



Research Article

Integration of geological data and Sentinel-2A and ASTER satellite images for the exploration of Pb-Zn deposits in the Saqez geological sheet

Mohamad Amin Jafari*¹ , Hamed Kachar², Ali Zeinali³, Alireza Zarasvandi¹

1-Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3-Department of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 17 Apr 2023 Accepted: 06 Feb 2024

Extended Abstract

Introduction

Modeling mineral potential based on the precise collection and processing of geological, geophysical, and satellite data enables us to predict the potential presence of mineral substances in a specific area. This process involves constructing complex mathematical models that, utilizing machine learning algorithms and thorough data analysis, assist authorities and decision-makers in the mining sector. It helps identify mineral-rich zones for optimal extraction and manage land resources in the best possible way. Given the diverse geological units present in the Saqez sheet, this sheet is considered one of the most promising areas for the formation of metallic deposits. The host rock for most Pb-Zn deposits in Iran is sedimentary, known as Sedimentary-Hosted Pb-Zn deposits. According to conducted surveys, it has been determined that the Pb-Zn mineralization occurring in the Saqez sheet is also of this type. Typically, calcite, dolomite, shale, sandstone, and igneous rocks serve as hosts for these deposits.

Materials and Methods

In this research, the exploratory layers of lithology, dolomite alteration, and geochemical of Pb-Zn were used to prepare a map of the prediction of Pb-Zn mineralization in the turpentine sheet. Utilizing the singularity technique on sediments stream, using various exploratory layers performing laboratory spectroscopy, and applying the spectral behavior curves obtained on Sentinel-2A images in this innovative and creative research. It shows its existence compared to another similar research. After fuzzification of exploration layers in GIS software, the prediction map of Pb-Zn mineralization was obtained by Fuzzy-Gamma function and gamma value of 0.85. The results of XRF and ICP-MS analysis on the discovered Pb-Zn samples showed a grade between 3 and 7%, which indicates the correct selection of the studied area and the exploratory layers and their correct integration.

Citation: Jafari, M.A. et al, 2024. Integration of geological data and Sentinel-2A and ASTER satellite images for the exploration, *Res. Earth. Sci.* 15(2), (112-128) DOI: 10.48308/esrj.2024.104492

* Corresponding author E-mail address: Ma-Jafari@stu.scu.ac.ir





Further, by conducting laboratory spectroscopy in a dark room with a halogen lamp and obtaining the spectral behavior curve of the sphalerite mineral related to the samples of the study area, the SAM matching algorithm was applied to the Sentinel-2A satellite images.

Results and Discussion

According to the Pb-Zn mineralization prediction map of the Saqez sheet, this map is classified into four categories of low, moderate, high, and extreme mineralization potential. It is evident from this map that the northern, central, and southeastern regions have the highest potential for Pb-Zn mineralization. Upon examining the topography and road identification of the Saqez sheet, six areas were selected for exploratory drilling of Pb-Zn. Samples were collected for analysis and validation of identified points. XRF and ICP-MS analysis results indicated that the total Pb-Zn content ranged from 2 to 7% and 70,000 to 20,000 ppm. Finally, high-grade Pb-Zn samples were selected for petrographic examination. Petrographic studies revealed that minerals such as sphalerite, galena, and pyrite were predominant in the collected samples, with their texture filling the pore spaces. Specifically, sphalerite replaced galena, and galena replaced pyrite.

The results obtained from laboratory spectral analysis and the application of spectral behavior curves for sphalerite minerals on Sentinel-2A satellite images were utilized to assess the accuracy of the work and identify promising new mineralized areas. By comparing the corrected spectra from the laboratory experiments with the USGS spectral library, it was determined that the obtained spectral behavior is similar to the USGS spectral library. Therefore, the predictive map of Pb-Zn mineralization resulting from the application of spectral behavior curves for sphalerite on Sentinel-2A satellite images indicates the correct selection of imagery, appropriate spectral analysis, and all processing steps.

Conclusion

Due to the fact that the host rocks of most Pb-Zn deposits in Iran are of sedimentary origin, the first step in modeling the mineral potential of these deposits is to accurately recognize the ore deposit type. Based on the evidence and samples observed in the study area, the ore deposit type in the study area can be considered as the Irish type. Therefore, based on this, modeling and prediction of Pb-Zn mineralization on the one hundred thousand scale map of Saqez were carried out according to the Irish type Pb-Zn mineralization.

After evaluating the Pb-Zn mineral potential map, seven final areas were selected for exploration. Based on the exploration conducted in six areas (S1, S2, P, Q-Pb-Zn, Polygon12, and Polygon13), samples containing Pb-Zn mineralization were discovered, while Polygon5 was identified as lacking Pb-Zn mineralization, indicating the reliability of the exploration layers and integration method. XRF and Aqua Regia analysis results showed that the discovered Pb-Zn samples had grades ranging from two to seven percent, indicating economic-grade content for these metals.

Keywords: Pb-Zn exploration, Singularity, Spectroscopy, Sentinel-2A, Saqez.



تلفیق داده‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A و ASTER برای

اکتشاف ذخایر سرب و روی در ورقه سقز

محمد امین جعفری*^۱، حامد کاچار^۲، علی زینالی^۳، علیرضا زراسوندی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

تهران، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

چکیده گسترده

مقدمه

مدل‌سازی پتانسیل معدنی براساس جمع‌آوری و پردازش دقیق داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌فیزیکی و ماهواره‌ای، این امکان را فراهم می‌کند تا پتانسیل وجود ماده معدنی در یک منطقه خاص را پیش‌بینی کنیم. این فرآیند شامل ساخت مدل‌های ریاضی پیچیده است که با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تجزیه و تحلیل دقیق داده‌ها، به به مسئولان و تصمیم‌گیران در زمینه استخراج معدنی کمک می‌کنند تا مناطق مستعد کانه‌زایی برای بهره‌برداری بهینه را تعیین کنند و منابع زمین را به بهترین شکل مدیریت کنند. با توجه به واحدهای زمین‌شناسی متنوع موجود در ورقه سقز این ورقه یکی از با پتانسیل‌ترین مناطق برای تشکیل ذخایر فلزی می‌باشد. سنگ میزبان اکثر کانسارهای سرب و روی موجود در ایران رسوبی می‌باشد که با عنوان کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی (Sedimentary-Hosted) شناخته می‌شوند. طبق بررسی‌های صورت گرفته نیز مشخص شد کانه‌زایی سرب و روی صورت گرفته در ورقه یکصد هزار سقر نیز از این نوع می‌باشد که عموماً کلسیت، دولومیت، شیل، ماسه‌سنگ و سنگ‌های آذرآواری میزبان این ذخایر می‌باشند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از لایه‌های اکتشافی لیتولوژی، دگرسانی دولومیتی، ژئوشیمی سرب و روی برای تهیه نقشه پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی در ورقه سقز استفاده شد. بهره‌گیری از تکنیک سینگولاریتی بر روی رسوبات آبراه‌های سرب و روی، استفاده از لایه‌های اکتشافی متنوع و انجام طیف‌سنجی آزمایشگاهی و اعمال منحنی‌های رفتار طیفی به دست آمده بر روی تصاویر Sentinel-2A در این پژوهش نوآوری و خلاقانه بودن آن را نسبت به سایر پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد. پس از فازی‌سازی لایه‌های اکتشافی در نرم‌افزار GIS نقشه پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی توسط تابع Fuzzy-Gamma و مقدار گامای ۰/۸۵ بدست آمد. نتایج حاصل از تجزیه XRF و ICP-MS بر روی نمونه‌های سرب و روی کشف‌شده عیار بین ۳ تا ۷٪ را نشان داد که بیانگر انتخاب درست منطقه مورد مطالعه و لایه‌های اکتشافی و تلفیق صحیح آن‌ها می‌باشد.

استناد: جعفری، م.ا. و همکاران، ۱۴۰۳. تلفیق داده‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A و ASTER، پژوهشهای

دانش زمین: ۱۵(۲)، (۱۲۸-۱۱۲)، DOI: 10.48308/esrj.2024.104492

E-mail: Ma-Jafari@stu.scu.ac.ir

* نویسنده مسئول:



در ادامه با انجام طیف سنجی آزمایشگاهی در اتاق تاریک با لامپ هالوژن و دستیابی به منحنی رفتار طیفی کانی اسفالریت مربوط به نمونه‌های منطقه مورد مطالعه، الگوریتم تطابق سنجی SAM روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A، اعمال شد.

