

Research Article

Mineralogy and geochemistry of trace and rare earth elements of the Chah Badam Coal mine, Yazd province

Seyedeh Narges Sadati^{1*}, Ahmad Hosseinkhani²

1- Department of Geology, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Tehran, Sarmak Mining Company

Keywords: coal, rare earth elements, trace elements, maceral, Chah Badam, Yazd.

1-Introduction

One of Iran's coal-bearing units is in Yazd province, Chah Badam coal mine, Bahabad city. Its approximate area is 10 square kilometers, and it is on geological sheet 1:250000 Raver and sheet 1:100000 Bahabad. Structural geology is considered a part of the central Iran zone. The introduction of trace elements in coal, especially environmentally sensitive or economically valuable elements, has continuously attracted the interest of coal geologists and geochemists worldwide. Related scientific topics such as the content, distribution, occurrence, and origin of trace elements have been widely studied (Lin et al., 2012; Arbuzov, 2014; Chen et al., 2015; Yawooz and Cortland. 2017; Karayığit et al., 2017, Ding et al., 2018). In the last decade, the geochemical characteristics of rare earth elements in coals have been considered economically (Shao et al. 2022, Huang et al. 2021). In this study, the geological, mineralogical, and geochemical features of this mine are investigated, and the economic conditions of the mineral deposits are analyzed and evaluated with a particular attitude toward rare earth elements.

2-Material and methods

Fifteen samples were taken from the Bahabad coal mine using a lithochemical sampling method. The collected samples include nine coal samples and six coal shale samples. Nine samples were analyzed to measure the principal oxides by XRF device, and 15 samples were analyzed by ICP-MS device to measure rare and rare earth elements. Mineralogical composition of 9 coal samples was studied by X-ray diffraction (XRD). Also, five polished thin sections and five polished sections of coals were analyzed using optical and mineralogical characteristics using an optical-reflective microscope.

3-Results and discussions

According to petrographic studies, vitrinite is the essential maceral in the coals of the study area, and exinite and inertinite macerals are less abundant. XRD studies indicate the presence of quartz, illite, dolomite, and gypsum minerals in the coals and shaly coal of the study area. In this research, the Pb element was found to have a concentration coefficient of more than 7 ($CC > 7$) compared to the global average of coal. Most of the samples are slightly enriched ($CC = 2-5$) with other rare elements, including Bi, Mo, Sc, Zn, W. Elements such as Pb, Mo, Zn, Ag, As, Cu, Mo, Mn, Se, Ti, Zn, Co, B, Ba show a positive correlation with SO_3 , which indicates the association of these elements with sulfide and sulfate phases. The results of geochemical analysis for all rare earth elements had lower values than the average of bituminous coal in the world, which is affected by the nature of their primary constituent minerals, which entered the coal field in the form of debris under the influence of erosion. The positive correlation between rare earth elements with oxides such

* Corresponding author: sadati_sn@uma.ac.ir

DOI : 10.22055/AAG.2022.41696.2312

Received: 2022-08-13

Accepted: 2022-09-26

as SiO₂, Al₂O₃, and K₂O and the negative correlation of these elements with SO₃ and CaO indicates the detrital origin (presence of clay minerals such as kaolinite and illite) for rare earth elements.

4-Conclusion

The coal of the Chah Badam Yazd mine consists of a group of mineral and organic materials. Minerals consist of minerals such as illite, quartz, clinocllore, dolomite, gypsum, and natrojarosite. The most important macerals forming coal are vitrinite macerals, and exinite and inertinite macerals are less important. In this research, the average of rare elements in the coals of the Chah Badam mine in Yazd has been compared with the standard of these elements in the coals of the world. Based on the geochemistry results of coal samples, trace elements with enrichment factors of more than 7 (CC>7) are limited only to Pb in coal samples, which have an average of 57.07 and a maximum of 180.81 ppm. Most of the samples are only slightly enriched in other studied trace elements. All the rare earth elements in the coal samples had lower values than the average bituminous coal of the world.

References

- Arbuzov, S.I., Volostnov, A.V., Mezhibor, A.M., Rybalko, V.I. Ilenok, S.S., 2014. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran). *International Journal of Coal Geology* 125, 1-35. <http://10.1016/j.coal.2014.01.008>.
- Chen, J., Chen, P., Yao, D., Liu, Z., Wu, Y., Liu, W., Hu, W., 2015. Mineralogy and geochemistry of Late Permian coals from the Donglin Coal Mine in the Nantong coalfield in Chongqing, southwestern China, *International Journal of Coal Geology* 149, 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104582>.
- Huang,S., Ning,S., Zhang,J., Zhang,L., Liu, K., 2021. REE characteristics of the coal in the Erlian Basin, Inner Mongolia, China, and its economic value. *China Geology* 2, 256–265. <https://doi.org/10.31035/cg2021001>.
- Karayığıt, A.I., Littke, R., Querol, X., Jones, T., Oskay, R.G, Christanis, K., 2017. The Miocene coal seams in the Soma Basin (W. Turkey): Insights from coal petrography, mineralogy and geochemistry, *International Journal of Coal Geology* 173, 110–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.03.004>.
- Lin, R., Soong, Y., Granite, E.J., 2018. Evaluation of trace elements in U.S. coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part I: Rare earth elements and yttrium (REY). *International Journal of Coal Geology* 192, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.03.004>.
- Shao, P., Hou, H., Wang, W., Qin, K., Wang, W., 2022. Distribution and enrichment of Al-Li-Ga-REEs in the High-Alumina coal of the Datong Coalfield, Shanxi Province, China. *Ore Geology Reviews*140, 104597. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104597>.
- Yawooz, K., Cortland, F.E., 2017. Petrology, mineralogy and geochemistry of Hemrin Coal Seam, Hemrin South Mountain, Northern Iraq. *International Journal of Coal Geology* 181, 39-59. <http://10.1016/j.coal.2017.08.001>.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Sadati, S.N., Hosseinkhani, A., 2023. Mineralogy and geochemistry of trace and rare earth elements of the Chah Badam Coal mine, Yazd province. *Adv. Appl. Geol.* 13(2), 600-623.

DOI: 10.22055/AAG.2022.41696.2312

https://aag.scu.ac.ir/article_18241.html

©2023 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

کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام، استان یزد

سیده نرگس ساداتی

اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

احمد حسینخانی

تهران، شرکت معادن سرمک

Sadati_sn@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

چکیده

معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام استان یزد از لحاظ زمین‌شناسی ساختاری بخشی از زون ایران مرکزی است. رخنمون اصلی محدوده معدن ماسه‌سنگ‌های میکادار، شیل همراه با لایه‌های زغال‌سنگی با سن ژوراسیک آغازین می‌باشد. بر اساس مطالعات پتروگرافی و پترینیت مهم‌ترین ماسرال تشکیل‌دهنده زغال‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه است و ماسرال اکسینیت و اینترینیت فراوانی کمتری دارند. لیتوتیپ زغال‌سنگ کلارودوریت است. مطالعات XRD حاکی از وجود کانی‌های کوارتز، ایلیت، دولومیت و ژیپس در زغال‌ها و شیل‌های زغالی منطقه است. در این پژوهش عنصر Pb با ضریب غنی‌شدگی بیش از ۷ برابر نسبت به میانگین جهانی زغال (CC>7) در نمونه‌های زغال‌سنگ یافت شده است. اغلب نمونه‌ها از سایر عناصر کمیاب شامل Bi, Mo, Sc, Zn, W نیز اندکی غنی شده‌اند (CC=2-5). عناصری مانند Pb, Mo, Zn, Ag, As, Cu, Mo, Mn, Se, Ti, Zn, Co, B, Ba همبستگی مثبتی با SO₃ نشان می‌دهند که نشان‌دهنده همراهی این عناصر با فازهای سولفیدی و سولفات است. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی برای تمام عناصر کمیاب خاکی دارای مقادیر پایین‌تری از میانگین زغال‌سنگ قبری جهان بودند که متأثر از طبیعت کانی‌های اولیه تشکیل‌دهنده آن‌هاست که تحت تاثیر فرسایش به صورت آواری وارد حوزه زغال‌سنگی شده‌اند. همبستگی مثبت بین عناصر خاکی کمیاب با اکسیدهایی مانند SiO₂, Al₂O₃, K₂O و همبستگی منفی این عناصر با SO₃ و CaO نشانگر منشا آواری (حضور کانی‌های رسی مانند کائولینیت و ایلیت) برای عناصر خاکی کمیاب است.

واژه‌های کلیدی: زغال‌سنگ، ماسرال، عناصر خاکی نادر، عناصر کمیاب، چاه‌بادام

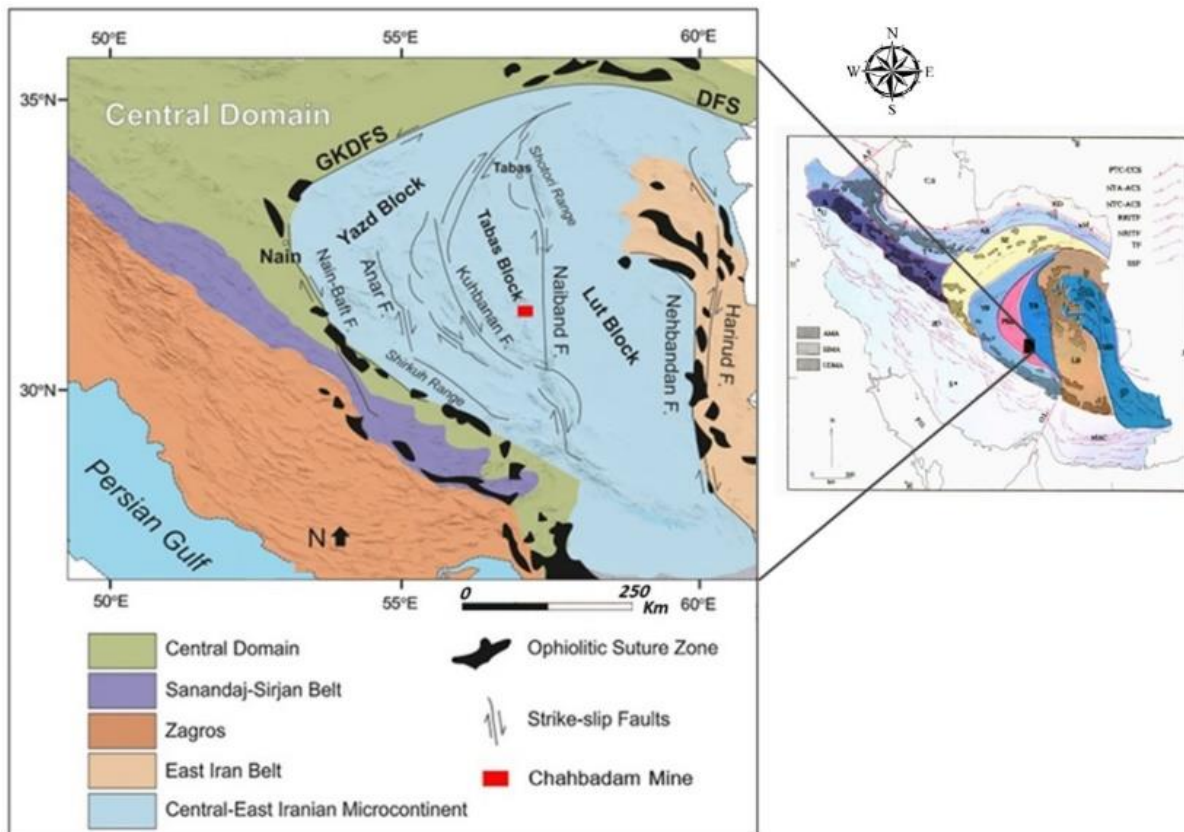
۱-مقدمه

یزد واقع شده است که معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام، شهرستان بهاباد یکی از این معادن است که وسعت تقریبی آن ۱۰ کیلومتر مربع می‌باشد و در ورقه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور و ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ بهاباد قرار گرفته و از لحاظ زمین‌شناسی ساختاری بخشی از زون ایران مرکزی محسوب می‌شود. محدوده چاه‌بادام برای نخستین بار در سال ۱۳۹۲ با درخواست اکتشاف سنگ آهن در سازمان صنعت، معدن و تجارت استان یزد به ثبت رسیده است، سپس با توجه به درخواست صدور مجوز اکتشاف زغال‌سنگ به عنوان ماده معدنی دوم در محدوده، مجوز اکتشاف زغال‌سنگ صادر گردید. در نتیجه عملیات اکتشافی انجام شده گواهی‌نامه کشف با ذخیره قطعی ۴۲۴۰۰ تن زغال‌سنگ بیتومینه حرارتی صادر گردید. در سال ۱۳۹۹ نیز شرکت معادن سرمک عملیات اکتشاف تکمیلی و حفاری را در این معدن انجام داد. نقشه‌های تهیه شده از منطقه شامل نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهاباد و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰

حوضه‌های زغالی ایران در دو بخش بزرگ زمین‌شناسی یعنی البرز و و ایران مرکزی گسترش دارند. این محدوده‌ها اولین بار توسط کارشناسان شرکت فولاد با کمک کارشناسان روسی از سال های ۱۳۴۵ به بعد مورد مطالعه اصولی قرار گرفته است (Yazdi, 2003, Esmailpour et al., 2022) رسوبات زغال‌دار ایران با نام گروه شمشک از دیدگاه زمانی از تریاس بالایی آغاز و تا ژوراسیک میانی ادامه دارد (Yazdi, 2009)، گسترش این رسوبات شرق، شمال و شمال غرب ایران را در بر می‌گیرد (Yazdi, 2009, Alimolaei and Aminzadeh, 2019). زغال‌سنگ‌های ایران مرکزی عموماً در سازند‌های بند با سن تریاس فوقانی تا ژوراسیک زیرین تشکیل شده‌اند. رسوبات زغال‌دار البرز اغلب از نوع تخریبی هستند و رسوبات حوضه ایران مرکزی بیشتر تحت تاثیر رسوبات دریایی قرار گرفته‌اند (Yazdi, 2003). بخشی از واحدهای زغال‌دار ایران در استان

نظیر کانسارهای سرب و روی، معادن گچ و همچین سنگ ساختمانی نیز گسترش دارد. به‌ویژه کانسارهای سرب و روی فراوان نظیر معادن گوجر، سنجدو، تپه سرخ در منطقه وجود داشته که کانه‌زایی سرب و روی در آن‌ها کربناته و غالباً در گسل‌ها تشکیل شده‌اند.

