

Separation of alteration zones using remote sensing images and support vector machines, case study: Zaglic area, Arasbaran metallogenic zone, NW Iran

Habibollah Bazdar ¹, Ali Imamalipour ²*

¹ Ph.D. Student, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran ² Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT

Article History

Received:01 January 2025Revised:11 May 2025Accepted:17 May 2025

Keywords

Separation of alteration zones support vector machine remote sensing porphyry deposits Arasbaran metallogenic zone

*Corresponding author

Ali Imamalipour ☑ a.imamalipour@urmia.ac.ir The separation of alteration zones plays a significant role in the exploration of porphyry copper-epithermal gold deposits and is one of the key issues in the exploration operations of these deposits. In the general exploration stage and in the large-scale exploration stage of these deposits, one of the most important guides for determining suitable areas for exploratory drilling in the detailed exploration stage is the recognition and separation of alteration zones. In this study, alteration zones have been separated using satellite images and support vector machine. The study area is the Zaglic area near the city of Ahar, located in East Azerbaijan province. The images obtained from the satellite were digitized for modeling using a support vector machine and four classes were determined for data classification, namely "silica vein", "argillic", "propylitic" and "stockwork". After data preparation, the data were classified into four defined classes using a support vector machine and the accuracy of the model in correctly classifying the data was calculated to be 90.24 percent. Finally, alteration map was drawn with the predicted data and compared with the previously collected map, which showed the appropriate performance of the model.

How to cite this article

Bazdar, H. and Imamalipour, A., ?. Separation of alteration zones using remote sensing images and support vector machines, case study: Zaglic area, Arasbaran metallogenic zone, NW Iran. Journal of Economic Geology, ?(?): ?-?. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.2025.1138



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Studies of the alteration of host rocks are one of the appropriate guides in the exploration of hydrothermal deposits, including porphyry deposits. In porphyry systems, alterations are usually observed that can be referred to as potassic, phyllic, advanced argillic and propylitic alterations. These alterations provide a very suitable exploration prospect for determining the location of the deposit. Potassic alteration is usually accompanied by mineralization. Therefore, by separating potassic alteration, areas with high mineralization potential can be distinguished. In this study, alteration zones are predicted using data obtained from ASTER satellite images and intelligent support vector machine modeling. The Zaglic region, as the study area of this study, is located in the Arasbaran metallogenic zone in northwest Iran. This area is located at coordinates 20'26°38'N and 59'20°47'E, 25 km southeast of Ahar city and 5 km north of Naqduz Village in East Azerbaijan Province.

Materials and methods

In this study, satellite data obtained from the ASTER and the alteration map of the area were used to build an intelligent model. ASTER provides highresolution satellite images of the Earth in 14 different bands of the electromagnetic spectrum in the visible to thermal infrared range. The resolution of ASTER images is ranges from 15 to 90 meters. ASTER bands were downloaded in the desired area website through the relevant (https://earthexplorer.usgs.gov). website This provides ASTER images in different areas for free. Of course, the downloaded data format is HDF, but we need the bands in numerical form to use the data. For this reason, the data were corrected and processed using ENVI version 5.6 software. Initially, radiometric and atmospheric corrections were made to the data. Then, the band data were obtained digitally through ENVI software and the file was extracted through the desired area tool and saved in Excel format. The resulting Excel file was such that 90-meter square grids were defined on the ground and the numerical value of each band was represented the numerical intensity of the absorbed reflection of the desired band at that point (center of

the square). Therefore, the input to the model was the numerical ASTER bands and the output of the model was the type of alteration at that point. The type of alteration was extracted from the alteration map of the desired area.

Results

The most important parameter among the parameters of a support vector machine is the choice of kernel. Here we use the RBF kernel function in modeling because this function has a good ability to analyze high-dimensional data. On the other hand, for implementation, it requires setting two parameters; one is C (penalty parameter) and the other is λ which determines the width of the kernel function. The division of the number of training and test data is such that 80% of the data is considered for the training dataset and the remaining data is considered as the test dataset. This ratio was also optimized by keeping other parameters constant and changing the percentage of data in the training and test datasets and the value was determined to be 80%. After dividing the dataset into two sets of training and testing data, it is time to determine the two parameters λ and C. By considering the value of λ as a constant, we find the optimal value of C. According to the obtained values, the value of the parameter C was considered to be 2. The value of epsilon was also determined by trial and error to be 10^{-7} . The value of λ was optimized by using different values and running the model, and its value was determined to be 1. Finally, by optimizing the required parameters, the best value obtained for modeling was an accuracy of 90.24%. After determining the optimized parameters of the support vector machine, modeling was performed using the data and the output map was drawn based on the prediction of the type of alteration in the study area. Also additionally, in order to compare with the existing alteration map of the study area, the predicted map was implemented on the alteration map of the area.

