



Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 3, Autumn 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Geochemical Evaluation of Rare Earth Elements Using Step Factor Analysis and Fractal Modeling in Qalikhoh Oil Shale in Western Iran

Pourshaban A.¹, Yazdi M.^{2*}, Adabi M.H.², Daryabandeh M.³

1- Ph.D Student, Dept. of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Professor, Dept. of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- M.Sc, Dept. of Geochemistry, Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Iran

Received: 25 Jan. 2021

Accepted: 28 Feb. 2021

Abstract: Qalikhoh area is located 35 km southwest of Aligudarz city, Lorestan province, SW of Iran. The area is located in the central part of the Zagros Geological Zone. The oil shales of the area are located in the Upper Triassic and Lower Jurassic of Sargalu and Garau Formations. The Sargalu Formation contains a series of shale, carbonate and clays. Garau Formation includes oil shale horizons with different thicknesses, ammonite shales and black cherty layer. In order to investigate the enrichment ratio and relationship between elements and organic matter, 53 samples of oil shale from Garau and Sargalu formations were selected. The samples were analyzed by XRD, XRF, ICP-MS and Rock-Eval analyzer. Data processing was performed using factor analysis, fractal modeling, stepwise factor analysis and principal component analysis. The data show that Sargalu Formation with average TOC = 13.27% and Garau Formation with average TOC = 18.13%, have high content of organic matter in central and NW of the area. Concentration-number fractal modeling showed that the Co, Mo, Ni, Pb and U have significant anomalies. The stepwise factor analysis (SFA) method showed a significant correlation between the anomalous elements and TOC. Geochemical maps showed that the anomalies are located for Co and Pb in the center and SE, for Mo, Ni in the NW and center, for V and REE in the NW, and for U in central part of the area.

Keywords: Oil shale, Stepwise factor analysis, Fractal modeling, Qalikhoh area, Western Iran.

How to cite this article

Pourshaban, A., Yazdi, M., Adabi, M. H., and Daryabandeh, M. (2022). "Geochemical evaluation of rare earth elements using step factor analysis and fractal modeling in Qalikhoh oil shale in western Iran". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(3): 39-58.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14970.1487

*Corresponding Author Email: m-yazdi@sbu.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Oil shales are unconventional hydrocarbon resources which is composed of fine-grain sedimentary rocks [1,2]. Trace elements can be concentrate in oil shales because of they were formed in reduction condition [3-5]. According to the different researches, considerable oil shale reserves in the Qalikouh area have been formed in Garau and Sargalu formations [6]. In this research we used concentration-number fractal modelling and stepwise factor analysis method to analysis geochemistry of rare earth and trace elements (Co, Mo, Ni, Pb, U, V, and Σ REE) of Qalikouh oil shales. Also, related factors to mineralization and geochemical maps were determined and finally the single element maps were compared to factor rating maps.

MATERIALS AND METHODS

53 samples were chosen from various geological sections of Qalikouh oil shales for geochemical analysis of and organic matter. After sample preparation, organic matters were analysed by Rock-Eval method, and trace and rare earth elements were analysed by ICP-MS [5]. In order to evaluate multivariate data, the principal component analysis (PCA) method was used. This method is a suitable tool for reducing the volume of geochemical data. Then, correlation and variations between these elements were investigated by using Stepwise Factor Analysis (SFA) method [1,7,8]. Finally, we used Concentration-Number fractal (C-N fractal) modelling, geochemical background and anomaly threshold values to calculate and draw concentration maps. The general formula for this model is as follows [9]:

$$N(\geq\rho) = F \rho^{(-D)} \quad (1)$$

Where:

ρ : element concentration

$N(\geq\rho)$: cumulative number of samples with values greater than or equal to ρ

F: constant data

D: is fractal distribution of elements concentration.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The statistical show that the average of organic carbon (TOC) is 15.3%. Average for Co, Mo, Ni, Pb, and U is 16.73 ppm, 287.29 ppm, 238.85 ppm, 21.10 ppm, and 51.28 ppm, respectively. These average are high in the Garau Formation relative to Sragalu Formation. Average for V and REE is 751.53 ppm and 39.66 ppm. These average are high in the Sragalu Formation relative to Garau Formation. U, Mo, Ni, V, and partly Co show high correlation to organic matter. It can be concluded that the increase in concentration of these elements are related to the increase of organic matter.

Elements concentration were classified by using Step Factor Analysis (SAF) method. In first step, the elements were classified on the basis of genesis characters. Threshold limit of 0.6 were used for separation of elements in different factors. First factor (F1-1) includes Ag, Al, Cd, Cr, Cs, Ga, K, Li, Nb, Rb, Sb, Ti V, Σ LREE, and Σ HREE. Factor II (F2-1) includes As, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, P, Pb, S, Sr, Tl, U and TOC. Factor III (F3-1) includes Hf, Na, and Zr. Factor IV (F4-1) includes Ba and Mg. Factor V (F5-1) includes Sn and Ca, Mn, Th and Zn.

In the final stage, all elements were classified into 5 factors, and two groups including of F1-2 and F2-2. According to the stepwise factor analysis, light and heavy rare earth elements are located in F1-1. There is good correlation between Al, K, Ti and Ga in this factor which indicates these elements were originated from aluminosilicate minerals weathered [5]. The presence of the TOC parameter in F2-1 indicates that other variables in this group are controlled by organic matter. Presences of V, Ni, Mg and Cu confirm the origin of biological processes for these elements. The presence of P in this group show that concentration of P in organic matter. Also, Mo and U represent the sediments rich in organic matter which were deposited in reducing conditions. It seems that they are added to the sediments through the diffusion of porous water [5]. C-N fractal modeling were calculated based on F1-2 (including V, LREE and HREE) and F2-2 (including Co, Mo, Ni, Pb, U and TOC) data. C-N logarithmic diagram was plotted based on F1-2 and F2-2 and SFA data (Figure 1).

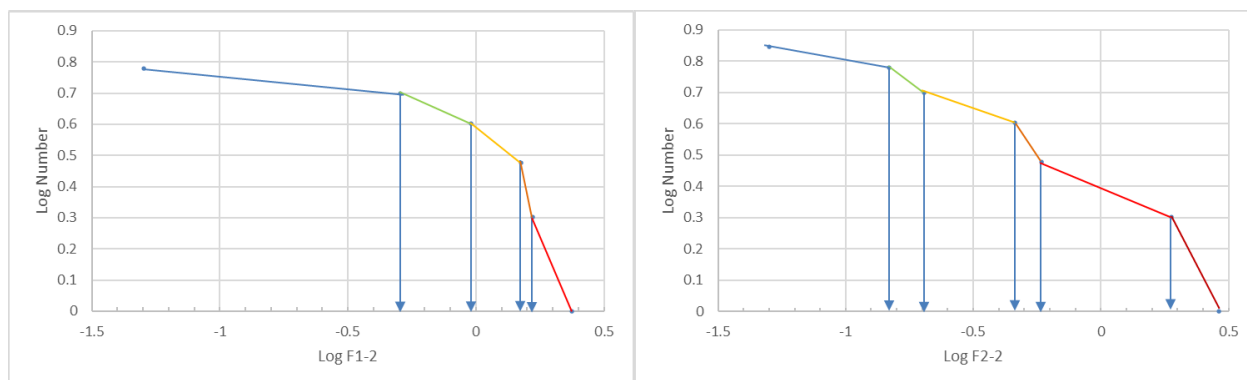


Figure 1. Concentration-number logarithmic diagram - F1-2 and F2-2

F1-2 and F2-1 anomaly maps were calculated according to C-N fractal modelling data (Figure 2). The maps show that F1-2 data has an anomaly in the NW part of the area and F2-2 show anomaly in the centre, partly in SE and NW of the area. Also, SFA data show that F1-2 anomalies are mostly related to Garau Formation and F2-2 anomalies are mainly related to Sargalu Formation.

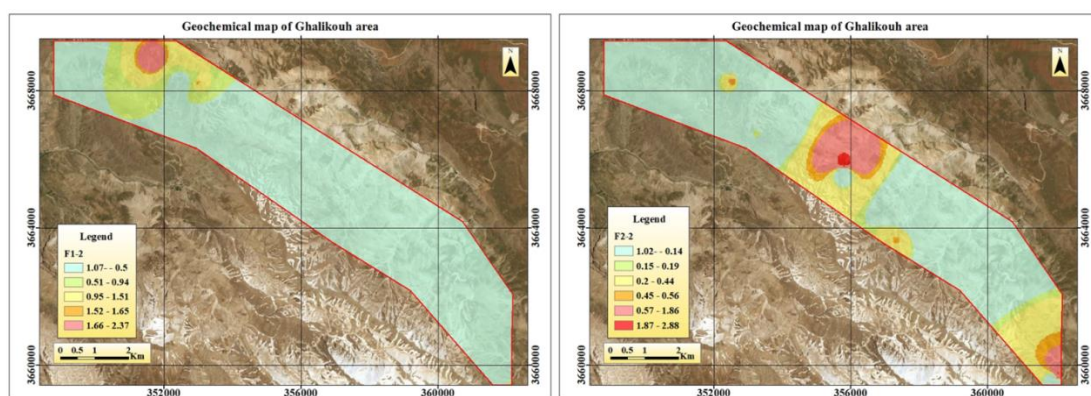


Figure 2. F1-2 and F2-1 anomaly maps obtained by C-N fractal modelling

Elemental Enrichment Factor (EF) was calculated based on the average of Australian Archean shales. The results show that the enrichment ratio are as $Mo > U > V > Ni > Pb > Co > \sum LREE > \sum HREE$ in Garau Formation. In Sargalu Formation, enrichment ratio are as $Mo > U > V > Ni > Pb > Co > \sum LREE > \sum HREE$.

CONCLUSIONS

Oil shales in the Qalikouh area are mainly associated with Sargalu and Garau formations (Jurassic-Cretaceous). The average of TOC in Sargalu and Garau formations is 13.27% and 18.13%, respectively. The data show high content of organic matter in these shales. Average of Co, Mo, Ni, Pb, and U is 16.73 ppm, 287.29 ppm, 238.85 ppm, 21.10 ppm, and 51.28 ppm, respectively in Garau Formation samples. Average of V and REE is 751.53 ppm and 39.66 ppm in Sargalu Formation samples. The data show a good correlation between organic matter and Co, Mo, Ni, V, and U elements. Comparison of the main anomalies (calculated by fractal C-N method) indicates high enrichment for Co, Mo, Ni, Pb, U, and V elements, which confirm the hope to find good potential these elements in these oil shale as by-products.

REFERENCES

- [1] Afzal, P., Yasrebi, A. B., Daneshvar Saecin, L., and Panahi, S. (2017). "Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 181: 294-304.
- [2] Liu, W., Yao, J., Tong, J., Qiao, Y., and Chen, Y. (2018). "Organic matter accumulation on the Dalong Formation (Upper Permian) in western Hubei, South China: Constraints from multiple geochemical proxies and pyrite morphology".

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology, 514: 677-689.