معادن چاه‌بادام است. نتایج آنالیز شرکت معادن سرمک نشان داد که زغال‌سنگ محدوده چاه‌بادام از نوع حرارتی بوده و ارزش حرارتی زغال‌سنگ‌های این منطقه ۵۸۱۶ کیلوکالری بر کیلوگرم برآورد شده است و از نوع زغال‌های غیرقابل پخت می‌باشند. در منطقه به‌باد علاوه بر زغال‌سنگ که یکی از کانسارهای اصلی در منطقه است، پتانسیل‌ها و معادن مختلفی



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه روی نقشه ایران و پهنه‌بندی ساختاری خرده‌قاره ایران مرکزی (Alavi., 1991)

Fig. 1. Location of the study area and structural zoning of the central Iranian subcontinent (Alavi., 1991)

هستند، ضروری به‌نظر می‌رسد. معرفی عناصر کمیاب در زغال‌سنگ، به‌ویژه عناصر حساس از لحاظ محیط زیست یا ارزشمند از نظر اقتصادی، پیوسته علاقه زمین‌شناسان زغال‌سنگ و ژئوشیمی‌دانان را در سطح جهان برانگیخته است. موضوعات علمی مرتبط مانند محتوا، توزیع، نحوه وقوع و منشأ عناصر کمیاب به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Arbuzov, 2014, Chen et al., 2015, Yawooz and Cortland. 2017, Karayigit et al., 2017, Ding et al., 2018). به طور کلی، عناصر کمیاب همراه با اجزای تشکیل‌دهنده معدنی، آلی و مخلوط با اجزای زغال‌سنگ هستند. اطلاعات در مورد نحوه وقوع عناصر کمیاب در زغال‌سنگ می‌تواند به حداقل رساندن توزیع خطرناک آن‌ها در

از لحاظ زمین‌شناسی رخنمون اصلی محدوده معدن ماسه‌سنگ میکادار، شیل همراه با لایه‌های زغالی سنگی می‌باشد که با ضخامت‌های بسیار زیاد و متفاوت در اغلب برش‌ها بیرون‌زدگی دارد و در برداشت‌های صحرایی افق‌های متعددی از فسیل گیاهی به صورت برگ، ساقه و تنه قابل مشاهده می‌باشد که با توجه به آن سن ژوراسیک آغازین برای این واحدها می‌توان در نظر گرفت که از این لحاظ مشابه سایر لایه‌های زغال‌سنگ دار ایران (گروه شمشک با سن تریاس پسین- ژوراسیک پیشین- میانی) است (Mahdavi, 1996). ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی گروه شمشک در مناطق مختلف متفاوت است، بنابراین شناسایی و بررسی این ویژگی‌ها که در واحدهای زمین‌شناسی مستقل و مخصوص به‌خود

نادر خاکی در زغال سنگ‌های ایران بیشتر از متوسط عیار این عناصر در پوسته فوقانی و زغال سنگ‌های جهان مثل زغال‌های چین و آمریکا است (Emamalipour et al., 2020). همچنین مطالعات نشان داده است تمرکز عناصر نادر خاکی در خاکستر حاصل از احتراق زغال سنگ بیشتر از خود زغال سنگ است و این امر موجب کاهش چشم گیر مشکلات زیست محیطی ناشی از خاکسترهای حاصل از احتراق می‌گردد (Yazdi, 2003, Kolker et al., 2017). همچنین از آنجا که عناصر REE ممکن است علاوه بر زغال در سنگ‌های در برگیرنده آن نیز تجمع یافته باشد، این امکان وجود دارد که این عناصر در مراحل مختلف استخراج بازیابی شوند، مانند: روباره برداری، استخراج زغال، احتراق زغال و ... و در مرحله بعد استخراج این عناصر از سنگ بستر می‌تواند عمر معادن را طولانی کند. از آنجا که تاکنون مطالعات جامعی در مورد کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر خاکی کمیاب در منطقه مورد مطالعه انجام نشده است، انجام این پژوهش می‌تواند در شناسایی ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی زغال سنگ در محدوده چاه‌بادام و درک ارتباط بین ساختارهای زمین‌شناسی و لایه‌های زغال سنگ کمک شایانی کند. بنابراین در این مطالعه به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی این معدن پرداخته می‌شود و سعی بر آن است که شرایط اقتصادی کانی‌زایی‌ها با نگرشی خاص به عناصر کمیاب و نادر خاکی مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گیرد.

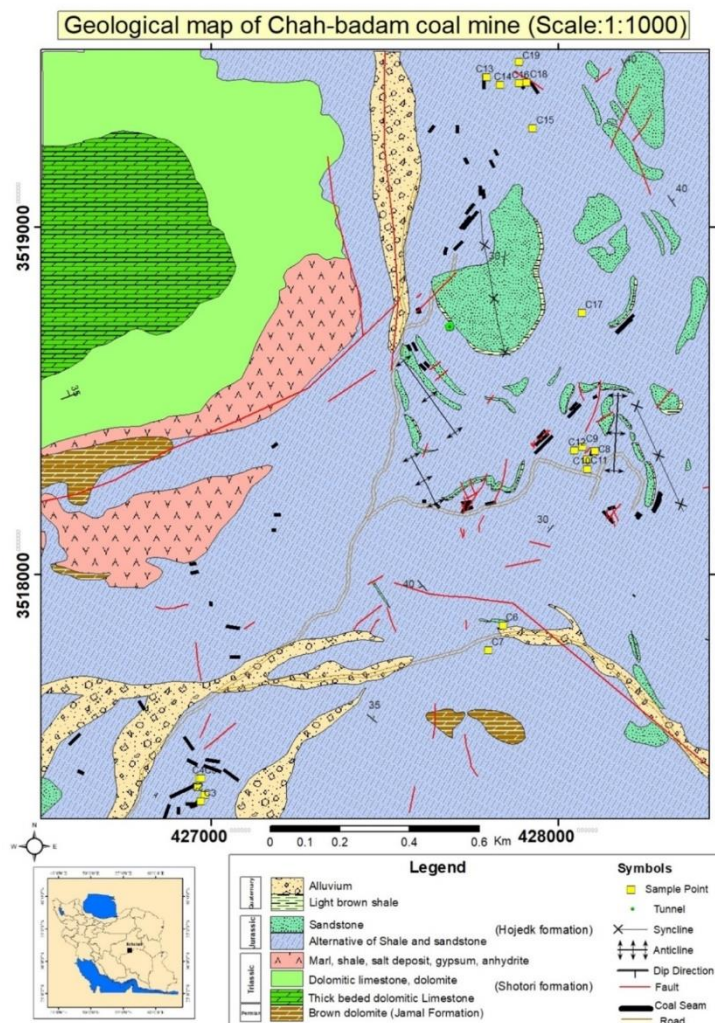
۲- زمین‌شناسی منطقه چاه‌بادام

معدن زغال سنگ چاه‌بادام از دیدگاه زمین‌شناسی و به‌ویژه زمین‌ساخت در بخشی از ایران مرکزی و در مرز جنوب‌باختری بلوک طیس و بلوک پشت‌بادام واقع گردیده است (شکل ۱). منطقه چاه‌بادام از لحاظ ارتفاعی در ناحیه‌ای با توپوگرافی نسبتاً شدید واقع شده است. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی منطقه، اختلاف ارتفاعی در حدود ۳۹۰ متر در محدوده حدود ۱۱ کیلومتر مربع را نشان می‌دهد که توپوگرافی نسبتاً شدیدی را مخصوصاً در بخش شرقی و شمالی محدوده ایجاد نموده است. در بخش غربی محدوده نیز واحدهای آهکی رخنمون داشته که توپوگرافی نسبتاً خشنی دارند. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ که در این پژوهش تهیه شده است (شکل ۲)، رخنمون اصلی محدوده معدن واحد Jssh است که با یک مرز بهم‌ریخته

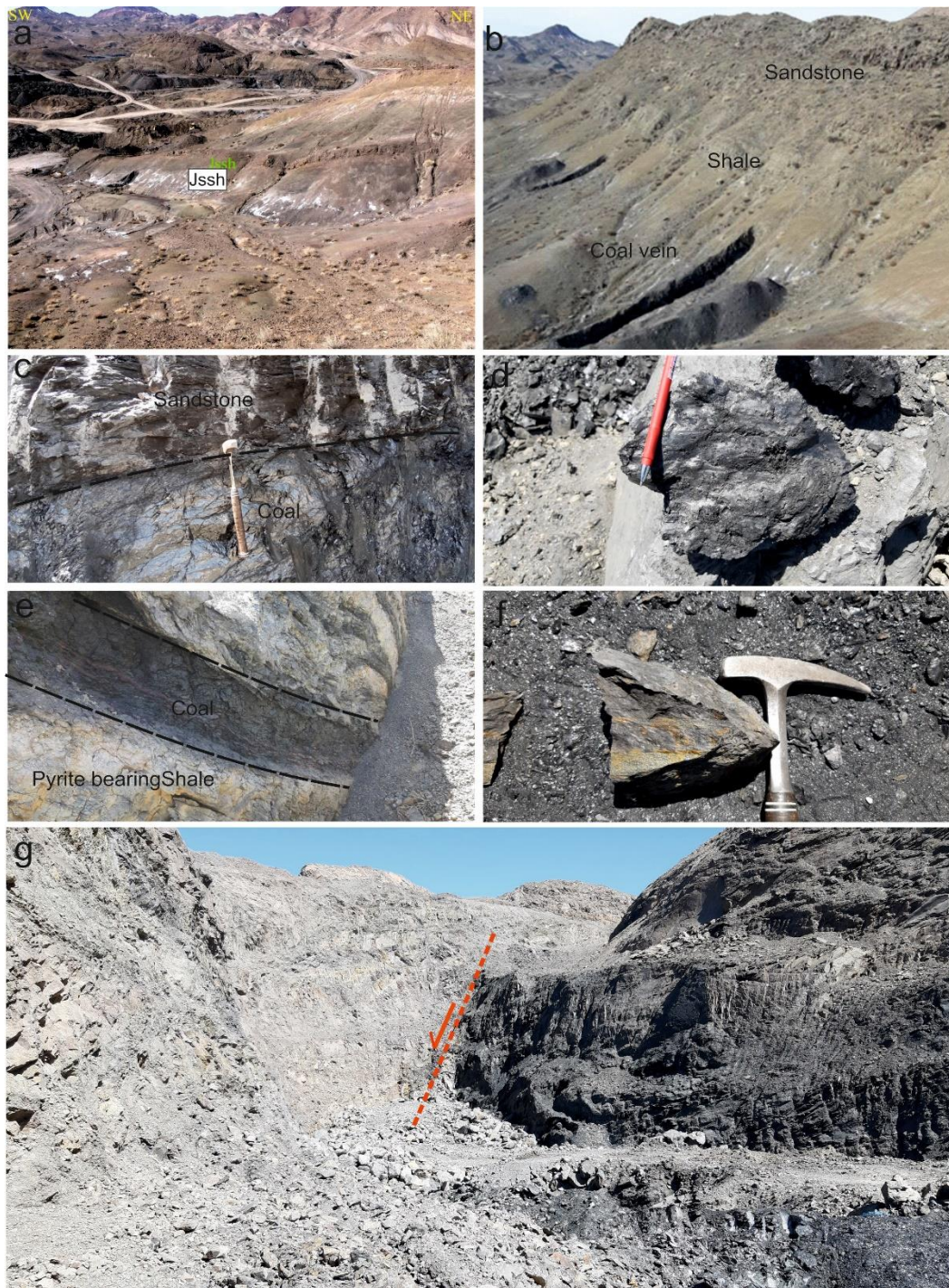
محیط زیست در طول استفاده از زغال سنگ کمک کند، و همچنین برای ارزیابی روش‌های استخراج بالقوه برای فلزات باارزش لازم است. بسیاری از مطالعات نشان داده اند که ویژگی‌های کیفی زغال سنگ و ژئوشیمی عناصر از طریق ترکیبی از چندین فرایند زمین‌شناسی از جمله مواد منشا، محیط رسوبی، شرایط آب و هوایی و هیدرولوژیکی تعیین میشود (Fu et al., 2016). برخی عناصر در طول بهره‌برداری، حمل و نقل و استفاده از زغال سنگ منجر به اثرات نامطلوب محیطی و مشکلات آلودگی می‌شوند، به‌عنوان مثال برخی از عناصر فرار، آلاینده بالقوه هوا هستند، به ویژه عناصر سمی و بسیار فرار مانند As, Se هنگام سوزاندن زغال سنگ خانگی به سلامت انسان آسیب می‌رساند (Zhou et al., 2021)، اگرچه برخی از عناصر مانند Sb فراریت کمتری دارند، اما احتمالاً در خاکستر زغال سنگ باقی می‌مانند و موجب فرسودگی تجهیزات زغال سنگ و یا آلودگی آب و خاک می‌شوند (Li et al., 2018). از دیگر آلوده کننده‌ها از لحاظ زیست محیطی می‌توان به عناصر سرب، کروم و جیوه اشاره کرد. بنابراین آگاهی از فراوانی، توزیع و تحرک این عناصر در زغال سنگ برای رسیدگی به مسائل زیست محیطی و به حداقل رساندن آسیب به سلامت انسان و تولید اقتصادی ضروری است. علاوه بر این عناصر، برخی عناصر کمیاب از جمله Cs, Li, Rb, Be, Ta, Nb, Hf, Zr, Ge, Ga, Se و عناصر خاکی کمیاب نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عناصر خاکی کمیاب به‌دلیل ویژگی‌های زمین‌شیمی در زمین بسیار پراکنده‌اند. این عناصر را می‌توان در ۱۷ گونه اسکاندیوم، ایتیم، لانتان، سریم، پرازئودیمیم، نئودیمیم، پرومتیم، ساماریم، یوروپیم، گادولینیم، تربیم، دیسپرویم، هولمیم، اربیم، تولیم، ایتربیم و لوتتیم برشمرد (Dai et al., 2015, 2016). اولین اکتشاف عناصر خاکی کمیاب با مقادیر بالای عناصر خاکی کمیاب (۰,۲ تا ۰,۳ درصد) در خاکستر زغال سنگ یکی از حوضه‌های زغالی روسیه صورت گرفت (Seredin and dai, 2012). در دهه اخیر به دلیل رو به اتمام بودن کربناتیت‌ها به‌عنوان منبع اصلی عناصر خاکی کمیاب ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی موجود در زغال سنگ‌ها از لحاظ اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است (Dai et al., 2016, Lin et al., 2018, Shao et al., 2022, Imamalipour et al., 2020 Huang et al., 2021). مطالعه زغال سنگ‌های البرز و ایران مرکزی نشان داده است، عیار عناصر

یک مرز بسیار واضح و مشخص روی سازند هم‌ارز شمشک توالی از سنگ‌ها شامل آهک نازک‌لایه همراه با میان لایه‌هایی از شیل سبز رنگ در بخش زیرین که در افق‌های بالاتر اولیتی هستند، دیده می‌شود. در رخنمون‌های متفاوت، این لایه‌های آهکی به ماسه‌سنگ آهکی دارای مقدار اندکی مارن تبدیل می‌گردند. لایه‌های زغال‌سنگی در برخی رخنمون‌ها دارای لایه‌های براق است (شکل ۳ c و d) و در برخی نقاط بر روی شیل‌های حاوی پیریت قرار گرفته است (شکل ۳ e, f). با وجود ضخامت و پراکندگی زیاد سازند هم‌ارز شمشک (واحد Jssh) در محدوده معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام، محیط رسوبی تشکیل‌دهنده آن‌ها می‌بایستی دارای منشا رودخانه‌ای باشد. در برخی قسمت‌های منطقه، رگه‌های زغال‌سنگ به‌دلیل گسلش و چین‌خوردگی شدید منطقه در امتداد شیب‌های تند فرورفته‌اند (شکل ۳ g).

