

Comparison accuracy of Fuzzy-GAMMA and analytical hierarchy process (AHP) two methods with the potential detection of Cu metal in Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic zone

Mohamad Amin Jafari¹, Ahad Nzarpour^{2*}, Ali Kananian¹

1-School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2-Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Keywords: Cu potential, Singularity, Fuzzy Logic (Fuzzy-GAMMA), Analytical Hierarchy Process (AHP), Malayer-Aligoudarz-Esfahan

1-Introduction

Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic belt is located in the Sanandaj-Sirjan Zone, which hosts a large number of metal deposits. In this study, using the Fuzzy-GAMMA method and analytic hierarchy process (AHP) based on weighting to exploratory layers were used Cu metal modeling in the studied area. Mineral exploration is a sophisticated process requiring the simultaneous consideration of various thematic geo-datasets (e.g., geological, geochemical, geophysical). The ultimate purpose of mineral exploration is to discover a new mineral deposit in the region of interest. Multiple data sets or layers should be collected, analyzed, and integrated for mineral prospectivity mapping (MPM) in the region of interest to achieve this goal (Carranza, 2008). MPM is a multistep process of generating evidential maps (i.e., extracting and weighting of features indicating the presence of the mineral deposit-type sought), combining evidential maps, and finally ranking promising target areas for further exploration (Yousefi et al., 2012). The MPM process is, in fact, a multi-criterion decision-making (MCDM) task. An MCDM method allows the analyst and decision-makers (DMs) to understand the problem, the feasible alternatives, different outcomes, conflicts between the criteria, and the data uncertainty level. The analytical hierarchy process (AHP) and fuzzy-GAMMA is an MCDM approach that has widely been used in decision-making problems in geology and environmental sciences (Taylan, 2013).

2-Methodology

2-1- Fuzzy logic

Fuzzy logic is based on a fuzzy set theory proposed by Zadeh (1965). Fuzzy logic does not use a binary response (presence or absence of evidence as in weights of evidence) but values between 0 (not favorable) and 1 (favorable) (Zadeh, 1965). The fuzzy model for mineral prediction is defined as a generic model: if X is the set of evidential layers X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), and each layer has r classes defined as ($j = 1, 2, 3, \dots, r$), then n fuzzy sets A_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) in X are defined as:

$$A_{ij} = \{(x_{ij}, \mu_A) / x_{ij} \in X_i\}, \quad (0 \leq \mu_A \leq 1) \quad (1)$$

Where μ_A is the membership value. When x_{ij} is favorable to mineralization, $0.5 < \mu_A < 1$; when and only when it cannot be determined whether x_{ij} is favorable or unfavorable to mineralization, $\mu_A = 0.5$; and when x_{ij} is unfavorable to mineralization, $0 < \mu_A < 0.5$. The individual evidence layer, calculated by using the fuzzy-GAMMA approach, multiplied in the corresponding evidence layers. Then the final prospectivity map was generated by integrating the weighted evidential maps using fuzzy Gamma = 0.9 operator (Bonham-Carter, 1994). Choosing a value of 0.95 for this study reflects the expert opinion for giving an additive possibility value in the final prospectively map.

*Corresponding author : Ahad.nazarpour@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.30222.2011

Received 2019-07-06

Accepted 2020-02-07

2-2- Analytical Hierarchy Process (AHP)

The analytical hierarchy process (AHP) is one of the essential techniques among multiple criteria decision making (MCDM) techniques. This technique investigates complicated problems based on their interactions and resolves them by converting them into simple forms (Saaty, 2016). The relative “priority or weight” given to each element of the hierarchy is determined by comparing pairwise the contribution of each element, at a lower level, in terms of the criteria (elements) with which a causal relationship exists. The pairwise judgment starts from the second level and finishes at the lowest level, alternatives. In each level, the criteria are compared pairwise according to their level of influence and based on the specified criteria at a higher level. The DM uses a standardized comparison scale of nine levels shown in Table 1 (Saaty, 1990).

Table 1. Nine-point intensity of importance scale and its description (Saaty, 1990).

Intensity of importance	Definition
9	Extreme importance
8	Very strong to stream
7	Very strong importance
6	Strongly to very strong
5	Strong importance
4	Moderately to strong
3	Moderate importance
2	Equally to moderately
1	Equal importance

3- Results and discussion

First, all exploration layers and substrates, including lithology, geochemistry, and fault density, were weighted by the Fuzzy-GAMMA method and ranged from 0 to 1. Then fuzzy layers are integrated according to the weights assigned with 0.9 gammas (γ) value, and Potential maps of Cu metal in the study area were obtained by the Fuzzy-GAMMA method. Subsequently, using the analytic hierarchical process Method (AHP) and forming an appropriate matrix for the exploration layers, the layers were weighted, and the potential map of Cu metal was obtained. Finally, the Cu deposits and indices in the region were used to compare the applied methods accuracy. The results showed that the (AHP) method compared with the Fuzzy-GAMMA method, determine more anomaly and the obtained anomalies by this method more consistent with existing Cu deposits in the region.

References

- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists 13, 398.
- Carranza, E. J. M., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS, Elsevier, Volume 11, 1st edition.
- Saaty, T. L., 1986. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. Management science 32(7), 841-855.
- Saaty, T. L., 2016. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In Multiple criteria decision analysis Springer, New York, NY. pp. 363-419
- Saaty, T.L., 1990. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS publications.
- Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M., Kabli, M. R., 2014. Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. Applied Soft Computing 17, 105-116.
- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E. J. M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. Journal of Geochemical Exploration 115, 24-35.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. Information and control 8(3), 338-353.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jafari, M.A., Nzarpour, A., Kananian, A., 2020. Comparison accuracy of Fuzzy-GAMMA and analytical hierarchy process (AHP) two methods with the potential detection of Cu metal in Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic zone. Adv. Appl. Geol. 10(3), 314-327.

DOI: 10.22055/AAG.2020.30222.2011

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15341.html?lang=en

مقایسه دقت دو روش فازی گاما (Fuzzy-GAMMA) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با هدف پتانسیل-

یابی فلز مس در زون فلززایی ملایر - الیگودرز - اصفهان

محمدامین جعفری

دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

احد نظریور*

گروه زمین شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

علی کنعانیان

دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۸

*Ahad.nazarpour@gmail.com

چکیده

کمربند فلززایی ملایر - الیگودرز - اصفهان با قرار گرفتن در زون سندنچ - سیرجان میزبان تعداد زیادی از ذخایر فلزی می باشد. در این پژوهش با استفاده از روش های منطق فازی (Fuzzy-GAMMA)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و بر اساس وزن دهی به لایه های اکتشافی، مدل سازی فلز مس در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. ابتدا تمام لایه ها و زیر لایه های اکتشافی شامل لیتولوژی، زمین شیمی و چگالی گسل ها با استفاده از روش منطق فازی (Fuzzy-GAMMA) وزن دهی و در دامنه ۰ تا ۱ قرار گرفتند. سپس لایه های فازی سازی شده طبق وزن های اختصاص یافته با مقدار گامای (۲) ۰/۹ با یکدیگر تلفیق و نقشه های پتانسیل یابی فلز مس در منطقه مورد مطالعه بر اساس روش منطق فازی (Fuzzy-GAMMA) حاصل شد. پس از آن با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با تشکیل دادن ماتریس مناسب برای لایه های اکتشافی، لایه ها وزن دهی شدند و نقشه پتانسیل یابی فلز مس بدست آمد. در نهایت، از موقعیت کانسارها و اندیس های مس موجود در منطقه برای مقایسه میزان دقت روش های بکار گرفته شده استفاده شد که نتایج حاصل نشان داد روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در مقایسه با روش منطق فازی (Fuzzy-GAMMA) آنومالی های بیشتری را مشخص کرده و آنومالی های بدست آمده از این روش انطباق بیشتری با معادن مس موجود در منطقه نشان می دهد.

