

Original Research Paper

The application of Python-GIS-fractal-wavelet add-on to highlight the promising areas of iron-apatite in association with REEs, in the metallogenic zone of Taron, NW Iran

Ahmad Adib^{1*}, Mohammad Mahdi Pourgholam¹, and Peyman Afzal¹

¹Department of Petroleum and Mining, Faculty of Mining, Petroleum and Energy, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2024 October 23

Accepted: 2025 December 06

Available online: 2026 March 21

Keywords:

Fractal wavelet classifier

QGIS Plugin

Python

Stream sediment

Geochemical anomalies

REEs

ABSTRACT

In this systematic exploration, Python and Python-GIS programming environments serve as valuable tools for developing automatic algorithms for analyzing and processing discovery layers. In this study, a fractal-wavelet classifier was designed in the Python environment and subsequently implemented as a plugin in QGIS. The geochemical data of stream sediments, and in some cases Litho-geochemical data from the metallogenic area of the Taron zone in northwest Iran, are used as input to identify potential areas promising for REE mineralization, particularly in the form of iron apatite. The program pre-processes and analyzes the geochemical layer within the GIS environment to delineate and classify these potential zones from the background. Additionally, it generates fractal diagrams, calculates breakpoints, and saves the results in user-specified formats such as images and Excel files. The fractal output diagrams display breakpoints related to the threshold boundaries between anomalous and background populations, aiding final classification. To optimize threshold selection, the relevant values suggested by experts are provided for application in the final classification, along with possible troubleshooting steps.

1. Introduction

The models based on exploration features include the mineralization properties. One of these essential layers is geochemistry. In the scale of reconnaissance or regional exploration, the proper data that could be used is the stream sediment samples to analyze


elements' mobility and concentration behavior in a catchment basin. Therefore, suits of nominated elements based on the exploration model and the target mineralization apply to classify the anomalous catchment basin from the background. All this


* Corresponding author: Ahmad Adib; E-mail: adib@azad.ac.ir

Citation:

Adib, A., Pourgholam, M.M., Afzal, P., 2026. The application of Python-GIS-fractal-wavelet add-on to highlight the promising areas of iron-apatite in association with REEs, in the metallogenic zone of Taron, NW Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(1), 139, 97-112. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.488096.2165>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2025.488096.2165

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.6.4



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

progress is performed on the spatial data on stream sediment samples in the catchment basin. So, it should be used as the layer in the GIS environment. The mathematical calculation, statistical process, fractal analysis, signal processing, and other steps should be performed on the data during the classification process to prepare the result as an exploration feature for the exploration model. These steps make the progress more complicated. Hence, as a modular programming environment that should be compatible with GIS programs, especially QGIS, the Python program helped make the progress automatic and comfortable. The algorithm Implementation program as Python codes based on proper libraries could be used in an independent and unique GUI or as a Plugin in QGIS. The main algorithm performed in this study program was a fractal wavelet, already used to detect geochemical anomalies.

The Tarom district is part of Zanjan province (NW Iran), a part of the Tarom-Hashhtjin metallogenic belt by an NW-SE trend. The outcrops of this region are primarily Tertiary intrusive and volcanic rocks. This mountain range is associated with layers such as pyroclastic and volcanic rocks. Most rock types are andesite and rhyolite, with low volumes of basaltic units. (Nabatian et al., 2012; Shahbazi et al., 2021). In this area, Eocene volcanic masses were intruded by a 3–5 km wide and 10–15 km long NW-SE trending intrusions of Upper Eocene quartz-monzonites to quartz, monzodiorites, and monzogranites. The plutonic bodies are metaluminous I -type granitoids with calc alkaline affinity (Nabatian et al., 2014). There are iron oxide-apatite (IOA) ores, including Sorkheh-Dizaj, Aliabad, Morvarid, Zaker, Golestan Abad, Zarnan, Chorehnab (Fig1). These deposits are hosted by quartz-monzonites, volcanic, and volcanoclastic rocks.

2. Research methodology

In this study, 753 stream sediment samples were collected based on a stream network sampling (Fig. 2) in Tarom area 1:100000 sheet located in the Zanjan province (NW Iran) and analyzed for 42 related elements using the ICP-MS and XRF methods by the geological survey of Iran Laboratory. The location of the collected samples was depicted in Fig 3, overlaid by the nominated geo units. The program performs the fractal calculation on all input elements. Still, for the detection of REE minerals anomalies in the Iron apatite mineralization type in this study, the geochemical suit related to the exploration model of Iron-apatite includes 14 REE elements (Ce, La, Nb, Sc, Y, Zr, U, Th, Ti, V, Fe, P) nominated and studied. The FFT/IFFT has been utilized in signal processing and time series analysis (Cheng et al., 1999; Zuo, 2011; Chen et al., 2016; Zuo and Wang, 2016; Afzal et al., 2017). Functions for density of spectral energy demonstrate the distribution of power spectrum in a frequency domain. The advantage of this

operation is that some complex processes in a spatial domain for correlation analysis, transformation, and filtering can be simplified in the frequency domain (Cheng, 2007).

The wavelet thresholding filtering is routinely applied as an approach to threshold coefficients by comparing them with a predefined threshold value, motivated by the compression or sparsity property of Wavelet Transformation (WT) that, for most signals, a few large wavelet coefficients can capture a significant fraction of the signal energy (Donoho and Johnstone, 1994; Mallat, 1999). The power-law model is generally supposed to lie at the origin of fractals. It has been proven that fractals/multifractals are an effective physical mechanism for explaining and modeling the singular distribution of nonlinear processes (Cheng, 1999; Turcotte, 1997).

The wavelet-fractal analysis was applied to geochemical data from the Ipak area in 2021 using the Sym8 wavelet. In 2022, the same method was employed to classify alteration zones in the Tarom area based on Landsat 8/OLI images. Following these studies, the original MATLAB codes were converted and developed into the Python environment to create a unified program, enabling its widespread application in GIS environments, particularly as a plugin for QGIS. Initially, the codes were used to generate a standalone program with a PyQt graphical user interface (GUI), as illustrated in Fig. 4, and subsequently integrated into QGIS as a plugin. The front-end (GUI) of the program is shown in Fig. 4.

3. Results and Discussions

The program used stream sediment data analysis as a standard sheet form in Iran's Geological Survey and Mineral Exploration (GSI). The sheet file should be in the format of CSV or XLS. A sample of standard sheets and their column titles is shown in Fig 4. The algorithm of the Fractal-Wavlet-Classifer (FWC) based on Python for the GIS environment also has an option to calculate the fractal process, drawing the fractal plots using the Matplot Python library and then calculating the fractions using suitable periods and proposing the line of populations. The algorithm didn't work correctly on pipe fitting to the fractal plot, and the population lines didn't provide suitable. So, we must develop significantly in drawing the fitted population lines to fractal plots. However, the fractions were calculated accurately and satisfied the results. The results were also checked manually. Some of the fractal results plots drawn by the FWC-Python are depicted in Fig 6. Also, another option was added to the FWC-python program for the final results of thresholds and cut of grades of elements to save in a CSV file with all necessary values and pair values of actual grades in the same folder of output plots. The program was also added to QGIS using an executable link from the FWC-python. The Plugin is named as FWC.

4. Conclusion

The result of the program calculation and outputs were checked by applying the thresholds to the geochemical anomalies map, and then end member rock samples were collected during the field anomaly checking operation overlaid in the QGIS environment. The samples were collected from high-potential Iron-Apatite as the main mineral target, such as mines, ore deposits, and high-grade indexes. The Correlation between FWC-python program results and anomaly checking/Iron-

Apatite samples (Fig 8). The results show high correlation and the suitable accuracy of the automatic FWC-python algorithm.

Acknowledgment

The authors wish to acknowledge the Islamic Azad University, South Tehran branch for financial support of this project. The reference of this research project contract is B.16.896

کاربرد افزونه پایتون-جی آی اس-فرکتال-موجک برای بارزسازی مناطق امیدبخش آهن-آپاتیت در همیافتی با عناصر خاکی کمیاب در منطقه فلززایی طارم، شمال باختر ایران

احمد ادیب*، محمد مهدی پورغلام^۱ و پیمان افضل^۱^۱ گروه نفت و معدن، دانشکده معدن، نفت و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

چکیده

محیط‌های برنامه‌نویسی پایتون و پایتون-GIS ابزار ارزشمندی برای توسعه الگوریتم‌های خودکار در تحلیل و پردازش لایه‌های اکتشافی هستند. در این مطالعه، طبقه‌بندی‌کننده فرکتال-موجک (FWC: Fractal Wavlet Classifier) در محیط برنامه‌نویسی پایتون طراحی و سپس به‌عنوان یک افزونه در محیط QGIS (Quantum Geographic Information System) پیاده‌سازی و از داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای منطقه فلززایی طارم، به‌عنوان مقادیر ورودی برای شناسایی مناطق مستعد کانه‌زایی آهن، فسفر و عناصر خاکی کمیاب (REE) استفاده شد. سپس لایه ژئوشیمیایی در محیط GIS پردازش شد تا جوامع بی‌هنجاری از جوامع زمینه جدا شوند. این برنامه نمودارهای فرکتال را ترسیم، نقاط شکست را محاسبه و آن‌ها را در قالب فایل تصویری و اکسل ذخیره می‌نماید. برای انتخاب بهینه مرزها، مقادیر منتخب مناظر در اختیار قرار می‌گیرند تا طبق نظر کارشناسی در طبقه‌بندی نهایی اعمال شوند. فرایند مورد استفاده در این پژوهش، بر الگوریتم افزونه FWC مبتنی است و برای شناسایی مناطق امیدبخش آهن، فسفر و عناصر خاکی کمیاب به کار گرفته شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج الگوریتم افزونه FWC، برداشت صحرایی از مناطق مستعد خروجی مطالعات صورت گرفت. نتایج آنالیز نمونه‌های سنگ‌شناسی حاصل از برداشت صحرایی به صورت لایه صحت‌سنج در محیط GIS اضافه گردید و نتایج انطباق بالایی را با مناطق مستعد کانه‌زایی نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

طبقه‌بندی فرکتال-موجک

افزونه QGIS

پایتون

رسوب آبراهه‌ای

بی‌هنجاری ژئوشیمیایی

عناصر خاکی کمیاب

۱- پیش‌نوشتار

قرار گیرند، داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراهه‌ای می‌باشند، که مبتنی بر نمونه‌برداری از حوضه‌های آبریز، تجزیه و تحلیل شیوه توزیع، تحرک و رفتار عناصر در هر حوضه آبریز هستند.

