش دارد (شکل ۱). این افق معدنی درون سطوح فرسایشی و حفرات کارستی واحدهای آهکی سازند روته قرار گرفته و با مرز فرسایشی توسط ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک پوشیده شده است (شکل ۲). در برخی بخش‌ها، به‌طور محدود در گودی‌ها و فرورفتگی‌های سنگ‌های آهکی سازند روته که در ترانشه‌های اکتشافی نمایان شده است، بقایایی از گدازه‌های آتشفشانی در زیر افق بوکسیتی دیده می‌شود (شکل ۲ و ۳). این گدازه‌ها از نوع زیردریایی بوده و به رنگ سبز تا خاکستری مایل به

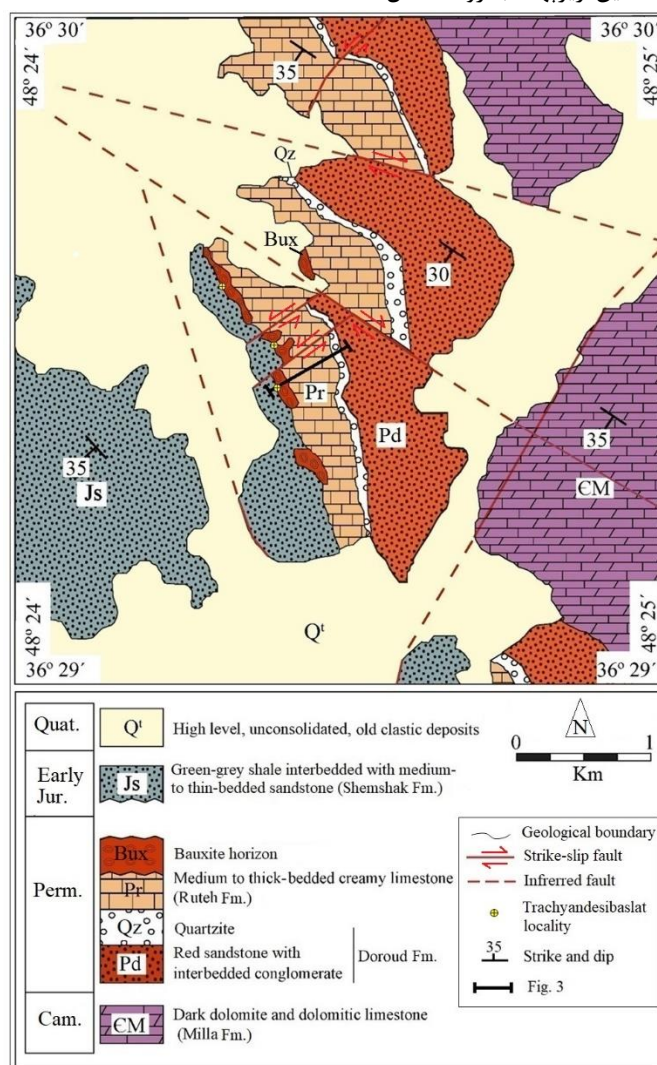
مناسب در بازسازی نقشه‌های دیرینه اقلیم و اظهار نظر درباره شرایط محیطی به‌کار روند (Bárdossy and Aleva, 1990; Price et al., 1997; Bárdossy and Combes, 1999). مطالعات کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی سنگ کل یکی از روش‌های مرسوم در مطالعه کانسنگ‌های بوکسیتی است که برای بررسی فرایندهای بوکسیتی‌شدن و تعیین سنگ منشاء کاربرد دارد (Taylor et al., 2008; Habibzadeh et al., 2014). علاوه بر این، بررسی عناصر بافتی بوکسیت‌ها کاربرد زیادی در بازسازی شرایط دیرینه محیطی و دیرینه اقلیمی دارد (Reolid et al., 2008; Taylor et al., 2008; Horbe and Anand, 2011).

تشکیل نهشته‌های بوکسیت در ایران به رخداد‌های تکتونیکی بین پرمین تا کرتاسه مربوط می‌شود. بر همین اساس، نهشته‌های بوکسیت ایران از نظر زمانی و مکانی به پنج گروه قابل تفکیک هستند (Calagari and Abedini, 2007; Ahmadnejad et al., 2017): ۱- نهشته‌های پرمین (حدود ۴۷/۶۱ درصد) در شمال باختر ایران و برخی از بخش‌های ایران مرکزی، ۲- نهشته‌های پرمو- تریاس (حدود ۱۹/۰۴ درصد) در شمال باختر ایران و رشته‌کوه‌های البرز و برخی از بخش‌های ایران مرکزی، ۳- نهشته‌های تریاس (حدود ۹/۵۲ درصد) در ایران مرکزی، ۴- نهشته‌های تریاس تا ژوراسیک آغازین (حدود ۲۱/۸ درصد) در رشته‌کوه‌های البرز و برخی از بخش‌های ایران مرکزی و زاگرس مرتفع و ۵- نهشته‌های کرتاسه (حدود ۴/۷ درصد) در کمربند چین‌خورده زاگرس. بر اساس توزیع جغرافیایی جهانی نهشته‌های بوکسیت (Bárdossy, 1982)، نهشته‌های بوکسیت در ایران به کمربند بوکسیتی ایران - هیمالیا تعلق دارند (Abedini and Calagari, 2014). این نهشته‌ها به بوکسیت‌های نوع مدیترانه‌ای شبیه بوده و در محیط‌های کارستی سکوه‌های کربناته تشکیل شده‌اند (Zarasvandi et al., 2008, 2010, 2012; Mongelli et al., 2014, 2015, 2016; Zamanian et al., 2016; Abedini et al., 2018).

مطالعات اکتشافی انجام شده در محور سلطانیه - ماه‌نشان نشان دهنده وجود رخنمون‌های متعددی از ذخایر بوکسیتی (مانند قارخوتلو، اوغول‌بیک، قالیچه‌بلاغی و میرجان) در این بخش از ایران می‌باشد (Eshghabadi, 2015). این ذخایر بر روی سنگ‌های کربناته سازند روته (به سن پرمین) و در قاعده رسوبات ژوراسیک (سازند شمشک) تشکیل شده‌اند. نهشته بوکسیت قارخوتلو در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب باختر زنجان با مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 30' 2''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 28' 82''$ طول خاوری قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده بر روی این نهشته تنها شامل مطالعات اولیه مربوط به فعالیت‌های اکتشافی توسط بخش خصوصی می‌باشد که در قالب گزارش پایان عملیات اکتشافی توسط Eshghabadi (۲۰۱۵) جمع‌بندی شده و اطلاعات علمی جامع و دقیقی در باره آن وجود ندارد. در این مقاله، کانی‌شناسی، ساخت و بافت، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و چگونگی رفتار و توزیع عناصر اصلی و جزئی در نهشته بوکسیت قارخوتلو بررسی شده و سنگ

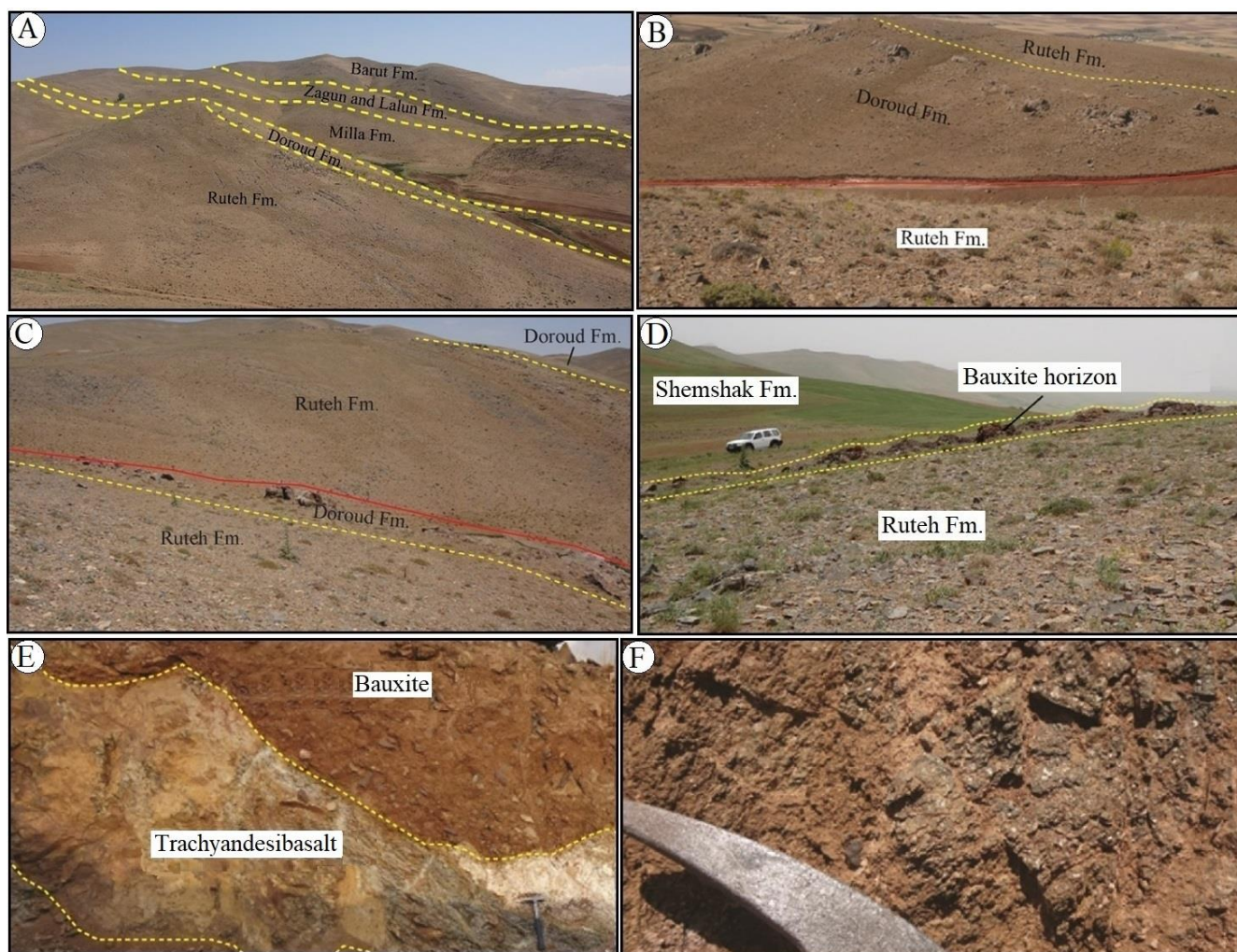
باختری - جنوب خاوری، پی سنگ بالاآمده پرکامبرین - پالئوزوئیک در پهنه ایران مرکزی است. گسل اصلی موجود در این زیرپهنه، گسل پی سنگی و عمیق سلطانیه می باشد که تکاپوی آن از پالئوزوئیک به بعد آغاز شده ولی اوج تکاپوی آن از ائوسن به بعد (الیگوسن؟) بوده است (Babakhani and Sadeghi, 2004). این گسل در بخش جنوب خاوری زیرپهنه سلطانیه، پرشیب و با جابه جایی امتدادلغز چپ گرد و در گوشه جنوب خاوری ورقه زمین شناسی ۱۰:۱۰۰۰۰۰ زنجان، شیب آن به ۳۰ تا ۴۰ درجه به طرف جنوب باختر شده و به صورت تراست نمایان می شود و سپس به سوی شمال باختر، دوباره عملکرد امتدادلغز چپ گرد با شیب زیاد دارد. گسل های موجود در منطقه قارخوتلو روندهای شمال باختری - جنوب خاوری و شمال خاوری - جنوب باختری داشته (شکل ۱) و گسل های درجه ۲ و ۳ مربوط به تکاپوی امتدادلغز گسل سلطانیه هستند. گسل های با روند شمال باختری - جنوب خاوری دارای مولفه امتدادلغز راست گرد و گسل های با روند شمال خاوری - جنوب باختری، دارای مولفه امتدادلغز چپ گرد هستند (شکل ۱). این گسل ها باعث جابه جایی نهشته های پرکامبرین و پالئوزوئیک به میزان چند ده متر شده اند.

سبز می باشند. بیشینه ضخامت این گدازه ها حدود ۱/۵ متر است (شکل e۲ و f). بر اساس مطالعات میکروسکوپی انجام شده، گدازه های آتشفشانی دارای ترکیب کلی تراکی آندزی بازالت هستند. این گدازه ها دارای بافت پورفیری بوده و درشت بلورهای آن شامل آمفیبول، بیوتیت، پلاژیوکلاز و احتمالاً پیروکسن دگرسان شده به کلریت در یک زمینه دانه ریز می باشند. آپاتیت و روتیل به عنوان کانی های فرعی در این گدازه حضور دارند. گسترش اصلی سازند شمشک در منطقه قارخوتلو در بخش های مرکزی و باختری می باشد (شکل ۱). از نظر سنگ شناسی، این سازند در منطقه قارخوتلو از واحدهای شیل سبز تا خاکستری و ماسه سنگ های خاکستری رنگ متوسط تا نازک لایه تشکیل شده است. امتداد این واحدها، شمال باختری - جنوب خاوری با شیب ۳۵ درجه به سمت جنوب باختر می باشد. سازند شمشک با مرز فرسایشی بر روی افق بوکسیتی منطقه قرار گرفته است (شکل d۲). نهشته های کواترنری شامل رسوبات آواری و پادگانه های آبرفتی و مخروط افکنه های عهد حاضر می باشند که بخش عمده منطقه قارخوتلو را پوشانده اند (شکل ۱). از نگاه ساختاری، منطقه قارخوتلو بخشی از زیرپهنه سلطانیه است (Babakhani and Sadeghi, 2004). این زیرپهنه با روند شمال



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه قارخوتلو.

Fig. 1. Geological map of the Qarkhotlou area.



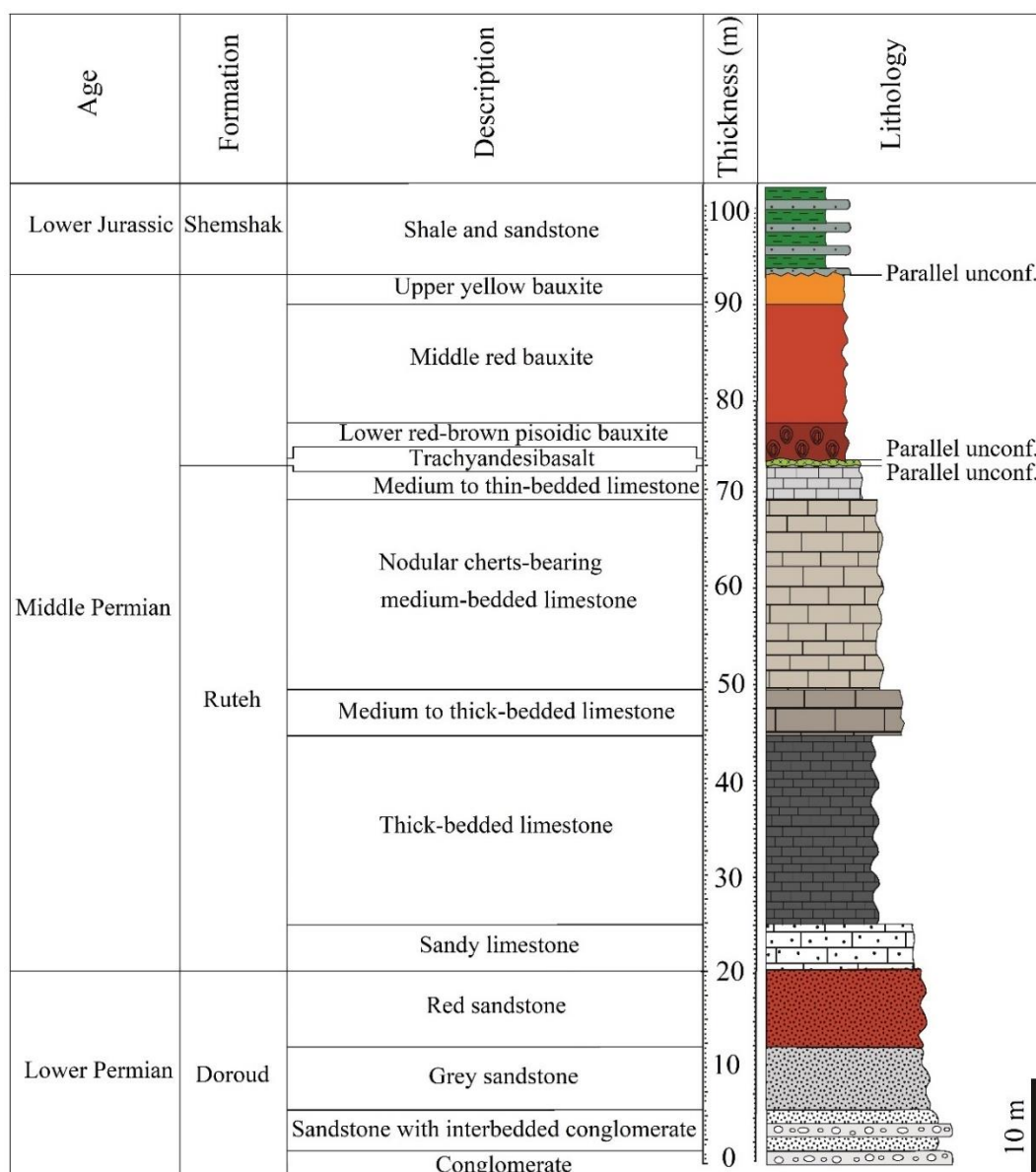
شکل ۲- (a) نمایی از سازند میلاد در منطقه قارخوتلو که توسط سازند دورود پوشیده شده است (دید به سمت شمال)، (b و c) نمایی از سازندهای دورود و روته در منطقه قارخوتلو (دید تصاویر به ترتیب به سمت جنوب و شمال)، گسل خوردگی سبب تکرار این سازندها در منطقه شده است، (d) نمایی از رخنمون افق بوکسیتی منطقه قارخوتلو در مرز سازندهای روته و شمشک (دید به سمت جنوب باختر)، (e) نمایی از بقایای گدازه تراکی آندزیزالتی در بخش زیرین افق بوکسیتی و (f) نمایی نزدیک از بقایای گدازه تراکی آندزیزالتی.

