

Original Research Paper

The use of the Gray Wolf Optimizer algorithm in separating anomalies from the background, Case study: Alut area

Kamran Mostafaei^{1*}, Mohammadnabi Kianpour², and Mahyar Yousefi³¹ Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran² Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran³ Faculty of Engineering, University of Malayer, Malayer, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 June 11

Accepted: 2023 November 20

Available online: 2024 June 21

Keywords:

Optimization Algorithm

Gray Wolf

Anomaly Separation

Gold

Alut

ABSTRACT

This article is devoted to introducing a novel application of the Gray Wolf Optimizer (GWO) algorithm in one of the most challenging issues related to mineral exploration, anomaly separation from the background in stream sediment geochemical studies. The Alut geological sheet, located in the Sanandaj-Sirjan zone, which has special importance to gold prospecting, has been studied for the distribution of gold and arsenic that accompany each other as the paracenteses in such deposits. The cost function used in this algorithm has been provided according to previously well-explored deposits. While the GWO algorithm was able to divide the sheet into two classes of anomalous and non-anomalous areas, the fractal method identified four categories among distributions of gold and arsenic, which impose the responsibility of selecting anomalous areas on the scientists. The GWO draws the areas as potential zones of prospecting that may be neglected by fractal strategy. The derived results show that 24.8ppm and 15.7ppb is anomaly threshold for arsenic and gold distribution respectively. The comparison of the results shows that the anomaly threshold obtained by the fractal methods and GWO algorithm for arsenic is almost the same, but the anomaly threshold for gold in the GWO algorithm method is optimal.

1. Introduction

Mineral exploration is carried out by a combination of different methods and techniques. The choice of methods and techniques depends on the goal of the study and the conditions of the studied area such as geology, topography, mineralization type, etc.


(Mostafaei and Kianpour, 2022). Geochemical studies are the main steps in metal deposit exploration and stream sediments are one of the more important subsets of geochemical studies. Determination of anomaly values from the background has been challenging in the


* Corresponding author: Kamran Mostafaei; E-mail: k.mostafaei@uok.ac.ir

Citation:

Mostafaei, K., Kianpour, M. N., and Yousefi, M., 2024. The use of the Gray Wolf Optimizer algorithm in separating anomalies from the background, Case study: Alut area. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 34(2), 132, 75-88. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.401546.2094>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2023.401546.2094

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.2.5.1



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

geochemical investigation, especially in stream sediments (Hassani Pak, 2015). Classical statistical methods are used to separate the background from the anomaly, but these methods are for various reasons including not considering the spatial distribution of data, the condition of following the normal distribution, removing outlier data, have not having good results (Reimann *et al.*, 2017). To overcome the problems of classical statistical methods, different methods of spatial statistics are used (Hassani Pak and Sharafodin, 2011). For example, the following research can be mentioned:

Using of Power Spectral-Area Fractal Method in the copper-molybdenum deposit of Kahang (Afzal *et al.*, 2010), utilizing fractal modeling and staged factor analysis for Cr and Fe mineralization in Balvard, SE Iran (Afzal *et al.*, 2016), using PCA and U-spatial statistics model for Pb and Zn anomaly separation in the Arak 100000 sheet (Haji Ali Askari *et al.*, 2018), using statistical and fractal methods for shear zone detection in the Saqqez area (Seyedrahimi-Niaraq and Hekmatnejad, 2021), power spectrum–area fractal modeling of multi-element mineralization factor (Mahdyanfar and Seyedrahimi-Niaraq, 2022), application of geochemical structural methods including fractal and U-spatial statistical methods to determine lead-contaminated areas (Seyedrahimi-Niaraq *et al.*, 2023) separation of geophysical anomaly by fractal methods (Mostafaei and Ramazi, 2018), Using the hybrid factor-fractal model for threshold detection in the Basiran 100000 sheet, south Khorasan (Aryafar *et al.*, 2020). Also, neural network methods have been used for anomaly separation (Farhadi *et al.*, 2022; Chen and Shayilan, 2022; Luo *et al.*, 2023; Mostafaei *et al.*, 2023; Chen and Lu, 2023; Chen *et al.*, 2023).

The case study is Alut 100000 sheet that some researches were done for anomaly separation:

Using classical statistical methods and clustering (Mohammadpour *et al.*, 2012), using neural network and PCANN (Khezri *et al.*, 2013), Using fractal analysis (Rahimi *et al.*, 2016), Using Concentration-Area and Concentration- Number Methods (Hosseini *et al.*, 2017), using PCA and clustering (Ahmadi and Mohammadpour, 2018).

Collective intelligence algorithm with different features such as self-organization, parallel processing, and high flexibility has been used to solve problems in different areas and estimate different parameters, such as robot control, transportation, communication network, etc. (Parpinelli and Lopes, 2011; Leboucher *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013). Gray Wolf optimization algorithm is one of the collective intelligence optimization algorithms that is widely used in solving various problems, as an example of using this algorithm in geoelectrical data inversion (Li *et al.*, 2018), solving engineering design problems (Nadimi-Shahraki *et al.*, 2021), network and wireless (Otair *et al.*, 2022), feature selection (Almazini *et al.*, 2023), lidar signal noise reduction (Li *et al.*, 2023), and Mineral prospectivity mapping (Mostafaei *et al.*, 2023) can be mentioned.

In this study, we want to use the gray wolf algorithm (GWO) as an optimization algorithm for anomaly separation in the Alut 100000 sheet. For this purpose, gold and arsenic distribution maps have been prepared. In the following, based on the fractal methods the Au and As maps were prepared, and anomalies were identified. Then the GWO algorithm was used to separate the background from the anomaly values in the study area. The obtained results were compared and the efficiency of the GWO algorithm was investigated for separation in the stream sedimentary studies.

2. Research methodology

As mentioned in this research, we used the GWO algorithm for anomaly separation in the Alut 100000 sheet. The GWO algorithm is inspired by the social behavior of gray wolves in nature and their hunting method (Mirjalali *et al.*, 2014; Leboucher *et al.*, 2012). This meta-heuristic algorithm is based on collective intelligence and has three main stages: a) observing the prey, tracking and chasing the prey, b) approaching, surrounding the prey, and leading it astray until it stops moving, and c) attacking the prey.

Alut area is a part of the Sanandaj-Sirjan belt and is located between 45° to 46° 30' E longitudes and 36° to 36° 30' N latitudes (Fig.1). This region is very active in terms of tectonics. For this reason, there are many displacements and rifts with the northwest-southeast trend parallel to the fold of the Zagros belt (Omran and Khabaznia, 2003). One of the characteristics of this region is the existence of a large intrusive body, especially in the eastern part of this region, which according to the evidence occurred in the compressive-shear state. The type of these intrusive bodies varies from granite to granodiorite-gabbro with upper cretaceous age, it can be said that it has undergone some metamorphism. Granit is the oldest magmatic phase that penetrated the Precambrian metamorphic rocks (Eftkharnejad, 1972). The oldest metamorphic units of this region include schist, phyllite, slate, metariorite, and gneiss. The intensity of metamorphism in these units is considered moderate to low. The trend of the metamorphic rocks is similar to the Zagros thrust (northwest-southeast) with soft morphology. Cretaceous units including sedimentary-volcanic rocks have outcrops in this area. Among the Paleozoic and Cretaceous units, there are Permian limestone, but they do not have a significant origin and a specific stratigraphic order (Eftkharnejad, 1972; Ahmadi and Mohammadpour, 2018). There are also colored mélange complexes with Paleocene age in the southwest of this region (Hosseini *et al.*, 2017; Mohammadpour *et al.*, 2019).

There are two types of gold mineralization in this area: a) gold mineralization related to shear zones such as Zavakoh, Mirgenakhshineh, and Sheikh Chooan and b) gold mineralization related to gold-rich massive sulfides with a volcanic host rock for example Barika (Aliyari *et al.*, 2009 and 2012; Afzal *et al.*, 2013;

Mohammadpour *et al.*, 2019). In Figure 2, a geological map of the study area is presented.

The data were collected by the method of stream sediments and the sampling density was approximately 3 square kilometers for each sample in the Alut sheet (Fig. 3). Finally, 835 samples were collected in this area, considering that the distance between the samples was not more than 1km along the streams. The samples were analyzed by the AAS and ES methods for 20 elements and their results were obtained by geological survey and mineral exploration of Iran.

3. Results and Discussion

According to this research goal, the results of gold and arsenic were selected from the database. In the first, the distribution map of gold and arsenic was prepared by the IDW method and presented in Figure 4. In the following for anomaly separation, the fractal methods were used. For this purpose, the results of applying the fractal method (Hosseini *et al.*, 2017) have been used. Based on the obtained results, the gold and arsenic data were divided into four groups which are shown in Figure 5. Designating a group as an anomaly may depend on individual manner. Therefore, it is not possible to accurately comment on the separation of anomalies. Based on this, the need to apply a method to accurately separate the anomaly from the background is felt, and on this basis, optimization algorithms were used.

3.1. GWO algorithm results

To use the GWO algorithm, first, the location of 8 known indexes was placed on the gold and arsenic distribution map, and their values were measured. In designing the gray wolf algorithm, 50 gray wolf and 100 iterations were used. For this purpose, the following function was used.

$f(x) = \sum_{i=1}^n |x - x_i|$, where, x = optimal value, x_i = metal value in indexes location, n = number of known indexes.

In fact, the optimal point is obtained where the value of the

mentioned function is the lowest. Figure 6 shows the process of the implemented algorithm for the distribution of gold and arsenic values.

Based on the function results, the optimal limit for gold is 4ppb, in other words, areas with a value higher than 15.76 ppb should be considered anomalous areas for gold. For arsenic, the optimal limit is 24.86 ppm. Anomalous areas for each element of gold and arsenic are shown in Figure 7.

4. Conclusion

This study was conducted in order to investigate the use of a collective intelligence algorithm to separate background anomaly values in the stream sediment method of exploratory geochemical studies. For this purpose, the data from the Alut 100000 sheet were used, and the results of the gold and arsenic analyses were selected for this investigation.