نتایج و بحث

طبق پی‌جویی‌های صورت گرفته در ۶ محدوده S1، S2، P، S1، Q-Pb-Zn، Polygon12 و Polygon13 نمونه‌های حاوی کانه‌زایی سرب و روی کشف شد و فقط محدوده Polygon5 فاقد کانه‌زایی سرب و روی تشخیص داده شد که نشانگر قابل اعتماد بودن لایه‌های اکتشافی و روش تلفیق می‌باشد. نتایج آنالیز XRF و Aqua Regia نشان داد که نمونه‌های حاوی سرب و روی کشف شده عیاری بین ۲ تا ۷ درصد داشته که مشخص کننده عیار اقتصادی برای این فلزات می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از انجام طیف‌سنجی آزمایشگاهی و اعمال منحنی‌های رفتار طیفی کانی اسفالریت بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A به نوعی برای بررسی دقت کار و شناسایی نواحی امیدبخش معدنی جدید استفاده شد. با مقایسه طیف‌های اصلاح شده بر روی تصاویر Sentinel-2A بدست آمده از آزمایشگاه با کتابخانه USGS مشخص شد رفتار طیفی بدست آمده مشابه کتابخانه طیفی USGS می‌باشد لذا نقشه پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی حاصل از اعمال منحنی رفتار طیفی اسفالریت بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A بیانگر روش درست انتخاب تصویر، طیف‌سنجی مناسب و تمامی پردازش‌ها می‌باشد.

واژگان کلیدی: اکتشاف سرب و روی، سینگلاریتی، طیف سنجی، Sentinel-2A، سقر.

مقدمه

وزن‌های ورودی هستند که توسط کارشناس تعیین می‌شوند و اهمیت هر نقشه شاهد را نشان می‌دهند (Saaty, 2016). این وزن‌ها در ارتباط با مدل اکتشافی مخصوصی هستند که از آن استفاده شده است. از جمله روش‌های مدل‌سازی دانش‌محور، روش منطق بولین، همپوشانی شاخص، منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Ahmadi et al, 2018) هستند. در فرآیند مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) به تصمیم‌گیرنده این اجازه داده می‌شود که یک درک کلی از هدف نهایی، جایگزین‌های ممکن خروجی‌های مختلف، معیارهای متفاوت و میزان عدم قطعیت داشته باشد (Zuo et al, 2021). به منظور تعیین عوامل مؤثر در کانه‌زایی عنصری خاص، باید ابتدا نوع مدل ذخیره معدنی مربوطه مشخص شود (Song et al, 2022). ذخیره‌های معدنی، می‌توانند به صورت مختلف گروه‌بندی یا طبقه‌بندی شوند، و این امر به ویژگی‌های آن‌ها بستگی دارد (Carvalho et al, 2021). هیچ دو ذخیره‌ای از یک نوع، به طور کامل یکسان نیستند؛ بعضی اوقات نیز یک دسته ممکن است محدوده‌ای از نوسان و تغییر را در بر داشته

برای تهیه نقشه مناطق معدنی مستعد (MPM) می‌توان از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده و لایه‌های اطلاعاتی را در محیط GIS گردآوری و مطالعه نمود (Yousefi et al, 2021). به‌طور کلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی هر ناحیه در GIS شامل سه مرحله است (Carranza, 2008): الف) ساختن پایگاه داده‌های فضایی، ب) پردازش داده‌ها؛ ج) تلفیق داده‌ها با یکدیگر. روش‌های زیادی برای تهیه نقشه پتانسیل‌یابی با استفاده از GIS وجود دارد که به‌طور شاخص شامل دو روش می‌شود (Hedayat, 2022): ۱) روش‌های مدل‌سازی متکی بر داده‌ها؛ ۲) روش‌های مدل‌سازی متکی بر دانش. در روش‌های مدل‌سازی داده‌محور، ارتباط‌های فضایی میان داده‌های ورودی و موقعیت نهشته‌های معدنی، اهمیت و وزن هر کدام از نقشه‌های شاهد را تعیین می‌کنند. از جمله روش‌های مدل‌سازی داده‌محور، روش‌های رگرسیون منطقی و وزن‌های نشانگر و شبکه‌های عصبی هستند (Zhang et al, 2015). روش‌های مدل‌سازی متکی بر دانش وابسته به

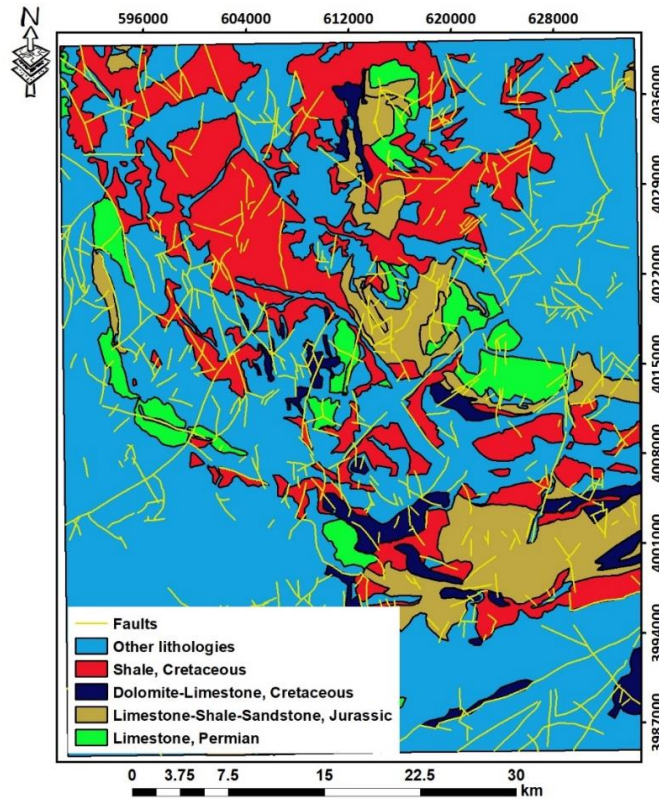
فلزی نوع گرمایی و اسکارن در این محدوده باشد. از نگاه ریخت‌شناسی مناطق میانی ورقه که به‌طور عمده از سنگ‌های آواری و آتشفشانی کرتاسه پدید آمده‌اند دارای توپوگرافی ملایم به صورت تپه‌های کم‌ارتفاع با سطوح فرسایش هموار است. بخش‌های آهکی و دولومیتی کرتاسه زیرین و الیگو-میوسن فرسایش خشن دارند و مناطق مرتفع را در بخش‌های شمالی، خاوری، جنوبی و جنوب‌غربی ورقه می‌پوشانند. توده گرانیتهی حسن سالاری نیز بخش‌هایی مرتفع و خشن را در جنوب ورقه تشکیل داده است. در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی ورقه که سنگ‌های دگرگونی قدیمی گسترش دارند بخش‌های شیستی توپوگرافی به نسبت خشن دارند ولی نهشته‌های شیلی سازمد کهر توپوگرافی ملایمی را به صورت تپه‌های کم-ارتفاع نشان می‌دهند. در این منطقه توده گرانیتهی G3 نیز توپوگرافی خشن‌تری را نسبت به سنگ‌های پیرامون نشان می‌دهد (شکل ۱). از نگاه ساختاری، محدوده ورقه سقز در حاشیه شمال غربی نوار دگرگونی سنندج-سیرجان و در حقیقت در محل تلاقی این پهنه با پهنه‌های ساختاری خوی-مهاباد و البرز-آذربایجان واقع شده است. لذا واحدهای مختلف سنگی موجود در این ورقه بعضاً خصوصیات پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان (سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین) را داشته و بعضاً نیز تشابهات لیتولوژیکی با پهنه البرز-آذربایجان (واحدهای کربناته آواری پرکامبرین-کامبرین زیرین، پالئوزوئیک و مزوزوئیک) نشان می‌دهند. نهشته‌های مربوط به پالئوزوئیک زیرین تا میانی (اردویسین تا کربونیفر) در منطقه رخنمون نداشته و نهشته‌های پرمین با مرز ناهمسان بر روی دولومیت‌های سازند میلا با واحدهای قدیمی‌تر جای می‌گیرند. نهشته‌های مربوط به دوران دوم با دولومیت‌های تریاس شروع و نهشته‌های مربوط به سرآغازهای کرتاسه در محدوده ورقه سقز حضوری چشم‌گیر دارند و اغلب دارای رخساره آواری و آتشفشانی هستند. سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و نهشته‌های آذرآواری وابسته به آن در یان منطقه رخنمون شایان توجهی ندارند، در حالی که نهشته‌های کربناته الیگومیوسن حضوری چشمگیر دارند و بیشتر ویژگی‌های پهنه البرز-آذربایجان را نشان می‌دهند (شکل ۱).