Fig. 2. (a) View of Mila Fm. in the Qarkhotlou area covered by Doroud Fm., looking to the north, (b and c) View of Doroud and Ruteh Formations in the Qarkhotlou area, looking to the south and north, respectively. Faulting caused repetition of these formations, (d) View of bauxite horizon in the Qarkhotlou area between the Ruteh and Shemshak Formations, looking to the southwest, (e) View of remnants of trachyandesibasalt lava in the lower part of the bauxite horizon, and (f) Close view of remnants of trachyandesibasalt lava.

خاکستری رنگ متوسط تا ضخیم لایه دارای مقادیر فراوان خرده‌های اسکلتی جلبک سبز و دوکفه‌ای به ضخامت ۵ متر، ۸- سنگ آهک‌های خاکستری رنگ متوسط لایه همراه با نودول‌ها و باندهای چرتی به ضخامت ۲۰ متر، ۹- سنگ آهک‌های خاکستری رنگ روشن متوسط تا نازک لایه دارای مقادیر فراوان خرده‌های اسکلتی براکیوپود و جلبک سبز به ضخامت ۳ متر، ۱۰- گدازه تراکی آندزیزالتی دگرسان شده به ضخامت ۱/۵ متر، ۱۱- افق بوکسیتی به ضخامت ۱۸/۵ متر و ۱۲- تناوب شیل و ماسه سنگ به ضخامت ۷/۵ متر. لازم به ذکر است که واحدهای ۱ تا ۴ متعلق به سازند درود، واحدهای ۵ تا ۹ متعلق به سازند روته و واحد ۱۲ متعلق به سازند شمشک می‌باشد.

چینه‌شناسی منطقه قارخوتلو

بر اساس پیمایش‌های صحرایی، توالی چینه‌شناسی منطقه قارخوتلو از پایین به بالا بدین شرح می‌باشد (شکل ۳): ۱- کنگلومرای خاکستری رنگ به ضخامت ۲ متر، ۲- ماسه سنگ‌های سفید رنگ کوارتزآرنایتی با میان لایه‌های کنگلومرایی به ضخامت ۴ متر، ۳- ماسه سنگ‌های خاکستری رنگ ریز تا متوسط دانه به ضخامت ۶ متر، ۴- ماسه سنگ‌های قرمز رنگ متوسط تا ریزدانه به ضخامت ۸ متر، ۵- سنگ آهک‌های ماسه‌ای ضخیم لایه کرم رنگ حاوی ذرات آواری (کوارتز) به ضخامت ۴ متر، ۶- سنگ آهک‌های نازک لایه کاملاً تیره رنگ دارای آلومک‌های اسکلتی براکیوپود و خارپوست به ضخامت ۲۰ متر، ۷- سنگ آهک‌های



شکل ۳- ستون سنگ‌چینه‌ای منطقه قارخوتلو.

Fig. 3. Lithostratigraphy column of the Qarkhotlou area.

هم‌شیب با لایه‌های دربرگیرنده خود می‌باشد. میزان ذخیره قطعی این نهشته بوکسیتی حدود ۶۰۰۰۰۰ تن با عیار ۲۷/۳۷ تا ۵۵/۳ (متوسط ۳۴/۵) درصد Al_2O_3 برآورد شده است (Eshghabadi, 2015). به دلیل عملکرد گسل‌های متعدد، روند افق بوکسیتی جابه‌جایی‌های زیادی را نشان می‌دهد اما به‌طور کلی این افق از امتداد عمومی سازندهای زمین‌شناسی موجود در منطقه تبعیت کرده و دارای روند شمال باختر- جنوب خاور می‌باشد. افق بوکسیتی در بخش‌هایی دارای ساخت‌های جریان‌ی و برشی است (شکل C۴ تا e) که این امر می‌تواند نشان دهنده جابه‌جایی و حمل‌شدگی کوتاه این بوکسیت‌ها پس از تشکیل و ته‌نشست مجدد آنها در حفرات کارستی و یا سطوح فرسایشی سازند روته باشد.

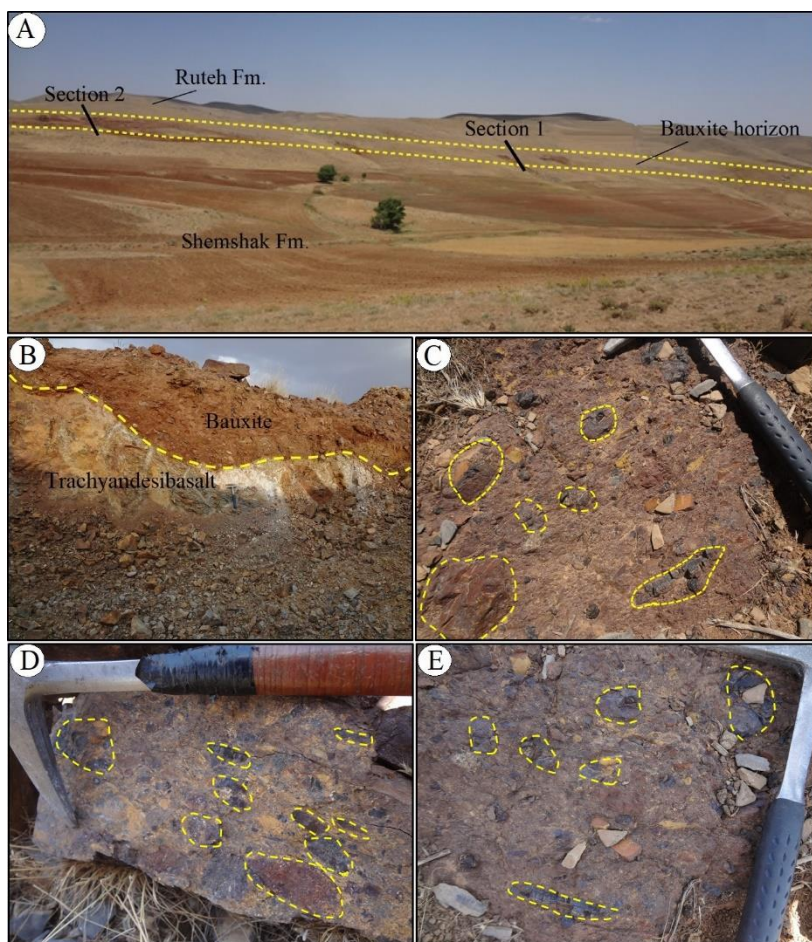
نتایج

ویژگی‌های ماکروسکوپی نهشته بوکسیت

نهشته بوکسیت قارخوتلو به شکل یک افق چینه‌سان بین سازندهای روته (پرمین) و شمشک (ژوراسیک) و درون سطوح فرسایشی و حفرات کارستی بخش‌های آهکی سازند روته تشکیل شده است (شکل a۴). در مرز این افق با سازند روته، در برخی از گودی‌ها و فرورفتگی‌های موجود که در ترانسه‌های اکتشافی نمایان شده است، گاه برون‌زدهایی از گدازه‌های تراکی آندزیت‌بازالتی نیز دیده می‌شود (شکل b۴) که با مرز فرسایشی به افق بوکسیتی تبدیل می‌شود. این موضوع می‌تواند بیانگر ارتباط زایشی این گدازه‌ها با افق بوکسیتی باشد. افق بوکسیتی طولی حدود ۳۰۰ متر، ضخامتی بین ۱۵ تا ۳۰ متر و شیبی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه (متوسط ۳۵ درجه) به سمت جنوب باختر داشته و به‌صورت

بیشتری نسبت به بوکسیت‌های بالایی است. افزایش سختی این بوکسیت نسبت به بوکسیت‌های بالایی، دلیل دیگری بر فزونی کانی‌های آهن‌دار در این بخش می‌باشد. بوکسیت قرمز میانی بر روی بوکسیت پیژوئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی و در زیر بوکسیت زرد بالایی قرار گرفته (شکل ۵c و d) و بین ۱۰ تا ۲۵ متر ضخامت دارد. سختی این بوکسیت نسبت به بوکسیت پیژوئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی کمتر است. بوکسیت زرد بالایی حدود ۳ تا ۴ متر ضخامت داشته و با مرزی مشخص بر روی بوکسیت قرمز میانی قرار گرفته است (شکل ۵d). این بوکسیت دارای تخلخل بیشتری نسبت به بوکسیت‌های دیگر می‌باشد.

بر اساس مطالعات صحرایی، نهشته بوکسیت قارخوتلو از تناوبی از لایه‌های با رخساره‌های متعدد تشکیل شده است که بر اساس مشخصات بافتی و رنگ می‌توان آنها را از پایین به بالا به سه بخش بوکسیت پیژوئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی، بوکسیت قرمز میانی و بوکسیت زرد بالایی تفکیک کرد (شکل ۵). بوکسیت پیژوئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی بین ۲ تا ۳ متر ضخامت داشته و مستقیماً بر روی سازند روته و یا بر روی گدازه تراکی آندزی‌بازالتی قرار گرفته است. این بوکسیت به‌واسطه رنگ و بافت پیژوئیدی از بوکسیت‌های بالایی خود قابل تشخیص است (شکل ۵a و b). به دلیل رنگ قرمز - قهوه‌ای این بوکسیت می‌توان چنین استنباط کرد که این بوکسیت حاوی آهن (از نوع هماتیت)



شکل ۴- (a): دورنمایی از افق بوکسیتی قارخوتلو و موقعیت نیمرخ‌های نمونه‌برداری (دید به سمت شمال)، (b) نمایی از رخنمون بقایای گدازه تراکی آندزی‌بازالتی در زیر افق بوکسیتی در ترانشه‌های اکتشافی (دید به سمت شمال) و (c تا e) نماهایی نزدیک از ساخت‌های جریانی و پرشی (خطوط زرد رنگ) در افق بوکسیتی که می‌تواند بیانگر حمل‌شدگی و ته‌نشست مجدد آن باشد.

Fig. 4. (a) View of Qarkhotlou bauxite horizon showing location of sampling profiles, looking to the north, (b) View of remnants of trachyandesibasalt lava in the lower part of the bauxite horizon in the exploration trench, looking to the north and (c-e) Close views of flow and brecciated textures (yellow lines) within the bauxite horizon probably showing its reworking and reprecipitation.

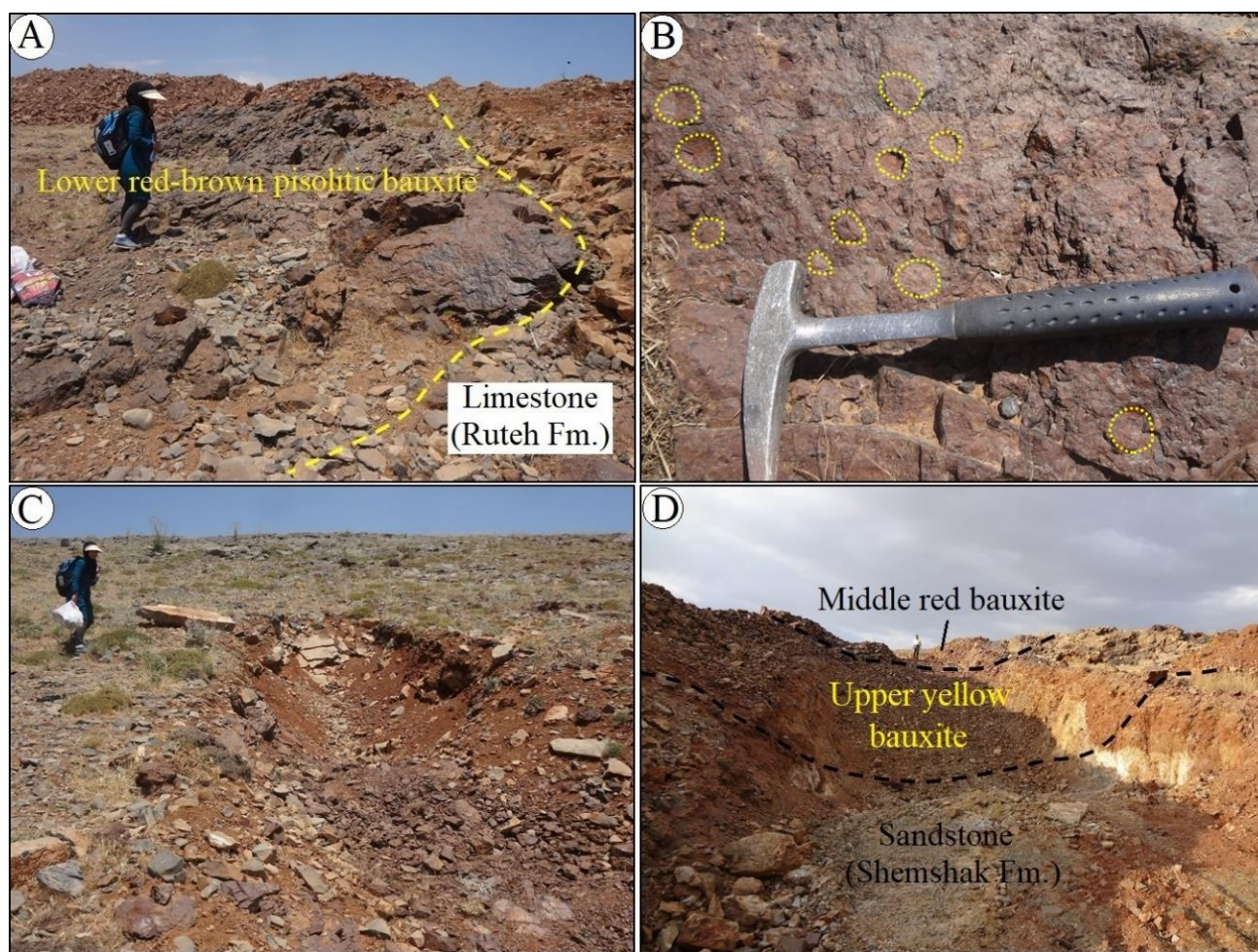
کانی‌شناسی

روتیل و کلریت همراهی می‌شوند (شکل‌های ۶ و ۷). بالا بودن مقادیر کانی‌های رسی نشان می‌دهد که این نهشته از نظر تکوینی نارس بوده و طی تکامل خود از زهکشی مناسبی برخوردار نبوده است (Ghasemi

بر اساس نتایج مطالعات سنگ‌نگاری و XRD، افق بوکسیتی قارخوتلو عمدتاً از هماتیت، گوتیت، بوهمیت، دیاسپور، کائولینیت و پیروفیلیت تشکیل شده است که با کانی‌های سرپسیت - ایلیت، آناتاز،

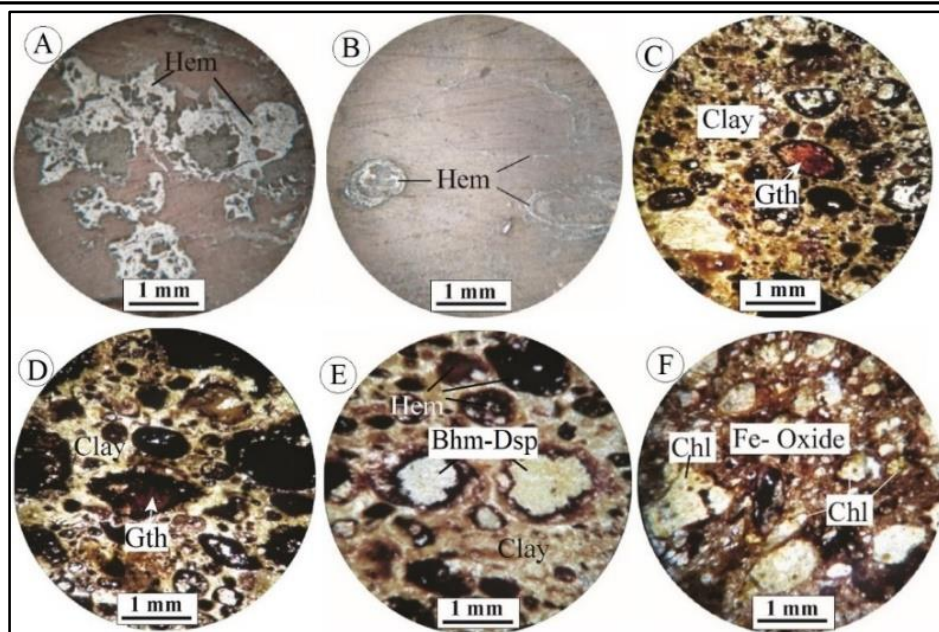
وجود دارند. در بخش‌های آهن‌شویی شده افق بوکسیتی، بوهمیت و دیاسپور هسته قطعات پیزوئیدی و اوئیدی را پُر کرده‌اند (شکل ۶e). نتایج مطالعات XRD نشان می‌دهد پیروفلیت و کائولینیت اصلی‌ترین کانی‌های رسی در افق بوکسیتی قارخوتلو هستند. در مقاطع میکروسکوپی، این کانی‌ها به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای روشن دیده شده و بیشتر بخش‌های زمینه‌ای سنگ را به خود اختصاص داده‌اند (شکل‌های ۶c تا ۶e). کلریت به رنگ سبز کم رنگ مایل به زرد در زمینه‌ای با بافت میکروگرانولار قابل مشاهده است (شکل ۶f). روتیل اغلب به صورت دانه‌ریز و دانه‌پراکنده در زمینه سنگ دیده می‌شود.