کلمات کلیدی: پتانسیل یابی مس، سینگولاریتی، منطق فازی (Fuzzy-GAMMA)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، ملایر - الیگودرز - اصفهان

مقدمه

کانسارهای مس با میزبان رسوبی در محیط های دریایی یا دلتایی غیر آشفته یابی یافت می شوند. این نهشته ها از نظر دید زمانی و مکانی، توزیع گسترده ای از پروتوزوئیک تا سنوزوئیک دارند و ذخیره آن ها می تواند از اندازه های نیمه اقتصادی تا چند صد میلیون تن تغییر کند (Perelló et al., 2017). به طور کلی، این کانسارها از دید شکل کانی - سازی، عدسی مانند تا چینه سان هستند و طول آن ها دست کم ده ها برابر ستبرای آنهاست. ذخایر مس رسوبی توسط پژوهشگران بسیاری مانند (Hitzman et al., 2005) به دو گروه گسترده تقسیم شده اند: (۱) نوع کوپرشیر که ذخایر مس گسترده اما محدود شده به افق های پلیتی - کربناتی هستند که در محیط های دریایی کم ژرفا یا دریاچه ای رسوب - گذاری شده اند؛ (۲) نوع لایه سرخ که مرز میان افق های آواری سرخ و خاکستری، در توالی هایی که لایه های سرخ چیره هستند، تمرکز دارند. در بیشتر موارد در کانسارهای مس رسوبی، چند لایه از ماده معدنی وجود دارد که ستبرای آن ها با همدیگر متفاوت است. به باور Singer (۱۹۹۵) این کانسارها تقریباً ۲۳ درصد ذخایر مس تولیدی دنیا را تشکیل می دهند و همین طور منابع مهمی برای فلزاتی از جمله نقره و کبالت به شمار می روند (Singer, 1995).

کمربند ملایر - الیگودرز - اصفهان، یزد - انارک، البرز مرکزی و طبس - پشت بادام بیشترین و مهم ترین کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی ایران را در خود جای داده اند (Momenzadeh, 1976). کمربند فلززایی ملایر - الیگودرز - اصفهان که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است در زون پرتکاپوی سندنچ - سیرجان واقع شده است و دارای توان معدنی فلزی و غیرفلزی بالایی است. مواد معدنی فلزی در این زون شامل: سرب، روی، مس، نقره، کادمیوم و آهن می باشد (Delavar et al., 2012). این زون که مهم ترین کمربند سرب و روی موجود در ایران است دارای ذخایر مس قابل توجهی است که عمدتاً جز ذخایر مس رسوبی بشمار می روند و همراه با سرب و روی و گاهی نقره و کادمیوم درون سنگ های کربناته (آهک های کراتاسه) تشکیل شده اند (Momenzadeh, 1979).

اکتشاف منابع معدنی فرآیند پیچیده ای است که نیازمند در نظر گرفتن مجموعه داده های مکانی مختلف (زمین شیمی، ژئوفیزیک، زمین شناسی و غیره) از منطقه مورد مطالعه می باشد که هدف نهایی آن، اکتشاف نوع خاصی از کانه زایی می باشد. جهت رسیدن به این هدف، می بایست داده های مکانی مختلف برای مدل سازی پتانسیل معدنی (MPM) جمع آوری، آنالیز و تلفیق شوند (Najafi et al., 2014). اکتشاف مواد معدنی، معمولاً از یک مقیاس کوچک (نواحی بزرگ) شروع شده و تا مقیاس های بزرگتر (نواحی کوچک) جهت تشخیص و جدا نمودن

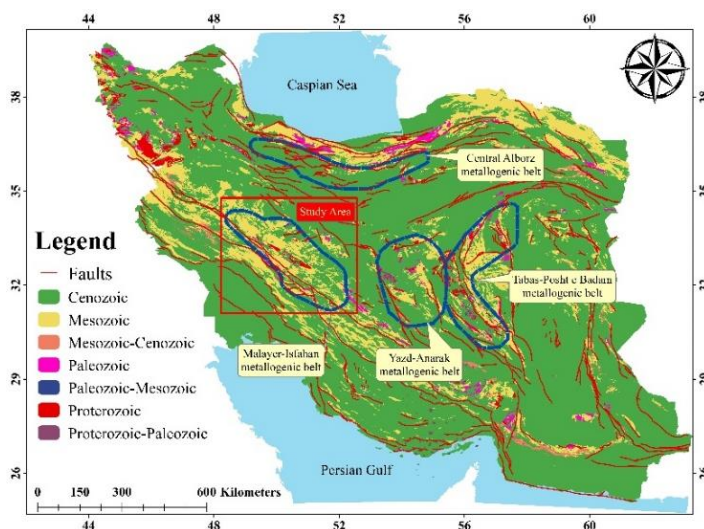
روش‌های نام برده از سه لایه اصلی لیتولوژی (سنگ‌شناسی)، زمین‌شیمی و چگالی گسل‌های منطقه استفاده شده است. همچنین روش‌های مذکور در پتانسیل‌یابی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کانی‌زایی مس رسوبی در ایران در زمان‌های مختلف زمین‌شناسی از جمله در پرکامبرین-کامبرین همراه با گنبد‌های نمکی در پهنه زاگرس، سازند نایبند در زمان تریاس بالایی، سازند گردو در زمان ژوراسیک بالایی-کرتاسه زیرین و سازند سرخ بالایی مربوط به زمان میوسن روی داده است (Aghazadeh and Badrzadeh, 2011). کمر بند فلزایی ملایر - الیگودرز - اصفهان در محدوده طول جغرافیایی ۴۸°۲۱' تا ۵۲°۱۳' و عرض جغرافیایی ۳۰° تا ۳۴° ۴۱' قرار گرفته است. این زون فلزها بخشی از پهنه دگرگونی-ماگمایی سنجندج - سیرجان با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق است که جزئی از بخش درونی کوهزاد زاگرس در نظر گرفته شده است (Alavi, 1994; Mhajjel, 1997). در این پهنه ذخایر مهمی از جمله ذخایر طلای کوهزایی (Aliyari et al., 2007, 2009)، طلای نوع اپی‌ترمال (Daliran, 2008) طلای کارلین (Mehrabi and Mousivand et al., 1999)، ذخایر سولفید توده‌ای (Yardley, 2007, 2011)، ذخایر سرب و روی با میزبان کربناتی (Momenzadeh, 1976) گزارش شده است. این زون در موقعیت زمین‌ساختی پشت کمانی جای دارد و در نتیجه فرورانش اقیانوس نوتتیس به زیر صفحه ایران ایجاد شده است و مهم‌ترین کمر بند فلزایی سرب و روی ایران از نوع MVT (مس‌سی‌سی‌پی با میزبان رسوبی) و Sedex (کم‌تر) بشمار می‌رود که ذخایر مس و نقره قابل توجهی را هم دارا می‌باشد (Rajabi et al., 2013). به علت مشابه بودن شرایط زمین‌شناسی برخی از انواع کانسارهای مس با تشکیل کانسارهای سرب و روی، این زون میزبان تعداد زیادی از کانسارهای مس نیز می‌باشد که دارای سنگ میزبان رسوبی (آهک‌های کرتاسه) می‌باشد (شکل ۲) (Ghasemi and Talbot, 2006).

مناطق دارای پتانسیل، ادامه می‌یابد (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018).

مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) در حقیقت نوعی تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) در نظر گرفته می‌شود، زیرا به تصمیم‌گیرنده این اجازه را می‌دهد که یک درک کلی از هدف نهایی را داشته باشد (Najafi et al., 2014). تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)، فرآیند انتخاب مناسب‌ترین جایگزین‌ها در حضور معیارهای چندگانه می‌باشد. مدل‌سازی پتانسیل معدنی بر اساس روش‌های دانش محور در شروع عملیات اکتشافی در مناطقی که از لحاظ زمین‌شناسی مناسب بوده ولی در آن کار اکتشافی کم صورت گرفته، مناسب هستند. در این روش‌ها، مدل‌های مفهومی به عنوان ملاکی برای انتخاب و شناسایی معیارهای اکتشافی و الگوهای شاهد، تولید نقشه‌های پیش‌گو، تخصیص وزن به نقشه‌ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه‌های شاهد به منظور معرفی مناطق امیدبخش برای ذخیره مورد جستجو استفاده می‌شود (Carranza, 2008). برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در محیط ArcGIS دو دسته کلی وجود دارد. دسته اول با عنوان روش‌های متکی بر داده‌ها شناخته می‌شوند که متغیرهای این مدل با در نظر گرفتن شواهد موجود و مدل‌های ذخیره اکتشاف شده در منطقه مطالعاتی تعیین می‌شوند که در این دسته می‌توان به روش‌هایی چون تحلیل تصمیم‌گیری درختی و رگرسیون لجستیک اشاره کرد. در دسته دوم که به روش‌های متکی بر دانش موسوم هستند، متغیرهای مدل با توجه به هدف اکتشافی، منطقه مورد مطالعه و عوامل تأثیرگذار دیگر توسط کارشناس برآورد می‌شود. روش‌های چون منطق فازی و همپوشانی چند کلاسه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جز این دسته‌اند (Zhang et al., 2017). با توجه به اینکه یکی از مهمترین فلزات همراه با زون‌های سرب و روی، مس می‌باشد، هدف اصلی این پژوهش، پتانسیل‌یابی کانه‌زایی فلز مس در زون ملایر-الیگودرز - اصفهان می‌باشد. در این پژوهش از روش‌های منطق فازی (Fuzzy-GAMMA) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. بدین منظور برای استفاده از