در روی بخش‌هایی از سازند شتری قرار گرفته است. واحد Jssh بیشتر به‌صورت سنگ ماسه میکادار، شیل همراه با لایه‌های زغال‌سنگی و مقدار اندکی مارن می‌باشد (شکل ۳ a و b). در برخی موارد آثاری از کنگلومرای بین لایه‌ای در این واحد دیده می‌شود. با وجود اینکه این مجموعه با ضخامت‌های بسیار زیاد و متفاوت در بیشتر برش‌ها بیرون زدگی دارد، ولی به‌ندرت آثار فسیل جانوری قابل تشخیص در آن یافت گردیده است. در برداشت‌های صحرایی افق‌های متعددی از فسیل گیاهی به‌صورت برگ و ساقه و تنه گیاهان قابل مشاهده می‌باشد. در آثار گیاهی شواهدی می‌باشند که تعیین‌کننده سن ژوراسیک آغازین (لیاس) برای آن‌ها است و با ویژگی‌هایی که دارا هستند با سازند شمشک در شمال ایران هم‌ارزی دارند (Mahdavi, 1996)، قسمتی از این سنگ‌ها در افق‌های بالاتر به لایه‌های نازکی از سنگ‌آهک و بخشی به مارن تبدیل گردیده است.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی چاه‌بادام و موقعیت لایه‌های زغالی
Fig. 2. Geological map of Chah Badam mineral area and location of coal veins.



۳- (a) رخنمون واحد Jssh در محدوده معدن زغال سنگ چاه‌بادام، (b) نمایی نزدیک از مرز واحد ماسه‌سنگ و شیل همراه با لایه‌های زغال‌سنگ، (c) لایه‌های براق زغال‌سنگ، (d) نمونه دستی زغال‌سنگ براق، (e) مرز شیل‌های زغالی حاوی پیریت و لایه زغال‌دار، (f) شیل زغالی با لکه‌های زرد حاصل از اکسیداسیون پیریت و (g) قطع‌شدگی لایه زغال در اثر گسل با شیب تند و فرورفتگی احتمالی لایه زغال به اعماق بیشتر.

Fig. 3. (a) Outcrop of the Jssh unit of the Shamshak Formation in the area of Chah-Badam coal mine, (b) a close-up view of the boundary of the sandstone and shale unit with coal veins, (c) shiny layers of coal, (d) hand sample Shiny coal, (e) boundary of coal shales containing pyrite and coal layer, (f) coal shale with yellow spots resulting from pyrite oxidation, and (g) interruption of the coal layer due to a fault with a steep slope and possible subsidence of the coal layer to greater depths.

۲- مواد و روش ها

در معدن زغال سنگ چاه بادام با توجه به لایه بندی ماسه سنگ و شیل و همچنین توالی لیتولوژی، سه باند اصلی زغال سنگ برونزد دارد که هر کدام از این باندها متشکل از لایه های نازک تا ضخیم زغال سنگ هستند. فرایندهای تکتونیکی باعث جابجایی، قطع شدگی و تکرار این لایه های زغالی شده است که در نقشه زمین شناسی مشخص شده است (شکل ۲). نمونه برداری از هر سه لایه اصلی زغال دار، به ویژه لایه های دوم و سوم انجام گرفت. نمونه ها از زغال هایی با کیفیت های مختلف (زغال بی کیفیت تا زغال سنگ با کیفیت بالا) و همچنین لایه های شیل مجاورت زغال (شامل شیل های کربن دار و رس) برداشت شد. در مجموع ۱۵ نمونه از معدن زغال سنگ چاه بادام با استفاده از روش نمونه برداری لیتوژئوشیمیایی برداشت شد. نمونه های برداشت شده شامل ۹ نمونه زغال سنگ و ۶ نمونه شیل زغالی است. وزن تقریبی نمونه ها ۱ کیلوگرم است. تمامی نمونه ها در کیسه های پلاستیکی نگه داری شده اند تا از آلودگی و اکسیداسیون جلوگیری شود. نمونه ها پس از خردایش تا اندازه ۲۰۰ مش آسیاب شدند و ۹ نمونه برای اندازه گیری اکسیدهای اصلی با دستگاه XRF و ۱۵ نمونه برای اندازه گیری عناصر کمیاب و نادر حاکی به وسیله دستگاه ICP-MS در آزمایشگاه دانش بنیان آریا شیمی شریف مورد آنالیز قرار گرفتند. ترکیب کانی شناسی ۹ نمونه زغال سنگ با پراش اشعه ایکس (XRD) مطالعه گردید. همچنین با استفاده از میکروسکوپ نوری- انعکاسی تعداد ۵ مقطع نازک صیقلی و ۵ مقطع صیقلی از زغال سنگ ها از لحاظ ویژگی های نوری و کانی شناسی مطالعه گردید. اندازه گیری پارامترهای کیفی مانند درصد رطوبت، مواد فرار، خاکستر و کربن ثابت بر روی دو نمونه زغال سنگ در این آزمایشگاه انجام شد. نتایج آنالیزها در جدول ۱ تا ۵ گزارش شده است. برای ارزیابی روابط احتمالی بین عناصر کمیاب و ماده آلی در زغال سنگ در این پژوهش از روش ها و تکنیک های غیرمستقیم و روش های آماری از جمله ضرایب همبستگی استفاده شده است. با این حال، در بسیاری از موارد، تفسیر نتایج حاصل از روش های آماری به دلیل پیچیدگی زغال زایی باید محتاطانه باشد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- کانی شناسی زغال سنگ

از نظر اجزای تشکیل دهنده، زغال سنگ مجموعه ای از مواد معدنی و معمولاً غیریکنواخت (مینرال) و مواد آلی با ساختمان مشخص (ماسرال) است (Yazdi, 2003).

۴-۱-۱- اجزای معدنی (مینرال)

بسیاری از کانی ها به عنوان حامل عناصر کمیاب خاص شناسایی شده اند. به عنوان مثال سولفیدهای آهن، از جمله پیریت و اسفالریت، به عنوان کانی های میزبان کبالت، نیکل، مولیبدن، جیوه، کادمیم، آرسنیک، مس، کبالت، تنگستن، تیتانیوم، سلینیم و روی در نظر گرفته می شوند. کربنات ها مانند کلسیت و دولومیت معمولاً حاوی کلسیم، کبالت و منگنز هستند. سولفات ها، عمدتاً گچ، حامل های کلسیم و باریم هستند. کانی های رسی و فلدسپات ها مانند ایلیت، کائولینیت و مونتموریلونیت می توانند منبع تا ده ها عنصر کمیاب مانند سزیوم، کروم، بیسموت، باریم، آلومینیوم، نیکل، سدیم، منیزیم، لیتیم، پتاسیم، گالیوم، مس، سرب، فسفر، تانتالیوم، استرانسیوم، قلع، روبیدیم، ایتریوم، وانادیوم، اورانیوم، تیتانیوم و توریوم باشند. (Aghaie Qariq, 2009). در این پژوهش کانی شناسی زغال سنگ بر اساس مطالعات XRD و پتروگرافی مقاطع صیقلی و نازک صیقلی انجام شده است. در محدوده مورد مطالعه شیل های حاوی مواد آلی در ارتباط بسیار نزدیکی با زغال سنگ ها یافت شده اند که در برخی قسمت ها توسط رگه های سیلیسی قطع شده اند (شکل ۴ a)، شیل های زغالی در معدن چاه بادام یزد حاوی رگه های مواد آلی به همراه دانه های پراکنده کوارتز و کربنات در زمینه ای از کانی های رسی هستند (شکل ۴ b). همراهی کوارتز با ایلیت حاکی از منشا تخریبی آن است (Zhao et al., 2016). کوارتز یکی از رایج ترین کانی های سیلیکاته در زغال سنگ است که در مرحله زغال سنگ نارس حمل شده و توسط آب منتقل می شود. دیگر کانی رایج در زغال سنگ ها کانی های کربناته هستند که در طول محدوده کامل پتروژنز از مراحل اصلی تا اپی ژنتیک و پس از زغال زایی تشکیل می شوند (Zhao et al., 2016, Esmailpour, 2022). بر اساس نتایج مطالعات XRD کانی های کربناته شناسایی شده در زغال سنگ در ناحیه مورد مطالعه عمدتاً دولومیت بوده است (شکل ۴ e) علاوه بر این کانی های

پلاریزان به رنگ نارنجی تا قرمز تیره دیده می‌شود. در این ماسرال حالت انیزوتروپی دیده نمی‌شود و رلیف آن از سایر ماسرال‌ها کمتر است (شکل ۴g).

اکسینیت (لیپتینیت)

در طی تشکیل زغال‌سنگ به طور عمومی پروتیدها و رزین‌ها در اثر واکنش شیمیایی یا بیوشیمیایی به ماسرال اکسینیت تبدیل می‌شوند (Yazdi, 2003). در نمونه‌های معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام این ماسرال در زیر نور مستقیم میکروسکوپ پلاریزان به رنگ زرد، قرمز تا قهوه‌ای و در زیر نور منعکس به رنگ سیاه تا خاکستری و به صورت مات دیده می‌شود. این ماسرال عمدتاً دارای بافت نواری است (شکل ۴h).

اینرتینیت (فوزینیت)

این گروه از خرده‌های لیگنیتی، رشته‌ها و مواد قارچی در شرایط بی‌هوازی تشکیل شده است و معمولاً جزء تیره زغال‌سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. این ماسرال‌ها نور را از خود عبور نمی‌دهند و در عوض انعکاس نوری و رلیف قوی دارند (شکل ۴i).

نتایج مطالعات XRD نشان می‌دهد که کانی‌های رسی (ایلیت و کلینوکلر) و کوارتز کانی‌های اصلی بودند و به دنبال آن کانی‌های کربناته و پیریت قرار داشتند، در برخی نمونه‌ها ناتروژاروسیت و ژیپس نیز به صورت فرعی مشاهده شده است (شکل ۵ a-f). کانی‌های رسی در زغال‌سنگ‌ها عمدتاً از هوازگی فلدسپارهای سنگ منشا به دست می‌آیند که در طی مراحل رسوبگذاری و دیاژنتیکی به داخل حوضه زغال‌سنگی منتقل می‌شوند، ایلیت در زغال‌سنگ اغلب به صورت لایه‌ای یا موازی روی هم قرار می‌گیرند و همراه با کوارتز در برخی موارد ساختارهای سلولی را پر می‌کنند (Zhao et al., 2016). در نمونه‌های مورد مطالعه با توجه به درصد بالای گوگرد در نتایج آنالیز ICP-MS (۰/۰۳ تا ۶/۴ درصد گوگرد) و حضور گوگرد به صورت پیریت در مقاطع میکروسکوپی و نتایج مطالعات XRD تا حد زیادی وجود آن به تولید خاکستر به شکل اکسیدهای آهن پس از احتراق زغال‌سنگ کمک می‌کند (Fu et al., 2016).

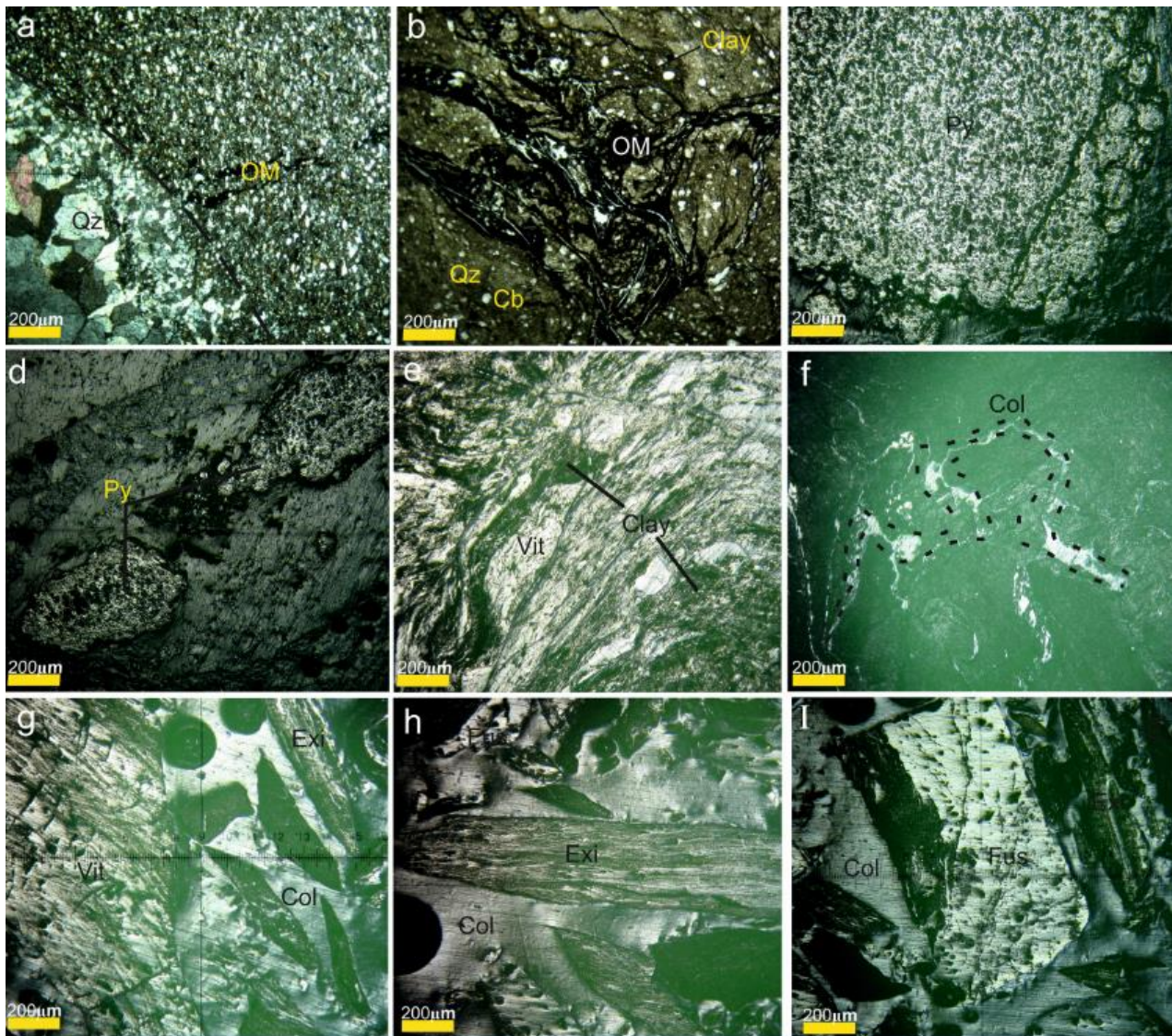
سولفیدی عمدتاً پیریت به شکل لکه‌های پراکنده به شکل بلورهای فرامبوئیدال و خودشکل (حاصل از رشد پیریت‌های فرامبوئیدال) و یا خطی وجود دارند (شکل ۴ c و d) که این اشکال متفاوت پیریت نشان می‌دهد که پیریت می‌تواند منشا دیاژنتیک اولیه تا تاخیری داشته باشد (Zhao et al., 2016, Esmailpour et al., 2022).