- [3] Bai, Y., Lv, Q., Liu, Z., Sun, P., Xu, Y., Meng, J., Meng, Q., Xie, W., Wang, J., and Wang, K. (2020). "Major, trace and rare earth element geochemistry of coal and oil shale in the Yuqia area, Middle Jurassic Shimengou Formation, northern Qaidam Basin". *Oil Shale*, 37(1): 1-31.
- [4] Wang, J., Zhou, L., Mi, J., Ma, C., Yang, H., Lei, H., Chen, J., and Ren, J. (2019). "Trace Elemental Geochemistry and Depositional Environment of Shale Oil Reservoir Rocks within the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag". *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 101-108.
- [5] Yazdi, M. (2012). "Geological and geochemical features of Alborz Basin coal deposits". *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 23(2): 163-169.
- [6] Rasouli, A., Shekarifard, A., Jalali Farahani, F., Kök, M., Daryabandeh, M., and Rashidi, M. (2015). "Occurrence of highly organic matter-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikh locality, Zagros Basin, South-West of Iran: A possible oil shale resource". *International Journal of Coal Geology*, 143: 34-42.
- [7] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M. (2012). "Geochemical mineralization probability index (GMPI): A new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping". *Journal of Geochemical Exploration*, 115: 24-35.
- [8] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M. (2014). "Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14: 45-58.
- [9] Hassanpour, S., and Afzal, P. (2013). "Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3): 957-970.



ارزیابی ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و نادر خاکی با استفاده از تحلیل عاملی مرحله‌ای و مدل سازی فراکتالی در شیل‌های نفتی قالیکوه غرب ایران

اردشیر پورشعبان لیاولی^۱، محمد یزدی^۲، محمد حسین آدابی^۳، منوچهر دریابنده^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳- کارشناسی ارشد، شرکت ملی نفت ایران

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

چکیده

محدوده قالی کوه در ۳۵ کیلومتری شهرستان الیگودرز، استان لرستان، غرب ایران قرار دارد. شیل‌های نفتی قالی کوه در زاگرس مرتفع و در دو سازند گرو و سرگلو گسترش دارند. این شیل‌های نفتی در دو سازند سرگلو و گرو با سن تریاس بالایی و ژوراسیک پایینی قرار گرفته‌اند. سازند سرگلو شامل مجموعه‌ای از رسوبات شیلی و سنگ آهک‌های رس دار است. سازند گرو متشکل از افق شیل نفتی با ضخامت‌های متفاوتی از نهشته‌های آهک نازک تا متوسط لایه و شیل‌های آمونیت‌دار و گرهک‌های لایه‌ای چرتی سیاه رنگ است. برای بررسی غنی‌شدگی، ارتباط عناصر معدنی با مواد آلی، تشخیص مناطق دارای کانی‌سازی و تعیین حدود آستانه عناصر کمیاب و نادر خاکی، ۵۳ نمونه شیل نفتی از دو سازند گرو و سرگلو انتخاب شدند. این نمونه‌ها با استفاده از روش‌های XRF، XRD، ICP-MS و Rock-Eval مورد تجزیه ژئوشیمیایی قرار گرفتند، سپس با استفاده از روش تحلیل عاملی و مدل‌سازی فراکتالی نسبت به پردازش داده‌ها اقدام شد. بر پایه نتایج به دست آمده از نمونه‌ها و پردازش داده‌ها مشخص شد که سازند سرگلو با میزان میانگین $TOC=13.27\%$ و سازند گرو با میانگین $TOC=18.13\%$ ، آنومالی قوی از مواد آلی را در شمال غرب و مرکز نشان می‌دهند. مدل‌سازی فراکتالی عیار- تعداد نشان داد که عناصر Pb ، Ni ، Mo ، Co و U آنومالی قابل توجهی دارند. همچنین روش تجزیه فاکتوری مرحله‌ای (SFA) نشان داد که همبستگی قابل توجهی بین عناصر آنومال با TOC وجود دارد. ترسیم نقشه‌های عنصری نشان داد که آنومالی عناصر Pb و Co در مرکز و جنوب شرق و Mo ، Ni در شمال غرب و مرکز، U در مرکز، V ، REE در شمال غرب قرار دارند.

کلمات کلیدی

شیل نفتی، مدل فراکتال، تحلیل عاملی مرحله‌ای، قالی کوه، غرب ایران.

استناد به این مقاله

پورشعبان لیاولی، ا. یزدی، م. آدابی، م. ح. دریابنده، م.؛ ۱۴۰۱؛ "ارزیابی ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و نادر خاکی با استفاده از تحلیل عاملی مرحله‌ای و مدل‌سازی فراکتالی در شیل‌های نفتی قالیکوه غرب ایران". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۳، ص ۵۸-۳۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14970.1487



۱- مقدمه

و تقسیمات زمین‌شناسی ایران در پهنه زاگرس مرتفع جای گرفته است [۱۸]. بر اساس تقسیم‌بندی جغرافیایی، زاگرس را می‌توان به نواحی لرستان، خوزستان و فارس تقسیم کرد و از نظر زمین ریخت‌شناسی، این حوضه رسوبی از شمال شرق به سمت جنوب غرب، به زاگرس مرتفع، زاگرس چین خورده و دشت خوزستان تقسیم شده است و از نظر الگوی ساختاری، از سمت شمال شرق به سمت جنوب غرب، حوضه زاگرس به زون راندگی‌ها، کمربند چین خورده، فروافتادگی دزفول و دشت آبادان قابل تقسیم است (شکل ۱) [۱۹، ۲۰].

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- نمونه‌ها

در این پژوهش برای مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمی شیل‌های نفتی محدوده قالی کوه، در برش‌های متعدد زمین‌شناسی نمونه‌برداری از شیل‌های نفتی سازندهای سرگلو و گرو انجام شد. برای بررسی وضعیت و تعیین نحوه توزیع آنومالی‌های ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی، عناصر کمیاب و همچنین مواد آلی، ۵۳ نمونه برداشت شد که محل نمونه‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است. در این راستا نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Rock Eval IV در آزمایشگاه دانشگاه خاورمیانه آنکارا (M.E.T.U) و نیز دستگاه ICP-OES و ICP-MS در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران آنالیز شدند. داده‌های خام حاصل از تجزیه نمونه‌ها پس از آماده‌سازی، از نظر مقادیر سنسورد بررسی و به وسیله روش جایگزینی ساده جایگزین شدند [۲۴-۲۱].

۳-۲- روش‌های ارزیابی داده‌ها

۳-۲-۱- تحلیل عاملی مرحله‌ای (SFA)

تجزیه مولفه اصلی^۱ یا تجزیه فاکتوری به عنوان یکی از تکنیک‌های تجزیه چند متغیره به صورت ابزاری موثر و کاربردی در پردازش داده‌های اکتشافی استفاده می‌شود. PCA روشی است که برای ترکیب چندین متغیر همبسته به یک متغیر واحد برای کاهش دادن ابعاد مجموعه داده‌ها بر پایه کوواریانس یا همبستگی بین متغیرها (با در نظر گرفتن رابطه درونی میان متغیرهای چند بعدی) به کار گرفته می‌شود [۳۱-۳۴، ۳۲، ۲۴]. هدف اصلی تجزیه فاکتوری تشریح تفاوت‌ها در مجموعه داده‌های چند متغیره به وسیله فاکتورهای در حد امکان کمینه و یافتن ساختارهای پنهان داده‌های چند متغیره است [۳۸-۳۵].

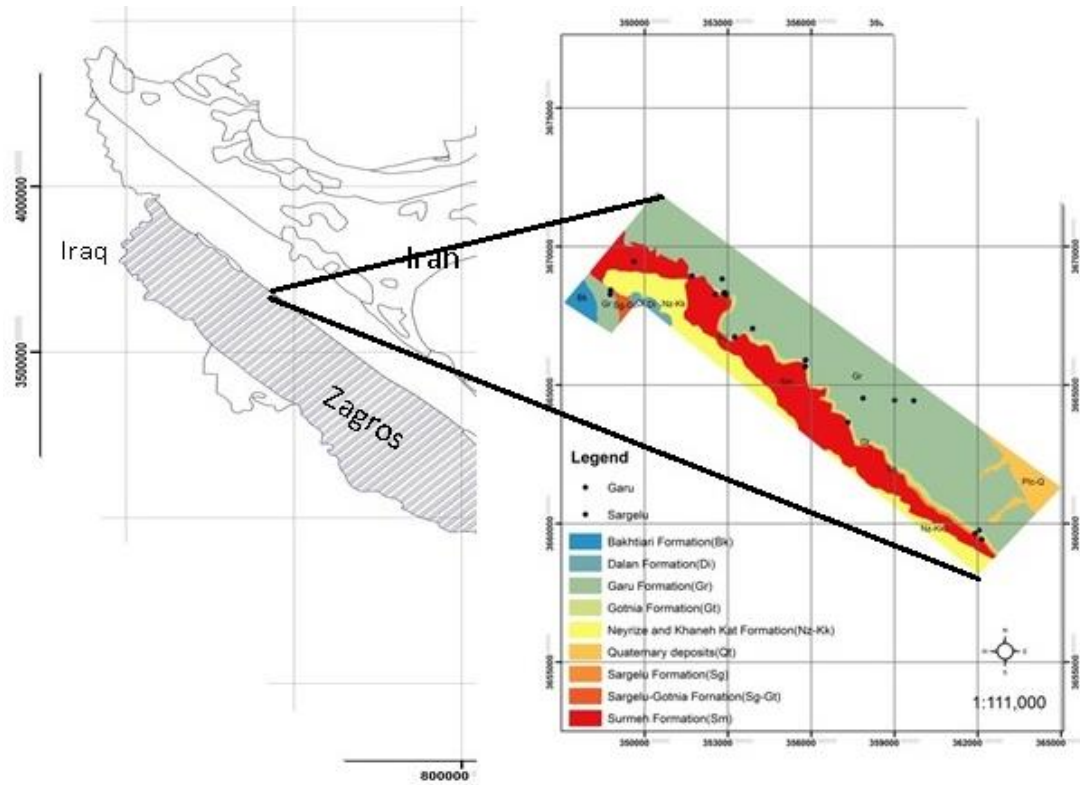
شیل‌های نفتی که از سنگ‌های رسوبی دانه‌ریز تشکیل شده است، منابع نفتی غیرمعارفی‌اند که به وسیله پیرولیز می‌توان مقدار زیادی نفت از آن‌ها استحصال کرد [۵-۱۱]. مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده بر روی بسیاری از شیل‌های نفتی دنیا نشان داده است که این شیل‌ها افزون بر توان هیدروکربن‌زایی بالا، ناهنجاری‌هایی از برخی عناصر فلزی و غیرفلزی نشان می‌دهند که بررسی و مطالعه آن‌ها از این نقطه نظر ممکن است بسیار حایز اهمیت باشد [۱۳-۶].

نهشته‌های شیل نفتی قالی کوه در زاگرس مرتفع و در دو سازند گرو و سرگلو گسترش دارند. مطالعات سیستماتیک برای برآورد پتانسیل هیدروکربورزایی شیل‌های نفتی این منطقه توسط مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت، فریدونی و رسولی، انجام پذیرفته است که با توجه به این مطالعات میزان مواد نفتی در شیل‌های نفتی سازند سرگلو با میزان میانگین TOC برابر با ۱۳٫۲۷ درصد و سازند گرو با میانگین TOC برابر با ۱۸٫۱۳ درصد بیان شده است. همچنین بررسی عناصر کمیاب در بخش جنوبی حوضه نفتی قالی کوه بیانگر غنی‌شدگی عناصر V، Ni، Pb، و Mo در این شیل‌ها است [۱۷-۱۴]. از آنجایی که مطالعات قبلی در محدوده شیل‌های نفتی قالی کوه به طور عمده بر روی ژئوشیمی آلی متمرکز بوده و به صورت مختصر در بخش جنوبی این ناحیه مطالعات ژئوشیمی معدنی انجام گرفته است، بررسی دقیق پتانسیل معدنی این شیل‌ها ممکن است حایز اهمیت باشد.