After preparing the distribution map of the gold and arsenic elements, the fractal methods were used to separate anomaly values from the background. Based on the obtained results, gold and arsenic data were divided into four groups.

Next, the gray wolf algorithm was used for anomaly separation, based on the results of the algorithm, values greater than 15.7 ppb were chosen as the anomaly area for gold, and 24.8 ppm was chosen for arsenic.

By using this algorithm (GWO), the area is divided into 2 parts, and anomalous areas are completely determined without the intervention of an expert. Nevertheless, we should select a group or groups as an anomaly in fractal methods.

The anomalies identified map based on the GWO algorithm was combined with the geological map and presented in Figure 8. Then, the anomaly locations were compared with the host rocks and fault's locations, and the relationship between them was observed.

The anomaly threshold in the gray wolf algorithm and fractal results for arsenic are almost the same. For gold separation, results were different, gray wolf algorithm has an optimal result.

استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری در جدایش مقادیر بی‌هنجاری از زمینه، مطالعه موردی: آلودگی

کامران مصطفائی^{۱*}، محمد نبی کیانپور^۲ و مهیار یوسفی^۳^۱ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران^۲ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران^۳ دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده

در این پژوهش به بررسی امکان جدایش مقدار زمینه از بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری پرداخته شده است. بدین منظور داده‌های برداشت رسوبات آبراه‌ای برکه یکصد هزار زمین‌شناسی آلودگی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. با توجه به پتانسیل بالای این محدوده برای کانی‌سازی طلا، الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری بر روی نقشه توزیع عناصر طلا و آرسنیک که غالباً به صورت پارازنز در کانسارهای طلا مشاهده می‌شوند، اعمال گردید. مقایسه نتایج به دست آمده با روش فرکتال که توسط دیگر پژوهشگران در این محدوده انجام گردیده است، نشان می‌دهد که بر خلاف روش فرکتال که گاه به معرفی چندین کلاس یا دسته می‌انجامد، الگوریتم گرگ خاکستری توانسته محدوده را تنها به ۲ رده زمینه و بی‌هنجاری تقسیم نماید. با استفاده از این الگوریتم تعیین بی‌هنجاری به نظر کارشناس بستگی ندارد. نتایج نشان می‌دهند که ۲۴/۸ ppm حد آستانه بی‌هنجاری توزیع آرسنیک و ۱۵/۷ ppb حد آستانه بی‌هنجاری مربوط به طلا می‌باشد. به دلیل ماهیت این روش که توزیع فضایی مقادیر مربوطه را در نظر می‌گیرد، نسبت به روش‌های آمار کلاسیک از صحت و دقت بالایی برخوردار است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

الگوریتم بهینه‌سازی

گرگ خاکستری

جدایش بی‌هنجاری

طلا

آلودگی

۱- پیش‌نوشتار

مطالعات اکتشاف مواد معدنی ترکیبی از روش‌های مختلف می‌باشد که در فازها و مراحل مختلف انجام می‌شود. انتخاب روش‌ها و تکنیک‌ها بستگی به هدف مطالعه و شرایط محل مورد مطالعه از جمله وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی، فاز مطالعه، شرایط کانی‌سازی و غیره دارد (Mostafaei and Kianpour, 2022). مطالعات زمین‌شیمیایی یکی از مهم‌ترین مراحل اکتشاف کانسارهای فلزی می‌باشد. یکی از زیر مجموعه‌های مهم کاربردی در مطالعات زمین‌شیمی اکتشافی، روش زمین‌شیمیایی رسوبات آبراه‌ای است که در اکتشافات ناحیه‌ای برای تعیین پتانسیل‌ها و نواحی امیدبخش به منظور شناسایی کانسارهای فلزی اهمیت فراوانی دارد. یکی از مسائل و چالش‌های اصلی در مطالعات زمین‌شیمیایی رسوبات آبراه‌ای تعیین مناطق بی‌هنجاری می‌باشد بنابراین، تعیین مقدار زمینه و حد بی‌هنجاری همواره چالش‌برانگیز بوده است (حسنی پاک، ۱۳۹۴؛ Mohammadi et al., 2016). بنابراین، تعیین روش جدایش زمینه از بی‌هنجاری اهمیت زیادی در ادامه مطالعات دارد. برای

این منظور، بایستی ویژگی‌های مختلف داده‌های زمین‌شیمیایی شامل پارامترهای آماری و تغییرپذیری مکانی آنها باید در نظر گرفته شود. از روش‌های آمار کلاسیک جهت جدایش زمینه از بی‌هنجاری استفاده می‌شود اما این روش‌ها به دلایل مختلف از جمله: در نظر نگرفتن توزیع فضایی داده‌ها، شرط پیروی از توزیع نرمال، حذف داده‌های خارج از ردیف و عدم توجه به شکل هندسی بی‌هنجاری‌ها، در بسیاری از موارد کارایی مناسبی ندارد (Reimann et al., 2017).

جهت برطرف کردن نقص روش‌های آمار کلاسیک، از روش‌های مختلف آمار فضایی استفاده می‌شود (حسنی پاک و شرف الدین، ۱۳۹۱). روش‌های مختلفی جهت تعیین مناطق بی‌هنجاری از زمینه توسعه داده شدند (Cheng and Li, 2002). Chen et al., 2014). پژوهش‌های مختلفی در ایران در این زمینه انجام شده است که در ادامه به چند نمونه اشاره می‌شود: افضل و همکاران (۱۳۸۸) از روش طیف توان-مساحت، برای جدایش

* نویسنده مسئول: کامران مصطفائی؛ E-mail: k.mostafaei@uok.ac.ir

ماخذنگاری:

مصطفائی، ک.، کیانپور، م. ن.، یوسفی، م.، ۱۴۰۳، استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری در جدایش مقادیر بی‌هنجاری از زمینه، مطالعه موردی: آلودگی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۲)، ۷۵-۸۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.401546.2094>

doi: 10.22071/gsj.2023.401546.2094

doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.2.5.1

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

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

مولفه‌های اصلی و آنالیز خوشه‌ای جهت تعیین مناطق بی‌هنجاری و مستعد کانی‌سازی طلا استفاده نموده‌اند.

استفاده از الگوریتم‌های مختلف فرابکارایی در حال گسترش می‌باشد. این الگوریتم‌ها به‌طور عمده ریشه در استراتژی‌هایی دارند که موجودات زنده برای برآورده کردن نیازهای خود مانند شکار، لانه‌سازی و غیره استفاده می‌کنند. این الگوریتم‌ها برای حل مسائل پیچیده با ارائه راه حل‌های سریع و منطقی استفاده می‌شوند (Derrac *et al.*, 2011; Cui and GAO, 2012). الگوریتم هوش جمعی با ویژگی‌های مختلف از جمله خودسازماندهی، پردازش موازی، انعطاف‌پذیری زیاد برای حل مسائل در حوزه‌های مختلف و تخمین پارامترهای مختلف، مانند حوزه کنترل ربات، حمل و نقل، شبکه‌های ارتباطی و غیره استفاده شده است (Parpinelli and Lopes, 2011; Mostafaei *et al.*, 2023b). الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimizer) یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوش جمعی است که به‌طور گسترده در حل مسائل مختلف استفاده می‌شود به عنوان نمونه استفاده از این الگوریتم در مدل‌سازی وارون داده‌های ژئوالکترونیک (Li *et al.*, 2018)، حل مسائل طراحی مهندسی (Nadimi-Shahraki *et al.*, 2021)، حل مشکلات اینترنت و سنسورهای شبکه بی‌سیم (Otair *et al.*, 2022)، مطالعات مربوط به نیروگاه‌های خورشیدی و مشکلات آن (Ahmed *et al.*, 2023)، انتخاب ویژگی و پارامترهای مختلف در طبقه‌بندی داده‌ها (Almazini *et al.*, 2023)، افزایش سطح سیگنال به نویز در تصحیحات مختلف مربوط به مطالعات دورسنجی (Li *et al.*, 2023)، مطالعات مدل‌سازی پتانسیل‌های معدنی (Mostafaei *et al.*, 2023b) را می‌توان نام برد.

همان‌گونه که اشاره شد، یکی از چالش‌های اصلی مطالعات زمین‌شیمیایی تفکیک زمینه از بی‌هنجاری می‌باشد. بدین منظور به بررسی داده‌های زمین‌شیمی رسوبات آبراهه‌های برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ آلودت پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا نقشه‌های توزیع طلا و آرسنیک تهیه شده است. در ادامه، براساس روش‌های فرکتال نقشه‌های گروه‌بندی عیار طلا و آرسنیک تهیه شده و بر این اساس، بی‌هنجاری‌ها شناسایی شده‌اند. در ادامه، از الگوریتم گرگ خاکستری جهت جدایش زمینه از بی‌هنجاری و تعیین مناطق بی‌هنجاری طلا و آرسنیک در برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ آلودت استفاده شده است. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، بررسی کارایی الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی در جدایش بی‌هنجاری از زمینه داده‌های زمین‌شیمیایی رسوبات آبراهه‌ای بوده و نتایج روش فرکتال و الگوریتم گرگ خاکستری نیز مقایسه شده است.

محدوده مورد مطالعه در شمال باختر ایران و در حفاصل شهرستان‌های بانه و سقر (استان کردستان) و شهرستان سردشت (استان آذربایجان غربی) قرار دارد (شکل ۱). این محدوده بین طول جغرافیایی ۳۰° ۴۵' تا ۴۶° ۴۵' و عرض ۳۶° ۳۰' تا ۳۶° ۳۰' شمالی قرار گرفته است.