۴-۱-۲- اجزای آلی (ماسرال)

ماسرال‌های عمده زغال‌سنگ‌ها از سه گروه ویتیرینیت، اکسینیت (لیپتینیت) و اینرتینیت (فوزینیت) تشکیل شده است. در نمونه‌های زغال‌سنگ مطالعه شده در این پژوهش هر سه این ماسرال‌ها مشاهده می‌شود که در ادامه به شرح ویژگی‌های میکروسکوپی آن‌ها پرداخته می‌شود.

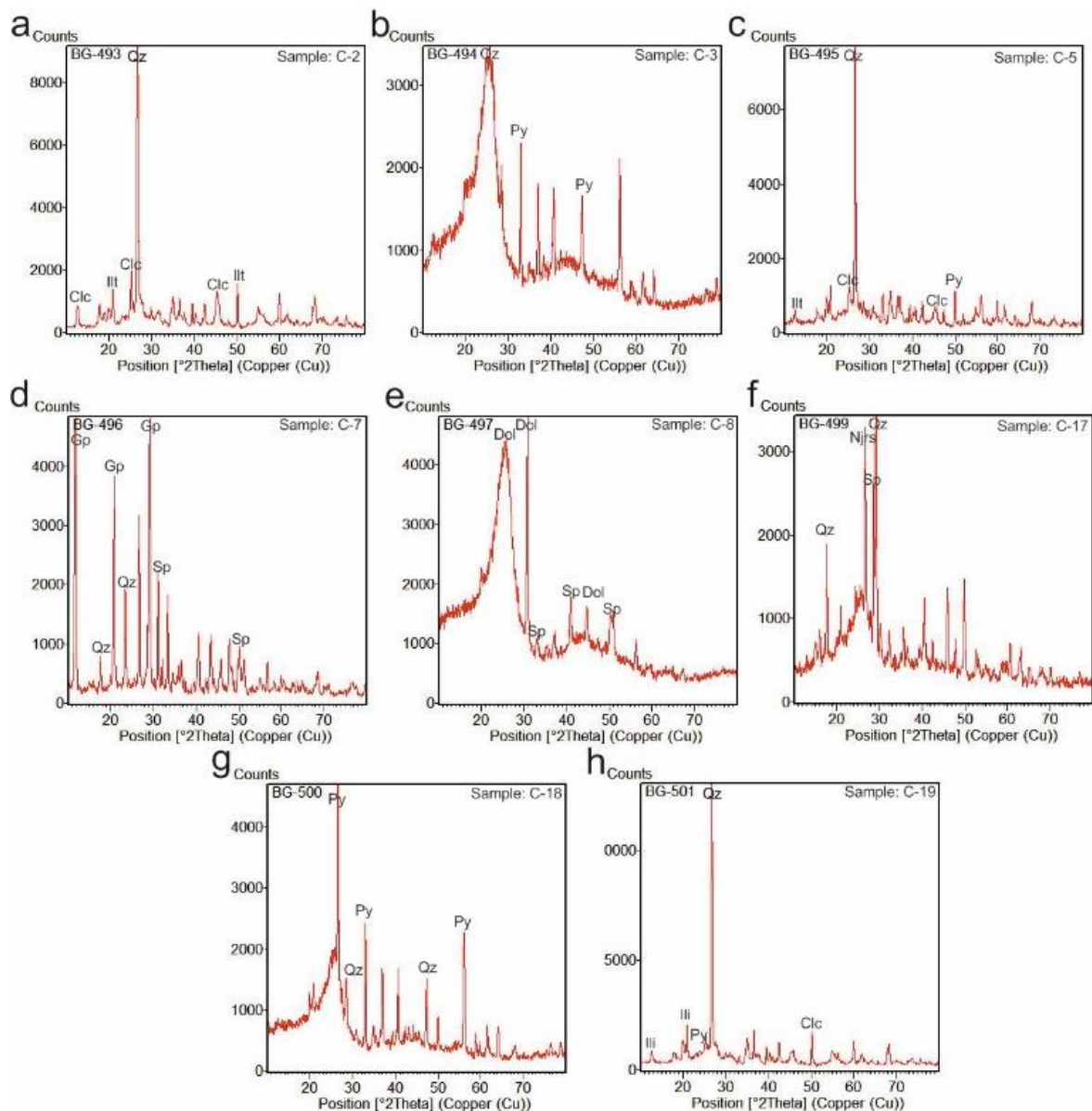
ویتیرینیت

حدود ۷۰ درصد یک گیاه از سلولز، آب و پروتئین تشکیل می‌شود که در صورت عدم تجزیه در اثر واکنش‌های شیمیایی یا بیوشیمیایی به ماسرال ویتیرینیت تبدیل می‌شود (Yazdi, 2003). این ماسرال در معدن چاه‌بادام یزد، ترکیب اصلی و جزء روشن زغال‌سنگ را تشکیل می‌دهد و دارای درخشندگی زیاد است. این ماسرال در زیر میکروسکوپ با نور پلاریزان به رنگ کدر با حاشیه‌ای قرمز تا قهوه‌ای و با نور انعکاسی به رنگ خاکستری تا سفید متمایل به زرد دیده می‌شود. در نمونه‌های معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام ویتیرینیت‌ها ساخت‌های ریز به هم پیوسته با رشد تداخلی نشان می‌دهند (شکل ۴e). این ماسرال‌ها در اندازه‌های مختلفی زیر میکروسکوپ مشاهده می‌شوند. ماسرال کولینیت زیررده‌ای از ویتیرینیت هاست که در نتیجه حرکت و نفوذ مواد آلی و سیاه‌رنگ باقیمانده گیاه در سایر بافت‌های حفظ‌شده گیاهان تحت تاثیر ژله‌ای شدن در اثر دگرگونی بیوشیمیایی و در شرایط بدون اکسیژن و توسط باکتری بی‌هوازی تشکیل می‌شود. در نمونه‌های معدن زغال‌سنگ چاه‌بادام این ماسرال در مقطع صیقلی صاف و بدون ساخت و به حالت آمورف مشاهده می‌شود و در حقیقت یک ویتیرینیت ناقص است. رنگ ماسرال کولینیت در مقطع صیقلی و با میکروسکوپ نور انعکاسی از خاکستری تا سفید متمایل به زرد متغیر است (شکل ۴f) و در مقطع نازک و با میکروسکوپ نور



شکل ۴- (a) قطع شدگی شیل حاوی مواد آلی با رگه سیلیسی، (b) شیل زغالی با دانه‌های پراکنده کوارتز و کربنات، (c) پیریت خودشکل رشد یافته از پیریت فرامبوئیدال، (d) پیریت دانه‌ای پر شده در امتداد شکستگی، (e) زغال سنگ با ماسرال ویتترینیت با ساخت های ریز به هم پیوسته با رشد تداخلی که خلل و فرج آن با کانی رسی پر شده است، (f) تشکیل ماسرال کولینیت تحت تاثیر عمل زله‌ای شدن، (g) ماسرال‌های ویتترینیت و کولینیت و اکسینیت و (h و i)، ماسرال‌های اکسینیت، فوزینیت و کولینیت (تمامی مطالعات در میکروسکوپ انعکاسی و نور ppl انجام شده است).

Fig.4. (a) Interruption of shale containing organic matter with silica veins, (b) Coal shale with scattered quartz and carbonate grains, (c) Euhedral pyrite grown from framboidal pyrite, (d) Granular pyrite filled along the fracture, (e) vitrinite macerals with fine interconnected structures with interference growth in the coal, which its pores are filled with clay minerals, (f) the formation of colinite macerals under the influence of gelification, (g) vitrinite macerals, colinite and exinite, and (h and i): Exinite, fusinite and colinite macerals (all studies have done by reflective microscope and in ppl light)



شکل ۵- فازهای شناسایی شده به وسیله مطالعات XRD در معدن چاه بادام (a) کوارتز، ایلیت، کلسیت، (b) پیریت، (c) کوارتز، کلینوکلر، ایلیت، پیریت (d) ژپس، کوارتز، اسفالریت، (e) دولومیت، اسفالریت، (f) کوارتز، ناتروژاروسیت، (g) پیریت، کوارتز و (h) کوارتز، ایلیت، کلینوکلر، پیریت، حروف اختصاری برگرفته از (Donna L. Whitney, 2010)

Fig . 5. Identified phases by XRD studies in Chah Badam mine, (a) quartz, illite, calcite, (b) pyrite, (c) clinocllore, illite, pyrite, (d) gypsum, quartz, sphalerite, (e) dolomite, sphalerite, (f) quartz, natrojarosite, (g) pyrite Quartz, (h) Quartz, Illite, Clinocllore, Pyrite, abbreviations taken from (Donna L. Whitney, 2010)

است، لایه‌های زغالی در محدوده چاه‌بادام از باندهای درخشانده و مات سیاه رنگ تشکیل شده است. در این مطالعه زغال‌سنگ‌ها را بر اساس ماسرال‌های تشکیل‌دهنده‌شان نامگذاری کردیم. نتایج مطالعات میکروسکوپی نشان داد که زغال‌سنگ‌های محدوده چاه‌بادام از سه ماسرال ویتترینیت، اکسینیت و فوزینیت تشکیل شده است. اما ترکیب این زغال‌سنگ طوری است که ماسرال‌های ویتترینیت نسبت به سایر ماسرال‌ها سهم بیشتری

۴-۲- سنگ شناسی زغال‌سنگ‌های چاه‌بادام

ویژگی‌های مهم سنگ شناسی که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده است، از قبیل اختلاف در رنگ ظاهری، درخشندگی، ماسرال‌های اولیه و بافت و ساخت لیتوتیپ زغال‌سنگ را مشخص می‌کند. در این پژوهش برای مشاهده بهتر این ویژگی‌ها تکه‌هایی از زغال‌سنگ را بریده و از آن مقاطع نازک و صیقلی تهیه کردیم. همان طوری که در شکل ۳ نشان داده شده

کائولینیت (۱,۱۸) است (Dai et al., 2012)، که ممکن است به دلیل مقادیر نسبتاً بالای همراهی کوارتز با کائولینیت باشد (Zhou et al., 2021). نتایج ضریب همبستگی نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین اکسیدهای SiO_2 و Al_2O_3 (0.98)، SiO_2 و K_2O (0.76)، Al_2O_3 و K_2O (0.73) می‌باشد (جدول ۲) که احتمالاً ناشی از همراهی این اکسیدها در کانی‌های تخریبی و غیرآلی همانند کانی‌های رسی (ایلیت و کائولینیت) است (Zhou et al., 2021)، که نتایج XRD نیز صحت آن را تایید می‌کند. ضریب همبستگی ۰,۷۵ بین Fe_2O_3 و SO_3 هم می‌تواند ناشی از تخریب حرارتی پیریت تحت تاثیر اکسیژن باشد که منجر به اکسید شدن گوگرد و خروج آن به صورت گاز و تشکیل اکسیدهای آهن می‌شود (Zhao et al., 2016)، نتایج آنالیز XRD نیز حضور پیریت را در نمونه‌های زغال سنگ تایید می‌کند.

دارند. به این لیتوتیپ کلارودوریت گفته می‌شود و در واقع ترکیبی بین زغال سنگ‌های کلاریت و دوریت دارند، با این تفاوت که بیشترین بخش آن‌ها از زغال سنگ‌های کلاریت تشکیل شده است.