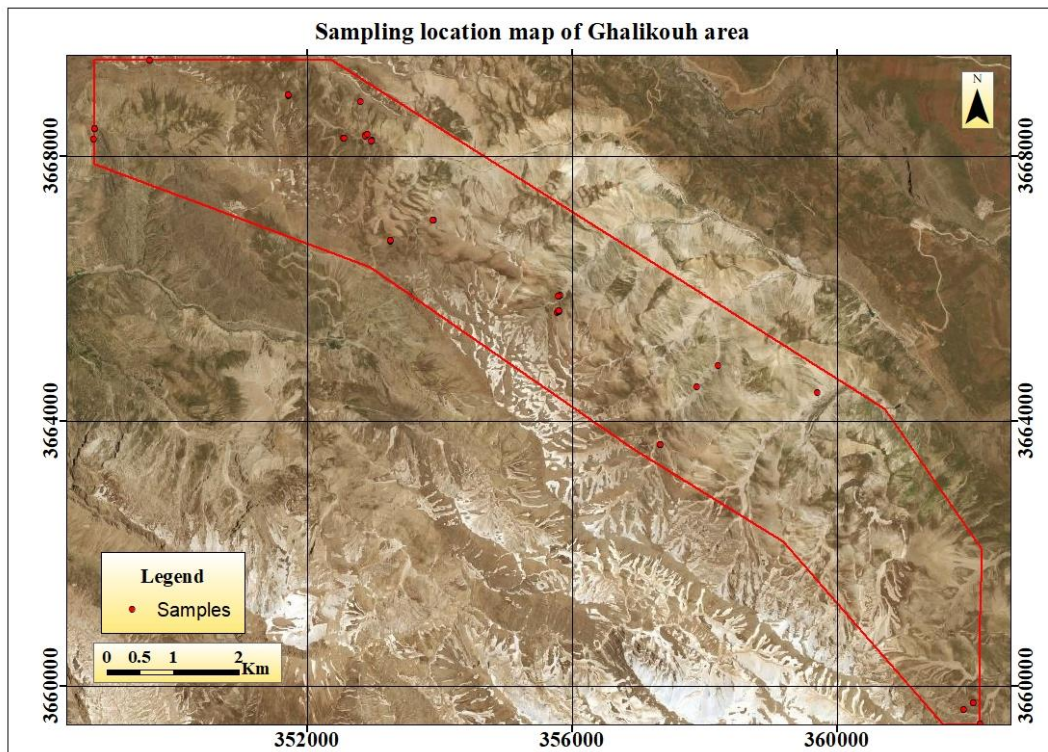
در این پژوهش به بررسی ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی و کمیاب (Co، Mo، Ni، Pb، U، V و Σ REE) شیل‌های نفتی قالی کوه و جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی آن‌ها از زمینه در نمونه‌های برداشت شده به روش فراکتالی عیار- تعداد پرداخته می‌شود. همچنین فاکتورهای مرتبط با کانی‌سازی و ترسیم نقشه‌های ژئوشیمیایی امتیاز فاکتوری مربوط به آن‌ها و در نهایت مقایسه نقشه‌های تک عنصری با نقشه‌های امتیاز فاکتوری تعیین می‌گردد.

۲- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان الیگودرز، در استان لرستان و در ورقه زمین‌شناسی یکصد هزارم دورود، کینو و هفت تنان قرار گرفته است. همچنین این محدوده از نظر زمین‌شناسی ساختاری



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی محدوده قالی کوه



شکل ۲: محل نمونه‌برداری در شیل‌های نفتی محدوده قالی کوه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تحلیل‌های آماری

در این پژوهش برای کسب اطلاعات از وضعیت و روند کلی پراکندگی داده‌ها، شناخت ویژگی‌های داده‌های خام استفاده شده در مطالعات ژئوشیمیایی، به کارگیری صحیح‌تر داده‌ها و تجزیه و تحلیل مناسب‌تر نتایج، بررسی‌های آماری تک متغیره بر روی داده انجام شد (جدول ۱ و شکل ۳). از آنجایی که بسیاری از شیل‌های نفتی ضمن داشتن پتانسیل مواد نفتی و هیدروکربوری، می‌توانند منبع مهمی از عناصر مختلف غیرآلی نیز باشند، بررسی‌ها علاوه بر پارامتر TOC، روی عناصر نادر خاکی و کمیاب نیز متمرکز شد [۳۲]. با توجه به تعدد عناصر نادر خاکی، برای ارزیابی کلی از وضعیت عیار این عناصر در ابتدای مطالعات، از مجموع عناصر نادر خاکی ($\sum REE$)، مجموع عناصر نادر خاکی سنگین و سبک ($\sum HREE$ and $\sum LREE$) استفاده شد.

برای شناخت مقدماتی شرایط تشکیل مواد آلی و عناصر معدنی، همبستگی میان عناصر هدف و TOC بررسی شد (جدول ۲). همان‌طور که از نتایج جداول ۱ و ۲ و شکل ۳ و نیز تطابق آن‌ها با اطلاعات صحرائی، قابل استنباط است در منطقه قالی کوه میانگین کلی کربن آلی (TOC) برابر با ۱۵٫۳ درصد است. این پارامتر در سازند گرو میانگین بالاتری دارد. میانگین کلی عناصر Co، Ni، Mo، Pb و U در این منطقه به ترتیب ppm 16.73، ppm 287.29، ppm 238.85، ppm 21.10 و ppm 51.28 است که در سازند گرو میانگین عیار بالاتری دارند. عناصر V و REE با میانگین عیار کلی ppm 751.53 و ppm 39.66 در سازند سرگلو میانگین عیار بالاتری دارند. بر این اساس مشاهده می‌شود که عناصر U، Ni، Mo، V و تا حدی Co دارای همبستگی بالایی با ماده آلی‌اند که می‌توان نتیجه گرفت که این عناصر در اثر غنی‌شدگی محیط از ماده آلی افزایش تمرکز داشته‌اند.

۴-۲- تجزیه فاکتوری مرحله‌ای

از آنجایی که نمونه‌های برداشت شده، علاوه بر ماده آلی برای عناصر معدنی نیز تجزیه شده‌اند و مجموعه بزرگی از داده‌ها ایجاد شده است، برای طبقه‌بندی عناصر بر اساس ارتباط و ماهیت ژئوشیمیایی موثر بر تشکیل آن‌ها و نیز کوچک کردن تعداد متغیرها، روش مولفه اصلی استفاده شد. با توجه به این که هر فاکتور تعیین شده، چند متغیر را کنترل می‌کند، روش‌هایی بر پایه چرخش عوامل وجود دارند که بدون تغییر

در واقع تجزیه فاکتوری به صورت ابزاری مناسب برای کاهش حجم داده‌های ژئوشیمیایی با محاسبه امتیازهای فاکتوری به جای اولیه، ضمن کم کردن داده‌های قابل بررسی، تاثیر مناسبی در بهبود بخشیدن نتایج و تعیین و تفسیر دقیق‌تر آنومالی‌های ژئوشیمیایی چند عنصری دارد [۲۴].

روش آنالیز فاکتوری مرحله‌ای^۲ با بررسی آماری چند متغیره، روابط و تغییرات نسبی و همچنین ساختارهای پنهان بین عناصر را شرح می‌دهد [۳۳] و نقش بسزایی در تسهیل جداسازی، درک و تفسیر آنومالی‌ها ایفا می‌کند [۲۴، ۳۰، ۳۳، ۳۵، ۳۹، ۴۰، ۴۱]. از مزیت‌های روش SFA نسبت به تجزیه فاکتوری معمولی، شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی و تولید نقشه‌های بهبود یافته است. SFA به عنوان تکنیکی از تجزیه فاکتوری، ضمن اجرای چندین مرحله تجزیه و حذف عناصر نویز و غیربیشگو، موجب افزایش دقت و کارایی در تشخیص همبستگی‌های ژنتیکی متقابل موجود بین عناصر متمایز و طبقه‌بندی داده‌ها بر اساس عناصر شاخص مرتبط با هر تیپ کانساری در قالب کمترین تعداد ممکن فاکتورها می‌شود [۲۴، ۳۳، ۴۰، ۴۲].

۳-۲-۲- مدلسازی فراکتالی تعداد-عیار

روش فراکتالی عیار-تعداد^۳ برای تعیین زمینه ژئوشیمیایی و مقادیر آستانه‌ای آنومالی ابتدا توسط ماندلبروت ارایه شد، سپس آگتبرگ مدل مولتی فراکتالی اندازه-عیار^۴ را برای تعیین توزیع فضایی عیار استفاده کرد. بر این اساس مدل رابطه توانی برای شرح رابطه عیار-تعداد بر اساس توزیع فراوانی غلظت عناصر و فراوانی تجمعی نمونه‌ها ارایه شد [۳۰، ۵۲-۴۳]. فرمول عمومی این مدل به صورت زیر است [۴۶]:

$$N(\geq \rho) = F\rho^{-D} \quad (1)$$

که در آن:

