

Research Article

## Identifying high potential area of porphyry copper mineralization using the Aaptive Nero fuzzy method in Shahre-Babak studied area, Kerman province

Moslem Jahantigh<sup>1</sup>, Hamid Reza Ramazi<sup>2\*</sup>, Hosein Ferdusi<sup>3</sup>, Zahra Jafari<sup>4</sup>

1-Phd student in mineral exploration, Amir Kabir university, Tehran, Iran

2-Department of Mineral Exploration, Faculty of Mine, Amir Kabir university, Tehran, Iran

3-Phd student in mineral exploration, Tehran university, Tehran, Iran

4-Khavarar Kavesh Zahid Consulting Engineers Co

**Keywords:** Karst, Khederzende spring, Recession curve, Stable isotopes (18O, 2H)

### 1-Introduction

The study area of Shahre-Babak is a part of the Urmia Dokhtar magmatic arc (UMDA). The extent of the study area is about 1977 km<sup>2</sup>, which is located in the eastern part of Kerman province and approximately 170 kilometers far from Kerman city. The study area is on the 1:100,000 geology map of Shahre Babak, a high-potential area for porphyry copper mineralization.

### 2- Materials and methods

Predictive maps include nine layers of lithology information, lineaments, copper geochemical signature, multivariate signature anomaly resulting from the factor analysis (factor 1), aeromagnetic data (reduction to pole), digital elevation model elevation, argillic alteration, phyllic alteration, and iron oxide alteration. (Gossan zone). To extract the lithological layer of the study area, the Shahre Babak geology map, which the Geological Survey of Iran prepared, was used. The units extracted from the geological map of Shahre-Babak include sub-volcanic intrusive units, which are a suitable source for porphyry copper mineralization.

Lineaments are another effective parameter in porphyry copper mineralization. The effect of lineaments in porphyry copper mineralization has been investigated by various authors (Sillitoe, 1972, 1997; Skewes and Stern, 1994). The faults show high tectonic activity and provide crushed zones suitable for porphyry copper mineralization. These places can be suitable locations for the penetration of mineralized fluids and mineralization; Therefore, they can be considered suitable keys for recognizing and exploring mineral deposits. Therefore, studying the fractured zones and comparing the map of geochemical anomalies with the density map of lineaments can help evaluate the anomalies.

The third layer used in finding high porphyry copper mineralization is the aeromagnetic data of Shahre-Babak, surveyed by the Atomic Energy Organization in 1977 with a line spacing of 500 meters and a height of 120 meters.

In regional exploration, stream sediment geochemistry is one of the steps to identify promising mineralization areas. One of the points in stream sediment geochemistry is evaluating the representativeness of a sample to predict the type of mineralization. In order to identify the promising areas of a specific type of mineralization, the best combination of trace elements should be identified, and multivariate analysis should be used to achieve this goal.

\* Corresponding author: ramazi@aut.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.42558.2333

Received: 2022-12-19

Accepted: 2023-03-07

### 3- Adaptive Nero fuzzy method

The combination of fuzzy logic and neural network methods was first proposed by Jang (1993). The combined method of the fuzzy neural network, as its name suggests, combines two methods of neural network (data-oriented) and fuzzy logic (knowledge-oriented) in potential mineral modeling. Therefore, this method can also be called a knowledge-based neural network (Porwal et al., 2004). It uses a fuzzy inference system to form a matrix of eigenvectors at the input of the neural network. Therefore, the fundamental difference between the fuzzy and neural network methods is how to form the eigenvectors matrix.

### 4- Results and discussion

In order to train the model resulting from the adaptive neural fuzzy network in this research, two series of data are needed:

The deposit points, which include 38 points, are mineralized in the study area of the Shahre-Babak area. Therefore, these points entered the training model with index number one.

Thirty-eight non-deposit points were obtained using the point pattern analysis method, which was entered into the Adaptive Nero fuzzy network training model by the index of number zero.

### 5- Conclusion

In this research, the adaptive Nero fuzzy method has been used in producing the potential porphyry model in the study area of Share- Babak. In this regard, nine exploratory criteria of subvolcanic units related to porphyry copper mineralization, faults, the geochemical signature of the copper element, the geochemical signature of multivariate analysis (factor 1), aeromagnetic data, argillic alteration, phyllic alteration, Iron oxide alteration and DEM layer were used. Firstly, the mentioned layers were converted into a raster file and then transformed to the scale using fuzzy transformations.

Next, information about 38 mineralization points and 38 non-mineralization points was extracted from the prepared data. Then, non-mineralization points were extracted using the point pattern analysis method. Finally, the prepared training points were entered into MATLAB software with one index for mineralization points and zero for non-mineralization points. After the training, the training model produced was implemented on the data of the study area, and the final model was drawn out in the ArcGis software environment.

### References

- Sillitoe, R.H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences* 44, 373–388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sillitoe, R.H., 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology* 67, 184–197. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.2.184>
- Ninomiya, Y., n.d. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data, in: IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). IEEE, pp. 1552–1554. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294172>
- Sillitoe, R.H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences* 44, 373–388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sillitoe, R.H., 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology* 67, 184–197. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.2.184>
- Porwal, A., Carranza, E.J.M., Hale, M., 2004. A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping. *Math Geol.* <https://doi.org/10.1023/B:MATG.0000041180.34176.65>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jahantigh, M., Ramazi, H., Ferdusi, H., Jafari, Z., 2024. Investigating how to recharge in the karst spring using hydrogeology and isotope studies (case study: Sangvil anticline). Adv. Appl. Geol. 14(2), 44 – 62.

DOI: 10.22055/AAG.2023.42558.2333

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19029.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19029.html)

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## شناسایی نواحی مستعد کانی‌سازی مس پورفیری با استفاده از شبکه عصبی فازی تطبیقی در منطقه مطالعاتی شهر بابک، استان کرمان

مسلم جهانتیغ

دانشجو دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حمیدرضا رمزی\*

استاد گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حسین فردوسی

دانشجو دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه تهران

زهرا جعفری

شرکت مهندسی مشاور خاوران کاوش زاهد

\* Ramazi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

### چکیده

شناسایی مناطق کانی‌سازی با سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان، موضوع پیچیده‌ای است که نیازمند اجرای روش‌هایی برای تعیین مناطقی با پتانسیل کانی‌سازی بالا می‌باشد. در این تحقیق از روش عصبی فازی تطبیقی برای پتانسیل‌یابی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی شهر بابک در کمربند ماگمایی ارومیه دختر استفاده شده است. از مزایای آن نسبت به شبکه عصبی، کمی حجم محاسبات، سرعت و سادگی آموزش، نیاز کم به داده آموزشی و حذف ورودی غیر ضروری است. در این روش باتکیه بر نقاط آموزشی حاصل از رخنمون‌های کانی‌سازی با اندیس شماره یک و نقاط غیر کانی‌سازی حاصل از روش آنالیز نقطه‌ای با اندیس صفر، سعی بر بهبود عملکرد مدل عصبی فازی گردید. داده‌هایی ورودی در این تحقیق شامل (۱) واحدهای آذرین پلوتونیک (۲) واحدهای آذرین ولکانیک (۳) گسل‌ها (۴) اثر ژئوشیمیایی عنصر مس (۵) اثر ژئوشیمیایی آنالیز مولفه‌های اصلی (مولفه ۳) (۶) برگردان به قطب داده‌های مغناطیس هوایی (۷) آلتراسیون آرژلیک (۸) آلتراسیون فیلک (۹) آلتراسیون اکسید آهن (زون گوسان) (۱۰) لایه ارتفاعی منطقه می‌باشد. پس از رسترسازی داده‌های مذکور تبدیلات فازی روی داده‌ها جهت هم‌مقیاس‌سازی صورت گرفت تا وزن لایه‌های ورودی یکسان گردد. سپس داده‌های فازی حاصل از نقاط کانی‌سازی و غیر کانی‌سازی تولید شد و برای ایجاد مدل به روش شبکه عصبی فازی تطبیقی وارد محیط نرم‌افزار متلب شد. همچنین برای صحت سنجی مدل روش مجذور میانگین مربعات خطا بکار برده شد. مقدار حداقل مربعات خطا برای داده‌های آموزشی برابر ۸/۲۳ e-06 و برای داده‌های آزمایشی برابر ۱/۰۷ e-06 می‌باشد. که تأییدکننده دقت بالای مدل آموزشی تولید شده می‌باشد. در نهایت مدل آموزشی حاصل، روی داده‌های محدوده مطالعاتی شهر بابک اجرا شد و مدل نهایی کانی‌سازی مس پورفیری تولید گردید. بر اساس مدل تولید شده، نواحی پر پتانسیل محدوده در قسمت غربی محدوده و همچنین بخش‌هایی از شرق آن قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی فازی تطبیقی، شهر بابک، پتانسیل‌یابی مس پورفیری، کاهش به قطب، روش آنالیز نقطه‌ای.

