



Imam Khomeini International University

Vol. 8, No. 3, Autumn 2023



نشریه مهندسی منابع معدنی

Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Presenting a Model for Distinguishing Between True and False Anomalies Using Data Classification

Kharashadi Zadeh M.¹, Ziaii M.^{2*}

1- Ph.D Student, Dept. of Mining Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2- Associate Professor, Dept. of Mining Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 09 Feb. 2022

Accepted: 04 Sep. 2022

Abstract: Data integration can be used to conduct exploratory studies on a regional scale simultaneously on all available data from the study area. The results obtained by considering all the data and the relationship between them are more accurate and reliable. In these cases, mineral potential modeling is utilized to determine promising areas. Although GIS-based mineral prospectivity mapping methods have been established, it is important to review which methods of geochemical data analysis result in anomaly maps that, in turn, lead to better models of mineral prospectivity. In this study, instead of using anomalies of pathfinder elements, using geochemical zonality anomalies as one of the several evidential maps resulted in the improved mapping of mineral prospectivity. In addition, whereas weights-of-evidence analysis was used in this study, other methods of data representation and integration for mineral prospectivity mapping can be used. In this study, a part of Arasbaran metallogenic zone was selected and one-element geochemical control maps, geochemical maps produced by zonality, structural, alteration and geological maps were weighted and produced using the position of known indices by the method of weights-of-evidence. In the next step, weighted layers were combined with logistic regression (LR) method to prepare mineral potential models.

Keywords: Porphyry copper deposit, Weights of evidence, Mineral potential model, Geochemical zonality.

How to cite this article

Kharashadi Zadeh, M., and Ziaii, M. (2023). "Presenting a model for distinguishing between true and false anomalies using data classification". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(3): 1-14.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.16891.1576](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.16891.1576)

*Corresponding Author Email: mziaii@shahroodut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Mineral deposits and associated primary halos are characterized by variations in chemical compositions along both vertical and horizontal directions. Most methods of analyses of anomalies in stream sediment data are concerned with variations in surficial chemical compositions along horizontal directions. However, the concept of the geochemical zonality method allows distinction between sub- and supra-ore anomalies. Therefore, application of zonality indices in mineral prospectivity allows further interpretation about whether delineated favorable areas are attractive for exploration of outcropping or blind mineral deposits. This added value information from zonality indices is essential in planning exploration activities.

METHOD

Although methods of GIS-based mineral prospectivity mapping are now mostly well investigated, it is important to review which methods of geochemical data analysis result in anomaly maps that, in turn, lead to better models of mineral prospectivity. In this study, instead of using anomalies of pathfinder elements, using geochemical zonality anomalies as one of the several evidential maps resulted in the improved mapping of mineral prospectivity. In addition, whereas weights-of-evidence analysis was used in this study, other methods of data representation and integration for mineral prospectivity mapping can be used.

FINDINGS AND ARGUMENT

Several methods currently exist for GIS-based mineral prospectivity mapping, whereby various relevant evidential data layers are integrated [1]. The most widely used of those methods is weights-of-evidence (WofE) analysis [2]. The WofE is a data-driven method that provides a simple approach to integration of diverse geodata set information. In this study, the geochemical zonality and WofE are used to build a model for porphyry–Cu deposits in the area covered by two 1:100,000 scale map sheets of Varzaghan and Seah-Road (East Azerbaijan province, NW Iran) that are favorable for porphyry copper deposits. Porphyry copper deposits, due to their large and important reservoirs, have been well studied. Furthermore, these types of deposit have a special pattern, which is very good for regional exploration [2].

From various spatial data bases of the Geological Survey of Iran (GSI), the following datasets were used for regional-scale data-driven predictive mapping of prospectivity for porphyry–Cu deposits:

- Locations of 20 porphyry–Cu deposits/occurrences.
- Fault/fracture lineaments digitized from the 1:100,000 scale geological/structural maps and from Aster satellite images.
- Lithological units from the 1:100,000 scale geological/structural maps
- Map of hydrothermally altered rocks interpreted from Aster satellite images.
- A sub set of stream sediment geochemical data (analyzed for Cu, Zn, Pb, Mo) pertaining to the study area.

WofE analysis was applied to quantify the spatial associations of known porphyry–Cu deposits in the study area with individual layers of spatial evidence. In this analysis, a unit cell size of 200 m was used for spatial representation of porphyry–Cu deposits [1]. In WofE analysis with a large number of deposits (say >20), a maximum positive contrast (C) for presence/absence of evidence is considered a cutoff level for converting evidential data into binary predictor maps. However, in WofE analysis with small number of deposits, say <20 [1,2] the studentized C (i.e., the ratio of C to its standard deviation) is used to judge the strength or statistical significance of spatial association and to select cutoff level for converting evidential data into binary predictor maps. A studentized C greater than 1.5, for example, suggests a statistically significant positive spatial association at 95% confidence level [2]. This criterion was used for judging the strength of spatial association and for converting individual data layers into binary predictor maps.

In this study, instead of using anomalies of pathfinder elements, using geochemical zonality anomalies ($Pb \times Zn / (Cu \times Mo)$) as one of the several evidential maps resulted in the improved mapping of mineral prospectivity for porphyry–Cu deposits (Figure 1). For comparison, Cu and Mo maps were used instead of the zonality map in the WofE analysis (Figure 2). The zonality-in-WofE prospectivity model shows only high values in the Soungun (blind mineralization) area, whereas the WofE map portrays shows high values in both Astamal (zone dispersed mineralization) and Soungun prospectivity in that part of the study area. The zonality-in-WofE prospectivity model outperforms the Cu-Mo in-WofE prospectivity model. The

results demonstrate the usefulness of the zonality-in-WofE for regional-scale targeting of blind mineral deposits.