از نظر تقسیم‌بندی ساختاری انجام شده توسط اشتوکلین (Stocklin, 1968 in Sepahi *et al.*, 2020) این محدوده در شمال باختری پهنه سنج-سیرجان قرار دارد. این پهنه با ۱۵۰۰ کیلومتر طول و حدود ۲۰۰ کیلومتر عرض از شمال باختری دریاچه ارومیه شروع شده و تا گسل میناب ادامه دارد و جزو پهنه‌های با پتانسیل بالا در زمینه کانی‌سازی‌های مختلف از جمله کانی‌سازی‌های طلا می‌باشد (درویش زاده، ۱۳۹۴؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۸۴). منطقه از لحاظ زمین‌ساختی بسیار فعال بوده و به همین دلیل، جابه‌جایی‌ها و راندگی‌های فراوانی با روند شمال باختری-جنوب خاوری و به موازات کمربند چین خورده زاگرس دیده می‌شود (عمرانی و خبازنیا، ۱۳۸۲). از ویژگی‌های این منطقه، جایگیری توده‌های نفوذی بزرگ است، به‌ویژه در بخش خاوری منطقه که باتوجه به شواهد در رژیم فشاری-برشی رخ داده است (افتخارنژاد، ۱۳۵۲؛ احمدی و محمدپور، ۱۳۹۷). ترکیب این توده‌ها از گرانیت تا گرانودیوریت-گابرو با سن کرتاسه بالایی متفاوت است و تاحدی دگرگونی‌هایی را تحمل کرده است براین اساس، تکه‌های میلیونیت قابل تشخیص هستند. واحدهای

بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی از زمینه در کانسار مس-مولیبدن پورفیری کهننگ در استان اصفهان، استفاده کرده‌اند. کنعانیان و همکاران (۱۳۹۷) از روش‌های مختلف آمار کلاسیک و فرکتال شامل عیار مساحت و شاخص سینگولاریتی جهت جدایش زمینه از بی‌هنجاری پتانسیل‌های سرب و روی در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ اراک استفاده کرده‌اند. (آریافر و همکاران، ۱۳۹۹) از مدل ترکیبی فاکتوری-فرکتالی جهت شناسایی بی‌هنجاری‌ها و تعیین مقدار زمینه در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ بصیران، خراسان جنوبی استفاده کرده‌اند. در این مطالعه با استفاده از روش‌های گفته شده، مناطق بی‌هنجاری آرسنیک، آنتیموان و طلا را مشخص نموده‌اند. افضل و همکاران (Afzal *et al.*, 2016) از روش‌های فرکتالی جهت شناسایی بی‌هنجاری‌های ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ بکلورد استفاده کرده‌اند و براین اساس، بی‌هنجاری‌ها و پتانسیل‌های موجود را مشخص کردند. سیدرحیمی‌نیارق و حکمت‌نژاد (Seydrahimi-Niaq and Hekmatnejad, 2021) از روش‌های آماری و فرکتال در شناسایی پهنه‌های بُرشی (Shear zone) در منطقه طلادار سقر در شمال باختر ایران استفاده نمودند. مهدیان‌فر و سیدرحیمی‌نیارق (Mahdyanfar and Seydrahimi-Niaq, 2022) از روش‌های فرکتال طیف توان جهت شناسایی بی‌هنجاری‌های چند عنصری همراه طلا در محدوده سقر استفاده کردند. سیدرحیمی‌نیارق و همکاران (۱۴۰۲) از ترکیب روش‌های فرکتال و آماره U جهت شناسایی مناطق آلوده به سرب در منطقه ایرانکوه استان اصفهان استفاده نمودند. روش‌های فرکتال افزون بر داده‌های زمین‌شیمیایی در تفکیک داده‌های زمین‌فیزیکی (ژئوفیزیکی) هم مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mostafaei and Ramazi, 2018, 2019).

از روش‌های هوش مصنوعی نیز در تفکیک بی‌هنجاری از زمینه استفاده می‌شود که می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود:

استفاده از ترکیب الگوریتم‌های یادگیری ماشین و فرکتال در جدایش بی‌هنجاری‌های سرب و روی (Farhadi *et al.*, 2022)، تعیین بی‌هنجاری‌های طلا با استفاده از الگوریتم‌های مختلف یادگیری و مقایسه با روش‌های آماری (Chen and Shayilan, 2022)، به کاربردن الگوریتم‌های Ad-Hoc و Post-Hoc جهت تفکیک بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی و تعیین مناطق کانی‌زایی (Luo *et al.*, 2023)، استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و نیمه‌نظارت‌شده جهت تعیین بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی و مقایسه نتایج به‌دست آمده با روش نزدیک‌ترین همسایگی (Chen and Lu, 2023)، پیش‌بینی عیار طلا با استفاده از روش‌های بردار ماشین پشتیبان در کانسار دالی (Mostafaei *et al.*, 2023a)، شناخت الگوهای زمین‌شیمیایی مرتبط با کانی‌سازی و تهیه نقشه‌های زمین‌شیمیایی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری نظارت نشده (Chen *et al.*, 2023).

منطقه مورد بررسی در این مطالعه برگه صدهزار آلودت می‌باشد، چندین مطالعه در زمینه جدایش زمینه از بی‌هنجاری انجام شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود:

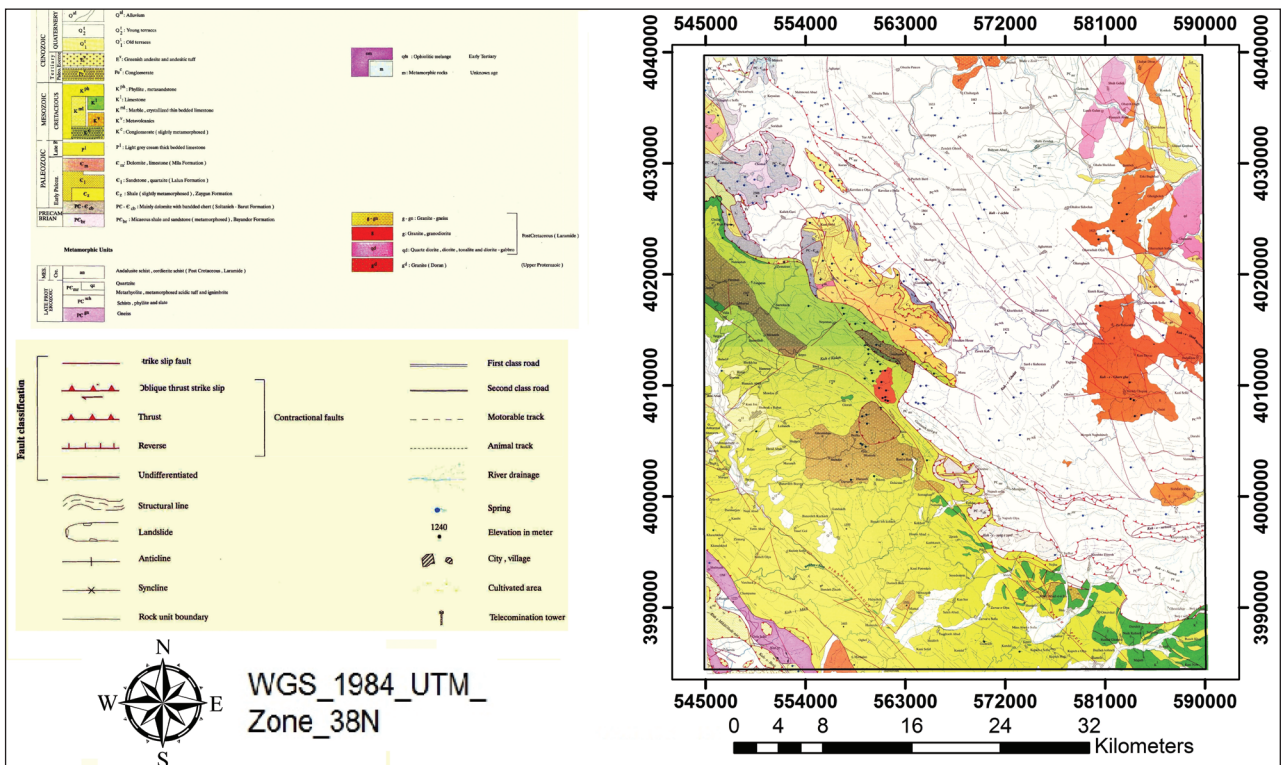
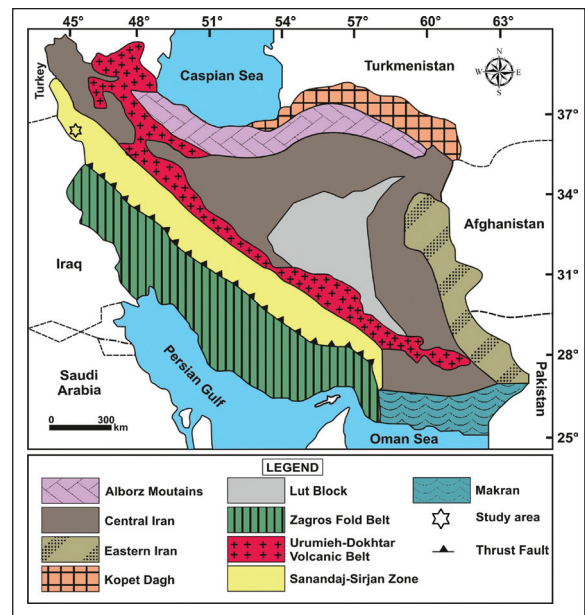
محمدپور و همکاران (۱۳۹۱) از روش‌های آمار کلاسیک و آنالیز خوشه‌ای جهت تفکیک جوامع زمینه از بی‌هنجاری استفاده و در پایان مناطق مستعد کانی‌سازی طلا را مشخص نموده‌اند. خضری و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و PCANN به جدایش زمینه از بی‌هنجاری در منطقه آلودت پرداخته‌اند. در این مطالعه، با ترکیب روش‌های مختلف توزیع طلا در منطقه به ۵ گروه تقسیم شده است. رحیمی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای از روش‌های تحلیل فاکتوری جهت شناسایی مناطق مستعد طلا در این منطقه استفاده کرده‌اند و بر این اساس، مناطق امیدبخش را شناسایی نموده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، از روش‌های فرکتالی عیار-مساحت و عیار تعداد جهت جدایش بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی استفاده شده است، براساس مطالعات انجام شده، مناطق امیدبخش آرسنیک، آنتیموان، طلا و مس در این ورقه مشخص شده‌اند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین در ادامه مطالعات انجام شده، احمدی و محمدپور (۱۳۹۷) از روش‌های آماری چند متغیره شامل تحلیل