Discussion

As mentioned above, by optimizing the model, we achieved a resolution accuracy of 90.24%, which is adequate for modeling that only uses satellite images to separate alterations. Finally, the alteration map of the region was drawn using the model output based on the prediction of the alteration type of each point.

According to the results obtained, the following are suggested:

- The obtained model is capable of separating alterations and rock units and it is recommended to use it in similar studies.

- It is recommended to use data from other satellites and compare it with the results obtained from the ASTER data.

- In order to conduct comparative research, classification should be performed with other intelligent methods.

- In addition to the alteration type, the amount of elements using geochemical data can also be considered as an output and modeling can be performed.

Acknowledgements

We sincerely thank the editor and reviewers of the Journal of Economic Geology for their useful and valuable comments.



مقاله پژوهشی

doi 10.22067/econg.2025.1138

تفکیک زونهای دگرسانی با استفاده از تصاویر سنجش از دور و ماشین بردار پشتیبان، بررسی موردی: ناحیه زگلیک، زون متالوژنی ارسباران، شمالغرب ایران

حبيباله بازدار 💷، على امامعلى پور 🔭 回

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران ۲ دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیدہ
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷	تفکیک مناطق دگرسانی در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری- طلای اپی ترمالی نقش به سزایی دارد و یکی از موارد کلیدی در عملیات اکتشاف این کانسارهاست. در مرحله اکتشاف عمومی و در مقیاس وسیع اکتشافی این کانسارها، یکی از مهمترین راهنماها برای تعیین مناطق مناسب جهت حفاری اکتشافی در مرحله اکتشاف تفصیلی، شناخت و تفکیک مناطق دگرسانی است. در این بژه هش با استفاده اذ تصاوید ماهوارهای و یک ملل هوش مند توسط ماشین برداد بشتسان
واژههای کلیدی تفکیک مناطق دگرسانی ماشین بردار پشتیبان سنجش از دور	ین پرو ش به مصلحان و صلح ریز به وروسی و یا صلحان و مصلحان و مصلحان و مصلحان و معلم و او و اقع مناطق د گرسانی تفکیک شده است. منطقه مورد بررسی ناحیه ز گلیک در نزدیکی شهر اهر واقع در استان آذربایجان شرقی است. تصاویر به دست آمده از ماهواره برای مدلسازی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان، رقومی شده و چهار رده برای طبقهبندی داده ها با نام های ر گه سیلیسی،
کانسارهای پورفیری زون متالوژنی ارسباران	ارژیلیک، پروپلیتیک و استو ک ور ک تعیینشد. بعد از امادهسازی دادهها با استفاده از ماشین بردار پشتیبان، دادهها در چهار رده تعریفشده طبقهبندی شد و دقت مدل در طبقهبندی صحیح دادهها ۹۴/۲۴ درصد محاسبه شد. در نهایت، نقشه دگرسانی محدوده با دادههای پیشبینی شده ترسیم و با نقشه برداشتشده قبلی مقایسهشد که عملکرد مناسب مدل را نشان میداد.
نه سنده مسئما	

نويسنده مسئول

على امامعلى پور ⊠a.imamalipour@urmia.ac.ir

استناد به این مقاله

بازدار، حبیباله و امامعلیپور، علی، ؟. تفکیک زونهای دگرسانی با استفاده از تصاویر سنجش از دور و ماشین بردار پشتیبان، بررسی موردی: ناحیه زگلیک، زون متالوژنی ارسباران، شمالغرب ایران. زمین شناسی اقتصادی، ؟(؟): ؟-؟. https://doi.org/10.22067/econg.2025.1138

مقدمه

بررسیهای دگرسانی سنگهای درون گیر یکی از راهنماهای مناسب در اکتشاف ذخایر گرمابی، از جمله ذخایر پورفیری و کانیزاییهای همراه از جمله کانسارهای اپی ترمال است. در این موع ذخایر، به طور معمول دگرسانیهایی مشاهده می شود که می توان به دگرسانیهای پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک پیشرفته و پروپلیتیک اشاره کرد. این دگرسانیها چشمانداز اکتشافی بسیار مناسبی برای تعیین مختصات کانسار ارائه می دهند. دگرسانی پتاسیک به طور معمول با کانهزایی همراه است؛ بنابراین با تفکیک و جداسازی دگرسانی پتاسیک، می توان مناطق با پتانسیل کانهزایی بالا را تفکیک کرد.