باشد (Roedder, 1971). مدل‌های ذخایر معدنی، برای تهیه و تدارک چهارچوب نظری و کاهش هزینه‌ها در مطالعات پتانسیل‌یابی معدنی به کمک GIS دارای اهمیت‌اند (Zuo et al, 2021). آن‌ها به انتخاب داده‌ها، مدل‌سازی و تصمیم‌گیری اینکه کدام موارد به عنوان شاهد استخراج گردند و همچنین برای تصمیم‌گیری نحوه وزن‌دار کردن اهمیت نسبی شواهد، در برآورد پتانسیل معدنی، کمک می‌کنند (Behera et al, 2019). معمولاً پی‌جویی ذخایر معدنی توسط سنجش از دور با شناسایی سنگ‌ها و کانی‌های شاخصی که مرتبط با ذخیره خاصی هستند، انجام می‌شود که در مقایسه با آنومالی‌های ژئوشیمیایی یا ژئوفیزیکی از آنها با عنوان آنومالی‌های لیتولوژیکی یاد می‌شود (Nwaila, 2022). سنجنده‌های سنجش از دور چندطیفی همانند Sentinel در مقایسه با تصاویر ASTER از توان تفکیک مکانی بالایی برخوردار هستند. این توانایی آنها را به ثبت اطلاعات مکانی دقیق‌تری از عارضه‌های سطح زمین قادر می‌سازد؛ به طوری که می‌تواند اختلافات کوچک طیفی را نیز ثبت کنند (Thakur et al, 2020). به همین دلیل در دهه اخیر تبدیل به ابزاری مهم برای بررسی سنگ‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهنده سطح زمین شده است (Peyghambari and Zhang, 2021). با توجه به مطالب ذکر شده در این مقاله با بهره‌گیری از داده‌های زمین‌شناسی و دورسنجی شامل: دگرسانی، لیتولوژی، ژئوشیمی و طیف‌سنجی به شناسایی کانه‌زایی سرب و روی، برای اولین بار در منطقه سقز پرداخته می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده ورقه سقز به علت قرارگیری بخش اعظم آن در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان دارای خصوصیات متالوژیکی این پهنه می‌باشد. در این منطقه نفوذ توده‌های گرانیته‌ی مربوط به زمان‌های پرکامبرین (G1)، مزوزوئیک (G2) و ترشیاری (G3) به داخل سنگ‌های دگرگونی قدیمی و نیز تکتونیک شدید و پوشش آواری-کربناته پالئوزوئیک می‌تواند نویدبخش کانی‌سازی‌های

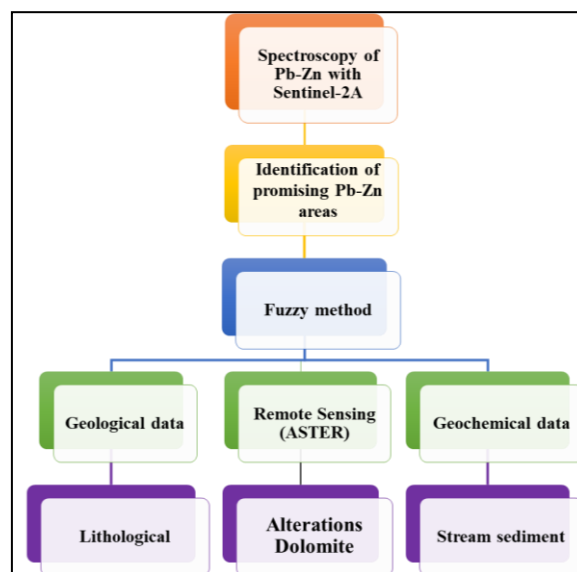


شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور پتانسیل‌یابی سرب و روی در ورقه سقز، لایه‌های اکتشافی پس از وزن‌دهی با یکدیگر تلفیق شد و مناطق کانه‌زایی سرب و روی پیش‌بینی شد. در نهایت پس از پی‌جویی‌های به عمل آمده و با کشف نمونه‌های

پرعیار حاوی سرب و روی، این نمونه‌ها در اتاق تاریک آزمایشگاه طیف سنجی مورد آزمایش قرار گرفتند و رفتار طیفی مربوط به کانی اسفالریت مشخص و برای پیاده‌سازی بر روی تصاویر Sentinel-2A از الگوریتم SAM استفاده شد. مراحل انجام پژوهش در فلوجارت زیر (شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: فلوجارت مراحل تهیه نقشه‌های پیش‌بینی سرب و روی.

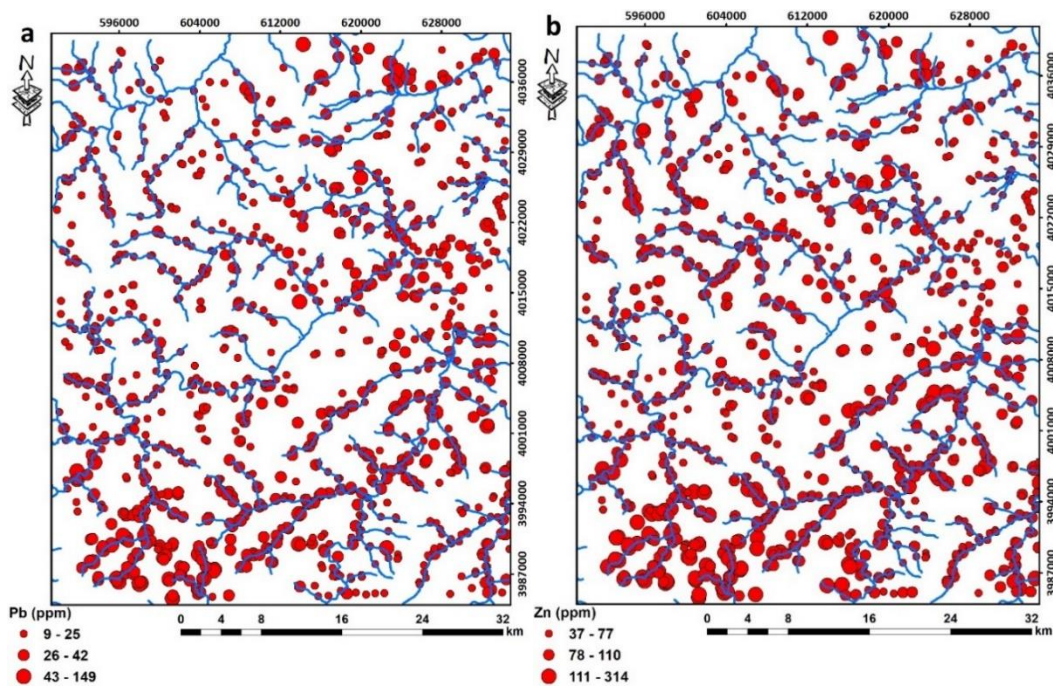


شکل ۳: دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده و انجام فرآیند طیف‌سنجی در اتاق تاریک.

تکنیک سینگولاریتی (Singularity)

در این مطالعه برای فراهم کردن لایه ژئوشیمی سرب و روی در ورقه سقز از نمونه رسوبات آبراهه‌ای با حد تشخیص

۰/۰۶ ppm برای فلز سرب و ۰/۰۸ ppm برای فلز روی که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور تهیه شده‌اند استفاده شده است (شکل ۴).



شکل ۴: موقعیت رسوبات آبراهه‌ای برداشت شده در ورقه سقز، a: فلز سرب، b: فلز روی.