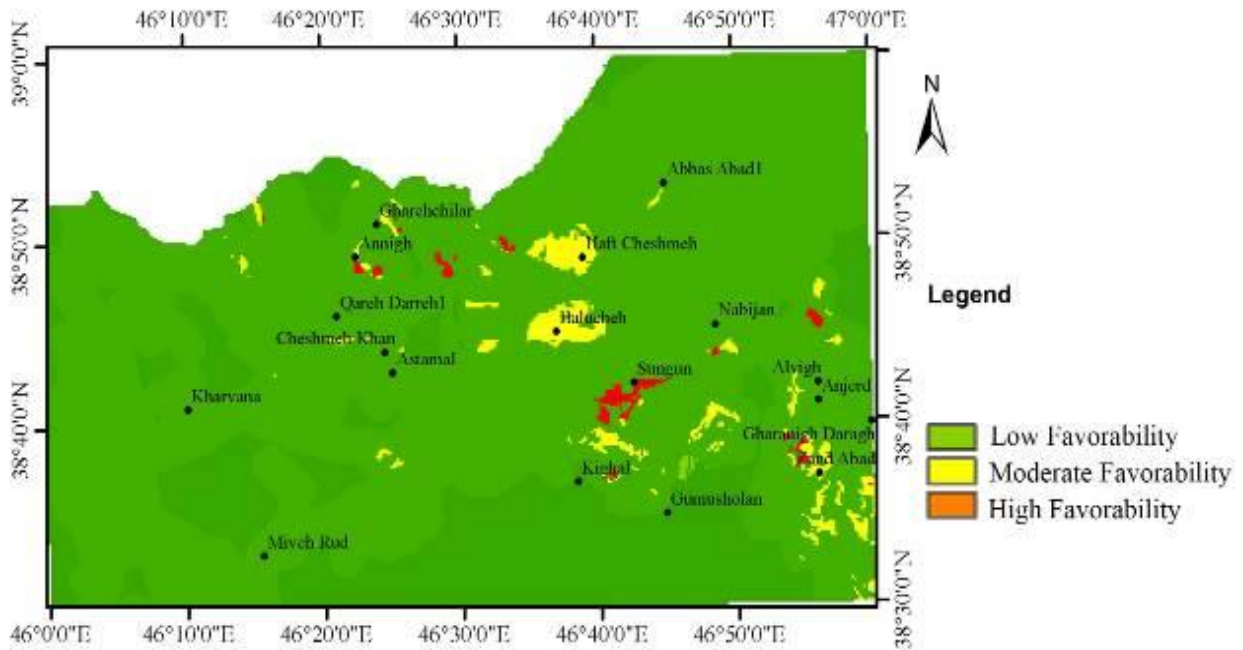


Figure 1. Porphyry–Cu prospectivity models: zonality in WofE

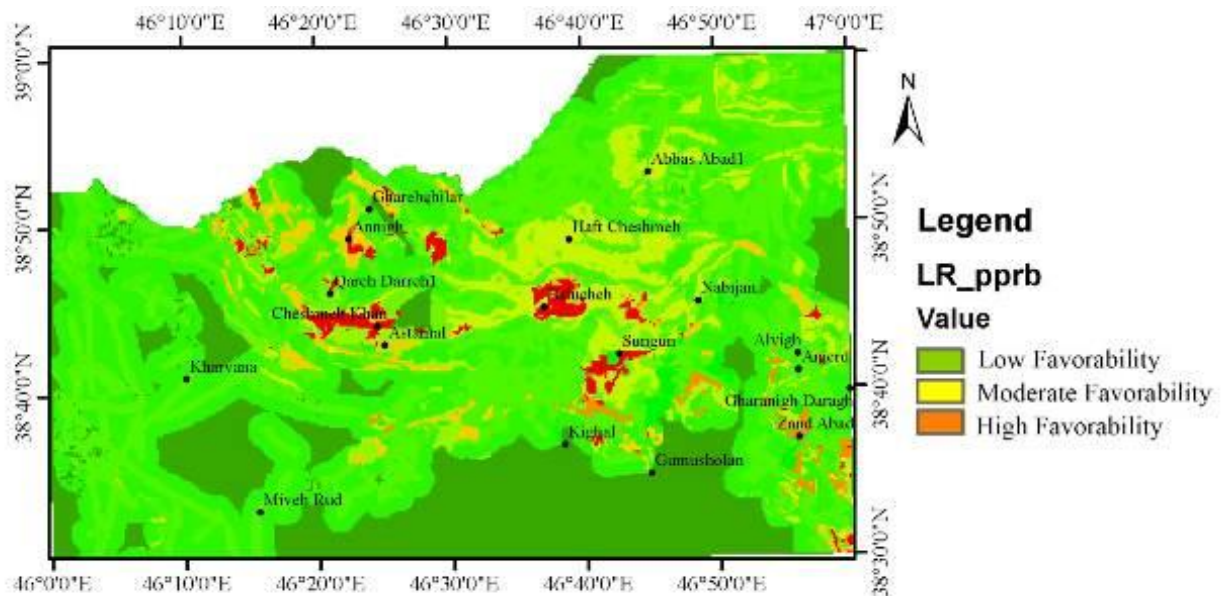


Figure 2. Porphyry–Cu prospectivity models: Cu-Mo in WofE

REFERENCES

- [1] Ziaii, M., Carranza, E. J. M., and Ziaei, M. (2011). "Application of geochemical zonality coefficients in mineral prospectivity mapping". *Computers & Geosciences*, 37(12): 1935-1945.
- [2] Bonham-Carter, G. F. (1994). "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS". *Computer Methods in the Geosciences*, 13: pp. 398.



ارایه مدلی برای تفکیک بین آنومالی‌های واقعی و کاذب با استفاده از طبقه‌بندی داده‌ها

محمد خراشادی زاده^۱، منصور ضیائی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰

چکیده

تلفیق داده‌ها یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان مطالعات اکتشافی در مقیاس ناحیه‌ای را به صورت یکجا و همزمان بر روی همه داده‌های در دسترس از منطقه مورد مطالعه انجام داد. نتایجی که با در نظر گرفتن همه داده‌ها و ارتباط میان آنها به دست می‌آید، دقت و اطمینان بیشتری دارد. در چنین شرایطی عموماً از مدل‌سازی پتانسیل معدنی برای تعیین نواحی امیدبخش استفاده می‌شود. در روش جدید معرفی شده در مقاله حاضر ضمن بررسی تئوری زونالیت‌ها ژئوشیمیایی در بهبود بخشیدن به نتایج به دست آمده از تهیه مدل پتانسیل معدنی، بخشی از زون فلززایی ارسباران انتخاب و ارایه نقشه آنومالی فوق و تحت کانسار، محدوده‌های کانی‌سازی پنهان و پراکنده معرفی شده بررسی شد. همچنین نقشه‌های شاهد ژئوشیمی تک عنصری، نقشه‌های ژئوشیمی تولید شده با روش زونالیت، ساختاری، دگرسانی و زمین‌شناسی با استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته شده با روش وزن‌های نشانگر وزن‌دهی و تولید و در مرحله بعد برای تهیه مدل‌های پتانسیل معدنی لایه‌های وزن‌دار اطلاعاتی با روش لجستیک رگرسیون (LR) تلفیق شدند. در پایان از رخدادهای معدنی شناخته شده کانی‌سازی مس پورفیری منطقه برای ارزیابی مدل‌های تولید شده استفاده شد که نتایج نشان می‌دهد مناطق مشخص شده برای اکتشاف با استفاده از مدل تهیه شده با استفاده از نقشه شاهد ژئوشیمی زونالیت، انطباق خوبی با رخدادهای معدنی موجود دارد.

کلمات کلیدی

کانسار مس پورفیری، روش وزن‌های نشانگر، مدل پتانسیل معدنی، ژئوشیمی زونالیت.

استناد به این مقاله

خراشادی زاده، م.، ضیائی، م.؛ ۱۴۰۲؛ "ارایه مدلی برای تفکیک بین آنومالی‌های واقعی و کاذب با استفاده از طبقه‌بندی داده‌ها". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۳، ص ۱-۱۴.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.16891.1576



۱- مقدمه

از نقشه‌های تهیه شده به صورت صحرایی به ویژه در منطقه سونگون کمک گرفته شد. همچنین برای تهیه نقشه‌های شاهد ژئوشیمی از ۱۲۳۸ نمونه رسوب آبراهه‌ای برگه یکصد هزار سیه‌رود و همچنین ۱۰۶۷ نمونه رسوب آبراهه‌ای برگه ورزقان استفاده شد.

برای بررسی بهتر داده‌های ژئوشیمی، حوضه‌های آبریز هر کدام از نمونه‌ها ترسیم و اطلاعات هر نمونه ژئوشیمی به پلی‌گون حوضه آبریز بالادستی منتقل شد [۱۱]. برای محاسبات اولیه داده‌های ژئوشیمی روش فرکتالی عیار- مساحت مد نظر قرار گرفت [۱۲]. با توجه به متفاوت بودن برداشت‌های ژئوشیمی در برگه‌های ورزقان و سیه‌رود، هر برگه جداگانه تحلیل و نتایج بعد از کلاسه‌بندی به صورت فایل رستری با یکدیگر ترکیب شدند. در انتها با روش داده محور و استفاده از نقشه شاهد زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی و در نهایت نقشه‌های شاهد تولید شده از داده‌های ژئوشیمی با روش تک متغیره و روش زونالیت‌ه دو مدل پتانسیل معدنی تولید شد.

