1986
Imam Hossein Comprehensive University

Construction Science and Technology
Volume 6, Issue 2 , page : 39-52
https://stc.ihu.ac.ir/

Integration of different exploration layers to identify areas with porphyry copper potential in the Mahunak area of Kerman province

Mohammad javad Nekoei motlagh [1*], Hadi Piroj [2], Seyed Farshid Shojaei [3]

[1 *]Correspondence: Master's degree, Mining Engineering, Faculty of Earth Sciences, Arak University of Technology, Arak, Iran
mohammadjavadnekoee.1394.76@gmail.com
[2] Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Lorestan, Iran
[3] Master of Science, Mining Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 2025 April 15
Revised: 2025 August 27
Accepted: 2025 September 3
Available online: 2025 September 3

Keywords:
Analytical hierarchy process (AHP),
Integrating layers,
Fuzzy logic,
Mahunak area,
Porphyry copper

ABSTRACT

Integrating information layers is an effective and efficient method for identifying and exploring areas with porphyry copper potential. This process, by using various data and analyzing them, helps reduce exploration costs and identify new reserves in an accurate and targeted manner. For this purpose, the integration operation was performed on the information layers of the Mahunak area, which is located 90 kilometers southwest of Kerman province and 20 kilometers west of the city of Bardsir. In terms of geological divisions, this region is located in the south of the Central Iran zone and mainly in the Cenozoic Urmia-Dokhtar magmatic belt. In Iran, this belt is known as the main host of copper, molybdenum, and gold deposits, also known as the Kerman Copper Belt. Therefore, the purpose of this research is to identify areas with porphyry copper potential by integrating different information layers such as geological layer, tectonic layer, remote sensing layer, geophysical layer, and geochemical layer. All these layers were weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and their integration was performed using the fuzzy logic method. Also, in order to validate the results, mines around the Mahunak area were used, and the output obtained from them has appropriate accuracy in identifying mines and potential areas.

Cite this article: Nekoei motlagh, M. J., Piroj, H., & Shojaei, S. F. (2025). Integration of different exploration layers to identify areas with porphyry copper potential in the Mahunak area of Kerman province. Construction science and technology, 6(2), 39-52. **DOR:** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.4.0

Publisher: Imam Hossein University.

علوم و فنون سازندگی

علوم و فنون سازندگی / سال ۱۴۰۴/ دوره ۶/ شماره ۲/ صفحه ۵۲-۳۹

https://stc.ihu.ac.ir/

تلفیق لایه‌های اکتشافی مختلف به منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل مس پورفیری در محدوده ماهونک استان کرمان

محمد جواد نکوئی مطلق[1*]، هادی پیروج[2]، سید فرشید شجاعی[3]

[1] کارشناسی ارشد، رشته مهندسی معدن، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران Mohammadjavadnekoee.1394.76@gmail.com

[2] رشته زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

[3] کارشناسی ارشد، رشته مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

تلفیق لایه های اطلاعاتی یک روش موثر و کارآمد در شناسایی و اکتشاف مناطق مستعد مس پورفیری به شمار می رود. این فرآیند با استفاده از داده های مختلف و تحلیل آنها به کاهش هزینه های اکتشافی و شناسایی ذخایر جدید به صورت دقیق و هدفمند کمک می کند. برای این منظور عملیات تلفیق بر روی لایه های اطلاعاتی محدوده ماهونک انجام گرفت که این محدوده در ۹۰ کیلومتری جنوب غربی استان کرمان و در ۲۰ کیلومتری غرب شهر بردسیر واقع شده است. این منطقه از لحاظ تقسیمات زمین شناسی، در جنوب زون ایران مرکزی و به طور عمده در کمربند ماگمایی سنوزوئیک ارومیه – دختر قرار دارد. در ایران این کمربند میزبان اصلی کانسارهای مس، مولیبدن و طلا شناخته می شود که به کمربند مس کرمان نیز معروف است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، شناسایی مناطق دارای پتانسیل مس پورفیری با استفاده از تلفیق لایه های اطلاعاتی مختلف مانند لایه زمین شناسی، لایه تکتونیک، لایه سنجش از دور، لایه ژئوفیزیک و لایه ژئوشیمی می باشد. تمام این لایه ها با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) وزن دهی شده و عملیات تلفیق آنها با روش منطق فازی انجام گرفته است. همچنین به منظور اعتبار سنجی نتایج از معادن اطراف محدوده ماهونک استفاده شده که خروجی بدست آمده از آنها در شناسایی معادن و مناطق پتانسیل دار از دقت مناسبی برخوردار می باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

کلید واژه ها:

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)،

تلفیق لایه ها،

منطق فازی،

محدوده ماهونک،

مس پورفیری

استناد: نکوئی مطلق, محمد جواد, پیروج, هادی, & شجاعی, سید فرشید. (۱۴۰۴). تلفیق لایه های اکتشافی مختلف به منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل مس پورفیری در محدوده ماهونک استان کرما ن. علوم و فنون سازندگی, ۶(۲), ۳۹-۵۲. **DOR:** 20.1001.1.29812577.1404.6.2.4.0

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

مقدمه

اکتشاف مواد معدنی برای تضمین عرضه پایدار در آینده ضروری است. به عنوان اولین گام در چرخه حیات معدن، اکتشاف به شناسایی مناطق بالقوه معدنی، کشف ذخایر جدید یا بهبود دانش در مورد ذخایر موجود کمک می کند تا در زمان ممکن به معادن جدید تبدیل شوند. معمولا اکتشاف مواد معدنی در مقیاس کوچک (محدوده بزرگ) شروع شده و سپس به مقیاس بزرگتر (محدوده کوچک) به منظور بررسی دقیق‌تر پیش می‌رود [۱]. از طرفی اکتشاف مواد معدنی یک فرآیند دقیق و منظم است که شامل جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و تلفیق داده‌های مختلف برای تعیین محدوده های کانی سازی شده و شناسایی اهداف مطلوب در آینده می‌باشد [۲]. فناوری سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) کاربرد رو به رشدی را در بسیاری از زمینه های علمی به ویژه در اکتشاف مواد معدنی نشان داده است. یکی از توانایی‌های اصلی GIS، ترکیب لایه‌های مختلف به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی (MPM) می‌باشد. این نقشه مناطق مستعد را به ویژه در مراحل شناسایی و پی جویی برای اکتشاف کانسارهای مختلف نمایان می سازد. ترسیم نقشه پتانسیل معدنی از داده های مکانی زمین شناسی، تکتونیک، ژئوشیمی، سنجش از دور و ژئوفیزیک برای شناسایی مناطق اکتشافی امیدوارکننده و درک الگوهای کانی‌سازی استفاده می‌کند [۳]. معمولا نقشه برداری پتانسیل معدنی یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) در نظر گرفته می‌شود، زیرا یک مدل پتانسیل معدنی ایجاد می‌کند. بنابراین این نقشه‌های پیش‌بینی کننده با استفاده از لایه های مختلف تولید شده[۴] و استفاده از نقشه پتانسیل معدنی (MPM) می‌تواند ریسک و عدم قطعیت را کاهش دهد [۵].

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های تلفیق داده برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد توسعه قرار گرفتند که به‌طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: گروه اول شامل روش‌های داده محور و گروه دوم شامل روش‌های دانش محور هستند. همچنین گروه سومی نیز وجود دارد که در واقع ترکیب دو روش داده محور و دانش محور می باشد[۶]. در روش‌های مبتنی بر داده، ذخایر معدنی شناخته شده در منطقه مورد مطالعه به عنوان نقاط آموزشی برای شناسایی و ایجاد روابط فضایی کانسارها با ویژگی های شواهد اکتشافی خاص استفاده می شود[۷]. بنابراین این روش ها در مناطقی که به خوبی مورد کاوش قرار گرفتند، مناسب اند. به عبارتی دیگر، این روش در نواحی و مکان هایی استفاده می‌شود که تعداد ذخایر شناخته شده و اندیس های معدنی زیاد باشد و مطالعات اکتشافی خوبی در آن مناطق انجام شده باشد. از جمله روش‌های متکی بر داده می‌توان به روش رگرسیون لجستیکی[۸]، وزن‌های نشانگر و شبکه‌های عصبی [۹] اشاره کرد. هنگامی که داده‌های اکتشافی دارای محدودیت باشد، از روش های دانش محور استفاده می شود. رویکردهای دانش محور به ورودی متخصص برای وزن دادن به درجه اهمیت هر لایه اطلاعاتی (نقشه شواهد) بستگی دارد، زیرا در ارتباط با مدل اکتشافی خاص مورد استفاده می باشد. این رویکرد بیشتر ذهنی است، اما دارای مزیت ترکیبی دانش و تخصص کارشناس در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد [۱۰]. به عبارتی دیگر، اگر عملیات اکتشافی در ناحیه‌ای انجام شود که در آنجا فعالیت اکتشافی صورت نگرفته و ذخایر معدنی از تیپ مشابه وجود نداشته باشد، در این صورت به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی باید از روش دانش محور و قضاوت های کارشناس استفاده کرد. رایج ترین روش های دانش محور برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی شامل منطق بولیین، شاخص همپوشانی، منطق فازی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی هستند[۱۱]. مطالعات زیادی به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از تلفیق لایه های اطلاعاتی مختلف انجام شده که در ادامه به برخی از آنها پرداخته می شود. عابدی و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای ارزیابی کانسار مس سریدون (استان کرمان) از تلفیق داده های مختلف ژئوفیزیکی به روش AHP فازی به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده کردند. ارزیابی نتایج از طریق گمانه‌های حفر شده بدست آمد که نتایج رضایت بخش بود[۱۲]. نجفی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی به شناسایی کانسارهای تیپ اکسیدهای آهن حاوی مس و طلا (IOCG) در منطقه طاهر آباد (شرق ایران) پرداختند. آنها براساس داده های زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک وزن هر لایه را تعیین کرده و از عملگر فازی برای تلفیق لایه های شواهد وزنی استفاده کردند[۱۳]. طبق گفته لیندزی و همکاران در سال ۲۰۱۴، استفاده از روش منطق فازی با مقادیر عضویت براساس یک مدل اکتشافی به طور قابل توجهی ثابت کرده است که در شناسایی ذخایر مس شناخته شده در مقایسه با آنهایی که صرفا بر وزن شواهد متکی اند، موثرتر هستند. همچنین نتایج کمی بهتر از ترکیب وزن شواهد و منطق فازی به‌دست می‌آید[۱۴]. دایا و بیجاری در سال ۲۰۱۵ با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در منطقه کاموشگران (شمال غربی ایران) به مطالعات پتانسیل معدنی پرداختند. آنها از معیارهای