(et al., 2019). هماتیت به صورت پیزوئیدهای دانه‌پراکنده و گاه بلورهای درشت در زمینه‌ای ریزدانه متشکل از کانی‌های رسی و بعضاً بوهمیت و دیاسپور دیده شده و سبب تشکیل بافت پورفیری دروغین شده است (شکل ۶a). در برخی مقاطع، هماتیت در لایه‌های بیرونی و حاشیه پیزوئیدها و اوئیدها حضور دارد (شکل ۶b). گوئیت محصول فرایندهای برون‌زاد و دگرسانی هماتیت بوده و بیشتر در هسته پیزوئیدها و اوئیدها قابل مشاهده است (شکل ۶c و ۶d). بوهمیت و دیاسپور اصلی‌ترین کانی‌های آلومینیوم‌دار تشکیل‌دهنده در افق بوکسیتی قارخوتلو می‌باشند. در مقاطع میکروسکوپی، این کانی‌ها هم به صورت ریزدانه در زمینه و هم به صورت قطعات درشت و گاه کروی و بی‌شکل



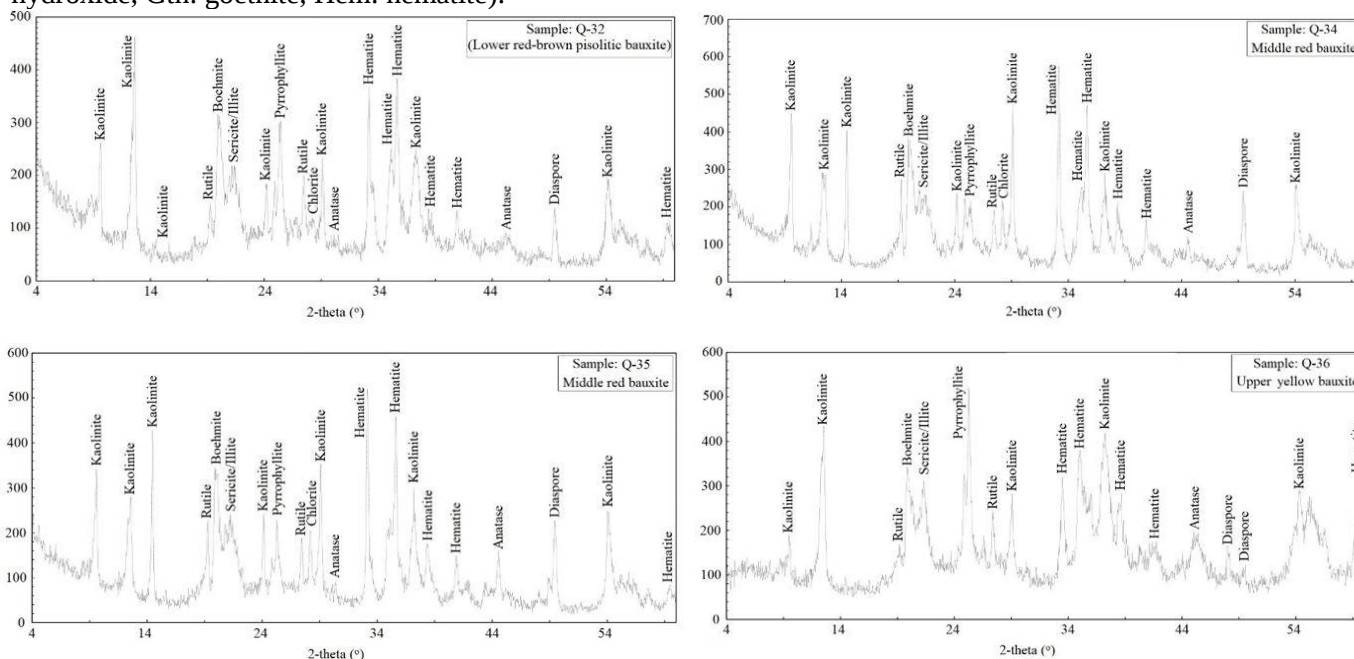
شکل ۵- تصاویر صحرایی از بخش‌های مختلف افق بوکسیتی قارخوتلو؛ (a) نمایی از بوکسیت پیزوئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی (دید به سمت شمال باختر)، (b) نمایی نزدیک از بوکسیت پیزوئیدی قرمز - قهوه‌ای تحتانی دارای پیزوئیدهای هماتیته (خطوط زرد رنگ)، (c) نمایی از بوکسیت قرمز میانی (دید به سمت شمال) و (d) نمایی از بوکسیت زرد بالایی بر روی بوکسیت قرمز میانی (دید به سمت شمال).

Fig. 5. Field photographs of different parts of the Qarkhotlou bauxite horizon. (a) View of lower red-brown pisoidic bauxite, looking to the northwest, (b) Close view of lower red-brown pisoidic bauxite containing hematitic pisoids (yellow lines), (c) View of middle red bauxite, looking to the north, and (d) View of upper yellow bauxite over the middle red bauxite, looking to the north.



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی (a و b در نور بازتابی و بقیه در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از کانی‌های موجود در افق بوکسیتی قارخوتلو؛ (a) بلورهای درشت هماتیت در زمینه‌ای دانه‌ریز از کانی‌های رسی و تشکیل بافت پورفیری دروغین، (b) حضور هماتیت در حاشیه پیزوئیدها و اوئیدها، (c) و (d) گوتیت در هسته پیزوئیدها و اوئیدهای پراکنده در زمینه کانی‌های رسی، (e) بوهمیت و دیاسپور در هسته پیزوئیدها و اوئیدهای آهن‌شویی شده و (f) کلریت در زمینه‌ای دانه‌ریز از کانی‌های رسی و اکسیدها - هیدروکسیدهای آهن. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Bhm: بوهمیت، Chl: کلریت، Clay: کانی‌های رسی، Dsp: دیاسپور، Fe-Oxide: اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، Gth: گوتیت، Hem: هماتیت).

Fig. 6. Photomicrographs (a and b in reflected light and the rest in transmitted plane-polarized light, PPL) of mineralogy in the Qarkhotlou bauxite horizon; (a) Coarse-grained hematite set in fine-grained matrix forming pseudo-porphyry texture, (b) Hematite in the rim of pisoids and ooids, (c and d) Goethite in the core of pisoids and ooids which are disseminated in clay mineral matrix, (e) Boehmite and diasporite in the core of de-ferrificated pisoids and ooids and (f) Chlorite set in fine-grained clay and Fe oxy-hydroxide matrix. All abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Bhm: boehmite, Chl: chlorite, Clay: clay minerals, Dsp: diasporite, Fe-Oxide: iron oxy-hydroxide, Gth: goethite, Hem: hematite).



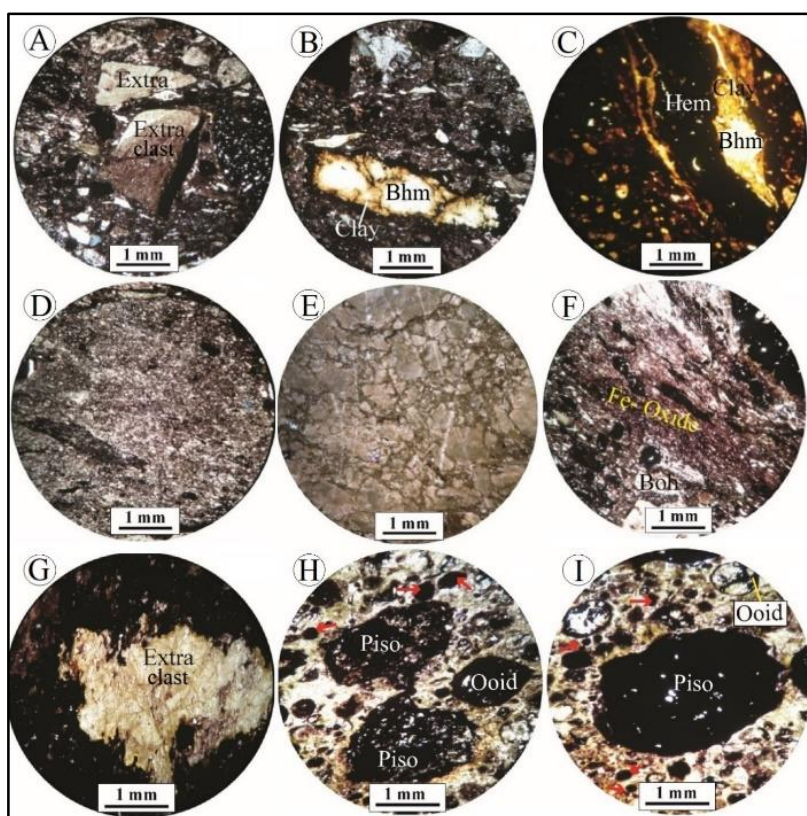
شکل ۷- طیف‌های XRD مربوط به نمونه‌های بوکسیتی قارخوتلو.

Fig. 7. XRD spectra of Qarkhotlou bauxite samples.

ساخت و بافت

عناصر بافتی بوکسیت‌ها بر مبنای ویژگی‌های ریختی و پیدایشی به دو گروه اصلی زمینه و متمایز تفکیک می‌شوند (Bárdossy, 1982). عناصر بافتی زمینه شامل تجمعات نسبتاً دانه‌ریز با اندازه‌های کم و بیش یکسان است که مانند سیمان عناصر بافتی متمایز را در بر گرفته‌اند. بافت‌های پان‌ایدیومورفیک، میکروگرانولار، پلیتومورفیک، پرشی و جریان‌ی از مهم‌ترین عناصر بافت‌ساز زمینه (شکل a تا f) است که در نمونه‌های مورد مطالعه شناسایی شد. پیزوئیدها، اوئیدها، پلوئیدها و قطعات آواری از مهم‌ترین عناصر بافت‌ساز متمایز (شکل g تا i) در افق بوکسیتی قارخوتلو می‌باشند. معمولاً، بافت‌های پلیتومورفیک،

پان‌ایدیومورفیک، پیزوئیدی و اوئیدی از شواهد برجزا (Petrascheck, 1989; Yang et al., 2019) و قطعات پلوئیدها و قطعات آواری از شواهد نابرجازی (Bárdossy, 1982; Putzolu et al., 2018) نهشته‌های بوکسیتی هستند. با توجه به شواهد بافتی، می‌توان اظهار داشت که بخش اعظم نهشته بوکسیت قارخوتلو در اثر فرایندهای بوکسیت‌زایی برجزا تشکیل شده است. با این وجود، حضور قطعات پلوئیدی و آواری و ساخت‌های جریان‌ی و پرشی شواهدی از حمل‌شدگی و جابه‌جایی کوتاه مواد بوکسیتی از محیط اولیه تشکیل و ته‌نشست مجدد در محیط‌های رسوبی کارستی و یا سطوح فرسایشی را نشان می‌دهند.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از بافت کانه‌ها در افق بوکسیتی قارخوتلو. (a) بافت پان‌ایدیومورفیک متشکل از قطعات درشت اکستراکلاست در زمینه‌ای دانه‌ریز از بوکسیت‌های تجدید تبلور یافته، (b و c) بافت میکروگرانولار متشکل از کانی‌های بوهمیت و هماتیت در زمینه‌ای دانه‌ریز از کانی‌های رسی، (d) بافت پلیتومورفیک. e: بافت پرشی، (f) بافت جریان‌ی، (g) قطعات آواری اکستراکلاست در زمینه‌ای از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و (h و i) مجموعه اوئیدها، پیزوئیدها و پلوئیدها (پیکان‌های قرمز) در کنار یکدیگر. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Bhm: بوهمیت، Clay: کانی‌های رسی، Extra: اکستراکلاست، Hem: هماتیت، Piso: پیزوئید).

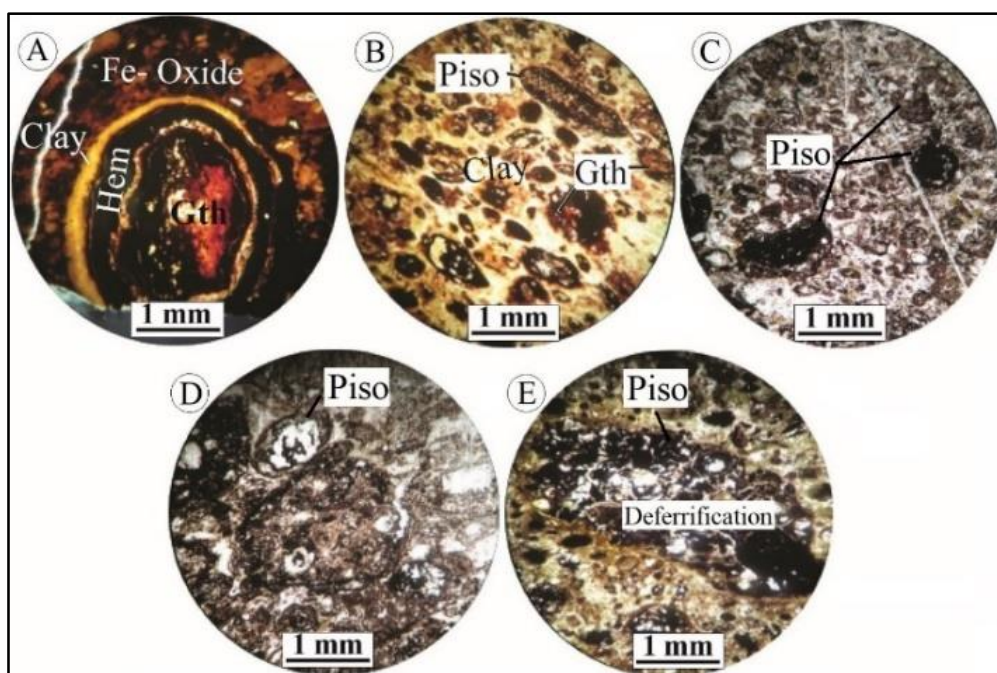
Fig. 8. Microphotographs (transmitted plane-polarized light, PPL) of Qarkhotlou bauxite horizon ores texture. (a) Panidiomorphic texture composed of large-grained extraclast aggregates set in fine-grained matrix of recrystallized bauxite, (b and c) Microgranular texture composed of boehmite and hematite minerals set in fine-grained matrix of clay minerals, (d) Pelitomorphic texture, (e) Breccia texture, (f) Flow texture, (g) Extraclast aggregates set in iron oxy-hydroxide matrix, and (h and i) Ooid, pisoid and ploid (red arrows) aggregates. All abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Bhm: boehmite, Clay: clay minerals, Extra: extraclast, Hem: hematite, Piso: pisoid).

هسته مرکزی تشکیل شده و با ثبت تغییرات محیطی می‌توانند در تفسیرهای دیرینه اقلیمی به‌کار رفته و به زایش لایه‌های بوکسیتی و

اوئیدها و پیزوئیدها از مهم‌ترین فرایندهای دیاژنتیک در نهشته‌های بوکسیتی هستند. این عناصر بافتی از لامینه‌های متناوب با یک یا چند

شکل‌های متفاوت (شکل c۹) که نشان‌دهنده شرایط محیطی انرژی بالا هستند (Öztürk et al., 2002). ۴- پیزوئیدهای دگرزاد یا پیزوئیدهای با هسته اوئیدی که هسته آنها از اوئیدهای کروی کوچک‌تر تشکیل شده است (شکل d۹ و e). این پیزوئیدها دلالت بر انتقال مواد بوکسیتی دارند (Taylor and Eggleton, 2004). ۵- تجمعی از پیزوئیدهای به رنگ روشن (شکل b۹ و c) که نشانه‌ای از فرایند آهن‌شویی تفسیر می‌گردند (White, 1976). فرایند آهن‌شویی، از فرایندهای اپی‌ژنتیک مهم در زایش نهشته‌های بوکسیتی محسوب شده (White, 1976, Zarasvandi et al., 2012) و بیانگر شرایط آب و هوای گرمسیری و فعالیت بالای بیولوژیکی است (Ferenczi, 2001).