از این رو، به منظور طبقه‌بندی مناسب بر روی داده‌ها، پس از جدایش جوامع عنصری برای هر یک از عناصر مرتبط با مدل اکتشافی عناصر خاکی کمیاب در منطقه (مدل آهن-آپاتیت)، طبقات براساس شدت بی‌هنجاری (آنومالی) نام‌گذاری شدند. تمام این فرایندها بر روی داده‌های مکانی بر اساس مقادیر نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در حوضه آبریز انجام می‌شود (Pourgholam et al., 2021, 2024).

داده‌های مکانی در مقیاس کاربردی به منظور برنامه‌ریزی اکتشاف سامانه‌مند (سیستماتیک) و شناسایی مناطق امیدبخش کانی‌سازی در اکتشاف، نقش ویژه‌ای دارند. از این رو، لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده می‌بایست بر اساس یک مدل اکتشافی مناسب انتخاب شوند. مدل‌های اکتشافی بیشتر مبتنی بر ویژگی‌های کانی‌سازی می‌باشند، از میان لایه‌های اطلاعاتی به عنوان متغیرهای دارای اهمیت در مدل اکتشافی، می‌توان به لایه ژئوشیمی و به‌طور خاص در مرحله اکتشاف مقدماتی و شناسایی (ناحیه‌ای) به ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای اشاره کرد. در مرحله اکتشاف مقدماتی و شناسایی ناحیه‌ای، داده‌های با مقیاس مناسب که می‌توانند مورد استفاده

* نویسنده مسئول: احمد ادیب؛ E-mail: adib@azad.ac.ir

ماخذنگاری:

ادیب، ا.، پورغلام، م.م.، افضل، پ.، ۱۴۰۵، کاربرد افزونه پایتون-جی آی اس-فرکتال-موجک برای بارزسازی مناطق امیدبخش آهن-آپاتیت در همیافتی با عناصر خاکی کمیاب در منطقه فلززایی طارم، شمال باختر ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۱)، ۹۷-۱۱۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.488096.2165>

doi: 10.22071/gsj.2025.488096.2165



doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.6.4

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

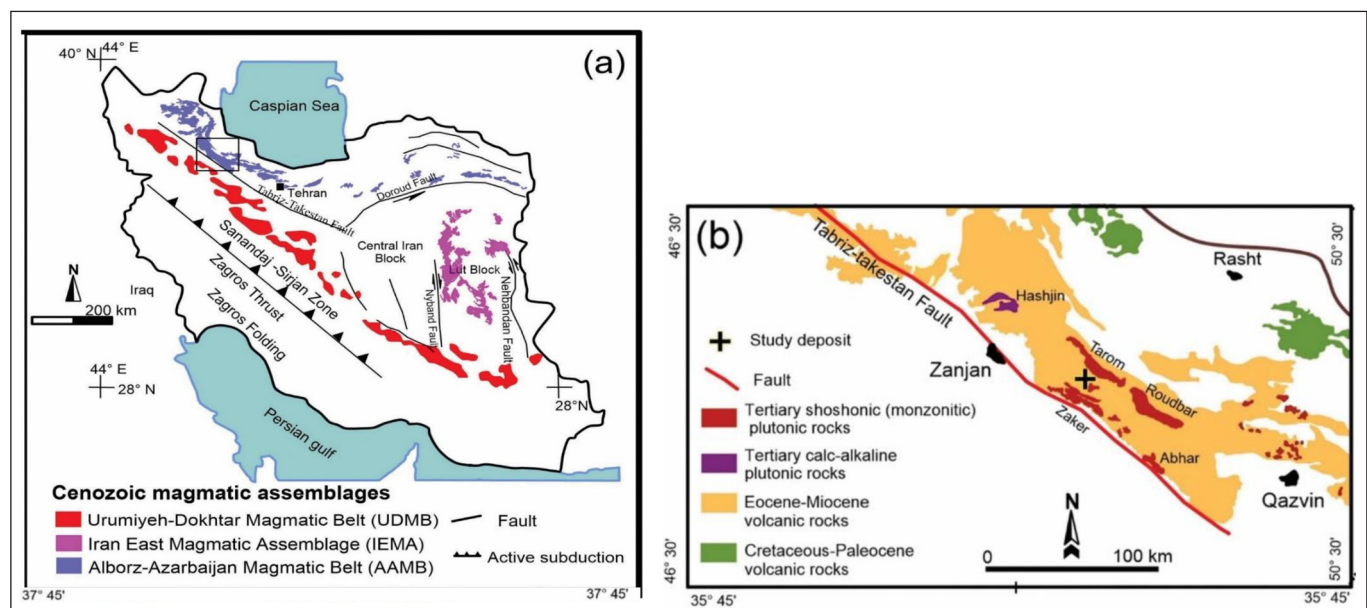
This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

مستعد معدنی از دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته است. برخی پژوهشگران نیز مطالعاتی را پیرامون این موضوع داشته‌اند (e.g., Cheng et al., 1999; Agterberg, 1995; Ali et al., 2007; Carranza, 2011; Wang et al., 2008; Zuo et al., 2009; 2012; 2015; Afzal et al., 2013; 2017; 2019; Daya, 2015; Pourgholam et al., Cheng et al., 2021; 2022b; Hadiloo et al., 2018). همچنین چنگ و همکاران (Cheng et al., 1999) یک مدل فرکتال طیف- مساحت (S-A) را برای ترسیم بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی بر اساس تبدیل فوریه سریع/ معکوس فوریه سریع (FFT/IFFT) (Cheng, 2007; Zuo, 2011; Afzal et al., 2013; 2017) پیشنهاد کردند. با این حال، پورغلام و همکاران (Pourgholam et al., 2021; 2022b) رویکرد فرکتال را با اجرای آن در حوزه موجک توسعه دادند. کدهای تولیدشده در Python/Python-GIS از آن مطالعه پیروی می‌کنند، اما تفاوت این است که داده‌های خام به‌عنوان ورودی به‌جای نقشه تصویری دوبعدی داده‌ها استفاده شده‌اند.

کانسارهای آهن-آپاتیتی خاور استان زنجان در پهنه البرز باختری-آذربایجان و منطقه طارم (شکل ۱) حاوی کانه‌زایی عناصر خاکی کمیاب مانند La، Ce، Nd و Y می‌باشد و بیشتر تمرکز عناصر خاکی کمیاب در موزانیت و آپاتیت است. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، کانی‌های اصلی نمونه‌ها شامل پلاژیوکلاز، مگنتیت، کوارتز، آپاتیت، فلوگوپیت، زئولیت، کلریت، کلسیت، هماتیت، پیریت، کالکوپیریت، کولیت، اسفالریت، لپیدوکروسیت، گوتیت و موزانیت می‌باشند (ادیب و افضل، ۱۴۰۲). منطقه طارم با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری بخشی از کمربند فلززایی طارم-هشتجین را تشکیل می‌دهد. رخنمون‌های سنگی این منطقه بیشتر سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی دوران سنوزویک هستند. ویژگی این رشته کوه واحدهای آذرآواری و آتشفشانی مانند آندزیت، ریولیت، تراکیت، تراکی آندزیت، توف لاپیلی و با حجم کم واحدهای بازالتی هستند. افزون بر این، نفوذی‌ها شامل کوارتز موزونیت، موزونیت و گرانیت ائوسن پسین-الگوسن است. بیشتر کانی‌سازی فلزی شامل Fe-P-REE و Cu-Au، Fe، Pb-Zn است (Nabatian et al., 2012; Shahbazi et al., 2021).

بنابراین، ضروری است به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی با اهمیت در محیط GIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند و محاسبات لازم همزمان با نمایش خروجی‌های گرافیکی در دسترس باشد. محاسبات ریاضی، فرایند آماری، تجزیه و تحلیل فرکتال، پردازش سیگنال و سایر مراحل باید در طول فرایند طبقه‌بندی بر روی این داده‌ها انجام شود تا نتیجه به‌عنوان یک شاخص اکتشافی برای مدل اکتشافی آماده شود. این مراحل فرایند را دچار پیچیدگی می‌کند. از این رو، برنامه پایتون به‌عنوان یک محیط برنامه‌نویسی ماژولار که باید با برنامه‌های GIS، به ویژه QGIS سازگار باشد، به ایجاد یک فرایند خودکار و راحت کمک شایانی می‌کند (Zambelli, 2013; Van Hoesen et al., 2015). پیاده‌سازی الگوریتم با استفاده از کدنویسی در محیط پایتون مبتنی بر کتابخانه‌های مناسب می‌تواند به صورتی مورد بهره‌برداری قرار گیرد که با به‌کارگیری یک رابط کاربری گرافیکی مجزا و یا در محیط یکپارچه QGIS به‌عنوان یک افزونه طراحی شده باشد. الگوریتم اصلی به‌کار گرفته شده در این برنامه مبتنی بر الگوریتم فرکتال-موجک بود که پیش‌تر توسط پورغلام و همکاران (Pourgholam et al., 2021) برای تشخیص بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی نیز مورد استفاده قرار گرفته بود. در این الگوریتم پس از تبدیل داده‌های ژئوشیمیایی دارای ارزش نقطه‌ای به تصویر دوبعدی توسط مدل ژئوشیمیایی، با نگرش سیگنال دوبعدی به تصویر خروجی مدل، با استفاده از ابزار موجک به پردازش و تحلیل سیگنال پرداخته شد. سپس در محیط نرم افزار متلب (MATLAB) بر روی مولفه‌های موجک با استفاده از الگوریتم‌های فرکتالی جوامع تحلیلی سیگنال جدایش شدند و جوامع نظیر ژئوشیمیایی در تصاویر مدل دوبعدی در محیط GIS به صورت فیلتر اعمال شد. همین الگوریتم در پژوهش دیگری توسط پورغلام و همکاران (Pourgholam et al., 2023) در محیط پایتون پیاده‌سازی گردید و سپس در قالب افزونه‌ای در محیط QGIS مورد آزمایش قرار گرفت، که در این پژوهش نیز مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

رویکرد فرکتال/چندفرکتال پیشنهاد شده توسط ماندلبروت (Mandelbrot, 1983) به‌صورت گسترده‌ای در مطالعات و پژوهش‌ها برای شناسایی بی‌هنجاری‌ها و مناطق