۳-۴- ژئوشیمی اکسیدهای اصلی

مهم‌ترین اکسیدهای اصلی در زغال سنگ شامل SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO است (جدول ۱) که اغلب در شکستگی‌ها و حفره های زغال سنگ و در ارتباط با کانی‌های رسی، کربناته و سولفیدی تشکیل می‌شوند، فراوانی و نوع اکسیدهای اصلی تحت تاثیر ناحیه منشا رسوبات است (Zhao et al., 2019, Zhou et al., 2021). نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ در زغال سنگ چاه‌بادام از ۲,۶ تا ۴,۶ میانگین ۳,۸ متغیر است که بالاتر از میانگین زغال سنگ چین (۱,۴۲) و میزان نظری

جدول ۱- آنالیز شیمیایی اکسیدهای اصلی نمونه‌های معدن زغال سنگ چاه‌بادام (مقادیر بر حسب درصد وزنی)

Table 1. Chemical analysis of the main oxides of Bahabad coal mine samples (values are in weight percent)

Compound	Unit	C-2	C-3	C-5	C-7	C-8	C-13	C-17	C-18	C-19
Al_2O_3	%	21.32	0.124	11.97	6.734	1.102	21.889	2.535	0.309	10.24
CaO	%	0.15	0.246	0.33	13.433	1.145	0.185	0.476	0.247	0.56
Fe_2O_3	%	2.73	3.317	5.26	4.773	0.585	0.610	6.582	5.803	1.73
K_2O	%	0.10	0.009	0.13	0.141	0.004	0.242	0.114	0.043	0.16
MgO	%	0.52	0.077	0.33	0.104	0.547	0.090	0.048	0.097	0.45
Na_2O	%	0.06	0.034	0.05	0.406	0.040	0.211	0.677	0.040	0.07
SO_3	%	1.35	5.582	6.16	16.106	1.103	0.413	3.194	9.225	1.36
SiO_2	%	65.23	0.327	48.16	25.43	5.13	69.12	9.87	4.12	57.31
LOI	%	8.29	89.97	27.31	32.42	89.63	4.31	76.13	79.36	25.88
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$		3.05	2.63	4.02	3.77	4.65	3.15	3.89	13.35	5.59

جدول ۲- ضریب همبستگی اکسیدهای اصلی در نمونه‌های معدن زغال سنگ چاه‌بادام

Table 2. Correlation coefficient of main oxides in Chah Badam coal mine samples

	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SO_3	SiO_2
Al_2O_3	1.00							
CaO	-0.30	1.00						
Fe_2O_3	-0.30	0.03	1.00					
K_2O	.733*	0.03	-0.05	1.00				
MgO	0.27	0.22	-0.57	-0.15	1.00			
Na_2O	0.52	0.22	0.25	.733*	-0.28	1.00		
SO_3	-0.43	0.33	.750*	-0.07	-0.27	0.00	1.00	
SiO_2	.983**	-0.27	-0.37	.767*	0.28	0.55	-0.48	1.00

۴-۳-۱- همبستگی اکسیدهای اصلی با عناصر فرعی و کمیاب

اساساً، ضریب همبستگی منفی بین غلظت عناصر کمیاب و اکسیدهای اصلی همراهی عناصر با اجزای آلی زغال سنگ را نشان می‌دهد و ضریب همبستگی مثبت نشان‌دهنده همراهی این عناصر با اجزای معدنی زغال سنگ است (Dai et al., 2015, 2016). نتایج همبستگی اکسیدهای اصلی با عناصر فرعی و کمیاب در جدول ۳ خلاصه شده است. عناصر Rb, Cs, Th دارای همبستگی بالایی با اکسیدهای اصلی نظیر SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O هستند که نشان‌دهنده این است که این عناصر لیتوفیل احتمالاً در کانی‌های رسی یا میکا قرار می‌گیرند. Sr دارای ضریب همبستگی بالایی با CaO است که نشان‌دهنده جانشینی آن با کلسیم است (Zhao et al., 2016). عناصری مانند Pb, Mo, Zn, Cu, Se, Ti, Co, Ag, As, B, Ba

همبستگی مثبتی با SO_3 نشان می‌دهند که نشان‌دهنده همراهی این عناصر با فازهای سولفیدی و سولفات‌هاست. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که عناصر با ارزش معدنی زغال سنگ معمولاً در سولفیدهای آهن (پیریت و مارکازیت) وجود دارد، به عنوان مثال ترکیبات مهم Se شامل آن‌هایی است که با سولفیدهای آهن و برخی کانی‌های سولفیدی کمکی (به ویژه گالن) مرتبط هستند. احتمالاً با جایگزینی سلنید در ساختار سولفید، همچنین در چندین شکل دیگر مانند کانی‌های $PbSe$ ، به همین دلیل Se همبستگی بالایی با گوگرد و سرب (به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۷۲) در نمونه‌های زغال سنگ نشان می‌دهد (Fu et al., 2016). فراوانی این عنصر در زغال سنگ‌های چین، آمریکا به ترتیب ۶/۲۲ و ۲/۸ گرم در تن است (Shahraz and Kouhsari, 2014)، میانگین این عنصر در زغال سنگ‌های معدن چاه‌بادام ۱/۱۸ گرم در تن است که کمتر از میانگین زغال سنگ چین و آمریکا است.

جدول ۳- همبستگی اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب در معدن زغال سنگ چاه‌بادام

Table 3. Correlation of main oxides and trace elements in Bahabad coal mine

	Al2O3	CaO	Fe2O3	K2O	MgO	Na2O	SO3	SiO2	Ag	As	B	Ba	Co	Cs	Cu	Mo	Pb	Rb	S	Se	Sr	Th	Ti	V	Zn	
Al2O3	1.00																									
CaO	-0.30	1.00																								
Fe2O3	-0.30	0.03	1.00																							
K2O	.733*	0.03	-0.05	1.00																						
MgO	0.27	0.22	-0.57	-0.15	1.00																					
Na2O	0.52	0.22	0.25	.735*	-0.28	1.00																				
SO3	-0.43	0.33	.750*	-0.07	-0.27	0.00	1.00																			
SiO2	.983**	-0.27	-0.37	.767*	0.28	0.55	-0.48	1.00																		
Ag	-0.53	0.35	.694*	-0.09	-0.60	0.33	.712*	-0.53	1.00																	
As	-0.42	-0.12	.783*	-0.38	-0.37	-0.30	.717*	-0.55	0.42	1.00																
B	-0.43	-0.07	.717*	-0.23	-0.700*	0.03	0.62	-0.52	.712*	.733*	1.00															
Ba	-0.10	-0.10	0.42	0.23	-0.65	0.02	0.52	-0.18	0.37	0.55	.733*	1.00														
Co	-0.09	-0.25	0.11	-0.28	0.25	-0.38	0.44	-0.13	0.06	0.35	0.33	0.23	1.00													
Cs	.913**	-0.58	-0.38	0.58	0.24	0.20	-0.53	.895**	-.720*	-0.35	-0.46	-0.05	0.00	1.00												
Cu	-0.38	-0.35	0.50	-0.22	-0.28	-0.45	0.53	-0.40	0.13	0.62	0.42	0.43	0.52	-0.13	1.00											
Mo	-0.32	-0.37	0.38	-0.33	-0.10	-0.38	0.56	-0.33	0.29	0.51	0.51	0.33	.895**	-0.17	.762*	1.00										
Pb	-0.32	-0.02	.950**	-0.05	-0.60	0.23	.785*	-0.38	.785*	.767*	.717*	0.43	0.14	-0.40	0.43	0.42	1.00									
Rb	.867**	-0.57	-0.10	.685*	0.10	0.33	-0.23	.850**	-0.46	-0.18	-0.35	0.02	0.05	.913**	0.02	-0.02	-0.07	1.00								
S	-0.02	0.48	0.65	0.22	0.03	0.40	.750*	-0.05	0.53	0.40	0.17	0.05	0.08	-0.27	0.08	0.11	.667*	0.05	1.00							
Se	-0.07	0.36	.763*	-0.03	-0.17	0.46	0.58	-0.15	0.61	0.54	0.49	0.10	0.01	-0.35	-0.08	0.03	.729*	-0.15	.780*	1.00						
Sr	-0.03	.700*	0.25	0.37	-0.20	0.53	0.35	-0.02	0.42	-0.03	0.33	0.37	-0.11	-0.31	-0.15	-0.18	0.12	-0.32	0.33	0.39	1.00					
Th	.895**	-0.30	-0.31	.854**	0.08	0.53	-0.38	.929**	-0.46	-0.51	-0.36	0.08	-0.06	.862**	-0.18	-0.20	-0.35	.820**	-0.14	-0.29	0.13	1.00				
Ti	-0.18	-0.08	0.60	-0.03	-0.45	0.02	0.55	-0.25	0.37	0.62	.817**	.733*	0.49	-0.16	0.60	0.58	0.47	-0.13	0.12	0.32	0.48	-0.02	1.00			
V	0.35	-.683*	-0.20	0.32	-0.32	-0.02	-0.30	0.37	-0.31	-0.15	0.15	0.43	0.27	0.57	0.33	0.31	-0.23	0.45	-0.62	-0.56	-0.08	0.61	0.40	1.00		
Zn	-0.35	-0.35	0.25	-0.42	0.10	-0.63	0.53	-0.38	0.09	0.55	0.25	0.20	.795*	-0.13	.767*	.879**	0.33	0.03	0.15	-0.08	-0.45	-0.32	0.28	0.10	1.00	

سزیم، باریوم، سربیم، روبیدیوم، لانتانیم، توریم، اورانیوم، وانادیوم، ایتریوم) و سیدروفیل (نیکل، کبالت، مولیبدن، تنگستن). با این حال، اطلاعات در مورد روابط عناصر کمیاب با مواد آلی در زغال سنگ نسبتاً محدود است. آن دسته از عناصر کمیاب که رابطه قوی با مواد آلی دارند، عبارتند از گالیوم، اورانیوم، ایتریوم، بریلیوم و تنگستن (Erarslan and Orgun, 2016). نتایج آنالیز عناصر فرعی و کمیاب در جدول ۴ خلاصه شده است.

۴-۴-۱- عناصر موجود در اجزای معدنی زغال سنگ

۴-۴-۲- ژئوشیمی عناصر فرعی و کمیاب

عناصر فرعی منظور آن دسته از عناصری هستند که دارای فراوانی ۱-۰/۱ درصد، و عناصر کمیاب دارای فراوانی کمتر از ۱۰۰ گرم در تن می‌باشند. به طور کلی، عناصر کمیاب با تشکیل دهندگان آلی و یا معدنی زغال سنگ همراه هستند (Munir et al., 2018, Khalili and Parsapour., 2019). عناصر همراه با اجزای معدنی در زغال سنگ عمدتاً به سه گروه تقسیم می‌شوند: کالکوفیل (سرب، روی، مس، گالیم، آرسنیک، بیسموت، جیوه)، لیتوفیل (اسکاندیوم، لیتیم، استرانسیوم،

مقادیر کمتر از ppb1 تا ۳۰۰ گرم در تن). زغال سنگ‌هایی که محتوای زیاد جیوه دارند، موجب آلودگی‌های شدید محیطی می‌شوند و ممکن است از استفاده آن‌ها ممانعت شود (Khalili and Parsapour., 2019). به طور کلی، محتوای جیوه در زغال سنگ توسط موقعیت زمین‌شناسی ذخایر زغال سنگ و فرایندهای ژئوشیمیایی تشکیل یا بعد از آن کنترل می‌شود. پدیده‌های زمین‌شناسی مانند دگرگونی و فعالیت هیدروترمال متعاقب، گونه‌های مختلف جیوه را در زغال سنگ و لایه‌های تحت فشار تولید می‌کند. جیوه در زغال سنگ می‌تواند به ماده آلی متصل شود یا به صورت عنصری جذب شود و به کانی سیلیسی (عمدتاً رس) متصل شود و یا به صورت ایزومورف در سولفیدها مشاهده شود (Mashyanov et al., 2017). در این مطالعه حد حساسیت دستگاه برای اندازه‌گیری جیوه ۰٫۱ گرم در تن بوده است که به دلیل پایین بودن غلظت جیوه از حد آشکارسازی در اغلب نمونه‌ها جیوه شناسایی نشد، تنها در یک نمونه شیل زغالی حاوی گوگرد بالا (نمونه C1) مقدار ۰٫۱۸ گرم در تن جیوه آشکار شد که احتمالاً به صورت ایزومورف در سولفیدهاست (Mashyanov et al., 2017). با وجود بالا بودن مقدار گوگرد در سایر نمونه‌ها، دلیل مشاهده نشدن جیوه در آن‌ها را می‌توان به عملکرد فازهای مختلف سیالات هیدروترمالی نسبت داد که به لایه‌های زغالی در نواحی مختلف وارد شده است (Mashyanov et al., 2017).

گروه لیتوفیل (Sc, Li, Sr, Cs, Ba, Ce, Rb, La, Th, U, V, Y)

در میان عناصر این گروه میانگین غلظت عناصر اسکاندیم، لیتیم در زغال سنگ‌ها و شیل‌های زغالی محدوده معدن چاه‌بادام (با ضریب غنی‌شدگی ۲٫۳۶ و ۱٫۱۹) بیشتر از میانگین جهانی زغال و کلارک پوسته زمین است (جدول ۵). مطالعات Zhou و همکاران (2021) نشان می‌دهد که لیتیم عمدتاً با سیلیکات‌های موجود در زغال سنگ مرتبط است. میانگین غلظت عنصر استرانسیوم در زغال‌ها (۲۰۳/۸۰ گرم در تن) نسبت به میانگین جهانی (۱۱۰ گرم در تن) دوبرابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. غلظت Cs در نمونه مورد مطالعه ۰٫۵ تا ۰٫۳ با میانگین ۱/۳۷ گرم در تن متغیر است که مقدار آن کمی بالاتر از زغال سنگ‌های قیری جهان (متوسط ۱ گرم در تن است). رخدادهای معدنی Cs در زغال سنگ اخیراً طی مطالعات زیادی بررسی شده است (Zhao et al., 2016, Mujtaba Munir)

کانی‌های معدنی موجود در زغال سنگ‌ها شامل رس‌ها، کربنات‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها، سیلیس‌ها و سایر کانی‌هایی چون تورمالین، آپاتیت و فلورین است که دربردارنده عناصر معدنی زغال سنگ‌ها هستند (Yazdi, 2003). عناصر با ویژگی‌های ژئوشیمیایی بسیار متغیری شامل کالکوفیل‌ها، لیتوفیل‌ها و سیدروفیل‌ها در زغال سنگ‌ها وجود دارند، البته به دلیل حضور گوگرد در زغال سنگ‌ها غلبه با عناصر کالکوفیل است (Shahraz and Kouhsari, 2014, Chou, 2012). حضور عناصر در زغال سنگ‌ها اغلب رابطه مستقیمی با شعاع یا بار یونی نشان نمی‌دهد و عناصر با شعاع یونی کم تا زیاد در زغال سنگ‌ها حضور دارند.

گروه کالکوفیل (Pb, Zn, Cu, Ga, As, Bi, Hg)

میانگین غلظت عناصر مس، سرب، روی در زغال سنگ‌ها و شیل‌های زغالی محدوده معدن چاه‌بادام بیشتر از میانگین جهانی زغال و کلارک پوسته زمین است (جدول ۵)، به طوری که میانگین غلظت سرب (۸۰/۹۱ گرم در تن) و روی (۹۳/۰۶ گرم در تن) نسبت به میانگین جهانی زغال (نسبت غلظت عنصری زغال سنگ مورد مطالعه و زغال سنگ جهانی: CC) به ترتیب ۷/۳ و ۳ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد (جدول ۵) و شکل ۶)، و عنصر مس (۲۴/۴۵ گرم در تن) نسبت به میانگین جهانی ۱٫۵ برابر غنی شده است. بر اساس نتایج آنالیز ژئوشیمیایی میزان کانی‌های حاوی مس، سرب و روی (مانند کالکوپیریت، گالن و اسفالریت) در این نمونه‌ها بسیار ناچیز است و تشخیص آن با استفاده از میکروسکوپ نوری ممکن نیست. غلظت Ga در نمونه‌های زغال سنگ معدن چاه‌بادام با میانگین وزنی ۲٫۵ گرم در تن (جدول ۵) پایین‌تر از میانگین این عنصر در زغال سنگ‌های قیری جهان (به طور متوسط ۵٫۸ گرم در تن) است. عنصر آرسنیک مقادیر بسیار متغیری از ۱-۷۲۰ گرم در تن نشان می‌دهد که در اغلب نمونه‌ها نسبت به میانگین جهانی ۳ تا ۷ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. عنصر بیسموت هم با میانگین ۲/۵۳ گرم در تن نسبت به میانگین جهانی ۲٫۶ برابر غنی‌شدگی نشان می‌دهد. غلظت جیوه در زغال سنگ دارای میانگین جهانی ۱۰۰ ppb است. آخرین ارزیابی UNEP از جیوه در سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد که احتراق زغال سنگ دومین منبع بزرگ (بعد از استخراج جیوه) است که ۲۴٪ از انتشار جهانی جیوه به جو را تشکیل می‌دهد. غلظت جیوه (Hg) در زغال سنگ در طیف وسیعی از موارد بسیار متغیر است (از

نسبت به میانگین جهانی زغال سنگ تهی شدگی نشان می دهند که نشان دهنده این است که استخراج آن ها از خاکستر زغال سنگ معدن چاه بادام در حال حاضر از لحاظ اقتصادی حائز اهمیت نمی باشند.