فرایندهای دخیل در تشکیل آنها کمک کنند (Bárdossy, 1982). نتایج مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از افق بوکسیتی قارخوتلو بیانگر وجود ۵ نوع پیزوئید در این افق معدنی است: ۱- ماکروپیزوئیدهای کاملاً گرد با پوسته‌های حفظ‌شده و اندازه‌ای بیش از ۲ میلی‌متر که اغلب پوشش‌های لایه‌ای آنها از کانی‌های رسی، هماتیت و گوتیت تشکیل شده است (شکل a۹). به‌طور معمول، گردشگری پیزوئیدها، نشان دهنده حمل و نقل قطعات قبل از نهشته شدن در زمینه نرم می‌باشد (Delavigne, 1998; Ahmadnejad et al., 2017). ۲- پیزوئیدهای کشیده و دمبلی‌شکل (شکل b۹) که نشان از تغییر شکل طی فعالیت‌های تکتونیکی و فشردگی دارند (Liu et al., 2010). ۳- پیزوئیدهای خردشده و بدون پوشش‌های لایه‌ای و با



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای، PPL) از انواع پیزوئیدها در افق بوکسیتی قارخوتلو. (a) ماکروپیزوئید کاملاً گرد با پوسته حفظ‌شده از جنس هماتیت و کانی‌های رسی، (b) پیزوئیدهای کشیده و دمبلی شکل در سیمانی از کانی‌های رسی، (c) پیزوئیدهای خردشده و بدون پوشش لایه‌ای و (d و e) پیزوئیدهای دگرزاد با هسته‌های اوئیدی. در تصاویر c تا e شواهدی از فرایند آهن‌شویی نیز قابل مشاهده است. علائم اختصاری کانی‌ها از Whitney و Evans (۲۰۱۰) اقتباس شده است. (Clay: کانی‌های رسی، Fe-Oxide: اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، Gth: گوتیت، Hem: هماتیت، Piso: پیزوئید).

Fig. 9. Microphotographs (transmitted plane-polarized light, PPL) of pisoids at Qarkhotlou bauxite horizon. (a) Well-developed rounded macropisoid with preserved layers of hematite and clay minerals, (b) Elongated and dumbbell-shaped pisoid cemented by clay minerals, (c) Broken and uncovered pisoids, and (d and e) Deformed pisoids with ooidic cores. Deferrification process is also observed in c to e. All abbreviations follow Whitney and Evans (2010). (Clay: clay minerals, Fe-Oxide: iron oxy-hydroxide, Gth: goethite, Hem: hematite, Piso: pisoid).

ژئوشیمی

برداشت شده از نهشته بوکسیت قارخوتلو در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی برای ۱۳ نمونه بوکسیتی و یک نمونه گدازه تراکی آندزیتی بازالتی

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی برای نمونه‌های نهشته بوکسیت قارخوتلو. تمامی داده‌ها بر حسب درصد وزنی می‌باشند.

Table 1. Geochemical data of major elements of the representative samples from the Qarkhotlou bauxite deposit. All data in wt. %.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Total
D.L.	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-
Q-25	36.74	30.25	0.25	20.32	0.36	0.11	<0.05	0.20	0.13	3.03	8.37	99.76
Q-26	35.32	30.84	0.17	22.55	0.31	0.10	<0.05	0.13	0.11	2.90	7.35	99.78
Q-27	34.08	29.19	0.21	25.10	0.38	0.16	0.08	0.15	0.12	3.05	7.28	99.80
Q-31	35.38	30.09	0.21	22.66	0.35	0.12	0.08	0.16	0.12	2.99	7.67	99.78
Q-32	33.72	26.08	0.87	26.23	1.00	0.34	0.09	0.40	0.12	2.76	8.12	99.73
Q-33	33.91	27.32	0.69	25.75	0.91	0.16	0.06	0.42	0.12	2.74	7.70	99.78
Q-34	34.05	28.77	0.43	24.63	0.60	0.19	0.14	0.30	0.11	2.81	7.80	99.83
Q-35	33.62	27.96	0.36	25.41	0.54	0.25	0.19	0.29	0.12	3.35	7.72	99.81
Q-36	36.12	30.24	0.45	17.33	0.87	0.40	0.27	0.32	0.15	3.60	10.16	99.91
Q-37	38.08	30.57	0.43	17.79	1.53	0.21	<0.05	0.29	0.12	2.83	7.93	99.78
Q-38	34.26	31.13	0.67	21.22	0.75	0.19	0.06	0.30	0.11	2.74	8.30	99.73
Q-39	26.51	41.84	0.28	17.68	0.15	0.26	0.18	0.18	0.11	3.05	9.54	99.78
Q-40	36.28	31.00	0.45	17.63	0.22	0.31	0.28	0.26	0.13	2.46	10.72	99.74
Q-41	43.51	27.11	0.76	16.55	1.45	0.61	0.26	0.27	0.12	2.44	6.85	99.93
Q-50	56.67	17.49	0.75	15.09	1.01	0.37	0.11	0.24	0.10	1.86	6.21	99.90

Q-25 to Q-33 and Q-37: lower red-brown pisolitic bauxite; Q-34 to Q-35 and Q-38: middle red bauxite; Q-36, Q-39 to Q-41: upper yellow bauxite; Q-50: trachyandesibasalt

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های نهشته بوکسیت قارخوتلو. تمامی داده‌ها بر حسب قسمت در میلیون (ppm) می‌باشند.

Table 2. Geochemical data of trace and rare earth elements of the representative samples from the Qarkhotlou bauxite deposit. All data in ppm.

	Ba	Cd	Co	Cr	Cs	Hf	Nb	Ni	Rb	Sc	Se	Sr	Ta	Th	U	V	Y
D.L.	1	0.1	1	1	0.5	0.5	1	1	1	0.5	0.5	1	0.1	0.1	0.1	1	0.5
Q-25	133	0.2	26.5	335	1.1	6.72	44.9	168	16	32.1	2.4	689	3.1	15.77	9.3	289	36.6
Q-26	157	0.4	25.7	383	1	7.14	50.3	151	15	32.7	1.34	580	3.5	19.13	12.4	337	38.7
Q-27	178	<0.1	43.9	353	1.1	6.94	47.5	149	17	35.3	2.59	558	3.22	16.96	11.2	379	36.5
Q-31	156	0.2	32.0	357	1.1	6.93	47.6	156	16	33.4	2.1	609	3.27	17.29	10.97	335	37.3
Q-32	327	0.3	141	407	2.7	6.91	47.2	210	34	36.3	3.12	477	3.41	20.81	14.8	512	88.6
Q-33	302	0.1	24.9	416	2.2	6.13	45	162	28	33.6	2.11	622	3.17	19.18	10.9	404	37.5
Q-34	259	0.1	33.7	362	1.8	6.33	45.2	164	22	34.2	0.56	563	3.25	17.13	10.8	367	39.5
Q-35	242	<0.1	56.6	409	2	6.71	45.5	162	20	35.3	2.06	579	3.11	16.37	11.9	370	45.4
Q-36	313	<0.1	53.6	379	1.7	6.64	39	152	26	35	1.76	429	2.54	17.5	9.3	156	31.5
Q-37	369	0.1	26.9	341	4.5	4.58	28.4	310	43	32	1.48	651	1.34	19.12	10.87	297	51.7
Q-38	298	<0.1	33.5	405	2.4	7.31	56.4	155	25	31.4	1.81	650	3.71	24.71	12.7	425	60.3
Q-39	148	<0.1	46.2	384	0.6	6.96	37.6	100	10	35.1	1.13	533	2.12	29.98	14.5	257	33.9
Q-40	333	0.1	26.4	352	1.5	7.42	64.3	92	12	34.3	1.74	1057	4.05	28.16	11.3	392	28.7
Q-41	323	0.1	24.4	345	1.4	6.85	38.5	89	13	34.2	1.67	1009	3.13	26.12	12.21	387	27.7
Q-50	223	0.4	41.4	295	3.6	4.72	31	161	33	28.5	1.54	284	1.87	13.79	7.9	203	70.9

	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu	Eu/Eu*	Sm/Nd	Tb/Tb*
D.L.	5	1	0.5	0.05	0.5	0.02	0.1	0.05	0.1	0.02	0.05	0.1	0.05	0.1	-	-	-
Q-25	114	70	181	17.09	70.3	15.18	3.8	12.64	1.67	8.7	4.83	0.59	3.2	0.53	0.70	0.22	0.85
Q-26	149	46	124	11.76	50.3	11.71	2.82	10.57	1.52	8.88	4.68	0.67	3.6	0.62	0.85	0.23	0.90
Q-27	126	61	145	15.22	64	13.67	3.23	11.8	1.61	9.17	4.97	0.66	3.7	0.62	0.92	0.21	0.88
Q-31	130	59	150	14.69	61.5	13.52	3.3	11.7	1.60	8.9	4.8	0.64	3.5	0.59	0.91	0.22	0.88
Q-32	171	110	155	30.09	130.6	26.02	7.06	22.55	3.5	20.76	11.13	1.6	8.2	1.46	0.89	0.20	0.92
Q-33	138	77	153	15.82	61.2	14.1	3.28	12.62	1.66	9.16	4.48	0.65	3.9	0.55	0.95	0.23	0.93
Q-34	137	94	149	18.09	71.8	14.73	3.48	12.75	1.74	9.67	5.02	0.7	4	0.65	0.75	0.21	0.91
Q-35	124	93	137	20.02	81.9	17.17	4.08	14.69	2.19	10.39	5.56	0.8	4.1	0.74	0.89	0.21	0.94
Q-36	134	120	198	20.42	77.3	14.16	3.53	10.83	1.29	7.68	3.83	0.51	3.1	0.51	0.92	0.18	0.95
Q-37	169	77	165	17.9	80.9	18.31	4.05	15.88	2.15	11.43	6.13	0.85	5.6	0.79	0.78	0.23	0.97
Q-38	195	71	170	16.8	69.1	14.74	3.68	14.25	2.11	11.97	6.64	0.97	5.3	0.9	0.86	0.21	0.93
Q-39	211	42	178	8.44	31.2	6.72	1.28	7.02	1.2	6.96	4.22	0.68	4.5	0.66	0.85	0.22	0.89
Q-40	281	63	212	11.72	41.9	8.27	1.63	7.47	1.21	6.77	3.81	0.56	4.3	0.6	0.88	0.20	0.90
Q-41	278	58	210	10.89	39.87	7.45	1.34	7.35	1.15	6.34	4.02	0.63	4.2	0.64	0.84	0.20	0.92
Q-50	104	77	111	16.36	70.4	15.76	3.94	15.3	2.16	12.54	7.01	0.94	4.8	0.85	0.98	0.25	0.93

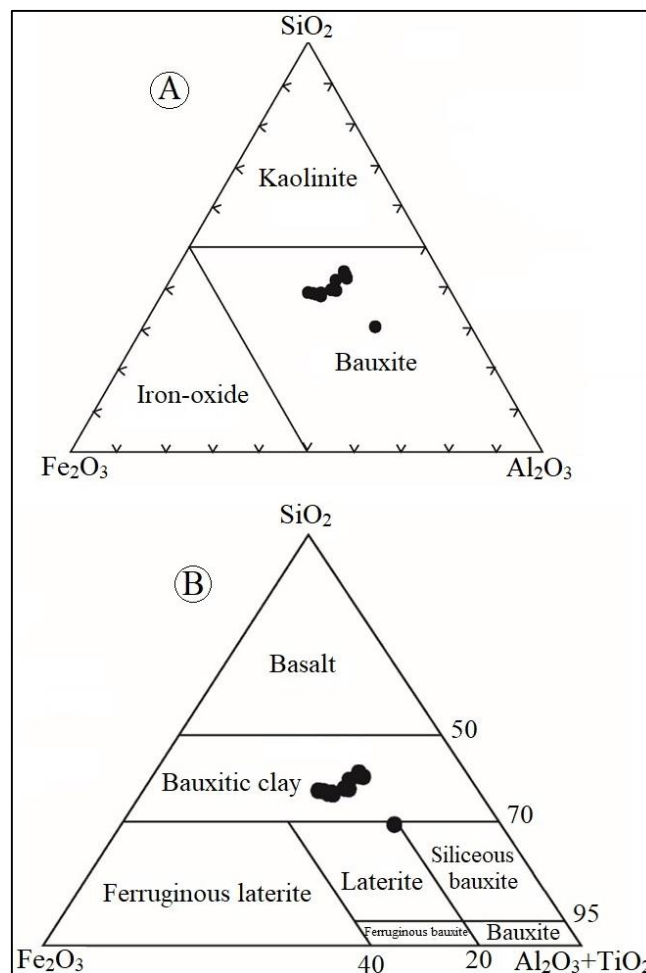
Q-25 to Q-33 and Q-37: lower red-brown pisolitic bauxite; Q-34 to Q-35 and Q-38: middle red bauxite; Q-36, Q-39 to Q-41: upper yellow bauxite; Q-50: trachyandesibasalt

بحث و بررسی

تعیین نوع بوکسیت

برای تعیین نوع بوکسیت در نهشته بوکسیت قارخوتلو از نمودار سه متغیره $Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$ (Mutakyahwa, 2003) استفاده شده است. طبق این نمودار، بوکسیت قارخوتلو در محدوده کانسنگ

بوکسیتی قرار می گیرد (شکل ۱۰a). در نمودار سه متغیره $Fe_2O_3-SiO_2-(Al_2O_3+TiO_2)$ (Balasubramaniam et al., 1987) نیز اغلب نمونه های برداشت شده از افق بوکسیتی قارخوتلو در بخش رس بوکسیتی و یک نمونه متمایل به بخش لاتریتی قرار گرفته است (شکل ۱۰b).



شکل ۱۰- (a) نمودار سه متغیره $Fe_2O_3-SiO_2-Al_2O_3$ (بعد از Mutakyahwa, 2003) و موقعیت نمونه های بوکسیتی قارخوتلو بر روی آن و (b) نمودار سه متغیره $Fe_2O_3-SiO_2-(Al_2O_3+TiO_2)$ (بعد از Balasubramaniam et. al., 1987) و موقعیت نمونه های بوکسیتی قارخوتلو بر روی آن.

Fig. 10. (a) Ternary plot for the system of $Fe_2O_3-SiO_2-Al_2O_3$ (after Mutakyahwa, 2003) showing the position of Qarkhotlou bauxite samples and (b) Ternary plot for the system of $Fe_2O_3-SiO_2-(Al_2O_3+TiO_2)$ (after Balasubramaniam et. al., 1987) showing the position of Qarkhotlou bauxite samples.

تعیین سنگ منشأ بوکسیت

برای تعیین سنگ منشأ افق بوکسیتی قارخوتلو از نمودارهای TiO_2/Al_2O_3 در مقابل Eu/Eu^* (Mameli et al., 2007; Reinhardt et al., 2018)، Sm/Nd در مقابل Eu/Eu^* (Mongelli et al., 2014; Reinhardt et al., 2018) و Tb/Tb^* در مقابل Eu/Eu^* (Wang et al., 2013) استفاده شد (شکل ۱۱a تا c). در این نمودارها، نمونه های برداشت شده از افق بوکسیتی قارخوتلو در اطراف داده های سنگ های بازالتی و محدوده بین

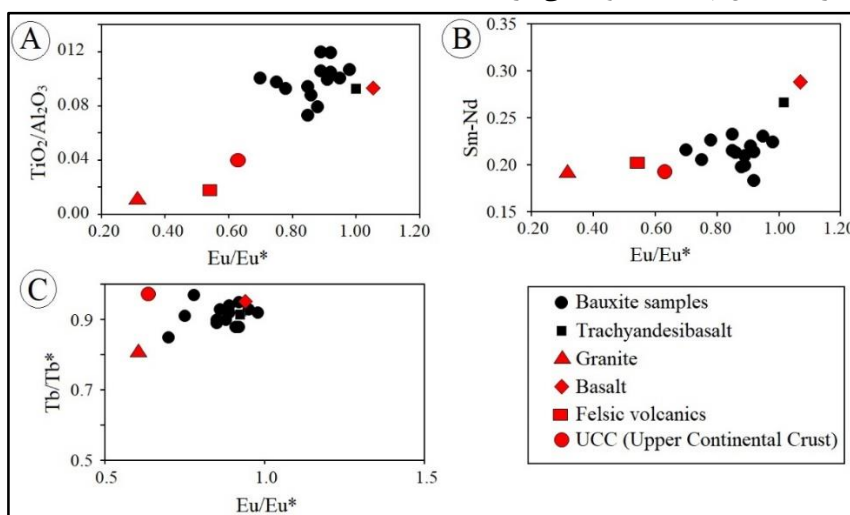
سنگ های بازالتی و سنگ های آتشفشانی اسیدی قرار می گیرند. این امر بیانگر سنگ منشأ آذرین با ترکیب بازیگ تا حدواسط برای افق بوکسیتی قارخوتلو است. حضور بقایای گدازه های آتشفشانی با ترکیب تراکی آندزیت بازالتی در گودی ها و فرورفتگی های موجود در سازند روته که با مرز فرسایشی در زیر افق بوکسیتی قرار گرفته اند، سنگ منشأ بازالتی تا آندزیتی را برای این نهشته تایید کرده و از این نظر قابل مقایسه با نهشته های بوکسیتی قپی، بیگلر، حیدرآباد، تاش و درزی والی (Abedini, 2002; Kangarani, 2008; Imamalipour and)

محدوده تغییرات Eh-pH محیط طی فرآیند بوکسیت‌زایی

در محدوده pH بین ۶ تا ۹، انحلال‌پذیری یون‌های آلومینیم و آهن به صفر می‌رسد و این یون‌ها به صورت کانی‌های اکسید و هیدروکسید نهشته می‌شوند (Komlóssy, 1976). در محدوده pH بین ۵ تا ۹، انحلال سیلیسیم ۱۰ تا ۲۰ برابر انحلال آلومینیم و آهن می‌باشد. در این شرایط، بعد از گذشت زمان زیادی از هوازدگی، انحلال مشخصی از سیلیسیم رخ خواهد داد اما آلومینیم و آهن بدون تغییر باقی می‌مانند. در یک محیط با pH ثابت، انحلال آهن در مقایسه با آلومینیم در نتیجه کاهش Eh می‌تواند افزایش یابد (Patterson, 1967; Liu et al., 2010). شرایط اکسیدان و احیاء نه تنها بر تشکیل ترکیبات آهن، بلکه بر تشکیل ترکیبات آلومینیم نیز تأثیر می‌گذارد. بر این اساس، گیسیست و گوتیت در شرایط اکسیدان قوی و محیط اسیدی ضعیف، بوهمیت و هماتیت در شرایط اکسیدان ضعیف و محیط اسیدی ضعیف‌تر، دیاسپور و هماتیت در Eh حدود صفر و در یک محیط خنثی و دیاسپور و شاموزیت در محیط بازی و احیایی تشکیل می‌شوند (Komlóssy, 1976).