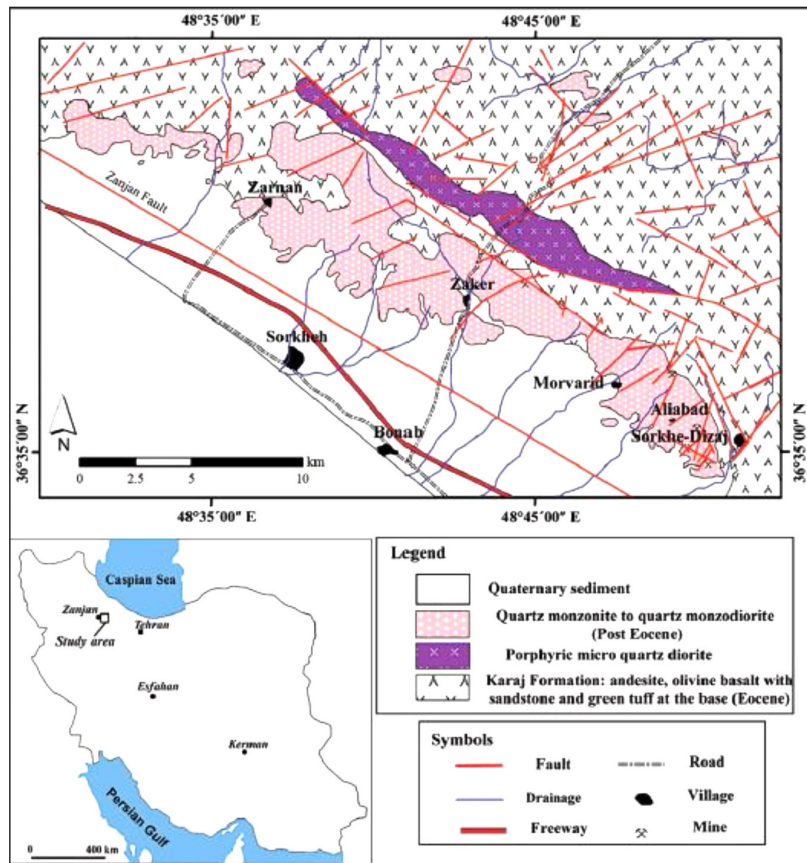
شکل ۱- (a) موقعیت ناحیه مورد مطالعه و مجموعه توده‌های ماگمایی سنوزویک در ایران (Siani et al., 2015 با تغییرات). (b) نقشه زمین‌شناسی طارم و جایگاه معدن آهن مروارید سرخه دیزج در این پهنه (Mikaeili et al., 2018 با تغییرات).

Figure 1. a) Location of Studied region and Cenozoic magmatic assemblages in Iran (modified based on Siani et al., 2015); b) Geological map of Tarom and the location of Morvarid iron mine of Sorkhe Dizaj in this zone (modified based on Mikaeili et al., 2018).

آذرین مشخص شده است (Amini, 1969).

در ناحیه طارم، درون واحدهای آتش فشانی-رسوبی ائوسن پیشین-میانی توده‌هایی با عرض ۳ تا ۵ کیلومتری و طول ۱۰ تا ۱۵ کیلومتری از کوارتز-مونزونیت، کوارتز-مونزودیوریت و مونزوگرانیت ائوسن پسین نفوذ کرده‌اند (خانمحمدی و همکاران، ۱۳۸۹؛ Nabatian et al., 2014). توده‌های نفوذی، گرانیتویدهای متآلومینوس نوع I با میل ترکیبی کالک‌آلکالن هستند (Nabatian et al., 2012). کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت (IOA) در این ناحیه شامل سرخه دیزج، علی‌آباد، مروارید، ذاکر، گلستان آباد، زرnan و چوره‌ناب می‌باشد. این کانسارها توسط کوارتز-مونزونیت‌ها، سنگ‌های آتش‌فشان‌ی و آذرآوری میزبانی می‌شوند. از نظر کانی‌شناسی، این ذخایر IOA از مگنتیت، آپاتیت، هماتیت، گونیت، مونازیت، اکتینولیت، کلینوپروکسن، پیریت، کالکوپیریت، لپیدوکروسیت، کوارتز و کلسیت تشکیل شده است (Nabatian and Ghaderi, 2013; Adib et al., 2021).

در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی-رسوبی ایران زمین، این منطقه در پهنه البرز-آذربایجان، در دامنه جنوبی زیرپهنه طارم قرار دارد. (Alavi, 1991). این پهنه از نظر ماگماتیسم، از مناطق پویا در طی دوران سنوزویک بوده است. در این دوران، ماگماتیسم شدت زیادی داشته و اوج آن در ائوسن-اولیگوسن با نفوذ باتولیت طارم همراه بوده است. در زیرپهنه ساختاری طارم توده‌های گرانیتی، کوارتزمونزونیتی تا کوارتزمونزودیوریتی و میکروکوارتزودیوریت به سن ائوسن پسین رخنمون دارند (نباتیان، ۱۳۹۱؛ Nabatian et al., 2014; Hassanzadeh et al., 2004). توده‌های نفوذی در توالی آتشفشانی-رسوبی (تناوبی از سنگ‌های آذرآوری و آتشفشانی با ترکیب ریولیت، داسیت، آندزیت و بازالت، ماسه‌سنگ، شیل توفی و سنگ آهک) ائوسن پیشین-میانی تزیق شده‌اند. ماگمایی که سنگ‌های نفوذی ناحیه را به وجود آورده است در رخداد کانه‌زایی آهن-آپاتیت-عناصر خاکی کمیاب نیز نقش داشته‌اند. در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲) کانسارهای ناحیه و ارتباط آن‌ها با توده‌های



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ناحیه طارم و موقعیت منطقه مورد مطالعه در جنوب‌خاور زنجان (امینی، ۱۳۴۸ با تغییرات)

Figure 2. Geological map of the Tarom region and the location of the studied area in the southeast of Zanjan (modified based on Amini, 1969).

۲- روش پژوهش

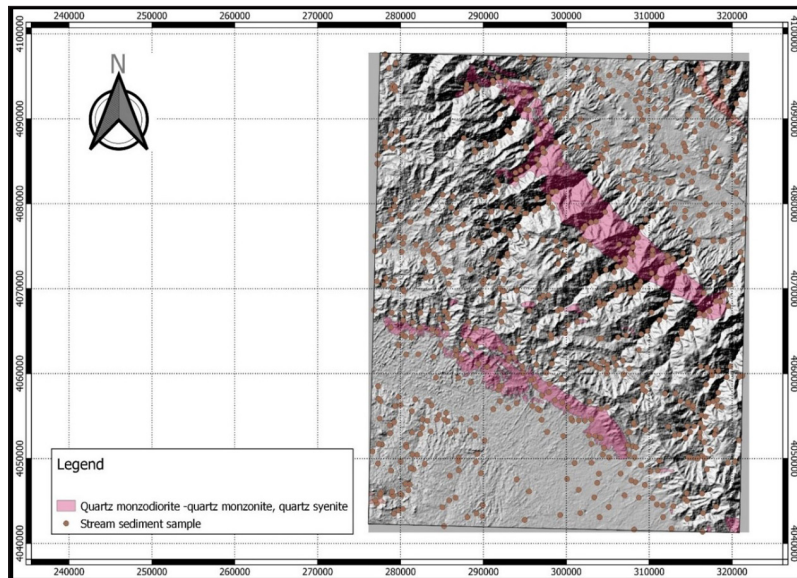
۲-۱- نمونه‌برداری

مطالعات مواد معدنی زرآما تجزیه شده است، استفاده شده است (گزارش پروژه اکتشاف سیستماتیک ژئوشیمیایی در محدوده برکه یک صد هزارم طارم، ۱۳۸۷). بخشی از داده‌های این پژوهش، دربرگیرنده بررسی‌های کتابخانه‌ای، صحرایی، آزمایشگاهی و پردازش و تفسیر داده‌ها و ارزیابی اطلاعات مربوط به منطقه و مناطق هم‌جوار از جمله گزارش‌های، پایان‌نامه‌ها، مقاله‌ها، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی می‌شود. پژوهش‌های صحرایی شامل بازدید

در این مطالعه، افزون بر داده‌های مجموعه گزارشات پروژه اکتشاف عناصر خاکی کمیاب تهیه شده در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی ایران (رحمانی و مختاری، ۱۳۸۲؛ پورغلام و همکاران، ۱۳۸۴)، از ۷۵۳ نمونه رسوب آبراهه‌ای که بر اساس شبکه نمونه‌برداری از آبراهه‌ها (شکل ۳) در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم استان زنجان جمع‌آوری و برای ۴۲ عنصر با استفاده از ICP-ES/MS در آزمایشگاه

محاسبه فرکتال را روی تمام عناصر ورودی انجام می‌دهد. از این رو، برای تشخیص بی‌هنجاری‌های کانی‌های REE در نوع کانی‌سازی تیپ آهن آپاتیتی، برای تعیین وضعیت ژئوشیمیایی مربوط به مدل اکتشافی آهن-آپاتیت، عناصر Ce, La, Nb, Sc, وضعیت ژئوشیمیایی مربوط به مدل اکتشافی آهن-آپاتیت، عناصر Y, Zr, U, Th, Ti, V, Fe, P مورد مطالعه قرار گرفتند.

بررسی صحرایی چندمرحله‌ای و سامانه‌مند از منطقه و در نهایت برداشت نمونه از رخساره‌های مختلف توده نفوذی است. بررسی‌های آزمایشگاهی شامل تهیه تیغه نازک، تیغه نازک-صیقلی و انجام پژوهش‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری و سرانجام انجام تجزیه‌های شیمیایی به روش ICP-MS است. در این پژوهش، برنامه،



شکل ۳- نقشه موقعیت نمونه‌های رسوب آبراه‌های در ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ طارم. مکان توده‌های نفوذی نیز بر روی این نقشه مشخص شده است.

Figure 3. Stream sediment samples location in the Tarom 1:100000 sheet. The location of intrusive bodies is also determined on this map.

فرایندهای پیچیده در یک حوزه فضایی برای تجزیه و تحلیل همبستگی، تبدیل و با فیلتر کردن می‌توانند در حوزه فرکانس ساده شوند (Cheng, 2007).