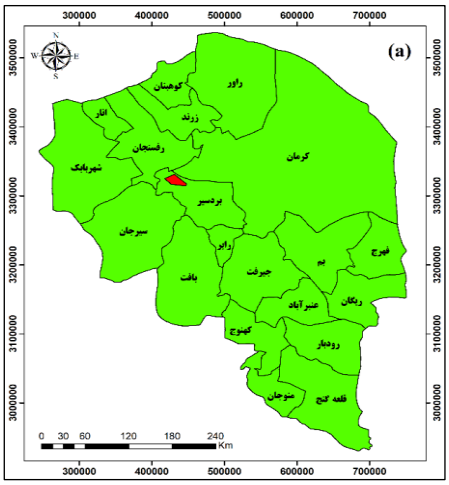
متعددی از جمله زمین شناسی، ژئوشیمی، دگرسانی و گسل استفاده کردند که هر معیار توسط AHP فازی مورد ارزیابی قرار گرفت[۱۵]. شیرمرد و همکاران در سال ۲۰۱۵ به منظور تعیین نقاط بهینه حفاری در کانسار مس پورفیری نیسیان (استان اصفهان) از روش ترکیبی سلسله مراتبی و فازی تحت عنوان روش سلسله مراتبی فازی (FAHP) بهره گرفتند[۱۶]. یزدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش همپوشانی شاخص و منطق فازی در منطقه چهارگنبد (استان کرمان) به شناسایی محدوده های مستعد کانی سازی مس پورفیری پرداختند و مناطق با اهمیت را اولویت بندی کردند [۱۷]. پازند و هزارخانی در سال ۲۰۱۸ با استفاده از مدلسازی فازی در منطقه اهر - ارسباران، به ترسیم مناطق دارای پتانسیل مس پورفیری پرداختند. در نتیجه، نقشه های فازی بدست آمده ۸۴ درصد از وقوع مس پورفیری شناخته شده را تفکیک کرد[۱۸]. مرادی پور و حیاتی در سال ۲۰۲۱ براساس آنالیز ژئوشیمیایی چند متغیره و تلفیق در GIS به تولید نقشه پتانسیل معدنی (MPM) برای یک منطقه کانی سازی مس پورفیری در کانادا پرداختند[۱۹]. خسروی و همکاران در سال ۲۰۲۲ برای اکتشاف مس پورفیری در منطقه سیمرغ (بلوک لوت شرقی ایران) از مدل ترکیبی AHP فازی برای شناسایی مناطق دگرسانی هیدروترمال استفاده کردند که در نهایت این مدل ترکیبی خروجی مناسبی را برای سیستم های مس پورفیری نشان داد[۲۰].

هدف از انجام این پژوهش، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف مانند لایه زمین‌شناسی، لایه تکتونیک، لایه ژئوشیمیایی، لایه ژئوفیزیک و لایه سنجش از دور با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) در محدوده ماهونک استان کرمان به منظور شناسایی مناطق مستعد مس پورفیری می‌باشد.

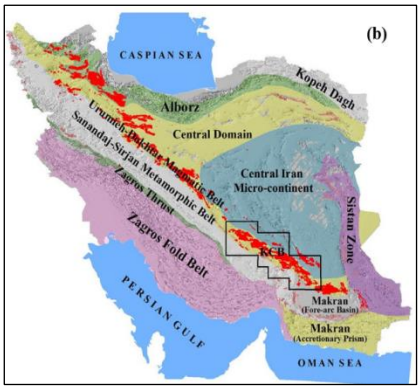
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی محدوده

محدوده اکتشافی ماهونک در ۹۰ کیلومتری جنوب غربی استان کرمان و در ۲۰ کیلومتری غرب شهر بردسیر واقع شده است (شکل۱-a). این منطقه از نظر تقسیمات زمین شناسی در جنوب زون ایران مرکزی و به طور عمده در کمربند ماگمایی سنوزوئیک ارومیه - دختر قرار دارد. این کمربند میزبان اصلی کانسارهای پورفیری مس، مولیبدن و طلا است که به عنوان کمربند مس کرمان نیز شناخته می‌شود (شکل۱-b). دیمیتریویچ [۲۱] در گزارش خود ناحیه کرمان را به پنج واحد ساختاری تقسیم بندی کرده که بر همین اساس محدوده ماهونک در نوار مرکزی دهج - ساردوئیه قرار می گیرد. این نوار از سنگ های آتشفشانی اسیدی، حد واسط و بازیک به همراه میان لایه های رسوبی و آتشفشانی تشکیل شده که بیشتر حاوی سنگ های آتشفشانی و رسوبی دوران سوم هستند[۲۲]. نوار دهج - ساردوئیه به طول تقریبی ۵۰۰ کیلومتر از دهج در شمال باختری استان کرمان شروع شده و تا جنوب خاوری محدوده ساردوئیه را شامل می شود. دیمیتریویچ تشکیل این نوار را به دلیل ایجاد شکستگی و فوران های ماگمایی خطی می داند. او این نوار را به ترتیب سن به چند زیر مجموعه تقسیم بندی کرده که عبارتند از : ۱) مجموعه رسوبی ائوسن پایینی ۲) مجموعه ائوسن پایینی - میانی (بحرآسمان) ۳) مجموعه رسوبی ائوسن میانی ۴) مجموعه آتشفشانی ائوسن میانی - بالایی (رازک) ۵) مجموعه آتشفشانی ائوسن بالایی (هزار). منطقه ماهونک بخشی از مجموعه آتشفشانی هزار می باشد که تناوبی ناهمگن از ماسه سنگ های توفی، کنگلومرا، توف، تراکی آندزیت، تراکی بازالت، ایگنمبریت، لایه های نازک آهک و کنگلومرا به صورت هم شیب بر روی مجموعه رازک قرار گرفته است. این مجموعه شامل توالی ضخیمی (بیش از ۱۵۰۰ متر) از سنگ های آتشفشانی و رسوبی بوده که فوقانی ترین بخش از تشکیلات ائوسن را به نمایش می‌گذارد. از طرفی مجموعه آتشفشانی هزار در مقایسه با مجموعه های آتشفشانی بحر آسمان و رازک ناچیز است که بیانگر کاهش فعالیت های آتشفشانی از انتهای ائوسن می باشد. هر چند که ماگماتیسم در زمان ائوسن غالبا به صورت فعالیت های آتشفشانی بوده است، به صورتی که در این زمان بالغ بر ۶۶۰۰۰ کیلومتر مربع سنگ آتشفشانی به شکل گدازه و مواد آذرآواری باعث تشکیل کمربند ماگمایی سنوزوئیک کرمان شده است. اما وجود توده‌های نفوذی در مجموعه های ذکر شده، نشانه ای از آغاز فعالیت‌های آذرین نفوذی در این کمان از زمان ائوسن میانی - پایانی می‌باشد. همچنین مجموعه هزار دارای تغییرات سنگ شناسی عمودی واضحی بوده که قسمت‌های شمال غرب کوه مزاحم، کوه حاجین، کوه آهورک - هزار و قسمت های کوچکتری را در نزدیکی گدار سیاه، غرب ساردوئیه، شهر بابک و ناحیه حنا می پوشاند[۲۱].

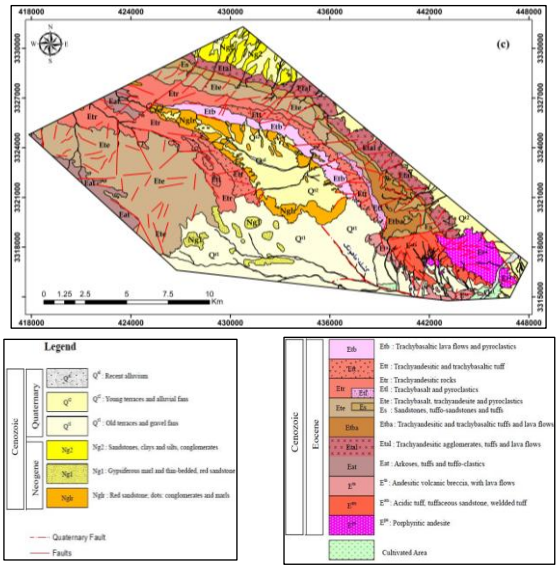


از نظر زمین ریخت شناسی، منطقه ماهونک شبیه به مجموعه‌های آتشفشانی - رسوبی ائوسن بوده و به طور عمده با لیتولوژی های تشکیل دهنده و زمین ساخت حاکم مرتبط می باشد. ارتفاعات موجود در منطقه نیز در ادامه رشته کوه های زاگرس و فلات مرکزی ایران با جهت شمال غربی - جنوب شرقی می باشد که منطقه ماهونک دارای توپوگرافی کوهستانی بوده و توسط دشت و حوضه های پهناور از هم جدا شده است. ارتفاع نسبی در نقاط پست و مرتفع به ترتیب ۲۱۵۰ و ۲۷۵۰ متر از سطح دریا می باشد. بر همین اساس در منطقه ماهونک دو گروه مورفولوژی متفاوت به وجود آمده است. گروه اول شامل واحدهای سنگی آتشفشانی بوده که مقاومت بیشتری داشته و تشکیل نقاط مرتفع داده اند و گروه دوم نیز شامل واحدهای سنگی رسوبی است که مقاومت پایین تری داشته و نقاط پست منطقه را تشکیل داده اند. واحدهای سنگی منطقه از قدیم به جدید شامل سنگ های آندزیت، تراکی آندزیت و تراکی بازالت با سن ائوسن، مارن و ماسه سنگ های قرمز رنگ نئوژن و رسوبات کواترنری هستند. شکل ۱-c نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ محدوده اکتشافی ماهونک را نشان می‌دهد.