بررسییهای دگرسیانی به طور مرسیوم و سینتی با اسیتفاده از کانی شناسی سنگهای ناحیه مورد بررسی به صورت سطحی و عميق با استفاده از تجزيه نمونهها انجام مي شود كه مي توان به پژوهش های مهوری و همکاران (Mehvari et al., 2010)، امامعلى پور و همكاران (Imamalipour et al., 2011)، تقى يور و مكىزاده (Taghipour and Mackizadeh, 2011)، يوسفى و مرادیان (Yousefi and Moradian, 2012)، حسینی دینانی و همكاران (Hosseini Dinani et al., 2012)، رجبزاده و اسماعيلى (Rajabzadeh and Esmaeili, 2013)، معانى جو و مستقيمي (Maanijou and Mostaghimi, 2014)، عليخاني و همكاران (Alikhani et al., 2014)، مهرابی و همكاران (Mehrabi et al., 2014)، زراسوندی و همکاران Komeili (Zarasvandi et al., 2015)، كميلى و همكاران (Zarasvandi et al., 2015) et al., 2017)، هاشميان و همكاران (et al., 2017) 2019)، بومرى و همكاران (Boomeri et al., 2019)، مهرابي و همكاران (Mehrabi et al., 2021)، رمضانی و همكاران (Ramezani et al., 2021)، زراسوندی و همکاران (Zarasvandi et al., 2022) و حشمت نيا و همكاران (Heshmatnia et al., 2022) اشاره کرد. به طور معمول در این نوع بررسمیها، پس از اینکه نمونهها تجزیه و کانیها و عناصر

شاخص مشخص شد، بر اساس کانی های شاخص، زون دگرسانی تعیین می شود.

استفاده از تصاویر ماهواره ای و تجزیه آنها نیز از روش های مرسوم تفکیک دگرسانی مرتبط با کانسارهای گرمابی است که در این زمینه می توان به پژوهش های مظلومی بجستانی و رسا (Mazloumi Bajestani and Rasa, 2010)، عبدی و کریم پور (2012) (Abdi and Karimpour, 2012)، کشکوئی جهرمی و قشقایی (2016) (Abdi and Karimpour, 2012)، کشکوئی جهرمی و قشقایی (Riahi)، عزتی و همکاران (Kashkoei Jahroomi and Qishlaqi, 2016) (2017) همکاران (Ezzati et al., 2016)، ریاحی و همکاران (Riahi میمولاً تجزیه تصاویر ماهوارهای به صورت بصری انجام می شود. با استفاده از تصحیحات و روش های آشکارسازی مانند نسبت باندی، نوعی از دگرسانی آشکارسازی شده و با رنگ یه خصوص مشخص می شود.

در سالیان اخیر، تفکیک دگرسانی با استفاده از تصاویر ماهوارهای و روشهای هوشمند نیز انجامشده است که میتوان به پژوهشهای عثمان و گلو گن (Othman and Gloaguen, 2014)، استفاده از طبقهبندی ماشین بردار پشتیبان، نقشه زمین شناسی افیولیت موات واقع در شمال شرق عراق، بازی و ملگانی (Bazi and Melgani, 2006)، استفاده از ماشین بردار پشتیبان، تقسیمبندی تصاویر سنجش از راه دور، براون و همکاران (Brown et al., 2000)، الگوريتم مدلسازي تركيبي و نيز ماشين بردار پشتيبان را براي طبقهبندی داده های سنجش از راه دور، هوانگ و همکاران (Huang et al., 2002)، استفاده از داده های تصاویر ماهوارهای و روش طبقهبندی ماشین بردار پشتیبان، کراکل و ریدینگ (Cracknell and Reading, 2013)، تفكيك ليتولوژيكي با روش های ماشین بردار پشتیبان و نیز جنگل تصادفی، فودی و ماتور (Foody and Mathur, 2004)، طبقهبندی عکس های هوایی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان، گالتیری و کرامپ (Gualtieri and Cromp, 1999)، طبقهبندی دادههای طیفی به دست آمده از ماهواره با روش ماشين بردار يشتيبان، گاسيمي و همكاران (Gasmi et al., 2016)، تهيه نقشه زمين شناسي با ماشين بردار

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

یشتیان، اشار ه کر د.

در این پژوهش، با استفاده از دادههای به دست آمده از تصاویر ماهواره ای استر و مدلسازی هوشمند ماشین بردار پشتیبان، زونهای دگرسانی پیشبینی می شوند. منطقه زگلیک به عنوان منطقه مورد بررسی این پژوهش، در پهنه فلززایی ارسباران در شمال غرب ایران واقع شده است. این محدوده با مختصات "۰۰ '۲۵ م۳۸ تا "۰۰ '۲۶ °۳۸ عرض شمالی و "۰۰ '۲۰ °۲۷ تا "۰۰ '۳۹ فول شرقی در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان اهر و در ۵ کیلومتری شمال روستای نقدوز در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. کارهای مشابه پژوهش های بیان شده در مورد کاربرد روش های هوش مصنوعی با داده های دورسنجی، در منابع زیر نیز انجام شده است:

(Melgani and Bruzzone, 2004; Pal, 2005; Kovacevic et al., 2009; Cracknell and Reading, 2014; Khodadadzadeh et al., 2014; Pournamdari and Hashim, 2014; He et al., 2015; Harvey and Fotopoulos, 2016; Ge et al., 2018).