### ۱-مقدمه

به‌منظور شناسایی مناطق هدف در اکتشاف کانی‌سازی‌های ناشناخته صورت می‌گیرد، مدل‌سازی پتانسیل معدنی نامیده می‌شود (Carranza, 2004) خروجی مدل پتانسیل معدنی، نقشه‌های خواهد بود که در آن محل حضور احتمالی ذخایر شناخته نشده آشکار می‌شود. به‌منظور پتانسیل‌یابی معدنی، داده‌های مکانی مختلف شامل داده‌های ژئوفیزیک، زمین‌شناسی، ژئوشیمی، دورسنجی و غیره در محیط GIS

سیستم عصبی - فازی (ANFIS) اولین بار توسط Jang (۱۹۹۳) معرفی شد. Lin و Juang (۱۹۹۸) یک سیستم استنتاج شبکه عصبی - فازی خود ارتقا با قابلیت یادگیری سریع را توسعه دادند. Jang شبکه عصبی فازی شبه سوگنو با ساختار شبکه‌ای پنج‌لایه پیاده‌سازی کرد. فرایند تجزیه و تحلیل، ترکیب و تلفیق داده‌های فضایی که

Porwal و همکاران (۲۰۰۴) از شبکه عصبی - فازی را برای پتانسیل‌یابی فلزات پایه استفاده کردند. ابتدا مدل آموزشی تولید کردند و سپس این مدل را روی داده‌های محدوده پیاده کردند و مدل نهایی کانی‌زایی تولید کردند. Leng و همکاران (۲۰۰۹) الگوریتمی ترکیبی برای سیستم‌های عصبی - فازی خود ارتقا ارائه داده‌اند. این الگوریتم متشکل از فرایند تولید دومرحله‌ای است. در ابتدا ساختار فازی، توسط مجموعه‌ای از قوانین فازی ایجاد می‌گردد. در مرحله دوم، ساختار اولیه توسط الگوریتم یادگیری، بر پایه الگوریتم پس انتشار، بهبود می‌یابد و سپس از الگوریتم یادگیری اوزان بازگشتی ارائه شده، برای حداقل نمودن خطای سیستم استفاده می‌نماییم.

Ramazi و Amini (۲۰۱۴) از منطق فازی در تخمین زمین‌لغزش در منطقه رهدار خوزستان استفاده کردند. Akbari و همکاران (۲۰۲۰) مدل‌سازی حفره‌های کارستی را با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک، با بهره‌گیری از منطق فازی، روش‌های فرکتال و روش هیبریدی AHP - تاپسیس در منطقه زری آباد در غرب ایران انجام دادند. Shahsavari و همکاران (۲۰۲۰) از روش شبکه عصبی فازی برای تعیین آنومالی‌های ژئوشیمی در محدوده مطالعاتی میال واقع در مرکز ایران استفاده کردند. Sanusi و Amigun (۲۰۲۰) از روش فازی برای پتانسیل‌یابی طلای کوه‌زایی در شمال نیجریه استفاده کردند. Shirazi و همکاران (۲۰۲۲) روش Neuro-Fuzzy-AHP را برای پتانسیل‌یابی مس در محدوده مطالعاتی سهل آباد واقع در شرق بکار بردند.

هدف این تحقیق آن است تا بانکچه‌بر داده‌های علوم مکانی در علوم زمین از قبیل داده‌های ژئوشیمی، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های ژئوفیزیک هوایی و داده‌های زمین‌شناسی پتانسیل مس پورفیری با استفاده از روش شبکه عصبی - فازی و مبتنی بر الگوریتم خوشه‌بندی Fuzzy Cmeans پتانسیل کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه مطالعاتی شهر بابک مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- منطقه مطالعاتی

متن محدوده شهر بابک بخشی از کمان ماگمایی ارومیه دختر (UMDA) می‌باشد. وسعت منطقه مطالعاتی ۱۹۷۷ کیلومتر مربع هست که در شرق استان کرمان و در فاصله تقریبی ۱۷۰ کیلومتری از شهر کرمان واقع شده است (شکل ۱) و بین طول‌های جغرافیایی ۵۵ ۳۰ تا ۵۵ ۰۰ و عرض‌های جغرافیایی

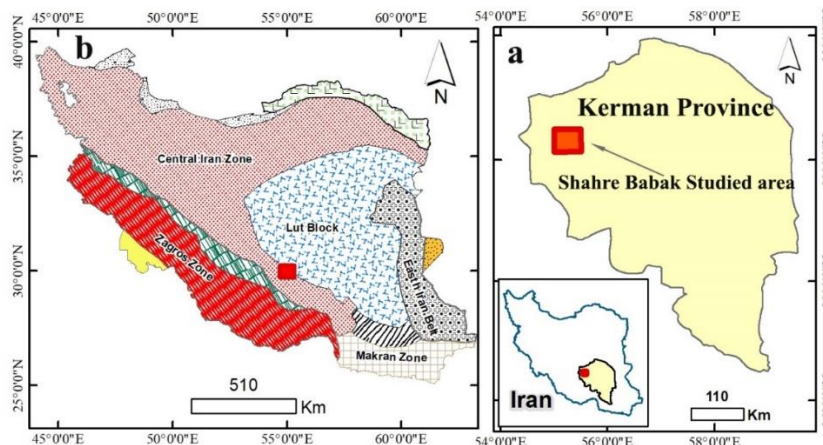
جمع‌آوری، آنالیز و ترکیب می‌شوند (Bonham-carter & Agterberg, 1999).

امروزه از روش‌های مختلفی برای تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی استفاده می‌شود که به‌طور کلی به دو گروه داده‌محور و دانش‌محور تقسیم می‌شود (Bonham and Carter, 1999). در روش داده‌محور، از اندیس‌های معدنی شناخته شده، برای آموزش استفاده می‌شود و روابط مکانی بین این ساختارهای شناخته شده با ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از روابط شناخته شده بین داده‌های ورودی و نقاط آموزشی اهمیت هر یک از ویژگی‌ها در تعیین نقشه نهایی اکتشافی مشخص می‌شود (Nykänen and Salmirinne, 2007).

شبکه عصبی مصنوعی، یک مکانیسم محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات و محاسبه کردن آنها یکسری اطلاعات جدید را ارائه دهد. یکی از متداول‌ترین سیستم‌های عصبی - فازی، شبکه عصبی - فازی تطبیقی است. این مدل یک سیستم فازی را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند. الگوریتم سیستم عصبی - فازی انطباقی یک سیستم انطباقی فازی را تولید می‌کند. روش شبکه عصبی - فازی، ترکیبی از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی است. کاربرد منطق فازی در اکتشاف معدنی، اولین بار توسط An و همکاران (۱۹۹۲) با به‌کارگیری داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیک برای ساختن مدل فازی نقشه‌های پیشگویی برای معادن آهن و فلزات پایه انجام گرفت. در سال ۲۰۰۰ مدل فازی بر اساس دانش، برای پتانسیل‌یابی معدنی نهشته‌های فلزی پایه از تیپ سدکس توسط پورووال و سیدز بکار گرفته شد. Carranza و Hale (۲۰۰۱) با کمی‌سازی فضایی با ارتباط فازی برای پتانسیل‌یابی معدنی از منطق فازی استفاده نموده‌اند. شبکه عصبی مصنوعی در سال ۱۹۹۶ در زمینه پتانسیل‌یابی معدنی، توسط Singer و Kouda (۱۹۹۶) با تخمین فاصله، نسبت به نزدیک‌ترین نهشته فلزات پایه تیپ کروکو مورد استفاده قرار گرفت. Haris و Pan (۱۹۹۹) با پتانسیل‌یابی طلا و مقایسه با تکنیک‌های آماری چند متغیره از شبکه عصبی استفاده نمودند. Singer و Kouda (۱۹۹۶) از شبکه عصبی مصنوعی در طبقه‌بندی تیپ نهشته‌ها بر اساس تناژ و عیار متوسط استفاده کردند. همچنین Bougrain و همکاران (۲۰۰۳) برای پتانسیل‌یابی معدنی در مقیاس قاره‌ای استفاده نمودند.

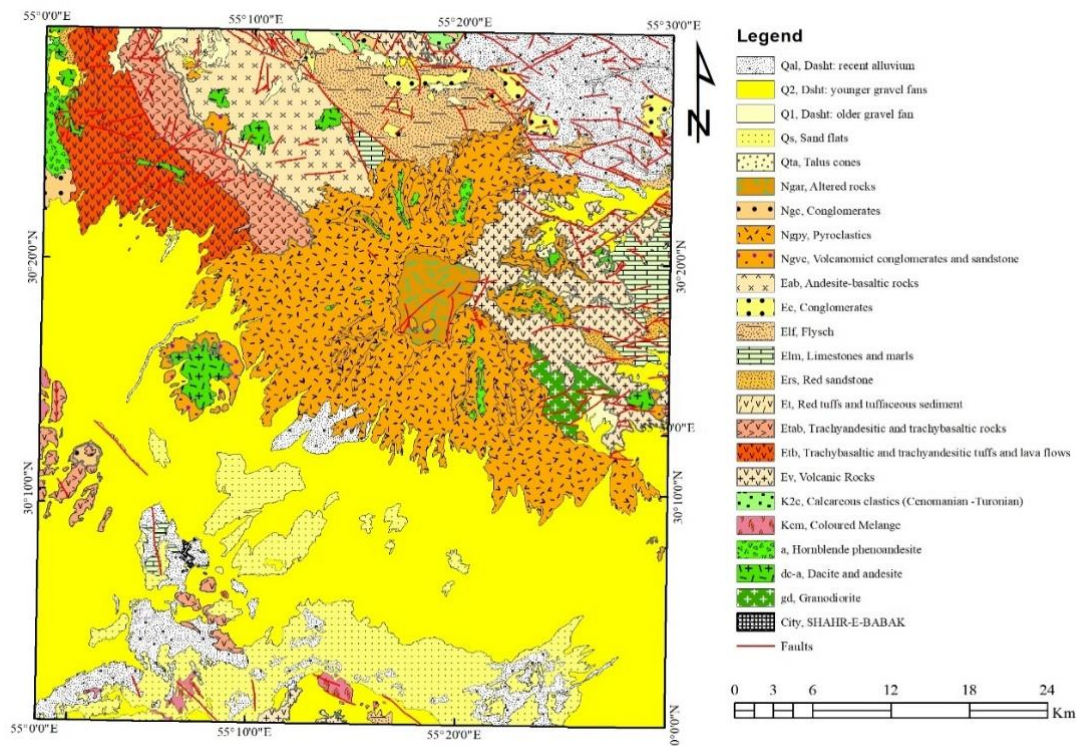
ائوسن، ولکانیک‌های ائوسن که اغلب از نوع توف، آندزیت و بازالت، واحدهای نفوذی از نوع گرانودیوریت، کوارتز دیوریت و کوارتز مونزونیت و در نهایت واحدهای آواری و آذرآواری نئوژن هستند. این واحدها در برخی مناطق توسط رسوبات کواترنری پوشیده شده‌اند. خواستگاه مس پورفیری در منطقه، کوارتز دیوریت‌ها، کوارتز مونزونیت‌ها و گرانودیوریت‌های نئوژن می‌باشد (Yousefi et al., 2022).