و نظم چینه‌شناسی خاصی ندارند (افتخار نژاد، ۱۳۵۲، احمدی و محمدپور، ۱۳۹۷). همچنین مجموعه ملانژ رنگین با سن پالئوسن در جنوب باختری منطقه یک کافت قاره‌ای پدیدار شده‌اند (Mohammadpour *et al.*, 2019، حسینی و همکاران، ۱۳۹۶). کانی‌زایی در این محدوده عمدتاً دو نوع می‌باشد: الف) کانی‌زایی طلا مربوط به پهنه‌های بُرشی مانند کانی‌زایی‌های محدوده زاوه کوه، میرگه نقشیه، شیخ چوپان. ب) کانی‌زایی طلا مربوط به سولفیدهای توده‌ای غنی از طلا با میزان آتشفشانی مانند محدوده کانی‌زایی باریکا (Aliyari *et al.*, 2009 and 2012; Afzal *et al.*, 2013; Mohammadpour *et al.*, 2019). در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه آورده شده است.

ماسه‌سنگی در منطقه دارای ریخت‌شناسی خشن هستند و معمولاً در ارتفاعات بالا توسعه پیدا کرده‌اند. در این محدوده، گرانت قدیمی‌ترین فاز ماگمایی است که به سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین نفوذ کرده است (افتخارنژاد، ۱۳۵۲؛ احمدی و محمدپور، ۱۳۹۷). قدیمی‌ترین واحدهای دگرگونی منطقه شامل شیست، فیلیت، اسلیت، متاریولیت و گنایس می‌باشند. شدت دگرگونی در این واحدها متوسط به پایین در نظر گرفته شده است. روند سنگ‌های دگرگونی شبیه راندگی زاگرس (شمال باختری-جنوب خاوری) با ریخت‌شناسی نرم می‌باشد. واحدهای کرتاسه شامل سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی در این منطقه رخنمون‌هایی دارند. در میان واحدهای پالئوزویک و کرتاسه، آهک‌های پرمین وجود دارند، اما مششاً قابل ملاحظه

شکل ۱- نقشه پهنه‌های ساختاری ایران (Stocklin, 1968 in Sepahi *et al.*, 2020) و موقعیت محدوده مورد مطالعه.

Figure 1. Structural map of Iran (Stocklin, 1968 in Sepahi *et al.*, 2020) and study area position.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه براساس نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ آلتوت تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (عمرانی و خبازنیا، ۱۳۸۲).

Figure 2. Geological map of Alut 1:100000, prepared by Geological Survey of Iran (Omran and Khabaznia, 2003).

۲- روش پژوهش

همان‌گونه که اشاره شد، در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری جهت جدایش زمینه از بی‌هنجاری استفاده شده است، در این بخش مختصری از این روش ارائه می‌شود.

در الگوریتم گرگ خاکستری از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در طبیعت و شیوه شکار آنها الهام گرفته شده است، این الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی بوده و دارای سه مرحله اصلی است (Mirjalali et al., 2014; Leboucher et al., 2012):

الف) مشاهده شکار، ردیابی و تعقیب شکار، ب) نزدیک شدن، احاطه نمودن شکار و گمراه نمودن آن تا زمانی که از حرکت باز بماند، ج) حمله به شکار.

در این الگوریتم، گرگ‌ها به ۴ گروه تقسیم می‌شوند: گرگ‌های آلفا یا رهبر، بتا، دلتا و امگا. هدایت‌کننده اصلی الگوریتم گرگ‌های آلفا می‌باشند. گرگ‌های بتا و دلتا دستیاران گرگ‌های آلفا هستند و گرگ‌های امگا به عنوان دنبال‌کننده بقیه در نظر گرفته می‌شوند (Zhang et al., 2013). در مرحله اول الگوریتم، گرگ‌های خاکستری طعمه را محاصره می‌کنند. با استفاده از روابط زیر می‌توان این کار را مدل نمود:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}_{(t)}| \quad (1)$$

$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

در این روابط، $X_{p(t)}$ موقعیت شکار در لحظه t و $X_p(t)$ موقعیت گرگ در لحظه t و D فاصله گرگ تا شکار می‌باشد. A, C بردار ضرایب بوده که به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

در این رابطه a متغیری است که مقدار آن به صورت خطی از ۲ تا ۰ کاهش پیدا می‌کند، r_1 و r_2 مقادیر تصادفی می‌باشند (Mirjalali et al., 2014)، میثاقی و همکاران، (۱۳۹۹).

گرگ خاکستری در مرحله شکار به طعمه محاصره شده حمله می‌کند که روند شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می‌شود. گاهی اوقات گرگ‌های بتا و دلتا در شکار

شرکت می‌کنند. این فرایند را نیز می‌توان شبیه‌سازی ریاضی نمود؛ برای این کار فرض بر آن است که گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا از مکان بالقوه طعمه آگاهی بهتری دارند. بنابراین سه انتخاب از بهترین راه حل‌های به دست آمده ذخیره می‌شوند و بقیه عوامل جستجو با توجه به موقعیت بهترین راه حل‌ها، موقعیت خود را به‌روزرسانی می‌کنند. این فرایند (شکار) را با روابط زیر می‌توان نشان داد:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5)$$

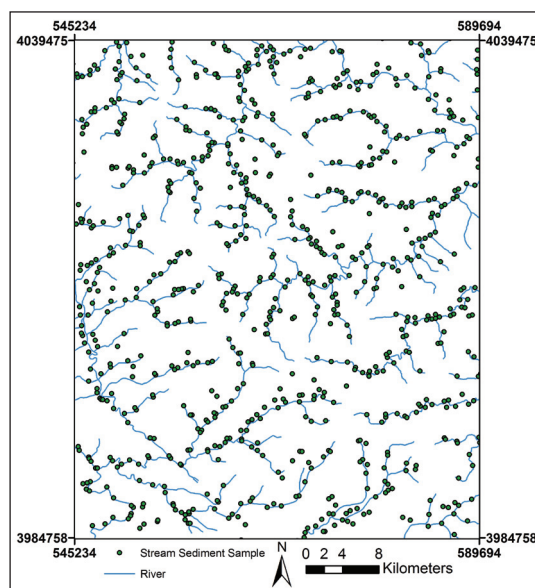
$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\delta \quad (6)$$

$$\vec{X}_{(t+1)} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

در حین جستجو برای طعمه، گرگ‌ها از هم فاصله می‌گیرند تا نقاط مختلف فضای راه حل را جستجو کنند. بردار تصادفی A با مقدار بزرگ‌تر از ۱ و یا کوچک‌تر از ۱- مدل ریاضی این فرایند را نشان می‌دهد. زمانی که شکار متوقف می‌شود، گرگ‌های خاکستری به آن حمله کرده و شکار به اتمام می‌رسد. برای مدل نمودن حمله به طعمه پارامتر a کاهش می‌یابد (میثاقی و همکاران ۱۳۹۹، Zhang et al., 2014).

۳- داده‌ها و اطلاعات

در این پژوهش از داده‌های برداشت شده در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت استفاده شده است. داده‌ها به روش رسوبات آبراه‌های برداشت شده و تراکم نمونه‌برداری تقریباً ۳ کیلومتر مربع برای هر نمونه بوده است. جهت استفاده بهینه از داده‌های به دست آمده، سعی بر آن شده تا توزیع نمونه‌ها به روش مرکز ثقل حوضه آبریز باشد، همچنین تلاش شد که فاصل نمونه‌ها در طول آبراه‌ها بیش از ۱ کیلومتر نباشد. به‌طور کلی، ۸۳۵ نمونه در این محدوده به روش رسوبات آبراه‌های برداشت شد (حسینی پاک، ۱۳۷۸). نمونه‌های برداشت شده پس از آماده‌سازی و تبدیل به مش ۲۰۰-، برای ۲۰ عنصر با روش اسپکترومتری نشری و جذب اتمی در آزمایشگاه شرکت توسعه علوم آنالیز شده و نتایج آنها به دست آمد (حسینی پاک، ۱۳۷۸؛ رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج آنالیزهای انجام شده از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است. شکل ۳ موقعیت نمونه‌های برداشت شده را نشان می‌دهد.



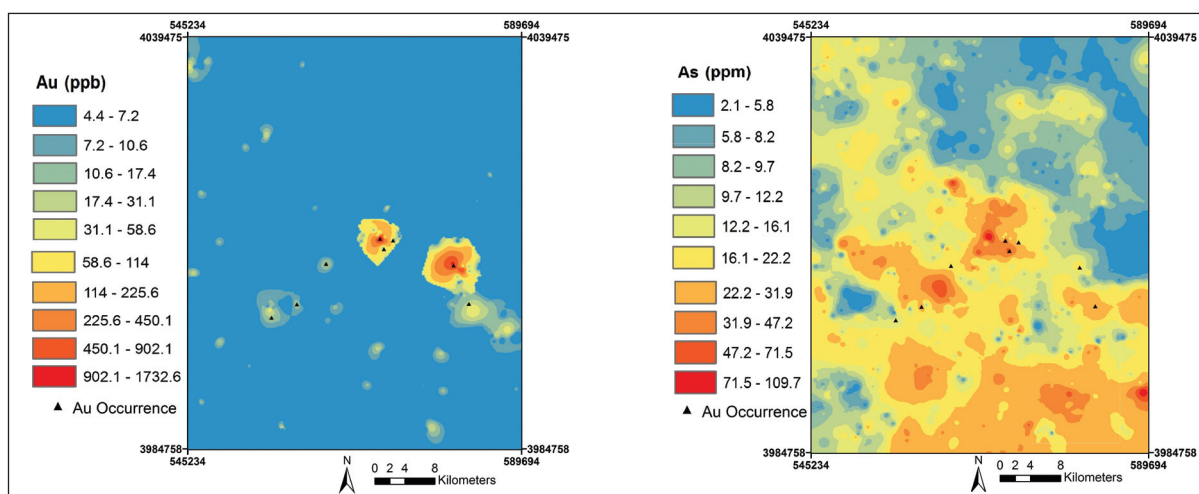
شکل ۳- نقشه شبکه آبراه‌ها و موقعیت نمونه‌های برداشت شده.