روش مطالعه

زمين شناسي منطقه ارسباران

ناحیه ارسباران در شمال غرب ایران و در استانهای آذربایجان شرقی و اردبیل با وسعت تقریبی ۲۲۲۵۵ کیلومترمربع قرار دارد. ناحیه فلززایی اهر – ارسباران، مطابق تقسیم بندی واحدهای ساختاری ایران توسط نبوی (Nabavi, 1976) در کمربند البرز – آذربایجان قرار می گیرد. کمربند ماگمایی ارسباران میزبان چندین ذخیره مس پورفیری و طلای اپی ترمال شناخته شده (شکل ۱-A و B) است که به طور متغیر در سراسر کوهزایی قفقاز کوچک واقع شده اند (Hassanpour et al., 2015). توالی های ولکانیکی کالک آلکالن و ولکانیکی – رسوبی ائوسن پسین تا پلیوسن پسین، مسته اصلی کمربند ماگمایی ارسباران را تشکیل می دهند که بر روی یک سنگ بستر با ترکیبی شامل مجموعه های سنگ آهک و مینگرای پیرو کلاستیک قرار گرفته است (Aghazadeh et

يشتيبان و تجزيه مؤلفه اصلى، ضيايي و همكاران (Ziaii et al., 2007)، تفكيك يتانسيل معدني ينهان از منطقه كانيزايي يراكنده با استفاده ترکیب زونبندی زمین شیمیایی عمودی و شبکه عصبی مصنوعي با داده هاي زمين شناسي، زمين شيميايي و سنجش از راه دور، وانىڭ و چانىڭ يو (Wang and ChangYu, 2010)، تفکیک لیتولوژیکی با تصاویر سنجش از راه دور و روش ماشین بردار يشتيبان، يو و همكاران (Yu et al., 2012)، تفكيك لیتولوژیکی با ماشین بردار پشتیبان و دادههای سنجش از راه دور، Bahrambeygi and Moeinzadeh,) بهرام بیگی و معینزاده (2017)، تفکیک واحدهای سنگی پیچیده ملانژ افیولیتی با استفاده از دادههای فراطیفی هایپریون و شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بر دار يشتيبان، شبل و همكاران (Shebl et al., 2023)، تهيه نقشه ليتولوژيكي با استفاده از الگوريتمهاي يادگيري ماشين جنگل تصادفي و ماشين بردار پشتيبان و داده هاي ماهوارهاي پريسما، فورسون و آمپونسا (Forson and Amponsah, 2023)، مدلسازی دادههای ژئوفیزیک، سنجش از دور و زمین شناسی با ماشین های بردار پشتیبان، غنیم و همکاران (Ghoneim et al., 2024)، تفکیک واحدهای سے نگی با ماشےین بردار پشےتیبان و داده های Landsat-8/9، لو و همکاران (Lu et al., 2023)، تفکیک واحدهای سینگی با ماشین بردار پشیتیبان بر اسیاس بهینهسازی ازدحام ذرات و دادههای ماهوارهای، حسین و همکاران (Hussain et al., 2025)، استفاده از داده های ماهوارهای و روش های هوشمند برای تفکیک لیتولوژیکی، موندال و همکاران (Mondal et al., 2024)، شيناسيايي مناطق داراي پتانسيل کرومیتیت با دادههای ماهوارهای و ماشین بردار پشتیبان، شریف و همكاران (Shereif et al., 2024)، تهيه نقشه ليتولوژيكي با دادههای سنجش از دور و ماشین بردار پشتیبان، پریرا و همکاران (Pereira et al., 2023)، تهیه نقشه لیتولوژیکی با دادههای سنجش از دور والگوریتم یادگیری ماشین J48 و رحمانی و همكاران (Rahmani et al., 2025)، تھیہ نقشہ ہای لیتولو ژیکی کانسار مس یورفیری سرچشمه با دادههای پریسما و ماشین بردار

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

زمینشناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

al., 2012). ذخایر فلزی در حد رده جهانی این ناحیه شامل ذخایر مس – مولیبدن پورفیری سونگون با ذخیره ۶۸۰ میلیون تن کانسنگ با عیار مس ۶/۹۰ درصـد و مولیبدن ۲۵۰ ppm ۲۵۰ (Hassanpour,) 2013) و کاجاران در ارمنستان با ذخیره ۱۸۱ میلیون تن کانسنگ با عیار مس ۶۶/۰ درصـد و مولیبدن ۵۰۰ ppm

2012) است. ذخایر کوچک تر شامل ذخایر مس – مولیبدن پورفیری هفت چشمه، کیقل، شله بوران، صاحب دیوان و نیاز به Hosseinzadeh, اسکارن مزرعه و انجرد است (Hosseinzadeh, 1999; Hassanpour and Rajabpour, 2019; Hassanpour (and Rajabpour, 2020).