۲- زمین‌شناسی

برگه‌های یکصد هزارم ورزقان و سیه‌رود در تقسیم‌بندی ساختاری کشور، در زون فلززایی ارسباران قرار دارند (شکل ۱). به لحاظ زمین‌شناسی اقتصادی محدوده برگه ورزقان یکی از نقاط پراستعداد منطقه آذربایجان به حساب می‌آید و پیوسته مورد توجه معدن کاران بوده است. وجود معدن فعالی مانند مس سونگون و معادن متروکه مثل انجرد و جوبند شاهدهی بر این مدعا هستند [۱]. فعالیت آتشفشانی در ائوسن سبب مشاهده واحدهایی همچون آندزیت، داسیت و تراکیت در بخش‌هایی از مرکز و شمال ناحیه مورد مطالعه شده است. واحدهای دوره الیگوسن که عمدتاً گرانیت، گرانودیوریت، مونزونیت و دیوریت هستند، سبب کانی‌سازی‌های باارزشی در اطراف این توده‌های نفوذی شده‌اند [۱۱]. همچنین فعالیت‌های ماگمایی در برگه سیه‌رود باعث به وجود آمدن سنگ‌های آتشفشانی، آتشفشانی- رسوبی و نفوذی شده است. سنگ‌های آتشفشانی مربوط به کرتاسه بالایی، اغلب آندزیتی بوده که به شدت دچار دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک، پروپیلیتیک و آلونیتی شده‌اند و در برخی مناطق کانی‌سازی مس و آهن نیز در آنها تشکیل شده است [۱۲].

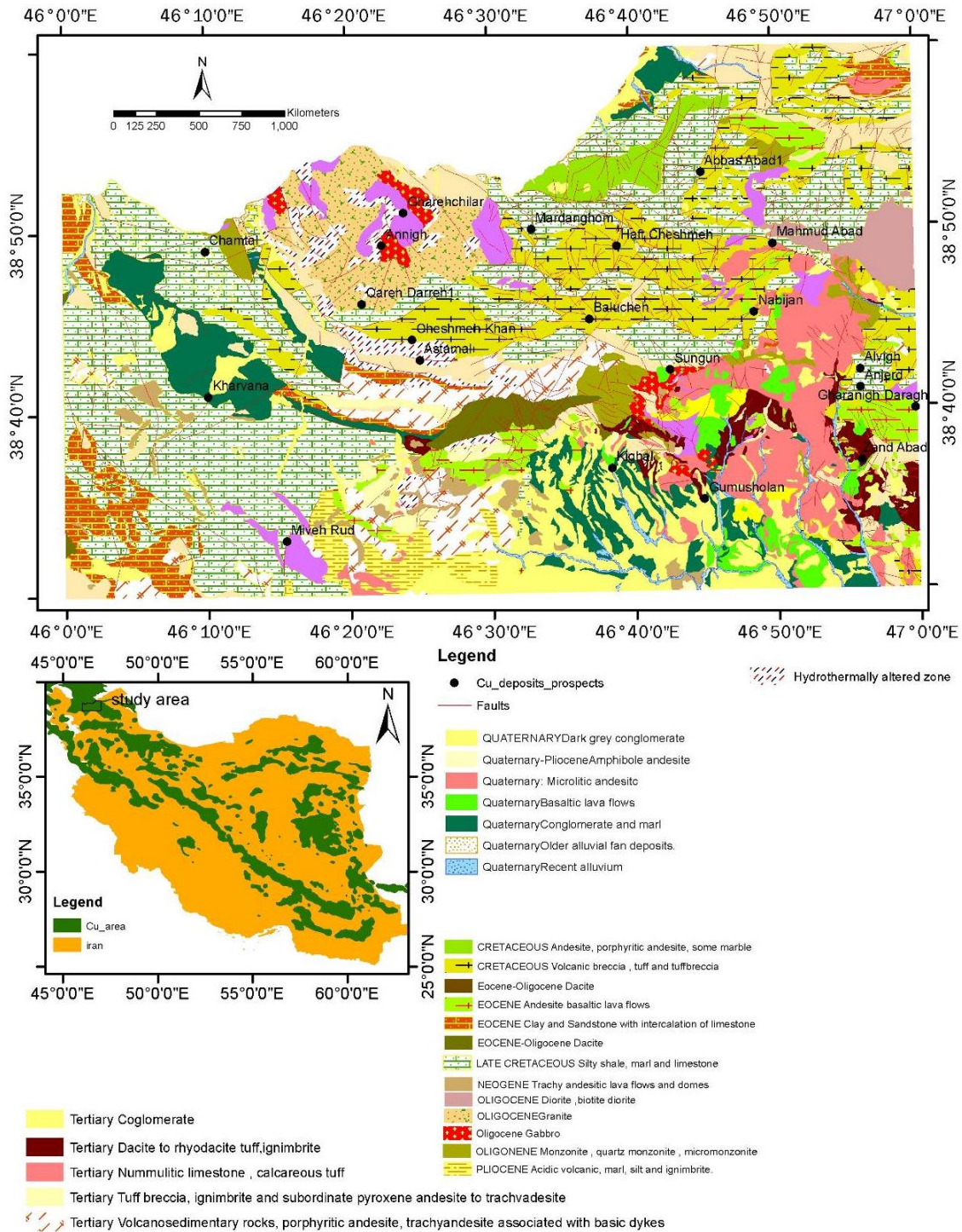
از دیگر سنگ‌های آتشفشانی منطقه می‌توان به داسیت، توف‌های اسیدی اشاره کرد که گستردگی زیادی نیز دارد. فعالیت‌های نفوذی در شمال شرق برگه سیه‌رود اهمیت

با گسترش علم کامپیوتر و توسعه نرم‌افزارهای نقشه‌برداری امروزه برای صرفه‌جویی در هزینه اکتشاف و تعیین مناطق پتانسیل‌دار معدنی از روش‌های مختلف داده محور و دانش محور برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی (زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، ساختاری و دگرسانی) در تهیه مدل پتانسیل معدنی در مقیاس ناحیه‌ای استفاده می‌شود [۱]. ساده‌ترین روش برای تلفیق لایه‌ها، روش دانش محور است که نقشه‌های شاهد بر اساس نظر کارشناس وزن‌دهی شده و با یکی از روش‌های فازی، مدل پتانسیل معدنی تولید می‌شود. در مقابل در روش داده محور وزن هر نقشه شاهد با توجه به ارتباط مکانی اندیس‌های معدنی و نقشه‌های شاهد، با استفاده از روابط آماری و ریاضی محاسبه می‌شود. روش داده محور اغلب برای مناطقی به کار برده می‌شود که مورد پیمایش زمینی قرار گرفته و اندیس‌ها و شواهد معدنی منطقه مشخص شده باشد [۵-۲]. از مهم‌ترین روش‌های داده محور می‌توان روش Logistic Regression (LR) [۲]، Evidential Weights OF Evidence (WofE) [۴] و Belief Functions [۵] را نام برد. البته به این نکته باید اشاره داشت که در مناطقی که اندیس‌های معدنی کم هستند، روش‌های داده‌محور قادر نخواهند بود به درستی عمل کرده و مقادیر گم شده را صفر در نظر خواهند گرفت، بنابراین در سال‌های اخیر از روش‌های داده محور یادگیری ماشین از جمله Random Forest [۹-۶] برای مناطقی که اندیس معدنی کمی دارند استفاده شده است [۱۰]. نکته قابل توجه در مدل تولید شده عوامل سطحی و عمقی است. از آنجا که لایه‌های به کار برده شده برای تهیه مدل پتانسیل معدنی در اغلب موارد از لایه‌های مختلف سطحی (زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی و نظایر آن) تشکیل شده‌اند، گاه در شناسایی آنومالی‌های پنهان موثر واقع نمی‌شوند، بنابراین برای بهبود بخشیدن به مدل پتانسیل معدنی و پیش‌بینی کانی‌سازی پنهان، از روش بوس و گریگوریان (زونالیت‌ه) بهره گرفته شد.

در این تحقیق برای بررسی مدل‌های پتانسیل معدنی، برگه‌های یکصد هزار ورزقان و سیه‌رود برای تعیین مناطق پرتانسیل مس پورفیری واقعی از نوع کاذب در نظر گرفته شد. در منطقه مورد مطالعه برای استخراج مناطق دگرسانی از تصاویر لندست و استر در شیت‌های مختلف و همچنین

در زون ارسباران، احتمال زیادی به اکتشاف ذخایری از نوع پورفیری، اسکارن، هیدروترمال و طلای مرتبط با توده‌های نفوذی در آن وجود دارد [۱].