۰۰ تا ۳۰ ۳۰ و واقع در استان کرمان می‌باشد. این منطقه واقع در نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ شهر بابک می‌باشد که به لحاظ کانی-سازگی مس پورفیری مستعد است (شکل ۲). نقشه زمین‌شناسی شهر بابک توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۹۵۶ تهیه شده است. طبق نقشه زمین‌شناسی شهر بابک در مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ واحدهای زمین‌شناسی محدوده از قدیم به جدید شامل افیولیت‌های کرتاسه، فلیش‌های



شکل ۱ - (a) موقعیت جغرافیایی محدوده شهر بابک و (b) موقعیت محدوده در زون‌های زمین ساختاری ایران.

Fig. 1 (a) Geographical location of Shahr Babak area, and (b) The location of the range in the structural zones of Iran.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر بابک برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ شهر بابک (Dimitrijevic, 1972).

Fig. 1 . Geological map of Shahr Babak area taken from Shahr-e-Babak 1:100000 geological map (Dimitrijevic, 1972).

### ۳- مواد و روش ها

#### ۳-۱- داده‌های ورودی، آماده‌سازی نقشه‌های پیشگو و بی‌مقیاس‌سازی

نقشه‌های شاهد شامل نه لایه اطلاعاتی سنگ‌شناسی، خطواره‌ها، آنومالی ژئوشیمی مس، آنومالی چندمتغیره حاصل از آنالیز مولفه‌های اصلی (مولفه ۳)، مغناطیس‌های هوایی (کاهش به قطب)، لایه ارتفاعی منطقه، آلتراسیون آرژلیک، آلتراسیون فیلک و آلتراسیون اکسید آهن (زون گوسان) می‌باشد.

برای استخراج لایه سنگ‌شناسی منطقه از نقشه زمین‌شناسی شهرباک در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده است که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است. واحدهای استخراج شده از نقشه زمین‌شناسی شهرباک شامل واحدهای نفوذی ساب و لکانیک می‌باشد که منبع مناسبی برای کانی‌سازی مس پورفیری می‌باشد. نقشه نزدیکی به واحدهای نفوذی تهیه گردید و با استفاده از تابع عضویت فازی، فازی‌سازی گردید. نقشه شاهد پیشگوی واحدهای نفوذی در شکل ۳ نشان داده شده است.

خطواره‌ها پارامتر مؤثر دیگر در کانی‌سازی مس پورفیری هستند. تأثیر خطواره‌ها در کانی‌سازی مس پورفیری توسط مؤلفان گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Sillitoe, 1972, 1997).

گسل‌ها فعالیت تکتونیکی بالایی از خود نشان می‌دهند و زون‌های خرد شده مناسبی را برای کانی‌سازی مس پورفیری فراهم می‌کنند. این محل‌ها می‌توانند معابر مناسبی برای نفوذ سیالات کانه‌دار و کانه‌زایی باشد؛ پس می‌توانند به‌عنوان کلیدهای مناسبی جهت شناخت و اکتشاف ذخایر معدنی مدنظر قرار گیرند؛ لذا مطالعه زون‌های شکسته و مقایسه نقشه آنومالی‌های ژئوشیمیایی با نقشه توزیع شکستگی‌ها می‌تواند در ارزیابی آنومالی‌ها مفید واقع شود. نکته اساسی در این مورد آن است که زمان تشکیل شکستگی‌ها در این مورد بسیار بااهمیت است. زیرا تنها شکستگی‌هایی که قبل از فعال شدن پدیده کانی‌زایی توسعه پذیرفته باشند می‌توانند در ایجاد کانال‌ها و مجاری لازم جهت حرکت سیال و تشکیل کانسارهای هیپوزن مؤثر باشد.

گسل‌های موجود در منطقه از به دو روش استخراج شدند. دسته اول از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرباک حاصل شدند و دسته دوم با کاربرد فیلترهای جهت‌دار و با استفاده از

تصاویر ماهواره‌ای استر استخراج شدند. نقشه چگالی خطواره‌ها تهیه گردید و با استفاده از تابع عضویت فازی خطی، فازی‌سازی شد. نقشه شاهد پیشگوی چگالی خطواره‌ها در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است.

سومین لایه مورد استفاده در پتانسیل‌یابی مس پورفیری داده‌های مغناطیس‌های هوایی شهرباک می‌باشد که توسط سازمان انرژی اتمی در سال ۱۹۷۷ میلادی بافاصله خطوط ۵۰۰ متر و ارتفاع ۱۲۰ متر برداشت گردیده‌اند. لایه ژئوفیزیک هوایی یکی از لایه‌های مهم می‌باشد که در ارزیابی اولیه در مقیاس ناحیه‌ای و زون‌بندی ساختاری و مشخص کردن نواحی مستعد و گاهی خود ذخایر معدنی نقش مؤثری دارد (Abedi et al., 2012). در بسیاری از نقشه‌های مغناطیس‌های هوایی در به نقشه در آوردن زمین‌شناسی زیرسطحی و نیز ساختارهای پنهان، نظیر توده‌های نفوذی کاربرد دارد؛ بنابراین به‌کارگیری داده‌های مغناطیس‌های هوای جهت آشکارسازی توده‌های نفوذی زیرسطحی مرتبط با زون دگرسانی پتاسیک پیشنهاد شده است (Clark, 2014). اگر توده‌های نفوذی با خاصیت مغناطیسی متوسط درون سنگ دیواره با خاصیت مغناطیسی ضعیف، مانند کوارتزیت یا ولکانیک‌های سیلیسی نفوذ کند، در نقشه برگردان به قطب آنومالی مغناطیسی قوی مشاهده می‌شود. برای سنگ میزبان اسیدی ویژگی مغناطیسی ضعیف، اثر تخریب مگنتیت دگرسانی‌ها دارای اهمیت کمتری نسبت به زون پتاسیک است و ناهنجاری مغناطیسی مثبت و با شدت دیده می‌شود که نشان‌دهنده حضور منشأ مغناطیسی مدفون در عمق زیاد است (Clark, 2014). این امر سبب ایجاد ناهنجاری مثبت قوی در نقشه برگردان به قطب می‌شود. فیلتر کاهش به قطب روی این لایه شاهد پیاده‌سازی گردید. نقشه شاهد پیشگوی کاهش به قطب داده‌های مغناطیس منطقه مطالعاتی شهرباک در شکل ۵ نشان داده شده است.

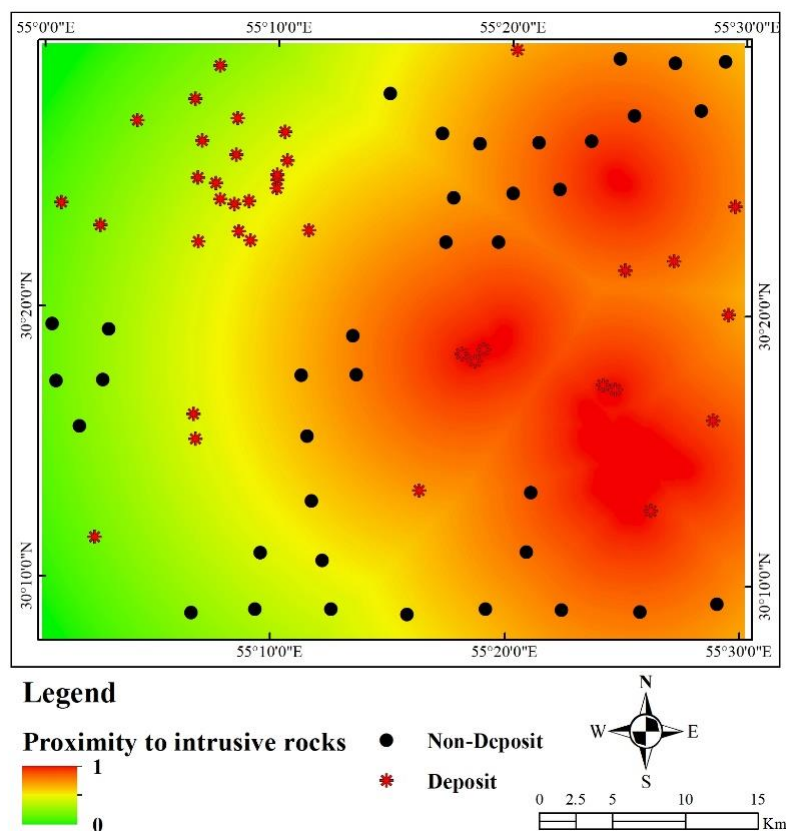
در اکتشافات ناحیه‌ای، ژئوشیمی رسوب آبراه‌های یکی از مراحل برای شناسایی مناطق امیدبخش کانی‌زایی است. یکی از نکات ژئوشیمی رسوب آبراه‌های، ارزیابی میزان معرف بودن یک نمونه برای پیش‌بینی نوع کانی‌سازی است. به‌منظور شناسایی نواحی امیدبخش یک نوع ماده معدنی خاص باید بهترین ترکیب عناصر ردیاب و معرف برای پی‌جویی شناسایی شود و برای رسیدن به این هدف از تحلیل‌های چندمتغیره استفاده شود. برای رسیدن به مناطق پر پتانسیل کانی‌سازی مس پورفیری در