شکل ۱. نقشه زمینشناسی ناحیه فلززایی ارسباران و موقعیت کانسارهای مهم شناختهشده واقع شده در آن. موقعیت منطقه مورد بررسی به صورت چهارگوش در نقشه مشخصشده است (Rajabpour et al., 2022).

Fig. 1. Geological map of the Arasbaran metallogenic zone and the location of the important known deposits located there. The location of the study area is marked as a rectangle on the map (Rajabpour et al., 2022).

و سپس با تودههای آتشفشانی حدواسط کالک آلکالن و فلسیک-آلکالن و قلیایی فلسییک- فلزیک معمولی دنبال شده است (Rajabpour et al., 2022). این منطقه شامل رخنمون هایی از سنگهای آتشفشانی و آذر آواری ائوسن و سنگهای رسوبی

زمینشناسی زگلیک چهار رویداد ماگمایی را در منطقه اهر در طول ژوراسیک پسین تا ترشیری مشخص کرده است که اغلب با سنگهای آتشفشانی حدواسط سیلیسی غیراشباع و قلیایی تا شوشونیتی حدواسط شروع

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

آندزیتی تا تراکی آندزیتی و توف سنگی به طور متنوع تحت تأثیر دگرسانی سیلیسی، سریسیتی، آرژیلیک و پروپیلیتیک منطقهای قرار گرفته و کانی سازی اصلی در آنها اتفاق افتاده است. سیلیسی شدن به ویژه در بخش شرقی و مرکزی ناحیه رخداد و دگرسانی های سریسیتی و آرژیلیک در حاشیه ها در سنگهای آتشفشانی و آذرآواری در ناحیه زگلیک رایج است. علاوه بر این، رگه های سیلیسی، رگه های استو کورک و اکسیدهای سوپرژن آهن به طور غالب در منطقه متمایز هستند (.Rajabpour et al.

کواترنر است. واحدهای سنگی اغلب شامل پورفیری ائوسن پسین و آندزیت میکرولیتی، تراکی-آندزیت تا آندزیت لاتیت و توف سنگی هستند (شکل ۲). آنها اغلب از پلاژیو کلاز (آندزین-الیگو کلاز)، هورنبلند، کلینوپیرو کسن و مقدار کمی بیوتیت و کوارتز تشکیل شدهاند. جریانهای گدازهای آندزیتی اغلب توسط سنگهای توفی ریزدانه با ترکیب متوسط، حاوی پلاژیو کلاز، هورنبلند، پیرو کسن و بیوتیت پوشیده شدهاند. این واحد سنگی به تدریج در حال تبدیل شدن به توف آندزیتی و برش آندزیتی است. توف سنگی جوانترین سنگ آتشفشانی این منطقه است که بر روی واحدهای یادشده قرار دارد. به طور قابل توجهی، سنگهای



(Rajabpour et al., 2022) شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده ز گلیک (Fig. 2. Geological map of Zaglic deposit (Rajabpour et al., 2022)

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

ســنگهای میزبان در زگلیک به صـورت گســترده تحتتأثیر دگرسانی به شکل رگهای، قرار گرفتهاند (شکل ۳). **دگرسانی و کانیزایی** الگوی مورفولوژیکی کلی مناطق دگرسانی در زگلیک پهنهبندی را از هسـته کوارتز تا توده سـنگ دگرسـاننشـده نشـان میدهد.



(Rajabpour et al., 2022) شکل ۳. الگوی د گرسان شده (گرسان در منطقه زگلیک از هسته سیلیسی به سمت سنگ درون گیر د گرسان نشده (Rajabpour et al., 2022) Fig. 3. Alteration pattern and zoning in the Zaglic area from the silicic core to the unaltered host rock (Rajabpour et al., 2022)