لایه ژئوشیمی عنصر سرب و روی در ورقه سقز با استفاده از تکنیک سینگولاریتی (Singularity) به دست آمد. تکنیک سینگولاریتی قادر به تخمین زدن غلظت فلزات از طریق مشاهده پنجره‌های کوچک مجاور هم است. برای تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره‌ها (N_i) (به شکل مربع) برای اندازه‌گیری تراکم غلظت (C) حول یک

موقعیت خاص (Z_i) استفاده می‌شود (Nazarpour et al, 2022; Jafari et al, 2020). این روش آنومالی‌هایی که بین زمینه پنهان می‌شوند و به اصطلاح Weak Anomaly نامیده می‌شوند و همچنین از طریق وزن‌دهی به شیوه معکوس فاصله^۱ (IDW) مشخص نمی‌شوند را می‌تواند شناسایی کند (Jafari et al, 2021). مقدار

رابطه ۲)

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

عملگر فازی گاما (GAMMA)، ترکیبی از عملگر فازی حاصلضرب جبری (PRODUCT) و عملگر فازی حاصل جمع جبری (SUM) می‌باشد که در آن پارامتر γ (گاما) در محدود صفر تا یک انتخاب می‌گردد. 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)، مقدارهایی در خروجی به وجود می‌آورد که نقش فزآینده جمع جبری فازی و نقش کاهنده ضرب جبری فازی در آن عمل می‌کند و کل مجموعه را به حالت تعادل می‌رساند. این پارامتر مشخص میکند که رفتار واقعی عملگر، چگونه بین حالت AND و OR فازی تغییر کند روش‌های مبتنی بر منطق فازی معمولاً کلاس‌های حد وسط را در نظر نمی‌گیرند و تمام کلاس‌های یک لایه اکتشافی را بین ۰ (کم‌ترین کلاس) و ۱ (بیشترین کلاس) ارزش‌گذاری می‌کنند به همین علت مناطقی را که به عنوان آنومالی معرفی می‌کند گستردگی کم‌تری نسبت به سایر روش‌ها دارند (Jafari et al, 2021a, b).

تلفیق لایه‌های اکتشافی توسط روش منطق فازی

با ارزش‌گذاری مقادیر بین صفر و یک، مرحله فازی‌سازی داده‌ها انجام می‌گیرد. برای تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی معمولاً از توابع عضویت استفاده می‌شود. باید توجه داشت که پیش از فازی‌سازی داده‌ها، به منظور امکان تبدیل داده‌ها به صورت بدون واحد و استاندارد، با تغییر دامنه متغیرها به بازه صفر و یک، نرمال‌سازی داده‌ها انجام می‌گیرد. مدل‌سازی داده‌های فازی در GIS این امکان را فراهم می‌سازد که با استفاده از عملیات همپوشانی، تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره فازی را عملیاتی نمود

بحث و نتایج

لایه‌های اکتشافی

لینولوژی

سنگ میزبان اکثر کانسارهای سرب و روی موجود در ایران رسوبی می‌باشد که با عنوان کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی (Sedimentary-Hosted) شناخته

سینگولاریتی برای پنجره‌های کوچک مجاور هم براساس (رابطه ۱) بدست می‌آید (Liu and Carranza, 2022):

رابطه ۱)

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

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).

روش منطق فازی

تئوری منطق فازی به عنوان یک روش دانش محور برای اولین بار توسط زاده (Zadeh, 1965) پیشنهاد شده است. در بسیاری مواقع نمی‌توان در مورد بود یا نبود پدیده خاصی تصمیم‌گیری نمود و بنابراین یک مرز تدریجی وجود دارد. منطق فازی هم دارای عملگرهایی است که در تصمیم‌گیری‌ها از آنها استفاده می‌شود. این روش براساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد که در آن وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی بر مبنای اهمیت هر یک از لایه‌ها براساس قضاوت کارشناسان متخصص صورت می‌پذیرد (Hedayat et al, 2022). مبنای این روش به صورت تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های نرمال شده با محاسبه اوزان برای عضوهای فازی براساس 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 (Abdelkareem and Al-Arifi, 2021). در تئوری منطق فازی عضوهای فازی براساس فواصل معنادار از ویژگی‌های مختلف وزن‌دهی می‌شوند که برای هر پیکسل یا موقعیت مکانی، یک وزن به‌خصوص 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 ۲) بیان می‌شود مورد استفاده قرار گرفته است:

طبق نظر کارشناسان علوم زمین و بررسی نقشه زمین شناسی ورقه یکصد هزار سقز سنگ به ترتیب به علت مؤثر بودن در تشکیل کانسارهای سرب و روی مطابق جدول ۱ وزن تعلق گرفت.

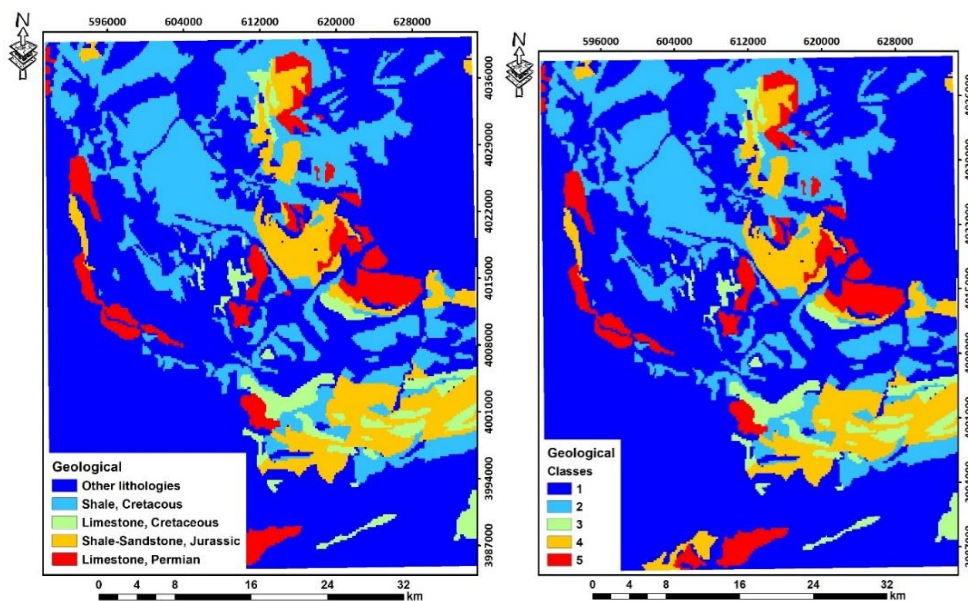
می‌شوند. عموماً کلسیت، دولومیت، شیل، ماسه‌سنگ و سنگ‌های آذرآاری میزبان ذخایر سرب و روی می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از سنگ آهک منطقه که کانه‌زایی سرب و روی در اتفاق افتاده نشان داده شده است. با توجه به اهمیت این واحدهای سنگی نام برده شده، در ورقه یکصد هزار سقز

جدول ۱: وزن‌دهی به واحدهای زمین‌شناسی برای شناسایی نواحی کانه‌زایی سرب و روی.

Lithologies	Classes
Other lithologies	1
Shale, Cretaceous	2
Dolomite-Limestone, Cretaceous	3
Limestone-Shale-Sandstone, Jurassic	4
Limestone, Permian	5



شکل ۵: واحد سنگی آهک پرمین و کانه‌زایی سرب و روی در ورقه سقز.

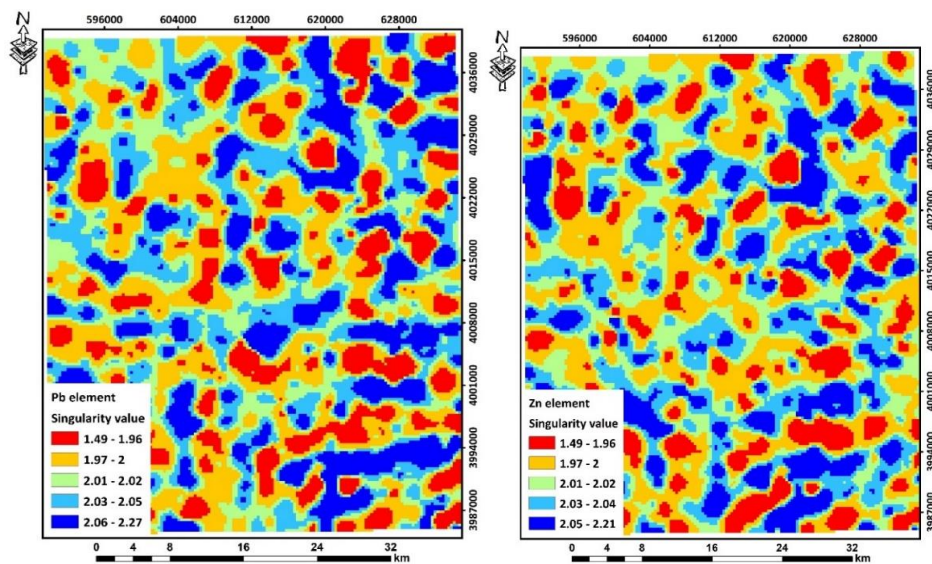


شکل ۶: نقشه اولیت‌بندی واحدهای زمین‌شناسی و کلاس‌بندی آن.