فیلترینگ آستانه‌گیری موجک معمولاً به عنوان یک روند/ راه حل آستانه گرفتن از ضرایب موجک در مقایسه با یک مقدار آستانه از پیش تعریف شده، با هدف فشرده‌سازی و یا خاصیت پراکندگی WT (که برای بیشتر سیگنال‌ها است) به کار برده می‌شود که بخش بزرگی از انرژی سیگنال را می‌توان با چند ضریب موجک بزرگ به دست آورد (Donoho and Johnstone, 1994; Mallat, 1989). مدل قدرت-قانون به عنوان یک اصل و منشأ عمومی برای فرکتال‌ها در نظر گرفته شد و ثابت شده است که فرکتال‌ها /چند-فرکتال‌ها سازوکار (مکانیسم) فیزیکی موثری برای توضیح و مدل‌سازی یک توزیع منفرد از فرایندهای غیرخطی هستند (Cheng, 1997; Turcotte 1997). یک تابع فرکتال (یا منفرد) که به عنوان افزایش سیگنال ثبت شده در یک فاصله معین تعریف می‌شود (Muzy et al., 1994) از ویژگی متغیر-مقیاس و ضابطه (۲) در نقطه منفرد $x \in \mathbb{Z}n$ پیروی می‌کند (Abry et al., 2012):

$$f(ax) \propto a^h f(x) \quad (2)$$

جایی که a یک عدد اسکالر است و h تابع نمایشی هُرسْت (Hurst exponent) است (Hurst, 1951) همان‌طور که پیش‌تر در رابطه با معادله (۱) و (۲) بیان شد، تبدیل موجک یک ابزار کاربردی است که می‌تواند سیگنال را در چند مقیاس تجزیه و تحلیل کند و به‌طور خاص می‌تواند تابع فرکتال $f(x)$ را به عنوان تبدیل معادله (۱) و (۲) را تجزیه کند:

$$W(a, b) = \frac{1}{a^n} \int \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) df(x), b \in \mathbb{Z}n \quad (3)$$

۲-۲- روش‌شناسی

عیارهای عنصری در مناطق مختلف معدنی شامل مقادیر زیاد غلظت در مناطق کوچک و مقادیر کم در مناطق بسیار بزرگ‌تر است. مدل‌های چند فرکتال اغلب می‌توانند این موقعیت‌ها را توضیح دهند. روابط بین نواحی و مقدار غلظت عنصر اشغال‌شده آن‌ها (عیار فلز در واحد سطح) از طریق مدل چندفرکتالی که بر اساس تابع تقسیم‌بندی ایجاد شده به دست می‌آید (Cheng et al., 1994). یورتز و ماندلبورت (Evertz and Mandelbrot, 1992) رابطه‌ای را بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده (به‌عنوان مثال، عیار سنگ معدن) و تعداد سلول‌ها محاسبه شده پیشنهاد کردند که می‌تواند بر اساس یک تابع تقسیم به صورت رابطه (۱) بیان شود:

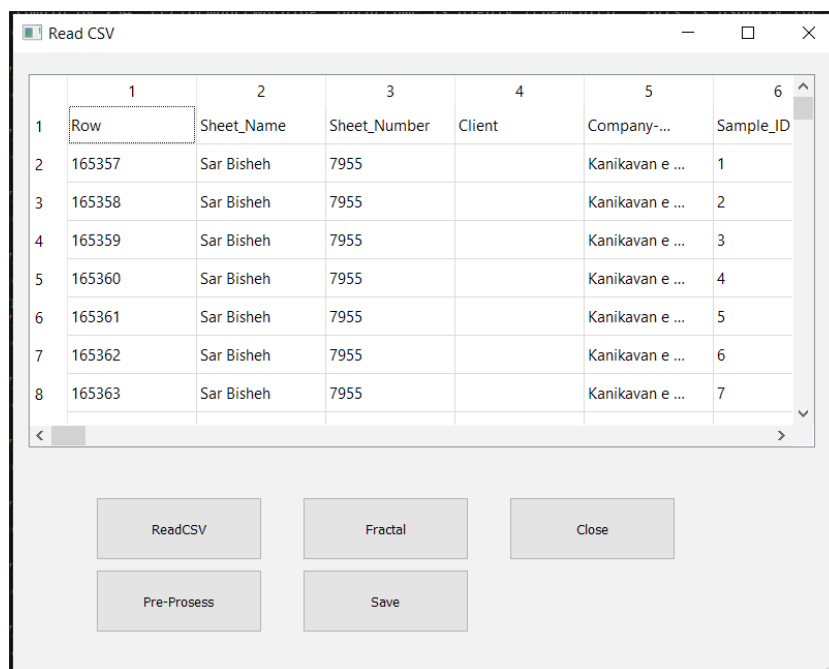
$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i^q \quad (1)$$

که در آن χ_q ، ε و μ به ترتیب تابع تقسیم، ابعاد سلول و یک پارامتر مورد مطالعه (عنصر معدنی در این مطالعه) هستند. این تابع برای پیشنهاد مدل‌های مختلف فرکتال/ چند-فرکتال کاربردی مانند تعداد-اندازه (N-S) ماندلبورت (Mandelbrot, 1983)، ناحیه-غلظت (C-A) چنگ و همکاران (Cheng et al., 1994)، و ناحیه طیف (S-A) چنگ و همکاران (Cheng et al., 1994) ضروری است.

تابع فوریه FFT/IFFT که در پردازش سیگنال و تحلیل سری‌های زمانی استفاده شده است (Cheng et al., 1999; Cheng, 2007; Zuo, 2011; Chen and Cheng, 2016; Zuo and Wang, 2016; Afzal et al., 2017) توابع چگالی انرژی طیفی توزیع طیف توان را در حوزه فرکانس نشان می‌دهند. برتری این عملیات این است که برخی از

تابع هسته $\psi(x)$ یک موجک تحلیلی است و b یک پارامتر موقعیتی است. کاربرد WT برای تجزیه و تحلیل مقیاس توابع فرکتال (افزاینده یا نوسانی) با استفاده از ضرایب موجک طبیعی ثابت شده است (Muzy et al., 1994). تجزیه و تحلیل موجک-فرکتال بر اساس موجک مادر سیم-8 (Sym8) بر روی داده‌های ژئوشیمیایی منطقه ایپک توسط پورغلام و همکاران اعمال شد (Pourgholam et al., 2021). همچنین از داده های سال ۲۰۲۲ برای طبقه‌بندی مناطق دگرسانی منطقه طارم بر روی تصاویر

تابع هسته $\psi(x)$ یک موجک تحلیلی است و b یک پارامتر موقعیتی است. کاربرد WT برای تجزیه و تحلیل مقیاس توابع فرکتال (افزاینده یا نوسانی) با استفاده از ضرایب موجک طبیعی ثابت شده است (Muzy et al., 1994). تجزیه و تحلیل موجک-فرکتال بر اساس موجک مادر سیم-8 (Sym8) بر روی داده‌های ژئوشیمیایی منطقه ایپک توسط پورغلام و همکاران اعمال شد (Pourgholam et al., 2021). همچنین از داده های سال ۲۰۲۲ برای طبقه‌بندی مناطق دگرسانی منطقه طارم بر روی تصاویر



شکل ۴- نمای از ورودی و خروجی برنامه (GUI).

Figure 4. The face of the program front-end Graphical User Interface (GUI).

۳- بحث و نتایج

تهیه شده‌اند، استفاده کرده است. فایل جدول ورودی باید در قالب XLS یا CSV باشد. نمونه‌ای از فرم استاندارد و عناوین ستون‌های آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، این برنامه از تجزیه و تحلیل داده‌های رسوب آبراهه‌ای که با فرم استاندارد در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (GSI)

Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
Ag_ppm	Al_ppm	As_ppm	Au_ppb	B_ppm	Ba_ppm	Be_ppm	Bi_ppm	Ca_ppm	Cd_ppm	Ce_ppm	Co_ppm	Cr_ppm	Cs_ppm	Cu_ppm
5.3757	82100	9.8	2	0.38	371	1.6	0.2	51700	0.09	62.3	18	75	4.2	25.2

شکل ۵- نمونه برگه‌های استاندارد ورود اطلاعات و عنوان ستون آن‌ها.

Figure 5. sample of standard sheets and their column titles.

۳- محاسبه ابعاد فرکتال برای زیر باندهای موجک

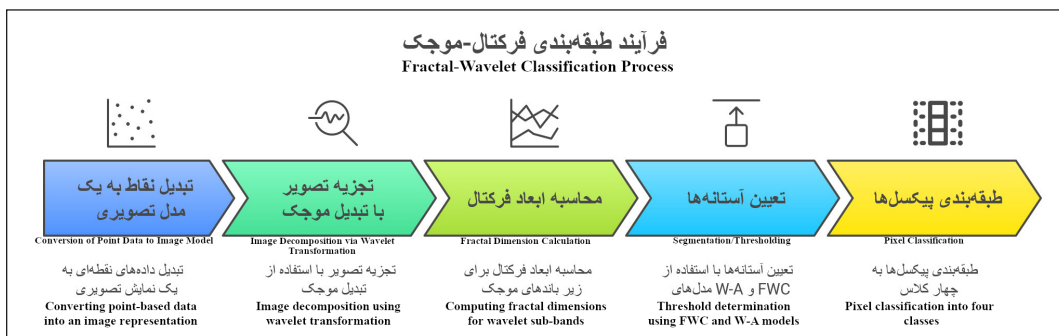
۴- تعیین آستانه‌ها با مدل W-A (Wavlet-Area) و فرکتال-موجک (FWC)

۵- طبقه‌بندی پیکسل‌ها به چهار کلاس: زمینه، پتانسیل ضعیف، متوسط و بالا. روند نمایی کلی از فرایند اجرایی الگوریتم طبقه‌بندی فرکتال-موجک مورد استفاده به شرح شکل ۶ ارائه گردید.