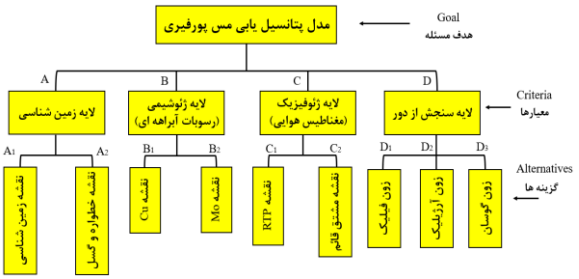


۲-۲. روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

برای اولین بار ساعتی در سال ۱۹۸۰ این روش را معرفی کرد که به‌طور گسترده به عنوان یکی از محبوب‌ترین تکنیک‌های MCDM شناخته می‌شود. AHP یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره است که از ساختارهای سلسله مراتبی برای نمایش یک مسئله استفاده می‌کند و سپس معیارها را برای گزینه‌ها براساس قضاوت کاربر توسعه می‌دهد [۲۳]. این روش دارای سه مرحله اساسی بوده که شامل ساخت سلسله مراتب، تنظیم اولویت‌ها و سازگاری منطقی می‌باشد [۲۴]. در مرحله ساخت سلسله مراتب، مسئله تصمیم‌گیری پیچیده به یک ساختار سلسله مراتبی با سطوح مختلف از جمله هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها تقسیم می‌شود تا تصمیم‌گیرنده به راحتی بتواند در کوچکترین تصمیم‌گیری دقت کند. برای ساخت مدل تصمیم‌گیری باید در بالاترین سطح، هدف و در سطوح میانی معیارها و در سطح پایین گزینه های ممکن را قرار داد [۲۵]. در این مطالعه به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس پورفیری از ساختار سلسله مراتبی شکل ۲ استفاده شد. در مرحله تنظیم اولویت‌ها، مقایسه بین معیارها و گزینه ها صورت می‌گیرد. بر همین اساس عناصر هر سطح، نسبت به سایر عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس‌های مقایسات زوجی آنها تشکیل می‌شود. مقایسات زوجی لایه‌های اطلاعاتی مختلف بر پایه مطالعات و نظرات کارشناسی شده متخصصان می‌باشد. همچنین مقایسه زوجی معیارها با استفاده از مقیاس مقایسه اعداد حقیقی ۱ تا ۹ مشخص شده در جدول ۱ صورت می‌گیرد.



شکل ۱ : a) موقعیت محدوده اکتشافی ماهونک در استان کرمان b) زمین شناسی عمده ایران و زیر مجموعه های ساختاری آن[۲۶] که محدوده مورد مطالعه را بر روی نوار مس کرمان (KCB) در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر نشان می دهد. c) نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ محدوده ماهونک



شکل ۲ : ساختار سلسله مراتبی محدوده ماهونک به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس پورفیری

جدول ۱ : مقیاس مقایسات زوجی در روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

Preferences expressed in numeric variables	Preferences expressed in linguistic variables
1	Equal importance
3	Moderate importance
5	Strong importance
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2,4,6,8	Intermediate values between adjacent scale values

اگر $C = \{Cj \mid j = 1,2,\ldots,n\}$ مجموعه معیارها باشد، معادله زیر یک ماتریس ارزیابی n×n از n معیار برای تنظیم اولویت‌ها می‌باشد که در آن a_{ij} $(i, j = 1,2,\ldots,n)$ وزن معیارها را نشان می‌دهد[۱۲]. بنابراین نرمال‌سازی و یافتن وزن‌های نسبی برای هر ماتریس انجام می‌شود. وزن‌های نسبی(A_W) با ضرب بزرگترین مقدار ویژه (λ_{max}) در بردار ویژه (W) محاسبه می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$a_{ii} = 1,\ a_{1/ji} = 1,\ a_{ji} \neq 0$$
$$A_W = \lambda_{max} W \quad (۲)$$

در مرحله سازگاری منطقی، کیفیت خروجی روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به شدت به سازگاری قضاوت‌های مقایسات زوجی مرتبط است. معیار اندازه گیری کیفیت روش AHP نسبت سازگاری (CR) می باشد. CR نهایی به عنوان نسبت شاخص سازگاری (CI) و شاخص تصادفی (RI) محاسبه می شود. مقدار RI برای تعداد n متغیر طبق جدول ۲ انتخاب می شود و CR برابر است با:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad , \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (۳)$$

به‌طور کلی اگر نسبت سازگاری محاسبه شده کمتر از ۰/۱ باشد، مقایسات زوجی و قضاوت های انجام گرفته مورد قبول بوده و در غیر این صورت باید در قضاوت‌های انجام گرفته تجدید نظر انجام گیرد[۲۵].

جدول ۲ : برخی از شاخص های ناسازگاری تصادفی (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

۳-۲. منطق فازی

این روش در سال ۱۹۶۵ توسط دکتر لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان مجموعه‌های فازی ارائه شد. براساس تئوری مجموعه‌های فازی، بازه‌ای از مقادیر بین صفر و یک می‌توانند برای بیان درجه یا میزان ارزش اعضای یک مجموعه بکار روند. در صورتی که در تئوری مجموعه های کلاسیک، عضویت یک مجموعه به صورت صفر (نادرست) یا یک (درست) بیان می شود. از طرفی مجموعه های فازی با توابع عضویت نشان داده شده و مقادیر اختصاص یافته به هر عضو را، توابع عضویت فازی در بازه بین صفر تا یک مشخص می کند. در واقع توابع عضویت در برگیرنده تمامی اطلاعات مرتبط با مجموعه های فازی هستند. همچنین تابع عضویت در منطق فازی به نظر و تجربه کارشناسان وابسته است و با توجه به شناخت آنها از منطقه تعیین می گردد[۲۷]. در نهایت بعد از تعیین وزن تمام نقشه های شواهد، لازم است نقشه ها با استفاده از عملگرهای مختلف ترکیب شوند. انواع مختلفی از عملگرهای جبری فازی با توجه به هدف تلفیق و کانی سازی مورد نظر وجود دارد که شامل عملگر فازی AND، عملگر فازی OR، عملگر حاصل ضرب جبری فازی، عملگر جمع جبری فازی و عملگر گامای فازی هستند[۲۸]. یکی از عملگرهای فازی که به طور گسترده برای تلفیق لایه های شواهد و تولید مدل های آینده نگری با توجه به کانی سازی مس پورفیری استفاده می شود، عملگر گامای فازی است[۲۹]. عملگر گامای فازی به عنوان یک عملگر ترکیبی، از حاصل ضرب جبری فازی و مجموع جبری فازی بدست می‌آید که این عملگر توسط یک پارامتر گاما کنترل می‌شود و در بازه بین صفر تا یک تغییر می‌کند.

۴-۲. انواع لایه‌های اطلاعاتی

در این پژوهش به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی از لایه‌های اطلاعاتی مختلفی مانند لایه زمین‌شناسی، لایه سنجش از دور، لایه تکتونیک (گسل‌ها و خطواره‌ها)، لایه ژئوشیمیایی و لایه ژئوفیزیکی استفاده شده است. برای تهیه این لایه ها، مطالعات زیادی با روش‌های مختلف انجام شده که در ادامه به صورت اختصار به توضیح هر یک پرداخته می‌شود.