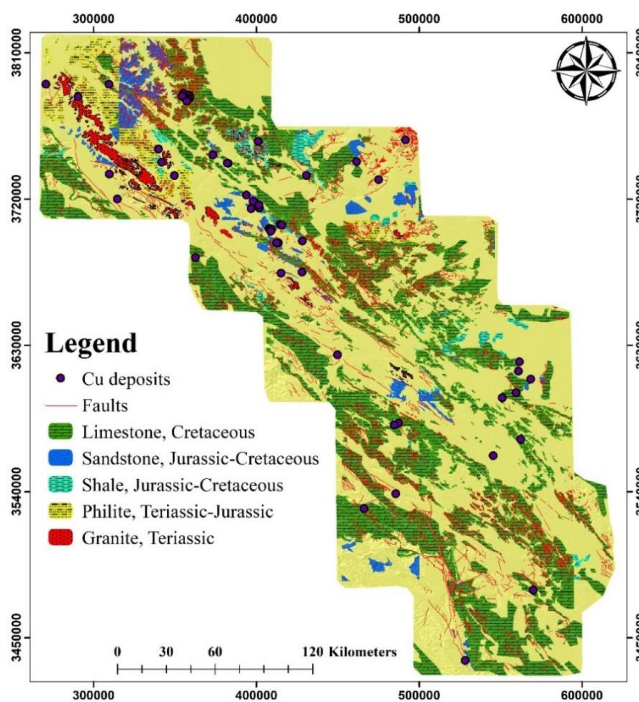


شکل ۱- موقعیت کمر بندهای متالوژن سرب و روی در ایران و جایگاه منطقه مورد مطالعه (Rajabi et al., 2012).

Fig. 1. Position of metallogenic belt of Pb and Zn in Iran and location of Malayer-Isfahan zone.

فیلیت‌های (تریاس-ژوراسیک) می‌باشد. در این زون، کانه‌سازی کانسارها و نشانه‌های معدنی به‌صورت چینه‌کران، لایه‌ای، عدسی و رگه‌ای هستند و اغلب میزبان آن‌ها دولومیت، آهک و ماسه‌سنگ هستند (Ehya et al., 2010). همچنین کانسارهای مس (Cu) تشکیل شده در این زون از ترکیب کانی‌های کالکوپیریت، پیروتیت، اسفالریت، پیریت، گالن و غیره می‌باشند (Rajabi et al., 2012).

زمین‌ساخت کشتی کرتاسه زبرین سبب تشکیل حوضه‌های فرازمین و فروزمین در این زون شده است که بسیاری از کانسارهای سرب، روی، مس، کادمیوم و نقره با میزبان کربناته در حوضه‌های فروزمینی حاصل، نهشته شده‌اند (Movahednia et al., 2017). مطابق نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲) واحدهای زمین‌شناسی موجود در این زون شامل ماسه-سنگ (ژوراسیک-کرتاسه)، شیل (ژوراسیک-کرتاسه)، گرانیت (تریاس) و



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.

Fig. 2. Geological map of Malayer-Isfahan metallogenic belt.

روش کار

این واحدها رخ داده‌اند، به همین دلیل برای جداسازی واحدهای سنگی از نقشه‌های زمین‌شناسی ۲۵ ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ که تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه می‌باشد استفاده شده است.

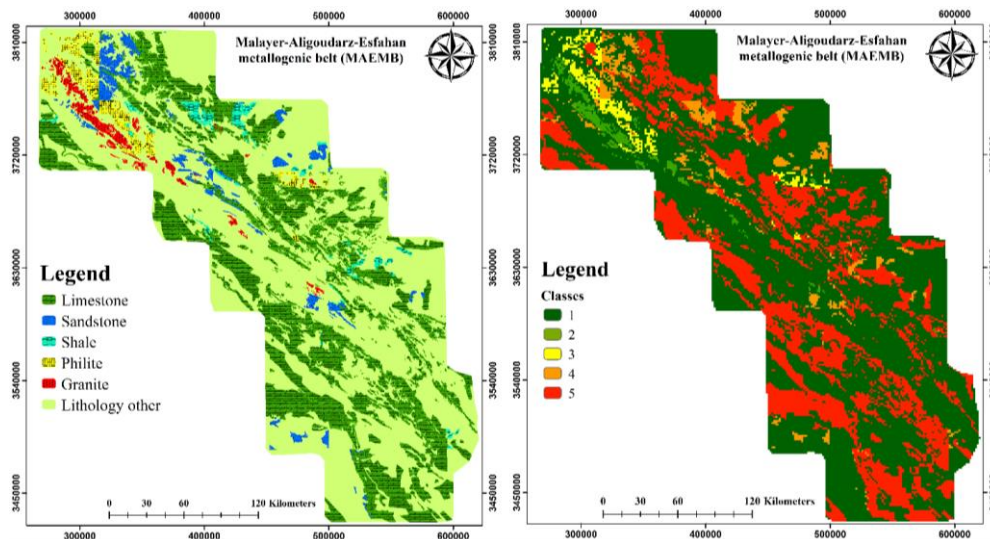
با توجه به اهمیت آهک‌های کرتاسه در کانه‌زایی سرب، روی، مس و ... در زون فلززایی ملایر - الیگودرز - اصفهان، این لایه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و همچنین این واحد با توجه به اینکه سنگ میزبان بسیاری از کانسارهای موجود در منطقه مورد مطالعه است بیشترین امتیاز را دارا می‌باشد (۵)، پس از آن واحدهای شیل و ماسه‌سنگ (۴)، فیلیت (۳)، گرانیت (۲) و سایر لیتولوژی‌ها (۱) به ترتیب به علت مؤثر بودن در تشکیل کانسارهای مس (با توجه به نظر متخصص)، بیشترین امتیازها را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳).

لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده در این تحقیق بر اساس معیارهای اکتشافی مربوط به کانسارهای مس رسوبی که همراه با کانسارهای سرب و روی تیپ MVT هستند انتخاب شده‌اند. پس از بررسی‌های فراوان و استفاده از نظرات متخصصین علوم زمین، در نهایت سه معیار اصلی در قالب لایه‌های اطلاعاتی شامل: سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، چگالی گسل-های موجود در منطقه مورد مطالعه و همچنین داده‌های زمین‌شیمیایی مس در نرم افزار ArcGIS باهم تلفیق شدند.

لایه‌های اکتشافی

الف) لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی)

منشأ اکثر کانسارهای موجود در کمربند ملایر - الیگودرز - اصفهان با واحدهای سنگی ارتباط تنگاتنگی دارند و بیشتر کانی‌زایی‌های مس درون



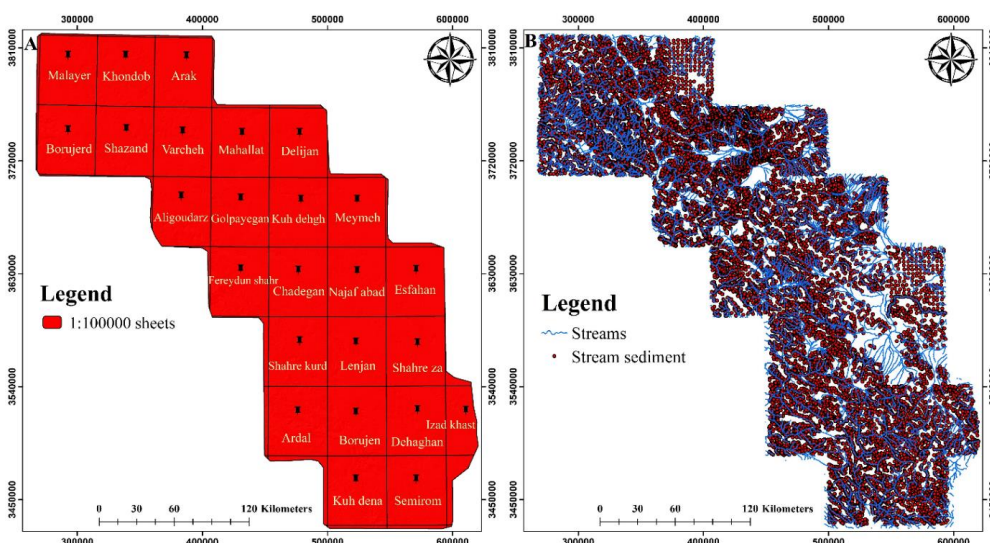
شکل ۳- لایه لیتولوژی و نقشه وزن دار شده آن در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 3. Lithology layer and its weighted map in the study area.