گروه سیدروفیل (Ni, Co, Mo, W)

میانگین غلظت عناصر نیکل، کبالت، مولیبدن، تنگستن در زغال سنگ ها و شیل های زغالی محدوده معدن چاه بادام (به ترتیب با ضریب غنی شدگی ۱،۲۴، ۱،۴۵، ۲،۳۲، ۳،۷۵) بیشتر از میانگین جهانی زغال است (جدول ۵).

(et al., 2018, Liu et al., 2019, Nguyen et al., 2022 مطابق با این مطالعات، Cs احتمالاً توسط مواد معدنی رسی و مواد آلی جذب می شود و می تواند به عنوان محصول جانبی مورد بهره برداری قرار بگیرد و اهمیت اقتصادی مهمی در زغال سنگ های قهوه ای دارد. Cs به طور کلی در کانی های حاوی K رخ می دهد (به عنوان مثال ایلیت و اسمکتیت) تا حدی به این دلیل که Cs می تواند به طور ایزومورف جایگزین K شود (Zhao et al., 2016)، همبستگی مثبت و قوی Cs با Al و Si به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸۹ نیز گواهی بر این امر است. بقیه عناصر این گروه (Ba, Ce, Rb, La, Th, U, V, Y)

جدول ۴- آنالیز شیمیایی عناصر فرعی و کمیاب نمونه های معدن زغال سنگ چاه بادام (مقادیر بر حسب گرم در تن)

Table 4. Chemical analysis of minor and trace elements of Chah Badam coal mine samples (values in grams per ton)

Compound Unit	Ag ppm	As ppm	B ppm	Ba ppm	Bi ppm	Ce ppm	Co ppm	Cs ppm	Cu ppm	Ga ppm	Gd ppm	Hg ppm	La ppm	Li ppm	Mo ppm
C-2	<0.1	28.78	47.05	19.37	5.10	1.28	17.61	1.51	33.21	2.77	<0.1	<0.1	0.83	7.98	9.23
C-3	0.54	56.42	62.93	183.02	0.21	4.71	15.19	<0.1	49.91	3.8	1.68	0.18	1.25	52.84	15.19
C-4	<0.1	1.30	48.36	83.77	<0.1	4.75	3.96	0.71	20.73	2.59	0.65	<0.1	1.88	9.02	1.73
C-5	<0.1	720.50	55.84	145.19	<0.1	1.25	7.84	0.92	38.66	2.58	<0.1	<0.1	0.74	6.65	2.58
C-7	5.42	38.12	56.96	81.37	<0.1	0.49	14.24	<0.1	8.14	1.81	<0.1	<0.1	<0.1	2.34	4.52
C-8	<0.1	28.29	35.10	18.84	2.29	0.66	0.51	<0.1	2.57	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.24	<0.1
C-9	<0.1	3.20	44.36	18.48	<0.1	2.85	3.55	<0.1	32.35	2.77	0.49	<0.1	1.24	9.57	<0.1
C-10	<0.1	1.38	57.66	22.38	<0.1	3.60	9.09	0.50	14.63	3.44	0.64	<0.1	1.54	9.80	<0.1
C-11	<0.1	2.80	45.19	71.71	<0.1	4.00	9.11	1.04	11.79	1.96	<0.1	<0.1	1.86	28.07	<0.1
C-13	<0.1	12.11	37.43	40.31	<0.1	7.79	<0.1	2.35	7.68	1.92	<0.1	<0.1	5.61	20.36	<0.1
C-16	<0.1	1.33	32.17	28.70	<0.1	1.44	0.98	3.03	20.00	1.74	<0.1	<0.1	0.95	25.40	<0.1
C-17	3.68	56.37	60.77	32.23	<0.1	1.67	<0.1	<0.1	19.34	3.68	<0.1	<0.1	1.37	<0.1	0.92
C-18	0.85	57.17	49.24	24.62	<0.1	<0.1	4.45	<0.1	47.54	1.70	<0.1	<0.1	<0.1	4.85	5.09
C-19	<0.1	3.74	32.23	20.91	<0.1	3.32	2.41	0.88	35.71	1.74	<0.1	<0.1	1.53	8.34	1.74
Ave	2.62	72.25	47.52	56.49	2.53	2.91	7.41	1.37	24.45	2.50	0.87	0.18	1.71	14.34	5.12
Min	0.54	1.30	32.17	18.48	0.21	0.49	0.51	0.50	2.57	1.70	0.49	0.18	0.74	1.24	0.92
Max	5.42	720.50	62.93	183.02	5.10	7.79	17.61	3.03	49.91	3.80	1.68	0.18	5.61	52.84	15.19
Compound Unit	Ni ppm	Pb ppm	Rb ppm	S ppm	Sb ppm	Sc ppm	Se ppm	Sr ppm	Th ppm	Ti ppm	U ppm	V ppm	W ppm	Y ppm	Zn ppm
C-2	52.84	29.52	4.53	5411.44	1.12	0.95	1.18	10.15	0.85	5.54	<0.1	5.02	<0.1	0.70	67.34
C-3	35.99	68.72	0.55	1311.31	5.61	2.96	<0.1	17.18	0.11	181.75	0.13	35.63	3.07	3.59	262.59
C-4	26.68	7.77	3.74	380.83	<0.1	55.89	0.64	10.36	2.40	8.64	<0.1	6.40	4.33	1.43	31.09
C-5	22.02	73.02	4.26	24657.22	1.13	59.02	1.81	19.76	0.62	10.31	<0.1	4.03	<0.1	0.57	46.39
C-7	6.02	90.42	1.29	64425.86	<0.1	0.60	1.86	1365.28	0.58	6.33	0.76	2.14	4.99	<0.1	37.07
C-8	1.80	8.56	<0.1	4412.67	<0.1	0.73	0.48	13.70	<0.1	1.71	0.62	0.97	<0.1	0.85	12.84
C-9	17.04	12.94	2.73	3195.93	<0.1	1.28	<0.1	12.01	0.82	2.77	<0.1	6.58	<0.1	1.22	68.39
C-10	18.76	78.31	4.05	3351.12	<0.1	2.27	0.52	15.49	1.31	9.47	<0.1	7.30	<0.1	1.48	46.47
C-11	10.64	30.45	3.38	756.39	<0.1	0.64	0.58	27.50	1.36	7.86	<0.1	5.14	<0.1	0.60	95.28
C-13	8.14	15.36	10.38	1652.59	0.76	0.94	<0.1	13.44	3.50	2.88	<0.1	6.16	<0.1	<0.1	8.64
C-16	5.55	7.83	10.08	719.13	<0.1	1.16	<0.1	13.04	0.81	1.74	<0.1	5.64	<0.1	<0.1	19.13
C-17	1.77	180.48	0.82	12775.32	<0.1	0.94	2.19	158.38	0.54	7.37	<0.1	3.12	<0.1	1.01	5.52
C-18	11.74	180.81	1.47	36898.13	0.69	0.82	1.34	6.79	<0.1	3.40	<0.1	2.03	<0.1	0.67	269.95
C-19	8.41	14.81	3.99	5423.34	<0.1	1.18	<0.1	21.78	0.92	5.23	<0.1	4.53	<0.1	0.74	14.81
Ave	16.24	57.07	3.94	11812.23	1.86	9.24	1.18	121.78	1.15	18.21	0.50	6.76	4.13	1.17	70.39
Min	1.77	7.77	0.55	380.83	0.69	0.60	0.48	6.79	0.11	1.71	0.13	0.97	3.07	0.57	5.52
Max	52.84	180.81	10.38	64425.86	5.61	59.02	2.19	1365.28	3.50	181.75	0.76	35.63	4.99	3.59	269.95

است، تنها عنصر تنگستن نسبت به میانگین جهانی غنی شدگی نشان داده است که این غنی شدگی می تواند در ارتباط با ماده آلی تشکیل دهنده زغال سنگ باشد. البته باید توجه داشت که تنگستن عنصر نادری بوده و به راحتی وارد ساختار گیاه نمی شود، بنابراین هرگونه مقدار مثبتی از تنگستن باید با احتیاط بررسی گردد و اطمینان حاصل شود که در وسیله ای حاوی ترکیبات کربید تنگستن آسیاب نشده باشد. همچنین برخی از فلزات احتمالاً از غبار حمل شده به وسیله باد حاصل

۴-۲- عناصر موجود در اجزای آلی زغال سنگ (Ga, U, Y, Be, W)

برخی عناصر کالکوفیل (Ga)، لیتوفیل (U, Y, Be) و سیدروفیل (W) می توانند ارتباط نزدیکی با مواد آلی موجود در زغال سنگ داشته باشند (Firouzi, 1993, Shahraz and Kouhsari, 2014). وقوع، توزیع و غنی سازی آن ها حتی تحت شرایط زمین شناسی خاص توسط مواد آلی کنترل می شود. در این مطالعه همان طور که در قسمت های قبلی توضیح داده شده

۴-۶- رده بندی زغال سنگ چاه بادام از لحاظ تجاری و صنعتی و مقایسه آن با سایر زغال سنگ های ایران

در جدول ۷ ویژگی های زغال سنگ محدود چاه بادام با سایر معادن حوضه های زغالی ایران مقایسه شده است. زغال سنگ ها را از نظر تجاری و صنعتی بر اساس ویژگی های متفاوت آن ها نامگذاری می کنند. این ویژگی ها شامل درصد کربن، درصد رطوبت، درصد مواد فرار، درصد خاکستر، ارزش حرارتی، وزن مخصوص، ترکیب شیمیایی معدنی و درجه زغال شدگی است. البته برخی از این ویژگی ها در طبقه بندی اهمیت بیشتری دارند و گاهی برای طبقه بندی زغال سنگ فقط دو یا سه عامل به کار می رود. در این مطالعه درصد مواد فرار، خاکستر، گوگرد، کربن و رطوبت در نمونه های معدن چاه بادام اندازه گیری شده است. مقدار مواد فرار در نمونه های زغال سنگ معدن چاه بادام ۱۲-۱۳ درصد است. بر اساس استانداردهای ملی چین زغال هایی با مقدار مواد فرار ۲۸ تا ۳۷ درصد زغال سنگ های فرار متوسط و آن هایی با ۳۷ تا ۵۰ درصد زغال سنگ های فرار بالا هستند. زغال های مورد مطالعه به عنوان زغال سنگ های فرار پایین طبقه بندی شدند. بازده خاکستر زغال سنگ در دو نمونه اندازه گیری شده از معدن چاه بادام یزد تقریباً ۲۰ درصد بود، که در رده زغال سنگ با خاکستر متوسط قرار می گیرند (طبق استانداردهای ملی چین زغال سنگ با بازده خاکستر کمتر از ۱۰ درصد زغال سنگ با خاکستر بسیار کم، ۱۰ تا ۲۰ درصد زغال سنگ کم خاکستر، ۲۰ تا ۳۰ درصد زغال سنگ های خاکستر متوسط و ۳۰ تا ۴۰ درصد خاکستر بالا تقسیم بندی می شوند). میزان گوگرد زغال سنگ ها از ۰,۳ تا ۶,۴ با میانگین ۱,۱ بود. زغال هایی با مقدار گوگرد کل کمتر از ۰,۵ زغال های گوگرد بسیار کم و آن هایی با ۰,۵ تا ۱ درصد زغال های گوگرد کم هستند. زغال سنگ معدن چاه بادام یزد به عنوان زغال سنگ با گوگرد کم تا متوسط طبقه بندی شد. هر چه درصد گوگرد در لایه های زغال سنگ بیشتر باشد ممکن تحت تاثیر بیشتری از آب دریا قرار داشته باشد (Fu et al., 2016).

شده اند (Dunn, 2007). همچنین کمتر بودن غلظت سایر عناصر این گروه از میانگین جهانی احتمالاً ناشی از کم بودن این عناصر در مواد آلی است که زغال سنگ های ناحیه مورد مطالعه را تشکیل داده است.

۴-۵- ژئوشیمی عناصر کمیاب خاکی

غنی شدگی عناصر خاکی کمیاب در زغال سنگ تحت تاثیر سه عامل عمده اتفاق می افتد: ۱- فرایندهای حیاتی گیاهان ۲- جذب سطحی از آب های زیرزمینی ۳- رسوبگذاری همزمان ماده معدنی با ماده آلی (Bahar Firouzi, 2003). همچنین میزان اسیدیته محیط تشکیل زغال سنگ نیز بر غلظت عناصر خاکی کمیاب موثر است (Taheri et al., 2014). میانگین و ماکزیمم غلظت عناصر نادر خاکی در نمونه های معدن چاه بادام ۱۷,۱۹-۵,۹۳ گرم در تن است که نسبت به میانگین زغال سنگ های جهان تهی شدگی شدیدی نشان می دهد (جدول ۶) که احتمالاً ناشی از ترکیب ژئوشیمیایی ناحیه منشأ رسوبات و محیط رسوبی تشکیل زغال سنگ و محدود بودن غلظت این عناصر در آب های زیرزمینی مجاور لایه های تشکیل دهنده زغال سنگ است (Lin et al., 2018). مخصوصاً این تهی شدگی در عناصر خاکی سنگین (Yb, Lu, Tm, Er, Ho) نسبت به سبک (La, Ce, Pr, Nd, Sm) به وضوح قابل مشاهده است که تقریباً برای تمامی عناصر سنگین این گروه غلظت آن زیر حد آشکارسازی دستگاه بوده است. این برتری عناصر نادر خاکی سبک به سنگین را می توان به بالا بودن عناصر خاکی سبک در ناحیه منشأ و یا تحرک بیشتر عناصر خاکی سنگین نسبت داد (Alimolaei and Aminzadeh, 2019). توزیع Gd در زغال سنگ های منطقه آنومالی خیلی ضعیفی نشان می دهد که اغلب زیر حد آشکارسازی دستگاه است. آنومالی Gd تحت تاثیر سیالات گرمابی و دیگر آب های طبیعی کنترل می شود که هر دو می توانند منجر به آنومالی مثبت در زغال سنگ شوند (Hower and Dai, 2016)، عدم مشاهده آنومالی Gd در زغال سنگ های منطقه می تواند نشان دهنده این باشد که محدوده های حاوی زغال سنگ چندان تحت تاثیر سیالات گرمابی قرار نگرفته اند (Zhao et al., 2016, Xue et al., 2021).