۱-۴-۲. لایه زمین شناسی

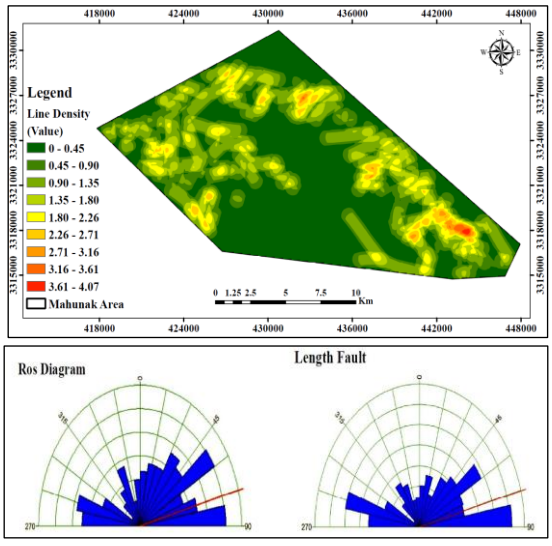
اغلب کانسارهای پورفیری در محیط های کمان ماگمایی با سری ماگمای کالک آلکالن رخ می دهند. این فعالیت های ماگمایی متعلق به فرورانش پوسته اقیانوسی در زیر پوسته قاره ای هستند[۳۰]. فلزات موجود در ذخایر پورفیری از پوسته پایینی منشاء گرفته و توسط سیالات و استوک های ماگمایی به سطوح کم عمق منتقل می شوند[۳۱]. این سیالات سنگ های اطراف را دچار دگرسانی می کنند. در ایران تمام کانی سازی مس پورفیری شناخته شده در کمربند کوهزایی سنوزوئیک ارومیه - دختر اتفاق افتاده و این کمربند از فرورانش صفحه عربی در زیر ایران مرکزی در دوران کوهزایی آلپ تشکیل شده است[۳۲]. بنابراین از ویژگی های کلیدی که در مدلسازی ذخایر پورفیری اهمیت دارد می توان به کانی سازی، کنترل توده های نفوذی، سنگ های آتشفشانی میزبان کانی سازی و ایجاد دگرسانی ها اشاره کرد. از طرفی کانسارهای پورفیری معمولا در زیر سنگ های آتشفشانی ماگمایی قرار دارند که توسط سیالات گرمابی ناشی از سیستم های پورفیری دگرسان شده اند[۳۳]. همچنین کانسارهای مس و طلای پورفیری از دیوریت نیمه عمیق تا دیوریت کوارتز منشاء گرفته و در ارتباط با سنگ های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی مانند داسیت و آندزیت هستند[۳۴].

لایه زمین شناسی محدوده ماهونک براساس نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده که این نقشه در شکل ۱-c نشان داده شده است. به طور کلی واحدهای زمین شناسی منطقه شامل سنگ های آذرین (توف ها، آندزیت ها، تراکی آندزیت و تراکی بازالت)، سنگ های رسوبی (ماسه سنگ ها، کنگلومرا و مارن ها) و رسوبات آبرفتی است. بنابراین مهم ترین واحدهای محدوده ماهونک براساس مدل کانی سازی مس پورفیری واحدهای آتشفشانی ائوسن هستند.

۲-۴-۲. لایه تکتونیک

کانسارهای مس پورفیری یکی از مهم ترین ذخایری هستند که در سیستم‌های کانی‌سازی بزرگ در سراسر جهان رخ می دهند که اغلب توسط ساختارهای منطقه ای از گسل های امتداد لغز کنترل شده [۳۵] و با ایجاد مسیرهایی برای عبور سیالات کانی‌ساز بر توده های نفوذی ماگمایی تاثیر می گذارند. از دیدگاه تکتونیکی، ذخایر پورفیری در ساختارهای شکننده اتفاق افتاده و محیط و ساختارهای تکتونیکی بر اندازه و موقعیت ذخایر پورفیری تاثیر می‌گذارند. البته هیچ محیط منحصر بفردی برای تشکیل این نوع کانی‌سازی وجود ندارد [۳۶]. بنابراین مناطق با چگالی خطوارگی بالا و گسل‌ها به عنوان یک کلید اصلی در مدل سازی ذخایر پورفیری در نظر گرفته می شوند.

برای ترسیم گسل های محدوده ماهونک از سه روش مختلف استفاده شده که در نهایت با تلفیق این روش ها خروجی نهایی بدست آمد. روش اول براساس تصاویر ماهواره ای Aster و فیلترهای خطی نرم افزار Envi انجام شد. روش دوم با استفاده از نقشه زمین شناسی یکصد هزار محدوده مورد مطالعه می باشد. روش سوم نیز از روی تصویر گوگل ارث به صورت چشمی مناطقی که دارای جابه جایی واحدها، دره های مستقیم، رویش خطی گیاهان، اختلاف تن رنگی، مرز و لبه صخره ها باشد را می توان به عنوان خطواره و گسل در نظر گرفت. بنابراین نقشه چگالی خطواره ها و نمودار رز دیاگرام محدوده ماهونک در شکل ۳ ترسیم شد. با توجه به این نقشه می توان گفت که تراکم گسل ها در شرق منطقه درون واحد آندزیتی و توفی بیشتر است که این منطقه با چگالی بالا از نظر اکتشافی حائز اهمیت می باشد. همچنین براساس نمودار رز دیاگرام روند کلی شکستگی ها و گسل های منطقه در امتداد شمال شرقی به جنوب غربی می باشد و اکثرا در یک امتداد ۷۵ درجه هستند.



شکل ۳ : نقشه چگالی خطواره ها و نمودار رز دیاگرام محدوده اکتشافی ماهونک

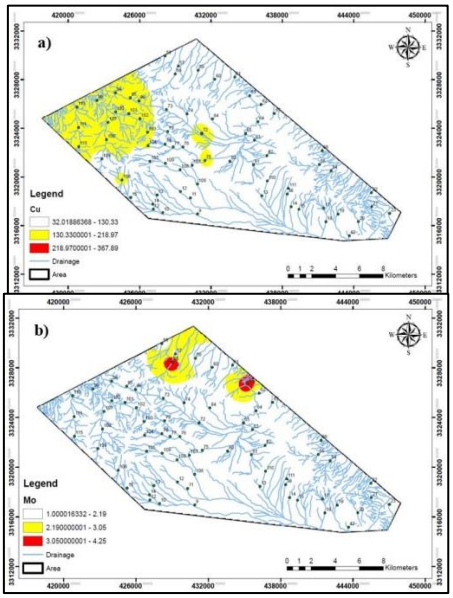
۳-۴-۲. لایه ژئوشیمی

جداسازی آنومالی‌ها از زمینه یک فعالیت حیاتی در اکتشاف مواد معدنی می باشد. یک آنومالی ممکن است غنی سازی طبیعی یا زمین زا (طبیعی و مربوط به ذخایر معدنی) یا فعالیت انسانی (ناشی از صنعت) در یک یا چند عنصر از مواد زمین باشد. از طرفی در ژئوشیمی رسوبات آبراهه ای، نمونه های آنومالی بیانگر این هستند که حوضه آبریز این نمونه ها برای اکتشاف اهمیت داشته و پایش شناسایی میدانی آن حوضه کلید موفقیت روش می باشد[۳۷]. بنابراین ذخایر پورفیری را می توان از طریق اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه ای شناسایی کرد.

برای تهیه لایه ژئوشیمیایی محدوده ماهونک از داده های رسوبات آبراهه ای سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۸۰ استفاده شد. تجزیه این نمونه ها با دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام گرفته که تعداد ۷۰ نمونه از آنها در محدوده ماهونک واقع شده اند. عناصر مس و مولیبدن این داده ها به منظور تهیه نقشه پتانسیل یابی مس پورفیری بکار گرفته شد (جدول ۳). براساس روش آمار کلاسیک، مقادیر میانگین و انحراف معیار داده ها نرمال شده و مقادیر زمینه، حدآستانه و آنومالی آنها تعیین شد. در نهایت نقشه های ژئوشیمیایی مس و مولیبدن محدوده اکتشافی ماهونک در شکل ۴ بر حسب ppm ترسیم شده تا مناطق امید بخش آنومالی مشخص گردد. در شکل ۴-a، عنصر مس دارای یک نمونه آنومالی (رنگ قرمز) و تعدادی نمونه حدآستانه (رنگ زرد) است و در شکل ۴-b عنصر مولیبدن دارای دو نمونه آنومالی با عیار ppm ۴ می باشد.

جدول ۳ : پارامترهای آمار توصیفی عناصر (داده های خام)

متغیر	تعداد داده	میانگین Mean	میانه Median	واریانس Variance	انحراف معیار
Cu	70	88.46	76.5	2112.22	45.95
Mo	70	1.71	2	0.38	0.61
متغیر	**Max**	**Min**	**چولگی Skewness**	**کشیدگی Kurtosis**	**درصد تغییرات %CV**
Cu	226	32	0.773	-0.298	51.95
Mo	4	1	1.026	3.525	36.00



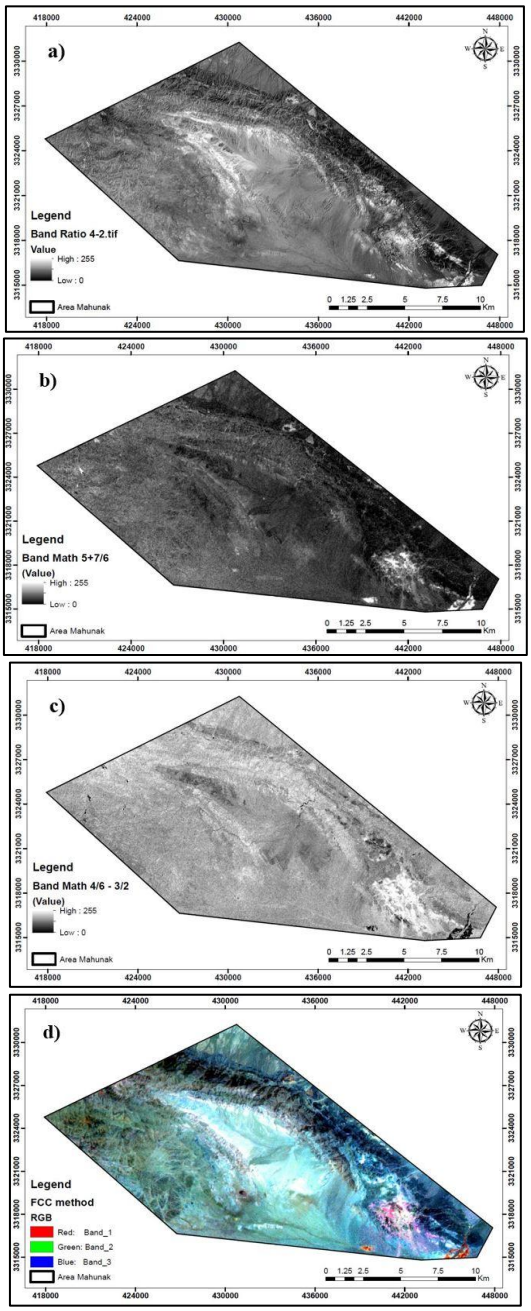
شکل ۴ : a) نقشه پراکندگی عنصر مس در محدوده اکتشافی ماهونک b) نقشه پراکندگی عنصر مولیبدن در محدوده اکتشافی ماهونک