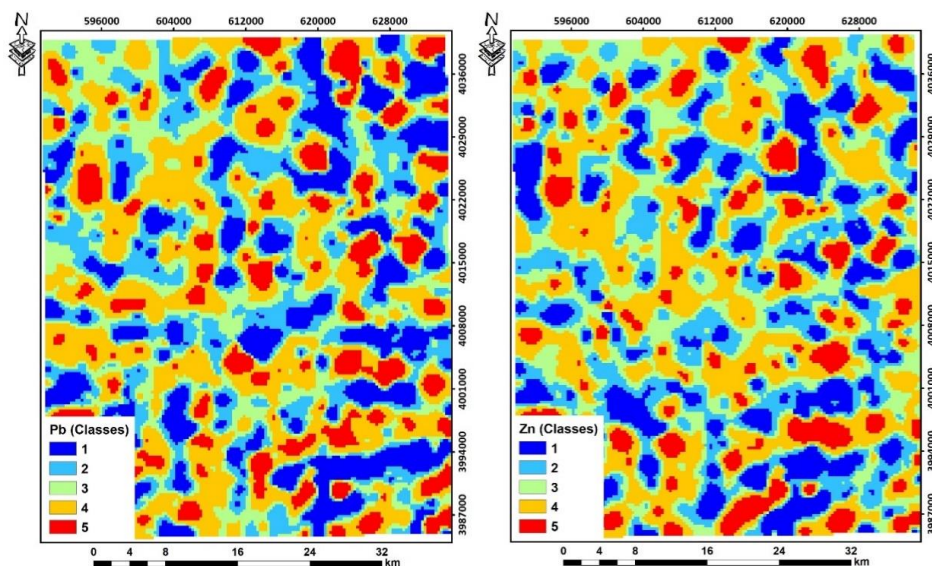
طبق مطالعات صورت گرفته از پنجره 19*19 به عنوان مناسب ترین پنجره جهت تعیین ضریب سینگولاریتی (α) و نقشه ژئوشیمی Pb-Zn استفاده شد. به این علت که در این پنجره سینگولاریتی در بهترین حالت ممکن قرار دارد و خوبی می‌تواند آنومالی‌های پنهان و ضعیف و همچنین آثار لیتولوژی بالادست در محدوده مورد مطالعه را شناسایی کند. براساس گفته چنگ حد آستانه معمول در روش سینگولاریتی $\alpha = 1/96$ می‌باشد (Cheng, 2007). کلاس بندی لایه زمین‌شیمیایی به ترتیب از کم به زیاد (۱ تا ۵) برای فلزات سرب و روی در نظر گرفته شده است (شکل ۷).

لایه ژئوشیمی

در روش شاخص سینگولاریتی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، سینگولاریتی یک ماتریس سطر با ستون برابر را ایجاد می‌کند و منطقه مورد مطالعه را به یک سری مربع های کوچک تقسیم‌بندی می‌کند سپس غلظت میانگین مربع‌ها را به عنوان غلظت تخمینی در نظر می‌گیرد (Jafari et al, 2020; et al, 2021b). در این 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. (Xiao et al, 2018; Borojerdnia et al, 2020). سپس عملیات میانگین متحرک برای اندازه پنجره-های 15*15، 17*17، 19*19، 21*21، 23*23 انجام شد.



شکل ۷: نقشه غنی‌شدگی فلزات سرب و روی براساس تکنیک سینگولاریتی.



شکل ۸: نقشه کلاس‌بندی فلزات سرب و روی و تهیه لایه‌های ژئوشیمیایی.

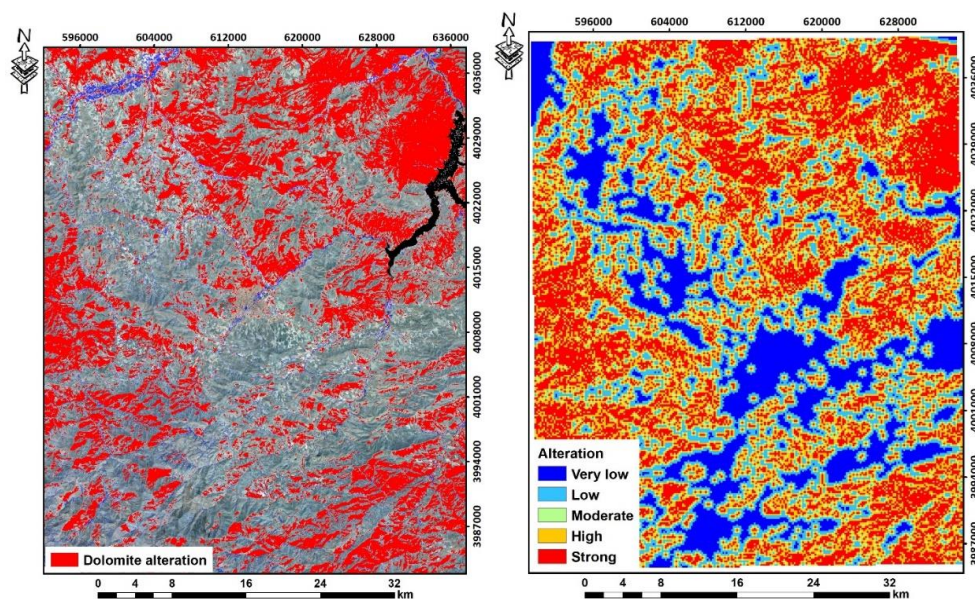
دگرسانی دولومیتی

در بسیاری از کنسارهای سرب و روی با سنگ میزبان کربناته که ارتباط مشخصی با منابع آذرین ندارند سنگ میزبان به عنوان تأمین کننده عناصر فلزی، نقش موثری در رخداد کانه‌زایی دارد. در این میان، دگرسانی دولومیتی^{۱۰} به عنوان یکی از کنترل کننده‌های اصلی کانی‌زایی در ذخایر فلزی پایه با سنگ میزبان رسوبی از قبیل MVT، SEDEX، ایرلندی و الپی گزارش شده است (Sass-Gustkiewicz et al, 1982). دگرسانی دولومیتی تغییراتی هستند که در اثر حرکت سیالات کانه‌ساز در سنگ دیواره دربرگیرنده به لحاظ خصوصیات ژئوشیمیایی (شیمی کانه‌ها و غلظت عناصر) و کانی‌شناسی (بافت، ساخت، دانه‌بندی و رنگ) ایجاد می‌شود. طبق شواهد رخداد دگرسانی در ذخایر یا

سنگ میزبان رسوبی اغلب همزمان یا کمی بعد از تکوین مراحل رخداد کانه‌زایی انجام می‌شود (Leach et al, 2005; Hossini-Dinani and Yazdi et al, 2021). در این مطالعه بهره‌گیری از نرم‌افزار ENVI تصاویر ASTER مورد پردازش گردید. در جدول ۲ مشخصات تصویر ASTER مورد استفاده در این مطالعه مشخص شده است. برای بارسازی دگرسانی دولومیتی از شاخص $(B6+B8)/(B7)$ استفاده شده است (Malainine et al, 2022). همانطور که در شکل ۹ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص است در قسمت‌های شمال شرقی و غربی منطقه مورد مطالعه دگرسانی دولومیتی گسترش بیشتری دارد. بنابراین با توجه به اهمیت لایه دگرسانی، وزن‌دهی این لایه از دگرسانی کم به قوی (۱ تا ۵) انجام گرفت.

جدول ۲: مشخصات تصویر ASTER مورد استفاده.