Mirmohammadi, 2011; Shamanian et al., 2015; Khosravi et al., 2017 می‌باشد.

مطالعات اخیر انجام شده بر روی نهشته‌های بوکسیتی موجود در حوضه زاگرس (مانند سرفاریاب، هنگام، مندان، دهنو، مومبی، دوپلان و بیدگل)، سنگ منشاء این نهشته‌ها را سنگ‌های کربناته رس‌دار تعیین کرده است (Liaghat et al., 2003; Zarasvandi et al., 2008, 2010, 2012; Salamab Ellahi et al., 2016; Zamanian et al., 2016; Ahmadnejad et al., 2017). با توجه به سنگ بستر آهکی (سازند روته) نهشته بوکسیتی قارخوتلو، احتمال اینکه این سنگ‌ها منشاء بوکسیت در این نهشته باشند نیز وجود دارد. نتایج مطالعات سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی انجام شده توسط Nori Nav همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که واحدهای سنگ آهکی سازند روته در منطقه قارخوتلو دارای ترکیب کانی‌شناسی اولیه مخلوط کلسیت-آراگونیت بوده و فاقد بخش رسی هستند. از اینرو، این واحدهای سنگ آهکی خالص را نمی‌توان به عنوان سنگ منشاء برای نهشته بوکسیتی قارخوتلو در نظر گرفت. این نتیجه‌گیری با مطالعات Mongelli و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد که نشان داد هرچند توالی‌های کربناته می‌توانند سنگ میزبان نهشته‌های بوکسیتی باشند، اما انحلال این سنگ‌ها به تنهایی نمی‌تواند منجر به تشکیل نهشته‌های بوکسیتی گردد.



شکل ۱۱- موقعیت نمونه‌های بوکسیتی قارخوتلو بر روی (a) نمودار TiO_2/Al_2O_3 در مقابل Eu/Eu^* (با تغییرات از Mameli et al., 2007; Reinhardt et al., 2018)، (b) نمودار Sm/Nd در مقابل Eu/Eu^* (با تغییرات از Mongelli et al., 2014; Reinhardt et al., 2018) و (c) نمودار Tb/Tb^* در مقابل Eu/Eu^* (با تغییرات از Wang et al., 2013).

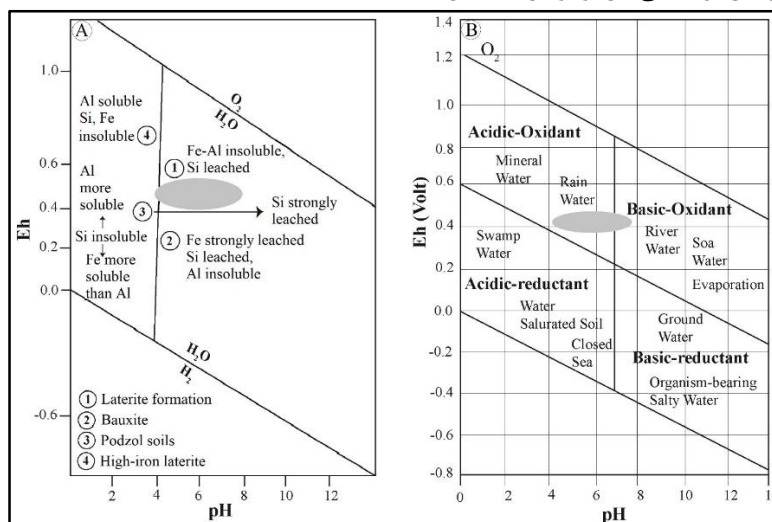
Fig. 11. Position of the Qarkhotlou bauxite samples on the: (a) TiO_2/Al_2O_3 versus Eu/Eu^* (modified after Mameli et al., 2007; Reinhardt et al., 2018), (b) Sm/Nd versus Eu/Eu^* (modified after Mongelli et al., 2014; Reinhardt et al., 2018) and (c) Tb/Tb^* versus Eu/Eu^* (modified after Wang et al., 2013) diagrams.

به pH بالاتر از ۷ و Eh بیشتر از ۰/۲ دارد (Temur, 2006). دیاسپور در Eh پایین‌تر از صفر و محدوده pH بین ۷ تا ۹ تشکیل می‌شود (Komlóssy, 1976). کائولینیت در محیط اسیدی ضعیف و در pH حدود ۶/۵ به وجود می‌آید. تشکیل بوهمیت تحت شرایط سطحی، نیازمند pH بیشتر از ۵ است (Valeton, 1972) درحالی‌که هماتیت و گوتیت در pH بیشتر از ۷ و Eh بیشتر از ۰/۲ تشکیل می‌شود (Temur and Kansun, 2006). همراهی هماتیت و بوهمیت در

تشکیل گوتیت در بوکسیت‌ها ممکن است در نتیجه تأثیر آب‌های زیرزمینی حاوی یون‌های فرو بر کانی هیدروکسید فریک باشد. هیدروکسید فریک با فرمول $2/5Fe_2O_3 \cdot 4/5H_2O$ هنگام هوازدگی بیوژنتیک کانی‌های حاوی آهن، تحت تأثیر گروهی از باکتری‌ها به وجود می‌آید. شرایط تشکیل لپیدوکروسیت نیز شبیه به گوتیت است با این تفاوت که لپیدوکروسیت فاز ناپایدار بوده و با افزایش دما به گوتیت تبدیل می‌شود. ته‌نشینی هم‌زمان هماتیت، گوتیت و لپیدوکروسیت نیاز

۴ تا ۸ و Eh حدود ۰/۴ تا ۰/۶ رخ داده است (شکل ۱۲a). با ترسیم میدان پایداری کانی‌های مزبور در نمودار Eh-pH محیط‌های طبیعی (شکل ۱۲b)، محدوده آب‌های سطحی طی تکوین افق بوکسیتی قارخوتلو در محدوده اکسیدی-اسیدی قرار می‌گیرد.

بوکسیت نشانگر شرایط اکسایش در محیط غیراشباع است. رخداد آناتاز به شکل پراکنده نشانگر شرایط کاهش و pH پایین در هنگام پدید آمدن بوکسیت است (Özlü, 1983). با توجه به نتایج مطالعات کانی‌شناسی (هماتیت، گوتیت، بوهمیت، دیاسپور، کائولینیت و پیروفیلیت)، به نظر می‌رسد تشکیل افق بوکسیتی قارخوتلو در pH بین



شکل ۱۲- (a) نمودار Eh-pH و شرایط تشکیل بوکسیت، فرایند آهن‌شویی و انحلال سیلیس (با تغییرات از Norton, 1973). موقعیت نهشته بوکسیت قارخوتلو با بیضی خاکستری رنگ مشخص شده است و (b) نمودار Eh-pH در محیط‌های طبیعی مختلف با توجه به میدان پایداری کانی‌ها (با تغییرات از Garrels and Christ, 1965). موقعیت نهشته بوکسیت قارخوتلو با بیضی خاکستری رنگ مشخص شده است.

Fig. 12. (a) Eh-pH diagram and condition bauxite formation, deferrification process and silica solubility (modified after Norton, 1973). Location of the Qarkhotlou bauxite deposit is shown by grey ellipse and (b) Eh-pH diagram showing environments under natural atmospheric conditions and stability fields of minerals (modified after Garrels and Christ, 1965). Location of the Qarkhotlou bauxite deposit is shown by grey ellipse.

Al_2O_3 با P_2O_5 و TiO_2 هم‌خوان بوده و میزان آنها افزایش نسبی یافته است، درحالی‌که میزان SiO_2 و Fe_2O_3 با کاهش نسبی همراه است (شکل ۱۴a). در نیمرخ شماره ۲، روند تغییرات Al_2O_3 و SiO_2 برعکس است، در حالی‌که روند تغییرات Fe_2O_3 با P_2O_5 و TiO_2 تا حدودی مشابه می‌باشد (شکل ۱۴b). غنی‌شدگی آلومینیم در افق بوکسیتی قارخوتلو احتمالاً نتیجه تمرکز این عنصر به‌صورت بازماندی است. همانگونه که در بالا بحث شد، pH محیط در افق بوکسیتی قارخوتلو بین ۴ تا ۸ متغیر بوده است. در این گستره از pH، آلومینیم به‌صورت هیدروکسید نامتحرک بوده و رسوب می‌کند که این امر سبب انباشتگی و غنی‌شدن این عنصر می‌شود. تهی‌شدگی نسبی سیلیسیم طی فرایند بوکسیتی‌شدن می‌تواند نتیجه کائولینیتی‌شدن و یا تبدیل فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی و در ادامه تبدیل بخشی یا کامل کانی‌های رسی به کانی‌های آلومینای آزاد و خروج اسید سیلیسیک مرتبط باشد (Karadag et al., 2009; Abedini and Calagari, 2015;).

Kiaeshkevarian et al., 2019). آهن از غنی‌شدگی نسبی بالایی به‌ویژه در بخش‌های بالایی افق بوکسیتی قارخوتلو برخوردار است. این عنصر معمولاً از تخریب کانی‌های فرومنیزیم، پیریت و ایلمنیت آزاد شده و ته‌نشست آن مربوط به محیط‌های قلیایی است (Kiaeshkevarian et al., 2019). افزایش نسبی این عنصر در بخش‌های بالایی افق بوکسیتی قارخوتلو را می‌توان به تغییرات Eh

بررسی فرآیند هوازدگی

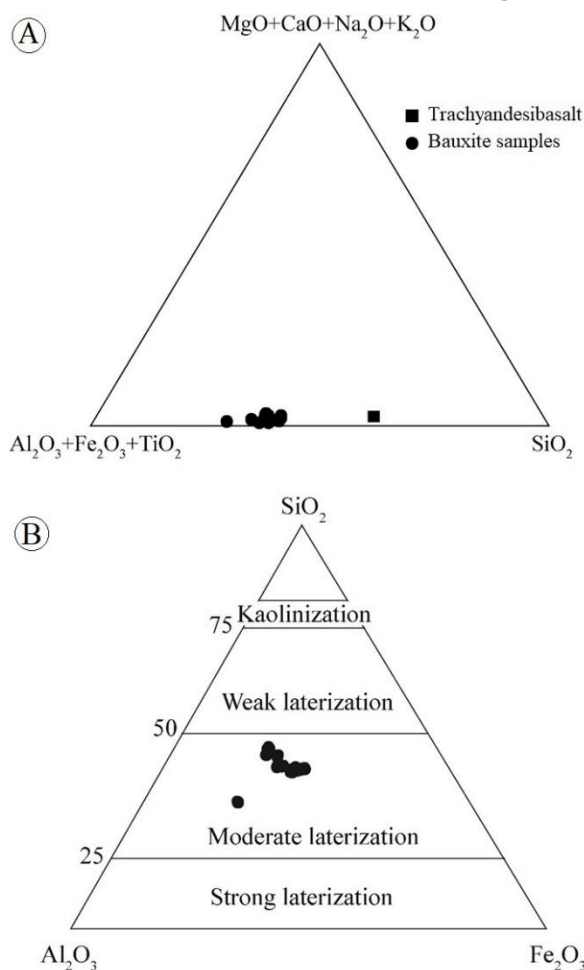
مسیر هوازدگی طی تشکیل افق بوکسیتی قارخوتلو، تهی‌شدگی سیلیس و عناصر قلیایی و قلیایی خاکی را نسبت به غنی‌شدگی آهن، تیتانیوم و آلومینیم نشان می‌دهد (شکل ۱۳a). در این افق، طی فرایند هوازدگی، انتقال از سنگ منشاء تراکی آندزیت‌بازالت به بوکسیت با کاهش عناصر منیزیم، کلسیم، سدیم، پتاسیم و افزایش عناصر آلومینیم، آهن و تیتانیوم همراه است. ترسیم نمونه‌های بوکسیتی نهشته قارخوتلو بر روی نمودار سه متغیره Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 (Schellmann, 1986) نشان می‌دهد که نهشته بوکسیتی قارخوتلو از نظر تکامل زمین‌شیمیایی درجات متوسطی از شرایط لاتریتی‌شدن را تجربه کرده است (شکل ۱۳b). با توجه به نمودار یاد شده، شرایط لاتریتی‌شدن در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه حکمفرما است.

تغییرات عناصر اصلی

نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی برای نمونه‌های بوکسیتی در نهشته قارخوتلو در امتداد دو نیمرخ نمونه‌برداری (شکل ۱۴a) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، در نیمرخ شماره ۱، از بخش‌های تحتانی افق بوکسیتی به سمت بخش‌های فوقانی آن که با تغییر ترکیب از بوکسیت پیروئیدی قرمز-قهوه‌ای تحتانی به بوکسیت‌های قرمز میانی و زرد بالایی همراه است، روند تغییرات

کانی‌های تیتانومگنتیت و یا ایلمنیت و تثبیت آن به صورت کانی‌های آناتاز و روتیل باشد.

محیط و شرایط مناسب برای تشکیل کانی‌های هماتیت و گوتیت نسبت داد (Hill et al., 2000). غنی بودن تیتانیوم می‌تواند به تخریب



شکل ۱۳- (a) نمودار سه متغیره $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)-(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (با تغییرات از Hill et al., 2000) و موقعیت نمونه‌های بوکسیتی قارخوتلو بر روی آن و (b) نمودار سه متغیره $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ (با تغییرات از Schellmann, 1986) و موقعیت نمونه‌های بوکسیتی قارخوتلو بر روی آن.

Fig. 13. (a) Ternary plot for the system of $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)-(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ (modified after Hill et al., 2000) showing the position of Qarkhotlou bauxite samples and (b) Ternary plot for the system of $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$ (modified after Schellmann, 1986) showing the position of Qarkhotlou bauxite samples.

الگوی عناصر کمیاب خاکی

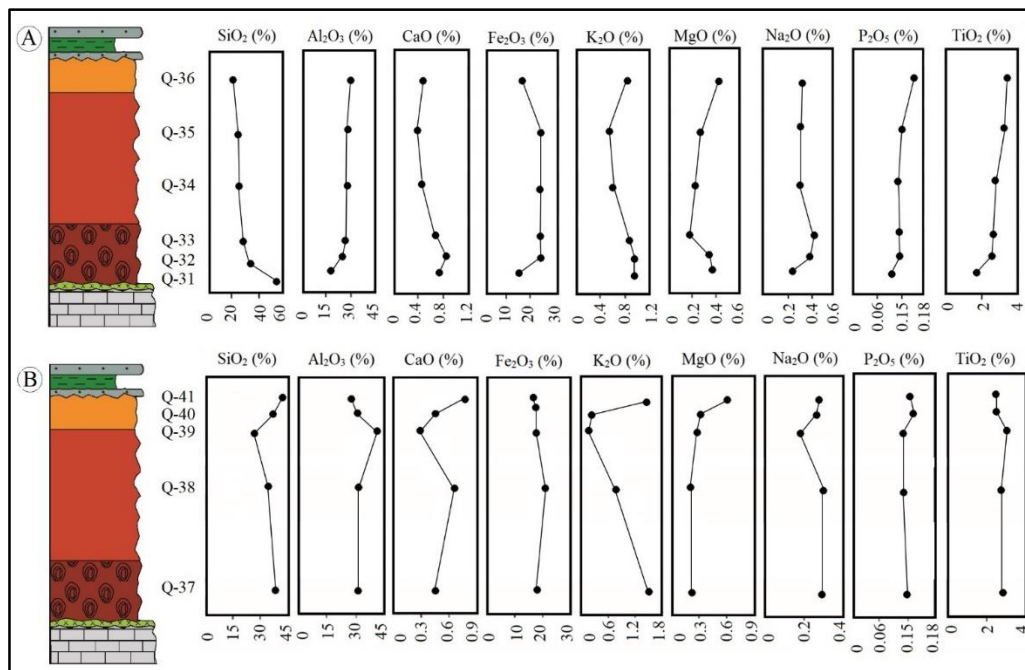
آندزی‌بازالتی مشابه است که می‌تواند بیانگر ارتباط ژنتیکی افق بوکسیتی مورد مطالعه با این گدازه‌ها باشد. یکی از نمونه‌های بوکسیت پیژوئیدی قرمز-قهوه‌ای تحتانی الگوی تقریباً متفاوت با دیگر نمونه‌های بوکسیتی را به‌ویژه در عناصر کمیاب خاکی سبک نشان می‌دهد (شکل ۱۵). این تفاوت را شاید بتوان مرتبط با خروج راحت‌تر عناصر کمیاب خاکی سبک در مراحل ابتدایی هوازدگی در نظر گرفت (Calagari and Abedini, 2007; Zarasvandi et al., 2012; Ahmadnejad et al., 2017).