۴-۴-۲. لایه سنجش از دور

تشکیل ذخایر پورفیری اغلب با دگرسانی های هیدروترمال پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک همراه است. کانی های هیدورکسیل در زون های فیلیک، آرژیلیک و پتاسیک به وفور یافت شده و بیشتر فرآیند های دگرسانی هیدروترمال منجر به تولید اکسیدهای آهن، کانی های رسی و سایر کانی های سیلیکاتی مانند زون های فیلیک و آرژیلیک می شوند. تغییر سوپرژن منجر به تشکیل کانی های اکسید آهن به صورت گسترده می شود. بنابراین این کانی های تغییر یافته را می توان با روش های سنجش از دور شناسایی کرد[۳۸].

به منظور شناسایی دگرسانی‌های محدوده ماهونک از تصویر ماهواره‌ای Aster استفاده شد. این تصویر در تاریخ ۲۰۰۴/۰۷/۱۵ از منطقه گرفته شده و بر روی آن پیش پردازش‌های مورد نیاز انجام گرفته است. روش‌های پردازشی مختلفی جهت آشکارسازی انواع دگرسانی‌های محدوده ماهونک اعمال شده که در اینجا به بعضی از آنها اشاره می‌شود. جهت استخراج اکسید آهن (زون گوسان) از نسبت باندی ۴ به ۲ استفاده شده که در شکل ۵-a پیکسل‌های سفید رنگ بیانگر کانی های آهن هستند. بدین منظور برای استخراج زون فیلیک از نسبت ترکیبی ۵+۷/۶ استفاده شده که در شکل ۵-b پیکسل‌های سفید رنگ بیانگر زون فیلیک بوده و برای استخراج زون آرژیلیک از نسبت ترکیبی ۴/۶-۳/۲ استفاده شده که در شکل ۵-c پیکسل‌های سفید رنگ حاوی کانی‌های رسی هستند.

همچنین روش ترکیب رنگی کاذب ۴۶۸ بر روی محدوده ماهونک اعمال شده که در شکل ۵-d مناطق صورتی رنگ حاوی زون فیلیک و آرژیلیک هستند. بنابراین براساس نتایج سنجش از دور می‌توان گفت که دگرسانی فیلیک و آرژیلیک درون واحد توفی در شرق محدوده ماهونک اتفاق افتاده است.

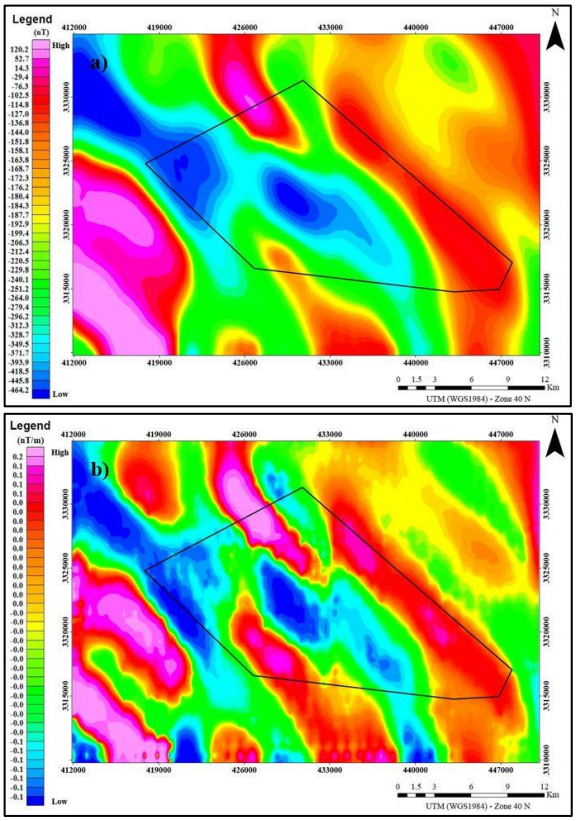


شکل ۵ : a) بارزسازی اکسید های آهن (زون گوسان) به صورت پیکسل های سفید رنگ b) بارزسازی زون فیلیک به صورت پیکسل های سفید رنگ c) بارزسازی زون آرژیلیک به صورت پیکسل های سفید رنگ d) بارزسازی دگرسانی فیلیک و آرژیلیک به رنگ صورتی توسط روش FCC

۵-۴-۲. لایه ژئوفیزیک

در زمین شناسی و اکتشافات معدنی، داده های مغناطیس هوابرد به عنوان یک لایه اطلاعاتی مهم برای مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختارهای زیر سطحی مانند گسل‌ها، توده‌های نفوذی پنهان، واحدهای سنگ شناسی مختلف و مناطق دگرسان شده شناخته می‌شوند [۳۹]. مغناطیس هوابرد به دلیل سرعت و دقت بالای برداشت‌ها، پوشش گسترده، اقتصادی بودن و سهولت در برداشت، بیش از سایر روش‌ها برای پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی بکار برده شده و معمولا نتایج مطلوبی به دنبال دارد. این روش در مقیاس بزرگ نیز برای تعیین گسل‌های اصلی، مناطق خرد شده و شکسته که اغلب با کانی‌سازی در ارتباط‌اند، بسیار مفید می‌باشد [۴۰]. از طرفی مطالعات مغناطیس هوایی می‌تواند برای مشخص کردن موقعیت ذخایر مس و طلای پورفیری که غنی از کانی‌های مغناطیسی مانند مگنتیت و پیروتیت هستند، انجام شود [۴۱]. مناطق مغناطیس بالا در زون پتاسیک در درون ذخایر پورفیری قرار دارند. بنابراین این منطقه یک ناهنجاری مغناطیسی بالا در مجموعه داده‌های مغناطیس هوایی ایجاد می‌کند. این ناهنجاری‌ها به عنوان اهداف مطلوب برای مدل‌سازی مس پورفیری به شمار می‌روند.

به منظور تهیه لایه ژئوفیزیکی از داده‌های مغناطیس هوابرد سازمان زمین‌شناسی ایران بین سال های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۷ استفاده شد. این داده ها با فاصله خطوط پروازی ۷/۵ کیلومتر و فاصله خطوط کنترلی ۴۰ کیلومتر با ارتفاع پروازی حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر برداشت شده‌اند. بر روی این داده‌ها پیش پردازش‌های مورد نیاز توسط سازمان زمین شناسی کشور انجام شده و فقط برای پردازش این داده ها باید از فیلترهای مختلف استفاده کرد. فیلترهای استفاده شده برای این پژوهش به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی شامل نقشه RTP و نقشه مشتق قائم مرتبه اول هستند که در شکل ۶ نشان داده شده است. در نقشه برگردان به قطب تمام بی هنجاری‌ها در موقعیت دقیق خود قرار گرفته و یک بی هنجاری قوی در شمال محدوده ماهونک مشخص شده که دارای وسعت کمی بوده و این شدت کم می‌تواند احتمالا به دلیل کانی سازی در عمق باشد. در نقشه مشتق قائم مرتبه اول نیز، بی‌هنجاری‌های سطحی نسبت به بی هنجاری‌های عمیق تقویت شده‌اند.



شکل ۶ : a) نقشه تبدیل برگردان به قطب (RTP) محدوده اکتشافی ماهونک b) نقشه مشتق قائم مرتبه اول محدوده اکتشافی ماهونک

۳- تجزیه و تحلیل داده ها و یافته های پژوهش

در این پژوهش بعد از تهیه انواع لایه های اطلاعاتی مختلف مانند زمین شناسی، تکتونیک، سنجش از دور، ژئوفیزیک و ژئوشیمی، اقدام به وزن‌دهی این لایه‌ها با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) توسط نرم‌افزار اکسپرت چویس شد. این نرم افزار برای محاسبه وزن لایه‌ها از الگوریتم بردار ویژه استفاده می‌کند. در نهایت بعد از وزن گرفتن این لایه‌ها، عملیات تلفیق آنها با روش منطق فازی و عملگر گاما انجام گرفت.

۳-۱. وزن دهی به لایه ها

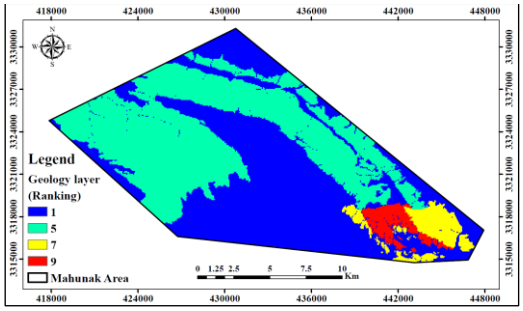
براساس مقالات و نظر کارشناسان با تجربه، پنج لایه اطلاعاتی محدوده اکتشافی ماهونک امتیاز دهی شد. معیار امتیازدهی به لایه های مختلف، با توجه به مقیاس مقایسه ۹ تایی جدول ۱ می باشد. سپس ماتریس مقایسات زوجی هر یک از لایه ها تشکیل شده و وزن نهایی آنها با نرم افزار اکسپرت چویس محاسبه شد که در جدول ۴ امتیاز لایه های مختلف و وزن نهایی آنها نشان داده شده است. همچنین نرخ ناسازگاری تمام لایه های اطلاعاتی این پژوهش کمتر از ۰/۱ بدست آمد که بیانگر قابل قبول بودن نتایج می باشد.