Figure 3. Steam network of study area along with sampling locations.

۴- بحث

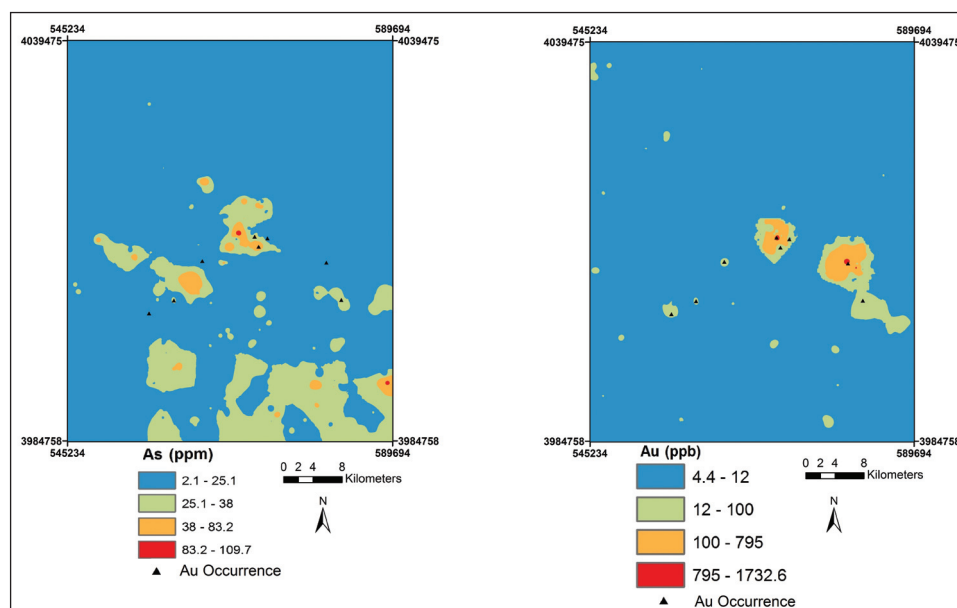
استفاده برابر دو، بیشینه تعداد همسایگی برابر ۱۵، کمینه تعداد همسایگی برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است. در این مرحله فقط نقشه توزیع تهیه شده و پردازش اضافه‌ای انجام نشده است. شایان توجه است که جهت رسیدن به نتایج بهتر در تحلیل رسوبات آبراه‌ای، بایستی حوضه‌های آبریز مشخص شده و باتوجه به وضعیت حوضه‌های آبریز تخمین شبکه‌ای انجام شود. براساس نقشه‌های تهیه شده مناطق با عیار بالا و کم قابل تشخیص است اما مرز بی‌هنجاری و زمینه مشخص نشده است. در ادامه، جهت تعیین مناطق بی‌هنجاری از روش فرکتال استفاده شده است. بدین منظور از نتایج اعمال روش فرکتال (حسینی و همکاران، ۱۳۹۶) استفاده شده است. براساس اعمال روش فرکتال بر روی داده‌های عناصر طلا و آرسنیک، داده‌های این عناصر را به ۴ دسته تقسیم شدند که نتایج به‌دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است.

در بخش داده‌ها اشاره شد که ۸۳۵ نمونه برداشت شده و برای ۲۰ عنصر آنالیزها انجام شد. ابتدا پردازش‌های مقدماتی شامل نرمال بودن و مقادیر خارج از ردیف انجام شد. جهت آزمون نرمال بودن از آزمون اسمینوف-گولوموگروف (Kolmogorov-Smirnov) استفاده شد. سپس با استفاده از نمودار جعبه‌ای و نمودار احتمال مقادیر خارج از ردیف شناسایی شده و با استفاده از روش دورفل در سطح اعتماد ۹۹٪ با مقادیر مناسب جایگزین گردید. در این مطالعه، از نتایج آنالیز عناصر طلا و آرسنیک که دارای بیشترین همبستگی بودند، استفاده شده است. بنابراین ابتدا با استفاده از داده‌های رسوبات آبراه‌ای، نقشه توزیع عناصر طلا و آرسنیک با استفاده از روش درون‌یابی فاصله معکوس وزنی (IDW) تهیه شد، نتایج به‌دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مطالعه جهت درون‌یابی با IDW، توان مورد



شکل ۴- نقشه پراکنندگی عیار طلا و آرسنیک.

Figure 4. Distribution map of gold and arsenic within study area.



شکل ۵- نتایج به‌دست آمده از روش فرکتال برای داده‌های آرسنیک و طلا.

Figure 5. Grade distribution map of gold and arsenic, derived by Fractal method.

می‌دهد. شایان ذکر است همان‌گونه که از شکل مربوط به روند الگوریتم برای عنصر آرسنیک مشخص است، الگوریتم در حدود تکرار شصتم به حد بهینه خود می‌رسد. چنانچه مقدار تکرار را برای اجرای این الگوریتم، کمتر از ۶۰ انتخاب می‌نمودیم، به نتیجه اشتباه می‌انجامید و از دیگر سو نیز با تکرار الگوریتم به میزان چهل مرتبه دیگر، تفاوتی در مقدار بهینه مشاهده نگردید. به طور مشابه، الگوریتم بر روری داده‌های غلظت طلا توانسته است در همان تکرارهای ابتدایی به مقدار بهینه خود برسد و در تکرارهای بیشتر، تغییری در جواب بهینه مشاهده نگردیده است. افزون بر این، تغییرات تعداد گرگ‌های الگوریتم، تغییر آشکاری در مقادیر بهینه ایجاد نمود. در طراحی الگوریتم گرگ خاکستری، از تعداد ۵۰ عدد گرگ خاکستری و تعداد ۱۰۰ تکرار استفاده گردید.

بدین منظور از تابع زیر استفاده گردید.

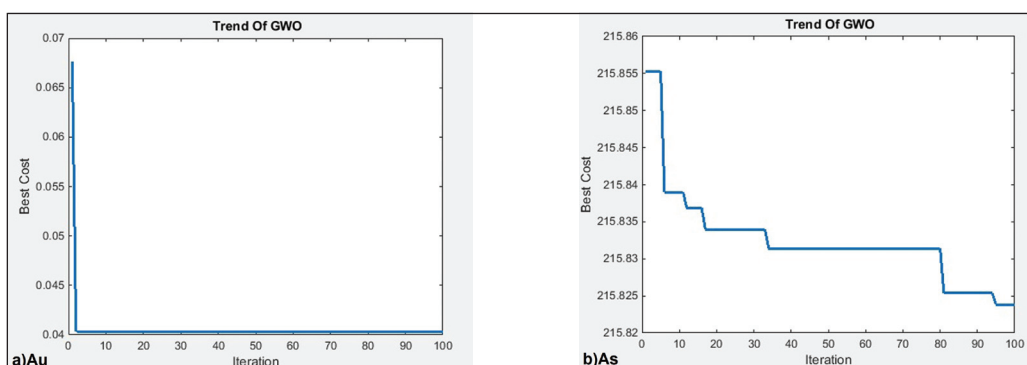
$$f(x) = \sum_{i=1}^n |x - x_i| \quad (8)$$

که در فرمول بالا، x برابر میزان غلظت بهینه (حد میان بی‌هنجاری و زمینه)، x_i برابر با میزان غلظت عناصر در موقعیت هر اندیس، و n برابر با تعداد اندیس‌های شناخته شده در محدوده می‌باشد، که بر این اساس، کمترین مقدار تابع هزینه برای عنصر طلا برابر 0.0412ppb و حد بهینه برابر 15.76ppb می‌باشد. به بیان دیگر، منطبق با عیار بالاتر از 15.76ppb را باید به عنوان مناطق بی‌هنجاری برای طلا در نظر گرفت. برای عنصر آرسنیک هم، کمترین مقدار تابع هزینه برابر 215.823 می‌باشد که متعلق به عیار 24.86ppm می‌باشد. باتوجه به حدود به دست آمده مناطق بی‌هنجاری برای هر یک از عناصر طلا و آرسنیک در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به این که هر عنصر به ۴ گروه تقسیم شده است، تعیین یک گروه به عنوان بی‌هنجاری ممکن است به سلیقه افراد مرتبط شود. بنابراین نمی‌توان به طور دقیق درباره جداسازی و تفکیک بی‌هنجاری‌ها اعمال نظر کرد. بر این اساس، نیاز به اعمال روشی جهت تفکیک دقیق بی‌هنجاری از زمینه حس می‌گردد که بر این اساس، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده گردید.