Image code	AST_L1T_00309062002075134_20150424203448_108287
Date of shooting	06/09/2002



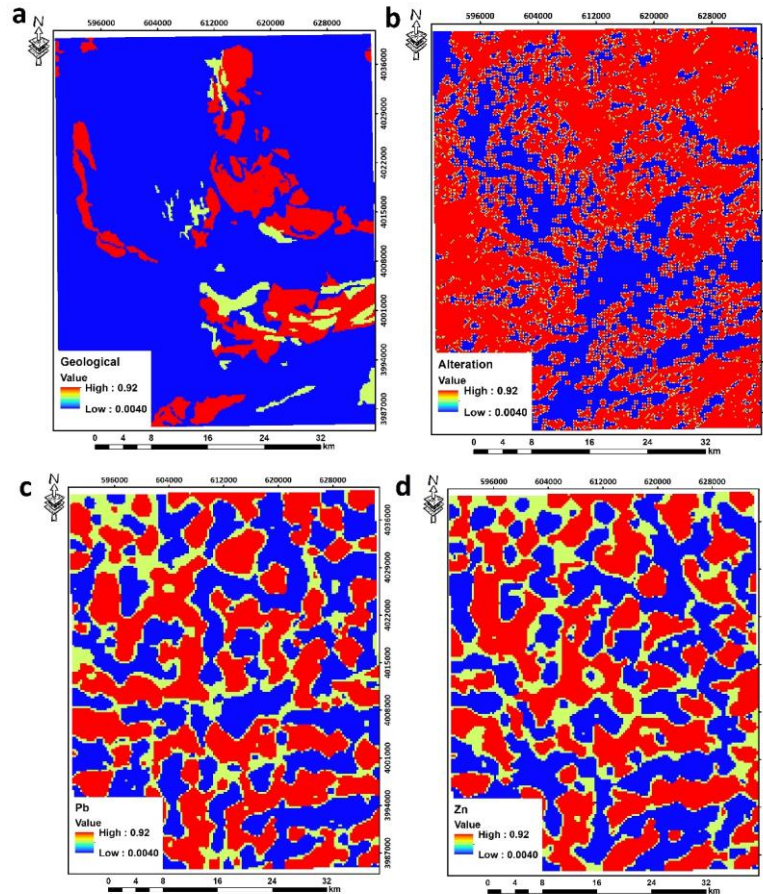
شکل ۹: نقشه دگرسانی دولومیتی و کلاس‌بندی آن.

شد اما با توجه به شناخت نسبی از منطقه مورد مطالعه و خروجی نقشه‌های نهایی با صلاح‌دید کارشناسان از تابع Large جهت تعیین دامنه‌ها استفاده و طبق این فرآیند عملیات فازی‌سازی بین صفر و یک بر روی نقشه‌ها انجام گرفته شد. در نهایت با استفاده از تابع Fuzzy-Gamma و مقدار گامای $\gamma=0/85$ ، لایه‌های اکتشافی با یکدیگر تلفیق و مطابق شکل ۱۱ نقشه پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی در ورقه سقز بدست آمد. مطابق این نقشه ورقه سقز به لحاظ

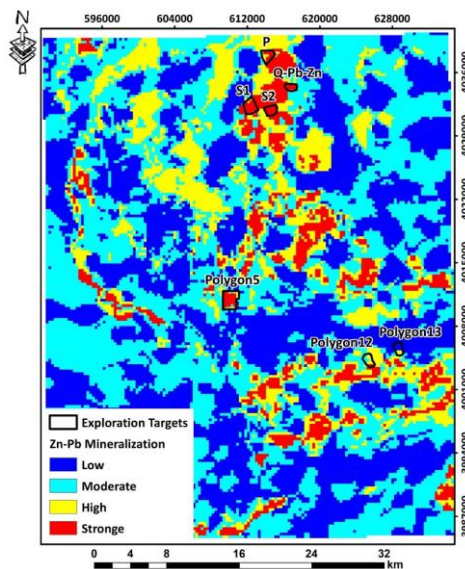
مطابق شکل ۱۰ نقشه‌های زمین‌شناسی (شکل ۱۰a)، دگرسانی دولومیتی (شکل ۱۰b)، ژئوشیمی سرب و روی (شکل ۱۰c,d) به کمک تابع عضویت Large در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 به پنج گروه پتانسیل شدید، بالا، متوسط، کم و بدون پتانسیل تعریف شد. تقسیم‌بندی و تعیین دامنه‌ها برای هر یک از توابع عضویت براساس شناخت از منطقه و مشورت با کارشناس مربوطه انجام گرفته به این معنی که از تمامی توابع دیگر همانند Small و ... استفاده

سرب و روی دارد. با توجه به بررسی ورقه سقز از لحاظ شناسایی راه‌ها و توپوگرافی، ۶ محدوده برای پی‌جویی اکتشافی سرب و روی انتخاب شد.

کانه‌زایی سرب و روی به ۴ گروه کانه‌زایی کم، متوسط، زیاد و شدید تقسیم‌بندی شده است که با مراجعه به شکل ۱۱ مشخص می‌شود نواحی شمالی، مرکزی و جنوب‌شرقی محدوده مورد مطالعه بیشترین پتانسیل را جهت کانه‌زایی



شکل ۱۰: لایه‌های اکتشافی فازی‌سازی شده. a: لیتولوژی، b: دگرسانی دولومیتی، c: ژئوشیمی سرب، d: ژئوشیمی روی.



شکل ۱۱: نقشه پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی در ورقه سقز.

ژئوشیمی و کانه‌نگاری سرب و روی

با توجه به نقشه نهایی پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی بدست آمده در ورقه سقز هفت محدوده برای پی‌جویی و بازدید صحرایی سرب و روی انتخاب شد. مطابق پی‌جویی‌های صورت گرفته از شش پلیگون مورد بررسی در تمامی مناطق به غیر از پلیگون ۵ نمونه‌های پرعیار سرب و روی کشف شد. نتایج پی‌جویی‌های به عمل آمده و دیدن نمونه‌ها به صورت چشمی نشان داد عیار روی بیشتر از سرب می‌باشد. برای پی بردن به عیار مناسب و اقتصادی فلزات سرب و روی از محدوده‌های مستعد کانه‌زایی با نام‌های اختصاری S1، S2، و P نمونه شاهد برداشت و برای آنالیز به آزمایشگاه ارسال شدند. در شکل ۱۲ نمونه‌های پرعیار سرب و روی کشف شده در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. به ترتیب در جدول ۲ نتایج آنالیز XRF^۳ و در جدول ۳ نتایج

آنالیز ICP-MS در نمونه‌های برداشت شده مشخص شده است. نتایج آنالیز XRF و ICP-MS نشان داد که مجموع سرب و روی‌ها بین ۲ تا ۷٪ و ۷۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ ppm می‌باشد که بیانگر: الف) اقتصادی بودن عیار نمونه‌های برداشتی، ب) بالاتر بودن عیار فلز روی نسبت به سرب در هر دو آزمایش انجام شده می‌باشد. این نتایج بیانگر انتخاب منطقه مورد مطالعه مناسب، روش صحیح تلفیق و انتخاب درست لایه‌های اکتشافی می‌باشد. در نهایت از نمونه‌های حاوی سرب و روی پرعیار برای بررسی پتروگرافی مقطع تهیه شد. مطابق که شکل ۱۳ کانی‌های اسفالریت، گالن و پیریت قابل رؤیت است نشان می‌دهد که بافت سنگ پرکننده فضای خالی می‌باشد یعنی اسفالریت جایگزین گالن و گالن جایگزین پیریت شده است.



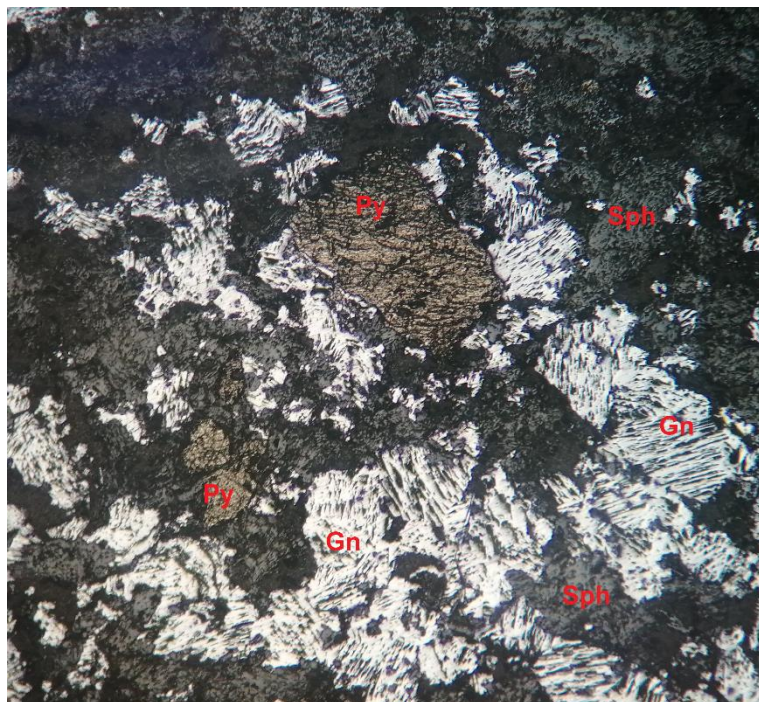
شکل ۱۲: نمونه‌های سرب و روی پرعیار و تأثیر محلول Zinczap بر روی واحدهای میزبان سرب و روی.