جدول ۴ : نحوه امتیاز دهی به لایه های اطلاعاتی مختلف و محاسبه وزن آنها به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

انواع لایه ها	کلاس بندی	توضیحات	امتیاز	وزن
لایه زمین شناسی	توف اسیدی	ائوسن	۹	۰/۳۹۱
	آندزیت	ائوسن	۷	۰/۳۰۴
	تراکی آندزیت و تراکی بازالت	ائوسن	۵	۰/۲۱۷
	ماسه سنگ، کنگلومرا و مارن	نئوژن	۱	۰/۰۴۴
	آبرفت ها	کواترنر	۱	۰/۰۴۴
لایه سنجش از دور	فیلیک		۹	۰/۴۲۹
	آرژیلیک		۷	۰/۳۳۳
	اکسید آهن (گوسان)		۵	۰/۲۳۸
لایه تکتونیک	۱۰۰		۹	۰/۲۰۵
	۲۰۰		۸	۰/۱۸۲
	۳۰۰		۷	۰/۱۵۹
	۴۰۰	براساس	۶	۰/۱۳۶
	۵۰۰	فاصله از	۵	۰/۱۱۴
	۶۰۰	خطواره و	۴	۰/۰۹۱
	۷۰۰	گسل ها	۳	۰/۰۶۸
	۸۰۰		۲	۰/۰۴۵
	شمال شرق	براساس	۹	۰/۳۴۶
	شمالی - جنوبی	امتداد	۷	۰/۲۶۹
	شرقی - غربی	خطواره و	۶	۰/۲۳۱
	شمال غربی	گسل ها	۴	۰/۱۵۴
لایه ژئوشیمی	زمینه	عنصر	۵	۰/۲۳۸
	حدآستانه	مس و	۷	۰/۳۳۳
	آنومالی	مولیبدن	۹	۰/۴۲۹
لایه ژئوفیزیک	بالا : رنگ صورتی	نقشه	۹	۰/۴۲۹
	متوسط : رنگ قرمز تا نارنجی	RTP و	۷	۰/۳۳۳
	پایین : رنگ زرد تا آبی	مشتق	۵	۰/۲۳۸
		قائم		
تلفیق لایه ها	زمین شناسی		۹	۰/۳۰۰
	سنجش از دور		۵	۰/۱۶۷
	تکتونیک		۷	۰/۲۳۳
	ژئوشیمی		۳	۰/۱۰۰
	ژئوفیزیک		۶	۰/۲۰۰

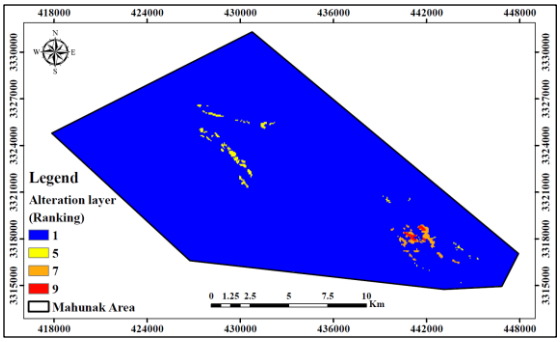
۳-۲. تلفیق لایه‌ها به روش منطق فازی

بر اساس مدل کانی‌سازی مس پورفیری، واحدهای سنگی لایه زمین شناسی به ۴ گروه مختلف طبقه بندی شده که برای هر گروه وزن های مناسب آن محاسبه گردید. با توجه به نبود سنگ های نفوذی در داخل محدوده ماهونک، سنگ های آتشفشانی ائوسن در اولویت امتیاز دهی قرار گرفتند. بنابراین اولویت اول واحد توفی و اولویت دوم واحدهای آندزیتی هستند. از طرفی به واحدهای رسوبی و کواترنری کمترین امتیاز داده شد. در نهایت به منظور فازی سازی از تابع عضویت خطی برای لایه زمین‌شناسی استفاده گردید که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ : نقشه فازی کلاس بندی شده لایه زمین شناسی

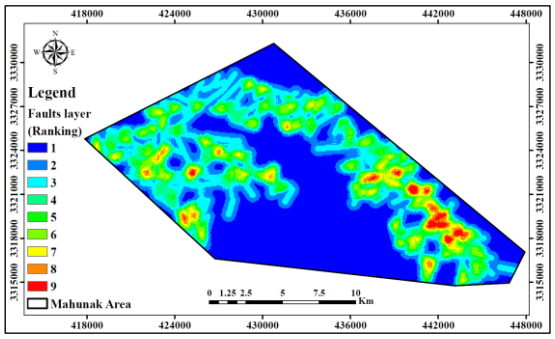
بر اساس مدل کانی سازی مس پورفیری، اولویت بندی در لایه دگرسانی به ترتیب شامل دگرسانی فیلیک به عنوان اولویت اول و دگرسانی آرژیلیک به عنوان اولویت دوم می باشد. همچنین دگرسانی اکسیدهای آهن (زون گوسان) در اولویت سوم قرار گرفته است. بر همین اساس طبقه بندی به ۴ گروه تقسیم شده و مناطقی که فاقد دگرسانی هستند (مناطق آبی رنگ) در اولویت آخر قرار گرفتند. در نهایت به منظور فازی سازی از تابع عضویت خطی برای لایه دگرسانی استفاده شد که در شکل ۸ نشان داده شده است.



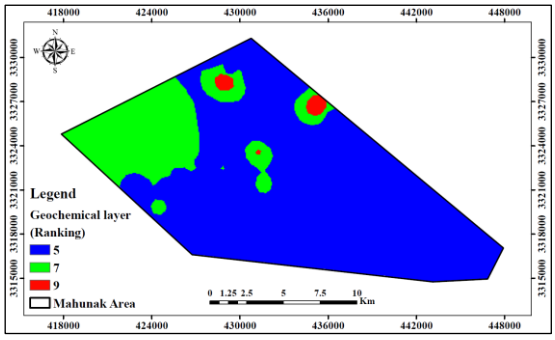
شکل ۸ : نقشه فازی کلاس بندی شده لایه سنجش از دور

بر اساس مدل کانی سازی مس پورفیری، گسل های منطقه به دو روش فاصله از گسل و امتداد گسل تلفیق شدند. در ابتدا عملیات بافرگذاری برای گسل ها در فواصل ۱۰۰ تا ۸۰۰ متری انجام شد و وزن هر یک از آنها محاسبه گردید. به صورتی که هر چه فاصله گسل کمتر باشد، امتیاز بیشتری برای آن در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم با توجه به این که جهت امتداد ها دارای تاثیر مختلف و ارزش های متفاوتی در کانی سازی هستند، گسل ها بر اساس امتداد به چهار روند کلی تقسیم بندی شدند. به طور کلی گسل های محدوده دارای چهار روند ۱) گسل های با امتداد شمال شرقی ۲) گسل های با امتداد شمالی - جنوبی ۳) گسل های با امتداد شرقی - غربی ۴) گسل های با امتداد شمال غربی هستند. بیشترین امتیاز متعلق به گسل های با امتداد شمال شرقی و کمترین امتیاز به گسل های با جهت شمال غربی اختصاص داده شد. در نهایت به منظور فازی سازی از تابع عضویت خطی برای لایه تکتونیک استفاده شده که در شکل ۹ نقشه کلاس بندی شده این لایه آمده است.

در لایه ژئوشیمی رسوبات آبراهه ای، طبقه بندی بر روی عناصر مس و مولیبدن بر اساس جوامع آماری زمینه، حدآستانه و آنومالی در سه دسته تقسیم بندی شده است که در نهایت این دو نقشه عناصر با هم تلفیق شده و لایه ژئوشیمیایی محدوده ماهونک را تشکیل دادند. همچنین به منظور فازی‌سازی از تابع عضویت لارج برای این لایه استفاده شد که در شکل ۱۰ تلفیق دو عنصر مس و مولیبدن نمایان شده است.