بروجن، بروجرد، چادگان، دهاقان، دلجان، اصفهان، فریدون شهر، گلپایگان، ایزدخواست، خنداب، کوهدهق، کوهدنا، محلات، ملایر، میمه، نجف آباد، ریزلنجان، سمیرم، شهرکرد، شازند، شهرضا و ورچه که توسط سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور تهیه شده اند استفاده شده است (شکل ۴). موقعیت نمونه های برداشت شده در (شکل ۴) ارائه شده است.

(ب) لایه زمین شیمی

در این مطالعه جهت فراهم کردن لایه زمین شیمیایی در کمربند فلزایی ملایر - الیگودرز - اصفهان از نمونه رسوبات آبراهه ای به تعداد ۴۰ سانتی متری آبراهه ها و با تجزیه به روش ICP-MS و XRF از ۲۵ ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ شامل ورقه های الیگودرز، اراک، اردل،



شکل ۴- (a) ورقه های ۱:۱۰۰۰۰۰ تشکیل دهنده پهنه ملایر-اصفهان و (b) موقعیت رسوبات آبراهه ای برداشت شده در پهنه ملایر-اصفهان.

Fig. 4. (a) 1:100000 sheets forming the Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone, and (b) Position of the stream sediments in the Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone.

شوند و به اصطلاح Weak Anomaly نامیده می شوند و همچنین از طریق وزن دهی به شیوه معکوس فاصله (IDW) مشخص نمی شوند را می تواند شناسایی کند (Jafari et al., 2018a). مقدار سینگولاریتی برای پنجره های کوچک مجاور هم بر اساس (رابطه ۱) بدست می آید (Zuo et al., 2015).

$$X = c \cdot \varepsilon^{(a-E)}$$

(رابطه ۱)

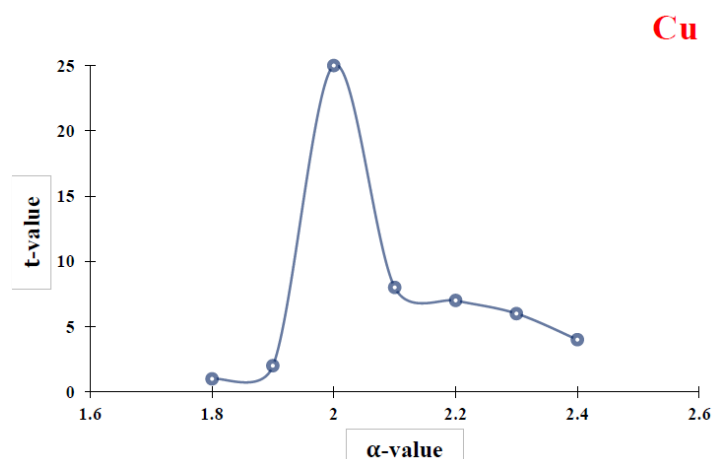
آنومالی های زمین شیمیایی در زون ملایر - الیگودرز - اصفهان با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index) به دست آمدند. تکنیک شاخص سینگولاریتی (SI) قادر به تخمین زدن غلظت فلزات از طریق مشاهده پنجره های کوچک مجاور هم است. جهت تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره ها (f_i) (به شکل مربع) برای اندازه گیری تراکم غلظت (C) حول یک موقعیت خاص (Zi) استفاده می شود (Xiao et al., 2018). این روش آنومالی هایی که بین زمینه پنهان می-

حالت آثار بالا دست و پایین دست منطقه نیز در نظر گرفته می‌شوند. تولید این مربع‌های کوچک آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا به مربع بهینه برسد، زمانی به این امر دست پیدا می‌کند که آنومالی‌های بدست آمده با اندیس‌ها و نشانه‌های معدنی منطقه همپوشانی بالایی نشان دهد. در واقع این امر مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد (Xiao et al., 2018). بر اساس گفته Cheng حد آستانه معمول در روش سینگولاریتی $\alpha = 1/96$ می‌باشد (Cheng, 2007). نمودار شواهد وزنی (T-Value)، مقدار سینگولاریتی (α) را در برابر مقدار t که در ارتباط با رخنمون‌های معدنی است، را نشان می‌دهد (شکل ۵). مقدار t از رابطه $C/S(C)$ با استفاده از روش شواهد وزنی (WofE) به دست آمده است. جایی که C $W^+ - W^-$ و $S(C)$ انحراف معیار (SDEV) باشد. W^+ و W^- زمانی که مدل‌های اثبات شده‌ای باشند (به عنوان مثال آنومالی‌ها) مقادیر وزن‌هایی هستند که از W^+ زمانی که رخنمون معدنی موجود باشد و از W^- زمانی که رخنمون معدنی وجود نداشته باشد استفاده می‌شود (Jafari et al., 2019). در واقع t تعداد معادن و کانسارهای مربوط به هر فلز را نمایش می‌دهد و (α) مقدار سینگولاریتی بدست آمده مربوط به هر عنصر می‌باشد. این نمودار بیان کننده این موضوع می‌باشد که در کدام مقدار از آنومالی‌های بدست آمده از روش سینگولاریتی (α)، همپوشانی بیشتری با کانسارهای مس موجود در منطقه وجود دارد (Kananian et al., 2018). در این پژوهش حد آستانه بدست آمده از روش شاخص سینگولاریتی (α) مطابق نمودار T-Value برای فلز مس ۲ می‌باشد که تمام معادن موجود در منطقه مورد نظر را پوشش می‌دهد. لایه زمین-شیمیایی با استفاده از روش سینگولاریتی (SI) برای فلز مس بدست آمد و کلاس‌بندی این لایه به ترتیب از کم به زیاد (۱ تا ۵) برای لایه زمین‌شیمی مس در نظر گرفته شده است (شکل ۶).

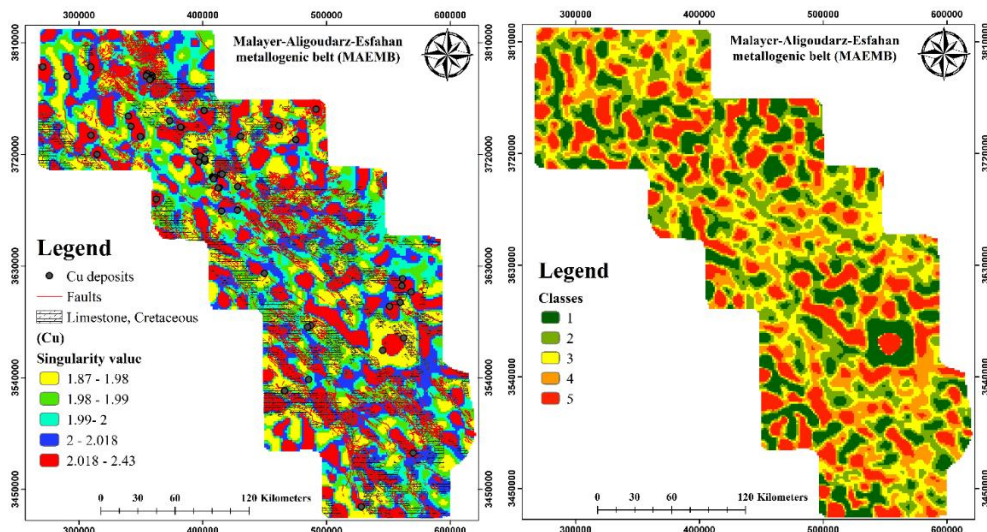
در (رابطه ۱) X نشان دهنده غلظت عنصر، C مقدار ثابت، α شاخص سینگولاریتی، ε اندازه فاصله نرمال شده و E بعد اقلیدسی می‌باشد (Agterberg, 2012). شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های C و ε در نمودار لگاریتمی تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در این روش دو نوع آنومالی ضعیف و قوی مشخص می‌شود که بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB باید مطابق مراحل زیر عمل کرد (Zuo et al., 2015): ۱- موقعیتی روی نقشه با تعدادی از پنجره‌های متغیر $A(r)$ (مربع شکل) $r_{min}=r1 < r2 < \dots < r_n=r_{max}$ در نظر گرفته می‌شود و میانگین غلظت $C[A(r_i)]$ برای هر اندازه پنجره روی نقشه محاسبه می‌شود (Jafari et al., 2018b). ۲- برای پیاده کردن داده‌های $C[A(r_i)]$ ($i=1, \dots, n$) و r_i در یک نمودار لگاریتمی از (رابطه ۲) استفاده می‌کنیم (Wang and Zuo, 2018).