در شناسایی کیفی کانی‌های مرتبط با آلتراسیون‌های هیدروترمال می‌باشد (Ninomiya, 2003). این روش اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را از بین برده و یکسری از نویزها را افزایش و سری دیگری را کاهش می‌دهد. علاوه بر آن اختلاف بین درجات روشنایی را آشکار کرده و مرزها را مشخص تر می‌سازد. در این روش مقدار ارزش پیکسل‌های یک تصویر که دارای انعکاس بالایی است، به مقدار ارزش پیکسل‌های تصویر دیگر که دارای مقدار انعکاس پایینی است، تقسیم می‌شود (Marsand - Rowan, 2010). نقشه‌های شاهد پیشگوی آلتراسیون آرژلیک، آلتراسیون فیلیک و اکسید آهن به ترتیب در شکل-های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همچنین نقشه شاهد پیشگوی ارتفاعی منطقه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای استخراج دگرسانی فیلیک از نسبت  $(5+7)/6$ ، آرژلیک از نسبت  $7$  به  $6$  و اکسید آهن از نسبت  $3$  به  $1$  استفاده شده است. در شکل ۱۲ روند مدل‌سازی مس پورفیری با استفاده از شبکه عصبی فازی تطبیقی را نشان می‌دهد.

منطقه شهربابک نقشه آنومالی ژئوشیمیایی عنصر مس تهیه شد. همچنین آنالیز مولفه‌های اصلی چندمتغیره روی داده‌های ژئوشیمیایی منطقه شهربابک صورت پذیرفت و مولفه ۳ شامل عناصر مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری تشخیص داده شد و به نقشه درآورده شد. نقشه‌های شاهد پیشگوی اثر ژئوشیمیایی عنصر مس و آنالیز مولفه‌های اصلی محدوده مطالعاتی شهربابک در شکل به ترتیب در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

چهارمین لایه اطلاعاتی مورداستفاده تصاویر ماهواره‌ای استریم‌سپات (USGS) داندلود گردیده است. با کاربرد نسبت‌های باندی آلتراسیون‌های آرژلیک، فیلیک و اکسید آهن (زون گوسان) استخراج گردید. جهت استخراج آلتراسیون آرژلیک از نسبت باندی ۵ به ۷، جهت استخراج آلتراسیون فیلیک از نسبت  $5+7/6$  و جهت استخراج زون‌های گوسان موجود در محدوده مطالعاتی از نسبت باندی ۳ به ۱ استفاده شد.

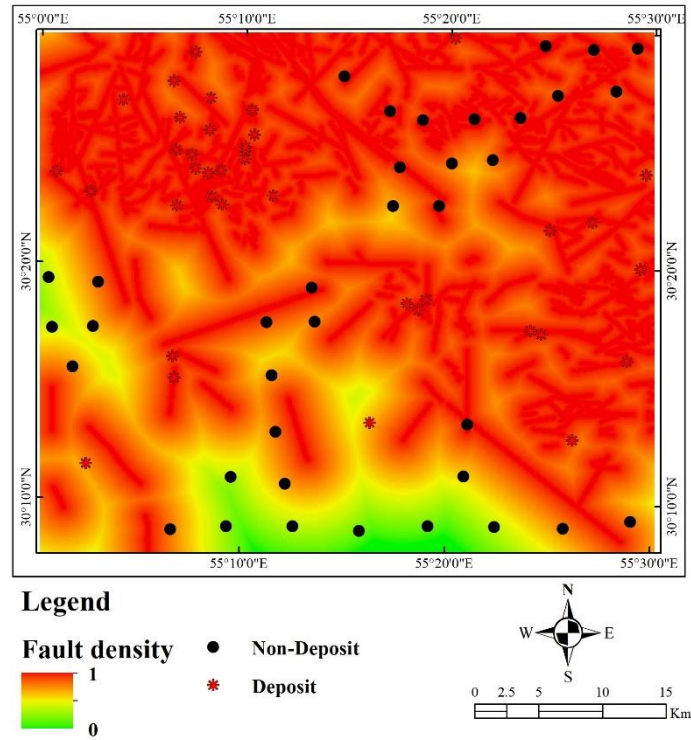
یکی از روش‌های رایج در پردازش تصویر، روش تقسیم باندی یا روش نسبت باندی می‌باشد. کاربرد روش نسبت باندی



شکل ۳- لایه پیشگوی اکتشافی توده نفوذی در منطقه مطالعاتی شهربابک.

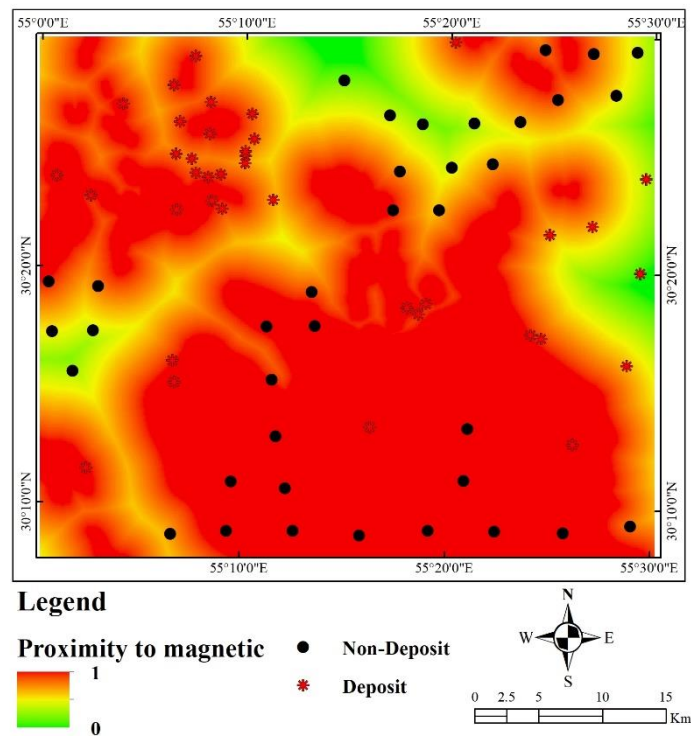
Fig. 3 – The evidence layer of the intrusive mass in the study area of Shahr-e-Babak.





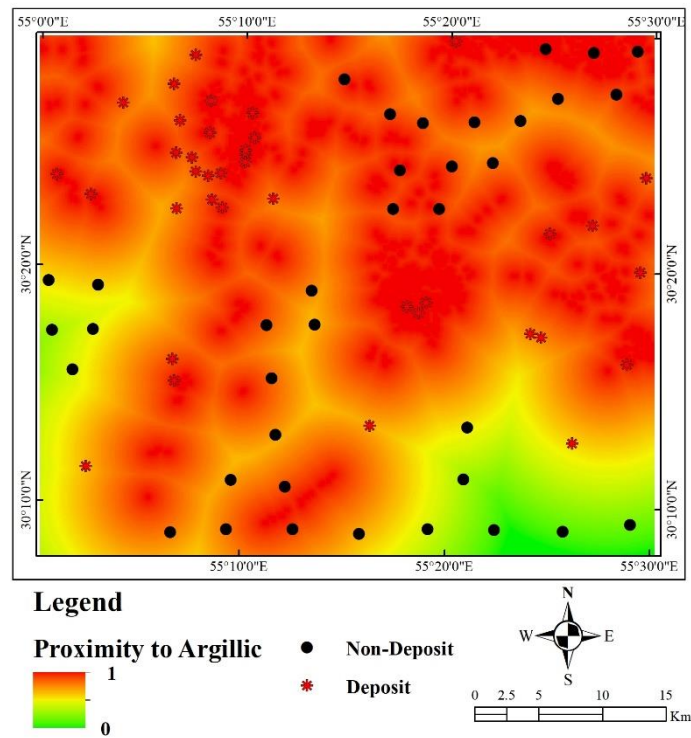
شکل ۴- لایه پیشگوی اکتشافی ساختارهای خطی در منطقه مطالعاتی شهربابک.

Fig. 4 – The evidenc layer of linear structures in the study area of Shahr-e-Babak.



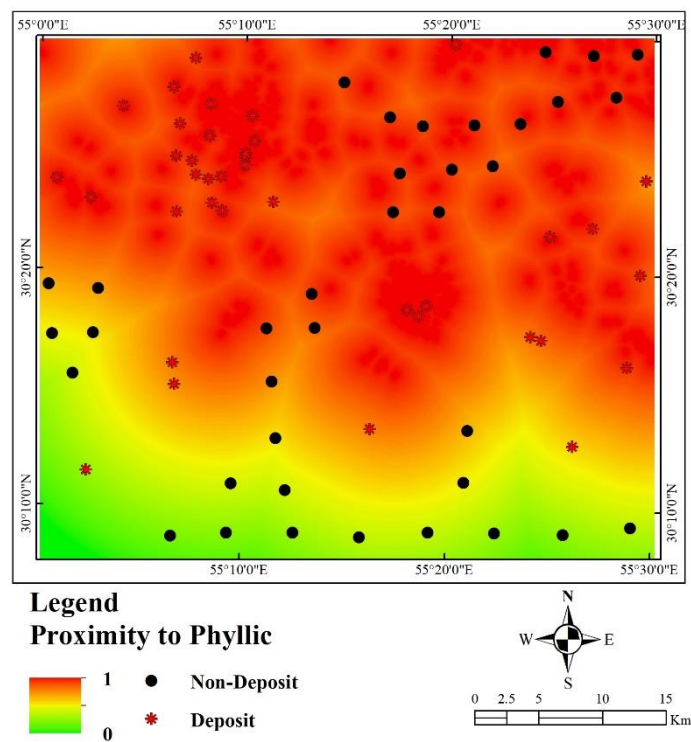
شکل ۵- لایه پیشگوی اکتشافی برگردان به قطب داده‌های مغناطیس هوایی در منطقه مطالعاتی شهربابک.