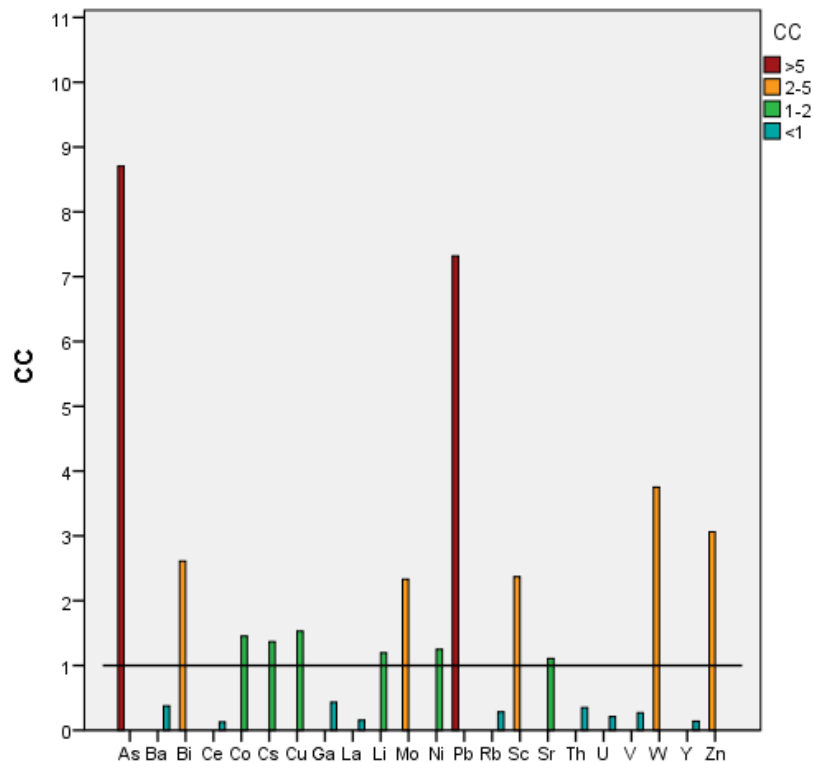
جدول ۵- مقایسه میانگین، حداقل و حداکثر برخی از عناصر کمیاب سه گروه کالکوفیل، لیتوفیل و سیدروفیل در زغال سنگ معدن چاه بادام با میانگین زغال سنگ های دنیا و کلارک پوسته زمین (داده ها از Zhao et al., 2016)

Table 5. Comparison of the average, minimum and maximum of some trace elements of three groups of chalcophile, lithophile and sidrophile in the coal of Chah Badam mine with the average of coal world and Clark of the earth's crust (data from Zhao et al., 2016)

Compound	Unit	Ave	Min	Max	Clark	World*	CC
Pb	ppm	57.07	7.77	180.81	13.00	7.8	7.31
Zn	ppm	70.39	5.52	269.95	70.00	23	3.06
Cu	ppm	24.45	2.57	49.91	55.00	16	1.52
Ga	ppm	2.50	1.70	3.80	15.00	5.8	0.43
As	ppm	72.25	1.30	720.50	1.80	8.3	8.70
Bi	ppm	2.53	0.21	5.10	0.20	0.97	2.60
Sc	ppm	9.24	0.60	59.02	22.00	3.9	2.36
Li	ppm	14.34	1.24	52.84	20.00	12	1.19
Sr	ppm	121.78	6.79	1365.28	375.00	110	1.10
Cs	ppm	1.37	0.50	3.03	3.00	1	1.36
Ba	ppm	56.49	18.48	183.02	425.00	150	0.37
Ce	ppm	2.91	0.49	7.79	60.00	23	0.12
Rb	ppm	3.94	0.55	10.38	90.00	14	0.28
La	ppm	1.71	0.74	5.61	30.00	11	0.15
Th	ppm	1.15	0.11	3.50	7.20	3.3	0.34
U	ppm	0.50	0.13	0.76	1.80	2.4	0.21
V	ppm	6.76	0.97	35.63	135.00	25	0.27
Y	ppm	1.17	0.57	3.59	33.00	8.4	0.13
Ni	ppm	16.24	1.77	52.84	75.00	13	1.24
Co	ppm	7.41	0.51	17.61	25.00	5.1	1.45
Mo	ppm	5.12	0.92	15.19	1.50	2.2	2.32
W	ppm	4.13	3.07	4.99	1.50	1.1	3.75

و شیمیایی زغال سنگ های منطقه چاه بادام که در این پژوهش بررسی شد نشان می دهد که اغلب نمونه های مورد مطالعه (با میزان کربن ۶۶ درصد، مواد فرار ۱۳ درصد، درصد خاکستر ۲۰ درصد) در حد واسط بین زغال سنگ لیگنیت و زغال سنگ بیتومینه قرار دارد و به شبه بیتومینه (زغال بخار دار با درجه بالا) معروف است (جدول ۷). این نوع زغال سنگ کربن زیاد، مواد فرار کم و رنگ سیاه دارد. ویژگی های مهم زغال سنگ های ایران و مقایسه آن با زغال سنگ چاه بادام یزد در جدول ۸ خلاصه شده است. نهشته های زغالی ایران متعلق به سازند شمشک است که بخش وسیعی از رشته کوه های البرز در جنوب دریای خزر و بخش میانی ژرفای ایران مرکزی را می پوشانند و به تریاس پسین - ژوراسیک میانی تعلق دارند. سنگ شناسی سازند شمشک در سرتاسر ایران یکسان و از تناوب لایه های ماسه سنگ، سیلتستون، شیل، آهک و لایه های زغالی تشکیل شده است. مقایسه ویژگی های زغال سنگ های ناحیه مورد مطالعه با زغال سنگ های ایران (جدول ۸) نشان می دهد که زغال سنگ معدن چاه بادام یزد شباهت زیادی از لحاظ سن، کانی شناسی، سازند میزبان با سایر زغال سنگ های ایران نشان می دهد.

یکی از عوامل مهم که تقریباً در همه طبقه بندی های زغال سنگ به آن توجه می شود درصد کربن موجود در زغال سنگ است. بر مبنای درصد کربن زغال سنگ های منطقه مورد مطالعه با مقدار کربن ۶۶ درصد جزو زغال سنگ های لیگنیت محسوب می شوند. مقدار رطوبت در زغال سنگ ها یکی دیگر از عوامل رایج جهت محاسبه کیفیت زغال سنگ هاست. در طبقه بندی تجاری زغال سنگ ها بر مبنای درصد رطوبت، زغال سنگ های معدن چاه بادام با رطوبت ۰٫۲ درصد از نوع زغال سنگ آنتراسیت محسوب می شود که البته با توجه به پایین بودن میزان کربن، این طبقه بندی برای نمونه های مورد مطالعه فاقد اعتبار است. از آنجا که زغال سنگ های ایران از نظر منشأ و خواص فیزیکی شبیه زغال سنگ های معادن کوزباس روسیه هستند و با توجه به مطالعات کارشناسان روسی، برای طبقه بندی زغال سنگ از لحاظ مواد فرار مقیاس روسی مدنظر قرار گرفته است (Yazi et al., 2003)، بر این مبنای زغال سنگ های ناحیه مورد مطالعه با مواد فرار ۱۳ درصد جزو زغال سنگ های لاغر قابل پخت تا نیمه آنتراسیت طبقه بندی می شوند. همچنین بر اساس درجه زغالی شدن زغال سنگ ها به ۴ گروه عمده تورب، لیگنیت، بیتومین و آنتراسیت تقسیم می شوند. ویژگی های فیزیکی



شکل ۶- ضریب غنی‌شدگی برخی عناصر کمیاب در معدن چاه‌بادام یزد نسبت به میانگین جهانی زغال، $CC=1$ با خط نمایش داده شده است (نسبت غلظت عنصری زغال سنگ مورد مطالعه و زغال سنگ سخت جهانی: CC).

Fig.4. The enrichment factor of some rare elements in the Chah Badam mine of Yazd compared to the average of world coal, $CC=1$ is shown with a line (CC, the ratio of elemental concentration between the studied coal and world hard coal).

جدول ۶- مقایسه میانگین غلظت عناصر نادر خاکی در نمونه‌های زغال سنگ معدن چاه‌بادام با زغال سنگ‌های جهانی (Youdovich and Krtris, 2009)

Table 6. Comparison of the average concentration of rare earth elements in the coal samples of Chah Badam mine with world coals (Youdovich and Krtris, 2009)

Compound	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Yb	RE E	LRE E	HRE E
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
C-2	1.2	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	0.8	<0.	0.7	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	2.8	2.88	<0.1
	8	1	1	1	1	1	3	1	7	1	1	1	1	1	8		
C-3	4.7	0.5	<0.	<0.	1.6	<0.	1.2	<0.	2.0	1.0	0.9	<0.	<0.	0.9	13.	9.97	0.93
	1	4	1	1	8	1	5	1	6	1	4	1	1	3	12		
C-4	4.7	<0.	<0.	<0.	0.6	<0.	1.8	<0.	2.4	<0.	0.7	<0.	<0.	<0.	10.	9.76	<0.1
	5	1	1	1	5	1	8	1	1	2	1	1	1	1	40		
C-5	1.2	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	0.7	<0.	0.8	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	2.8	2.82	<0.1
	5	1	1	1	1	1	4	1	3	1	1	1	1	1	1		
C-7	0.4	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	0.4	0.49	<0.1
	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8		
C-8	0.6	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	0.5	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	1.1	1.18	<0.1
	6	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	8		
C-9	2.8	<0.	<0.	<0.	0.4	<0.	1.2	<0.	1.3	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	5.9	5.43	<0.1
	5	1	1	1	9	1	4	1	4	1	1	1	1	1	2		
C-10	3.6	<0.	<0.	<0.	0.6	<0.	1.5	<0.	1.9	<0.	0.6	<0.	<0.	<0.	8.3	7.67	<0.1
	0	1	1	1	4	1	4	1	0	1	3	1	1	1	1		
C-11	4.0	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	1.8	<0.	1.4	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	7.2	7.29	<0.1
	0	1	1	1	1	1	6	1	3	1	1	1	1	1	8		

C-13	7.7	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	5.6	<0.	2.7	0.5	0.5	<0.	<0.	<0.	17.	17.1	<0.1
	9	1	1	1	1	1	1	1	7	3	0	1	1	1	19	9	
C-16	1.4	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	0.9	<0.	0.8	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	3.2	3.23	<0.1
	4	1	1	1	1	1	5	1	4	1	1	1	1	1	2		
C-17	1.6	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	1.3	<0.	0.9	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	3.9	3.97	<0.1
	7	1	1	1	1	1	7	1	3	1	1	1	1	1	7		
C-18	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.1	<0.1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
C-19	3.3	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	1.5	<0.	1.2	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	6.1	6.14	<0.1
	2	1	1	1	1	1	3	1	9	1	1	1	1	1	4		
Ave	2.7	0.0	<0.	<0.	0.2	<0.	1.3	<0.	1.2	0.1	0.2	<0.	<0.	0.0	5.9	5.57	0.07
	0	4	1	1	5	1	4	1	2	1	0	1	1	7	3		
Min	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.	<0.1	<0.1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Max	7.7	0.5	<0.	<0.	1.6	<0.	5.6	<0.	2.7	1.0	0.9	<0.	<0.	0.9	17.	17.1	0.93
	9	4	1	1	8	1	1	1	7	1	4	1	1	3	19	9	
World	23	2.1	0.9	0.4	2.7	0.5	11	0.2	12	3.5	2	0.3	0.3	1	60.	51.5	2.98
Coal			3	7		4						2	1		07	0	

جدول ۷- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برخی معادن زغال سنگ ایران و طبقه‌بندی مارک زغال سنگ (Yazi, 2003)

Table 7. Physical and chemical characteristics of some Iranian coal mines and coal brand classification (Yazdi, 2003)

coal mine	coal mark	calorific value (Kcal/Kg)	Sulfure (%)	Ash (%)	Volatile matter (%)
Lushan (Sangrod)	K-KF	8700	0-5-4	3-10	17-25
Glendrud	KG-KF	5500	1.3	25	35
Karmozd	G	8200	0.75	15	36
Karsang	KF	8600	0.7	20	27
Kerman Coal Zone	G-A	8000-9400	0.1-7.4	2-40	3-43
Chah Badam	A	5816	1.1	20	13

جدول ۸- ویژگی‌های مهم زغال سنگ‌های ایران (Khalili and Parsapour., 2019) و مقایسه آن با زغال سنگ چاه‌بادام

Table 8. Main properties of coal mine of the Iran (Khalili and Parsapour., 2019) and its comparison with Chah Badam coal mine

Structural Zone	Age	Type of Coal	Host Rock	Macerals کانی	mine
Western Alborz	Late Triassic- Middle Jurassic	Fatty and coking	Sandstone, siltstone, shale	vitritinite, liptenite and fusinite	Sangrud
Central Alborz	Late Triassic- Middle Jurassic	Fatty and coking, gassy and fatty	Shale, fine sandstone, coarse sandstone	Vitritinite, fusinite, semi-fusinitite, liptenite	Zirab
Eastern Alborz	Late Triassic- Middle Jurassic	Coking, Fatty and coking, high flame	Sandstone, shale, siltstone	Liptenite, fusinite	Clariz
Kerman-Nayband	Late Triassic- Middle Jurassic	gassy and fatty, Fatty and coking	Sandstone, shale, siltstone, coaly argillite	Vitritinite, semi- vitritinite	Pabdana

ادامه جدول ۸

Tabas	Late Triassic-Middle Jurassic	Fatty, coking	Limestone, dolomite, schist, sandstone, quartzite	vitritinite, semi-vitritinite, fusinitite	Parvardeh
Central Iran	Early Jurassic	Thermal and Non-coking	Mica sandstones, shale with coal layers	vitritinite, a small amount of liptenite (exinitite), and fusinitite (inertinitite)	چاه Badam (study area)