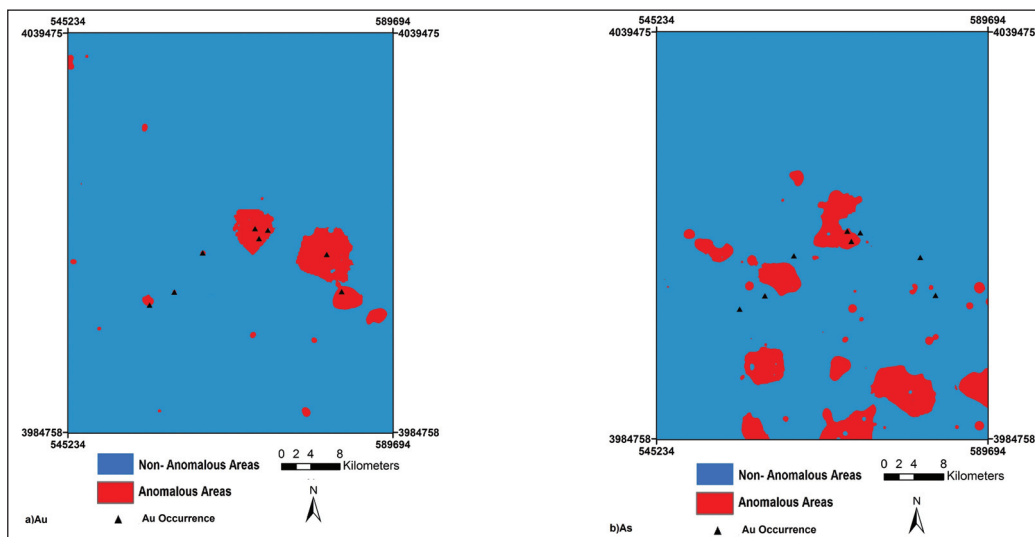
۴-۱- اعمال روش الگوریتم گرگ خاکستری

به منظور اجرای الگوریتم گرگ خاکستری بر روی داده‌های توزیع غلظت عناصر در برگه زمین‌شناسی آلوت، از محیط نرم‌افزار متلب استفاده گردید. در وحله اول، موقعیت تعداد ۸ اندیس شناخته شده بر روی نقشه‌های توزیع عیار طلا و آرسنیک جانمایی گردیده و مقادیر آن‌ها اندازه‌گیری شد. بدین منظور، در ابتدایی‌ترین قسمت کد مربوطه، تابع هزینه تعریف شده و در گام بعدی، مواردی مانند بازه تغییرات عیار (طلا و آرسنیک)، بیشینه تعداد تکرار الگوریتم و تعداد گرگ‌های خاکستری و ماتریس‌های مورد نیاز برای گرگ‌های آلفا، بتا و گاما مشخص گردید. در مرحله بعدی با استفاده از دستور تابع تصادفی، این ماتریس‌ها مقادیردهی شده و مقدار تابع هزینه محاسبه شده و در ادامه، بر اساس تعاریف و روابط حاکم بر الگوریتم گرگ خاکستری، این مقادیر بهینه گردید. به منظور ارزیابی روند پیشرفت الگوریتم در هر تکرار، مقدار تابع هزینه در قالب نمودار روند به تصویر کشیده شد (شکل ۶). در واقع نقطه بهینه در جایی به دست می‌آید که مقدار تابع یاد شده کمترین باشد. شکل ۶، روند الگوریتم اجرا شده برای توزیع غلظت عناصر طلا و آرسنیک را نشان



شکل ۶- نتیجه روند الگوریتم گرگ خاکستری برای بر روی نقشه‌های به‌دست آمده برای آرسنیک و طلا.

Figure 6. Trend analysis of applied GWO algorithm on gold and arsenic grade distribution within study area.



شکل ۷- نتایج به‌دست آمده از الگوریتم خاکستری و تعیین مناطق بی‌هنجاری برای طلا (a) و آرسنیک (b).

Figure 7. Grade distribution map of gold and arsenic, derived by applying GWO algorithm (a-gold, b-arsenic).

بر اساس الگوریتم می‌باشد. در صورت انتخاب گروه دوم فرکتال به عنوان بی‌هنجاری، وسعت محدوده انتخابی زیاد می‌شود و در صورت عدم انتخاب این گروه به عنوان بی‌هنجاری، بخشی از محدوده‌های بی‌هنجاری حذف می‌شود. در واقع انتخاب گروه بر اساس نظر کارشناسی همواره پیامدهای خاص خود را دارد.

جهت بررسی بیشتر و تطبیق بی‌هنجاری‌های مشخص شده با شرایط زمین‌شناسی، بی‌هنجاری‌های مشخص شده بر اساس الگوریتم گرگ خاکستری بر روی نقشه زمین‌شناسی انداخته شد. در این بخش، موقعیت سنگ میزبان و گسل‌ها نسبت به بی‌هنجاری‌ها مشخص شده است که در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، بی‌هنجاری‌های مشخص شده عمدتاً در ۲ گروه اصلی سنگ‌شناسی قرار دارند:

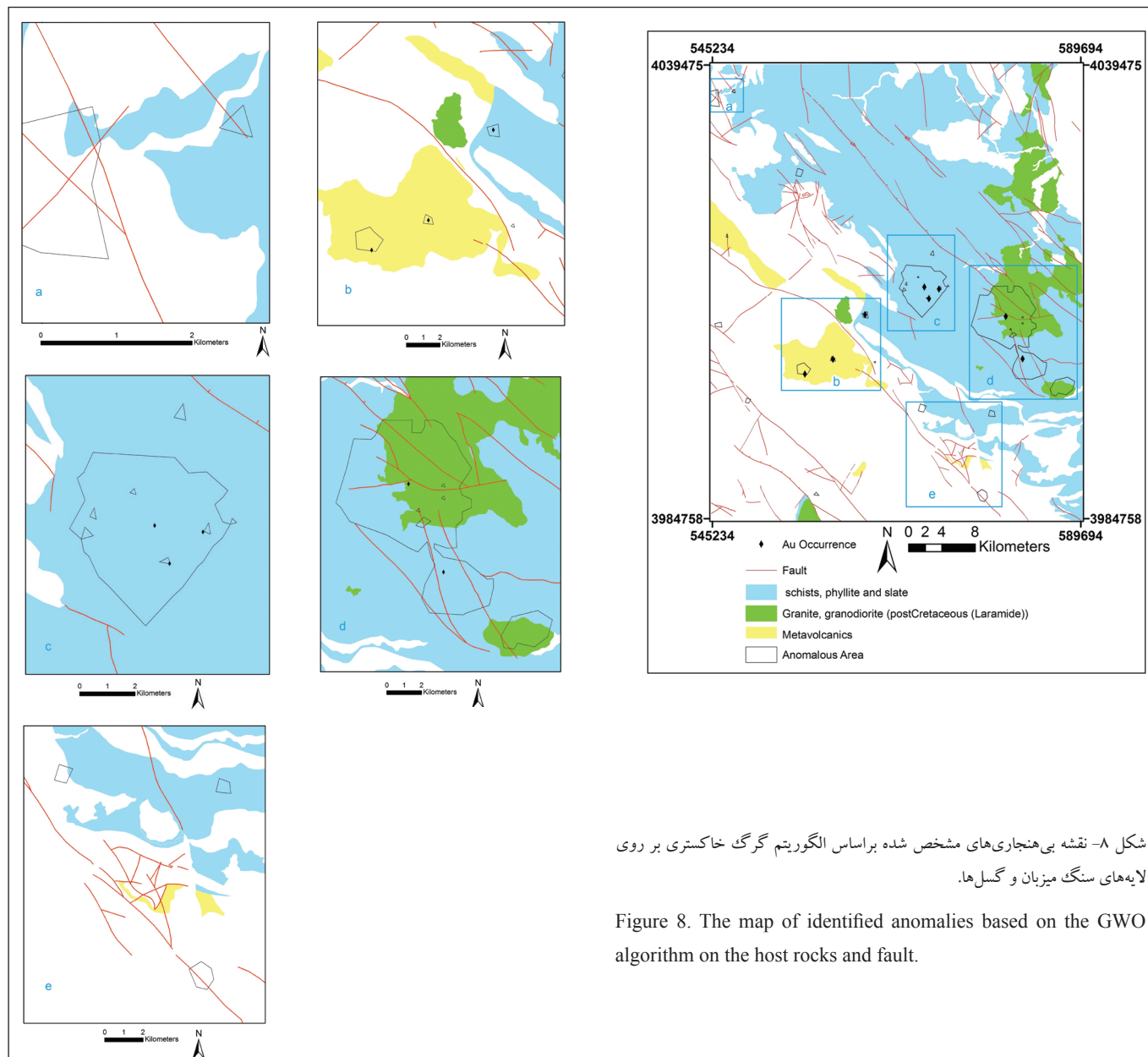
گروه اول واحدهای دگرگونی شامل: شیست، اسلیت و فیلیت. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی انجام شده، کانی‌سازی این گروه در زون‌های برشی می‌باشد. گروه دوم واحدهای آذرین که شامل گرانیت‌ها، گرانودیوریت‌ها و متاولکانیک‌ها می‌باشند.

در هر دو گروه، گسل‌ها در کانی‌سازی نقش مهمی دارند که در محل بی‌هنجاری‌های مشخص شده گسل‌های زیادی وجود دارند.

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین اشاره شد و بر اساس مطالعات مختلف از جمله مطالعات زمین‌شیمیایی انجام شده توسط هندی (۱۳۸۲ و ۱۳۸۳) و سایر مطالعات پژوهشی انجام شده (Aliyari *et al.*, 2009 and 2012; Afzal *et al.*, 2013; Mohammadpour *et al.*, 2019) در محدوده مورد مطالعه چند کانسار شناخته شده و نقطه پتانسیل دار طلا وجود دارد. بنابراین، این نقاط جهت اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از الگوریتم گرگ خاکستری و روش فرکتال می‌توان به دو نکته اشاره نمود:

نکته اول: در روش فرکتال داده‌های طلا و آرسنیک محدوده آلوت به ۴ جامعه تقسیم شده‌اند (شکل ۵). انتخاب جامعه بی‌هنجاری در این موارد دشوار و به نظر کارشناس وابسته می‌شود اما در نتایج به‌دست آمده از الگوریتم دو جامعه داریم زمینه و بی‌هنجاری، که در این حالت تعیین بی‌هنجاری به اظهار نظر کارشناس ارتباط ندارد. نکته دوم: حد بی‌هنجاری به‌دست آمده بر اساس نتایج الگوریتم (۲۴/۸۶)، با کران پایین گروه دوم روش فرکتال (۲۵/۱) تقریباً برابر است و می‌توان گفت با فرض انتخاب این کران به عنوان حد بی‌هنجاری، نتایج مشابه می‌باشد.