الگوی تغییر عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های مختلف بوکسیتی بیانگر کاهش غلظت این عناصر از بوکسیت پیژوئیدی قرمز-قهوه‌ای تحتانی به سمت بوکسیت‌های قرمز میانی و زرد بالایی است (شکل ۱۵). چنین به نظر می‌رسد در بخش‌های فوقانی افق بوکسیتی قارخوتلو، حضور مواد

الگوی عناصر کمیاب خاکی برای گدازه تراکی آندزی‌بازالتی و نمونه‌های بوکسیتی در نهشته قارخوتلو که نسبت به کندریت (Taylor and McLennan, 1985) به‌هنگار شده‌اند، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، روند تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای بخش‌های مختلف افق بوکسیتی مشابه بوده و دارای یک الگوی پرتیب با نسبت بالای عناصر کمیاب خاکی سبک نسبت به عناصر کمیاب خاکی سنگین است که می‌تواند بیانگر تفکیک این عناصر طی فرایند بوکسیت‌زایی باشد (Calagari and Abedini, 2007; Liu et al., 2010; Zarasvandi et al., 2012; Gu et al., 2013; Ahmadnejad et al., 2017). همچنین، روند تغییرات این عناصر برای نمونه‌های بوکسیتی با روند تغییرات آنها در گدازه تراکی

می‌شود. بررسی الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های بوکسیتی در نهشته قارخوتلو نشان دهنده وجود آنومالی‌های مثبت و منفی سریم ($0/96$ تا $1/86$) و آنومالی منفی یورپیم ($0/70$ تا $0/98$) می‌باشد. در این نهشته بوکسیتی، مقادیر سریم از بوکسیت زرد بالایی به سمت بوکسیت قرمز میانی و بوکسیت پیژوئیدی قرمز-قهوه‌ای تحتانی کاهش نشان می‌دهد (شکل ۱۵). به دلیل ایجاد محیط اکسیدان طی فرایند بوکسیت‌زایی و اکسیداسیون Ce^{+3} به Ce^{+4} ، رفتار سریم مشابه با دیگر عناصر کمیاب خاکی نیست (Abedini and Calagari, 2014; Mongelli et al., 2014). این پدیده سبب غنی‌شدگی سریم و ایجاد آنومالی‌های مثبت این عنصر در بخش‌های فوقانی افق بوکسیتی می‌شود. در مقابل، فروشویی دیگر عناصر کمیاب خاکی سه‌طرفیتی توسط محلول‌ها و تمرکز آنها در نزدیکی سنگ بستر کربناته سبب غنی‌شدگی این عناصر در بخش‌های تحتانی افق بوکسیتی می‌گردد (Karadag et al., 2009). وجود شرایط قلیایی حاکم در بخش‌های تحتانی افق بوکسیتی و تشکیل کمپلکس پایدار سریم-کربنات، سبب خروج Ce^{+4} و ایجاد آنومالی‌های منفی این عنصر شده است (Karadag et al., 2009). علاوه بر این، Ce^{+4} و عناصر کمیاب خاکی سنگین به دلیل پتانسیل یونی بالاتر، تحرک کمتری در مقایسه با عناصر کمیاب خاکی سبک داشته و معمولاً در بخش‌های فوقانی افق بوکسیتی تمرکز می‌یابند (Santos et al., 2006). در بخش‌های تحتانی افق بوکسیتی، وجود شرایط قلیایی و پتانسیل یونی پایین‌تر عناصر کمیاب خاکی سبک عاملی مناسب برای غنی‌شدگی آنها در این بخش از افق بوکسیتی است (Byrne and Kim, 1990).

ارگانیک و اکسیداسیون این مواد، شرایط اسیدیته قوی را به وجود آورده است که سبب افزایش تحرک و شستشوی عناصر کمیاب خاکی از کانی‌های حامل آنها و انتقال آنها به بخش‌های تحتانی شده است (Calagari and Abedini, 2007; Liu et al., 2010; Gu et al., 2013; Yalcin and Ilhan, 2013; Salamab Ellahi et al., 2016). مطالعات قبلی نشان داده است که در محیط‌های اسیدی، جذب سطحی یون‌های سه‌طرفیتی عناصر کمیاب خاکی بر روی سطح کانی‌های رسی انجام نشده و این یون‌ها همراه با محلول به سمت بخش‌های تحتانی افق‌های بوکسیتی مهاجرت می‌کنند (Abedini and Calagari, 2014; Zamanian et al., 2016, 2019; Ahmadnejad et al., 2017; Monsels and Bergen, 2017). نبود زهکشی مناسب و بافر تا قلیایی بودن محلول‌های نزدیک به سنگ بستر آهکی، منجر به غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی در بخش‌های تحتانی افق بوکسیتی می‌شود. با افزایش پتانسیل یونی عناصر کمیاب خاکی، شعاع یونی این عناصر کاهش و تمرکز آنها کاهش می‌یابد. از این رو میزان تمرکز عناصر کمیاب خاکی سنگین در بوکسیت‌ها کمتر از عناصر کمیاب خاکی سبک است. علاوه بر این، در pH قلیایی، کمپلکس‌های کربناته عناصر کمیاب خاکی به وجود می‌آید (Johannesson et al., 1995, 1996; Ye et al., 2007). پایداری این کمپلکس‌ها با افزایش عدد اتمی بیشتر شده و سبب باقی ماندن عناصر کمیاب خاکی سنگین در محلول می‌شوند. همچنین، شرایط قلیایی برای جذب عناصر کمیاب خاکی سبک به سطح کانی‌ها مناسب می‌باشد (Sholkovitz, 1995). این پارامترها سبب افزایش نسبت عناصر کمیاب خاکی سبک به سنگین در افق‌های بوکسیتی



شکل ۱۴- نمودار تغییرات اکسیدهای اصلی برای نمونه‌های بوکسیتی در نهشته قارخوتلو. (a) نیمرخ شماره ۱ و (b) نیمرخ شماره ۲. برای جنس واحدها به شکل ۳ و موقعیت نیمرخ‌ها به شکل ۴a مراجعه شود.

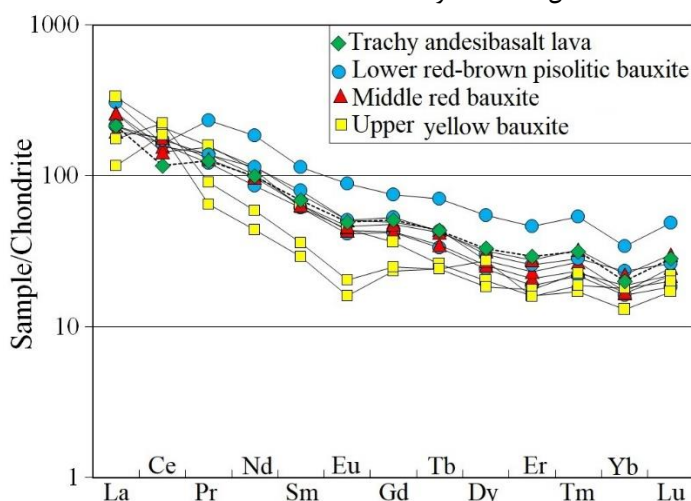
Fig. 14. Major elements variation diagram for bauxite samples in the Qarkhotlou deposit. (a) Section number 1 and (b) Section number 2. See Fig. 3 for lithology and Fig. 4a for location of sections.

تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر طی فرایند بوکسیت‌زایی

به‌منظور بررسی تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در بخش‌های مختلف افق بوکسیتی قارخوتلو، داده‌های مربوط به نمونه‌های بوکسیتی بر داده‌های مربوط به سنگ منشاء آنها (نمونه گدازه تراکی آندزیت‌بازالتی) به‌هنگار گردید تا تغییرات عناصر طی فرایند بوکسیت‌زایی مشخص شود. لازم به ذکر است که این روش نیمه‌کمی بوده و برای تعیین میزان تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر، نیاز به محاسبات موازنه جرم است که در این تحقیق انجام نشده است.

نمودار تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر برای نمونه‌های بوکسیتی نهشته قارخوتلو که نسبت به نمونه گدازه تراکی آندزیت‌بازالتی به‌هنگار شده‌اند، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌های بوکسیتی برداشت شده در امتداد نیمرخ شماره ۱ از اکسیدهای سیلیسیم، کلسیم، پتاسیم و منیزیم تهی شده (به جزء یک نمونه از بوکسیت پیژوئیدی قرمز- قهوه‌ای تحتانی که کمی از اکسید کلسیم غنی شده است) و از سایر اکسیدهای عناصر اصلی غنی شده‌اند (شکل ۱۶a). برای نمونه‌های بوکسیتی برداشت شده در امتداد نیمرخ شماره ۲، نمونه بوکسیت پیژوئیدی قرمز- قهوه‌ای تحتانی از SiO_2 , CaO , MgO تهی و از سایر اکسیدهای عناصر اصلی غنی شده است (شکل ۱۶b). نمونه

بوکسیت قرمز میانی از SiO_2 , CaO , K_2O , MgO تهی و از سایر اکسیدهای عناصر اصلی غنی شده است. نمونه‌های بوکسیت زرد بالایی نیز از SiO_2 , CaO , K_2O , MgO , Na_2O تهی و از سایر اکسیدهای عناصر اصلی غنی شده است (شکل ۱۶b). نمونه بوکسیت زرد بالایی در K_2O تهی‌شدگی چشم‌گیری را نشان می‌دهد. تمام نمونه‌های بوکسیتی مورد مطالعه نسبت به سنگ منشاء تراکی آندزیت‌بازالتی از اکسیدهای آلومینیم، آهن و تیتانیم غنی شده‌اند (شکل ۱۶a و b). تهی‌شدگی سیلیس می‌تواند به دگرسانی فلدسپات به کائولینیت و یا سریسیت و سپس تجزیه کائولینیت به گیبسیت و اسید سیلیسیک و یا کوارتز ثانویه مرتبط باشد (Zamanian et al., 2019). علاوه بر این، مقادیر زیادی از سیلیس در pH برابر ۸ یا بالاتر و فعالیت بالای آب در یک سیستم زهکشی گسترده فروشویی می‌شود (Karadag et al., 2009). غنی‌شدگی TiO_2 در نمونه‌های بوکسیتی مورد مطالعه با فروشویی سیلیس و غنی‌شدگی بازماند آلومینیم و تیتانیم در افق‌های شدیداً هوازده سازگار است. معمولاً تیتانیم و آلومینیم در طول فرایند هوازده‌گی غیر متحرک بوده و به دنبال آن می‌توان غنی‌شدگی این عناصر را در بوکسیت‌ها متصور شد (Zamanian et al., 2016, 2019).



شکل ۱۵- الگوی تغییرات عناصر کمیاب خاکی به‌هنگار شده به کندریت (Taylor and McLennan, 1985) برای گدازه تراکی آندزیت‌بازالتی و نمونه‌های بوکسیتی در نهشته قارخوتلو.

Fig. 15. Chondrite-normalized REE patterns of trachyandesibasalt lava and bauxite samples in the Qarkhotlou deposit. Normalization factors are from Taylor and McLennan (1985).

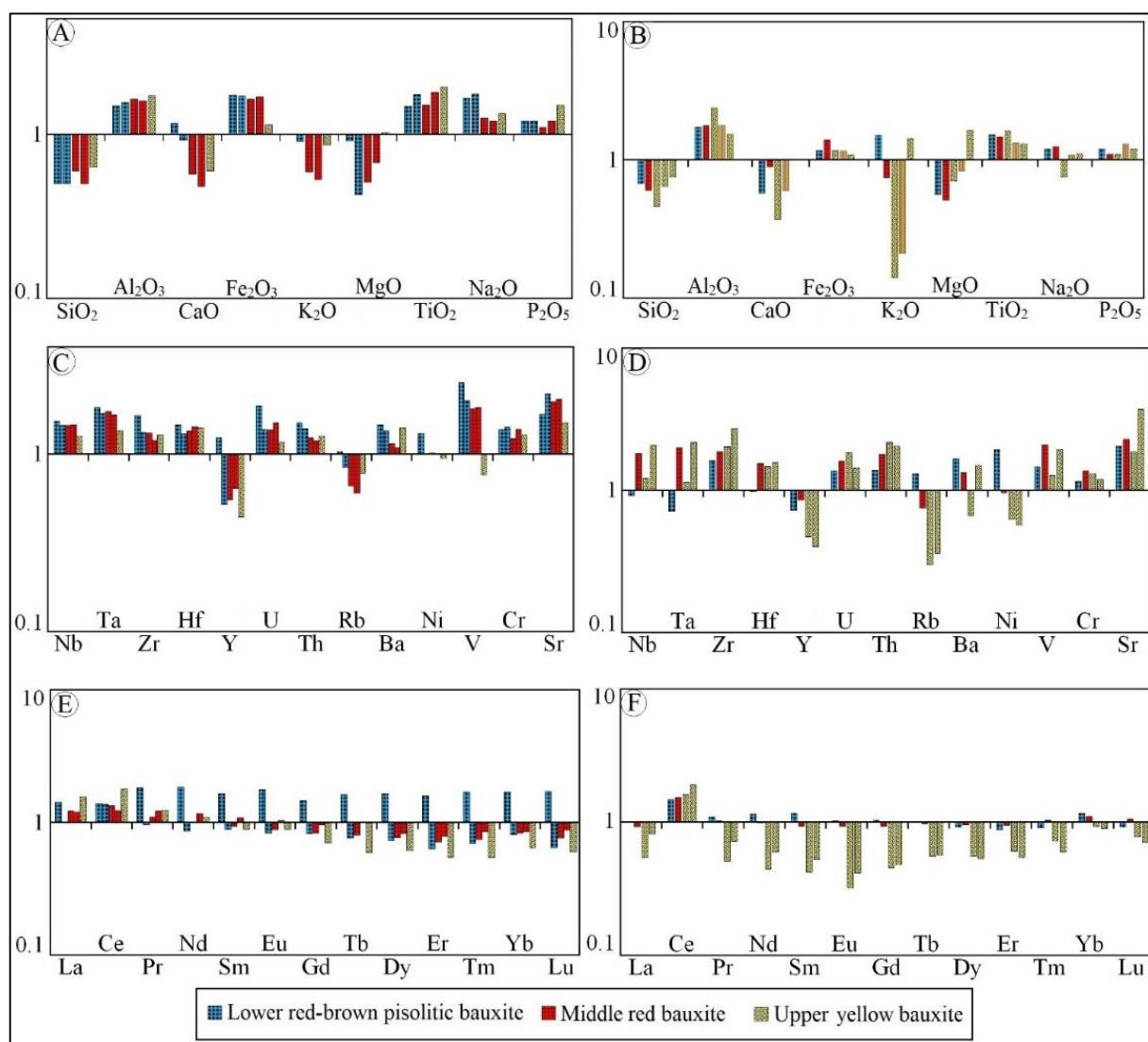
مرتبط دانست (Kiaeshkevarian et al., 2019, 2020). معمولاً عناصر Ta, Nb, Hf, Zr رفتار زمین‌شیمیایی همسانی داشته و در طول فرایند هوازده‌گی کم و بیش پایدار هستند که این امر می‌تواند به حضور کانی‌های فرعی مقاوم به هوازده‌گی (مانند کانی‌های تیتاندار) در افق‌های بوکسیتی مرتبط باشد (Mongelli et al., 2014, 2017; Zamanian et al., 2016, 2019; Kiaeshkevarian et al., 2020). غنی‌شدگی Zr می‌تواند به حضور زیرکن مربوط باشد. غنی‌شدگی Cr و V می‌تواند بیانگر نقش کانی‌های آتاز و روتیل در

نمونه‌های بوکسیت پیژوئیدی قرمز- قهوه‌ای تحتانی و بوکسیت قرمز میانی برداشت شده در امتداد نیمرخ شماره ۱ از همه عناصر به‌جز Y و Rb غنی شده‌اند (شکل ۱۶c). نمونه‌های بوکسیت زرد بالایی این نیمرخ نیز از همه عناصر به‌جز Y, Rb, Ni, V غنی شده‌اند. به جز عناصر Y, Rb, Ni و به مقدار جزئی Ta, Nb و Ba که تهی‌شدگی هستند، سایر عناصر کمیاب در نمونه‌های بوکسیتی برداشت شده در امتداد نیمرخ شماره ۲، غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۶d). کاهش Rb را می‌توان به دگرسانی کانی‌های فلدسپاتی و غنی‌شدگی U و Th را به جذب سطحی این دو عنصر بر روی هیدروکسیدهای آلومینیم

سبک غنی و از عناصر کمیاب خاکی سنگین به جزء Yb تهی شده است (شکل f۱۶). در نیمرخ شماره ۲، نمونه بوکسیت قرمز میانی از عناصر Cr, Pr, Nd, Sm و Yb غنی و از سایر عناصر کمیاب خاکی تهی شده است. غنی‌شدگی عناصر کمیاب خاکی سبک در نهشته بوکسیت قارخوتلو، احتمالاً به سبب جذب انتخابی آنها به وسیله اکسیدهای فلزی مانند هماتیت و کانی‌های رسی است (Bradbury and Baeyens, 2002; Ma et al., 2007; Ndjigui et al., 2008; Beyala et al., 2009; Liu et al., 2016; Monsels and Bergen, 2017; Abedini et al., 2018).

تثبیت این عناصر باشد (Mordberg et al., 2001; Long et al., 2017).