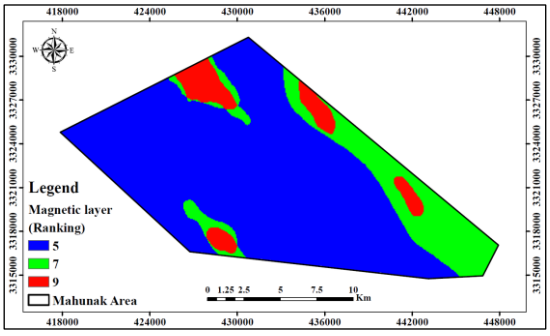


شکل ۹ : نقشه فازی کلاس بندی شده لایه تکتونیک



شکل ۱۰ : نقشه فازی کلاس بندی شده لایه ژئوشیمی

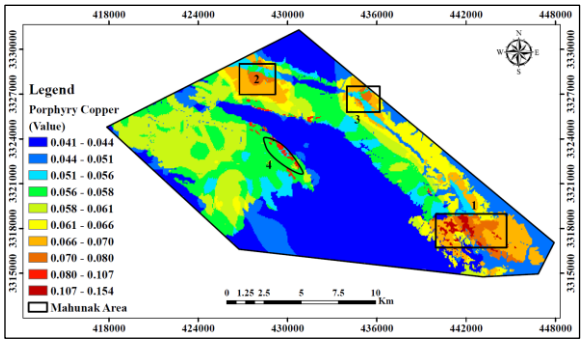
در لایه مغناطیس هوابرد نیز از نقشه برگردان به قطب (RTP) و نقشه مشتق قائم مرتبه اول استفاده شد. این دو نقشه براساس شدت میدان مغناطیسی مختلف به سه دسته مغناطیس بالا، مغناطیس متوسط و مغناطیس پایین تقسیم شده اند. حداکثر امتیاز به مغناطیس بالا و کمترین امتیاز به مغناطیس پایین اختصاص داده شد که در نهایت این دو نقشه با هم تلفیق شدند. همچنین به منظور فازی سازی از تابع عضویت لارج برای لایه مغناطیس هوابرد استفاده شد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ : نقشه فازی کلاس بندی شده لایه مغناطیس هوابرد

به منظور تلفیق لایه های اکتشافی محدوده ماهونک از روش منطق فازی و عملگر گاما استفاده شد. در این روش اصلی ترین پارامتر موثر مقدار گاما می باشد. از طرفی در مطالعات اکتشافی مقدار استاندارد گاما ۰/۹۵ است. بنابراین در این پژوهش نیز از گامای ۰/۹۵ برای عملیات تلفیق لایه ها استفاده

شد. شکل ۱۲ نقشه پتانسیل یابی مس پورفیری محدوده اکتشافی ماهونک را نشان می‌دهد. بر همین اساس چهار منطقه به عنوان مناطق مستعد مس پورفیری در محدوده ماهونک شناخته شده‌اند که منطقه یک در اولویت اول و بقیه مناطق نیز در اولویت بعدی قرار دارند.



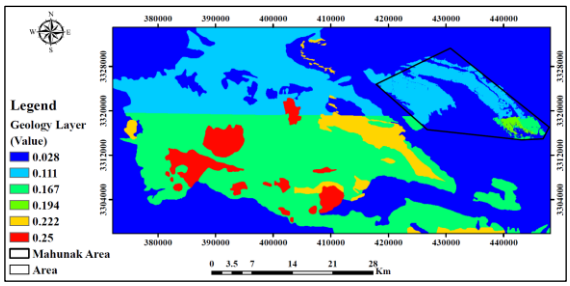
شکل ۱۲ : نقشه پتانسیل یابی مس پورفیری در محدوده اکتشافی ماهونک به روش F-AHP

۴- اعتبار سنجی نتایج

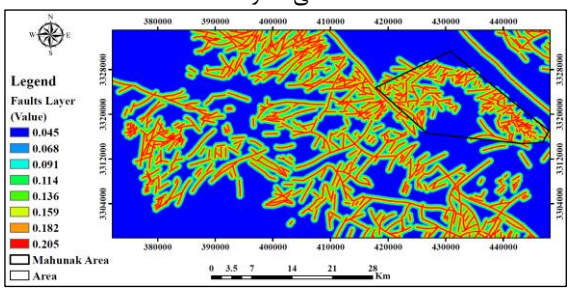
به منظور صحت سنجی نتایج بدست آمده از مدل پتانسیل یابی مس پورفیری، از معادن اطراف محدوده ماهونک استفاده گردید. این معادن از جمله مس سرچشمه، سریدون، دره هزار، ده سیاهان و کوه پنج از نوع ذخایر پورفیری هستند و به کمک آنها می توان دقت خروجی های بدست آمده را بررسی کرد. در ابتدا باید تمام لایه های اطلاعاتی معادن اطراف مانند زمین شناسی، تکتونیک، سنجش از دور، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تهیه گردد. سپس وزن های بدست آمده از روش AHP به لایه های تکتونیک، سنجش از دور، ژئوشیمی و ژئوفیزیک اعمال شد. از طرفی در لایه زمین شناسی معادن اطراف، به دلیل وجود توده های نفوذی، ریولیت و داسیت باعث شد تا وزن لایه زمین شناسی معادن دوباره محاسبه گردد (جدول ۵). اما بقیه لایه های اطلاعاتی نیازی به محاسبه مجدد وزن آنها نیست. بنابراین تمام این لایه ها مانند لایه های محدوده ماهونک تولید شده و نقشه فازی تمام لایه های اطلاعاتی در اشکال ۱۳ تا ۱۷ ترسیم شده است.

جدول ۵ : امتیاز دهی مجدد به لایه زمین شناسی و محاسبه وزن آنها به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

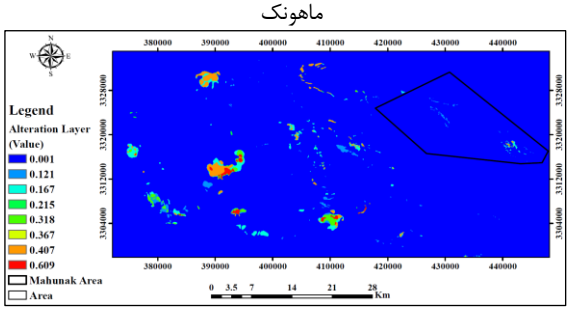
داده های زمین شناسی	واحدهای سنگی	سن	امتیاز	وزن
واحدهای موثر کانه زایی مس پورفیری	توده های نفوذی	ائوسن	۹	۰/۲۵۰
	ریولیت و داسیت	ائوسن	۸	۰/۲۲۲
	توف اسیدی	ائوسن	۷	۰/۱۹۴
	آندزیت	ائوسن	۶	۰/۱۶۷
	تراکی آندزیت و تراکی بازالت	ائوسن	۴	۰/۱۱۱
	ماسه سنگ، کنگلومرا و مارن ها	نئوژن	۱	۰/۰۲۸
	آبرفت ها	کواترنر	۱	۰/۰۲۸



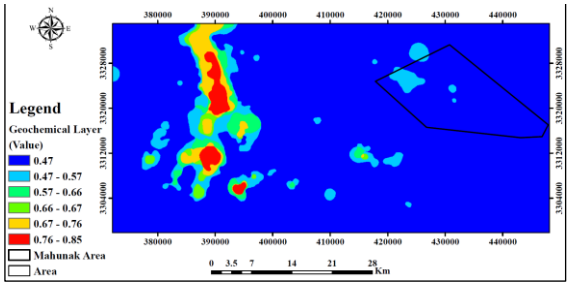
شکل ۱۳ : نقشه فازی لایه زمین شناسی معادن اطراف محدوده اکتشافی ماهونک



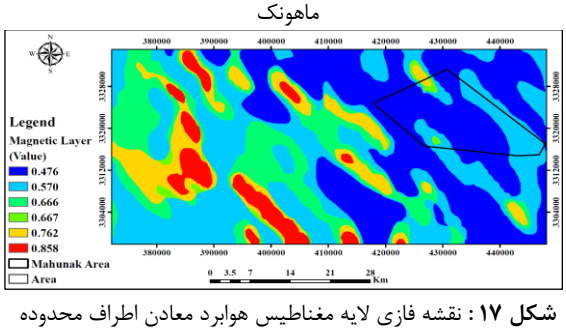
شکل ۱۴ : نقشه فازی لایه تکتونیک معادن اطراف محدوده اکتشافی ماهونک



شکل ۱۵ : نقشه فازی لایه سنجش از دور معادن اطراف محدوده اکتشافی ماهونک

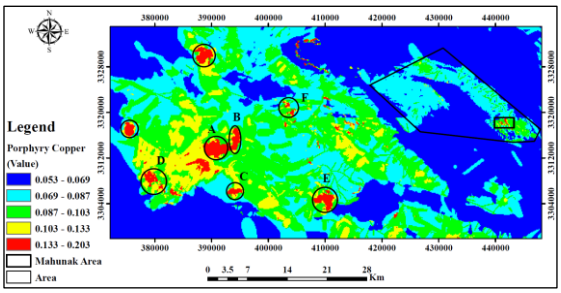


شکل ۱۶ : نقشه فازی لایه ژئوشیمی معادن اطراف محدوده اکتشافی ماهونک



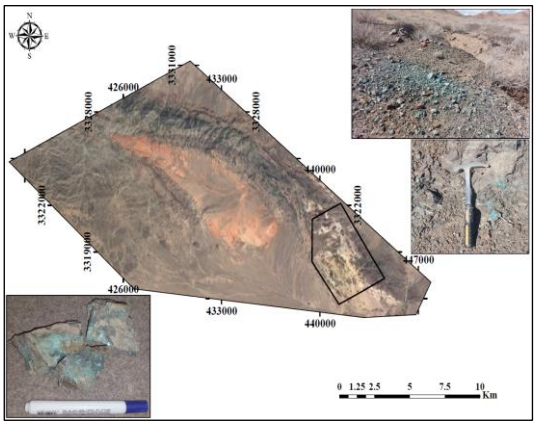
شکل ۱۷ : نقشه فازی لایه مغناطیس هوابرد معادن اطراف محدوده اکتشافی ماهونک

در نهایت بعد از بدست آمدن نقشه فازی تمام لایه ها، با استفاده از روش منطق فازی و عملگر گامای ۰/۹۵ عملیات تلفیق معادن اطراف محدوده ماهونک انجام گرفت. شکل ۱۸ مدل پتانسیل یابی مس پورفیری معادن اطراف محدوده ماهونک را نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان گفت که تمام معادن پورفیری منطقه بارزسازی شده اند. این معادن شامل معدن سرچشمه (A)، معدن سریدون (B)، معدن دره هزار(C)، محدوده حسین آباد (D)، محدوده کوه پنج (E)، محدوده ده سیاهان (F) و تعدادی محدوده های دیگر هستند. همچنین در شرق محدوده ماهونک نیز قسمتی به عنوان منطقه پر پتانسیل مشخص شده است که این منطقه برای بررسی های بیشتر توصیه می گردد. بنابراین نتایج بدست آمده این پژوهش از دقت بسیار مطلوبی برخوردار بوده و این روش قادر به شناسایی مناطق مستعد مس پورفیری می باشد.