صورت یک ناحیه دگرسانی دایرهای به قطر ۱/۵ کیلومتر و بیشتر به صورت آرژیلیک با تغییرات سریسیتیکی در حاشیههاست. دگرسانی سریسیتی به صورت محلی به صورت هاله در اطراف رگههای سیلیسی رخداده و اغلب از مجموعه ریزدانه سریسیت، کوارتز و آدولاریا تشکیل شده است. دگرسانی آرژیلیک به طور گسترده در منطقه رخداده است. در نواحی با دگرسانی زیاد، پشتههای سیلیسی به علت مقاومت بالای رگههای سیلیسی در مقابل فرسایش، به طور گستردهای رخنمون دارند. در نمونههای دستی، در اثر دگرسانی آرژیلیک، بیشتر پلاژیو کلاز و ماتریکس ریزدانه سریزدانه مونتموریلونیت، ایلیت و مونتموریلونیت، کوارتز ثانویه و مقدار کمی سریسی دگرسانی تبدیل شده است. برشهای گرمابی مونومیکت با دگرسانی دگرسانی سیلیسی در زگلیک به سه شکل رخداده است: ۱-رگههای سیلیسی گسترده به همراه رگچههای استو کورک، ۲-پشتههای سیلیسی که به طور گسترده در قسمتهای بالایی دگرسانی آرژیلیک رخنمون دارند و ۳- سیلیسی شدن تقریباً همه واحدهای سنگی. رگههای سیلیسی در مساحتی به وسعت ۸/۵ کیلومتر در ۱ کیلومتر با روند شمال غربی - جنوبی ایجاد شدهاند. هالههای رگههای سیلیسی به طور گسترده به دگرسانی های سریسیتی و آرژیلیک تغییر یافتهاند. در نمونههای دستی، رگهها حاوی پیریت و اکسید آهن سوپرژن هستند. به طور کلی، سیلیس به صورت سیلیس دودی، شفاف و آمورف (کلسدونی) در منطقه وجود دارد. دگرسانی های سریسیتی و آرژیلیک به طور گسترده در سنگهای آتشفشانی و آذرآواری اتفاقافتاده است که به

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

- نبود زون کلریتی همراه بخش آرژیلیک؛ - وجود ایلیت به عنوان کانی اصلی بخش آرژیلیک و - حضور سریسیت همراه بخش سیلیسی.

دادهها و روش مطالعه

در این پژوهش از دادههای ماهواره ای به دست آمده از سنجده استر و نقشه دگرسانی منطقه به منظور ساخت یک مدل هوشمند استفاده شد. به این صورت که ابتدا ۱۴ باند استر محدوده مورد بررسی به صورت رقومی در آمده که هر پیکسل ۳۰ متر در ۳۰ متر روی زمین شامل ۱۴ عدد می شد که هر کدام از این اعداد مقدار عددی هر کدام از باندهای استر در پیکسل مورد نظر بود. سپس با تطابق نقشه دگرسانی و پیکسل های عددی به دست آمده، از هر نوع دگرسانی تعیین شده در محدوده، نقاطی به صورت نمونه شد. مانند اغلب روش های هوشمند که داده ها به دو دسته ورودی شد. مانند اغلب روش های هوشمند که داده ها به دو دسته ورودی و خروجی تقسیم می شوند، در اینجا، باندهای رقومی استر به عنوان مدل هوشمند ساخته شده برای پیش بینی نوع دگرسانی در محدوده مورد بررسی، استفاده شد. در ادامه کلیاتی درباره ماشین بردار مورد بررسی، استفاده شد. در ادامه کلیاتی درباره ماشین بردار پشتیبان و ماهواره استر بیان می شود.

ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان که برای نخستین بار توسط کورتس و و پنیک (Cortes and Vapnik, 1995) معرفی شد، مانند شبکههای عصبی مصنوعی، یک الگوریتم یادگیری مجهز به رویکرد یادگیری هوشمند است که دادهها را تجزیه و تحلیل می کند و الگوهای دادههای ورودی/ خروجی را پیدا می کند. روش آموزش ماشین بردار پشتیبان به نتایج خروجی بهینه سریع تر هم گرا می شود و نیازی به کنترل مؤلفههای مدل نیست (,.Suykens et al و نیازی به کنترل مؤلفههای مدل نیست (,.Suykens et al و سال های اخیر در حوزه های مختلف علوم از جمله مهندسی،