ρ : نشانگر عیار عنصر

$N(\geq \rho)$: نشانگر تعداد تجمعی نمونه‌ها با مقادیر بزرگ‌تر

یا مساوی ρ

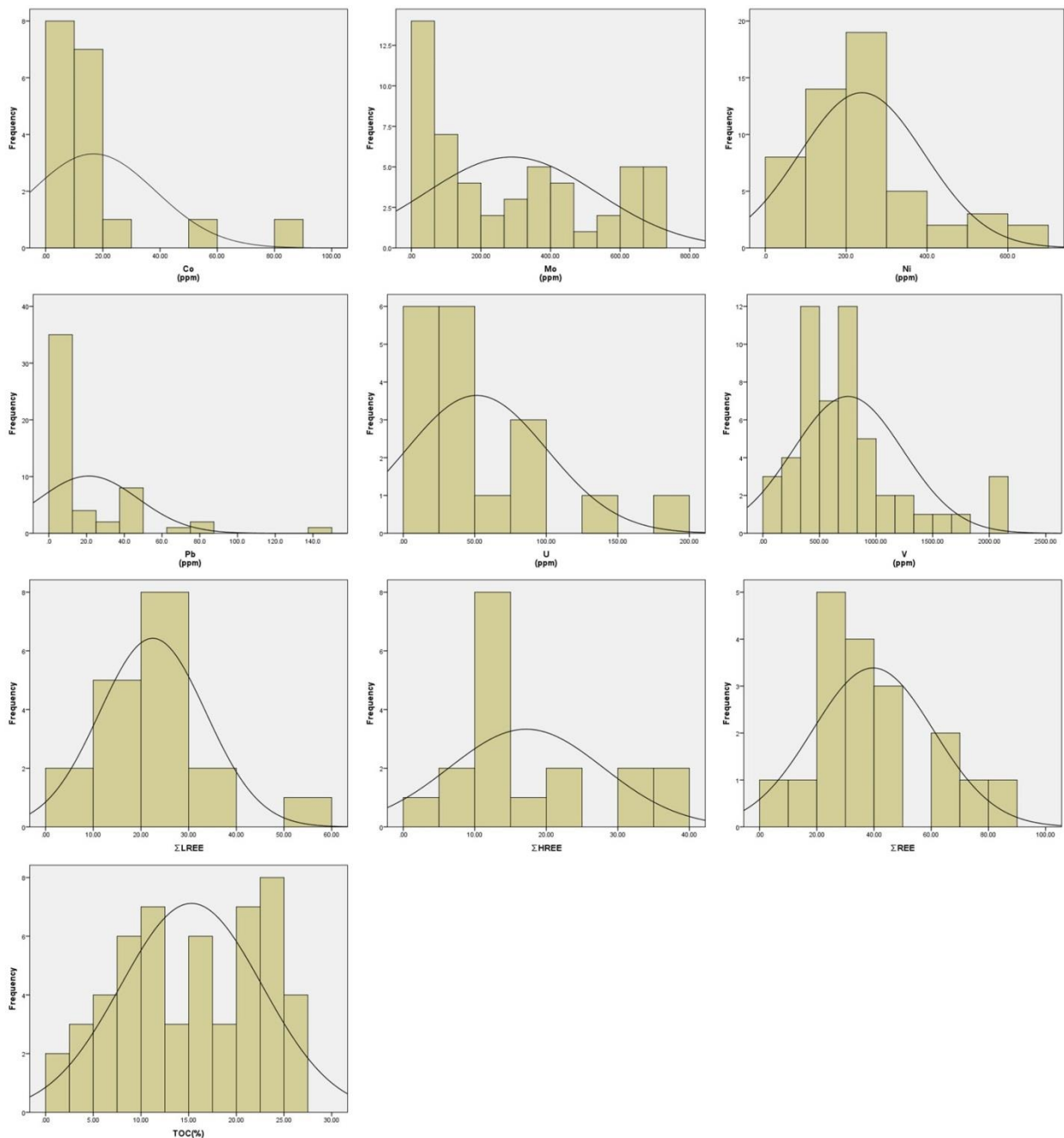
F: ثابت

D: توان مقیاس یا بعد فراکتالی توزیع غلظت عناصر است

[۴۶، ۵۳، ۵۴].

ماتریس چرخش یافته، ۶ فاکتور با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۶ برای جداسازی عناصر در فاکتورها معرفی شدند [۲۴].
 فاکتور اول (F1-1) شامل عناصر Cs, Cr, Cd, Al, Ag, V, Ti, Sb, Rb, Nb, Li, K, Ga, Ni, Mo, Fe, Cu, Co, As در برگیرنده (F2-1) فاکتور دوم (F3-1) شامل Hf, Pb, P, Sr, Tl, U و TOC فاکتور سوم

میزان اشتراک، تفسیر عوامل را ساده می‌سازد. برای این منظور در این مطالعه از روش دوران متعامد داده‌ها (Varimax) استفاده شد [۶۴، ۵۶، ۵۵، ۲۴]. در ابتدا با انجام اولین مرحله از تجزیه فاکتوری، عناصر بر اساس وابستگی‌های ژنتیکی متقابل بینشان طبقه‌بندی شدند که نتایج به همراه واریانس تحت پوشش هر فاکتور در جدول ۳ آورده شده است. بر این اساس مطابق با



شکل ۳: هیستوگرام توزیع فراوانی عناصر مورد بررسی

که مرحله نهایی محسوب می‌شود همه عناصر در ۵ فاکتور دسته‌بندی شدند و عناصر هدف در دو گروه F1-2 و F2-2 قرار گرفتند که جدول ۴ نشانگر نتایج و واریانس تحت پوشش این فاکتورها است. با توجه به جداول ۳ و ۴ مشخص است که انجام SFA علاوه بر کاهش تعداد فاکتورها، موجب افزایش واریانس کل، به ویژه در فاکتورهای در بردارنده عناصر هدف شده که این امر موید کارایی و تاثیر پردازش‌ها است.

Na و Zr فاکتور چهارم (F4-1) شامل Ba و Mg و فاکتور پنجم (F5-1) شامل Sn است و عناصر Ca، Mn، Th و Zn در هیچ یک از فاکتورها مشارکت نداشتند.

در ادامه برای افزایش دقت و حذف داده‌های نویز، با حذف عناصر Ca، Mn، Th و Zn از محاسبات بعدی، تجزیه فاکتوری مرحله‌ای برای تعیین آنومالی ژئوشیمیایی عناصر هدف انجام و تحلیل فاکتوری بر روی باقی عناصر اجرا شد. در این مرحله

جدول ۱: پارامترهای آماری داده‌های برداشت شده از شیل‌های نفتی قالیکوه

مقدار	سازند	Co (ppm)	V (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Ni (ppm)	Mo (ppm)	∑LREE (ppm)	∑HREE (ppm)	∑REE (ppm)	TOC (%)
بیشترین	سازند سرگلو	۱,۸۹	۲۴,۴۲	۵,۴۵	۲,۰۰	۱,۶۰	۷,۲۱	۵,۳۷	۳,۵۳	۸,۹۰	۱,۰۴
	سازند گرو	۳,۳۸	۲۸,۴۶	۵,۷۳	۴,۴۰	۱۱,۰۰	۷,۹۲	۵,۶۱	۵,۳۵	۱۰,۹۶	۳,۸۳
	جمع	۱,۸۹	۲۴,۴۲	۵,۴۵	۲,۰۰	۱,۶۰	۷,۲۱	۵,۳۸	۳,۵۳	۸,۹۱	۱,۰۴
کمترین	سازند سرگلو	۲۰,۳۳	۲۱۴۳	۷۵,۹۱	۷۱,۲۰	۶۶۹,۰۰	۷۲۴,۰۰	۵۱,۱۵	۳۶,۹۸	۸۸,۱۳	۲۷,۰۰
	سازند گرو	۸۶,۳۶	۱۷۴۰	۱۹۳,۹۱	۱۴۷,۰۰	۵۷۷,۰۰	۷۳۳,۰۰	۳۹,۲۰	۳۷,۶۳	۷۶,۸۳	۲۶,۴۲
	جمع	۸۶,۳۶	۲۱۴۳	۱۹۳,۹۱	۱۴۷,۰۰	۶۶۹,۰۰	۷۳۳,۰۰	۵۱,۱۵	۳۷,۶۳	۸۸,۱۳	۲۷,۰۰
میانگین	سازند سرگلو	۹,۵۰	۷۷۷,۵۵	۳۵,۱۱	۱۷,۲۷	۲۴۱,۱۸	۲۴۱,۲۸	۲۳,۸۲	۱۹,۰۷	۴۲,۹۰	۱۳,۲۷
	سازند گرو	۲۸,۰۷	۷۱۴,۸۵	۷۶,۶۸	۲۶,۴۹	۲۳۵,۵۶	۳۵۵,۱۹	۲۰,۳۳	۱۴,۲۲	۳۴,۵۵	۱۸,۱۳
	جمع	۱۶,۷۳	۷۵۱,۵۳	۵۱,۲۸	۲۱,۱۰	۲۳۸,۸۵	۲۸۷,۲۹	۲۲,۴۷	۱۷,۱۹	۳۹,۶۶	۱۵,۳۰
میان	جمع	۱۰,۹۷	۶۶۷	۳۴,۷۸	۷,۵۰	۲۱۷,۰۰	۲۳۷,۱۵	۲۲,۳۸	۱۲,۹۷	۳۷,۰۱	۱۶,۰۵
انحراف معیار	جمع	۲۱,۶۵	۴۸۶,۹۱	۴۹,۲۵	۲۶,۱۸	۱۵۴,۵۴	۲۴۶,۷۹	۱۱,۱۷	۱۰,۷۸	۲۱,۲۱	۷,۴۳
کشیدگی	جمع	۲,۵۷	۱,۲۹	۱,۶۷	۲,۷۷	۱,۰۶	۰,۴۹	۰,۸۲	۰,۹۳	۰,۸۶	-۰,۱۱

جدول ۲: ضرایب همبستگی بین ماده آلی و عناصر مورد بررسی

	Co	Mo	Ni	Pb	U	V	TOC	∑LREE	∑HREE
Co	۱,۰۰								
Mo	۰,۷۶	۱,۰۰							
Ni	۰,۴۴	۰,۷۶	۱,۰۰						
Pb	۰,۶۴	۰,۰۰	۰,۱۲	۱,۰۰					
U	۰,۸۰	۰,۸۷	۰,۶۴	۰,۵۵	۱,۰۰				
V	۰,۴۱	۰,۷۰	۰,۸۲	-۰,۱۶	۰,۶۲	۱,۰۰			
TOC	۰,۴۴	۰,۶۴	۰,۵۱	۰,۱۲	۰,۶۶	۰,۵۰	۱,۰۰		
∑LREE	۰,۰۸	۰,۳۷	۰,۷۰	۰,۱۶	۰,۲۷	۰,۶۹	۰,۰۸	۱,۰۰	
∑HREE	-۰,۲۴	۰,۰۹	۰,۵۵	۰,۱۱	-۰,۰۸	۰,۵۴	۰,۰۴	۰,۸۳	۱,۰۰

جدول ۳: ماتریس مولفه‌های چرخش یافته (موارد **Bold** شده نشانگر عناصر انتخاب شده بر اساس قدر مطلق حد آستانه ۰٫۶ است.) و واریانس تحت پوشش هر فاکتور در تجزیه فاکتوری مرحله اول