شکل ۱۸ : نقشه پتانسیل یابی مس پورفیری معادن اطراف محدوده اکتشافی ماهونک

بعد از بازدیدهای صحرایی از قسمت شرقی محدوده ماهونک آثاری از سرباره های قدیمی مس و حضور کانی های آزوریت و مالاکیت در منطقه دیده شد که در شکل ۱۹ تصاویری از آنها آمده است.



شکل ۱۹ : بازدید های صحرایی انجام شده از بخش شرقی محدوده اکتشافی ماهونک

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف شناسایی مناطق مستعد مس پورفیری در محدوده اکتشافی ماهونک با ۵ لایه اطلاعاتی مختلف انجام شد. تلفیق داده‌های حاصل از مطالعات زمین شناسی، تکتونیک، ژئوشیمی رسوبات آبراهه ای، ژئوفیزیک مغناطیس هوابرد و سنجش از دور نشان داد که بخش شرقی محدوده ماهونک به دلیل وجود دگرسانی های شاخص فیلیک و آرژیلیک، تراکم بالای ساختارهای تکتونیکی و حضور آنومالی های مغناطیسی از پتانسیل بیشتری برای اکتشاف ذخایر مس پورفیری برخوردار است. نتایج بدست آمده از مدل پتانسیل یابی با استفاده از روش های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی همگی تاییدکننده اهمیت بخش شرقی محدوده ماهونک هستند. این منطقه با همپوشانی حداکثری لایه های موثر و بالاترین امتیاز فازی به عنوان اولویت اصلی به منظور مطالعات اکتشاف تکمیلی پیشنهاد می گردد. همچنین برای ارزیابی دقت مدل نیز از داده‌های اکتشافی معادن اطراف محدوده ماهونک استفاده شد. نتایج نشان داد که تمامی معادن پورفیری در زون‌های با پتانسیل بالا قرار دارند که بیانگر دقت مکانی بالا و کارایی علمی روش مورد نظر می باشد.

۶- مراجع

[1] Carranza, E.J.M., Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Vol. 11. 2008: Elsevier.

[2] Yousefi, M., et al., Data analysis methods for prospectivity modelling as applied to mineral exploration targeting: State-of-the-art and outlook. Journal of Geochemical Exploration, 2021. 229: p. 106839.

[3] Mirzabozorg, S.A.A.S. and M. Abedi, Recognition of mineralization-related anomaly patterns through an autoencoder neural network for mineral exploration targeting. Applied Geochemistry, 2023. 158: p. 105807.

[4] Abedi, M., et al., A comprehensive VIKOR method for integration of various exploratory data in mineral potential mapping. Arabian Journal of Geosciences, 2016. 9: p. 1-21.

[5] Li, S., J. Chen, and C. Liu, Overview on the development of intelligent methods for mineral resource prediction under the background of geological big data. Minerals, 2022. 12(5): p. 616.

[6] Pazand, K. and A. Hezarkhani, Comparison of subjective and objective methods for the spatial estimation of the porphyry Cu potential in Ahar-Arasbaran area, north-western Iran. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2016. 57(4): p. 343-364.

[7] Feltrin, L., Predictive modelling of prospectivity for Pb–Zn deposits in the Lawn Hill Region, Queensland, Australia. Ore Geology Reviews, 2008. 34(3): p. 399-427.

[8] Agterberg, F.P., Automatic contouring of geological maps to detect target areas for mineral exploration. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1974. 6: p. 373-395.

[9] Brown, W.M., et al., Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping. Australian journal of earth sciences, 2000. 47(4): p. 757-770.

[10] Harris, J., et al., Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps—a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. Natural Resources Research, 2001. 10: p. 91-124.

[11] Carranza, E.J.M. and M. Hale, Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. Natural Resources Research, 2001. 10: p. 125-136.

[12] Abedi, M., S. Torabi, and G. Norouzi, Application of fuzzy AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: Seridune copper deposit. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2013. 54(2).

[13] Najafi, A., M.H. Karimpour, and M. Ghaderi, 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, 2014. 33: p. 142-154.

[14] Lindsay, M.D., P.G. Betts, and L. Ailleres, Data fusion and porphyry copper prospectivity models, southeastern Arizona. Ore Geology Reviews, 2014. 61: p. 120-140.

[15] Daya, A. and H. Bejari, Fuzzy Analytical Hierarchy Process for Mineral Exploration Potential Mapping: a Case Study in Kamoshgaran Region (NW, Iran).

[16] Shirmard, et al. "Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Spatial Information System to Determine Optimal Drilling Points in Nissian Porphyry Copper Deposit". “Sepehr” Geographic Information Research Quarterly, 2015. p.91-100.

[17] Yazdi, Z., A.R. Jafari Rad, and K.S. Ajayebi, Analysis and modeling of geospatial datasets for porphyry copper prospectivity mapping in Chahargonbad area, Central Iran. Arabian Journal of Geosciences, 2015. 8: p. 8237-8248.

[18] Pazand, K. and A. Hezarkhani, Predictive Cu porphyry potential mapping using fuzzy modelling in Ahar–Arasbaran zone, Iran. Geology, Ecology, and Landscapes, 2018. 2(4): p. 229-239.

[19] Moradpouri, F., A copper porphyry promising zones mapping based on the exploratory data, multivariate geochemical analysis and GIS integration. Applied Geochemistry, 2021. 132: p. 105051.

[20] Khosravi, V., et al., Hybrid fuzzy-analytic hierarchy process (AHP) model for porphyry copper prospecting in simorgh area, eastern lut block of Iran. Mining, 2021. 2(1): p. 1-12.

[21] Dimitrijevic, M., Geology of Kerman region: institute for geological and mining exploration and investigation of nuclear and other mineral raw material, Beograd—Yugoslavia, Iran Geol. Survey Rept Yu/52, 1973.

[22] Shafiei, B., M. Haschke, and J. Shahabpour, Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. Mineralium Deposita, 2009. 44: p. 265-283.

[23] Saaty, T.L., The analytic hierarchy process (AHP). The Journal of the Operational Research Society, 1980. 41(11): p. 1073-1076.

[24] Feizi, F., A. KarbalaeiRamezanali, and E. Mansouri, Calcic iron skarn prospectivity mapping based on fuzzy AHP method, a case Study in Varan area, Markazi province, Iran. Geosciences Journal, 2017. 21: p. 123-136.

[25] Ataei, M. "Multi-criteria decision making", Shahrood University of Technology, 2009.

[26] Stöcklin, J., Structural history and tectonics of Iran: a review. AAPG bulletin, 1968. 52(7): p. 1229-1258.

[27] Novriadi, H. and T. Darijanto. Applying Fuzzy Logic Method in Mineral Potential Mapping for Epithermal Gold Mineralization in the Island of Flores, East Nosa Tenggara Using Geographical Information Systems (GIS). in Proceeding of 9th International Symposium on Mineral Exploration, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia. 2006.

[28] Bonham-Carter, G., Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. 1994: Elsevier.

[29] Parsa, M., A. Maghsoudi, and R. Ghezelbash, Decomposition of anomaly patterns of multi-element geochemical signatures in Ahar area, NW Iran: a comparison of U-spatial statistics and fractal models. Arabian journal of Geosciences, 2016. 9: p. 1-16.

[30] Hou, Z., et al., Porphyry Cu (–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. Ore Geology Reviews, 2011. 39(1-2): p. 21-45.

[31] Richards, J.P., Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. Ore Geology Reviews, 2011. 40(1): p. 1-26.

[32] Berberian, M. and G. King, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian journal of earth sciences, 1981. 18(2): p. 210-265.

[33] Sillitoe, R.H., The tops and bottoms of porphyry copper deposits. Economic Geology, 1973. 68(6): p. 799-815.

[34] Sillitoe, R.H., Porphyry copper systems. Economic geology, 2010. 105(1): p. 3-41.

[35] Cloos, M. and B. Sapiie, Porphyry copper deposits: strike–slip faulting and throttling cupolas. International Geology Review, 2013. 55(1): p. 43-65.

[36] Sillitoe, R., Characteristics and controls of the largest porphyry copper□gold and epithermal gold deposits in the circum□Pacific region. Australian Journal of Earth Sciences, 1997. 44(3): p. 373-388.

[37] Lucero-Álvarez, J., et al., Interpretation of geochemical anomalies and domains using Gaussian mixture models. Applied Geochemistry, 2021. 135: p. 105110.

[38] Drury, S.A. and G.A. Hunt, Geological uses of remotely-sensed reflected and emitted data of lateritized Archaean terrain in Western Australia. International Journal of Remote Sensing, 1989. 10(3): p. 475-497.

[39] Almasi, A., et al., Evaluation of structural and geological factors in orogenic gold type mineralisation in the Kervian area, north-west Iran, using airborne geophysical data. Exploration Geophysics, 2014. 45(4): p. 261-270.

[40] Chander, G., B.L. Markham, and D.L. Helder, Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment, 2009. 113(5): p. 893-903.

[41] Sinclair, W., Porphyry deposits. Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007. 5: p. 223-243.