Fig. 5 – The evidenc layer of pole-to-pole aeromagnetic data in the Shahr-e-Babak study area.



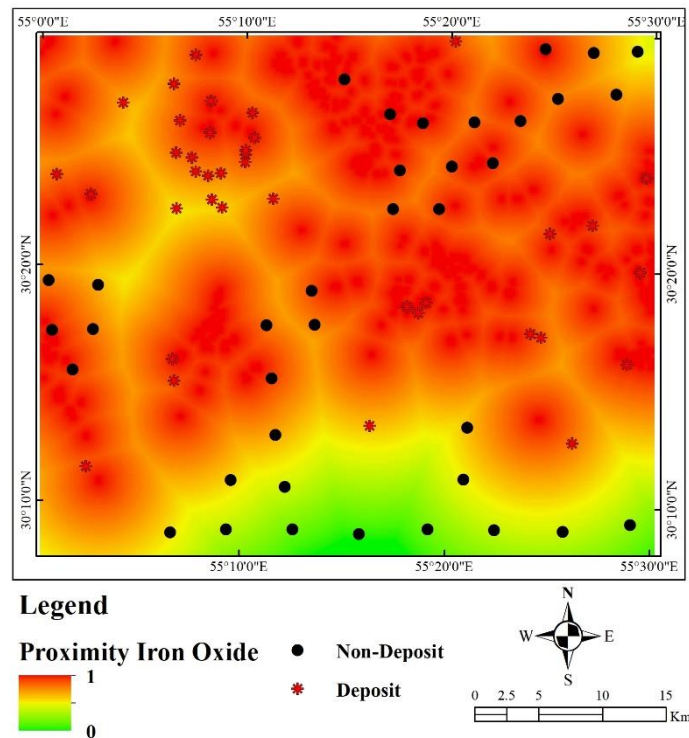
شکل ۶- لایه پیشگوی اکتشافی دگرسانی آرژیلیک در منطقه مطالعاتی شهربابک.

Fig. 6 – The evidenc layer of argillic alteration in Shahr-e-Babak study area.

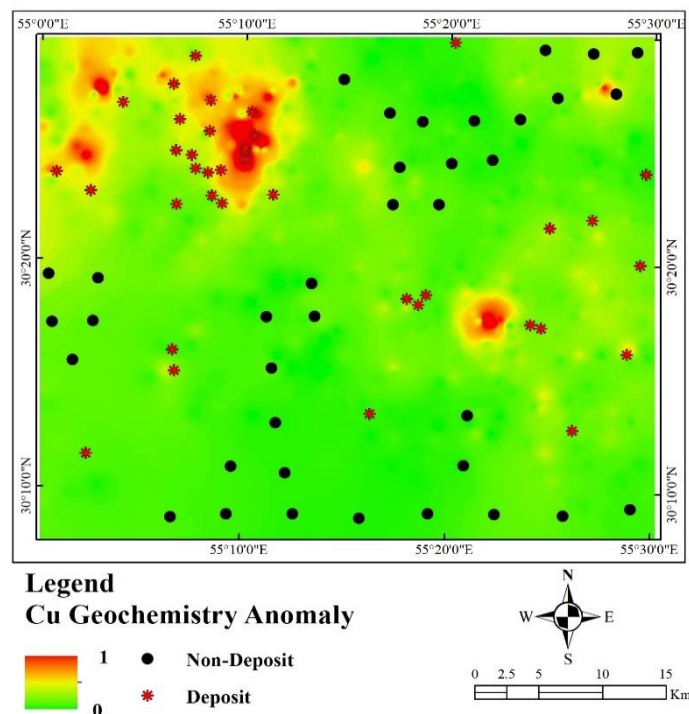


شکل ۷- لایه پیشگوی اکتشافی دگرسانی فیلیک در منطقه مطالعاتی شهربابک.

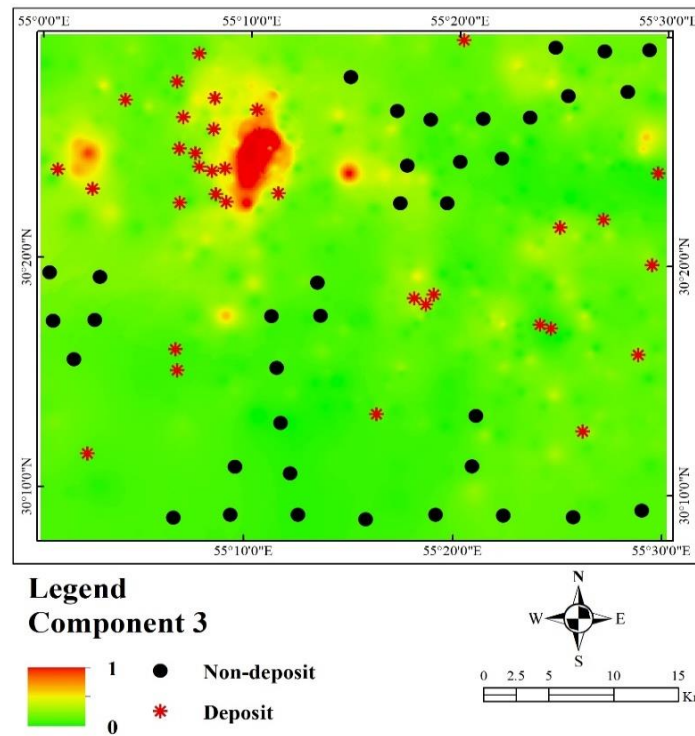
Fig. 7 – The evidenc layer of phyllic alteration in Shahr-e-Babak study area.



شکل ۸- لایه پیشگوی اکتشافی دگرسانی اکسید آهن در منطقه مطالعاتی شهربابک.  
Fig. 8 – The evidenc layer of iron oxide alteration in Shahr-e-Babak study area.

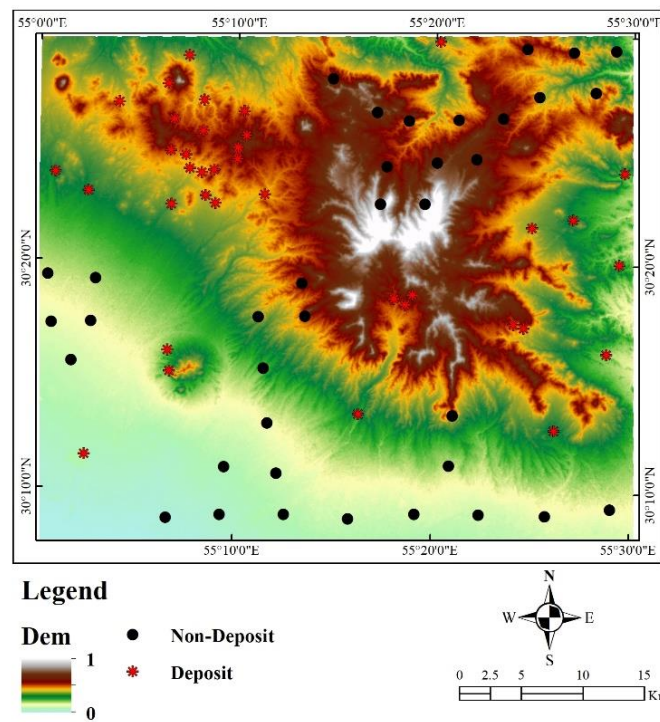


شکل ۹- لایه پیشگوی اکتشافی آنومالی ژئوشیمی مس در منطقه مطالعاتی شهربابک.  
Fig. 9 –The evidenc layer of copper geochemistry anomaly in Shahr-e-Babak study area.



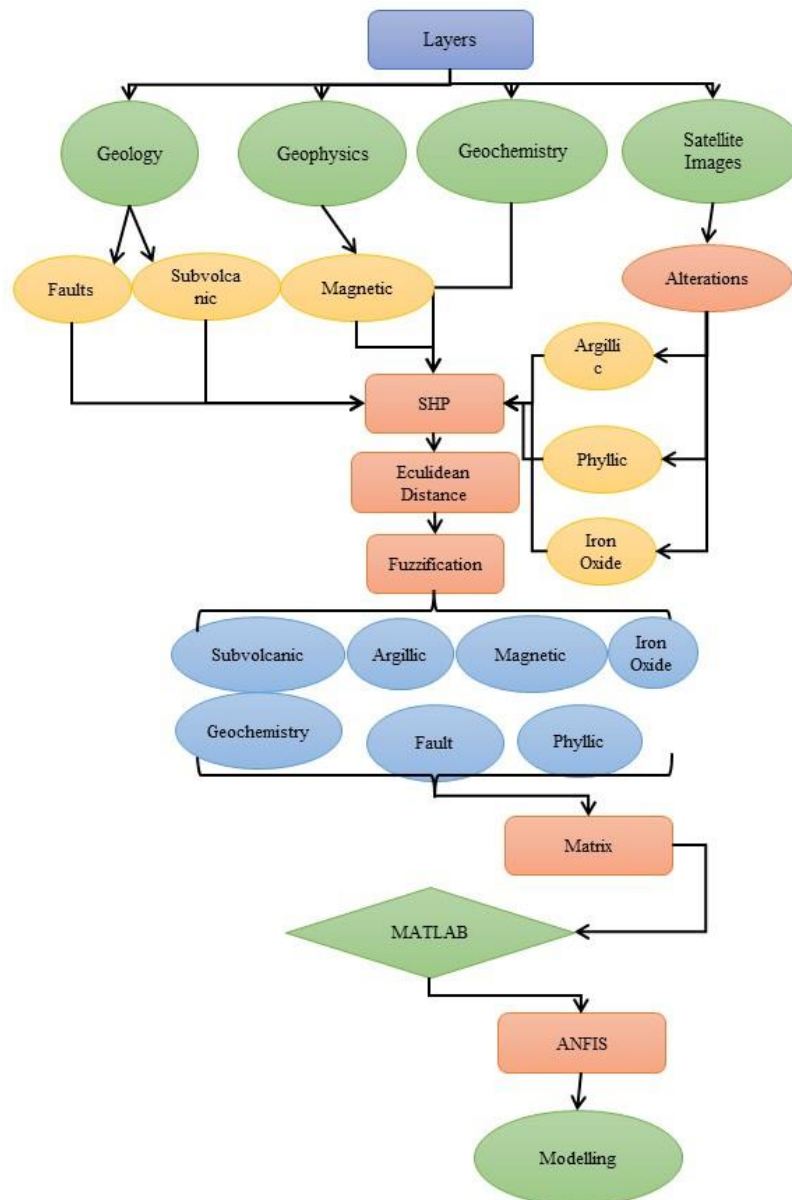
شکل ۱۰- لایه پیشگوی اکتشافی آنالیز مولفه‌های اصلی (مولفه ۳) در منطقه مطالعاتی شهربابک.