جدول ۳: نتایج XRF نمونه‌های سرب و روی.

Element (%)	SiO ₂	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Pb	Zn
S1-01	44.55	9.78	7.33	1.4	<	2.15	0.05	8.25	<	2.36
S2-03	71.97	1.79	2.4	0.67	0.07	0.21	<	1.97	2.74	4.54
S2-04	94.01	0.05	1.17	0.47	0.1	<	0.07	0.06	<	2

جدول ۴: نتایج ICP-MS نمونه‌های سرب و روی.

Element (ppm)	P	Pb	S	Sb	Sc	Th	V	Y	Yb	Zn
S1-01	197	1072	1477	11.8	<0.5	6.3	7	1	0.2	29283
S2-03	178	>3%	1506	60.1	<0.5	<5	21	1	<0.2	>3%
S2-04	143	2505	293	15.3	<0.5	<5	4	1	<0.2	18757
P	758	10388	2253	13.54	<0.5	<5	26	1.1	0.2	9298



شکل ۱۳: تصویر مربوط به مقطع صیقلی حاوی سرب و روی. Py: پیریت، Sph: اسفالریت، Gn: گالن.

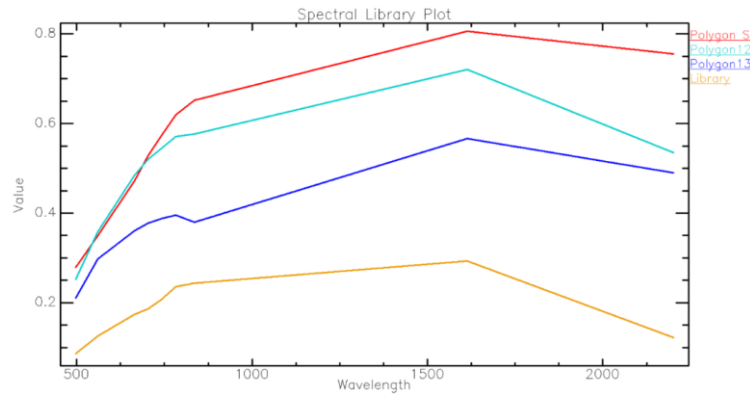
سرب در منطقه بود و پس از بررسی و مقایسه طیف‌های بدست آمده با نمودارهای طیفی USGS مشخص شد طیف‌های اندازه‌گیری شده مربوط به کانی اسفالریت می‌باشد. بنابراین از طیف این کانی برای طیف‌سنجی و شناسایی نواحی با آنومالی سرب و روی استفاده شد. با مقایسه نمودار منحنی‌های طیفی بدست آمده در آزمایشگاه با نمودارهای استاندارد USGS بر روی تصاویر Sentinel-2A می‌توان از نتایج رفتار طیفی بدست آمده مورد نظر اطمینان حاصل نمود (شکل ۱۴). نقشه نهایی پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی براساس الگوریتم SAM و طیف‌سنجی مطابق شکل ۱۵ بدست آمد که نشان دهنده کانه‌زایی سرب و روی در نواحی مرکزی و جنوب‌شرقی ورقه سقز می‌باشد. مطابق این الگوریتم علاوه بر نواحی جدید کشف شده، تمامی مناطق که در آن‌ها نمونه‌های پر عیار سرب و روی کشف شد به جز پلیگون P، توانسته به عنوان مناطق با آنومالی سرب و روی شناسایی نماید.

تحلیل و بررسی کانه‌زایی سرب و روی توسط طیف‌سنجی آزمایشگاهی

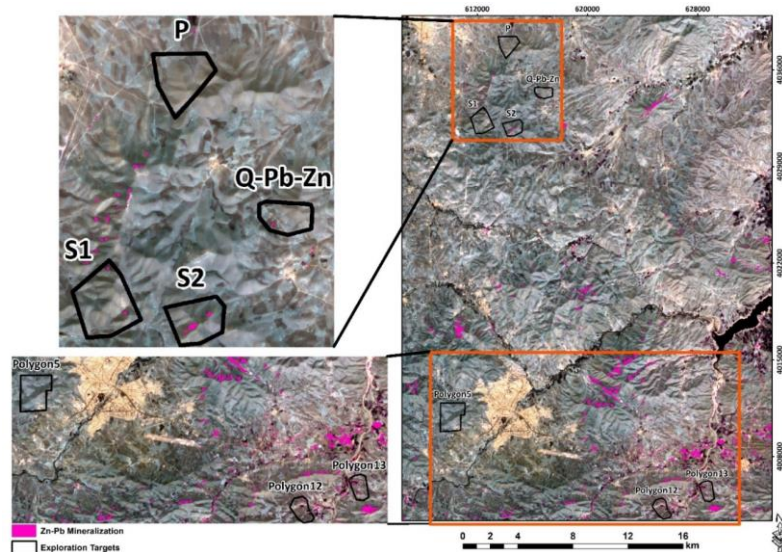
از نمونه‌های پر عیار سرب و روی پلیگون‌های ۵، ۱۲ و ۱۳ در آزمایشگاه طیف‌سنجی برای دست آوردن رفتار طیفی آن‌ها استفاده شد. در این مطالعه از طبقه‌بندی نظارت شده به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی^۴ (SAM) و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A برای شناسایی کانه‌زایی سرب و روی براساس رفتار طیفی استفاده شد. مشخصات تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2A در جدول ۵ مشخص شده است. الگوریتم SAM بدین صورت عمل می‌کند که نقشه‌برداری سریع پدیده‌ها را از طریق محاسبه شباهت طیفی بین بردار تصویر با داده‌های طیفی مرجع ممکن می‌سازد. این الگوریتم مشابهت بین دو طیف را به وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند. در این روش هر چه مقدار زاویه (بین ۰ تا ۱) کمتر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود (Jan and Sharma, 2019). با توجه به شواهد صحرایی و نتایج آنالیزها که نشان‌دهنده عیار بیشتر روی نسبت به

جدول ۵: مشخصات تصویر Sentinel-2A مورد استفاده.

Image code	S2A_MSIL1C_20220930T073721_N0400_R092_T38SPF_20220930T082824.SAFE
Date of shooting	30/09/2022



شکل ۱۴: مقایسه رفتار طیفی کانی اسفالریت با کتابخانه طیفی USGS براساس تابع پاسخ طیفی Sentinel-2A.



شکل ۱۵: شناسایی نواحی امیدبخش سرب و روی پس از اعمال الگوریتم SAM بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A.