$$C[A(r_i)] = C \log(r)\alpha + 2 - \log \quad (\text{رابطه ۲})$$

مقدار α ۲- را می‌توان از شیب خط راست بدست آورد. ۳- تکرار کردن روش‌های نام برده برای تمام قسمت‌های نقشه زمین-شیمیایی (Xiao et al., 2018). برای یک نقشه زمین‌شیمیایی، مقدار α (شاخص سینگولاریتی) نزدیک به ۲ یک توزیع نرمال را نشان می‌دهد. درحالی که مناطقی با سینگولاریتی مثبت ($\alpha > 2$) تپی-شدگی و سنگولاریتی منفی ($\alpha < 2$) غنی‌شدگی غلظت عناصر در منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد (Liu et al., 2019). در این روش، با استفاده از نرم افزار MATLAB، سینگولاریتی یک ماتریس سطر با ستون برابر را ایجاد می‌کند و منطقه مورد مطالعه را به یک سری مربع‌های کوچک تقسیم‌بندی می‌کند سپس غلظت میانگین مربع‌ها را به عنوان غلظت تخمینی در نظر می‌گیرد (Jafari et al., 2019). در این



شکل ۵- نمودار T-Value فلز مس برای آنومالی‌های بدست آمده از روش شاخص سینگولاریتی در منطقه مورد مطالعه.
Fig. 5. T-Value graph of Cu metal for anomalies obtained by Singularity Index method in the study area.



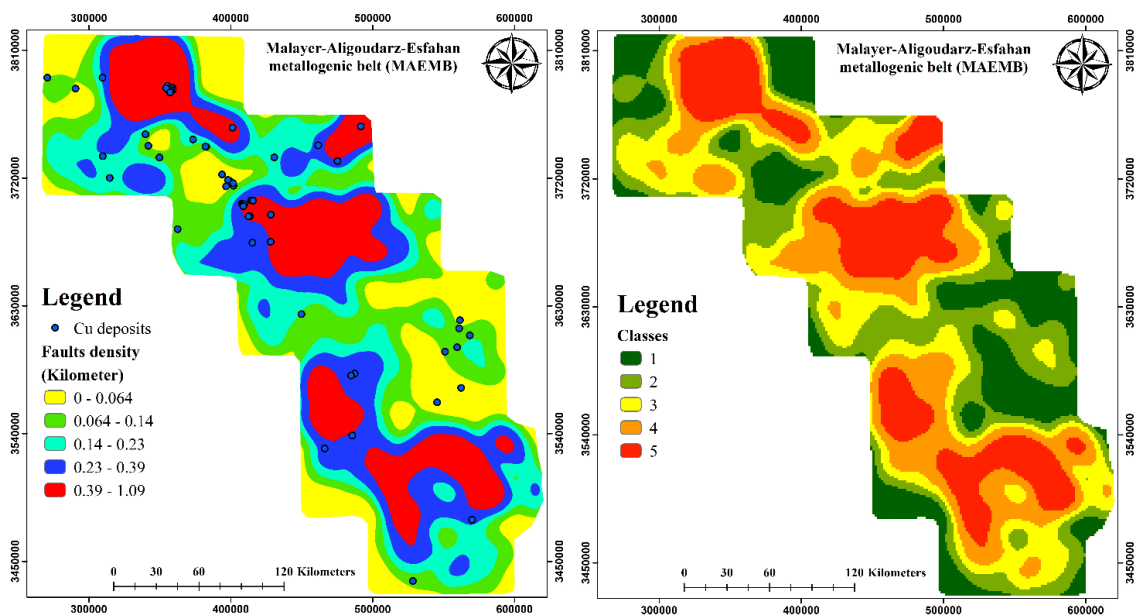
شکل ۶- لایه زمین‌شیمیایی فلز مس بر اساس روش شاخص سینگولاریتی و نقشه وزن‌دار شده آن در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 6. Geochemical layer of Cu metal based on Singularity Index method and its weighted map in the study area.

در زون ملایر- الیگودرز- اصفهان با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه رقومی گردید و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS چگالی‌های گسل‌های منطقه بر اساس کیلومتر برای این لایه بدست آمد. از این لایه به عنوان یکی از لایه‌های اکتشافی استفاده شده است. در همین راستا لایه چگالی گسل‌ها که از لحاظ تراکم به ترتیب از تراکم کم به زیاد دارای وزن (یک تا پنج) هستند تهیه شد (شکل ۷).

ج) لایه چگالی گسل‌ها

یکی از عوامل کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه با توجه به نوع و ماهیت تشکیل ماده معدنی گسل‌ها هستند که ممکن است کانی‌زایی مس در امتداد آن‌ها صورت گرفته باشد. بخاطر اهمیت گسل‌ها و ارتباط نزدیک آن‌ها با کانه‌زایی و محلول‌های هیدروترمال، یکی از لایه‌های اطلاعاتی به گسل‌ها اختصاص داده شد. در این منطقه گسل‌های با روند شمال‌غرب - جنوب‌شرق ارتباط خیلی نزدیکی با کانه‌زایی مس دارند. گسل‌های موجود



شکل ۷- لایه چگالی گسل‌ها و نقشه وزن‌دار شده آن در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 7. Layer of faults density and its weighted map in the study area.

روش‌های تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

استفاده از روش‌های منطق فازی (Fuzzy-GAMMA) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) پتانسیل‌یابی برای فلز مس انجام شد. در نهایت سه معیار

پس از ایجاد لایه‌های اطلاعاتی مختلف بر اساس داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و مشخص کردن وزن هر زیرلایه در هر لایه، با

عملگر فازی گاما (GAMMA)، ترکیبی از عملگر فازی حاصلضرب جبری (PRODUCT) و عملگر فازی حاصل جمع جبری (SUM) می-باشد در آن پارامتر γ (گاما) در محدود صفر تا یک انتخاب می-گردد. به-طوری که اگر γ (گاما) یک باشد، ترکیب همان حاصل جمع جبری (SUM) خواهد بود و اگر γ (گاما) صفر باشد، ترکیب مساوی حاصلضرب جبری (PRODUCT) است. انتخاب صحیح و آگاهانه γ (گاما)، مقدرهایی در خروجی به وجود می-آورد که نقش فرآینده جمع جبری فازی و نقش کاهنده ضرب جبری فازی در آن عمل می-کند و کل مجموعه را به حالت تعادل می-رساند (Sadeghi and Khalajmasoumi, 2015). با توجه به مطالب گفته شده و مطالعات صورت گرفته در منطقه، اطلاعات لازم برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از منطق فازی GAMMA در قالب (جدول ۱) دسته‌بندی شدند.

اصلی لیتولوژی (سنگ‌شناسی)، زمین‌شیمی و چگالی گسل‌ها با استفاده از روش‌های مذکور تلفیق گردید و مناطق امید بخش فلز مس بدست آمد.