سیلیسی، سریسیتی و آرژیلیک همراه هستند. به طور محلی، رگه و ماتریس برش های گرمایی، میزبان مجموعه های کانی زایی پر اکنده از جمله پیریت و کالکوپیریت است. ماتریکس برش اغلب از باطله و کانیزایی گرمابی همراه با تکههای لبهدار آندزیت دگرسانشده تشکیل شده است. به طور کلی، کانیزایی کوار تز – سولفید طلا در حاشیههای برشی شده، با کائولینیت- ایلیت در مواد سیمانه و متن برش ها و سولفیدهای پر کننده شکاف ها معمول است. ماتریس برش های گرمابی اغلب به صورت کوار تز - سریسیت - کلریت -پیریت و در مقیاس کوچک تر، به کانی های رسبی (سریسیتی-آرژیلیک) دگرسان شده است. بیشتر برش ها یک ماتریس سیال متشکل از خرده سنگ و کوارتز + پیریت و کالکوپیریت را نشان می دهند. دگر سانی پروییلیتیک کلریت، ایبدوت و کلسیت به صورت محلي در قسمتهاي شمالشرقي و جنوب شرقي دگرساني آرژیلیک رخداده است. به طور کلی، بافت اصلی که در رگهها مشاهده می شود، شامل کوارتز تودهای، پوستهای، برش و نواری است. دگرسانی های مرتبط با کانیزایی، محدود به هالههای نسبتاً باریک مناطق سیلیسی شده نزدیک به رگههاست که با تغییرات سريسيتي (كوارتز + سريسيت± آدولاريا)، آرژيليك (كائولينيت+ ايليت+ مونت موريلونيت) و يروييليتيك (اييدوت+ كلريت+ کلسیت) هممرز هستند. کانیزایی در منطقه اغلب در رگه و ر گچههای سیلیسی و برشهای گرمابی که حاوی مقدار کمی سولفید هستند، اتفاقافتاده است. رگههای سیلیسی در محدوده زگلیک، ۱۲۵ تا ۸۵۰ متر طول و ۳ تا ۸ متر عرض دارند. پیریت معمولاً با كالكوپيريت، موليبدنيت، بورنيت و كووليت همراه است. طلا اغلب به صورت دانههای میکروسکویی آزاد در سیلیس و ادخال در پيريت يافت مي شود (Ebrahimi et al., 2011). با توجه به مطالب بالا، مي توان دگرساني حاشيه رگه در محدوده اکتشافي زگليک را با توجه به شواهد زير با دگرساني حاشيه رگه كانسارهاي ايي ترمال با درجه سولفيد كم مقايسه كرد: - نبود کانی های شاخص محیط های اسیدی به ویژه آلونیت (ژاروسیت از منشأ ثانویه در برخی موارد دیده شده است)؛

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

ابعاد خیلی بالا را با استفاده از این روش ها حل کنیم، از قضیه دو گانی لاگرانژ برای تبدیل مسئله کو چک سازی مورد نظر به فرم دو گانی آن که در آن به جای تابع پیچیده فی که ما را به فضایی با ابعاد بالا میبرد، تابع ساده تری به نام تابع هسته که ضرب برداری تابع فی است، استفاده می کنیم. از توابع هسته مختلفی از جمله هستههای نمایی، چند جمله ای و سیگموید می توان استفاده کرد. الگوریتم اولیه معرفی شده توسط ولادیمیر و پنیک در سال ۱۹۶۳ برای حالت غیر خطی بود و بعد توسط و پنیک و کورینا کورتس در سال ۱۹۹۳ حالت غیر خطی آن نیز ارائه شد. برای بررسی جزئیات بیشتر از این الگوریتم منابع معرفی شده در بالا پیشنهاد می شود. پزشکی، هواشناسی و... نشانداده است که این روش نسبت به روش های هوشمند قدیمی تر مانند شبکه عصبی مصنوعی، برای طبقه بندی و همچنین رگرسیون بر تری دارد. اساس کار این روش بر مبنای طبقه بندی داده ها به صورت خطی است و این طبقه بندی توسط خطی انجام می شود که به اصطلاح بالاترین حاشیه اطمینان را دارا باشد (شکل ۴). ترسیم این خط با حل معادله مربوطه با روش های برنامه نویسی غیر خطی انجام می شود که این روش ها به خاطر اینکه الگوریتم توانایی این را داشته باشد که داده های پیچیده که پیدا کردن ار تباط بین آنها دشوار است را طبقه بندی کند، باید داده ها به فضای دیگری با ابعاد بالاتر منتقل شوند و این انتقال با تابعی به نام تابع فی انجام می شود. برای اینکه بتوانیم مسئله



شکل ٤. تقسیم کننده بهینه، ابر صفحه نامیده می شود. نقاط نزدیک به این صفحه در هر یک از دستهها، بردارهای پشتیبان نامیده می شوند (Adib et al., 2018).

Fig. 4. The optimal divider is called the hyperplane. The points close to this plane in each of the clusters are called support vectors (Adib et al., 2018).