Fig. 10.- The evidenc layer of Principal component analysis analysis (component 3) in the study area of Shahr-e-Babak.



شکل ۱۱- لایه پیشگوی اکتشافی مدل ارتفاعی در منطقه مطالعاتی شهربابک.

Fig. 11 . The evidenc layer of the height model in the study area of Shahr-e-Babak



شکل ۱۲- فلوجارت مراحل تولید پتانسیل معدنی با استفاده از روش شبکه عصبی فازی  
 Fig. 12 - Flowchart of mineral potential production steps using fuzzy neural network method

استنتاج فازی ممدانی هر دو بخش فرضیه (if) و نتیجه (then) قوانین اگر و آنگاه یک گزاره فازی هستند. در مورد سیستم استنتاج فازی تاکاگی - سوگنو بخش فرضیه قوانین فازی یک گزاره فازی هستند و بخش نتیجه یک تابع ریاضی است که معمولاً یک چندجمله‌ای با درجه صفر و یا یک کی باشد (Porwal et al., 2004).

روش ترکیبی شبکه عصبی فازی همان‌طور که از اسم آن مشخص است از ترکیب دو روش شبکه عصبی (داده‌محور و منطق فازی (دانش‌محور) در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده

### ۲-۳- روش شبکه عصبی - فازی

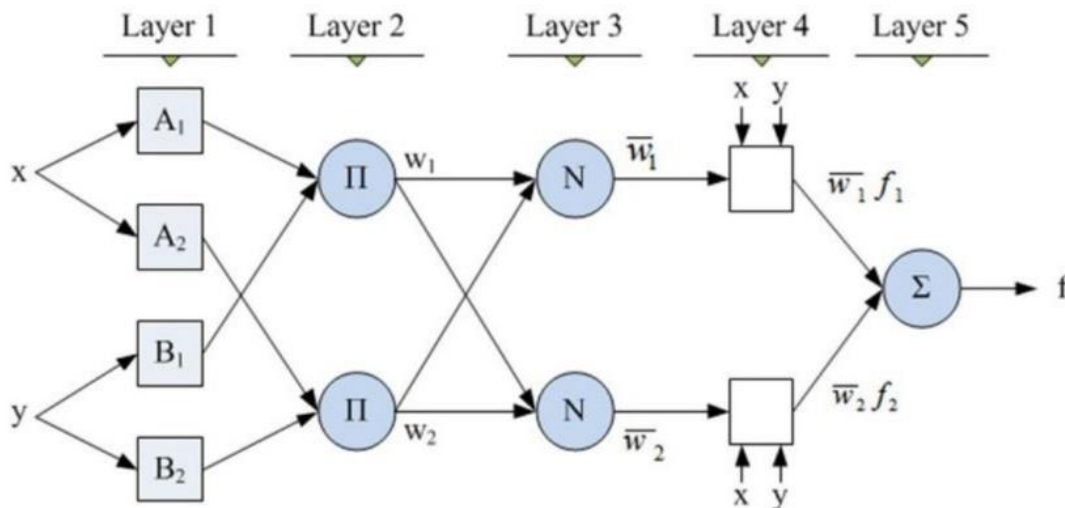
تلفیق روش‌های منطق فازی و شبکه عصبی، نروفازی نام دارد که اولین بار توسط Jang (۱۹۹۳) پیشنهاد داده شد. سیستم استنتاج فازی درک انسان را شبیه‌سازی می‌کند و این امر با به‌کارگیری توابع عضویت فازی و قوانین اگر - آنگاه صورت می‌پذیرد (Porwal et al. 2006). تاکون سیستم‌های استنتاج فازی توسط مؤلفان مختلف معرفی شده‌اند (Mamdani and Assilian, 1975; Sugeno and Kang, 1988; Sugeno and Tanaka, 1991; Zadeh, 1973). در مورد سیستم

آنگاه، یک پایگاه داده، یک ماتریس تصمیم‌گیری، یک رابط فازی (برای محاسبه ورودی فازی) و یک رابط غیرفازی (برای محاسبه خروجی واقعی) می‌باشد (Jang, 1993). یک سیستم عصبی فازی در یادگیری تخمین پارامترها شامل دو مرحله است که الگوریتم یادگیری هیبریدی نام دارد. این الگوریتم شامل یک گذر روبه‌جلو و یک گذر روبه‌عقب می‌باشد که در مورد گذر روبه‌جلو ورودی‌های شبکه تا لایه چهار جلو می‌روند، جایی که پارامترهای هدف توسط روش کمترین مربعات شناسایی می‌شوند و در گذر روبه‌عقب سیگنال‌های خطا از خروجی به سمت ورودی انتشار می‌یابند و پارامترهای پیش‌فرض توسط تابع کاهش شیب (gradient descent) به‌روزرسانی می‌شوند. در شکل ۱۳ ساختار شبکه عصبی فازی نشان داده شده است.

می‌کند. این روش که می‌توان آن را شبکه عصبی دانش‌محور نیز نامید (Porwal et al., 2004). از یک سیستم استنتاج فازی برای تشکیل ماتریس بردارهای ویژه در ورودی شبکه عصبی استفاده می‌کند. بنابراین اختلاف اساسی روش ترکیبی شبکه عصبی فازی با روش شبکه عصبی نحوه تشکیل ماتریس بردارهای ویژه می‌باشد. این روش توسط مؤلفان زیادی در علوم زمین بکار برده شده است (Fadhillah et al., 2022).

### ۳-۳- معماری سیستم عصبی فازی

معماری پایه سیستم عصبی فازی شامل ۵ شبکه پیش‌خور می‌باشد (Jang, 1993). اگر دو ورودی  $x$  و  $y$ ، و یک خروجی  $f$  و دو تابع عضویت را در نظر بگیریم معماری ANFIS شامل ۵ لایه است که شامل یک قانون پایه (شامل قوانین فازی اگر -



شکل ۱۳- ساختار ۵ لایه‌ای مدل عصبی فازی (ANFIS) با دو ورودی و دو قانون بر پایه مدل سوگنو (Jang, 1991)

Fig. 13 - five layers structure of fuzzy neural model (ANFIS) with two inputs and two rules based on Sugeno model (Jang, 1991).

نقاط فاقد کانی‌سازی باید از محل اندیس‌های معدنی فاصله داشته باشند.

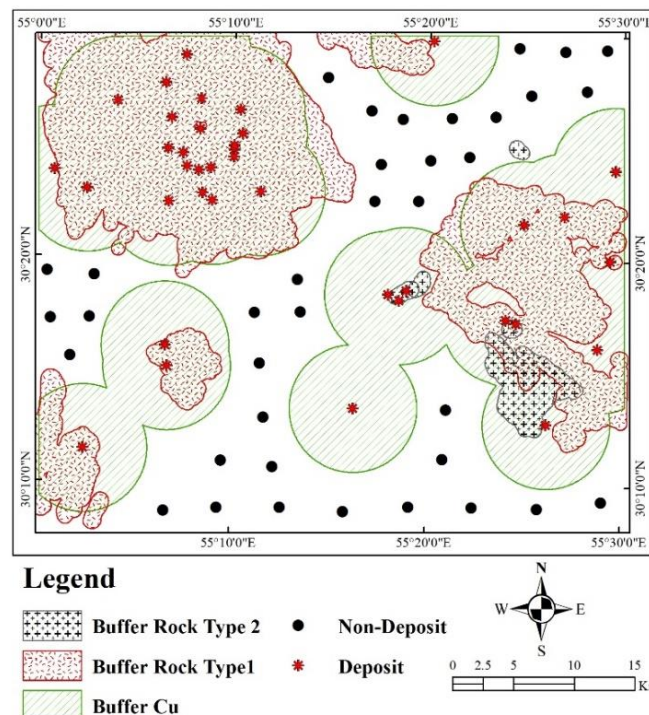
-نقاط غیر کانی‌سازی باید به صورت تصادفی و غیر خوشه‌ای انتخاب گردند.

بر اساس معیارهای فوق و با استفاده از روش آنالیز نقطه‌ای (Zuo and Carranza, 2011; Sun et al, 2019) یک بافر ۵۲۴۷ متری برای نقاط کانی‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین یک بافر ۵۰۰ متر برای واحدهای آذرین در نظر گرفته شده است. براین اساس و در خارج از بافرهای فوق نقاط غیر کانی‌سازی انتخاب گردید (شکل ۱۴).