فرایند اجرایی ابزار طبقه‌بندی فرکتال-موجک بر اساس ترکیب تبدیل موجک گسسته (DWT) و مدل‌سازی فرکتالی توسعه یافته است (Pourgholam et al., 2021). مراحل اصلی الگوریتم مورد استفاده شامل ۵ مرحله و به شرح زیر است:

۱- تبدیل نقاط به یک مدل تصویری

۲- تجزیه تصویر با تبدیل موجک (سطح ۵، موجک Symlet 8)

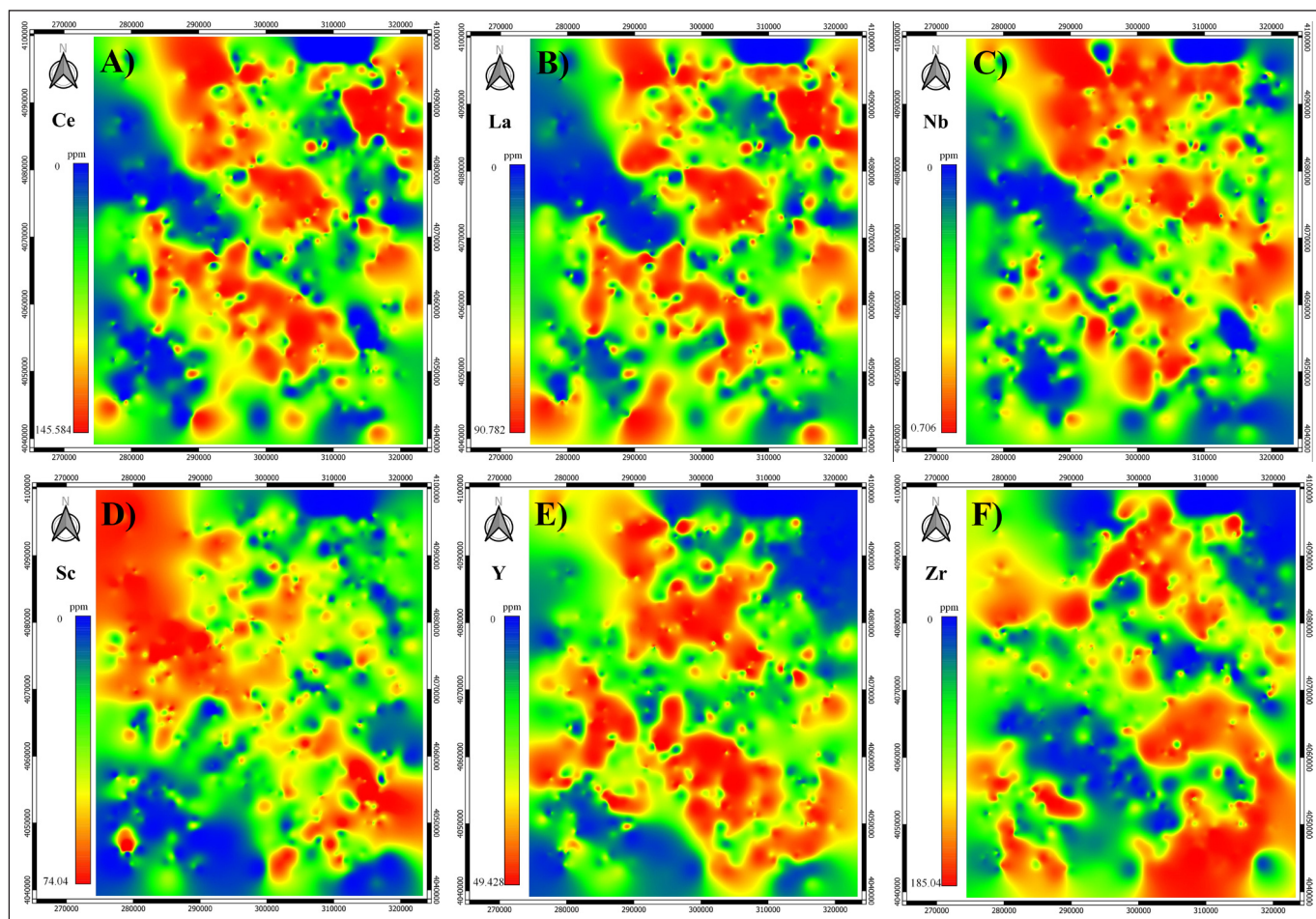


شکل ۶- روندنمای کلی فرآیند اجرای الگوریتم طبقه بندی فرکتال-موجک.

Figure 6. Flowchart of the fractal-wavelet classification algorithm execution process.

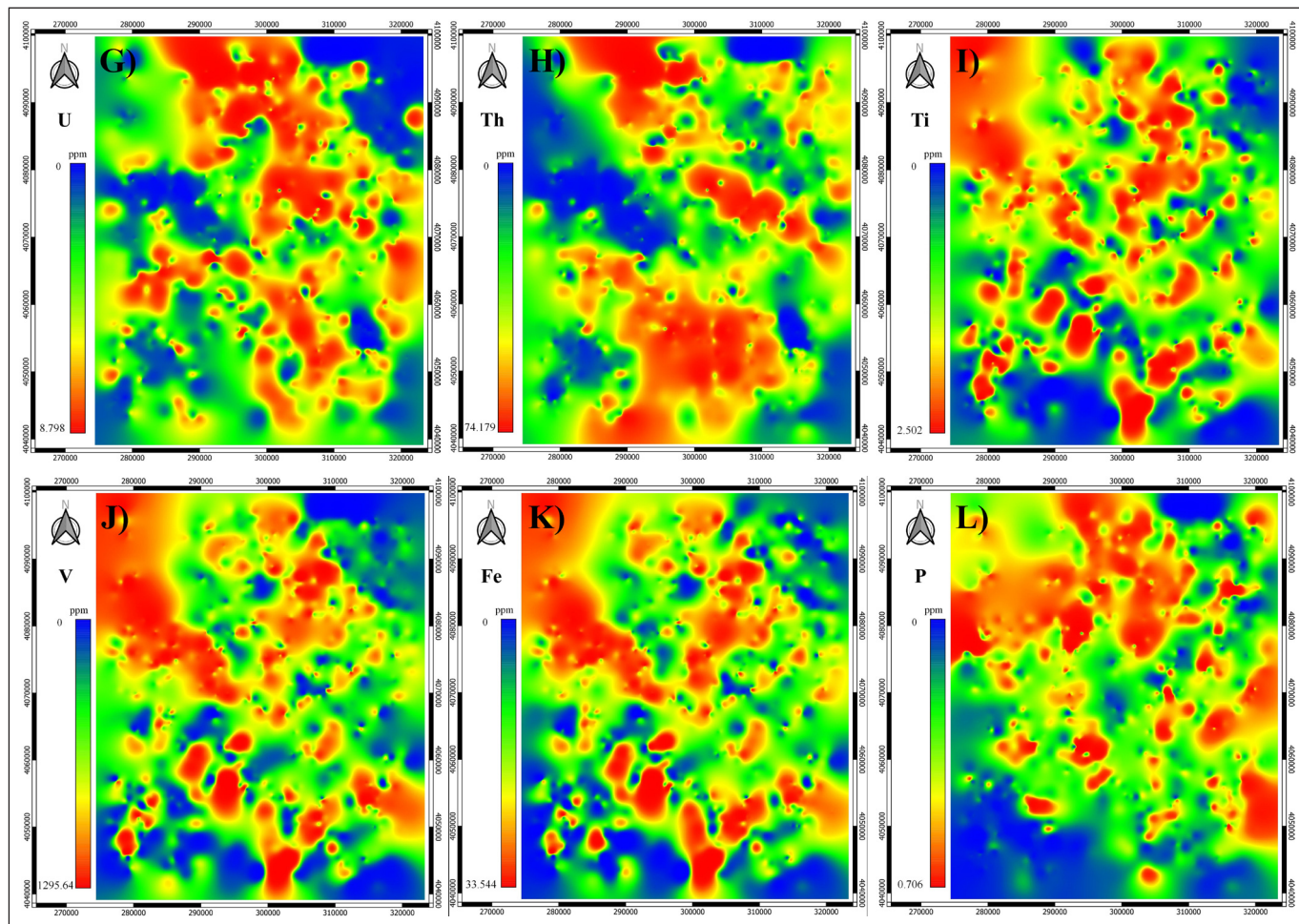
و سرعت پردازش مناسب از این مدل‌سازی به دست آورده بودند و در این الگوریتم حاضر نیز به صورت خودکار مورد استفاده قرار گرفت. برخی از نتایج تولید تصاویر نقشه‌های تک عنصری با روش MBS در ادامه این بخش ارائه گردیده است. با توجه به مدل اکتشافی مورد مطالعه در ارتباط با عناصر نادر خاکی، مدل‌های دوبعدی تصویری از مقادیر تک عنصری عناصر نادر خاکی متعلق به دسته عناصر برگزیده تولید گردید که نتایج این مدل‌سازی در شکل ۷ ارائه گردیده‌اند.

پایه‌سازی الگوریتم در محیط QGIS-Python انجام شده و به صورت افزونه FWC در دسترس قرار گرفت و قابلیت عمومی سازی و انتشار دارد (Pourgholam et al., 2024). در ادامه این پژوهش، به منظور انجام پردازش‌های تصویری لازم بر روی داده‌های تک عنصری، نقشه‌های تک عنصری با استفاده از روش مدل‌سازی Multi B Spline (MBS) استفاده گردید که پیش‌تر توسط پورغلام و همکاران (Pourgholam et al., 2024) در پژوهشی مشابه نتایجی شایان توجهی با دقت و کیفیت مناسب



شکل ۷- نقشه‌های تک عنصری مربوط به تولید مدل دوبعدی تصویری از مقادیر تک عنصری عناصر نادر خاکی متعلق به دسته عناصر برگزیده، (A) عنصر Ce، (B) عنصر La، (C) عنصر Nb، (D) عنصر Sc، (E) عنصر Y، (F) عنصر Zr

Figure 7. Single-element maps related to the generation of a two-dimensional image model of single-element values for REEs belonging to the selected elements group: A) element Ce, B) element La, C) element Nb, D) element Sc, E) element Y, F) element Zr,



ادامه شکل ۷- نقشه‌های تک عنصری مربوط به تولید مدل دوبعدی تصویری از مقادیر تک عنصری عناصر نادرخاکی متعلق به دسته عناصر برگزیده، - عنصر (G، U، عنصر (H، Th، عنصر (I، Ti، عنصر (J، V، عنصر (K، Fe، عنصر (L، P.