الف) روش منطق فازی

تئوری منطق فازی به عنوان یک روش دانش محور برای اولین بار توسط زاده (Zadeh, 1965) پیشنهاد شده است. این روش بر اساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد که در آن وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی بر مبنای اهمیت هر یک از لایه‌ها بر اساس قضاوت کارشناسان متخصص صورت می‌پذیرد (Houshyar et al., 2014). مبنای این روش به صورت تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های نرمال شده با محاسبه اوزان برای عضوهای فازی بر اساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد (Zhang et al., 2017). مقادیر عضو فازی برای هر یک از پیکسل‌های لایه‌های اکتشافی به صورت مقادیر پیوسته در دامنه صفر تا یک می‌باشند (Tan et al., 2014). در تئوری منطق فازی عضوهای فازی بر اساس فواصل معنادار از ویژگی‌های مختلف وزن‌دهی می‌شوند که برای هر پیکسل یا موقعیت فضایی، یک وزن به خصوص بین صفر تا یک اختصاص داده می‌شود (Zhang et al., 2017). در مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از تئوری منطق فازی، پنج عملگر کاربرد فراوانی برای ترکیب لایه‌های اکتشافی مختلف فازی‌سازی شده دارند که شامل عملگرهای AND فازی، OR فازی، PRODUCT جبری فازی، SUM جبری فازی و GAMMA فازی می‌باشند (Bonham-Carter, 1994). در این پژوهش از عملگر فازی گاما (GAMMA) که مطابق (رابطه ۳) بیان می-شود مورد استفاده قرار گرفته:

$$F_{Combination} = (\text{فازی } \gamma \times (\text{فازی } \text{PRODUCT})^{1-\gamma} \text{ (رابطه ۳)})$$

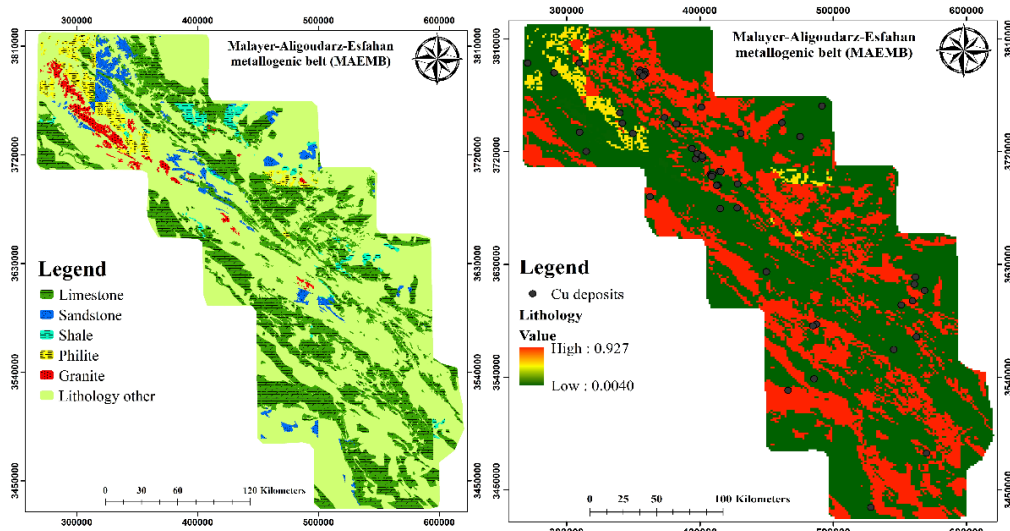
جدول ۱- تعیین لایه‌ها، زیرلایه‌ها و وزن‌دهی بر اساس منطق فازی در منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Determination of layers, substrates and weighting based on fuzzy logic in the study area.

Layers	Substrates	Weights
Lithology	Other	0.1
	Granite	0.2
	Philite	0.3
	Shale	0.7
	Sandstone	0.7
	Limestone	0.9
α (Geochemistry) (Cu)	1.87-1.98	0.1
	1.98-1.99	0.3
	1.99-2	0.5
	2-2.018	0.7
	2.018-2.43	0.9
Faults density (Km)	0-0.064	0.1
	0.064-0.14	0.3
	0.14-0.23	0.5
	0.23-0.39	0.7
	0.39-1.094	0.9

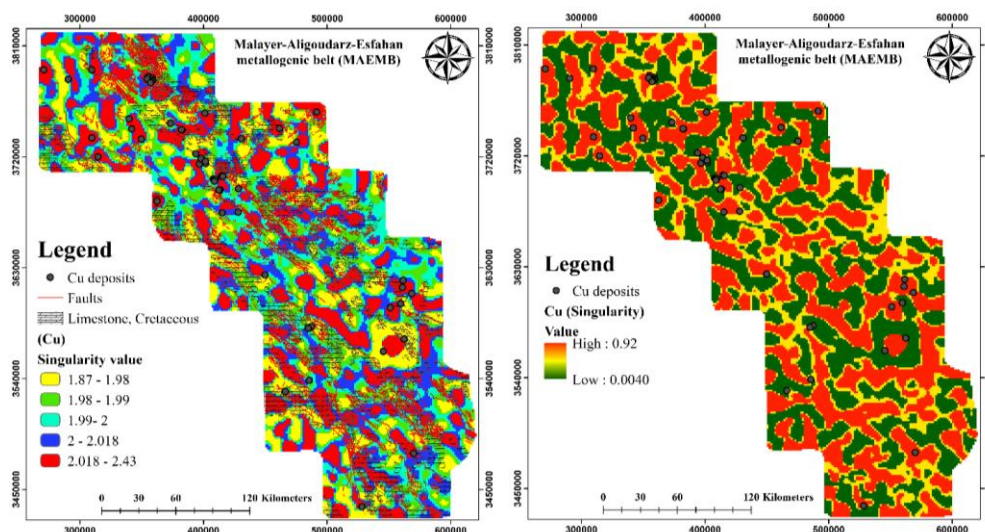
حاصله به جمع جبری نزدیک‌تر خواهد بود. در این مطالعه لایه‌های اکتشافی فازی‌سازی شده با استفاده از عملگر فازی گاما (GAMMA) تلفیق شدند و نقشه پتانسیل معدنی برای فلز مس مطابق شکل ۱۱ بدست آمد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در منطقه و اهمیت هر لایه نسبت به دیگری، اطلاعات لازم برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی فلز مس در قالب لایه‌های لیتولوژی (شکل ۸)، زمین‌شیمی (شکل ۹) و چگالی گسل‌های منطقه (شکل ۱۰) بین صفر تا یک فازی‌سازی شدند. مقدار گامای استفاده شده در این فرآیند $(\gamma=0/9)$ است. هرچقدر γ به یک نزدیک باشد ترکیب



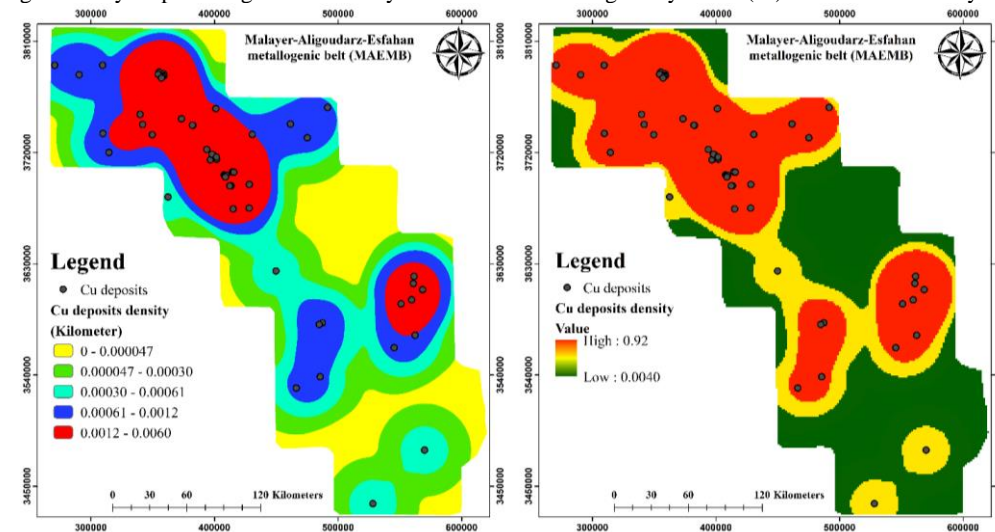
شکل ۸- نقشه فازی سازی شده لایه لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 8. Fuzzy lithology layer map in the study area.



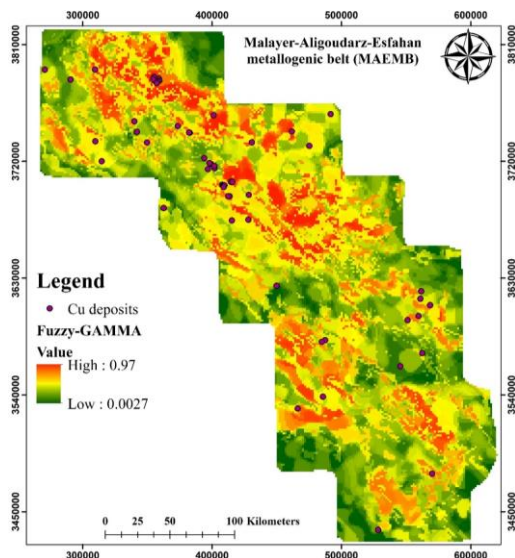
شکل ۹- نقشه فازی سازی شده لایه زمین شیمی مس بر اساس روش شاخص سینگولاریتی (SI) در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 9. Fuzzy map of the geochemical layer of Cu based on Singularity Index (SI) method in the study area.