بسیاری داشته به صورتی که بازتاب این فعالیت‌ها بیشتر به شکل سنگ‌های نفوذی متعلق به الیگوسن نمود دارد [۱۲]. با توجه به ذخایر شناسایی شده در این دو برگه و نقاط مجاور



شکل ۱: زمین‌شناسی منطقه مورد اکتشاف [۱۳-۱۶]

ترسیم شد. با توجه به متفاوت بودن برداشت‌های ژئوشیمی، هر برگه جداگانه تحلیل و اطلاعات هر نمونه ژئوشیمی به پلی‌گون حوضه آبریز بالادستی منتقل شد.

داده‌های ژئوشیمی منطقه مورد مطالعه در مقالات مختلفی مورد تحلیل قرار گرفته است. از جمله نیک‌فرجام و همکاران که با توصیف مدل مس پورفیری و در نظر گرفتن عناصر Cu, Mo, Ag, Pb, Zn, As به عنوان عناصر شاخص کانسارهای مس پورفیری با تهیه نقشه فازی پیوسته هر یک از عناصر و تلفیق نقشه‌های تولید شده با روش میانگین هندسی مدل پتانسیل معدنی برای مس پورفیری از برگه ورزقان تهیه شده است [۱۱]. دایا و مرادی برای جدایش بی‌هنجاری‌های ژئوشیمی عناصر مس، مولیبدن، آهن و آنتیموان در برگه صد هزار سیه‌رود با استفاده از مدل‌های فرکتالی عیار- مساحت و عیار- تعداد، سه جامعه ژئوشیمی را تشخیص می‌دهد. بیشترین بی‌هنجاری برای مس، آهن و مولیبدن را در بخش‌های شمالی، شمال شرقی و کمتر در مرکز برگه سیه‌رود معرفی کرده است [۱۲].

همچنین در بخش شمالی برگه سیه‌رود [۱۷] با بررسی داده‌های ژئوشیمی آبراه‌های و مقایسه دو روش مولفه اصلی و روش خوشه‌بندی فازی میان مرکز سه محدوده را در راستای شمال غربی- جنوب شرقی به عنوان بی‌هنجاری مس- مولیبدن معرفی می‌کند و ادامه این کانی‌سازی را منطبق بر کمربند مس آلپ- هیمالیا به سوی مناطق سونگون و کیقال دانسته است. شباهت‌های ترکیب سنگی منطقه ارسباران- قره‌داغ (شمال باختر ایران- آذربایجان شرقی) و ادامه آن در دو سوی شمال و جنوب رودخانه ارس در جمهوری آذربایجان و ارمنستان که به صورت یک توده باتولیتی اردوباد- میگری- قره داغ تجلی می‌یابد، قابل اشاره است [۱۷]. در این مناطق کارشناسان روس به طور گسترده فعالیت داشته و بانک اطلاعات ژئوشیمی از معادن مس پورفیری در معادن منطقه را تهیه کرده‌اند و با این اطلاعات شاخص زونالیته متناسب با معادن مس پورفیری این زون به دست آمده است [۱۸، ۱۹].

۳-۱- جدایش زمینه از آنومالی

از روش‌های متداول برای جداسازی آنومالی از زمینه برای عناصر می‌توان به روش‌های آماری کلاسیک اشاره داشت که با تبدیل داده‌ها به نرمال و حذف تعدادی از داده‌ها به عنوان خارج از ردیف و عدم توجه به شکل هندسی و توزیع فضایی داده‌ها توانایی بیان پیچیدگی‌های منطقه مورد اکتشاف به درستی نمایان نمی‌شود [۱۱، ۱۸]. این محدودیت‌ها سبب شده

در شکل ۱ محل قرارگیری منطقه مورد مطالعه بر روی زون ارسباران مشخص شده است و همچنین واحدهای زمین‌شناسی، گسل‌ها و اندیس‌ها و معادن شناخته شده نمایش داده شده که به صورت خلاصه در جدول ۱ این نقاط با مختصات و توضیحات نوع کانی‌سازی تشریح شده است [۱۶]. از این بین تعداد ۱۸ اندیس مس به عنوان اندیس‌های معدنی شناخته شده در محاسبات تهیه مدل پتانسیل معدنی به روش داده محور مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱: مختصات و نوع کانی‌سازی معادن و اندیس‌های منطقه مورد مطالعه [۱۶]

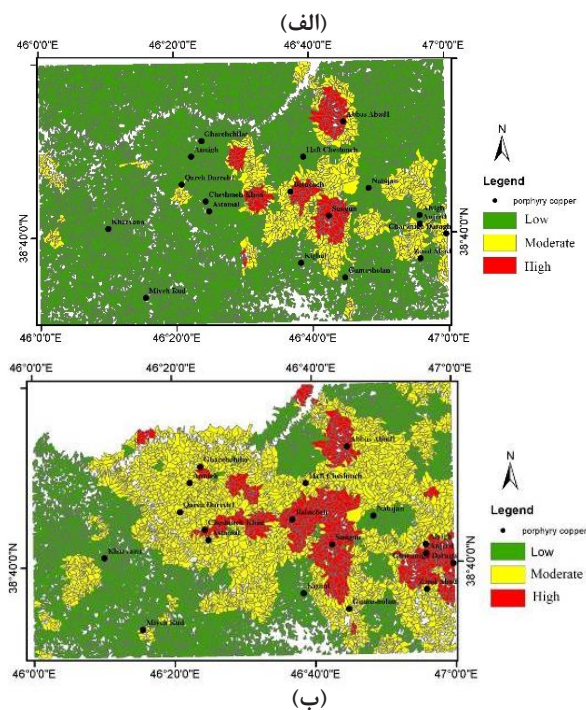
ردیف	نام	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عناصر
۰	Abbas Abad 1	۳۸،۸۸	۴۶،۷۵	Cu
۱	Alvigh	۳۸،۷۰	۴۶،۹۳	Cu, Mo
۲	Anjerd	۳۸،۶۸	۴۶،۹۳	Cu, Mo
۳	Annigh	۳۸،۸۲	۴۶،۳۷	Cu, Mo, Au
۴	Astamal	۳۸،۷۱	۴۶،۴۲	Cu, Mo
۵	Balucheh	۳۸،۷۵	۴۶،۶۲	Cu, Mo
۶	Chamtal	۳۸،۸۲	۴۶،۱۷	Cu, Au, Fe
۷	Cheshmeh Khan	۳۸،۷۳	۴۶،۴۱	Cu, Mo
۸	Gharanigh Daragh	۳۸،۶۶	۴۷،۰۰	Cu
۹	Gharehchilar	۳۸،۸۵	۴۶،۴۰	Cu, Mo, Au
۱۰	Gumusholan	۳۸،۵۸	۴۶،۷۷	Cu, Mo
۱۱	Haft Cheshmeh	۳۸،۸۲	۴۶،۶۵	Cu, Mo
۱۲	Kharvana	۳۸،۶۸	۴۶،۱۷	Cu
۱۳	Kighal	۳۸،۶۱	۴۶،۶۴	Cu, Mo
۱۴	Mahmud Abad	۳۸،۸۲	۴۶،۸۳	Cu, Fe
۱۵	Mardanghom	۳۸،۸۳	۴۶،۵۵	Cu, Fe
۱۶	Miveh Rud	۳۸،۵۵	۴۶،۲۶	Cu, Au
۱۷	Nabijan	۳۸،۷۵	۴۶،۸۱	Cu, Mo, Au
۱۸	Qareh Darreh 1	۳۸،۷۷	۴۶،۳۵	Cu, Mo
۱۹	Sungun	۳۸،۷۰	۴۶،۷۰	Cu, Mo
۲۰	Zand Abad	۳۸،۶۲	۴۶،۹۳	Cu, Mo

۳-۲- ژئوشیمی

برای تهیه نقشه‌های ژئوشیمی از ۱۲۳۸ نمونه رسوب آبراه‌های برگه یکصد هزار سیه‌رود که به روش XRF, ICP-MS تجزیه شده است و همچنین ۱۰۶۷ نمونه رسوب آبراه‌های برگه ورزقان استفاده شد. همچنین حوضه‌های آبریز هر کدام از نمونه‌ها با استفاده از توپوگرافی منطقه و نرم‌افزار ArcGIS

تولید سطحی تغییرات عمودی در سه شاخص زونالیته ذخایر مس پورفیری استاندارد ارمنستان، قزاقستان و ایران معرفی شده است (شکل ۳).