Rotated Component Matrix						
	Component					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
Ag	۰٫۹۱۰	-۰٫۱۳۳	-۰٫۱۴۱	-۰٫۰۴۱	-۰٫۱۴۳	-۰٫۱۶۱
Al	۰٫۷۰۲	۰٫۱۳۲	۰٫۴۲۷	۰٫۵۳۱	۰٫۰۰۵	-۰٫۰۹۱
As	۰٫۳۰۷	۰٫۸۴۱	۰٫۰۸۴	۰٫۳۱۰	-۰٫۰۵۴	۰٫۰۱۸
Ba	۰٫۰۴۴	۰٫۰۶۳	۰٫۰۲۳	۰٫۹۱۰	۰٫۰۵۴	۰٫۰۶۷
Ca	-۰٫۳۴۳	-۰٫۵۷۹	-۰٫۱۹۶	-۰٫۳۰۶	-۰٫۳۸۴	۰٫۲۵۱
Cd	۰٫۸۶۱	۰٫۰۳۳	۰٫۱۹۲	-۰٫۰۹۳	۰٫۱۵۰	۰٫۲۲۳
Co	-۰٫۱۰۲	۰٫۹۴۸	-۰٫۰۶۷	۰٫۰۰۲	-۰٫۱۶۱	۰٫۲۰۶
Cr	۰٫۹۳۳	۰٫۱۸۶	۰٫۰۵۲	۰٫۱۴۷	-۰٫۰۸۴	-۰٫۰۰۶
Cs	۰٫۷۵۱	-۰٫۰۱۸	۰٫۲۴۳	۰٫۵۷۳	-۰٫۱۲۰	-۰٫۰۳۲
Cu	۰٫۱۵۴	۰٫۹۶۹	۰٫۱۲۴	۰٫۰۰۷	۰٫۰۷۶	۰٫۰۴۸
Fe	۰٫۳۱۰	۰٫۷۵۹	۰٫۰۲۳	۰٫۳۸۶	-۰٫۰۴۵	۰٫۲۷۵
Ga	۰٫۸۰۸	۰٫۲۸۵	۰٫۳۵۳	۰٫۰۲۰	۰٫۱۱۶	۰٫۱۴۳
Hf	۰٫۳۲۴	۰٫۰۳۷	۰٫۸۸۵	۰٫۱۶۷	-۰٫۰۲۱	-۰٫۱۲۱
K	۰٫۶۷۸	-۰٫۰۰۴	۰٫۲۸۲	۰٫۵۹۳	۰٫۱۴۱	۰٫۰۰۰
Li	۰٫۵۷۶	۰٫۲۲۲	۰٫۵۳۶	۰٫۲۶۷	-۰٫۲۱۳	۰٫۱۳۸
Mg	۰٫۱۱۰	-۰٫۱۴۳	۰٫۱۱۸	۰٫۹۰۳	۰٫۰۴۶	۰٫۰۵۲
Mn	۰٫۰۸۵	۰٫۴۵۳	۰٫۰۹۳	۰٫۳۶۸	-۰٫۳۴۳	۰٫۴۶۴
Mo	۰٫۰۴۳	۰٫۸۵۰	۰٫۲۵۸	-۰٫۰۱۶	۰٫۲۱۲	-۰٫۲۵۳
Na	۰٫۱۵۹	-۰٫۰۳۷	۰٫۹۳۷	-۰٫۰۶۲	۰٫۲۰۰	۰٫۰۲۹
Nb	۰٫۷۷۶	۰٫۰۵۴	۰٫۴۵۲	۰٫۳۸۲	-۰٫۰۶۴	-۰٫۱۳۳
Ni	۰٫۶۵۵	۰٫۶۷۰	۰٫۲۵۲	۰٫۰۸۹	۰٫۰۸۵	-۰٫۰۲۶
P	-۰٫۱۶۳	۰٫۹۵۳	۰٫۰۷۸	-۰٫۱۲۹	۰٫۰۵۳	-۰٫۰۵۳
Pb	۰٫۰۷۰	۰٫۷۹۰	-۰٫۳۹۰	۰٫۱۷۳	۰٫۲۷۸	۰٫۱۰۹
Rb	۰٫۸۲۳	۰٫۰۱۲	۰٫۲۵۰	۰٫۴۶۹	۰٫۰۰۲	-۰٫۰۵۷
S	۰٫۵۵۸	۰٫۶۶۵	-۰٫۲۲۳	-۰٫۱۰۱	۰٫۰۵۹	-۰٫۳۱۰
Sb	۰٫۹۰۶	۰٫۰۰۹	۰٫۳۳۸	۰٫۱۳۹	-۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۹
Sn	-۰٫۰۳۶	۰٫۲۵۰	۰٫۱۲۰	۰٫۰۹۰	۰٫۷۵۵	-۰٫۰۵۶
Sr	-۰٫۱۸۸	۰٫۸۶۰	-۰٫۰۴۷	-۰٫۲۲۰	۰٫۲۴۰	-۰٫۰۳۱
Th	۰٫۵۱۸	۰٫۳۶۵	۰٫۵۴۶	۰٫۲۹۸	-۰٫۱۴۲	-۰٫۳۰۱
Ti	۰٫۷۸۱	-۰٫۰۰۹	۰٫۱۶۱	۰٫۵۸۹	-۰٫۰۳۴	-۰٫۰۱۱
Tl	۰٫۴۴۳	۰٫۷۸۸	۰٫۰۲۰	۰٫۰۹۶	-۰٫۲۶۶	-۰٫۰۲۹
U	-۰٫۰۷۵	۰٫۹۶۴	۰٫۱۲۲	-۰٫۱۴۷	۰٫۰۵۹	-۰٫۰۰۴
V	۰٫۸۲۲	۰٫۵۰۵	۰٫۱۵۶	۰٫۰۷۶	۰٫۰۸۶	-۰٫۱۱۶
Zn	۰٫۵۹۰	۰٫۳۰۹	-۰٫۱۹۰	-۰٫۰۹۲	۰٫۱۳۴	۰٫۳۷۴
Zr	۰٫۴۱۰	۰٫۱۲۳	۰٫۸۴۲	۰٫۲۶۳	۰٫۰۹۸	۰٫۱۰۸
TOC	۰٫۱۰۳	۰٫۶۵۵	۰٫۰۵۲	-۰٫۱۹۵	۰٫۱۷۲	-۰٫۰۶۱
∑LREE	۰٫۸۰۷	۰٫۰۷۴	۰٫۵۳۱	۰٫۱۲۴	-۰٫۰۰۹	-۰٫۰۲۳
∑HREE	۰٫۹۶۲	-۰٫۱۰۹	۰٫۱۲۸	-۰٫۰۱۴	-۰٫۰۲۱	-۰٫۰۳۸
Eigen-value	۱۷۰٫۱۹۳	۸۰٫۸۱۹	۳۰٫۰۵۸	۲۰٫۷۴۵	۱۰٫۵۰۸	۱۰٫۰۲۹
Variance (%)	۴۵٫۰/۲۴۵	۲۳٫۰/۲۰۸	۸٫۰/۴۸	۷٫۰/۲۲۵	۳٫۰/۹۶۸	۲٫۰/۷۰۸
Cumulative variance (%)	۴۵٫۰/۲۴۵	۶۸٫۰/۴۵۳	۷۶٫۰/۵۰۱	۸۳٫۰/۷۲۶	۸۷٫۰/۶۹۴	۹۰٫۰/۴۰۲

جدول ۴: ماتریس مولفه‌های چرخش یافته (موارد **Bold** شده نشانگر عناصر انتخاب شده بر اساس قدر مطلق حد آستانه ۰٫۶ است.) و واریانس تحت پوشش هر فاکتور در تجزیه فاکتوری مرحله دوم

Rotated Component Matrix					
	Component				
	۱	۲	۳	۴	۵
Ag	۰٫۹۱۳	-۰٫۱۴۳	-۰٫۱۹۹	-۰٫۱۱۹	۰٫۰۱۶
Al	۰٫۷۶۲	۰٫۱۱۸	۰٫۳۷۰	۰٫۴۷۲	۰٫۱۲۱
As	۰٫۳۱۷	۰٫۸۴۶	۰٫۰۶۵	۰٫۳۱۷	-۰٫۰۳۰
Ba	۰٫۰۷۶	۰٫۰۷۰	۰٫۰۲۸	۰٫۹۳۲	-۰٫۰۱۰
Cd	۰٫۸۳۰	۰٫۰۶۸	۰٫۱۸۱	-۰٫۰۷۷	-۰٫۰۸۳
Co	-۰٫۱۱۳	۰٫۹۵۶	-۰٫۰۷۱	۰٫۰۴۴	-۰٫۲۱۶
Cr	۰٫۹۴۴	۰٫۲۰۰	-۰٫۰۰۹	۰٫۱۰۵	-۰٫۰۸۴
Cs	۰٫۸۰۵	-۰٫۰۳۴	۰٫۱۸۰	۰٫۵۱۲	۰٫۰۰۴
Cu	۰٫۱۴۹	۰٫۹۷۲	۰٫۱۱۶	۰٫۰۱۶	۰٫۰۴۵
Fe	۰٫۳۱۹	۰٫۷۶۲	۰٫۰۰۱	۰٫۴۰۹	-۰٫۰۹۱
Ga	۰٫۸۰۸	۰٫۳۰۵	۰٫۳۲۲	۰٫۰۰۸	-۰٫۰۳۳
Hf	۰٫۳۸۳	۰٫۰۳۱	۰٫۸۵۷	۰٫۱۴۴	۰٫۰۷۳
K	۰٫۷۲۱	-۰٫۰۱۴	۰٫۲۴۳	۰٫۵۴۶	۰٫۱۷۰
Li	۰٫۶۲۳	۰٫۲۳۳	۰٫۴۸۷	۰٫۲۶۵	-۰٫۲۱۲
Mg	۰٫۱۵۲	-۰٫۱۳۵	۰٫۱۱۵	۰٫۹۲۱	۰٫۰۱۰
Mo	۰٫۰۵۹	۰٫۸۴۸	۰٫۲۴۹	-۰٫۰۲۹	۰٫۳۳۷
Na	۰٫۱۸۷	-۰٫۰۳۰	۰٫۹۵۱	-۰٫۰۴۸	۰٫۱۲۵
Nb	۰٫۸۳۳	۰٫۰۴۹	۰٫۳۹۳	۰٫۳۱۹	۰٫۰۳۶
Ni	۰٫۶۶۵	۰٫۶۷۸	۰٫۲۱۲	۰٫۰۶۵	۰٫۰۷۶
P	-۰٫۱۶۶	۰٫۹۴۴	۰٫۰۷۷	-۰٫۱۲۷	۰٫۰۹۶
Pb	۰٫۰۴۶	۰٫۷۷۲	-۰٫۴۰۱	۰٫۱۶۵	۰٫۲۵۷
Rb	۰٫۸۶۶	۰٫۰۰۲	۰٫۱۹۷	۰٫۴۰۷	۰٫۰۸۴
S	۰٫۵۴۷	۰٫۶۵۶	-۰٫۲۴۴	-۰٫۱۶۵	۰٫۲۲۲
Sb	۰٫۹۱۹	۰٫۰۲۴	۰٫۳۰۰	۰٫۱۱۵	-۰٫۰۴۹
Sn	-۰٫۰۳۴	۰٫۲۳۲	۰٫۱۱۵	۰٫۰۷۹	۰٫۷۷۵
Sr	-۰٫۲۲۸	۰٫۸۵۴	-۰٫۰۰۹	-۰٫۱۹۷	۰٫۲۲۶
Ti	۰٫۸۲۲	-۰٫۰۱۱	۰٫۱۱۱	۰٫۵۴۳	۰٫۰۱۴
Tl	۰٫۴۶۴	۰٫۷۹۸	-۰٫۰۳۴	۰٫۰۸۱	-۰٫۱۸۸
U	-۰٫۰۸۱	۰٫۹۷۲	۰٫۱۲۳	-۰٫۱۲۸	۰٫۰۴۰
V	۰٫۸۳۲	۰٫۵۰۶	۰٫۱۱۱	۰٫۰۲۵	۰٫۱۴۳
Zr	۰٫۴۵۲	۰٫۱۳۰	۰٫۸۳۰	۰٫۲۷۰	۰٫۰۳۳
TOC	۰٫۱۱۶	۰٫۶۳۸	۰٫۰۴۶	-۰٫۲۷۰	۰٫۴۴۹
∑LREE	۰٫۸۴۴	۰٫۰۷۶	۰٫۴۸۲	۰٫۰۷۶	۰٫۰۰۵
∑HREE	۰٫۹۶۵	-۰٫۱۰۳	۰٫۰۸۰	-۰٫۰۶۹	-۰٫۰۰۷
Eigen-value	۱۵۰٫۶۴۹	۸۰٫۶۲۳	۲۰٫۷۹۴	۲۰٫۵۷۷	۱۰٫۱۷۷
Variance (%)	۴۶٫۰۲۷	۲۵٫۰۳۶۲	۸٫۰۲۱۸	۷٫۰۵۸۰	۳٫۰۴۶۲
Cumulative variance (%)	۴۶٫۰۲۷	۷۱٫۰۶۳۹	۷۹٫۰۶۰۷	۸۷٫۰۱۸۷	۹۰٫۰۶۴۹

شکستگی‌ها بین قطعات خط مستقیم روی نمودار و مقدار متناظر عیار عنصر به عنوان آستانه برای جداسازی مقادیر ژئوشیمیایی از دیگر مولفه‌ها به کار گرفته شده است (جدول ۵ و شکل ۴).

برای بررسی همزمان پارامترهای مورد مطالعه، نمودار لگاریتمی C-N بر اساس داده‌های مربوط به امتیازهای فاکتوری F1-2 (در بردارنده عناصر هدف V، \sum LREE و \sum HREE) و F2-2 (در بردارنده عناصر هدف Mo، Co، Ni، Pb، U و TOC) به دست آمده از روش SFA نیز رسم (شکل ۵) و حدود آستانه‌ای آنومالی مربوط به آن‌ها محاسبه شد (جدول ۶).