نتیجه‌گیری

به علت آنکه اکثر ذخایر سرب و روی موجود در ایران از نوع رسوبی (سنگ میزبان) می‌باشد، بنابراین اولین گام در مدل‌سازی پتانسیل معدنی این ذخایر شناخت دقیق تیپ کانه‌زایی است. با توجه به شواهد و نمونه‌های دیده شده در منطقه مورد مطالعه می‌توان تیپ کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه را نوع Irish دانست. در ذخایر سرب و روی تیپ Irish کنترل‌کننده اصلی کانه‌زایی افق معدنی چینه‌شناسی و در اصلاح سنگ میزبان می‌باشد، از طرفی در این کانسارها اغلب ذخایر پیریتی بوده و در همه آنها شواهد خیلی واضح نهشته‌های سولفید و سولفات (اغلب پیریت، اسفالریت و باریت) در کف دریا، در شکستگی‌های کنترل شده گسلی و گسل‌های آهکی غنی از مواد ارگانیکی سنگ نشده وجود دارد. لذا بر همین اساس مدل‌سازی و پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی در ورقه یکصد هزار سقز طبق کانه‌زایی سرب

و روی تیپ Irish انجام گرفت. بهره‌گیری از تکنیک سینگولاریتی بر روی رسوبات آبراه‌های سرب و روی، استفاده از لایه‌های اکتشافی متنوع و انجام طیف‌سنجی آزمایشگاهی و اعمال منحنی‌های رفتار طیفی بدست آمده بر روی تصاویر Sentinel-2A در این پژوهش نوآوری و خلاقانه بودن آن را نسبت به سایر پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد. پس از بررسی نقشه پتانسیل معدنی سرب و روی در نهایت هفت محدوده برای پی‌جویی انتخاب شد. طبق پی‌جویی‌های صورت گرفته در شش محدوده P، S2، S1، Q-Pb-Zn، Polygon12 و Polygon13 نمونه‌های حاوی کانه‌زایی سرب و روی کشف شد و فقط محدوده Polygon5 فاقد کانه‌زایی سرب و روی تشخیص داده شد که نشانگر قابل اعتماد بودن لایه‌های اکتشافی و روش تلفیق می‌باشد. نتایج آنالیز XRF و Aqua Regia نشان داد که نمونه‌های حاوی سرب و روی کشف شده عیاری بین دو تا هفت درصد

از اعمال منحنی رفتار طیفی اسفالریت بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A بیانگر روش درست انتخاب تصویر، طیف‌سنجی مناسب و تمامی پردازش‌ها می‌باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده‌اند.

داشته که مشخص کننده عیار اقتصادی برای این فلزات می‌باشد. نتایج حاصل از انجام طیف‌سنجی آزمایشگاهی و اعمال منحنی‌های رفتار طیفی کانی اسفالریت بر روی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2A به نوعی برای بررسی دقت کار و شناسایی نواحی امیدبخش معدنی جدید استفاده شد. با مقایسه طیف‌های اصلاح‌شده بر روی تصاویر Sentinel-2A بدست آمده از آزمایشگاه با کتابخانه USGS مشخص شد رفتار طیفی بدست آمده مشابه کتابخانه طیفی USGS می‌باشد لذا نقشه پیش‌بینی کانه‌زایی سرب و روی حاصل

پانویس

- 1-Inverse Distance Weighting
- 2-Dolomitization alteration

- 3-X-ray fluorescence
- 4-Spectral Angle Mapper

References

- Agterberg, F.P., 2012. Multifractals and geostatistics, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 122, p. 113-122.
- Ahmadi, H., Gholamzadeh, M., Shahmoradi, L., Nilashi, M. and Rashvand, P., 2018. Diseases diagnosis using fuzzy logic methods: A systematic and meta-analysis review. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v. 161, p. 145-172.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information Systems for geoscientists modeling with GIS, *Computer methods in the geoscientists*, v. 13, p. 39-58.
- Borojerdnia, A., Rozbahani, M.M., Nazarpour, A., Ghanavati, N. and Payandeh, K., 2020. Application of exploratory and Spatial Data Analysis (SDA), singularity matrix analysis, and fractal models to delineate background of potentially toxic elements: A case study of Ahvaz, SW Iran, *Science of The Total Environment*, v. 740, Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140103.
- Carranza, E.J.M., 2008. *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Elsevier.
- Carvalho, J., Galos, K., Kot-Niewiadomska, A., Gugerell, K., Raaness, A. and Lisboa, V., 2021. A look at European practices for identifying mineral resources that deserve to be safeguarded in land-use planning, *Resources Policy*, v. 74, Doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102248.
- Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China, *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 314-324.
- Hedayat, B., Ahmadi, M.E., Nazerian, H., Shirazi, A. and Shirazy, A., 2022. Feasibility of Simultaneous Application of Fuzzy Neural Network and TOPSIS Integrated Method in Potential Mapping of Lead and Zinc Mineralization in Isfahan-Khomein Metallogeny Zone, *Open Journal of Geology*, v. 12, p. 215-233.
- Hossini-Dinani, H. and Yazdi, M., 2021. Multi-dataset analysis to assess mineral potential of MVT-type zinc-lead deposits in Malayer-Isfahan metallogenic belt, Iran, *Journal of Arabaian Geosciences*, v. 14(673), p. 1-23.
- Jafari, M.A., Nazarpour, A. and Rostami Paydar, G., 2021a. Application of Singularity Index (SI), Fuzzy-Gamma and AHP methods for Pb-Zn Prospecting in the Khondab sheet, Malayer-Isfahan Metallogenic Zone, Iran, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, v. 31, p. 79-96.
- Jafari, M.A., Kananian, A. and Nazarpour, A., 2021b. Prospecting of Zn-Pb mineralization based on stream sediments geochemical exploration in the Malayer-Isfahan metallogenic belt, *Journal of Economic Geology*, v. 12, p. 611-634.
- Jafari, M.A., Nzarpour, A. and 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,

- Advanced Applied Geology, v. 10, p. 314-327.
- Jain, R. and Sharma, R.U., 2019. Airborne hyperspectral data for mineral mapping in Southeastern Rajasthan, India, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 81, p. 137-145.
- Leach, D., Marsh, E., Bradley, D., Gardoll, S. and Huston, D., 2005. The distribution of SEDEX Pb-Zn deposits through Earth history. In *Mineral deposit research: Meeting the global challenge* (p. 145-148), Springer, Berlin, Heidelberg.
- Liu, Y. and Carranza, E.J.M., 2022. Uncertainty analysis of geochemical anomaly by combining sequential indicator Co-simulation and local singularity analysis, *Natural Resources Research*, p. 1-20.
- Malainine, C.E., Raji, O., Ouabid, M., Khouakhi, A., Bodinier, J.L., Laamrani, A. and Boumehdi, M. A., 2022. An integrated ASTER-based approach for mapping carbonatite and iron oxide-apatite deposits, *Geocarto International*, v. 37, p. 6579-6601.
- Nwaila, G.T., Zhang, S.E., Bourdeau, J.E., Ghorbani, Y. and Carranza, E.J.M., 2022. Artificial intelligence-based anomaly detection of the Assen iron deposit in South Africa using remote sensing data from the Landsat-8 Operational Land Imager, *Artificial Intelligence in Geosciences*.
- Peyghambari, S. and Zhang, Y., 2021. Hyperspectral remote sensing in lithological mapping, mineral exploration, and environmental geology: an updated review, *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 15, Doi.org/10.1117/1.JRS.15.031501.
- Roedder, E., 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado, *Economic Geology*, v. 66, p. 98-118.
- Sass-Gustkiewicz, M., Dzulynski, S. and Ridge, J.D., 1982. The emplacement of zinc-lead sulfide ores in the Upper Silesian District; a contribution to the understanding of mississippi valley-type deposits, *Economic Geology*, v. 77, p. 392-412.
- Song, Y., Yang, L., Carranza, E.J.M., Bagas, L., Gao, Y., Sun, B. and Wang, P., 2022. Contrasting Anomaly Patterns of Magmatic-Hydrothermal Polymetallic and Orogenic Gold Deposits and their Suitable Exploration Methods: A Case Study from the Qinling Orogen, *Natural Resources Research*, p. 1-20.
- Thakur, S., Mondal, I., Ghosh, P.B., Das, P. and De, T.K., 2020. A review of the application of multispectral remote sensing in the study of mangrove ecosystems with special emphasis on image processing techniques, *Spatial Information Research*, v. 28, p. 39-51.
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y. and 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*, v. 189, p. 122-137.
- Yousefi, M., Carranza, E.J.M., Kreuzer, O.P., Nykänen, V., Hronsky, J.M. and Mihalasky, M.J., 2021. Data analysis methods for prospectivity modelling as applied to mineral exploration targeting: state-of-the-art and outlook, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 229, Doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106839.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, v. 8, p. 338-353.
- Zhang, N., Zhou, K. and 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*, v. 128, p. 84-96.
- Zheng, B., Zhang, J., Yoon, S.W., Lam, S.S., Khasawneh, M. and Poranki, S., 2015. Predictive modeling of hospital readmissions using metaheuristics and data mining, *Expert Systems with Applications*, v. 42, p. 7110-7120.
- Zuo, R., Kreuzer, O.P., Wang, J., Xiong, Y., Zhang, Z. and Wang, Z., 2021. Uncertainties in GIS-based mineral prospectivity mapping: Key types, potential impacts and possible solutions, *Natural Resources Research*, v. 30, p. 3059-3079.