شکل ۱۰- نقشه فازی سازی شده لایه چگالی گسلها در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 10. Fuzzy map of fault density layer in the study area.



شکل ۱۱- نقشه پتانسیل یابی فلز مس با استفاده از روش Fuzzy-GAMMA در زون ملایر- الیگودرز - اصفهان.

Fig. 11. Potential map of Cu metal using Fuzzy-GAMMA method in Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone.

(ب) روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از روش‌های معروف تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) می‌باشد که طی آن به لایه‌ها و زیرلایه‌های مختلف براساس قضاوت کارشناسانه و به صورت مقایسات زوجی، اوزان مناسب اختصاص می‌یابد (Satty, 2016). بر مبنای این روش، تمامی لایه‌های اکتشافی براساس میزان اهمیت آن‌ها نسبت به سایر لایه‌ها در نوع خاصی از کانه‌زایی، وزن‌دهی می‌شوند و در نهایت تلفیق نهایی لایه‌ها صورت می‌گیرد (Tzeng et al., 2011).

تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اولین بار توسط Saaty (۱۹۹۰) پیشنهاد شد و به صورت یک فرآیند سلسله مراتبی، بر اساس مقایسه زوجی اهمیت لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Saaty, 1990). این فرآیند شامل سه گام اصلی ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قضاوت مقایسه‌ای لایه‌ها و زیرلایه‌ها و تلفیق نهایی بر اساس وزن‌های رتبه‌ای اختصاص داده شده

می‌باشد (Asadi et al., 2016). یک ساختار سلسله مراتبی به صورت کلی دارای سه سطح مختلف می‌باشد که سطح نخست مربوط به هدف مطالعه، سطح میانی مربوط به لایه‌ها و زیرلایه‌ها و سطح نهایی مربوط به جایگزین‌ها می‌باشد (Pazand and Hezarkhani, 2015). با استفاده از روش AHP، پارامترهای مربوط به سطح میانی (لایه‌ها و زیرلایه‌ها) به صورت مقایسه زوجی و با استفاده از جدول استاندارد پیشنهاد داده شده توسط Saaty (۲۰۰۵) (جدول ۲) از حالت کیفی به کمی تبدیل شده و با توجه به نوع هدف اکتشافی رتبه‌بندی می‌شوند. ماتریس مقایسه زوجی برای n لایه مختلف به صورت (رابطه ۴) تعریف می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} > 0; a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; a_{ii} = 1 \forall i. \quad (\text{رابطه ۴})$$

در نهایت مقادیر وزنی مناسب لایه‌ها و زیرلایه‌ها طبق (رابطه ۵) محاسبه می‌گردد که در آن W بردار وزنی و بالاترین مقدار ویژه ماتریس می‌باشد.

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (\text{رابطه ۵})$$

جدول ۲- مقیاس پایه‌ای برای مقایسات زوجی با استفاده از روش AHP (Satty, 1990).

Table 2. A basic scale for pairwise comparisons using the AHP method (Satty, 1990).

Intensity of importance	Definition
9	Extreme impornace
8	Very strong to stream
7	Very strong importance
6	Strongly to very strong
5	Strong importance
4	Moderately to strong
3	Moderate importance
2	Equally to moderately
1	Equal importance

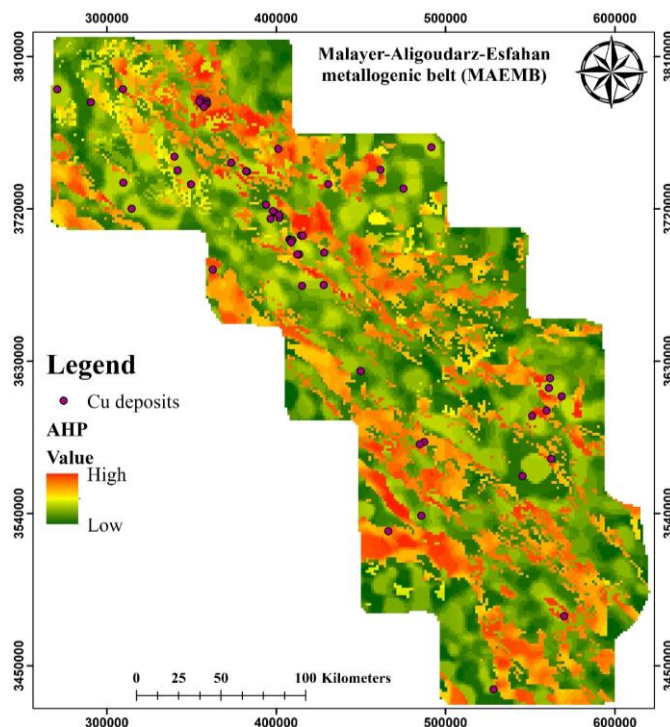
لیتولوژی اختصاص داده شده است. لایه زمین‌شیمی با اختصاص یافتن وزن ۰/۲۶ به عنوان معیار مهم پس از لیتولوژی انتخاب شده و در نهایت لایه چگالی گسل‌ها با ۰/۱۰ به عنوان کم اهمیت‌ترین معیار در این روش انتخاب شد. در این روش لایه‌های اطلاعاتی مختلف با یکدیگر تلفیق شده و نقشه پتانسیل نهایی کانه‌زایی مس در زون ملایر - الیگودرز - اصفهان مطابق تولید شد (شکل ۱۲).

این روش دارای سه بخش اصلی می‌باشد (Saaty, 2016): (۱) تعیین لایه‌ها برای استفاده در مدل‌سازی، (۲) تعیین وزن لایه‌ها و زیرلایه‌ها با استفاده از روش AHP، (۳) تلفیق نهایی لایه‌ها با استفاده از اوزان محاسبه شده توسط روش AHP. پس از تعیین معیارهای اکتشافی مختلف، که شامل لایه‌های لیتولوژی، زمین‌شیمی (مس) و چگالی گسل‌های منطقه می‌باشد، در ابتدا یک ماتریس مقایسه زوجی برای سه لایه اصلی نام برده شده تشکیل شد. در این ماتریس، سه معیار اصلی بر اساس نظرات متخصصین علوم زمین و با استفاده از جدول شاخص وزن‌دهی (Saaty, 1994) به صورت مقایسه زوجی وزن‌دهی شدند و در نهایت با استفاده از روش AHP، مقدار اوزان مناسب برای هر یک از معیارها طبق جدول ۳ محاسبه گردید. طبق این روش، بیشترین وزن با مقدار ۰/۶۴ به لایه

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی لایه‌های اکتشافی و اوزان محاسبه شده توسط روش AHP.

Table 3. Pairwise comparison matrix of exploration layers and weights calculated by AHP method.

Layers	Lithology	Geochemistry	Faults density	Wights
Lithology	1	3	5	0.64
Geochemistry	0.33	1	3	0.26
Faults density	0.2	0.33	1	0.10



شکل ۱۲- نقشه پتانسیل‌یابی فلز مس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در زون ملایر - الیگودرز - اصفهان.

Fig. 12. Potential map of Cu metal using analytical hierarchy process (AHP) in Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone.