۴-۴- بررسی و تحلیل آنومالی‌ها

از آنجایی که تهیه نقشه‌های ژئوشیمیایی یک ابزار مهم در اکتشاف عناصر است، در ادامه نقشه‌های هر یک از عناصر مورد بررسی و TOC ترسیم و حدود آستانه‌ای محاسبه شده به وسیله روش فرکتالی C-N به آن‌ها اعمال شد (شکل ۶). از بررسی محل آنومالی‌ها در شکل ۶ مشخص است که آنومالی Co با گسترش قابل توجه در مرکز و جنوب شرق به طور عمده مرتبط با سازند گرو (برش‌های گلزار دیناری و پیربادوش) و به صورت محدود در ارتباط با سازند سرگلو (برش پیت‌پیتی) است. آنومالی Mo با گسترش محدودتر در مرکز و شمال غرب مرتبط با سازندهای گرو (برش‌های دره‌نک، سم چال، پیربادوش و قلعه بادوش) و سرگلو (برش‌های پیت‌پیتی، پیربادوش، سم چال و قلعه بادوش) است. عنصر Pb به صورت محدود در مرکز و جنوب شرق آنومالی دارد که این آنومالی‌های مرتبط با سازند گرو (برش‌های پیربادوش و گلزار دیناری) هستند. آنومالی

در نهایت، امتیازهای فاکتوری برای این دو فاکتور منتخب (F1-2 و F2-2) محاسبه و به هر نمونه یک مقدار نسبت داده شد که معرف تمامی عناصر حاضر در فاکتور است که از آن می‌توان برای پردازش‌های بعدی و ترسیم یک نقشه واحد که نشانگر پتانسیل همه عناصر مورد مطالعه است (به جای ترسیم یک نقشه به ازای هر عنصر) استفاده کرد.

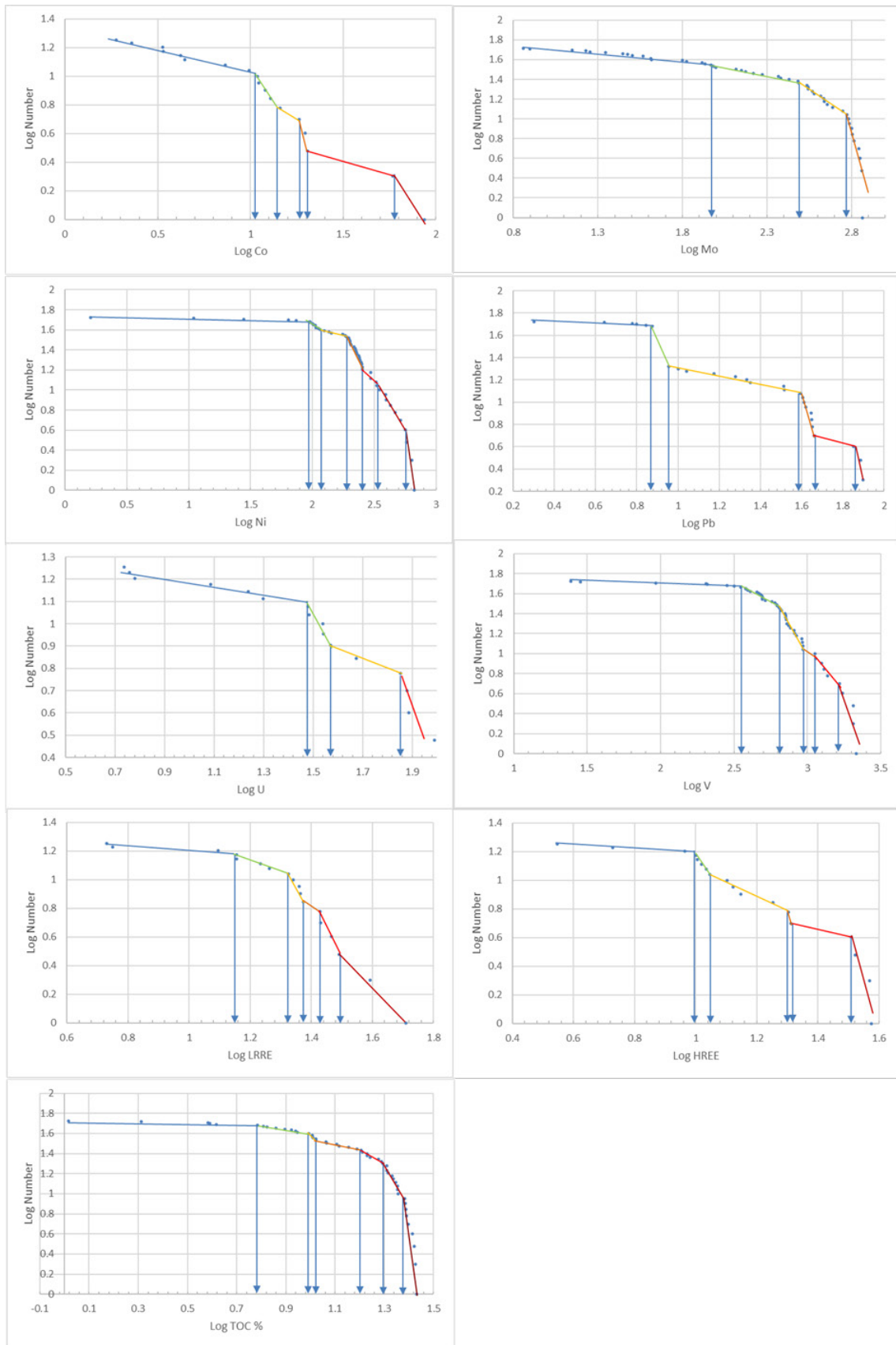
همان‌طور که از انجام تجزیه فاکتوری مرحله‌ای استنباط می‌شود، عناصر نادر خاکی سبک و سنگین در F1-1 قرار گرفته‌اند و همچنین حضور و همبستگی عناصری مانند Al، K، Ti و Ga در این فاکتور نشانگر این موضوع است که عناصر این گروه با هوازگی سنگ منشا و کانی‌های آلومینوسیلیکاتی و رسی در ارتباط‌اند و افزایش آن‌ها رابطه معکوس با مواد آلی دارد [۶۵]. حضور پارامتر TOC در F2-1 حاکی از این است که سایر متغیرهای این گروه به وسیله مواد آلی کنترل می‌شوند. همچنین عناصر V، Ni، Mg و Cu که در مولکول‌های ناهمسان نفتی دیده می‌شوند می‌توانند موید منشا فرایندهای زیستی برای این عناصر باشد. وجود فسفر نیز در این گروه می‌تواند در ارتباط با مواد آلی در جازا و یا تمرکز مواد آلی طی دیاژنز توجیه شود [۱۳]. همچنین Mo و U نشانگر رسوبات غنی از مواد آلی در شرایط احیایی‌اند و در این شرایط از طریق انتشار آب منفذی به رسوبات افزوده می‌شوند [۶۵].

۴-۳- مدل‌سازی فرکتالی عیار - تعداد (C-N)

محاسبه مقادیر آستانه آنومالی با دقت بالا و تفکیک جوامع عیاری برای ترسیم نقشه‌های پتانسیل معدنی بسیار حایز اهمیت است [۳۱، ۳۶، ۴۱، ۶۲-۵۷]. در این راستا نمودار لگاریتمی عیار- تعداد برای عناصر مورد نظر رسم شد و

جدول ۵: حدود آستانه‌ای برای عناصر Co، Mo، Ni، U، V، \sum LREE، \sum HREE و TOC بر اساس روش عیار- تعداد

	شدت کم	شدت متوسط	شدت بالا	شدت بسیار بالا	شدت فوق العاده بالا
Co	۱۰٫۵۹	۱۴٫۱۲	۱۷٫۷۸	۱۹٫۹۵	
Mo	۹۳٫۳۲	۳۱۶٫۲۲	۵۶۲٫۳۴		
Ni	۹۱٫۲۰	۱۱۷٫۴۸	۱۸۶٫۲۰	۲۵۱٫۱۸	۳۵۴٫۸۱
Pb	۷٫۲۴	۹٫۱۲	۳۸٫۹۰	۴۶٫۷	۷۲٫۴۴
U	۳۰٫۱۹	۳۷٫۱۵	۷۲٫۴۴		
V	۳۵۴٫۸۱	۶۳۰٫۹۵	۹۳۳٫۲۵	۱۱۲۲٫۰۱	۱۵۸۴٫۸۹
\sum LREE	۱۴٫۱۲	۲۰٫۸۹	۲۳٫۹۸	۲۶٫۹۱	۳۱٫۶۲
\sum HREE	۱۰	۱۱٫۲۲	۱۹٫۹۵	۲۰٫۸۹	۳۲٫۳۵
TOC	۶٫۰۲	۱۰٫۴۷	۱۵٫۸۴	۱۹٫۹۵	۲۳٫۹۸



شکل ۵: نمودار لگاریتمی عیار- تعداد F1-2 و F2-2

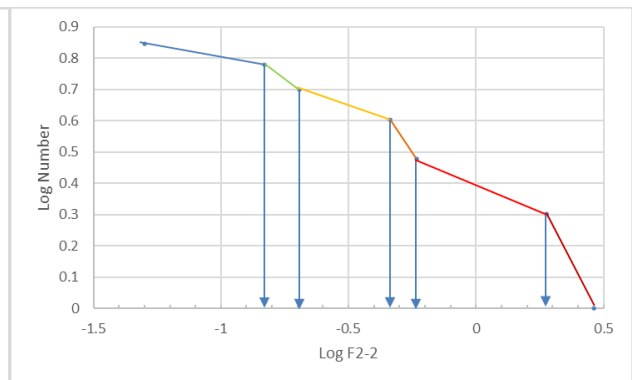
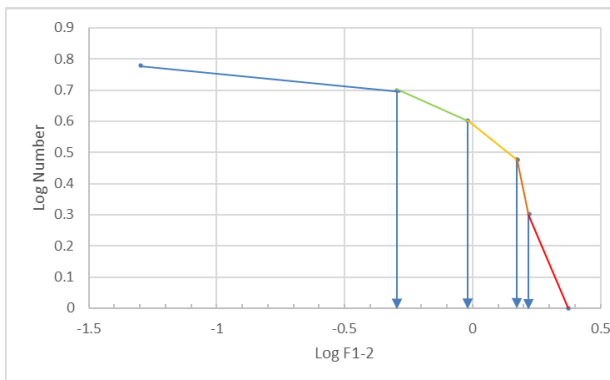
پیت پیتی) و با اختلاف اندک با سازند گرو (برش‌های سم چال، چاردرون، پیربادوش و دره‌نک) است.