با وجود تفاوت‌های قابل توجه در موقعیت زمین‌شناسی کانسارهای مس پورفیری، مقادیر شاخص زونالیته به صورت یکنواخت رو به پایین کاهش یافته که نشان‌دهنده وجود شاخص عمودی یکسان در هاله‌های اولیه کانسارهای مس پورفیری است. از این رو هاله‌های اولیه کانسارهای معدنی در



شکل ۲: نقشه آنومالی برای عنصر الف (مولیبدن و ب) مس با استفاده از روش فرکتالی عیار - مساحت

Erosional surface	Vertical section	$K = \frac{Zn \cdot Pb}{Cu \cdot Mo}$
Upper-ore	II	5 - 0.5
Ore	III	0.5 - 0.05
Ore	IV	0.05 - 0.005
Lower-ore	V	0.005 - 0.0005
Sub-ore	VI	<0.0005
	Contrast K(I)/K(VI)	10,000

شکل ۳: مدل شاخص زونالیته قائم برای ذخایر مس پورفیری بر پایه ذخایر استاندارد مس پورفیری [۲۹]

تا از روش هندسه فرکتال که در آن از داده‌های واقعی برای جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی استفاده می‌شود بدون آنکه پردازش‌های آماری مانند نرمال کردن داده‌ها که موجب عوض شدن ماهیت شوند، استفاده شود و در نتیجه مدل‌سازی با این روش به واقعیت نزدیکتر است [۱۹-۲۱].

با توجه به جدا بودن برداشت‌های ژئوشیمی در برکه‌های ورزقان و سیهرود هر برکه مجزا تحلیل و برای مقایسه راحت‌تر نتایج به دست آمده، با مقیاس پیوسته و کلاسه‌بندی شده به روش فرکتالی عیار - مساحت در شکل ۲ نشان داده شده است. محدوده مطالعاتی به سه بخش محدوده دارای احتمال کانی‌زایی زیاد (مناطق قرمز رنگ)، احتمال کانی‌زایی متوسط (مناطق زرد) و با احتمال کانی‌زایی کم (مناطق سبز رنگ) تقسیم شده است. تفکیک مقادیر رتبه‌بندی به سه بخش بر اساس بهترین نقاط شکست منحنی، حداقل بودن تعداد آنها و برآزش نقاط با سه خط مستقیم انجام گرفته است [۲۱-۲۳]. با توجه به نقشه شکل ۲-ب مناطق شرقی و مرکزی از منطقه مورد مطالعه بیشترین کانی‌سازی برای مس را داشته که انطباق مناسبی با اندیس‌ها دارند و بر واحدهای آذرین، دگرسانی‌های مربوط به آنها و گسل‌ها منطبق هستند.

۳-۲- روش زونالیته

شاخص زونالیته (قائم) به عنوان یکی از بخش‌های مهم زونالیته ژئوشیمیایی، به واسطه بررسی عناصر فوق کانسار و تحت کانسار در تشخیص مناطق کانی‌سازی پنهان کاربرد وسیعی داشته است. اولین بار بئوس و گریگوریان در سال ۱۹۷۷ از روش زونالیته برای داده‌های رسوبات آبراه‌های استفاده کرد و سطح از فرسایش را با حاصل‌ضرب عناصر مختلف به دست آورد [۱۸]. بر اساس مطالعات پیشین در کانسار مس پورفیری ارمنستان، عناصر سرب و روی به عنوان عناصر فوق کانسار، عناصر مس و مولیبدن به عنوان عناصر تحت کانسار و نسبت ضربی $(Pb \times Zn) / (Cu \times Mo)$ به عنوان شاخص زونالیته انتخاب شده است [۲۷، ۲۶]. همچنین در [۲۹، ۲۸] از روش زونالیته برای تشخیص مناطق آنومال از غیر آنومال استفاده شده است. انتخاب شاخص زونالیته اهمیت زیادی دارد [۲۹]. این روش که غالباً در کشور چین و روسیه مرسوم بوده و برای اولین بار توسط ضیائی و همکاران به عنوان لایه شاهد در تهیه مدل پتانسیل معدنی در اکتشاف مس در منطقه کرمان مورد استفاده قرار گرفت، موفق به تفکیک آنومالی‌های پنهان در ناحیه مورد بررسی شد [۲۹]. در مطالعات ضیائی و همکاران به وسیله محاسبه مقادیر

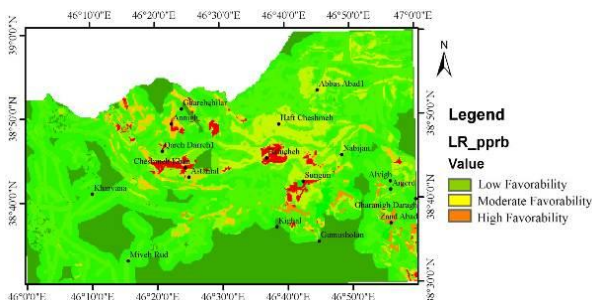
که در آن:

Std: انحراف معیار

از آنجا که انحراف معیار به واحدهای اندازه‌گیری وابسته است مقادیر بزرگتر در SigC نشان‌دهنده معنی‌دار بودن کنتراست است [۳۱،۳۰،۴].

اطلاعات مربوط به تعداد ۱۸ اندیس معدنی انتخاب شده در منطقه برای این پژوهش در دسترس بود. نقشه‌های شاهد با استفاده از روش وزن‌های نشانگر (WofE) و استفاده از اندیس‌های مس پورفیری وزن‌دار شده است (جدول ۲). نقشه‌های شاهدی که برای تهیه مدل پتانسیل معدنی در این منطقه مورد استفاده قرار گرفتند شامل نقشه‌های شاهد زمین‌شناسی، ژئوشیمی تک متغیره عنصر مس، مولیبدن ژئوشیمی زونالیت، گسل و دگرسانی است. افزون بر این، با توجه به اهمیت گسل‌ها [۳۱]، تمامی گسل‌ها در فواصل مختلف بافریندی شده و همچنین چگالی گسل‌ها و وزن‌های هر کدام از لایه‌های تولید شده با روش وزن‌های نشانگر محاسبه شد. از این بین با توجه به اندیس‌های موجود فقط لایه بافر در فواصل ۵۰۰ متر بهترین وزن را به خود اختصاص داد (جدول ۲) که در محاسبات مدل استفاده شد.

پس از محاسبه وزن‌ها با روش وزن‌های نشانگر برای تهیه مدل پتانسیل معدنی از روش لجستیک رگرسیون (LR) استفاده شد. نکته قابل توجه در مورد لجستیک رگرسیون عدم فرض استقلال شرطی میان نقشه‌های شاهد در ارتباط با نقاط اندیس‌ها در این روش است [۳۳،۳۲]. برای بررسی تاثیر لایه‌های مختلف در محاسبه نقشه پتانسیل، اولین مدل پتانسیل معدنی با استفاده از نقشه‌های شاهد زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی، لایه ژئوشیمی عنصر مس و لایه ژئوشیمی عنصر مولیبدن تولید شد (شکل ۶).