بحث و نتایج

روش از کارایی مناسبی برخوردار بوده و توانسته‌اند که اکثر رخدادهای کانه‌زایی مس را به خوبی پیش‌بینی نمایند. با مقایسه دو روش مذکور، مشخص شد که آنومالی‌های حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با کانسارهای موجود در منطقه همبستگی فضایی مثبت بالاتری دارند و این روش توانسته آنومالی‌های بیشتری را نمایان کند. با وجود اینکه آنومالی‌های حاصل از روش Fuzzy-GAMMA نیز همبستگی خوبی با کانسارهای مس دارند اما این روش نتوانسته تمام کانسارها و اندیس‌های

در این پژوهش از روش‌های Fuzzy-GAMMA و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای مدل‌سازی پتانسیل‌کانه‌زایی مس در کمربند فلزآزایی ملایر - الیگودرز - اصفهان استفاده شده است. برای مدل‌سازی توسط روش‌های مذکور، از سه معیار اکتشافی اصلی شامل لیتولوژی (سنگ‌شناسی)، زمین‌شیمی و چگالی گسل‌های منطقه استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از دو روش Fuzzy-GAMMA و AHP با کانسارها و اندیس‌های مس در منطقه مورد مطالعه مشخص شد که هر دو

صحیح‌تری را نسبت به روش Fuzzy-GAMMA دارا بوده و آنومالی‌های حاصل از آن، همبستگی مکانی بالاتری با رخدادهای کانی‌زایی و معادن مس موجود در منطقه نشان می‌دهند و از این روش می‌توان برای مطالعات اکتشافی تفصیلی‌تر در نواحی امیدبخش شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

مس موجود در منطقه را پیش‌بینی نماید در حالی که آنومالی‌های حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با دقت بالاتری توانسته‌اند نواحی آنومالی مس را شناسایی کنند و در نهایت نتیجه می‌شود که در این پژوهش روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که بر مبنای وزن‌دهی دانش‌محرور به لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی می‌باشد، عملکرد دقیق‌تر و

منابع

- Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., 2011. Introducing sedimentary copper mining horizons in Iran, 29rd Earth Sciences Forum, February, Geological and Mineral Exploration Organization of the Country.
- Agterberg, F.P., 2012. Multifractals and geostatistics. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 113-122.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238.
- Aliyari, F., Rastad, E., Zengqian, H., 2007. Orogenic Gold Mineralization in the Qolqoleh Deposit, Northwestern Iran. *Resource Geology* 57, 269-282.
- Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., Marehart, G.B., 2009. Geology and geochemistry of D-O-C isotope systematics of the Qolqoleh gold deposit, Northwestern Iran: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews* 36, 306-314.
- Asadi, H.H., Sansoleimani, A., Fatehi, M., Carranza, E. J. M., 2016. An AHP-TOPSIS predictive model for district-scale mapping of porphyry Cu-Au potential: a case study from Salafchegan area (central Iran). *Natural Resources Research* 25(4), 417-429.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information Systems for geoscientists modeling with GIS. *Computer Methods in the Geoscientists* 13, 398.
- Carranza, E.J.M., Van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C., van der Meijde, M., van der Meer, F. D., 2008. Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de Gata, SE Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10 (3), 374-387.
- Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews* 32 (1-2), 314-324.
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran—hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita* 43, 383-404.
- Delavar, S.T., Afzal, P., Borg, G., Rasa, I., Lotfi, M., Omran, N. R., 2012. Delineation of mineralization zones using concentration-volume fractal method in Pb-Zn carbonate hosted deposits. *Journal of Geochemical Exploration* 118, 98-110.
- Ehya, F., Lotfi, M., Rasa, I., 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences* 37(2), 186-194.
- Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran), *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (6), 683-693.
- Ghezlbash, R., Maghsoudi, A., 2018. A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 11, 275.
- Hitzman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J., Selley, D., 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system. *Society of Economic Geologists*, <https://doi.org/10.5382/AV100.19>.
- Houshyar, E., Sheikh Davoodi, M. J., Almassi, M., Bahrami, H., Azadi, H., Omidi, M., Witlox, F., 2014. Silage corn production in conventional and conservation tillage systems. Part I: sustainability analysis using combination of GIS/AHP and multi-fuzzy modeling. *Ecological Indicators* 39, 102-114.
- Jafari, M. A., Kananian, A., Nazarpour, A., Ghasemi, S., 2018a. Comparison of concentration-area (C-A) fractal models and singularity index to separation Pb and Zn geochemical anomalies in the Arak 1:100000 geochemical sheet. The First National Conference of Iranian Geological Remote Sensing Society.
- Jafari, M. A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2018b. Comparison exploratory data analysis (EDA) method and Singularity Index to separation Cu element geochemical anomalies in the Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone. The First National Conference National Knowledge Based Research in Earth Sciences 1, 210-215.
- Jafari, M. A., Kananian, A., Nazarpour, A., 2019. Discrimination of geochemical anomalies of Pb and Zn metals using the classical statistical (Mean+nSTEV), Singularity Index, remote sensing and structural factors method in Khondab 1:100000 sheet, northern part of the Malayer-Aligoudarz-Esfahan zone. *Advanced Applied Geology* 9(3), 341-356.
- Kananian, A., Jafari, M. A., Nazarpour, A., 2018. Discrimination of Pb and Zn geochemical anomalies using classical, multifractal (C-N) and (C-A) and singularity index statistical methods in Arak 1:100000 sheet. *Advanced Applied Geology* 8, 63-74.

- Liu, Y., Xia, Q., Carranza, E. J. M., 2019. Integrating sequential indicator simulation and singularity analysis to analyze uncertainty of geochemical anomaly for exploration targeting of tungsten polymetallic mineralization, Nanling belt, South China. *Journal of Geochemical Exploration* 197, 143-158.
- Mehrabi, B., Yardley, B. W. D., Cann, J. R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralisation at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita* 34(7), 673-696.
- Mohajjel, M., 1997. Structure and tectonic evolution of Palaeozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. Ph.D. thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia (unpublished).
- Momenzadeh, M., 1976. Stratabound lead-zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in the Malāyer-Esfahan district (west central Iran): lithology, metal content, zonation and genesis (Doctoral dissertation, Verlag nicht ermittelbar).
- Momenzadeh, M., Shafiqhi, S., Rastad, E., Amstutz, G. C., 1979. The Āhangarān lead-silver deposit, SE-Malāyer, West Central Iran. *Mineralium Deposita* 14(3), 323-341.
- Mousivand, F., Rastad, E., Hoshino, K., Watanabe, M., 2007. The Bavanat Cu-Zn-Ag orebody: first recognition of a Besshi-type VMS deposit in Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry* 183(3), 297-315.
- Mousivand, F., Rastad, E., Meffre, S., Peter, J. M., Solomon, M., Zaw, K., 2011. U-Pb geochronology and Pb isotope characteristics of the Chahgaz volcanogenic massive sulphide deposit, southern Iran. *International Geology Review* 53(10), 1239-1262.
- Movahednia, M., Rastad, E., Rajabi, A., Choulet, F., 2017. Mineralogy, geochemistry and genetic processes of supergene non-sulphide ore of the Ab-Bagh Sedimentary-Exhalative (SEDEX-type) Zn-Pb deposit, Sanandaj-Sirjan zone. *Geosciences* 26, 249-264.
- Najafi, A., Karimpour, M.H. and Ghaderi, M., 2014. Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran, *International journal of applied earth observation and geoinformation* 33, 142-154.
- Pazand, K., Hezarkhani A., 2015. Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahroud area (NW, Iran). *Earth Science Informatics* 8(1), 207-220.
- Perelló, J., Sillitoe, R. H., Yakubchuk, A. S., Valencia, V. A., Cornejo, P. 2017. Age and tectonic setting of the Udokan sediment-hosted copper-silver deposit, Transbaikalia, Russia. *Ore Geology Reviews* 86, 856-866.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C., 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review* 54(14), 1649-1672.
- Rajabi, A., Rastad, E., Canet, C., 2013. Metallogeny of Permian-Triassic carbonate-hosted Zn-Pb and F deposits of Iran: a review for future mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences* 60(2), 197-216.
- Saaty, T. L., 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces* 24(6), 19-43.
- Saaty, T. L., 2016. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In *Multiple criteria decision analysis* Springer, New York, pp. 363-419.
- Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M. 2015. A futuristic review for evaluation of geothermal potentials using fuzzy logic and binary index overlay in GIS environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, 818-831.
- Samani, B., 2011. Final report of mineralization of sedimentary copper at Cheshmeh Ashgabat, Ati Kan Arman Company.
- Singer, D. A., 1995. World-class base and precious metal deposits: a quantitative analysis. *Economic Geology* 90, 88-104.
- Tan, R. R., Aviso, K. B., Huelgas, A. P., Promentilla, M. A. B., 2014. Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects. *Process Safety and Environmental Protection* 92(5), 467-475.
- Wang, J., Zuo, R., 2018. Identification of geochemical anomalies through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis. *Computers & geosciences* 118, 52-64.
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y., Erten, O., 2018. A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration* 189, 122-137.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3), 338-353.
- Zhang, N., Zhou, K., Du, X. 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *Journal of African Earth Sciences* 128, 84-96.
- Zuo, R., Wang, J., Chen, G., Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration* 148, 12-24.