در ادامه برای تفسیر جامع‌تر و کاربردی‌تر آنومالی‌ها و بررسی همزمان چندین متغیر ژئوشیمیایی، نقشه مربوط به امتیازهای فاکتوری به دست آمده از SFA نیز ترسیم شد (شکل ۷). از بررسی شکل ۷ مشاهده می‌شود که F1-2 در بخش شمال غرب

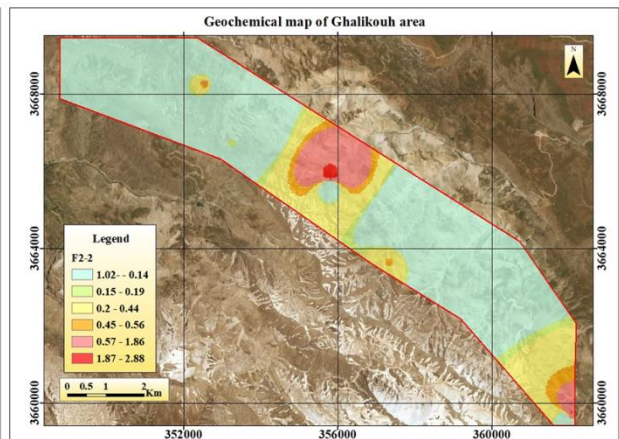
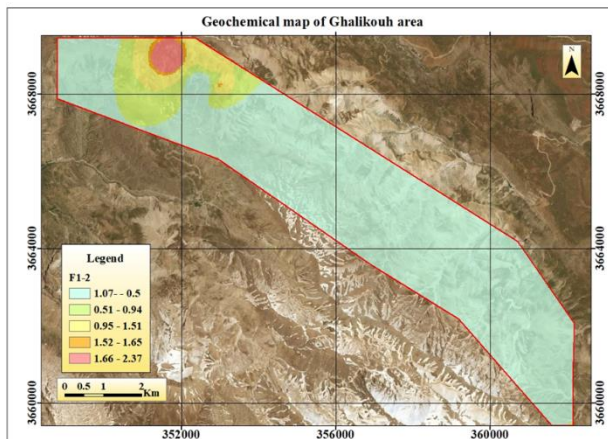
جدول ۶: حدود آستانه‌ای برای F1-2 و F2-1 بر اساس روش عیار-تعداد

	شدت کم	شدت متوسط	شدت بالا	شدت بسیار بالا	شدت فوق العاده بالا
F1-2	۰٫۵۰	۰٫۹۴	۱٫۵۱	۱٫۶۵	
F2-2	۰٫۱۴	۰٫۱۹	۰٫۴۴	۰٫۵۶	۱٫۸۶

عنصر Ni در شمال غرب و مرکز و در ارتباط با سازندهای گرو (برش‌های چاردرون و پیربادوش) و سازند سرگلو (برش‌های پیربادوش و سم چال) است. عنصر V در شمال غرب محدوده آنومالی دارد که این آنومالی به طور عمده مرتبط با سازند سرگلو (برش‌های پیربادوش و سم چال) و به طور محدود در ارتباط با سازند گرو (برش چاردرون) است. آنومالی عنصر U به طور عمده در مرکز محدوده قرار دارد و بیشترین ارتباط آن با سازند گرو (برش‌های پیربادوش، گلزار دیناری، سم چال و قلعه بادوش) و به صورت بسیار محدود با سازند سرگلو (برش پیت پیتی) است. آنومالی اصلی عناصر نادر خاکی سبک و سنگین در شمال غرب محدوده و در ارتباط با سازندهای گرو (برش چاردرون) و سرگلو (برش سم چال) بروز دارد. مواد آلی نیز در شمال غرب و مرکز آنومالی دارند که بیشترین ارتباط این آنومالی‌ها با سازند سرگلو (برش‌های دره‌نک، پیربادوش و



شکل ۶: نقشه آنومالی عناصر Co, Mo, Ni, Pb, U, V, ΣLREE, ΣHREE و TOC به دست آمده به وسیله مدل‌سازی فراکتالی C-N



شکل ۷: نقشه آنومالی F1-2 و F2-1 به دست آمده به وسیله مدل‌سازی فرکتالی C-N

میزان میانگین $TOC=13.27\%$ و سازند گرو با میانگین $TOC=18.13\%$ محتوای بالای از مواد آلی را نشان می‌دهند. مطالعات صحرایی و تجزیه نمونه‌ها در این منطقه مشخص کرد که علاوه بر وجود مقادیر قابل توجهی از مواد آلی، عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب نیز بعضاً میزان درخور توجهی دارند. بر این اساس عناصر Co, Mo, Ni, Pb و U به ترتیب با میانگین کلی عیار 16.73 ppm ، 287.29 ppm ، 238.85 ppm و 21.10 ppm و 51.28 ppm عمدتاً مرتبط با سازند گرو و عنصر V و عناصر نادر خاکی با میانگین کلی عیار 751.53 ppm و 39.66 ppm بیشتر در ارتباط با سازند سرگلو هستند. بررسی همبستگی میان مواد آلی و عناصر معدنی نشانگر وجود همبستگی قابل توجه بین Co, Mo, Ni, V و U و عدم ارتباط ژئوشیمیایی سایر عناصر با این مواد است.

ارزیابی داده‌ها به روش مدل فراکتالی عیار-تعداد و ترسیم نقشه‌های عنصری نشان داد که آنومالی‌های Co و Pb در مرکز و جنوب شرق و Mo به طور محدود در شمال غرب و مرکز، Ni در شمال غرب و مرکز، V به طور عمده در شمال غرب و U در مرکز، $\sum LREE$ و $\sum HREE$ در شمال غرب قرار دارند. همچنین آنومالی مواد آلی نیز در شمال غرب و مرکز تمرکز دارند. همه عناصر مورد بررسی (به جز عناصر نادر خاکی) نسبت به میانگین شیل‌های (PAAS) غنی‌شدگی دارند که این موضوع پتانسیل این شیل‌های نفتی را بیش از پیش حایز اهمیت می‌کند.

۶- سپاس‌گذاری

این پژوهش با حمایت مدیریت اکتشاف شرکت ملی

محدوده مورد مطالعه آنومالی دارد و $F2-2$ دارای آنومالی عمده در مرکز، تا حدی در جنوب شرق و به صورت جزئی در شمال غرب محدوده است. آنومالی $F1-2$ بیشتر مرتبط با سازند گرو (برش چاردرون) و بعد از آن مرتبط با سازند سرگلو (برش سم چال) است، اما آنومالی‌های $F2-2$ به طور عمده در ارتباط با سازند گرو (برش‌های پیربادوش و گلزار دیناری) هستند.

برای بررسی ضریب غنی‌شدگی^۵ عناصر از میانگین شیل‌های استرالیایی پس از آرکن^۶ استفاده شد [۶۳]. با بررسی EF مشخص شد که در سازند گرو به ترتیب عناصر $Mo > U > V > Ni > Pb > Co > \sum LREE > \sum HREE$ نشان می‌دهند، به صورتی که بیشترین غنی‌شدگی مربوط به Mo و کمترین مربوط به $\sum HREE$ است و در سازند سرگلو به ترتیب عناصر $Mo > U > V > Ni > Pb > Co > \sum LREE > \sum HREE$ غنی‌شدگی نشان می‌دهند، به صورتی که Mo بیشترین و $\sum HREE$ کمترین غنی‌شدگی را در این سازند دارند (جدول ۷). مقایسه حد آستانه آنومالی اصلی عناصر مورد بررسی موجود در شیل‌های نفتی منطقه قالیکوه (محاسبه شده توسط روش فرکتالی $C-N$) با میانگین عیار در $P.A.A.S$ ، نشانگر وضعیتی مشابه با هر یک از سازندهای گرو و سرگلو است و غنی‌شدگی قابل توجهی از عناصر Co, Mo, Ni, Pb, U, V را نشان می‌دهد که این موضوع مویدی بر پتانسیل عناصر فلزی شیل‌های این منطقه است.

۵- نتیجه‌گیری

شیل‌های نفتی در منطقه قالی کوه عمدتاً مرتبط با سازند سرگلو و گرو (ژوراسیک-کرتاسه) هستند. سازند سرگلو با

جدول ۷: ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد بررسی بر اساس میانگین عیار در شیل‌های (PAAS) [۶۵]

Element	میانگین در شیل (PAAS)	میانگین غلظت در شیل نفتی قالیکوه			ضریب غنی‌شدگی در شیل نفتی قالیکوه		
		سازند گرو	سازند سرگلو	حد آستانه آنومالی اصلی	سازند گرو	سازند سرگلو	حد آستانه آنومالی اصلی
Co	۱۹	۲۸,۰۷	۹,۵۰	۱۹,۹۵	۱,۴۷	۰,۵۰	۱,۰۵
Mo	۲,۶	۳۵۵,۱۹	۲۴۱,۲۸	۵۶۲,۳۴	۱۳۶,۶۱	۹۲,۸۰	۲۱۶,۲۸
Ni	۸۶,۷۹	۲۳۵,۵۶	۲۴۱,۱۸	۳۵۴,۸۱	۲,۷۱	۲,۷۷	۴,۰۸
Pb	۱۶,۹۴	۲۶,۴۹	۱۷,۲۷	۷۲,۴۴	۱,۵۶	۱,۰۱	۴,۲۷
U	۲,۴۳	۷۶,۶۸	۳۵,۱۱	۷۲,۴۴	۳۱,۵۵	۱۴,۴۴	۲۹,۸۱
V	۱۳۰	۷۱۴,۸۵	۷۷۷,۵۵	۱۹۹۵,۲۶	۵,۴۹	۵,۹۸	۱۵,۳۴
$\sum LREE$	۱۶۷,۷۹	۲۰,۳۳	۲۳,۸۲	۳۱,۶۲	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۱۸
$\sum HREE$	۴۳۸	۱۴,۲۲	۱۹,۰۷	۳۲,۳۵	۰,۰۳	۰,۰۴۳	۰,۰۷