### ۳-۳-۱- تولید داده‌های آموزشی

برای نقاط کانی‌سازی رخنمون‌های ۳۸ اندیس مس شناسایی شده، استفاده شده است. برای آموزش و اعتبارسنجی مدل‌های پتانسیل تولید شده نیاز به شناسایی نواحی کانی‌سازی و نقاط فاقد کانی‌سازی است. نقاط فاقد کانی‌سازی باید با در نظر گرفتن معیارهای زیر تعریف شوند (Nykänen et al., 2015):

- تعداد نقاط کانی‌سازی و غیر کانی‌سازی باید برابر باشد.
- دارای توزیع تصادفی باشد.
- به دلیل تفاوت در خصوصیات ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی



شکل ۱۴- موقعیت نقاط کانی سازی و انتخاب نمونه های غیر کانی سازی.

Fig. 14 - Location of mineralization points and selection of non-mineralization points.

#### ۴- بحث و نتایج

جهت آموزش مدل حاصل از شبکه عصبی فازی در این تحقیق نیاز به دوسری داده می باشد

➤ نقاط دارای کانی سازی مس که شامل ۳۸ نقطه است کانی سازی در محدوده مطالعاتی شهر بک می باشد. این نقاط با اندیس گذاری شماره یک وارد مدل آموزشی گردید.

➤ ۳۸ نقطه غیر کانی سازی که با استفاده از روش آنالیز نقطه ای حاصل گردید که با اندیس گذاری شماره صفر وارد مدل آموزشی شبکه عصبی فازی گردید. برای آموزش از ۷۰ درصد داده ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای مرحله آزمایش و ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی استفاده شده است. برای تهیه این نقاط روش آنالیز نقطه ای بکار برده شده است. برای بکار بردن روش آنالیز نقطه ای و تهیه نقاط آموزشی غیر کانی سازی چند معیار لازم است که به شرح زیر می باشد:

برای تهیه نقاط آموزشی غیر کانی سازی باید چند معیار در نظر گرفته شود. معیار اول فاصله از نقاط کانی سازی مس موجود در محدوده مطالعاتی شهر بک است تا ویژگی های متفاوت نقاط

کانی سازی، برای نقاط غیر کانی سازی حاصل شود. معیار دوم انتخاب غیر خوشه ای نقاط می باشد و نقاط غیر کانی سازی باید به صورت پراکنده در محدوده انتخاب گردند. معیار سوم: نقاط آموزشی باید به صورت تصادفی انتخاب شوند. معیار چهارم: تعداد نقاط کانی سازی و غیر کانی سازی باید برابر انتخاب شوند تا در مرحله آموزش مدل توازن بین این نقاط برقرار باشد. بر اساس معیارهای فوق و با استفاده از روش آنالیز نقطه ای بافری برای لایه های سنگ میزبان و نقاط کانی سازی مس موجود در محدوده اکتشافی تهیه گردید و نقاط غیر کانی سازی به شرح شکل ۱۴ استخراج شدند.

تهیه نقاط آموزشی با اندیس گذاری یک برای نقاط مطلوب کانی سازی و اندیس گذاری شماره صفر برای نقاط نامطلوب کانی سازی یکی از گام های اساسی در مدل سازی پتانسیل منابع معدنی می باشد. برای تهیه پایگاه داده ابتدا فایل رستر مربوط به لایه های شاهد اکتشافی شامل (۱) واحدهای آذرین نفوذی (۲) لایه ساختارهای خطی (۳) لایه ژئوشیمی عنصر مس و (۴) لایه ژئوشیمی آنالیز مولفه های اصلی (مولفه ۳)، (۵) لایه دگرسانی آرژیلیک (۶) لایه دگرسانی فیلیک (۷) لایه دگرسانی اکسید آهن (۸) لایه ارتفاعی و (۹) لایه مغناطیس هوایی تهیه گردید. برای

نتایج عملکرد داده‌های آموزشی و آزمایشی مدل در شکل ۱۵ ارائه شده است.

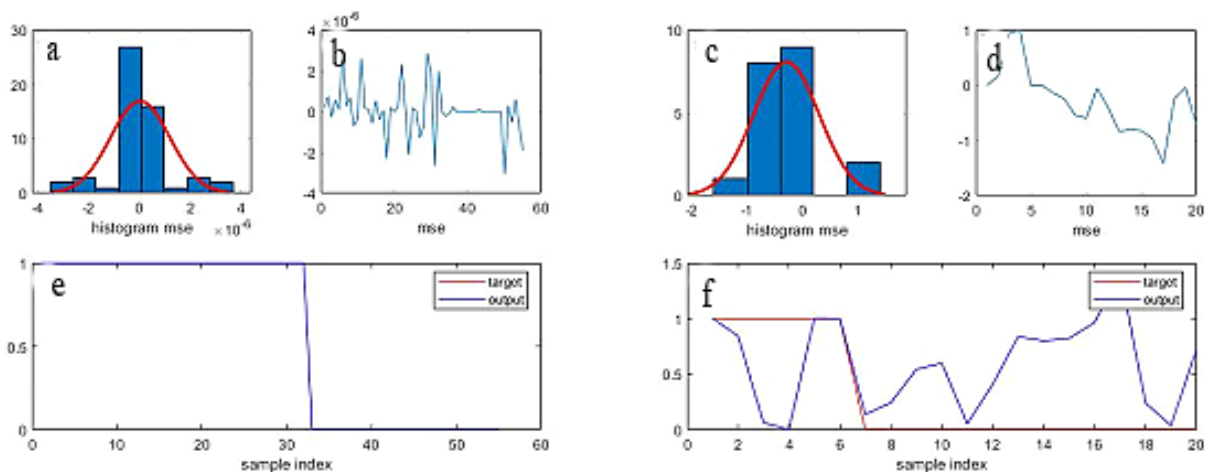
(۱) هیستوگرام مقادیر خطا را نشان می‌دهد برای داده‌های آموزشی (a) و آزمایشی (c) نشان می‌دهد.

(۲) مقایسه بین داده‌های واقعی و تخمینی را برای داده‌های آموزشی (b) و آزمایشی (d) نشان می‌دهد.

(۳) خطای داده‌های آموزشی (e) و آزمایشی (f) حاصل از مدل شبکه عصبی فازی را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از مدل آموزشی روی داده‌های محدوده مطالعاتی شهر بآبک پیاده اجرا شد و نتایج حاصله وارد نرم‌افزار ArcGis گردید و مدل پتانسیل نهایی برای محدوده مطالعاتی تولید شد (شکل ۱۶). بر طبق مدل حاصله عمده نواحی پر پتانسیل محدوده در قسمت غربی آن قرار دارد و همچنین در بخش شرقی محدوده بخش‌هایی به‌عنوان نواحی پر پتانسیل مشخص گردیده است. عمده نواحی با پتانسیل بالا منطبق بر سنگ‌های ولکانیک می‌باشد که به‌عنوان سنگ میزبان کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی شهر بآبک است.

تهیه لایه رستر ابتدا نقشه نزدیکی (proximity) به این عوارض تهیه و سپس برای بی‌مقیاس‌سازی و عملیات نرمال کردن این لایه‌ها از توابع فازی استفاده شد و کلیه لایه‌های شاهد اکتشافی در بازه صفر و یک قرار گرفتند تا جهت ورود به مدل ارزش یکسانی داشته باشند (شکل‌های ۳ تا ۱۱). سپس این داده‌ها تبدیل به ماتریس عددی گردید. داده‌های حاصل از ۹ لایه اکتشافی شامل لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک هوایی، ژئوشیمی و دورسنجی برای نقاط مطلوب کانی‌سازی (اندیس شماره یک) و نقاط نامطلوب کانی‌سازی (اندیس شماره صفر) استخراج و وارد مدل آموزشی شبکه عصبی فازی تطبیقی شدند. شبکه عصبی فازی طراحی شده، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی از نوع سوگنو می‌باشد و ساختار این شبکه پیش‌خور (feed forward) است. مقدار حداقل مجذور مربعات خطا برای داده‌های آموزشی برابر  $8.23 \times 10^{-6}$  و برای داده‌های آزمایشی برابر  $1.07 \times 10^{-6}$  می‌باشد. که تأییدکننده دقت بالای مدل آموزشی تولید شده می‌باشد. فلوجارت مراحل انجام کار در شکل ۱۲ آورده شده است.



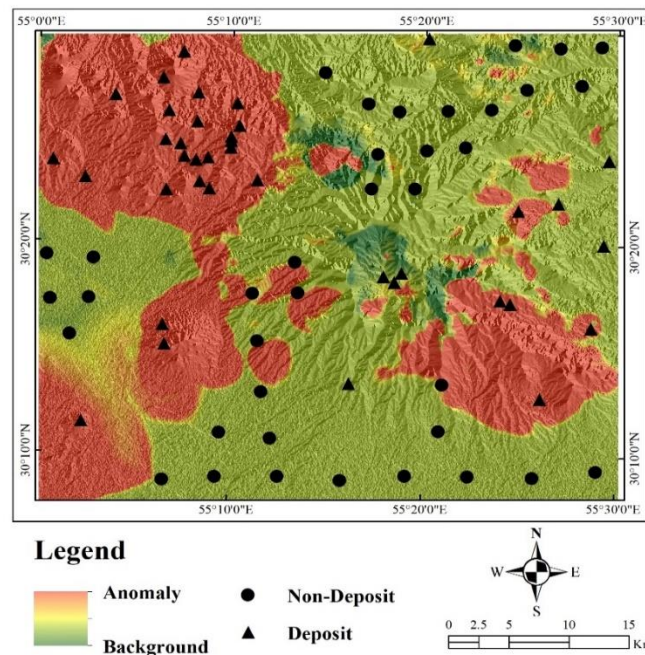
شکل ۱۵- نتایج حاصله برای مدل شبکه عصبی فازی به ترتیب برای داده‌های آموزشی و آزمایشی

a1- هیستوگرام خطا برای داده‌های آموزشی a2- هیستوگرام خطا برای داده‌های آموزشی b1- مقایسه بین داده‌های تخمینی و واقعی برای داده‌های آموزشی b2- مقایسه بین داده‌های تخمینی و واقعی برای داده‌های آموزشی C1- خطای داده‌های آموزشی C2- خطای داده‌های آزمایشی

Figure 15. The results obtained for ANFIS, respectively for the training and testing samples.