نمونه بوکسیت پیزوئیدی قرمز-قهوه‌ای تحتانی نیمرخ شماره ۱، از عناصر کمیاب خاکی سبک، غنی‌شدگی و از عناصر کمیاب خاکی سنگین، تهی‌شدگی نشان می‌دهد (شکل e۱۶). نمونه‌های بوکسیت قرمز میانی و زرد بالایی برداشت شده در امتداد این نیمرخ از عناصر La, Ce, Pr, Nd غنی و از سایر عناصر کمیاب خاکی تهی شده‌اند (شکل e۱۶). نمونه بوکسیت زرد بالایی برداشت شده در امتداد نیمرخ شماره ۲ در همه عناصر به جز Ce تهی شده است (شکل f۱۶). نمونه بوکسیت پیزوئیدی قرمز-قهوه‌ای تحتانی این نیمرخ از عناصر کمیاب خاکی



شکل ۱۶- نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر اصلی (a و b)، کمیاب (c و d) و کمیاب خاکی (e و f) برای نمونه‌های بوکسیتی در نهشته قارخوتلو که نسبت به گدازه تراکی آندزیت‌بازالتی سالم (نمونه شماره Q-50، جدول‌های ۱ و ۲) به‌نحیج شده‌اند. نمودارهای a، c و f مربوط به نیمرخ شماره ۱ و نمودارهای b، d و e مربوط به نیمرخ شماره ۲ می‌باشند.

Fig. 16. Loss and gain diagrams for major (a and b), trace (c and d) and REE (e and f) elements for the Qarkhotlou bauxite samples that normalized relative to fresh trachyandesibasalt lava (sample Q-50, Tables 1 and 2); a, c and e diagrams belong to section 1 and b, d and f diagrams belong to section 2.

1982; Liu et al., 2012; Long et al., 2017; Mongelli et al., 2017.

با توجه به ویژگی انواع نهشته‌های بوکسیتی و با عنایت به شواهد صحرایی و ساخت و بافتی، نهشته بوکسیت قارخوتلو بیشترین شباهت را با نهشته‌های بوکسیت کارستی (زیر رده مدیترانه‌ای) در طبقه‌بندی Bárdossy (۱۹۸۲) دارد. همه ذخایر بوکسیت مدیترانه‌ای به کربنات‌های رخنمون‌یافته در محیط‌های خشکی محدود بوده و به‌طور محلی یا ناحیه‌ای شواهد ناپیوستگی را نشان می‌دهند (Boni et al., 2013). این نوع ذخایر بوکسیتی به‌ندرت حاوی میان‌لایه‌های آهکی درجا‌زا بوده و محتوای مواد آلی در آنها بسیار پایین می‌باشد. سنگ بستر بوکسیت‌های کارستی مدیترانه‌ای اغلب سنگ‌های کربناته از نوع رخساره کم‌عمق مانند سنگ آهک، آهک دولومیتی و دولومیت بوده و سنگ پوشش آنها شامل رس‌های زرد، قرمز و خاکستری، تناوب رس و ماسه‌سنگ، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، دولومیت، شیل و یا تناوبی از آنها می‌باشد. همچنین این نهشته‌ها حاوی مقادیر قابل توجهی رس‌های بوکسیتی می‌باشند. در جدول ۳ ویژگی‌های نهشته بوکسیت قارخوتلو با انواع نهشته‌های بوکسیت کارستی ایران در زمان پرمو-تریاس مقایسه شده است.

نوع نهشته بوکسیت قارخوتلو

بر اساس ترکیب کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و جنس سنگ میزبان، نهشته‌های بوکسیتی به سه نوع اصلی لاتریتی، کارستی و تیخوین تقسیم‌بندی می‌شوند (Bárdossy and Aleva, 1990; Zarasvandi et al., 2012; Ahmadnejad et al., 2017). بوکسیت‌های نوع لاتریتی حاوی گیبسیت به‌عنوان کانی اصلی اکسید آلومینیم آبدار بوده و عموماً به‌صورت نهشته‌های برجا از لاتریتی‌شدن مستقیم سنگ‌های آلومینوسیلیکاته حاصل می‌شوند (Bárdossy, 1982; Bogatyrev et al., 2009; Ling et al., 2015). بوکسیت‌های نوع تیخوین، نهشته‌های تخریبی و حمل‌شده‌ای هستند که سنگ‌های آلومینوسیلیکاته فرسایش‌یافته را می‌پوشانند اما هیچ ارتباط زایشی با این سنگ‌ها ندارند (Mameli et al., 2007; Abedini and Calagari, 2014; Zamanian et al., 2016). این ذخایر محصول فرسایشی نهشته‌های بوکسیت لاتریتی هستند.

بوکسیت‌های کارستی حاوی بوهمیت و یا دیاسپور به‌عنوان کانی‌های اصلی غنی از آلومینیم می‌باشند. این بوکسیت‌ها بر روی سطوح کارستی و یا فرسایشی سنگ‌های کربناته تشکیل می‌شوند (Bárdossy, 2016).

جدول ۳- مقایسه ویژگی‌های اصلی نهشته بوکسیت قارخوتلو با نهشته‌های بوکسیت کارستی پرمو-تریاس ایران.

Table 3. Comparison of main characteristics of Qarkhotlou bauxite deposit with Permo-Triassic karst bauxite deposits of Iran.

	Qarkhotlou	Biglar	Tash	Heydarabad	Qoppi
Location	SW Zanjan	SW Qazvin	NW Shahroud	SE Urmia	South of Urmia
Host rock	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.	Ruteh Fm.
Cap rock	Shemshak Fm.	Elika Fm.	Shemshak Fm.	Mila Fm.	Elika Fm.
Mineralogy	Hem, Kln, Bhm, Dsp, Prl	Dsp, Hem, Ant, Kln	Dsp, Ant, Kln, Hem, Gth,	Hem, Dsp, Cld, Crn	Dsp, Hem, Prl, Kln
Al₂O₃ (wt.%)	17-41	19-65	11-58	21-51	18-60
Age	Permo-Triassic	Permo-Triassic	Permo-Triassic	Permo-Triassic	Permo-Triassic
Geometry	Layering	Layering	Layering	Layering	Layering
Texture	Pelitomorphic, microgranular, flow, breccia, pseudoporphry, oolitic, pisolitic	Pseudobreccia, pseudoporphry, collomorphic, nodular, skeletal	Pelitomorphic, microgranular, oolitic, pisolitic, flow	Microgranular, pseudoporphry, oolitic, pisolitic, flow	Pelitomorphic, pseudobreccia, pseudoporphry, flow
Origin	Autochthonous, allochthonous	Autochthonous	Autochthonous, allochthonous	Autochthonous	Autochthonous
Precursor rock	Trachyandesibasalt	Andesite	Mafic rocks	Diabase	Diabase
Type of bauxite	Mediterranean karst bauxite	Mediterranean karst bauxite	Mediterranean karst bauxite	Mediterranean karst bauxite	Mediterranean karst bauxite
Reference	This study	Kangarani (2008)	Shamanian et al. (2015)	Imamalipour and Mirmohammadi (2011)	Abedini (2002)

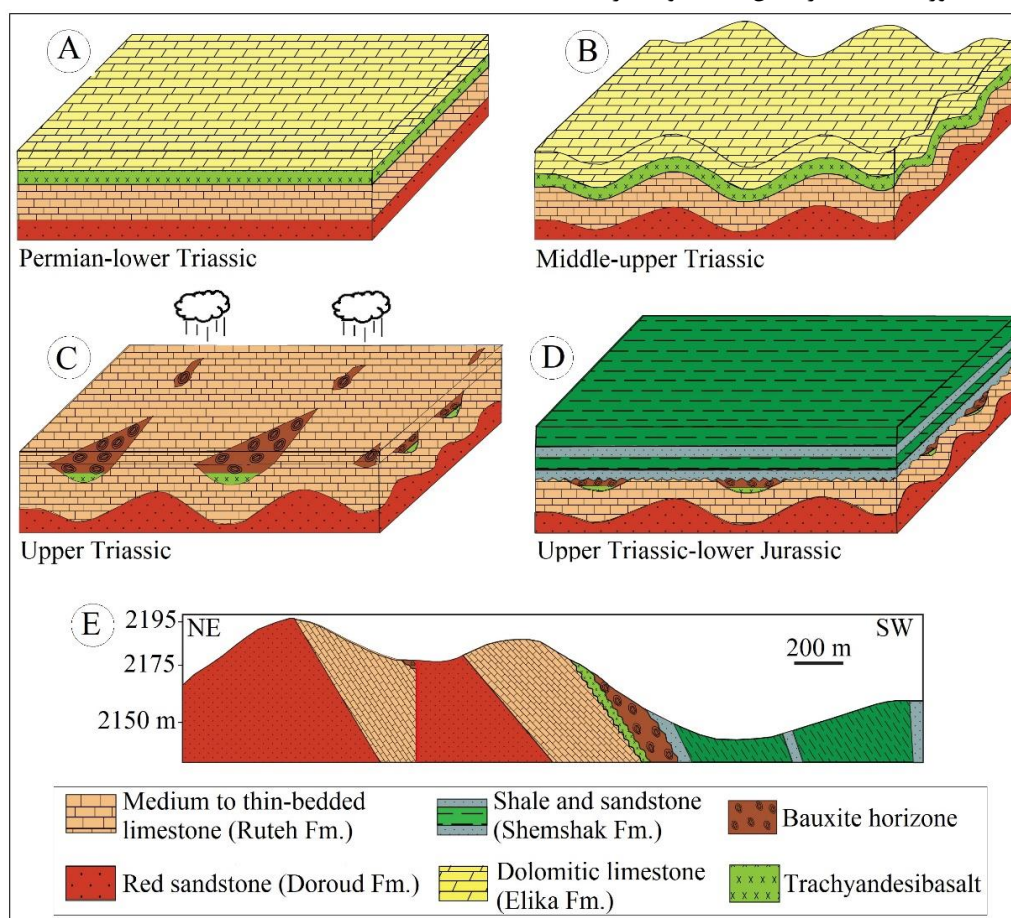
Abbreviations: Ant: anatase, Bhm: boehmite, Cld: chloritoid, Crn: corundum, Dsp: diaspor, Hem: hematite, Kln: kaolinite, Prl: pyrophyllite. All abbreviations follow Whitney and Evans (2010).

الگوی تشکیل نهشته بوکسیت قارخوتلو

بر اساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ شناسی، کانه نگاری و XRD، ساخت و بافت و داده های زمین شیمیایی، مراحل تکوین و تکامل تشکیل نهشته بوکسیت قارخوتلو را می توان به صورت توالی پنج مرحله ای به شرح زیر خلاصه کرد (شکل ۱۷):

مرحله نخست با ته نشست توالی های ماسه سنگی سازند درود (پرمین زیرین)، توالی سنگ آهکی سازند روته (پرمین میانی)، واحدهای گدازه ای زیر دریایی تراکی آندزیت بازالتی و در نهایت توالی های سنگ آهکی و دولومیتی سازند الیکا (تریاس زیرین) مشخص می شود (شکل ۱۷a). هرچند سازند الیکا در منطقه قارخوتلو رخنمون ندارد اما مطالعات Zohdi (۲۰۱۸) در برش آق بلاغ در ۶۰ کیلومتری شمال باختر منطقه قارخوتلو نشان دهنده وجود توالی های سازند الیکا در باختر منطقه زنگان می باشد. در مرحله دوم، واحدهای سنگی منطقه طی فاز کوهزایی سیمین پیشین (تریاس میانی- بالایی) چین و گسل خورده، از آب خارج شده و تحت شرایط گرم حاره ای قرار گرفته اند (شکل ۱۷b). در مرحله سوم، سازند الیکا تحت تأثیر فرایندهای هوازدگی شدید به طور کامل در منطقه مورد مطالعه فرسایش یافته و گدازه های

زیر دریایی تراکی آندزیت بازالتی هوازده شده اند (شکل ۱۷c). با توجه به فراهم بودن سنگ بستر مناسب (سطوح فرسایشی و حفرات کارستی سازند روته)، شرایط برای بوکسیت زایی ناشی از هوازدگی گدازه های تراکی آندزیت بازالتی فراهم شده است. در این شرایط، با توسعه فرایندهای هوازدگی فیزیکی و شیمیایی، عناصر قلیایی و سیلیس از سنگ منشاء تراکی آندزیت بازالتی شسته شده و خاک های برجای مانده، از عناصر نامتحرک مانند آلومینیم، آهن و تیتانیم غنی شده اند (Gu et al., 2013; Yu et al., 2014; Ahmadnejad et al., 2017). بعضاً شواهدی از حمل و جابه جایی در افق بوکسیتی قارخوتلو دیده می شود که از مهم ترین این شواهد می توان به بافت های پیروئیدی و اوئیدی خرد شده و جهت یافته و وجود قطعات آواری در زمینه بوکسیت اشاره کرد. در مرحله چهارم، با پیشروی دریای ژوراسیک، نهشته های آواری سازند شمشک (ژوراسیک زیرین) بر روی افق بوکسیتی نهشته می شود (شکل ۱۷d) که این امر سبب محفوظ ماندن افق بوکسیتی از فرسایش شده است. مرحله پنجم با بالآمدگی ناحیه ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و ریخت شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۷e).



شکل ۱۷- نمایی شماتیک نشان دهنده تاریخچه تکامل زمین شناسی و تشکیل نهشته بوکسیت قارخوتلو. برای توضیح به متن مراجعه شود.

Fig. 17. Schematic model showing the geological evolution history and formation of the Qarkhotlou bauxite deposit. See text for details.

نتیجه گیری

مهم ترین نتایج حاصل از بررسی های کانی شناسی، ساخت و بافتی و زمین شیمیایی در نهشته بوکسیتی قارخوتلو شامل موارد زیر است:

- ۱- هماتیت، گوتیت، بوهمیت، دیاسپور، کائولینیت و پیروفیلیت کانی های اصلی موجود در نهشته بوکسیت قارخوتلو هستند که با سریسیت-ایلپت، آنازاس، روتیل و کلریت همراهی می شوند.
- ۲- وجود بافت های پانایدیومورفیک، میکروگرانولار، پلیتومورفیک، پیژونیدی و اوونیدی در نهشته بوکسیت قارخوتلو بیانگر تشکیل برجای این نهشته بر روی سنگ منشاء خود است. با این وجود، حضور قطعات پلوئیدی و آواری و ساخت های جریان و پرشی نشان دهنده حمل و جابه جایی کوتاه مواد بوکسیتی از محیط اولیه تشکیل و ته نشین شدن در محیط های رسوبی کارستی و یا سطوح فرسایشی می باشد.
- ۳- نهشته بوکسیت قارخوتلو از نوع بوکسیت و رس بوکسیتی بوده و دارای سنگ منشاء تراکی آندزیت بازالیتی می باشد. این افق احتمالاً در pH بین ۴ تا ۸ و Eh حدود ۰/۴ تا ۰/۶ تشکیل شده و درجات متوسطی از فرایند لاتریتی شدن را متحمل شده است.
- ۴- الگوی پرتیب عناصر کمیاب خاکی با نسبت بالای عناصر کمیاب خاکی سبک به عناصر کمیاب خاکی سنگین در نمونه های بوکسیتی با تفکیک این عناصر طی فرایند بوکسیت زایی هم خوان است. علاوه بر این، الگوی این عناصر در نمونه های بوکسیتی و گدازه تراکی آندزیت بازالیتی

مشابه است که می تواند بیانگر ارتباط ژنتیکی افق بوکسیتی با این گدازه ها باشد.

۵- نمونه های بوکسیتی نسبت به سنگ منشاء تراکی آندزیت بازالیتی از Zr , Al_2O_3 , Fe_2O_3 غنی شده اند. عناصر نامتحرک مانند Zr , Ta و Cr , Hf , V , Th , U طی فرایند بوکسیت زایی غنی شده اند. طی این فرایند، عناصر کمیاب خاکی سبک، غنی شدگی و عناصر کمیاب خاکی سنگین، تهی شدگی نشان می دهند.

۶- قارخوتلو یک نهشته بوکسیت کارستی (زیرتپ مدیترانه ای) است که از هوازدهی گدازه های تراکی آندزیت بازالیتی بر روی سطوح کارستی و یا فرسایشی سازند روته تشکیل شده است. این نهشته، یکی از ذخایر بوکسیتی موجود در محور سلطانیه- ماه نشان است که بیانگر نبود چینه ای بین پرمین و تریاس زیرین در شمال باختر ایران می باشند. بررسی این مرز فرسایشی می تواند به اکتشاف ذخایر دیگری از بوکسیت در محور سلطانیه- ماه نشان و شمال باختر ایران منجر گردد.

قدردانی

نویسندگان از حمایت های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش و از آقای م.ح. آقاخانی بهره بردار معدن قارخوتلو به خاطر همراهی در بازدیدهای صحرایی و تأمین بخشی از هزینه های تجزیه نمونه ها کمال تشکر و قدردانی را دارند. نویسندگان همچنین از سردبیر و داوران محترم مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته به خاطر راهنمایی های علمی که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، تشکر می نمایند.