- [10] Wang, D. M., Xu, Y. M., He, D. M., Guan, j., and Zhang, O. M. (2009). "Investigation of mineral composition of oil shale". *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4: 691-697.
- [11] Rasouli, A., Shekarifard, A., Jalali Farahani, F., Kök, M., Daryabandeh, M., and Rashidi, M. (2015). "Occurrence of highly organic matter-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikh locality, Zagros Basin, South-West of Iran: A possible oil shale resource". *International Journal of Coal Geology*, 143: 34-42
- [12] Shi, J., and Wang, C. (1998). "Fractal analysis of gold deposits in China: implication for giant deposit exploration". *Earth Sciences Journal of China University of Geosciences*, 23: 616-618. (In Chinese with English Abstract).
- [13] Smith, W. D. (1991). "Composition and depositional environment of major Eastern Canadian Oil shale". *International Journal of Coal Geology*, 19: 385-438
- [14] Niocexp. (2011). "Petroleum geochemistry of oil shales (Middle Jurassic-Lower Cretaceous) from West Iran". Project Report, pp. 700. (In Persian).
- [15] Fereidoni, M., Lotfi, M., Rashidnejad, N., and Rashidi, M. (2018). "Evaluate geochemical trace elements of Qalikh oil shale (Southwest Aligoodarz) using elemental analysis and rock eval pyrolysis". *Journal of Geosciences*. 98: 171-180. (In Persian).
- [16] Rasouli, A., Shekarifard, A., Jalali Farahani, F., Kök, M., Daryabandeh, M., and Rashidi, M. (2015). "Occurrence of highly organic matter-rich deposits (Middle Jurassic to Lower Cretaceous) from Qalikh locality, Zagros Basin, South-West of Iran: A possible oil shale resource". *International Journal of Coal Geology*, 143: 34-42
- [17] Fereidoni, M., Lotfi, M., Rashidnejad, N., and Rashidi, M. (2016). "Using geochemical studies to determine the correlation between trace elements and organic and inorganic parameters in Ghalikoo oil shale's". *Scientific Journal of Exploration & Production Oil & Gas*, 131: 55-64. (In Persian).
- [18] Agard, P., Omrani, J., Jolivel, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., and Wortel, R. (2011). "Zagros orogeny: a subduction-dominated process". *Geological Magazine*, 148(5-6): 692-725.
- [19] Falcon, N. L. (1974). "Southern Iran; Zagros mountains". In *Mesozoic-Cenozoic orogenic belts, Data for orogenic studies: Alpine-Himalayan Orogenes*, Geological Society of London, Special Publication, 4: 199-211.
- [20] Alavi, N. M. (1994). "Tectonic of the Zagros, orogenic belt of Iran, new data and interpretation". *Tectonophysics*, 299: 211-238.
- نفت ایران انجام شد. نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از مدیران و کارشناسان این مدیریت اعلام می نمایند.
- ## ۷- مراجع
- [1] Luik, H., Luik, L., Krasulina, J., and Riisalu, H. (2012). "Upgrading Estonian shale oil bituminous fractions". *Proceedings of the 32nd Oil Shale Symposium: The 32nd Oil Shale Symposium, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, October 15-19.*
- [2] Alfredson, P. G. (1985). "Review of oil shale research in Australia". In *Eighteenth Oil Shale Symposium Proceedings: Golden, Colorado School of Mines Press*, 162-175.
- [3] Altun, N. E. (2006). "Oil shales in the world and Turkey; reserves, current situation and future prospects: a review". *Oil Shale*, 23(3): 211-227.
- [4] Turcotte, D. L. (1996). "Fractals and Chaos in Geophysics, second ed". Cambridge University Press, Cambridge UK, 81-99.
- [5] Liu, W., Yao, J., Tong, J., Qiao, Y., and Chen, Y. (2018). "Organic matter accumulation on the Dalong Formation (Upper Permian) in western Hubei, South China: Constraints from multiple geochemical proxies and pyrite morphology". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 514: 677-689
- [6] Bai, Y., Lv, Q., Liu, Z., Sun, P., Xu, Y., Meng, J., Meng, Q., Xie, W., Wang, J., and Wang, K. (2020). "Major, trace and rare earth element geochemistry of coal and oil shale in the Yuqia area, Middle Jurassic Shimengou Formation, northern Qaidam Basin". *Oil Shale*, 37(1):1-31
- [7] Bai, F., Guo, W., Lü, X., Liu, Y., Guo, M., Li, Q. and Sun, Y. (2015). "Kinetic study on the pyrolysis behavior of Huadian oil shale via non-isothermal thermogravimetric data". *Fuel*, 146: 111-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.073>.
- [8] Wang, J., Zhou, L., Mi, J., Ma, C., Yang, H., Lei, H., Chen, J., and Ren, J. (2019). "Trace Elemental Geochemistry and Depositional Environment of Shale Oil Reservoir Rocks within the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag". *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 101-108.
- [9] Wang, Q. F., Deng, J., Wan, L., Zhao, J., Gong, Q. J., Yang, L. Q., Zhou, L., and Zhang, Z. J. (2008). "Multifractal analysis of the element distribution in skarn-type deposits in Shizishan Orefield in Tongling area, Anhui province, China". *Acta Geologica Sinica*, 82: 896-905.

- [33] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M. (2012). "Geochemical mineralization probability index (GMPI): A new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping". *Journal of Geochemical Exploration*, 115: 24-35.
- [34] Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M., and Sadeghi, M. (2016). "Recognition of significant multi-element geochemical signatures of porphyry Cu deposits in Noghdoz area, NW Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 165: 111-124.
- [35] Johnson, R. A., and Wichern, D. W. (2002). "Applied multivariate statistical analysis". Prentice hall Upper Saddle River, New Jersey, pp. 800.
- [36] Krumbein, W. C., and Graybill, F. A. (1965). "An introduction to statistical models in geology". McGraw-Hill, pp. 475.
- [37] Treiblmaier, H., and Filzmoser, P. (2010). "Exploratory factor analysis revisited: How robust methods support the detection of hidden multivariate data structures in IS research". *Information & Management*, 47(4): 197-207.
- [38] Zuo, R. (2011a). "Decomposing of mixed pattern of arsenic using fractal model in Gangdese belt, Tibet, China". *Applied Geochemistry*, 26: S271-S273.
- [39] Filzmoser, P., Hron, K., and Reimann, C. (2009). "Principal component analysis for compositional data with outliers". *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 20(6): 621-632.
- [40] Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zia Zarifi, A., Foster, P., and Yasrebi, A. B. (2016). "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis". *Journal of African Earth Sciences*, 119: 139-149.
- [41] Reimann, C., Filzmoser, P., and Garrett, R. G. (2002). "Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities". *Applied Geochemistry*, 17(3): 185-206.
- [42] Afzal, P., Yasrebi, A. B., Daneshvar Saein, L., and Panahi, S. (2017). "Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 181: 294-304.
- [43] Tripathi, V. S. (1979). "Factor analysis in geochemical exploration". *Journal of Geochemical Exploration*, 11(3): 263-275.
- [44] Shamseddin Meigooni, M., Lotfi, M., Afzal, P., Nezafati, N., and Kargar Razi, M. (2020). "Detection
- [21] Hawkes, H. E., and Webb, J. S. (1962). "Geochemistry in mineral exploration". New York: Harper & Row, pp. 415.
- [22] Hawkes, H. E., and Webb, J. S. (1979). "Geochemistry in mineral exploration". 2nd Edn. Academic Press, New York, pp. 657.
- [23] Yazdi, M. (2012). "Geological and geochemical features of Alborz Basin coal deposits". *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 23(2): 163-169.
- [24] Yazdi, M. (2002). "Conventional methods in geochemical explorations". Shahid Beheshti University, Tehran, pp. 197. (In Persian).
- [25] Kumru, M., and Bakac, M. (2003). "R-mode factor analysis applied to the distribution of elements in soils from the Aydin basin, Turkey". *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2-3): 81-91.
- [26] Ots, A. (2007-0212). "Estonian oil shale properties and utilization in power plants". *Energetika, Lithuanian Academy of Sciences Publishers*, 53(2): 8-18.
- [27] Van Helvoort, P.-J., Filzmoser, P., and van Gaans, P. F. (2005). "Sequential Factor Analysis as a new approach to multivariate analysis of heterogeneous geochemical datasets: An application to a bulk chemical characterization of fluvial deposits (Rhine-Meuse delta, The Netherlands)". *Applied Geochemistry*, 20(12): 2233-2251.
- [28] Sun, X., Deng, J., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., and Zhao, Z. (2009). "Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition". *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 6-16.
- [29] Stocklin, J. (1968). "Structural History and Tectonic of Iran: A Review". *American Association of Petroleum Geologists Bulletin, USA*, 52: 1229-1258.
- [30] Rezaei, S., Lotfi, M., Afzal, P., Jafari, M. R., and Meigoony, M. S. (2015). "Delineation of Cu prospects utilizing multifractal modeling and stepwise factor analysis in Noubaran 1: 100,000 sheet, Center of Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9): 7343-7357.
- [31] Shamseddin Meigoony, M., Afzal, P., Gholinejad, M., Yasrebi, A. B., and Sadeghi, B. (2014). "Delineation of geochemical anomalies using factor analysis and multifractal modeling based on stream sediments data in Sarajeh 1: 100,000 sheet, Central Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 7(12): 5333-5343.
- [32] Wilkinson, R. (2008). "Queensland oil shale project still in the wings". *Oil & Gas Journal, PennWell Corporation*, pp. 106.

- and Augmented Edition.
- [54] Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q., and Liu, H. (2010). "Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China". *Journal of Geochemical Exploration*, 105: 95-105.
- [55] Davis, John. C. (2002). "Statistics and data analysis in Geology". John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 638.
- [56] Kaiser, H. (1958). "The Varimax criteria for analytical rotation in factor analysis". *Psychometrika*, 23(3): 187-200.
- [57] Carranza, E. J. M., Zuo, R., and Cheng, Q. (2012). "Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data". *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 1-3.
- [58] Bai, J., Porwal, A., Hart, C., Ford, A., and Yu, L. (2010). "Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China". *Journal of Geochemical Exploration*, 104: 1-11.
- [59] Li, C. J., Ma, T. H., and Shi, J. F. (2003). "Application of a fractal method relating concentration and distances for separation of geochemical anomalies from background". *Journal of Geochemical Exploration*, 77: 167-175.
- [60] Afzal, P., Shahbeik, S., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Zuo, R., and Wetherelt, A. (2014). "The Effect of Estimation Methods on Multifractal Modeling for Mineralized Zone Delineation in the Dardevey Iron Ore Deposit, NE Iran". *Iranian Journal of Earth Sciences*, 6(1): 78-90.
- [61] Afzal, P., Zia Zarifi, A., Farhadi Khankandi, S., Wetherelt, A., and Yasrebi, B. A. (2012). "Separation of uranium anomalies based on geophysical airborne analysis by using Concentration-Area (CA) Fractal Model, Mahneshan 1: 50000 Sheet, NW IRAN". *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, 48(1): 1-11.
- [62] Cerny, B. A., and Kaiser, H. F. (1977). "A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices". *Multivariate Behavioral Research*, 12(1): 43-47.
- [63] Taylor, S. R., and McLennan, S. H. (1985). "The Continental Crust: Its Composition and Evolution". Blackwell. Oxford, pp. 312.
- [64] Finkelman, R. B. (1993). "The use of modes of occurrence information to predict the removal of the hazardous air pollutants prior to combustion". *Journal of Coal Quality*, 12(4): 132-134.
- of rare earth element anomalies in Esfordi phosphate deposit of Central Iran, using geostatistical-fractal simulation*". *Geopersia*. DOI: 10.22059/geope.2020.296123.648526.
- [45] Zuo, R. (2011b). "Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb-Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum-area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China)". *Journal of Geochemical Exploration*, 111(1-2): 13-22.
- [46] Hassanpour, S., and Afzal, P. (2013). "Application of concentration-number (C-N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3): 957-970.
- [47] Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M., and Albanese, S. (2003). "Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region". *Applied Geochemistry*, 18(12): 1853-1865.
- [48] Afzal, P., Aramesh Asl, R., Adib, A., and Yasrebi, A. B. (2015). "Application of fractal modelling for Cu mineralisation reconnaissance by ASTER multispectral and stream sediment data in Khoshname area, NW Iran". *Journal of the Indian Society of Remote Sensing-Springer*, 43: 121-132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-014-0384-6>.
- [49] Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., and Rashidnejad Omran, N. (2011). "Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling". *Journal of Geochemical Exploration*, 108: 220-232.
- [50] Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Esfandiari, B., and Fadakar Alghalandis, Y. (2010). "Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 104: 34-46.
- [51] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M. (2014). "Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14(1): 45-58.
- [52] Zuo, R., Cheng, Q., and Xia, Q. (2009). "Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration". *Journal of Geochemical Exploration*, 102: 37-43.
- [53] Mandelbrot, B. B. (1983). "The Fractal Geometry of Nature". W.H. Freeman, San Francisco, CA. Updated

[65] Gulbay, R. K. (2007). "Rhenium and Molybdenum in Tertiary Oil shale deposits in Norhwestern Anatolia, Turkey". Department of Geological Engineering Karadeniz Technical University. DOI: 10.3176/oil.2007.3.05.

-
- ¹ Principal component analysis (PCA)
 - ² Stepwise Factor Analysis (SFA)
 - ³ Concentration-number (C-N)
 - ⁴ Size-grade (S-G)
 - ⁵ Enrichment Factor (EF)
 - ⁶ Post Archean Australian Shale (P.A.A.S)