A1- Error histogram for training data a2- Error histogram for testing data b1- Comparison between estimated and actual data for training data b2- Comparison between estimated and actual data for testing data C1- Training data error C2- Testing data error





شکل ۱۶ - مدل پتانسیل معدنی با استفاده از روش شبکه عصبی فازی.

Fig. 16 - Mineral potential model using Adaptive Nero Fuzzy method.

کانی‌سازی مس موجود در محدوده و همچنین برای تولید نقاط غیر کانی‌سازی از روش آنالیز نقطه‌ای استفاده شد. نقاط آموزشی تهیه شده با اندیس یک برای نقاط کانی‌سازی و با اندیس صفر برای نقاط غیر کانی‌سازی وارد نرم‌افزار متلب شد. پس از آموزش، مدل آموزشی تولید شده روی داده‌های محدوده مطالعاتی شهرباک اجرا و مدل نهایی پتانسیل‌یابی مس پورفیری تولید شد. مدل نهایی تولید شده همبستگی مناسبی با نقاط کانی‌سازی و غیر کانی‌سازی دارد. همچنین نواحی پرتانسیل به طور عمده در غرب محدوده اکتشافی و همچنین در بخش‌هایی از شرق محدوده قرار دارد. برای ارزیابی مدل از معیار میانگین مربعات خطا استفاده شد مقدار حداقل مجذور مربعات خطا برای داده‌های آموزشی برابر  $0.068/23$ -e و برای داده‌های آزمایشی برابر  $0.061/07$ -e می‌باشد. که تأییدکننده دقت بالای مدل آموزشی تولید شده می‌باشد. نتایج حاصله دقت بالای روش شبکه عصبی فازی را در تولید مدل پتانسیل مس پورفیری را نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش شبکه عصبی فازی تطبیقی در تولید مدل پتانسیل پورفیری در محدوده مطالعاتی شهرباک استفاده شده است. محدوده مطالعاتی شهرباک در غرب استان کرمان و در فاصله ۱۷۷ کیلومتری از شهر کرمان قرار دارد. محدوده مطالعاتی بخشی از کمربند مس پورفیری ارومیه دختر می‌باشد. جهت تولید مدل پتانسیل مس پورفیری در این محدوده از ۹ لایه ورودی شامل واحدهای پلوتونیک مربوط به کانی‌سازی مس پورفیری، گسل‌ها، نقشه اثر ژئوشیمیایی عنصر مس، نقشه ژئوشیمیایی آنالیز چندمتغیره (مولفه ۳)، نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیس هوایی، دگرسانی آرژیلیک، دگرسانی فیلیک، دگرسانی اکسید آهن و لایه ارتفاع منطقه به کار برده شد. ابتدا لایه‌های مذکور تبدیل به فایل رستری شد و سپس این لایه‌ها با استفاده از تبدیلات فازی بی‌مقیاس شدند و در بازه صفر و یک قرار گرفتند تا جهت ورود به مدل نرمال‌سازی و وزن یکسانی داشته باشند. جهت تولید مدل آموزشی از نقاط

## مراجع

Abedi, M., Torabi, S.A., Norouzi, G.-H., Hamzeh, M., 2012. ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping. *Journal of Applied Geophysics* 87, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.08.003>

- Alipour Shahsavari, M., Afzal, P., Hekmatnejad, A., 2020. Identification of Geochemical Anomalies Using Fractal and LOLIMOT Neuro-Fuzzy modeling in Mial Area, Central Iran. *Journal of Mining and Environment* 11. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8465.1727>
- An, P., Moon, W.M., Bonham-Carter, G.F., 1992. On knowledge-based approach of integrating remote sensing, geophysical and geological information, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1992.576620>
- Bonham-carter, G.F., Agterberg, F.P., 1999. Arc-WofE : a GIS tool for statistical integration of mineral exploration datasets. *Bulletin of the International Statistical Institute* 52.
- Bougrain, L., Gonzalez, M., Bouchot, V., Cassard, D., Lips, A.L.W., Alexandre, F., Stein, G., 2003. . Knowledge recovery for continental-scales mineral exploration by neural networks. *Natural Resources Research* 12, 173–181. <https://doi.org/10.1023/A:1025123920475>
- Carranza, E.J.M., 2004. Weights of Evidence Modeling of Mineral Potential: A Case Study Using Small Number of Prospects, Abra, Philippines. *Natural Resources Research* 13, 173–187. <https://doi.org/10.1023/B:NARR.0000046919.87758.f5>
- Carranza, E.J.M., Hale, M., 2001. Geologically-constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research* 10, 125–136. <https://doi.org/10.1023/A:1011500826411>
- Clark, D.A., 2014. Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper–gold systems: A review. *Tectonophysics* 624–625, 46–65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.011>
- Fadhillah, M.F., Hakim, W.L., Panahi, M., Rezaie, F., Lee, C.-W., Lee, S., 2022. Mapping of landslide potential in Pyeongchang-gun, South Korea, using machine learning meta-based optimization algorithms. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 25, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.03.008>
- Harris, D., Pan, G., 1999. Mineral favorability mapping: a comparison of artificial neural networks, logistic regression and discriminant analysis. *Natural Resources Research* 8, 93–109. <https://doi.org/10.1023/A:1021886501912>
- Jang, J.-S.R., 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 23, 665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Leng, G., Zeng, X.-J., Keane, J.A., 2009. A hybrid learning algorithm with a similarity-based pruning strategy for self-adaptive neuro-fuzzy systems. *Applied Soft Computing* 9, 1354–1366. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.05.006>
- Mamdani, E.H., Assilian, S., 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int J Man Mach Stud* 7, 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. *Remote Sensing of Environment* 114, 2011–2025. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.008>
- Ninomiya, Y., n.d. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data, in: *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*. IEEE, pp. 1552–1554. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294172>
- Nykänen, V., Lahti, I., Niiranen, T., Korhonen, K., 2015. Receiver operating characteristics (ROC) as validation tool for prospectivity models — A magmatic Ni–Cu case study from the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Finland. *Ore Geology Reviews* 71, 853–860. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.007>
- Nykänen, V., Salmirinne, H., 2007. Prospectivity analysis of gold using regional geophysical and geochemical data from the Central Lapland Greenstone Belt, Finland. *Special Paper of the Geological Survey of Finland* 2007.
- Porwal, A., Carranza, E.J.M., Hale, M., 2006. A Hybrid Fuzzy Weights-of-Evidence Model for Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research* 15, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11053-006-9012-7>
- Porwal, A., Carranza, E.J.M., Hale, M., 2004. A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping. *Mathematical Geosciences* 36(7), 803–826. <https://doi.org/10.1023/B:MATG.0000041180.34176.65>

- Ramazi, H., Amini, A., 2014. Fuzzy logic application in compiling multi geohazards macro-zone maps; case study: Rahdar, 1:25,000 Quadrangle, Khuzestan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 7, 3243–3249. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0943-0>
- Sanusi, S.O., Amigun, J.O., 2020. Logistic-Based Translation of Orogenic Gold Forming Processes into Mappable Exploration Criteria for Fuzzy Logic Mineral Exploration Targeting in the Kushaka Schist Belt, North-Central Nigeria. *Natural Resources Research* 29, 3505–3526. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09689-1>
- Shirazi, A., Hezarkhani, A., Beiranvand Pour, A., Shirazy, A., Hashim, M., 2022. Neuro-Fuzzy-AHP (NFAHP) Technique for Copper Exploration Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) and Geological Datasets in the Sahlabad Mining Area, East Iran. *Remote Sensing (Basel)* 14, 5562. <https://doi.org/10.3390/rs14215562>
- Sillitoe, R.H., 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences* 44, 373–388. <https://doi.org/10.1080/08120099708728318>
- Sillitoe, R.H., 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology* 67, 184–197. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.2.184>
- Singer, D.A., Kouda, R., 1996. Application of a feedforward neural network in the search for Kuroko deposits in the Hokuroku district, Japan. *Math Geol* 28, 1017–1023. <https://doi.org/10.1007/BF02068587>
- Sugeno, M., Kang, G.T., 1988. Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems* 28, 15–33. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3)
- Sugeno, M., Tanaka, K., 1991. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system. *Fuzzy Sets Syst* 42, 315–334. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(91\)90110-C](https://doi.org/10.1016/0165-0114(91)90110-C)
- Sun, T., Chen, F., Zhong, L., Liu, W., Wang, Y., 2019. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geol Review* 109, 26–49. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.003>
- Yousefi Soorani, L., Shafiei Bafti, B., Homam, S.M., Abbasloo, Z., Taghizadeh Zanooghi, H., 2022. Hypogene enrichment in Miduk porphyry copper ore deposit, Iran. *Scientific Reports* 12, 19133. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23501-5>
- Zadeh, L.A., 1973. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Trans Syst Man Cybern SMC-3*, 28–44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- Zuo, R., Carranza, E.J.M., 2011. Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity. *Computer and Geoscience* 37, 1967–1975. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.09.014>