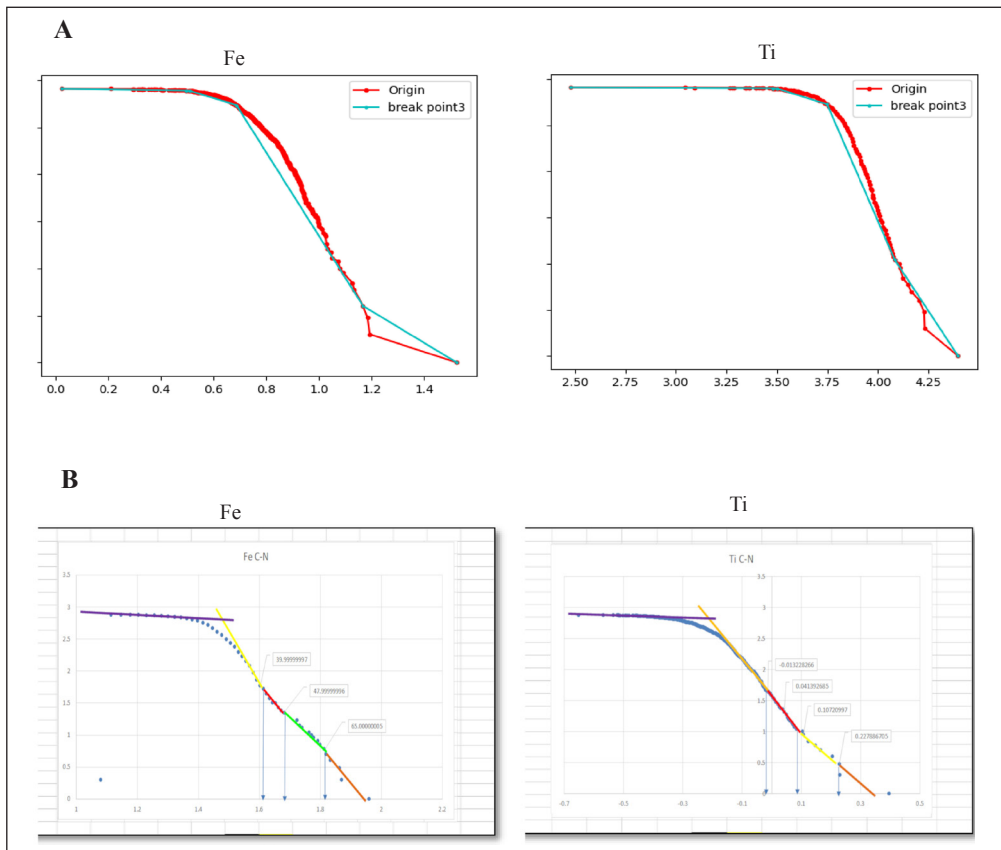
Continued from Figure 7. Single-element maps related to the generation of a two-dimensional image model of single-element values for REEs belonging to the selected elements group: G) element U, H) element Th, I) element Ti, J) element V, K) element Fe, L) element p.

افزوده شد. نتایج نهایی الگوریتم برنامه FWC-Python پس از اعمال حدود آستانه‌ای بر روی نقشه‌های تک عنصری مدل شده، اعمال گردید. پس از جمع نقشه‌های تک‌عنصری با روش بهینه ادغام ژرف که پیش‌تر پورغلام و همکاران (Pourgholam et al., 2024) در پژوهشی بر روی داده‌های ژئوشیمی انجام داده بودند، به منظور برنامه‌ریزی صحرایی کلاس‌های نهایی دارای امتیاز ژئوشیمیایی مرتبط با مدل اکتشافی آهن-آپاتیت ارائه شد و همچنین بر روی آن نقاط هدف جهت برداشت نمونه به منظور صحت‌سنجی در ارتباط با واحد مستعد زمین‌شناسی تعبیه گردید (شکل ۹).

برای بررسی و صحت‌سنجی نتایج نهایی، نتایج محاسبات برنامه و خروجی‌ها با اعمال حدود آستانه‌ها بر روی نقشه‌های بی‌هنجاری ژئوشیمیایی بررسی و سپس نتایج آنالیز حاصل از نمونه‌های سنگی برداشت شده برای کنترل بی‌هنجاری به عنوان لایه شاهد مستقیم با عارضه‌های هدف مورد مطالعه، در محیط QGIS تهیه شد. نمونه‌هایی از آهن-آپاتیت با پتانسیل بالا به‌عنوان هدف ماده معدنی اصلی مانند معادن، اندیس و مناطق دارای برونزد با عبار بالا جمع‌آوری شدند. نتایج شاخص که بر روی نقشه نهایی برهم‌نهی شکل ۱۰ نیز نمایش داده شده است، با رعایت ملاحظات اجرایی، مراحل انجام این پروژه در جدول ۱ ارائه می‌شود.

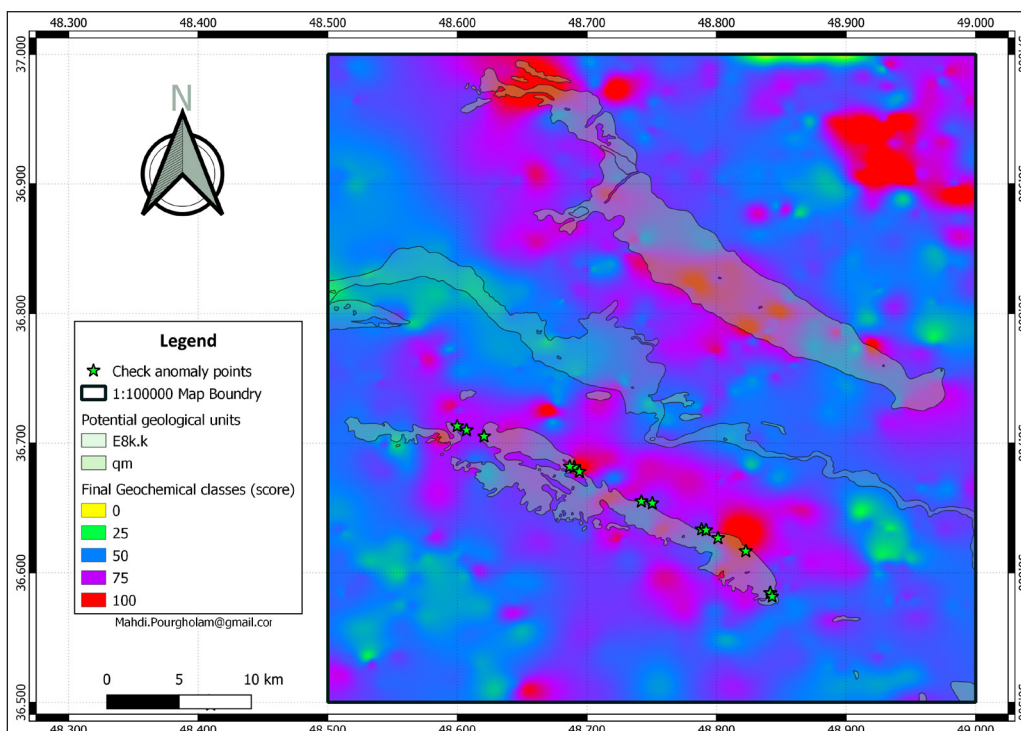
پس از تولید ورودی‌های مناسب برای ابزار طبقه فرکتال- موجک (FWC) به صورت خودکار در الگوریتم اجرایی، در محیط عملیاتی پایتون محیط GIS قابلیت محاسبه فرایند فرکتال و همچنین رسم نمودارهای فرکتال با استفاده از کتابخانه Matplot Python و سپس محاسبه نقاط شکست نمودار با استفاده از بازه‌های مناسب و پیشنهاد خط به جوامع (کلاس‌ها) به‌دست آمده، تعبیه گردید. الگوریتم در براش کردن منحنی مناسب به نمودار فرکتال در نتایج از دقت به‌نسبت قابل قبولی برخوردار بود. در این پژوهش سعی بر آن شد که در عین خودکارسازی فرایند، نقاط شکست یا به عبارتی حدود آستانه با دقت قابل قبولی محاسبه شوند. همچنین این قابلیت نیز در نظر گرفته شد که به صورت دستی نیز امکان انتخاب نقاط شکست مورد نظر باشد. برخی از نتایج نمودارهای فرکتال ترسیم‌شده توسط FWC-Python در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

همچنین گزینه دیگری در برنامه FWC-python تعبیه شد که برای نتایج نهایی حدود آستانه و نقاط شکست تناظر با مقادیر اصلی عناصر و دیگر مقادیر لازم جهت تجزیه و تحلیل‌های ژئوشیمیایی و طبقه‌بندی عنصری نقشه‌های ژئوشیمی، در یک فایل CSV در همان پوشه به همراه نمودارهای خروجی ذخیره شود. این برنامه همچنین با استفاده از یک پیوند اجرایی از FWC-python به QGIS



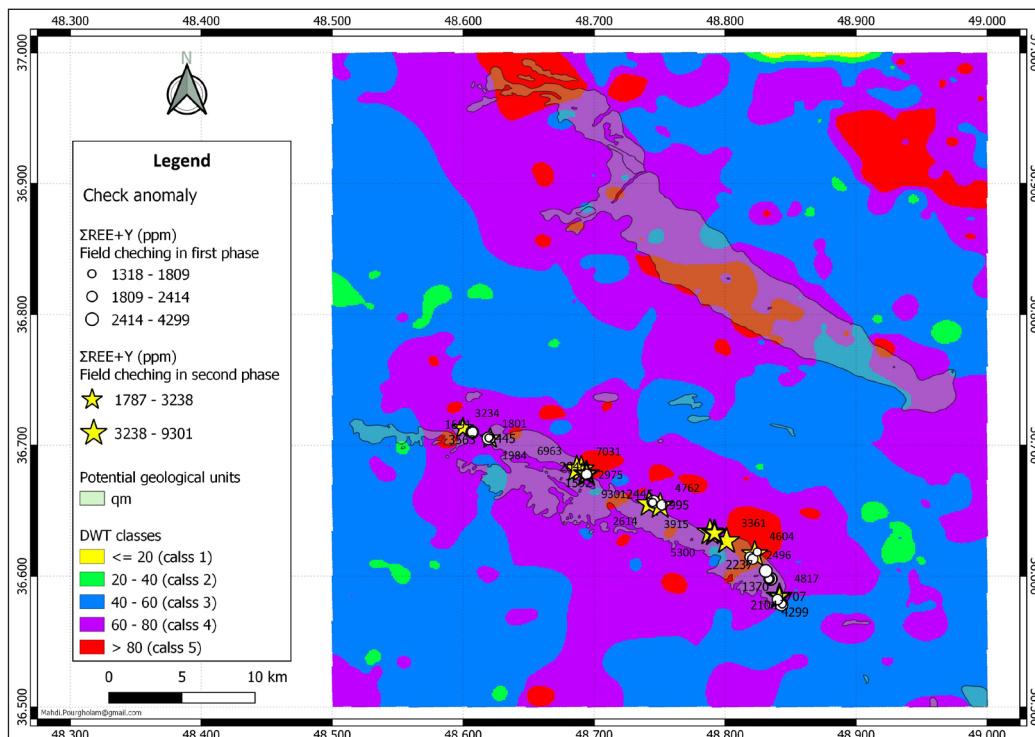
شکل ۸- A) برخی از نمودارهای اولیه حاصل از نتایج فرکتال ترسیم شده توسط FWC پایتون برای تعدادی از عناصر، B) نتایج نهایی ترسیم نمودارهای فرکتالی.