شکل ۶: مدل پتانسیل معدنی حاصل از پنج لایه زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی و ژئوشیمی عنصر مس و مولیبدن

خواهد بود، بنابراین احتمال اینکه یک اندیس معدنی جدید در منطقه پیدا شود ۲/۵ درصد است. این تخمین اولیه بعدها در نواحی مختلف با استفاده از سایر شواهد (نقشه‌های شاهد)، زیاد یا کم می‌شود. احتمال متقدم در عاملی ضرب می‌شود تا احتمال متاخر وجود کانی‌سازی با شواهد اصلی معلوم، به دست آید.

احتمال متاخر از ضرب وزن هر نقشه شاهد در مقدار احتمال متقدم به‌نگام می‌شود. با استفاده از مفاهیم مربوط به همپوشانی مکانی وجود یا عدم وجود نقشه شاهد و اندیس معدنی، وزن‌های مثبت و منفی را می‌توان با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه کرد [۳۰]:

$$W^+ = \text{Log}_e \frac{npixbd \times (npixt - npixd)}{(npixb - npixbd) \times npixd} \quad (2)$$

$$W^- = \text{Log}_e \frac{(npixd - npixbd) \times (npixt - npixd)}{(npixt - npixd - (npixb - npixbd)) \times npixd} \quad (3)$$

که در آن:

W^+ : وزن مثبت

W^- : وزن منفی

npixt: تعداد پیکسل‌های مربوط به کل منطقه

npixd: تعداد اندیس‌های موجود در منطقه

npixb: تعداد پیکسل‌های مربوط به الگوهای دوتایی

npixbd: تعداد پیکسل‌های مشترک بین الگوهای دوتایی

و اندیس‌ها

برای اندازه‌گیری میزان ارتباط یک نقشه شاهد و اندیس‌های معدنی از مقداری با عنوان کنتراست C که از رابطه ۴ قابل محاسبه است، استفاده می‌شود:

$$C = W^+ - W^- \quad (4)$$

اگر هیچ نقطه مشترکی بین اندیس‌ها و نقشه شاهد وجود نداشته باشد، معادله یاد شده برابر صفر خواهد بود. مقادیر بیشتر از ۲ نشان‌دهنده یک ارتباط قوی است و پیشنهاد می‌دهد که نقشه شاهد به خوبی وقوع رویداد معدنی را پیش‌بینی می‌کند. همچنین مقدار C را می‌توان برای تعیین حد آستانه برای تهیه نقشه پتانسیل استفاده کرد. برای تشخیص معنی‌دار بودن مقدار C مقادیر استیودنت کنتراست مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$\text{SigC} = \frac{C}{\sqrt{(\text{Std } W^+)^2 + (\text{Std } W^-)^2}} \quad (5)$$

جدول ۲: نتایج محاسبات روش وزن‌های نشانگر برای نقشه‌های شاهد (فواصل و واحدهایی که وزن بالایی داشته‌اند با فونت درشت نمایش داده شده است).

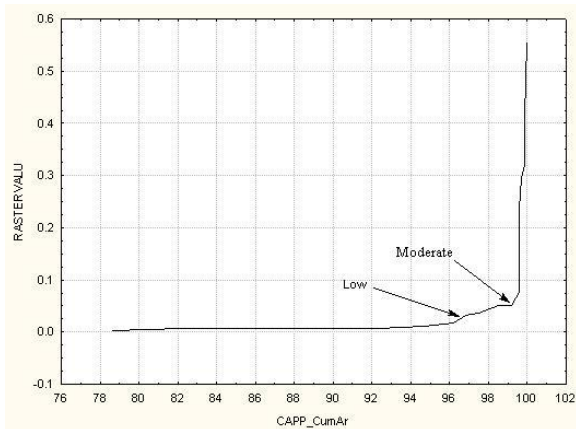
STUDC	SC	C	SW ⁻	W ⁻	SW ⁺	W ⁺	تعداد نهشته	مساحت (کیلومتر مربع)	کلاس شاهد	
۰.۸۹	۱.۰۳	۰.۹۲	۰.۲۴	-۰.۰۳	۱.۰۱	۰.۸۸	۱	۹۴	H	نقشه زمین‌شناسی
۲.۵۷	۰.۷۶	۱.۹۵	۰.۲۵	-۰.۱۰	۰.۷۲	۱.۸۵	۲	۷۳	D	
۱.۳۵	۱.۰۴	۱.۴۰	۰.۲۴	-۰.۰۴	۱.۰۱	۱.۳۵	۱	۵۹	B	
۰.۶۳	۱.۰۳	۰.۶۶	۰.۲۴	-۰.۰۳	۱.۰۰	۰.۶۳	۱	۱۲۱	An	
۳.۴۲	۰.۷۷	۲.۶۳	۰.۲۵	-۰.۱۱	۰.۷۳	۲.۵۲	۲	۳۸	Gr	
۰.۷۲	۱.۰۳	۰.۷۵	۰.۲۴	-۰.۰۳	۱.۰۰	۰.۷۲	۱	۱۱۱	Ns	
۲.۲۰	۰.۵۳	۱.۱۶	۰.۲۸	-۰.۲۱	۰.۴۵	۰.۹۵	۵	۴۴۰	Vt	
۰.۴۶	۱.۰۳	۰.۴۷	۰.۲۴	-۰.۰۲	۱.۰۰	۰.۴۵	۱	۱۴۴	G	بافر گسل
۱.۵۸	۰.۵۳	۰.۸۳	۰.۴۵	-۰.۵۲	۰.۲۸	۰.۳۱	۱۳	۱۷۲۳	۵۰۰ متر	
-۰.۰۸	۰.۵۷	-۰.۰۵	۰.۵۰	-۰.۰۴	۰.۲۷	-۰.۰۱	۱۴	۲۵۴۵	۱۰۰۰ متر	
-۰.۴۸	۰.۷۵	-۰.۳۶	۰.۷۱	۰.۳۲	۰.۲۵	-۰.۰۳	۱۶	۲۹۷۹	۱۵۰۰ متر	
-۰.۳۷	۱۴.۱۴	-۵.۱۹	۱۴.۱۴	۵.۱۹	۰.۲۴	۰.۰۰	۱۸	۳۲۳۹	۲۰۰۰ متر	
۲.۷۳	۰.۶۴	۱.۷۴	۰.۲۶	-۰.۱۵	۰.۵۸	۱.۵۹	۳	۱۴۸	۹۰٪	Cu
۲.۱۰	۰.۵۳	۱.۱۱	۰.۲۸	-۰.۲۱	۰.۴۵	۰.۹۰	۵	۴۸۵	۸۰٪	
۰.۶۱	۱.۰۳	۰.۶۳	۱.۰۰	-۰.۵۸	۰.۲۴	۰.۰۵	۱۷	۳۸۵۹	۷۰٪	
-۰.۳۹	۱۴.۱۴	-۵.۴۷	۱۴.۱۴	۵.۴۷	۰.۲۴	۰.۰۰	۱۸	۴۲۸۳	۶۰٪	
۱.۳۸	۱.۰۴	۱.۴۳	۰.۲۵	-۰.۰۵	۱.۰۱	۱.۳۹	۱	۶۵۳۸	۹۰٪	Mo
۲.۵۹	۰.۶۴	۱.۶۶	۰.۲۷	-۰.۱۵	۰.۵۸	۱.۵۰	۳	۱۷۵.۰۶	۸۰٪	
۱.۲۲	۰.۶۴	۰.۷۸	۰.۲۷	-۰.۱۰	۰.۵۸	۰.۶۸	۳	۳۹۵.۸۱	۷۰٪	
۱.۸۳	۰.۵۱	۰.۹۳	۰.۳۰	-۰.۲۴	۰.۴۱	۰.۶۹	۶	۷۸۲.۲۵	۶۰٪	Pb×Zn/Cu×Mo
۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰	۸	کلاس ۴	
۲.۱۱	۱.۰۳	۲.۱۷	۱.۰۰	-۱.۸۰	۰.۲۵	۰.۳۸	۱۶	۲۸۴۶	کلاس ۳	
۰.۶۳	۱.۰۰	۶.۳۵	۱.۰۰	-۶.۰۶	۰.۲۴	۰.۲۹	۱۷	۳۳۰.۲	کلاس ۲	
-۰.۳۹	۱۴.۱۴	-۵.۵۵	۱۴.۱۴	۵.۵۵	۰.۲۴	۰.۰۰	۱۷	۴۴۰.۴	کلاس ۱	آلتراسیون
-۲.۹۹	۰.۵۷	-۱.۷۱	۰.۵۱	۱.۵۱	۰.۲۷	-۰.۲۰	۱۴	۳۸۷.۰	وجود دارد	
۲.۹۹	۰.۵۷	۱.۷۱	۰.۲۷	-۰.۲۰	۰.۵۱	۱.۵۱	۴	۲۰.۴	وجود ندارد	