منابع

- Abedini, A., 2002. Economic geological survey of bauxite-laterite deposits of western Miyandoab (around Qoppi Babaali village). M.Sc. Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, p.163.
- Abedini, A., Calagari, A.A., 2014. REE geochemical characteristics of titanium-rich bauxites: The Permian Kanigorgeh horizon, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences* 23 (5), 513–532.
- Abedini, A., Calagari, A.A., 2015. Mobilization and redistribution of major and trace elements in a lateritic profile: The Sheikh-Marut deposit, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8, 10871–10882.
- Abedini, A., Calagari, A.A., Rezaei Azizi, M., 2018. The tetrad-effect in rare earth elements distribution patterns of titanium-rich bauxites: Evidence from the Kanigorgeh deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 186, 129–142.
- Ahmadnejad, F., Zamanian, H., Taghipour, B., Zarasvandi, A., Buccione, R., 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 Geology Reviews* 86, 755–783.
- Babakhani A., Sadeghi A. 2004. Geological map of Zanjan, scale 1:100000, Geological Survey and mineral exploration of Iran.
- Balasubramaniam, K., Surendra, M., Kumar, T.R., 1987. Genesis of certain bauxite profiles from India. *Chemical Geology* 60 (1–4), 227–235.
- Bárdossy, G., 1982. Karst bauxites. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam. p.441.
- Bárdossy, G., Alewa, G.J.J., 1990. Lateritic bauxites. *Developments in Economic Geology* 27, Elsevier Scientific Publication, Amsterdam, p. 624.
- Bárdossy, G., Combes P.J., 1999. Karst bauxites: Interfingering of deposition and palaeoweathering. In: Thiry, M., Coincon, R.S. (Editors), *Palaeoweathering, palaeosurfaces and related continental deposits*. Association of Sedimentologists Special Publications, Blackwell Science, Alden Press, p. 189–206.
- Beyala, V.K.K., Onana, V.L., Priso, E.N.E., Parisot, J., Ekodeck, G.E., 2009. Behaviour of REE and mass balance calculations in a lateritic profile over chlorite schists in South Cameroon. *Chemie der Erde (Geochemistry)* 69, 61–73.

- Bogatyrev, B.A., Zhukov, V.V., Tsekhovskiy, Y.G., 2009. Formation conditions and regularities of the distribution of large and super-large bauxite deposits. *Lithology and Mineral Resources* 44(2), 135–151.
- Boni, M., Rollinson, G., Mondillo, N., Balassone, G., Santoro, L., 2013. Quantitative mineralogical characterization of karst bauxite deposits in the southern Apennines, Italy. *Economic Geology* 108 (4), 813–833.
- Bradbury, M.H., Baeyens, B., 2002. Sorption of Eu on Na- and Ca-montmorillonites: Experimental investigations and modeling with cation exchange and surface complexation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66(13), 2325–2334.
- Byrne, R.H., Kim, K.H., 1990. Rare earth element scavenging in sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54 (10), 2645–2656.
- Calagari, A.A., Abedini, A., 2007. Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 94 (1–3), 1–18.
- Delvigne, J., 1998. Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering. The Canadian Mineralogist Special Publication 3, Ottawa, p.509.
- Eshghabadi, M., 2015. Final exploration report of laterite in Qarkhotlou area. Industry, Mine and Trade Organization of Zanjan, Zanjan, p. 86 (in Persian)
- Evans, A.M., 1993. Ore Geology and industrial minerals: An introduction. Blackwell, London, p. 389.
- Ferenczi, P., 2001. Iron ore, manganese and bauxite deposits of the northern Territory. Northern Territory Geological Survey, Northern Territory, Report 13, p. 113.
- Garrels, R., Christ, C.M., 1965. Solutions, minerals, and equilibria. Harper and Raw, New York, p. 450.
- Ghasemi, M., Abedini, A., Calagari, A.A., 2019. Mineralogy and REEs geochemistry of the Zaraj-Sou bauxite deposit, southwest of Ramsar, north Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 27 (2), 295–306. (in Persian with English abstract).
- Gu, J., Huang, Z., Fan, H., Jin, Z., Yan, Z., Zhang, J., 2013. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan–Zheng'an–Daozhen area, Northern Guizhou Province, China. *Journal of Geochemical Exploration* 130, 44–59.
- Habibzadeh, E., Shamanian, G.H., Omrani, H., 2014. Textural element investigation of the Jajarm karstic bauxite: Composition and formation condition. *Journal of Economic Geology* 6 (1), 163–176 (in Persian with English abstract).
- Hill, I., Worden, R., Meighan, I.G., 2000. Geochemical evolution of a paleolaterite: The Interbasaltic Formation, Northern Ireland. *Chemical Geology* 166 (1–2), 65–84.
- Horbe, A., Anand, R.R., 2011. Bauxite on igneous rocks from Amazonia and southwestern of Australia: Implication for weathering process. *Journal of Geochemical Exploration* 111 (1–2), 1–12.
- Imamalipour, A., Mirmohammadi, M., 2011. Mineralogy and geochemistry of corundum-bearing metabauxite-laterite from Heydarabad, SE Urmia, NW Iran. *Iranian journal of Crystallography and Mineralogy* 19 (1), 59–72.
- Johannesson, K.H., Lyons, W.B., Stetzenbach, K.J., Byrne, R.H., 1995. The solubility control of rare earth elements in natural terrestrial waters and the significance of PO_4^{3-} and CO_3^{2-} in limiting dissolved rare earth concentrations: A review of recent information. *Aquat Geochem* 1(2), 157–173.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., Lyons, W.B., 1996. Rare earth element complexation behavior in circumneutral pH groundwaters: Assessing the role of carbonate and phosphate ions. *Earth and Planetary Science* 139 (1–2), 305–319.
- Kangarani, F., 2008. Consideration of geochemistry and mineralogy in Biglar bauxitic horizon (northwest of Abgarm, Gazvin province). M.Sc. Thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, p. 100.
- Karadağ, M.M., Küpeli, Ş., Arýk, F., Ayhan, A., Zedef, V., Döyen, A., 2009. Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya–Southern Turkey). *Geochemistry* 69 (2), 143–159.
- Khosravi, M., Abedini, A., Alipour, S., Mongelli, G., 2017. The Darzi-Vali bauxite deposit, West-Azarbaidjan Province, Iran: Critical metals distribution and parental affinities. *Journal of African Earth Sciences* 129, 960–972.
- Kiaeshkevarian, M., Calagari, A.A., Abedini, A., Shamanian, Gh., 2020. Geochemical aspects of minor and rare earth elements in the Gheshlagh bauxite deposit, Golestan Province, North of Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 29 (116), 125–134. (in Persian with English abstract).
- Kiaeshkevarian, M., Calagari, A.A., Abedini, A., Shamanian, G., 2019. Mineralogical and geochemical characteristics of the Siahruddar bauxite deposit, Golestan Province, north of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 27 (3), 507–520. (in Persian with English abstract).

- Komlóssy, G., 1976. Minéralogie, géochimie et génétique des bauxites du Viet Nam du nord. *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 20 (3–4), 199–244.
- Laskou, M., 1991. Concentrations of rare earths in Greek bauxites. *Acta Geologica Hungarica* 34 (4), 195–404.
- Laskou, M., 2003. Geochemical and mineralogical characteristics of the bauxite deposits of Western Greece. *Mineral Exploration and Sustainable Development* 77 (1), 93–96.
- Liaghat, S., Hosseini, M., Zarasvandi, A., 2003. Determination of the origin and mass change geochemistry during bauxitization process at the Hangan deposit, SW Iran. *Geochemistry Journal* 37, 627–637.
- Ling, K.Y., Zhu, X.Q., Tang, H.S., Wang, Z.G., Yan, H.W., Han, T., Chen, W.Y., 2015. Mineralogical characteristics of the karstic bauxite deposits in the Xiuwen ore belt, Central Guizhou Province, Southwest China. *Ore Geology Reviews* 65 (1), 84–96.
- Liu, X., Wang, Q., Deng, J., Zhang, Q., Sun, S., Meng, J., 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. *Journal of Geochemical Exploration* 105 (3), 137–152.
- Liu, X., Wang, Q., Zhang, Q., Feng, Y., Cai, S., 2012. Mineralogical characteristics of the super-large Quaternary bauxite deposits in Jingxi and Debao counties, western Guangxi, China. *Journal of Asian Earth Sciences* 52, 53–62.
- Liu, X., Wang, Q., Zhang, Q., Zhang, Y., Li, Y., 2016. Genesis of REE minerals in the karstic bauxite in western Guangxi, China, and its constraints on the deposit formation conditions. *Ore Geology Reviews* 75, 100–115.
- Long, Y., Chi, G., Liu, J., Jin, Z., Dai, T., 2017. Trace and rare earth elements constraints on the sources of the Yunfeng paleo-karstic bauxite deposit in the Xiuwen-Qingzhen area, Guizhou, China. *Ore Geology Reviews* 91, 404–418.
- Ma, J., Wei, G., Xu, Y., Long, W., Sun, W., 2007. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 3223–3237.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G., 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. *International Journal of Earth Sciences* 96 (5), 887–902.
- Mongelli, G., Boni, M., Buccione, R., Sinisi, R., 2014. Geochemistry of the Apulian karst bauxites (southern Italy): Chemical fractionation and parental affinities. *Ore Geology Reviews* 63, 9–21.
- Mongelli, G., Boni, M., Oggiano, G., Mameli, P., Sinisi, R., Buccione, R., Mondillo, N., 2017. Critical metals distribution in Tethyan karst bauxite: The cretaceous Italian ores. *Ore Geology Reviews* 86, 526–536.
- Mongelli, G., Buccione, R., Gueguen, E., Langone, A., Sinisi, R., 2016. Geochemistry of the Apulian allochthonous karst bauxite, southern Italy: Distribution of critical elements and constraints on Late Cretaceous Peri-Tethyan palaeogeography. *Ore Geology Reviews* 77, 246–259.
- Mongelli, G., Buccione, R., Sinisi, R., 2015. Genesis of autochthonous and allochthonous Apulian karst bauxites (southern Italy): Climate constraints. *Sedimentary geology* 325, 168–176.
- Monsels, D.A., Bergen, M.J.V., 2017. Bauxite formation on Proterozoic bedrock of Suriname. *Journal of Geochemical Exploration* 180, 71–90.
- Mordberg, L.E., Stanley, C.J., Germann, K., 2001. Mineralogy and geochemistry of trace elements in bauxites: the Devonian Schugorsk deposit, Russia. *Mineralogical Magazine* 65 (1), 81–101.
- Mutakyahwa, M., Ikingura, J., Mruma, A., 2003. Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto district, Usambara Mountains, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* 36 (4), 357–369.
- Ndjigui, P.D., Bilong, P., Bitom, D., Dia, A., 2008. Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 50, 305–328.
- Nori Nav, F., Zohdi, A., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., 2019. Stratigraphy, sedimentary environment and geochemistry of the Ruteh Formation in Qarkhotlou region, southwest of Zanjan. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches* 35 (3), 57–78.
- Norton, S.A., 1973. Laterite and bauxite formation. *Economic Geology* 68 (3), 353–361.
- Özlü, N., 1983. Trace-element content of karst bauxites and their parent rocks in the Mediterranean belt. *Mineralium Deposita* 18 (3), 469–476.
- Öztürk, H.S., Hein, J.R., Haniçlı, N., 2002. Genesis of the Dogankuzu and Mortas bauxite deposits, Taurides, Turkey: Separation of Al, Fe, and Mn and implications for passive margin metallogeny. *Economic Geology* 97 (5), 1063–1077.

- Patterson, S.H., 1967. Bauxite reserves and potential aluminum resources of the world. United State Geological Survey, Washington, p. 176.
- Petrasccheck, W., 1989. The genesis of allochthonous karst-type bauxite deposits of southern Europe. *Mineralium Deposita* 24 (2), 77–81.
- Price, G.D., Valdes, P.J., Sellwood, B.W., 1997. Predication of modern bauxite occurrence: Implications for climate reconstruction. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology* 131 (1–2), 1–13.
- Putzolu, F., Papa, A.P., Mondillo, N., Boni, M., Balassone, G., Mormone, A., 2018. Geochemical characterization of bauxite deposits from the Abruzzi mining district (Italy). *Minerals* 8 (298), 1–24.
- Reinhardt, N., Proenza, J.A., Villanova-de-Benavent, C., Aiglsperger, T., Bover-Arnal, T., Torró, L., Salas, R., Dziggel, A., 2018. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements (REE) in bauxitic ores of the Catalan Coastal Range, NE Spain. *Minerals* 8 (562), 1–25.
- Reolid, M., Abad, I., Martin-Garcia, J.M., 2008. Palaeoenvironmental implications of ferruginous deposits related to a Middle–Upper Jurassic discontinuity (Prebetic Zone, Betic Cordillera, southern Spain). *Sedimentary Geology* 203 (1–2), 1–16.
- Santos, M.D.C., Varajao, A.F.D.C., Yvon, J., 2006. Geochemistry of a sedimentary lateritic kaolin deposit in Quadrilatero Ferrifero, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration* 88 (1–3), 318–320.
- Salamab Ellahi, S., Taghipour, B., Zarasvandi, A., Bird, M.I., Karimzadeh Somarin, A., 2016. Mineralogy, Geochemistry and Stable Isotope Studies of the Dopolan Bauxite Deposit, Zagros Mountain, Iran. *Minerals* 6 (11), 1–21.
- Schellmann, W., 1986. On the geochemistry of laterites. *Chemie der Erde* 45, 39–42.
- Shamanian, G.H. Monfared, Z., Omrani H. 2015. Stratigraphic, petrographic and facies characteristics of the Tash and Astaneh bauxitic-lateritic deposits in eastern Alborz: Palaeoenvironmental implications. *Sedimentary Facies* 8 (1), 71–86.
- Sholkovitz, E.R., 1995. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries. *Aquatic Geochemistry* 1 (1), 1–34.
- Sinsi, R., 2018. Mineralogical and geochemical features of Cretaceous bauxite from San Giovanni Rotondo (Apulia, southern Italy): A provenance tool. *Minerals* 8 (567), 1–19.
- Taylor, G., Eggleton, T., 2004. Little balls: The origin of the Weipa bauxite. *Regolith* 2004, 350–254.
- Taylor, G., Eggleton, R.A., Foster, L.D., Tilley, D.B., Le Gleuher, M., Morgan, C.M., 2008. Nature of the Weipa bauxite deposit, northern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences* 55 (S1), 45–70.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, p. 312.
- Temur, S., Kansun, G., 2006. Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (4), 512–522.
- Temur, S., 2006. A geochemical approach to parent rocks of the Maşatdağı diasporic bauxite, Alanya, Antalya, southern Turkey. *Geochemistry International* 44 (9), 941–952.
- Valeton, I., 1972. Bauxites. *Developments in Soil Science*, Elsevier, Amsterdam, p. 226.
- Valeton, I., 1999. Saprolite bauxite facies of ferrallitic duricrusts on paleosurfaces of former Pangaea. In: Thiry, M., Coincon, R.S. (Editors), *Palaeoweathering, palaeosurfaces and related continental deposits*. Association of Sedimentologists Special Publications, Blackwell Science, Alden Press, p. 153–188.
- Wang, X., Jiao, Y., Du, Y., Ling, W., Wu, L., Cui, T., Zhou, Q., Jin, Z., Lei, Z., Weng, S., 2013. REE mobility and Ce anomaly in bauxite deposit of WZD area, Northern Guizhou, China. *Journal of Chemical Geology* 133, 103–117.
- White, A., 1976. Genesis of low iron bauxite, northeastern Cape York, Queensland, Australia. *Economic Geology* 71 (8), 1526–1532.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist* 95 (1), 185–187.
- Yalcin, M.G., Ilhan, S., 2013. Major and trace element geochemistry of bauxites: Ayranci, Karaman, Central Bolukdag, Turkey. *Asian Journal of Chemistry* 25, 2893–2904.
- Yang, S., Huang, Y., Wang, Q., Deng, J., Liu, X., Wang, J., 2019. Mineralogical and geochemical features of karst bauxites from Poci (western Henan, China), implications for parental affinity and bauxitization. *Ore Geology Reviews* 105, 295–309.
- Ye, L., Cheng, Z.T., Pan, Z.P., 2007. The REE geochemical characteristics of the Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* 26 (3), 228–233.

- Yu, W., Ruihu, W., Qilian, Z., Yuansheng, D., Yue, C., Yuping, L., 2014. Mineralogical and geochemical evolution of the Fusui bauxite deposit in Guangxi, south China: From the original Permian orebody to a Quarternary Salento-type deposit. *Journal of Geochemical Exploration* 146, 75–88.
- Zamanian, H., Ahmadnejad, F., Zarasvandi, A., 2016. Mineralogical and geochemical investigations of the Mombi bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Chemie der Erde* 76 (1), 13–37.
- Zamanian, H., Beiranvand, G., Ahmadnejad, F., 2019. Mineralogy, Geochemistry and the Origin of the Bagoushi Karst Bauxite Deposit, Northwestern Fars Province, Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 28 (112), 269–280. (in Persian with English abstract).
- Zarasvandi, A., Carranza, E.J.M., Ellahi, S.S., 2012. Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Deh-now bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 48, 125–138.
- Zarasvandi, A., Charchi, A., Carranza, E.J.M., Alizadeh, B., 2008. Karst bauxite deposits in the Zagros mountain belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 34 (4), 521–532.
- Zarasvandi, A., Zamanian, H., Hejazi, E., 2010. Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 107 (1), 77–85.
- Zohdi, A. 2018. Sedimentary environment and sequence stratigraphy of the Ruteh Formation in the west of Zanjan (Agh-Bolagh section). *Scientific Quarterly Journal, Geosciences* 27 (108), 133–144. (in Persian with English abstract).