Figure 8. A) Some of the fractal results plots drawn by the FWC-Python for a number of elements, B) The final results of drawing fractal diagrams.



شکل ۹- نقشهٔ تجمیعی نهایی امتیاز ژئوشیمیایی مرتبط با کنترل بی‌هنجاری و نقاط نمونه‌برداری در شمال‌خاور استان زنجان.

Figure 9. The integrated Map of final Geochemical score classes and allocation of the check anomaly points locations for sampling. NE Zanjan Province.



شکل ۱۰- ارتباط بین نتایج برنامه FWC-python و بررسی بی‌هنجاری نمونه‌های آهن-آپاتیتی، شمال‌خاور استان زنجان.

Figure 10. The Correlation between FWC-python program results and anomaly checking of iron-apatite samples, NE Zanzan Province.

جدول ۱- نتایج برداشت صحرایی (کنترل بی‌هنجاری) جهت صحت‌سنجی نتایج خروجی از فرایند مطالعه پژوهش.

Table 1. The anomaly checking results for validating the study process results.

ΣREE+Y	ΣREE	Y	Lu	Yb	Tm	Er	Ho	Dy	Tb	Gd	Eu	Sm	Nd	Pr	Ce	La	
92	72	20.4	0.3	1.6	0.3	1.6	0.7	2.8	0.5	2.5	1.5	4.8	14.3	3.3	24.3	13.1	AL-2
3754	3343	410.7	5.6	36.5	6.9	48.6	17.1	88.7	16.5	132.1	6.1	123.0	642.8	168.8	1414.2	636.3	ALI-6
3563	3041	522.4	7.1	45.4	8.6	57.1	21.3	102.8	17.0	107.4	7.3	120.7	629.4	154.9	1216.4	545.2	CH-3
2427	2112	315.4	3.6	28.4	4.7	33.1	12.6	62.3	12.1	69.2	3.9	79.3	530.1	112.8	828.8	331.0	ES-3
2591	2175	415.8	5.3	39.0	6.3	44.1	16.7	75.1	13.5	77.4	3.8	90.3	520.0	112.5	829.4	341.4	ES-6
2233	1929	304.0	3.5	26.9	4.5	30.3	12.3	51.9	10.9	66.9	3.5	69.4	413.1	101.8	776.3	357.6	ES-7
2414	1991	422.8	5.1	36.2	6.2	41.1	16.1	63.4	12.2	65.7	2.3	74.2	415.1	99.3	794.2	360.1	MO-1
2780	2578	202.0	2.5	17.1	3.0	23.5	8.0	45.8	8.0	74.4	2.4	62.1	454.2	123.8	1110.6	642.8	MO-3-4
2237	1945	292.2	3.6	25.2	4.4	29.3	11.1	53.4	9.7	68.3	2.2	63.1	345.8	99.0	829.1	400.8	MO-5
163	108	55.2	1.0	7.3	1.2	5.8	2.1	8.6	1.3	6.0	0.5	6.5	25.2	5.0	27.5	9.8	SOR-10
2104	1880	224.0	2.9	20.4	3.4	25.9	9.1	50.5	8.5	60.2	2.9	60.8	379.1	89.8	775.7	390.4	SOR-11
4299	3833	466.1	6.8	44.2	7.7	57.4	19.0	101.7	17.2	134.1	7.3	133.7	749.1	178.4	1625.4	751.1	SOR-2
2445	2075	369.9	4.4	31.7	5.7	37.1	14.9	67.5	12.9	74.5	4.5	84.5	451.5	106.0	798.9	381.0	ZA-4

عناصر مدل اکتشافی آهن-آپاتیت در منطقه حاصل از الگوریتم و برنامه FWC-Python به صورت طبقه‌ها و کلاس‌های دارای ارزش پتانسیل عناصر خاکی کمیاب و نتایج عیاری دارای ارزش مکانی حاصل از برداشت صحرایی، نشان‌دهنده همبستگی بالا و دقت مناسب الگوریتم خودکار FWC-Python می‌باشد و ارتباط بین نتایج برنامه FWC-Python و نتایج بررسی‌های صحرایی آهن-آپاتیت در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

نتایج بررسی‌های صحرایی و آنالیز نمونه‌های برداشت شده بیشتر به صورت نمونه‌برداری لب‌پری (Chip sampling) صورت گرفت و به روش آزمایشگاهی ICP-MS برای ۵۳ عنصر مورد تجزیه قرار گرفت. از میان ۵۳ عنصر، ۱۴ عنصر کمیاب خاکی نیز با دقت بالا تجزیه شده‌است و نتایج تک‌عنصری و تجمعی این عناصر افزون بر ایتیم (Y) به منظور بررسی تکمیلی در جدول ۱ آورده شده‌است. نتایج خروجی تجمعی دسته

۴- نتیجه گیری

اعمال آستانه‌های پویا است. همچنین، امکان تعامل کاربر (Expert Knowledge) برای تعدیل نهایی مرزهای طبقات، انعطاف‌پذیری لازم را در فرایند اکتشاف فراهم می‌کند. این ویژگی، الگوریتم FWC را به عنوان ابزاری قدرتمند و در عین حال کاربرپسند در محیط QGIS متمایز می‌سازد.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که افزونه طراحی شده نه تنها از دقت و قابلیت اطمینان بالایی در شناسایی مناطق مستعد برخوردار است، بلکه به دلیل یکپارچه‌سازی در محیط GIS، فرایند اکتشاف سامانه‌مند را سرعت می‌بخشد و هزینه‌های مطالعات میدانی را کاهش می‌دهد. پیشنهاد می‌شود این روش در مناطق مشابه با زمینه زمین‌شناسی و مدل کانه‌زایی یکسان نیز مورد آزمایش قرار گیرد و قابلیت‌های آن برای اکتشاف سایر انواع کانسارها توسعه یابد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به جهت تامین بخشی از داده‌های این پژوهش و همچنین حمایت‌های معنوی آن سازمان محترم و همچنین از حمایت‌های مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب و سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران که در انجام این پژوهش ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

باتوجه به هدف این مقاله مبنی بر کاربرد افزونه پایتون-جی آی اس- فرکتال-موجک برای بارزسازی مناطق امیدبخش آهن-آپاتیت این مطالعه با هدف توسعه و کاربرد یک افزونه یکپارچه در محیط QGIS استفاده از قابلیت‌های پایتون و مبتنی بر طبقه‌بندی فرکتال-موجک (FWC) برای بارزسازی مناطق امیدبخش آهن-آپاتیت همراه با عناصر خاکی کمیاب در منطقه فلززایی طارم انجام شد. خروجی‌های این پژوهش نشان داد که الگوریتم پیاده‌سازی شده قادر است با دقت و کارایی بالا، داده‌های ژئوشیمیایی پیچیده را پردازش کرده و بی‌هنجاری‌های مرتبط با مدل اکتشافی آهن-آپاتیت را از زمینه جدا نماید.

بر اساس نتایج حاصل از اجرای الگوریتم FWC-Python بر روی ۷۵۳ نمونه رسوب آبراهه‌ای، نقشه‌های تک‌عنصری و تجمیعی تهیه شد که در نهایت به شناسایی چندین منطقه امیدبخش در شمال‌خاور استان زنجان انجامید. صحت‌سنجی این نتایج از طریق برداشت‌های صحرائی سامانه‌مند و آنالیز نمونه‌های سنگی به روش ICP-MS انجام گرفت. تطابق شایان‌توجه بین مناطق پیشنهادی الگوریتم و نمونه‌های سنگی با عیار بالای آهن، آپاتیت و عناصر خاکی کمیاب (مانند لانتانیم، سربیم و نئودیمیم)، گویای کارایی بالایی این روش در شناسایی دقیق کانون‌های کانه‌زایی است. یکی از نقاط قوت روش ارائه‌شده، قابلیت خودکارسازی فرایندهای پیچیده پردازش داده‌ها، از جمله ترسیم نمودارهای فرکتال، تعیین نقاط شکست بهینه و

کتابنگاری

- ادیب، ا. و افضل، پ.، ۱۴۰۲، انحلال عناصر نادر خاکی از باطله‌های سنگ آهن آپاتیتی معدن مروارید زنجان با روش فروشویی و هضم اسیدی، فصلنامه علمی علوم زمین، دوره ۳۴، شماره ۱، پیاپی ۱۳۱، صفحه ۸۱ تا ۹۸. 10.22071/2023.384172.gsj
- امینی، ب.، ۱۳۴۸، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم، سازمان زمین‌شناسی ایران.
- پورغلام، م.م.، رجیبی، ح.، اثنی عشری، ع. و دیداری، ح.، ۱۳۸۴، گزارش بررسی محصولات جانبی معادن، پروژه اکتشاف عناصر نادر خاکی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی ایران.
- خانمحمدی، ن.، خاکزاد، ع.، ایزدیار، ج.، ۱۳۸۹، بافت کانی‌شناسی و پیدایش کانسار آهن آپاتیت ذاکر (شرق زنجان). فصل نامه علمی، علوم زمین. سال ۱۹، شماره ۷۶، ۱۱۹-۱۲۶. 10.22071/2009.55669.gsj
- رحمانی، ش. و مختاری، ع.ا.، ۱۳۸۲، گزارش پروژه اکتشاف عناصر کمیاب خاکی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی ایران.
- گروه ژئوشیمی معاونت اکتشاف، ۱۳۸۷، گزارش پروژه اکتشاف سیستماتیک ژئوشیمیایی در محدوده برکه یکصد هزارم طارم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی ایران.
- نابتیان، ق.، ۱۳۹۱، زمین‌شناسی، ژئوشیمی و تکامل کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در کمر بند ماگمایی طارم (البرز غربی)، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

References

- Abry, P., Jaffard, S., and Wendt, H., 2012. Irregularities and Scaling in Signal and Image Processing: Multifractal Analysis https://doi.org/10.1142/9789814366076_0003.
- Adib, A., and Afzal, P., 2024. Dissolution of rare earth elements from Zanjan Morvarid iron ore tailings by leaching and acid digestion method., *Scientific Quarterly Journal of Geosciences (https://www.gsjournal.ir)*, Vol. 34, Issue 1, Serial No. 131, pp. 81-98. 10.22071/gsj.2023.384172.2061. (in Persian).
- Adib, A., Nabilou, M., and Afzal, P., 2021. Relationship between Fe-Cu-REEs mineralization and magnetic basement faults using multifractal modeling in Tarom region, NW Iran, Episodes, doi.org/10.18814/epiugs / 2021/021017.
- 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. *J Geochem Explor* 108, 220-232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>.
- Afzal, P., Harati, H., Fadakar Alghalandis, Y., and Yasrebi, A.B., 2013. Application of spectrum-area fractal model to identify of geochemical anomalies based on soil data in Kahang porphyry-type Cu deposit, Iran. *Chemie der Erde/Geochemistry*, 73, 533-543. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.08.001>.