H: وزن آلتراسیون هیدروترمال، D: توف داسیت تا ریوداسیت، B: جریان‌های لاوای بازالتی، Gr: گرانیت، A: جریان‌های لاوای آندزیت بازالتی، Ns: نفلین سینیت، V: برش ولکانیکی، توف و برش توفی، G: گابرو.

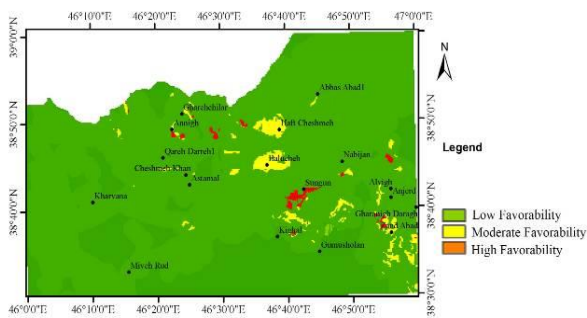
سونگون در اولویت اول منطقه و هفت چشمه در اولویت دوم قرار گرفته است.

برای برطرف کردن نواقص مدل پتانسیل معدنی و عدم توانایی در تشخیص کانی‌سازی پنهان از پراکنده با توجه به تجربه استفاده از شاخص زونالیته در منطقه کرمان [۲۹]، از شاخص زونالیته $(Pb \times Zn) / (Cu \times Mo)$ که برای مس پورفیری اهمیت دارد استفاده و نقشه پتانسیل با لایه‌های زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی و زونالیته ژئوشیمی مشابه نقشه قبل با روش لوجستیک رگرسیون تولید می‌شود (شکل ۸).

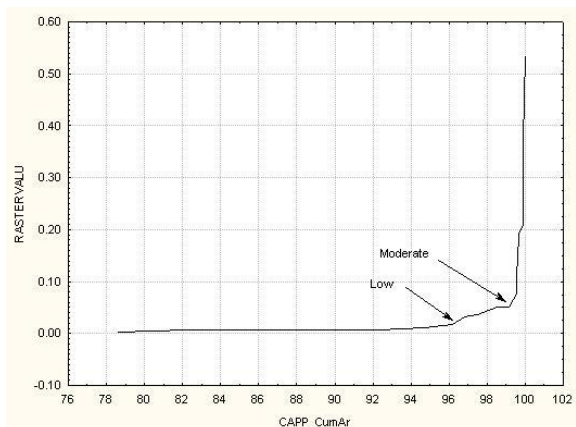
برای کلاسه‌بندی و تفکیک مناطق پرتانسیل از کم پتانسیل از نمودار تجمعی مساحت شکل ۷ استفاده شده است. در این نقشه میزان حداکثری احتمال متاخر در حدود ۵۴ درصد است و در حدود ۵ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به عنوان مناطق پتانسیل‌دار انتخاب شده است. همچنین اندیس آستامال که کانی‌سازی پراکنده دارد در این نقشه به عنوان منطقه پرتانسیل معرفی شده که با توجه به حفاری‌های گذشته از نظر مس پورفیری کانی‌سازی پنهان نداشته است. همچنین بلوچی و چشمه خان به همراه معدن



شکل ۶: نمودار تجمعی مساحت مربوط به شکل ۶



شکل ۸: مدل پتانسیل معدنی حاصل از چهار لایه زمین‌شناسی، ساختاری، دگرسانی و ژئوشیمی زونالیته



شکل ۹: نمودار تجمعی مساحت مربوط به شکل ۸

برای کلاسه‌بندی و تفکیک مناطق پرتانسیل از کم‌پتانسیل از نمودار تجمعی مساحت شکل ۹ (مشابه نقشه پتانسیل اول) استفاده شده است. مطابق نقشه کلاسه‌بندی شده شکل ۸ و نمودار تجمعی مساحت، میزان حداکثری احتمال متاخر در حدود ۵۱ درصد است و در حدود ۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به عنوان مناطق پتانسیل دار انتخاب شده است. همچنین منطقه آستمال که کانی‌سازی پراکنده دارد در این نقشه به عنوان منطقه کم‌پتانسیل و اولویت اول در این مدل منطقه حد فاصل سونگون و کیقال معرفی شده است. هفت چشمه و پلوچی در اولویت دوم قرار دارند. مدل پتانسیل معدنی تولید شده با لایه شاهد زونالیته با واقعیت منطقه اکتشاف شده همخوانی بیشتری دارد. در این نقشه آستمال اهمیت کمی دارد و معدن فعال سونگون حد فاصل کیقال مهم‌ترین بخش تاثیرگذار این نقشه است (شکل ۸).

۴-۱- ارزیابی و مقایسه مدل‌های پتانسیل معدنی

بر طبق مدل پتانسیل معدنی تهیه شده با عناصر ردیاب، زمین‌شناسی، ساختاری و دگرسانی شکل ۶ معدن سونگون که دارای کانی‌سازی پنهان و آستمال که دارای کانی‌سازی پراکنده است در مدل پتانسیل معدنی هر دو اهمیت بالایی دارند. بر این اساس برای بهبود بخشیدن به مدل پتانسیل معدنی نقشه شاهد ژئوشیمی زونالیته $(Pb \times Zn)/(Cu \times Mo)$ به جای نقشه عناصر ژئوشیمی مورد استفاده قرار گرفت و نقشه پتانسیل که در شکل ۸ قابل مشاهده است تولید شد که در این نقشه سونگون در اولویت اول و مناطقی مانند هفت چشمه و پلوچی در اولویت دوم و آستمال با کانی‌سازی پراکنده در مناطق کم اهمیت قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده نقشه پتانسیل تولید شده با روش زونالیته اعتبار بیشتری داشته، اگر چه مساحت کمتری از منطقه را مستعد معرفی کرده است، که با توجه به کم بودن اندیس‌ها پیشنهاد می‌شود از روش‌های جدید مانند جنگل‌های تصادفی^۳ برای تهیه مدل پتانسیل معدنی استفاده شود.