۵- نتیجه گیری

زغال سنگ معدن چاه بادام یزد از نوع زغال سنگ حرارتی و غیر کک شو است و از مجموعه ای از مواد معدنی و آلی تشکیل شده است. مواد معدنی از کانی های از قبیل ایلیت، کوارتز، کلینوکلر، دولومیت، ژپیس و ناتروژاروسیت تشکیل شده است. مهم ترین ماسرال های تشکیل دهنده زغال سنگ ماسرال ویترنیت است و ماسرال های اکسینیت و اینرتینیت از اهمیت کمتری برخوردار هستند. آنالیز اکسیدهای اصلی نشان می دهد ترکیب شیمیایی خاکستر عمدتاً از Al_2O_3 و SiO_2 نسبت کمتری از Fe_2O_3 ، CaO ، SO_3 و مقادیر جزئی MgO ، K_2O ، Na_2O تشکیل شده است که نشان دهنده این است که کانی های تخریبی به منطقه مورد مطالعه منتقل شده و همراه با مقادیر زیادی ماده آلی رسوب کرده اند. در این پژوهش میانگین عناصر کمیاب در زغال سنگ های معدن چاه بادام یزد با میانگین این عناصر در زغال سنگ های جهان مقایسه شده است. بر اساس نتایج حاصل از ژئوشیمی نمونه های زغال سنگ، عناصر کمیاب با فاکتورهای غنی شدگی بیش از ۷ برابر ($CC > 7$) تنها به عنصر Pb در نمونه های زغال سنگ محدود می شود که دارای میانگین 57.07 و ماکزیمم 180.81 ppm است. اغلب نمونه ها از سایر عناصر کمیاب مورد مطالعه فقط اندکی غنی شده اند. عناصر کمیاب با $CC = 2-5$ شامل Bi, Mo, Sc, Zn, W است. اغلب عناصر مانند Ba, Be, Cr, Ga, Nb, Rb, Th, REE نسبت به میانگین جهانی زغال سنگ تهی شدگی نشان می دهند ($CC < 0.5$). تمام عناصر کمیاب خاکی در نمونه های زغال سنگ دارای مقادیر پایین از میانگین زغال سنگ قیری جهان بودند. بر اساس تجزیه و تحلیل آماری بین عناصر و اکسیدهای اصلی و ضرایب همبستگی آن ها مشخص شده است که عناصر Rb, Cs,

Th دارای همبستگی بالایی با اکسیدهای اصلی نظیر SiO_2 ، Al_2O_3 ، K_2O هستند که نشان دهنده این است که این عناصر لیتوفیل احتمالاً در کانی های رسی یا میکا قرار می گیرند. استرانسیوم دارای ضریب همبستگی بالایی با CaO است که نشان دهنده این است که این عنصر بیشتر با مواد معدنی کربناته در ارتباط است. عناصری مانند Pb, Mo, Zn, Ag, As, Cu, Mo, Mn, Se, Ti, Zn, Co, B, Ba همبستگی مثبتی با SO_3 نشان می دهند که نشان دهنده همراهی این عناصر با فازهای سولفیدی و سولفات است. از لحاظ کیفی زغال سنگ های این محدوده به عنوان زغال سنگ با مواد فرار کم (تقریباً ۱۲-۱۳ درصد مواد فرار)، با مقادیر متغیر گوگرد ۰.۰۳-۶.۴٪ با میانگین ۱٫۱ درصد طبقه بندی می شوند که به عنوان زغال سنگ با گوگرد کم تا متوسط تعریف می شود که نشان دهنده تاثیر ناچیز لایه های زغالی از آب دریا است. مقایسه زغال سنگ های محدوده مورد مطالعه با سایر زغال سنگ های ایران شباهت های زیادی از لحاظ کانی شناسی (ماسرال ویترنیت ± اکسینیت، اینرتینیت)، جنس سازند میزبان (ماسه سنگ و شیل) و سن (ژوراسیک) نشان می دهد. زغال سنگ های معدن چاه بادام کربن زیاد، مواد فرار کم و رنگ سیاه دارد و از نوع زغال سنگ حرارتی و غیر کک شو است. نتایج آنالیز کیفی (درصد رطوبت، مواد فرار، خاکستر و کربن ثابت) نشان می دهد که زغال سنگ های معدن چاه بادام حدواسط لیگنیت و بیتومین هستند که به شبه بیتومینه (زغال بخاردار با درجه بالا) معروف است.

قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از دانشگاه محقق اردبیلی و شرکت معادن سرمک که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

مراجع

- Aghaie Qariq, M., 2009. mineralogy and geochemistry study in Glendrud coal mine and tailings of Watani coal washing plant (west of Mazandaran province) in order to evaluate the potential of acid drainage production. MSC thesis. Golestan University, Iran. <http://ijcm.ir/article-1-361-fa.html> .
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the paleo- Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of American; 103, 983-992. Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural Characteristics of the Paleo-Tethys Remnants in Northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103, 983- 992. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2).
- Alimolaei, M., Aminzadeh, B., 2019. Geochemical properties of major and rare earth elements in the South KouchekAli Coal Mine, Tabas. Journal of Economic Geology 11(2), 321-337. <http://10.22067/ECONG.V11I2.68357>
- Arbuzov, S.I., Volostnov, A.V., Mezhibor, A.M., Rybalko, V.I. Ilenok, S.S., 2014. Scandium (Sc) geochemistry of coals (Siberia, Russian Far East, Mongolia, Kazakhstan, and Iran). International Journal of Coal Geology 125, 1-35. <http://10.1016/j.coal.2014.01.008>.
- Bahar Firouzi, Kh, 2003. General information about coal and a reference to its expansion in Iran, Tehran, Geological survey of Iran. <https://www.gsi.ir/fa/reports/1588>.
- Chen, J., Chen, P., Yao, D., Liu, Z., Wu, Y., Liu, W. Hu, W., 2015. Mineralogy and geochemistry of Late Permian coals from the Donglin Coal Mine in the Nantong coalfield in Chongqing, southwestern China, International Journal of Coal Geology 149, 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104582>.
- Chou, C.L., 2012. Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins, International Journal of Coal Geology 100 , 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.05.009>.
- Dai ,S., Graham, I.T., Ward, C.R., 2016. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal, International Journal of Coal Geology 159, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.005>.
- Dai, S., Li, T., Jiang, Y., Ward, C.R., Hower, J.C., Sun, J., Liu, J., Song, H., Wei, J., Li, Q., Xie, P., Huang, Q., 2015. Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Hailiushu Mine, Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, China: Implications of sediment-source region and acid hydrothermal solutions, International Journal of Coal Geology 137, 92–110. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.11.010>.
- Ding, D., Liu, G., Fu, B., Qi, C., 2018. Characteristics of the coal quality and elemental geochemistry in Permian coals from the Xinjier mine in the Huainan Coalfield, north China: Influence of terrigenous inputs, Journal of Geochemical Exploration 186, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.12.002> .
- Dunn., C., 2007., Biogeochemistry in mineral exploration. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands p. 480.
- Emamalipour, A., Nazari, H., Esmailzadeh, M., 2020. An overview of the geochemical distribution of trace and rare earth elements in coals, with a perspective on Iranian coals. New Findings in Applied Geology (14)28. 1-8. <https://civilica.com/doc/1205842>.
- Esmailpour, R., Alipour, S., Ardejani, F.D., Rodrigues, S., Esterle, J., 2022. Petrology of the Parvadeh coals, Tabas Basin, Iran. International Journal of Coal Geology 104028. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4065566>.
- Erarslan, C., Örgün , Y., 2017. Mineralogical and geochemical characterization of the Saray and Pınarhisar coals, Northwest Thrace Basin, Turkey. <http://10.1016/j.coal.2017.01.015>.
- Erkoyun, H., Kadir S., Külah, T. and Huggett, J., 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis of clays interlayered coal seams succession in the Neogene lacustrine Seyitömer coal deposit, Kütahya, western Turkey. International Journal of Coal Geology 172, 112-133. <http://10.1016/j.coal.2017.01.014>.
- Fu, B., Liu, G., Liu, Y., Cheng, S., Qi, C. and Sun, R., 2016. Coal quality characterization and its relationship with geological process of the Early Permian Huainan coal deposits, southern North China. Journal of Geochemical Exploration 166, 33-34. <http://10.1016/j.gexplo.2016.04.002>.
- Hower , J. C., Dai, S., 2016. Petrology and chemistry of sized Pennsylvania anthracite, with emphasis on the distribution of rare earth elements. Fuel 305–315. <http://10.1016/j.fuel.2016.07.055>.

- Huang, S., Ning, S., Zhang, J., Zhang, L., Liu, K., 2021. REE characteristics of the coal in the Erlian Basin, Inner Mongolia, China, and its economic value, *China Geology* 2, 256–265. <https://doi.org/10.31035/cg2021001>.
- Imamalipour, A., Nazari, H. and Esmailzadeh, M., 2020, A Review on the geochemical distribution of rare earth elements (REE) in coal, with a view on Iran's coal, *New Findings in Applied Geology* 14(28), 62–69. <https://civilica.com/doc/1205842>.
- Karayigit, A. I., Littke, R., Querol, X., Jones, T., Oskay, R. G, Christanis, K., 2017. The Miocene coal seams in the Soma Basin (W. Turkey): Insights from coal petrography, mineralogy and geochemistry, *International Journal of Coal Geology* 173, 110–128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.03.004>.
- Khalili, M and Parsapour., A., 2019. Coal geology. University of Isfahan, Iran. P. 321.
- Kolker, A., Scott, C., Hower, J. C., Vazquez J. A., Lopano, C.L., Dai, S., 2017. Distribution of rare earth elements in coal combustion fly ash, determined by SHRIMP-RG ion microprobe. *International Journal of Coal Geology* 184, 1–10. <http://10.1016/j.coal.2017.10.002>.
- Li, C., Liang, H., Wang, S., Liu, J., 2018. Study of harmful trace elements and rare earth elements in the Permian tectonically deformed coals from Lugou Mine, North China Coal Basin, China, *Journal of Geochemical Exploration* 190, 10–25. <http://10.1016/j.gexplo.2018.02.016>.
- Liu, J., Soong, H., Dai, S., Nechaev, V.P., Graham, I.T., French, D., Nechaeva, E.V., 2019. Mineralization of REE-Y-Nb-Ta-Zr-Hf in Wuchiapingian coals from the Liupanshui Coalfield, Guizhou, southwestern China: Geochemical evidence for terrigenous input, *Ore Geology Reviews* 115, 103190. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103190>.
- Lin, R., Soong, Y. and Granite, E.J., 2018. Evaluation of trace elements in U.S. coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part I: Rare earth elements and yttrium (REY), *International Journal of Coal Geology* 192, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2017.03.004>.
- Mahdavi, M.A., 1996. 1:100000 shale geological map of Bahabad, Geological survey of Iran.
- Mashyanov, N.R., Pogarev, S.E., Panova, E.G., Panichev, N., Ryzhov, V., 2017. Determination of mercury thermospecies in coal. *Fuel* 203, 973–980. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76453-z>.
- Munir, M., M.A., Liu, G., Yousaf, B., Ali, M.U., Abbas, Q., Habib Ullah, H., 2018. Enrichment of Bi-Be-Mo-Cd-Pb-Nb-Ga, REEs and Y in the Permian coals of the Huainan Coalfield, Anhui, China. *Ore Geology Reviews* 95, 431–455. <http://10.1016/j.oregeorev.2018.02.037>.
- Nguyen, X., Lia, J., Zhuang, X., Li, B., Xavier Querol, X., Moreno, N., Cordoba, P., 2022. Significant enrichment of Rb and Cs in the Late Triassic coals from the Coc Sau surface mine, Cam Pha Coalfield, Quang Ninh Province, Vietnam. *Ore Geology Reviews* 142, 104700. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104700>.
- Seredin V. V., Dai S., 2012. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology* 94, 67–93. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.11.001>.
- Shahraz, S and Kouhsari, A., 2014, investigation of rare and rare earth elements in the coal fields of Iran (investigation in the underground mine of Karmozd coal). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 22, 4, 696–685. <http://ijcm.ir/article-1-209-fa.html>.
- Shao, P., Hou, H., Wang, W., Qin, K. and Wang, W., 2022. Distribution and enrichment of Al-Li-Ga-REEs in the High-Alumina coal of the Datong Coalfield, Shanxi Province, China. *Ore Geology Reviews* 140, 104597. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104597>.
- Shariat Nia, M.H., Taheri, B., Shahrivar Qozulu, J., Kazaroni, H., Qarabaghi, M., 2014, Investigating strategic metal reserves and rare earth elements in coal ash, The second national coal congress of Iran. 2nd National Iranian Coal Congress, <https://civilica.com/doc/331074>.
- Xue, J., Liu, J., Huang, D., Zhou, W., Liu, C., Cao, Y., Cao, C., 2021. Sources of rare earth elements REE+Y (REY) in Bayili Coal Mine from Wensu County of Xinjiang, China, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 31, 3105–3115. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105146>.

- Yawooz, K., Cortland, F.E., 2017. Petrology, mineralogy and geochemistry of Hemrin Coal Seam, Hemrin South Mountain, Northern Iraq. *International Journal of Coal Geology* 181, 39-59. <http://10.1016/j.coal.2017.08.001>.
- Yudovich, Y. and Ketris, M.P. 2009., Estimations of Clarkes for Carbonaceous Biolithes: World Averages for Trace Element Contents in Black Shales and Coals. *International Journal of Coal Geology* 78, 135-148. <https://org/10.1016/j.coal.2009.01.002>.
- Zhao, L., Dai, S., Nechaev, V.P., Nechaevae E.V., Grahamf, I.T., French, D., Sun, J., 2019. Enrichment of critical elements (Nb-Ta-Zr-Hf-REE) within coal and host rocks from the Datanhao mine, Daqingshan Coalfield, northern China, *Ore Geology Reviews* 111, 102951. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102951>.
- Zhao, C., Liu, B., Xiao, L., Li, Y., Liu, S., Li,Z., Zhao,B., Ma, J., Chu,G., Gao, P. and Sun, Y., 2016. Significant Enrichment of Ga, Rb, Cs, REEs and Y in the Jurassic No. 6 coal in the Iqe Coalfield, northern Qaidam Basin, China—A Hidden Gem. *Ore Geology Reviews* 83, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.012>.
- Zhou, M., Zhao, L., Wang, X., Nechaev c, V., Frenche, D., Spiro, B., Graham, I., Hower, J., Dai, Sh., 2021. Mineralogy and geochemistry of the Late Triassic coal from the Caotang mine, northeastern Sichuan Basin, China, with emphasis on the enrichment of the critical element lithiu *Ore Geology Reviews*, 139, 1-22. <http://10.1016/j.oregeorev.2021.104582>.