- Afzal, P., Heidari, S.M., Ghaderi, M., and Yasrebi, A.B., 2017. Determination of mineralization stages using correlation between geochemical fractal modeling and geological data in Arabshah sedimentary rock-hosted epithermal gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 91: 278-295. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.017>.
- Afzal, P., Yousefi, M., Mirzaei, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., and Daneshvar Saein, L., 2019. Delineation of podiform-type chromite mineralization using Geochemical Mineralization Prospectivity Index (GMPI) and staged factor analysis in Balvard area (southern Iran). *J. Mining and Environment*. 10, 705-715. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.7785.1652>.
- Agterberg F.P., 1995. Multifractal modeling of the sizes and grades of giant and supergiant deposits. *Int Geol Rev* 37, 1-8. <https://doi.org/10.1080/00206819509465388>.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys remnants in northeastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1991, 983-992. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)1032.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)1032.3.CO;2).
- Ali, Kh., Cheng, Q., and Zhijun, C., 2007. Multifractal power spectrum and singularity analysis for modelling stream sediment geochemical distribution patterns to identify anomalies related to gold mineralization in Yunnan Province, South China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 7 (4), 293-301. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/06-116>.
- Amini, B., 1969. *Tarom 1:100000, Geological map, Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Carranza, E.J.M., 2011. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration* 110, 167-185. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.007>.
- Cheng, Q., 2007. Multifractal imaging filtering and decomposition methods in space, Fourier frequency, and eigen domains. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14(3), pp. 293-303.
- Chen, G., and Cheng, Q., 2016. Singularity analysis based on wavelet transform of fractal measures for identifying geochemical anomaly in mineral exploration. *Computers & Geosciences*, 87, pp. 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.11.008>.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *J. Geochem. Explor.* Volume 51, Issue 2, 109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2).
- Cheng, Q., Xu, Y., and Grunsky, E., 1999. Integrated spatial and spectral analysis for geochemical anomaly separation. in *Proc. of the Conference of the International Association for Mathematical Geology*, S.J. Lippard, A. Naess and R. Sinding-Larsen (Eds.) Trondheim, Norway, Vol. 1, 87-92.
- Cheng, Q., 1999. Multifractality and spatial statistics. *Comput Geosci* 25:949-961. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00060-6).
- Daya, A.A., 2015. Comparative study of C-A, C-P, and N-S fractal methods for separating geochemical anomalies from background: A case study of Kamoshgaran region, northwest of Iran. *J Geochem Explor* 150, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.017>.
- Donoho, D.L., Johnstone, J.M., 1994. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika* 81:425-455. <https://doi.org/10.1093/biomet/81.3.425>.
- Evertz, C.J.G., and Mandelbrot, B.B., 1992. Multifractal measures (appendix B), In: Peitgen, H.-O., Jurgens, H., Saupe, D. (Eds.). *Chaos and Fractals*. Springer, New York.
- Geochemistry Group, Exploration Deputy, 2008. Report of the systematic geochemical exploration project in the Tarom 1:100,000 sheet area, Geological and Mineral Exploration Organization of Iran (In Persian)*.
- Hadiloo, S., Mirzaei, S., Hashemi, H., and Beiranvand, B., 2018. Comparison between unsupervised and supervised fuzzy clustering method in interactive mode to obtain the best result for extract subtle patterns from seismic facies maps. *Geopersia* 8 (1), 2018, PP. 27-34 DOI: 10.22059/GEOPE.2017.240099.648346.
- Hassanzadeh, J., Axen, G., Guest, B., Stockli, D.F., and Ghazi, A.M., 2004. The Alborz and NW Urumieh-Dokhtar magmatic belts, Iran: rifted parts of a single ancestral arc. *Geological Society of America National Meeting*. Geological Society of America, Denver, Colorado, 434.
- Hurst, H.E., 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 116: 770. doi:10.1061/TACEAT.0006518.
- Khanmohamadi, N., Khakzad, A., and Izadyar, J., 2010. Mineralogy texture and genesis of Zaker iron- apatite deposit (NE Zanjan). Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 76, 119-126. 10.22071/gsj.2009.55669. (in Persian)*.
- Mallat, S., 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11 (7), 674-693. <https://doi.org/10.1109/34.192463>.
- Mallat, S., 1999. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 2nd ed. San Diego: Academic Press. (ISBN: 9780124666061).
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. WH Freeman, San Francisco, 468.

- Mikaeili, K., Hosseinzadeh, M.R., Moayyed, M., and Maghfouri, S., 2018. The Shah-Ali-Beiglou Zn-Pb-Cu(-Ag) Deposit, Iran: An Example of Intermediate Sulfidation Epithermal Type Mineralization, *Minerals*, 8, 148; doi:10.3390/min8040148. <https://doi.org/10.3390/min8040148>.
- Muzy, J.-F., Bacry, E., and Arneodo, A., 1994. The multifractal formalism revisited with wavelets. *Int J Bifurc Chaos* 4:245–302. <https://doi.org/10.1142/S0218127494000204>.
- Nabatian, G., 2012. *Geology, geochemistry and evolution of iron oxide-apatite deposits in the Tarom volcano-plutonic belt, western Alborz*. Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian).
- Nabatian, Gh., and Ghaderi, M., 2013. Oxygen isotope and fluid inclusion study of the Sorkheh-Dizaj iron oxideapatite deposit, NW Iran. *International Geology Review*. 55(4), 397-410. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.713548>.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V., and Honarmand, M., 2014. Geology, alteration, age and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 49, 217–234. <https://doi.org/10.1007/s00126-013-0484-1>.
- Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Daliran, F., and Rashidnejhad Omran, N., 2012. Sorkheh-Dizaj Iron Oxide-Apatite Ore Deposit in the Cenozoic Alborz-Azərbaycan Magmatic Belt, NW Iran. *Resource Geology*. 63 (1), 42–56. <https://doi.org/10.1111/rge.12002>.
- Pourgholam, M. M., Afzal, P., Adib, A., Rahbar, K., and Gholinejad, M., 2023. Fractal-wavelet classifier as a QGIS plugin and python program for geochemical anomalies. In: *The Second National Conference of New Technologies in Energy and Materials*, Tehran. <https://civilica.com/doc/1824524>.
- Pourgholam, M. M., and Afzal, P., Adib, A., Rahbar, K., and Gholinejad, M., 2024. Recognition of REEs anomalies using an image Fusion fractal-wavelet model in Tarom metallogenic zone, NW Iran. *Geochemistry*, 126093, ISSN 0009-2819 (<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126093>).
- Pourgholam, M.M., Afzal, P., Adib, A., Rahbar, K., and Gholinejad, M., 2022a, Rahmani, S, H., and Mokhtari, A., 2003. *Report of the project of exploration of rare earth elements, Geological and Mineral Exploration Organization of Iran (In Persian)*.
- Pourgholam, M.M., Afzal, P., Adib, A., Rahbar, K., and Gholinejad, M., 2022b. Delineation of Iron Alteration Zones using Spectrum-Area Fractal Model and TOPSIS Decision-Making Method in Tarom Metallogenic Zone, NW Iran. *Journal of Mining and Environment (JME)* 13, 2, 503-525. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11574.2105>.
- Pourgholam, M.M., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Gholinejad, M., and Wetherelt, A., 2021. Detection of geochemical anomalies using a fractal-wavelet model in Ipack area, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 220, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106675>.
- Rahmani, Sh., and Mokhtari, A., 2003. *Report of the project of exploration of rare earth elements, Geological and Mineral Exploration Organization of Iran (In Persian)*.
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., and Afzal, P., 2021. Prognosis of gold mineralization phases by multifractal modeling in the Zehabad epithermal deposit, NW Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 13, 31-40. <https://doi.org/10.30495/ijes.2021.17301>.
- Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Wilkinson, C.M., and Ganerod, M., 2015. Geochemistry and geochronology of the volcano-plutonic rocks associated with the Glojeh epithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geoscience*, 7, 207–222. (<https://doi.org/10.1515/geo-2015-0017>).
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge
- Wendt H, Roux SG, Jaffard S, Abry P (2009) Wavelet leaders and bootstrap for multifractal analysis of images. *Signal Process* 89:1100–1114.
- Van Hoesen, J., Menke, K., Smith, R., and Davis, P., 2015. *Introduction to Geospatial Technology Using QGIS*. <https://www.canvas.net/browse/delmarcollege/courses/introduction-to-geospatial-technology-1>.
- 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 Geol Sin* 82, 896–905. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2008.tb00646.x>.
- Zambelli, P., Gebbert, S., and Ciolli, M., 2013. An object-oriented Python application programming interface (API) for geographic resources analysis support system (GRASS) geographic information system (GIS). *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2013, 2, 201–219. [Google Scholar] [CrossRef]. <https://doi.org/10.3390/ijgi2010201>.
- Zuo, R., and Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 164, pp. 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.010>.
- Zuo, R., Carranza, E.J.M., and Cheng, Q., 2012. Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.09.002>.

- Zuo, R., Cheng, Q., and Xia, Q., 2009. Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *J Geochem Explor* 102, 37-43.
- Zuo, R., 2011. 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), pp. 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.06.012>.
- Zuo, R., Zhang, Z., Zhang, D., Carranza, E.J.M., and Wang, H., 2015. Evaluation of uncertainty in mineral prospectivity mapping due to missing evidence: a case study with skarn-type Fe deposits in Southwestern Fujian Province, China. *Ore Geology Reviews*, 71, pp. 502-515. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.024>.