۵- نتیجه‌گیری

الگوی زونالیته در بسیاری از معادن و مناطق دنیا انجام شده است و نتایج به دست آمده از این روش دارای دقت بالا و در ارتباط هاله‌های اولیه ماده معدنی است. نقشه شاهد

- district, NW Iran". Ore Geology Reviews, 92: 97-112.
- [7] Xiang, J., Xiao, K., Carranza, E. J. M., Chen, J., and Li, S. (2020). "3D mineral prospectivity mapping with random forests: A case study of Tongling, Anhui, China". Natural Resources Research, 29(1): 395-414.
- [8] Kou, G. Y., Xu, B., Zhou, Y., Zheng, Y. C., Hou, Z. Q., Zhou, L. M., Zhang, Y. F., and Yu, J. X. (2021). "Geology and petrogenesis of the Sungun deposits: Implications for the genesis of porphyry-type mineralisation in the NW Urumieh-Dokhtar magmatic Arc, Iran". Ore Geology Reviews, 131: 104013.
- [9] Zhang, S., Carranza, E. J. M., Xiao, K., Wei, H., Yang, F., Chen, Z., Li, N., and Xiang, J. (2022). "Mineral prospectivity mapping based on isolation forest and random forest: Implication for the existence of spatial signature of mineralization in outliers". Natural Resources Research, 31(4): 1981-1999. DOI: 10.1007/s11053-021-09872-y.
- [10] Carranza, E. J. M., and Laborde, A. G. (2015). "Random Forest predictive modeling of mineral prospectivity with small numbers of prospects and data with missing values". Computers & Geosciences, 74: 60-70.
- [۱۱] نیک‌فرجام، م.، هزارخانی، ا.، پازند، ک.؛ ۱۳۹۷؛ "کاربرد روش میانگین هندسی در تلفیق لایه‌های اطلاعاتی ژئوشیمیایی برای تولید نقشه شاهد ژئوشیمی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره سوم، شماره ۱، ص ۱۱-۱.
- [۱۲] دایا، ع. ا.، مرادی، ر.؛ ۱۳۹۷؛ "مقایسه مدل‌های فرکتالی عبار-تعداد C-N و عبار-مساحت C-A در جداسازی بیهنجاریهای ژئوشیمیایی از زمینه در برکه یکصد هزار سیه رود، شمال غرب ایران". نشریه علمی-پژوهشی روشهای تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۱۶، ص ۹۴-۸۷.
- [۱۳] مهرپرتو، م.، امینی فضل، آ.، رادفر، ج.؛ ۱۳۷۱؛ "نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان". سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- [14] Mehrparto, M. (1997). "Geological Quadrangle Map of Siahrood, 1:100000". Geological Survey of Iran. (In Persian).
- [۱۵] آقانیاتی، س. ع.؛ ۱۳۸۳؛ "زمین شناسی ایران". نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [16] Zürcher, L., Bookstrom, A., Hammarstrom, J. M., Mars, J. C., Ludington, S., Zientek, M. L., Dunlap, P., and Wallis, J. C. (2014). "Porphyry copper assessment of the Tethys region of western and southern Asia". U.S. Geological Survey Scientific Investigations, Report 2010-5090-v, pp. 232. DOI:10.3133/sir20105090V.
- [۱۷] محمدزاده، م. ج.، شهین فر، ح.، ناصری، آ.؛ ۱۳۹۰؛ "توصیف زمین‌شناسی، ساختاری و دگرسانی، مناطق با پتانسیل و سطح از فرسایش را به خوبی نمایان نمی‌سازند و نیاز به لایه‌های با جزییات بهتر و بدون وابستگی به عوامل محدودکننده دارند. الگوی زونالیت‌ها با بررسی هاله‌های عناصر در سطح‌های مختلف کانی‌سازی، بدون وابستگی به دگرسانی‌ها و واحدهای سنگی و دیگر عوامل محدود کننده، به خوبی سطح از فرسایش و مناطق با پتانسیل را نمایان می‌کند و اضافه کردن این شاخص و نتایج به دست آمده از آن مدل پتانسیل معدنی را تکمیل کرده و مناطق با پتانسیل را با دقت بهتری نمایان می‌سازد. در این مقاله برای بررسی بیشتر، برکه‌های ورزقان و سیه‌رود مورد مطالعه قرار گرفت و دو مدل پتانسیل معدنی با روش داده محور تهیه شد. در مدل اولیه که از شاخص زونالیت‌ها در تلفیق استفاده نشد، منطقه سونگون که دارای کانی‌سازی پنهان و آستامال که دارای کانی‌سازی پراکنده است، جز مناطق پرتانسیل معرفی شده‌اند اما در مدل تلفیق شده با استفاده از شاخص زونالیت‌ها منطقه آستامال پرتانسیل معرفی نشده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از شاخص زونالیت‌ها برای هدایت فعالیت‌های اکتشافی ذخایر مس پورفیری در منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر است.
- ## ۶- مراجع
- [1] Jamali, H., and Mehrabi, B. (2014). "Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt". Ore Geology Reviews, 65: 497-501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.017>.
- [2] Chung, C. F., and Agterberg, F. P. (1980). "Regression models for estimating mineral resources from geological map data". Mathematical Geology, 12: 473-488.
- [3] Bonham-Carter, G. F. (1994). "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS". Computer Methods in the Geosciences, 13: pp. 398.
- [4] Carranza, E. J. M. (2014). "Data-driven evidential belief modeling of mineral potential using few prospects and evidence with missing values". Natural Resources Research, 24: 291-304.
- [5] Zuo, R., and Carranza, E. J. M. (2011). "Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity". Computers Geosciences, 37: 1967-1975.
- [6] Parsa, M., Maghsoudi, A., and Yousefi, M. (2018). "Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan

- methods for porphyry copper deposit in Sungun, NW Iran*". M.Sc. Thesis, Moscow State University, Moscow.
- [27] Ziaii, M., Pouyan, A. A., and Ziaei, M. (2009). "Neuro-fuzzy modelling in mining geochemistry: identification of geochemical anomalies". *Journal of Geochemical Exploration*, 100(1): 25-36.
- [28] Solovov, A. P. (Ed.), (1990). "Handbook on geochemical prospecting for useful minerals". Nedra Publishing House, Moscow, pp. 336.
- [29] Ziaii, M., Carranza, E. J. M., and Ziaei, M. (2011). "Application of geochemical zonal coefficients in mineral prospectivity mapping". *Computers & geosciences*, 37(12): 1935-1945.
- [30] Palomera, R. P. (2004). "Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems for Mineral Predictive Mapping, Deseado Massif, Southern Argentina". M.Sc. Thesis, International Institute for Geo-Formation Science and Earth Observation Enschede, the Netherlands.
- [31] Carranza, E. J. M. (2008). "Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS". *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 11: pp 351.
- [32] Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., and Wright, D. F. (1990). "Statistical pattern integration for mineral exploration". In: Gaa', I. G., Merriam, D. F. (Eds.), *Computer Applications in Resource Estimation*. Pergamon Press, Oxford, 1-21.
- [33] Agterberg, F. P., and Cheng, Q. (2002). "Conditional independence test for weights-of-evidence modeling". *Natural Resources Research*, 11: 249-255.
- الگوهای ژئوشیمیایی با استفاده از روش های تحلیل مؤلفه اصلی و کلاستر فازی میانمرکز (FCMC) برای ثبت بیهنجاری های ضعیف (منطقه قولان - آذربایجان شرقی)". *نشریه علوم زمین*، سال بیست و یکم، شماره ۸۱، ص ۱۵۰-۱۴۳.
- [18] Beus, A. A., and Grigorian, S. V. (1977). "Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits". Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois, pp. 287.
- [19] Solovov, A. P. (1987). "Geochemical prospecting for mineral deposits". In: Kuznetsov, V. V. (Trans.), Engl. (Ed.), Mir, Moscow, pp. 288.
- [20] Agterberg, F. P. (1994). "Fractals, multifractals and change of support". In: Dimitrakopoulos, R. (Ed.), *Geostatistics for the next century*, Dordrecht: Kluwer, 223-234.
- [21] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109-130.
- [22] Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., Esfandiari, B., and Fadakar Alghalandis, Y. (2010). "Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran". *Journal of Geochemical Exploration*, 104: 34-46.
- [23] Agterberg, F.P. (2012). "Multifractals and geostatistics". *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 13-122.
- [24] Cheng, Q. (2006). "GIS based fractal/multifractal anomaly analysis for modeling and prediction of mineralization and mineral deposits". In: Harris, J. R. (Ed.), *GIS for the Earth Sciences*, St. Johns, Newfoundland: Geological Association of Canada, 285-296.
- [25] Hassanpour, Sh., and Afzal, P. (2013). "Application of concentration-number (C-N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 957-970.
- [26] Ziaii, M. (1996). "Litho-geochemical exploration

¹ Prior Probability

² Posterior Probability

³ Random Forest