در داده‌های مربوط به طلا حد بی‌هنجاری تعیین شده بر اساس الگوریتم (۱۵/۷۶) در میانه گروه دوم نتایج فرکتال (۱۰-۱۲) قرار می‌گیرد، که نشان دهنده حد بهینه



شکل ۸- نقشه بی‌هنجاری‌های مشخص شده بر اساس الگوریتم گرگ خاکستری بر روی لایه‌های سنگ میزبان و گسل‌ها.

Figure 8. The map of identified anomalies based on the GWO algorithm on the host rocks and fault.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده شد. براساس نتایج الگوریتم مقادیر بیشتر از 15.76ppb به عنوان حد جدایش بی‌هنجاری برای طلا انتخاب شد، همچنین 24.86ppm برای آرسنیک انتخاب شد. با استفاده از این الگوریتم محدوده به ۲ بخش تقسیم می‌شود و مناطق بی‌هنجاری دار بدون دخالت کارشناس کاملاً مشخص می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که حد بی‌هنجاری به‌دست آمده از روش فرکتال و الگوریتم، برای آرسنیک تقریباً یکسان است اما در حد بی‌هنجاری برای طلا در روش الگوریتم گرگ خاکستری بهینه می‌باشد.

این مطالعه به منظور بررسی استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی جهت تفکیک جوامع زمینه از بی‌هنجاری در مطالعات زمین‌شیمی اکتشافی به روش رسوبات آبراهه‌ای انجام شد. بدین منظور، از داده‌های رسوبات آبراهه‌ای برگه آلوت استفاده شد و نتایج آنالیز طلا و آرسنیک جهت بررسی انتخاب شدند. پس از تهیه نقشه توزیع عناصر طلا و آرسنیک، ابتدا از روش‌های فرکتال جهت جدایش بی‌هنجاری استفاده شد براساس نتایج به‌دست آمده، داده‌های طلا و آرسنیک به ۴ گروه تقسیم شدند. در ادامه، از الگوریتم گرگ خاکستری جهت جدایش

کتابنگاری

- احمدی، ف. و محمدپور، م.، ۱۳۹۷، بررسی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای جهت تعیین کانه‌زایی طلای پهنه برشی مطالعه موردی: منطقه آلوت در استان کردستان، فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، ۱۲(۴۴)، ۱۹-۳۵.
- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۵۲، نقشه زمین‌شناسی مهاباد، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- افضل، پ.، فداکارالقلندیس، ی.، خاک زاد، ا.، معارف‌وند، پ.، رشیدنژادعمران، ن. و اسدی هارونی، ه.، ۱۳۸۸، جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه با استفاده از روش طیف توان - مساحت، مطالعه موردی: کانسار پورفیری مس - مولیدن کهنک، اصفهان. زمین و منابع، ۲(۲) (پیاپی ۵)، ۹-۲۰.
- آریافر، ا.، خسروی، و.، فرشادمهر، م. ا. و یوسفی، س.، ۱۳۹۹، استفاده از مدل ترکیبی فاکتوری- فرکتالی جهت شناسایی پتانسیل‌های معدنی طلا، آرسنیک و آنتیموان در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران، خراسان جنوبی، شرق ایران. پژوهش‌های دانش زمین، ۱۱(۲)، ۱۲۷-۱۴۲.
- حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۹۴، اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۱۵ص.
- حسنی پاک، ع. ا.، ۱۳۷۸، گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در محدوده برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ آلوت، سازمان صنایع و معادن استان کردستان.
- حسنی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۹۱، تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۰۱ص.
- حسینی، س.، شاهرخی، س.، افضل، پ.، فرهادی نژاد، ط. و ایمان زاده، ح.، ۱۳۹۶، جدایش ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی به روش‌های فرکتالی عیار- تعداد و عیار- مساحت برای شناسایی مناطق امیدبخش در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت، کردستان. علوم زمین، ۲۷(۱۰۵)، ۱۹۹-۲۰۶.
- خضری، ا.، محمد زاده، م. ج.، نوری، ا.، ۱۳۹۲، مقایسه روش‌های شبکه عصبی و PCANN به منظور شناسایی مناطق امید بخش طلا در منطقه آلوت کردستان، پنجمین همایش زمین‌شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- درویش زاده، ع.، ۱۳۹۴، زمین‌شناسی ایران، چاپ ششم، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۴ص.
- رحیمی، م. ر.، مرادزاده، ع.، عابدی، م. و عرب امیری، ع.، ۱۳۹۵، به‌کارگیری تحلیل فاکتوری مرحله‌ای جهت اکتشاف طلا در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت، کنفرانس ملی پژوهش در علوم زمین، تهران.
- سیدرحیمی نیارقی، م.، مهدیان فر، ح. و مختاری، ا.، ۱۴۰۲، به‌کارگیری روش‌های ساختاری ژئوشیمیایی فرکتال و آماره‌ی لآ جهت تعیین مناطق آلوده به عنصر سرب مرتبط با فعالیت‌های معدنی در منطقه ایرانکوه. روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۳(۳۴)، ۴۱-۵۵.
- عمرانی، ج.، خبازنیا، ا. ر.، ۱۳۸۲. نقشه زمین‌شناسی آلوت، مقیاس: ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کعبانیا، ع.، جعفری، م. ا. و نظرپور، ا.، ۱۳۹۷، جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی سرب و روی با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک، مولتی فرکتال عیار-تعداد، عیار-مساحت و شاخص سینگولاریتی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ اراک. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۸(۳) (پیاپی ۲۹)، ۶۳-۷۴.
- محمدپور، م.، رحیمی پور، غ. و غضنفری، م.، ۱۳۹۱، بررسی ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای جهت تعیین اختصاصات پاراژنتیک کانساز طلای پهنه برشی در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ آلوت، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.
- مقصودی، ع.، رشیدی، ب. و رحمانی، م.، ۱۳۸۴، کانسارها و نشانه‌های معدنی طلا در ایران، انتشارات آریز زمین، ۳۸۸ص.
- میثاقی، ف.، امانی، ا. ح. و صدیق، ع.، ۱۳۹۹، مقایسه کارآیی الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و رقابت استعماری در حوزه تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی (مطالعه موردی: شبکه صوفی چای)، فصلنامه علوم محیطی، دوره هجدهم، شماره ۲، ۲۰۳-۲۰۱۸.
- هندی، ر.، ۱۳۸۲، گزارش مطالعات ژئوشیمیایی در مناطق طلا دار آلوت، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- هندی، ر.، ۱۳۸۳، گزارش مطالعات لیتوژئوشیمیایی در مناطق طلا دار آلوت، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Afzal, P., Ahari, H. D., Omran, N. R., and Aliyari, F., 2013. Delineation of gold mineralized zones using concentration-volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 55, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.05.005>
- Afzal, P., Fadakar, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnezhad Omran, N.A., and Asadi Harouni, H., 2010. Separation of Geochemical Anomalies from Background by Using of Power Spectral-Area Fractal Method, Case Study: Kahang Porphyry Cu-Mo Deposit, Isfahan. *Journal of Earth and Resources*, 2(2 (5)), 9-20 [in Persian].

- Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zarifi, A. Z., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.03.009>
- Ahmadi, F., Mohamadpour, M., 2018. *Geochemical studies of stream sediment to determine the shear zone-related gold mineralization (Case study of Alut area in Kurdistan province)*, *Iranian Journal of Environmental Geology*, 12(44), 19-35 [in Persian].
- Ahmed, Q. I., Attar, H., Amer, A., Deif, M. A., and Solyman, A. A., 2023. Development of a Hybrid Support Vector Machine with Grey Wolf Optimization Algorithm for Detection of the Solar Power Plants Anomalies. *Systems*, 11(5), 237. <https://doi.org/10.3390/systems11050237>.
- Aliyari, F., Rastad, E., and Arehart, G. B., 2009. Geology and geochemistry of D-O-C isotope systematics of the Qolqoleh Gold Deposit, Northwestern Iran: implications for ore genesis. *Ore Geol. Rev.*, 36, 306-314. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.06.003>.
- Aliyari, F., Rastad, E., and Mohajjel, M., 2012. Gold Deposits in the Sanandaj-Sirjan Zone: Orogenic Gold Deposits or Intrusion-Related Gold Systems?" *Resource Geology* 62.3: 296-315. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>.
- Almazini, H. F., Ku-Mahamud, K. R., and Almazini, H., 2023. Heuristic Initialization Using Grey Wolf Optimizer Algorithm for Feature Selection in Intrusion Detection. *Int. J. Intell. Eng. Syst*, 16(1), 410-418. DOI: 10.22266/ijies2023.0228.36
- Aryafar, A., Khosravi, V., Farshadmehr, M. A., and Yousefi, S., 2020. *Using hybrid factor-fractal model for identification of Au, As, Sb mineral potential in Basiran 1:100000 sheet, south Khorasan, and east of Iran. Researches in Earth Sciences*, 11(2), 127-142. doi: 10.52547/esrj.11.2.127 [in Persian].
- Chen, Y., and Lu, L., 2023. The Anomaly Detector, Semi-supervised Classifier, and Supervised Classifier Based on K-Nearest Neighbors in Geochemical Anomaly Detection: A Comparative Study. *Mathematical Geosciences*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11004-022-10042-w>.
- Chen, Y., and Shayilan, A., 2022. Dictionary learning for multivariate geochemical anomaly detection for mineral exploration targeting. *Journal of Geochemical exploration*, 235, 106958. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106958>
- Chen, Y., Lu, L., and Li, X., 2014. Application of continuous restricted Boltzmann machine to identify multivariate geochemical anomaly. *Journal of Geochemical Exploration*, 140, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.013>.
- Chen, Z., Xiong, Y., Yin, B., Sun, S., and Zuo, R., 2023. Recognizing geochemical patterns related to mineralization using a self-organizing map. *Applied Geochemistry*, 151, 105621. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105621>.
- Cheng, Q., and Li, Q., 2002. A fractal concentration-area method for assigning a color palette for image representation. *Computers & geosciences*, 28(4), 567-575. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00060-7)
- Cui, Z. H., and GAO, X. Z., 2012. Theory and applications of swarm intelligence. *J. Neural Computing and Applications*. 21, 205-206. <https://doi.org/10.1007/s00521-011-0523-8>.
- Darvishzadeh, A., 2015. *Geology of Iran, Amirkabir Publication, 6th Edition, 434pp [in Persian]*.
- Derrac, J., García, S., and Molina, D., 2011. A practical tutorial on the use of non-parametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *J. Swarm and Evolutionary Computation*. 1, 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.02.002>.
- Eftkharnejad, J., 1972. *Geological map of Mahabad, scale 1:250000, Geology Survey and Mineral Exploration of Iran [in Persian]*.
- Farhadi, S., Afzal, P., Boveiri Konari, M., Daneshvar Saein, L., and Sadeghi, B., 2022. Combination of Machine Learning Algorithms with Concentration-Area Fractal Method for Soil Geochemical Anomaly Detection in Sediment-Hosted Irankuh Pb-Zn Deposit, Central Iran. *Minerals*, 12(6), 689. <https://doi.org/10.3390/min12060689>.
- Haji Aliaskari, A., Maghsoudi, A., Javandel, P., and Ghezelbash, R., 2018. *Identification of geochemical populations using PCA and U-spatial statistics model in Shamkan 100000 sheet, 10th conference of economic geology of Iran, Esfahan [in Persian]*.
- Hassani Pak., A.A., 2015. *Geochemical Exploration, University of Tehran Publication, 615pp [in Persian]*.
- Hassani Pak., A.A., and Sharafodin, M., 2011. *Exploration Data Analyses, University of Tehran Publication, 1010pp [in Persian]*.
- Hassani Pak., A.A. 2000, *Report of systematic geochemical exploration in the area of Alut, Kurdistan Industrials and Mining organization [in Persian]*.
- Hendi, R., 2003. *Report of geochemical exploration in the area of Alut, Geology Survey and Mineral Exploration of Iran [in Persian]*.
- Hendi, R., 2004. *Report of litho-geochemical exploration in the area of Alut, Geology Survey and Mineral Exploration of Iran [in Persian]*.
- Hosseini, S.A., Shahrokh, S.V., Afzal, P., Farhadinejad, T., and Imanzadeh, H., 2017. Separation of Geochemical Anomalies Using Concentration- Area and Concentration- Number Methods in the Alut 1:100,000 Sheet, Kurdistan. *Geosciences*, 27(105), 199-206 [in Persian].
- Kanarian, A., Jafari, M., and Nazzari, A., 2018. Discrimination of Pb and Zn geochemical anomalies using classical, multifractal (C-N) and (C-A) and singularity index statistical methods in Arak 1:100000 sheet, *Journal of Advanced Applied Geology*, 8(29), 63-74, doi: 10.22055/aag.2019.26910.1887. [in Persian].
- Khezri, A., Mohammadzadeh, M.J., and Nouri, A., 2013. Comparison of neural network and PCANN methods in order to identify gold mineralization in Alut Area, Kurdistan, 5th conference of economic geology of Iran, Ferdowsi university of Mashhad [in Persian].

- Leboucher, C., Chelouah, R., Siarry, P., and Le Méneç, S., 2012. A swarm intelligence method combined to evolutionary game theory applied to the resources allocation problem. *International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR)*, 3(2), 20-38. DOI: 10.4018/jsir.2012040102
- Li, S. Y., Wang, S. M., Wang, P. F., Su, X. L., Zhang, X. S., and Dong, Z. H., 2018. An improved grey wolf optimizer algorithm for the inversion of geoelectrical data. *Acta Geophysica*, 66(4), 607-621. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0148-8>.
- Li, S., Mao, J., and Li, Z. 2023. An EEMD-SVD method based on gray wolf optimization algorithm for lidar signal noise reduction. *International Journal of Remote Sensing*, 44(17), 5448-5472. <https://doi.org/10.1080/01431161.2023.2249597>.
- Luo, Z., Zuo, R., Xiong, Y., and Zhou, B. 2023. Metallogenic-Factor Variational Autoencoder for Geochemical Anomaly Detection by Ad-Hoc and Post-Hoc Interpretability Algorithms. *Natural Resources Research*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11053-023-10200-9>.
- Maghsoudi, A., Rashidi, B., and Rahmani, M., 2004. *Deposits and mine index of gold in Iran, Arian Zamin publication, 388pp [in Persian]*.
- Mahdianfar, H., and Seyedrahimi-Niaraq, M., 2022. Improvement of geochemical prospectivity mapping using power spectrum–area fractal modeling of multi-element mineralization factor (SAF-MF). *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* (2022): geochem2022-015. <https://doi.org/10.1144/geochem2022-015>.
- Mirjalili, S.A., Mirjalili, S.M., and Lewis, A., 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software* 69: 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- Misaghi, F., Amani, A. H., and Seddigh, A. R., 2020. *Comparison of the efficiency of gray wolf optimizer and imperialist competitive algorithms in an optimal allocation of water in irrigation and drainage networks (case study: Sofi-Chay network). Environmental Sciences, 18(2), 203-218. doi: 10.29252/envs.18.2.203 [in Persian]*.
- Mohammadi, N. M., Hezarkhani, A., and Saljooghi, B. S., 2016. Separation of a geochemical anomaly from background by fractal and U-statistic methods, a case study: Khooni district, Central Iran. *Geochemistry*, 76(4), 491-499. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.09.001>.
- Mohammadpour, M., Abedi, M., Rahimpor, Gh., Jozanikohan, G., and Khalifiani, F., 2019. Geochemical distribution mapping by combining number-size multifractal model and multiple indicator kriging, *Journal of Geochemical Exploration*, 200, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.01.018>.
- Mohammadpour, M., Rahimpour, Gh., and Ghazanfari, M., 2012. *Geochemical investigation of stream sediments to determination of paragenetic features of shear zone gold mineralization in Alut, 16th conference of the geological society of Iran [in Persian]*.
- Mostafaei, K., and Kianpour, M., 2022. Application of Magnetometry in Manto-type Copper Deposit Exploration, Case study: Meyami, Iran. *Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*, 37(5), 1–14. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.5.1>.
- Mostafaei, K., and Ramazi, H., 2018. Compiling and verifying 3D models of 2D induced polarization and resistivity data by geostatistical methods. *Acta Geophysica*, 66, 959-971. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0175-5>.
- Mostafaei, K., and Ramazi, H., 2019. Mineral resource estimation using a combination of drilling and IP-Rs data using statistical and cokriging methods. *Bulletin of the mineral research and exploration*, 160(160), 177-195. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.502794>.
- Mostafaei, K., Maleki, S., Jodeiri Shokri, B., and Yousefi, M., 2023a. Predicting gold grade by using support vector machine and neural network to generate an evidence layer for 3D prospectivity analysis. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. doi: 10.22059/ijmge.2023.362951.595087.
- Mostafaei, K., Kianpour, M., and Yousefi, M., 2023b. Delineation of gold exploration targets based on the prospectivity models through an optimization algorithm. *Journal of Mining and Environment*. doi: 10.22044/jme.2023.13472.2489.
- Nadimi-Shahraki, M. H., Taghian, S., and Mirjalili, S., 2021. An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems. *Expert Systems with Applications*, 166, 113917. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113917>.
- Omrani, J., and Khabaznia, A. R., 2003. *Geological map of Alut, Scale: 1000000, Geological survey and mineral Exploration of Iran [in Persian]*.
- Otair, M., Ibrahim, O. T., Abualigah, L., Altalhi, M., and Sumari, P., 2022. An enhanced grey wolf optimizer-based particle swarm optimizer for intrusion detection system in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 28(2), 721-744. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02866-x>.
- Parpinelli, R. S., and Lopes, H. S., 2011. New inspirations in swarm intelligence: a survey. *J. International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3, 1–16. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2011.0387>.
- Rahimi, M.R., Moradzadeh, A., Abedi, M., and Arabamiri, A., 2016. *Use the fractal analysis for gold exploration in Alut area, national conference of research in earth sciences [in Persian]*.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Hron, K., Kynčlová, P., and Garrett, R. G., 2017. A new method for correlation analysis of compositional (environmental) data—a worked example. *Science of the Total Environment*, 607, 965-971. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.063>.
- Sepahi, A. A., Ghoreishvandi, H., Maanijou, M., Maruoka, T., and Vahidpour, H., 2020. Geochemical description and sulfur isotope data for Shahrak intrusive body and related Fe-mineralization (east Takab), northwest Iran. *Island Arc*, 29(1), e12367. <https://doi.org/10.1111/iar.12367>.
- Seyedrahimi-Niaraq, M., and Hekmatnejad, A., 2021. The efficiency and accuracy of probability diagram, spatial statistic and fractal methods in the identification of shear zone gold mineralization: a case study of the Saqqez gold ore district, NW Iran. *Acta Geochimica*, 40, 78-88. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00413-7>.

Seyedrahimi-Niaraq, M., Mahdianfar, H., and Mokhtari, A. R., 2023. Application of geochemical structural methods to determine lead-contaminated areas related to mining activities. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 13(34), 41-55. doi: 10.22034/anm.2022.2783[in Persian].

Zhang, Z., Long, K., Wang, J., and Dressler, F., 2013. On swarm intelligence inspired self-organized networking: its bionic mechanisms, designing principles and optimization approaches. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 513-537. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.062613.00014>.