مجموعه داده

استر تصاویر ماهوارهای از زمین را با قدرت تفکیک بالا و در ۱۴ باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی در بازه طیف مرئی تا فروسرخ حرارتی را تهیه می کند. قدرت تفکیک تصاویر استر از ۱۵ تا ۹۰ متر است. بارگیری باندهای استر در منطقه مورد نظر از طریق پایگاه اینترنتی https://earthexplorer.usgs.gov انجام گرفته و تاریخ تصویربرداری دادههای بارگیریشده، آوریل

۲۰۲۲ است. این پایگاه تصاویر استر را در مناطق مختلف به صورت رایگان ارائه می کند. البته تصاویر بار گیری شده با فرمت HDF بوده و برای استفاده از داده ها برای مدل سازی با ماشین بردار پشتیبان باید به فرمت CSV و فایل اکسل تبدیل شوند. به همین دلیل با استفاده از نرمافزار ENVI نسخه ۵/۶ تصحیح و پردازش داده ها انجام شد. در ابتدا تصحیحات رادیومتری و اتمسفری روی داده ها انجام شد. سپس داده های باند ها به صورت

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

برای هم اندازه کردن پیکسلها، ابعاد پیکسل همه باندها ۹۰ متر در نظر گرفته شــد. بنابراین، ورودی مدل، باندهای اســتر به صـورت عددي (شدت بازتاب جذبشده) و خروجي مدل، نوع دگرساني در آن نقطه بود. نوع دگرسانی از روی نقشه دگرسانی منطقه مورد بازتاب جذب شده باند مورد نظر در آن نقطه (مرکز مربع) بود. به 👘 نظر استخراج شد. نقشه دگرسانی منطقه مورد نظر در شکل ۵ ار ائەشدە است.

رقومی از طریق نرمافزار ENVI و اســتخراج فایل از طریق ابزار منطقه مورد نظر و ذخیره آن با فرمت اکسل به دست آمد. فایل اکسل به دست آمده به این صورت بود که شبکههای مربعی ۹۰ متری روی زمین تعریف شده و مقدار عددی هر باند، شدت عددی علت اینکه برای تفکیک رگههای سیلیسی به باندهای فروسیرخ حرارتی نیاز بوده و قدرت تفکیک باندهای حرارتی ۹۰ متر است،





شکل ٥. نقشه د گرسانی منطقه ز گلیک (Kavoshgaran, 2012) Fig. 5. Alteration map of the Zaglic area (Kavoshgaran, 2012)

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

زمین شناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

آمادهسازی دادهها

با استفاده از جدول همبستگی، از بین ۱۴ باند موجود استر، ۹ باند به عنوان ورودی مدل انتخاب شد. از ۹ باند انتخاب شده، ۳ باند فروسرخ حرارتی، ۳ باند فروسرخ مرئی نزدیک و ۳ باند نیز واحدهای سنگی موجود در منطقه بود، با ۴ رده شامل پروپلیتیک، آرژیلیک، رگه سیلیسی و استوک ورک تقسیم شد. با استفاده از ژئو رفرنس کردن نقشه دگرسانی، دادههای خروجی که شامل ۴ رده مدنظر بود، از روی نقشه به عنوان نقاط با ورودی و خروجی معلوم انتخاب شد. به این ترتیب، ۱۱۵۳ نقطه با رده آرژیلیک، معلوم انتخاب شد. به این ترتیب، ۱۹۵۳ نقطه با رده آرژیلیک، نقطه با رده استوک ورک به عنوان نقاط معلوم برای آموزش مدل انتخاب شدند. مجموع این نقاط معلوم، ۲۰۳۹ نقطه از مجموع انتخاب شدند. مجموع این نقاط معلوم، ۲۰۳۹ نقطه از مجموع

مدلسازی دادههای استر با نرمافزار وکا (ماشین بردار پشتیبان)

وکا نرمافزاری در حوزه مدلسازی با روشهای هوشمند و یادگیری ماشین است که نخستینبار توسط دانشگاه وایکاتو نیوزلند معرفی شده و در چند سال اخیر نسخه های به روز شده آن عرضه شده است. این نرمافزار که در محیط جاوا نوشته و توسعه یافته است، توانمندی های کاربردی در زمینه پیش پردازش داده ها، طبقه بندی، خوشه بندی، تجزیه و تحلیل رگرسیون، ایجاد قوانین انجمنی، استخراج ویژگی و تجسم داده ها دارد.

آمادهسازی دادهها برای مدلسازی با وکا

داده ها برای استفاده و مدلسازی با و کا به قالب خاصی نیاز دارند. داده ها در یک فایل اکسل به این ترتیب مرتب می شوند که هر سطر بیانگر یک نمونه است و ۹ ستون اول، مربوط به اندازه باندها و ستون دهم رده یا برچسب مربوط به نوع د گرسانی یا واحد سنگی را نشان می دهد. در نهایت، فایل اکسل با فرمت text

ذخیره می شود. هر نمونه شامل چند ویژگی اندازه گیری شده (که در اینجا ۹ باند استر است (B1-B9)) و نیز برچسب ویژگی است. بعد از تهیه و آماده سازی مجموعه داده، فراخوانی داده ها تو سط نرم افزار انجام می شود. این نرم افزار قابلیت مدل سازی با روش های هو شمند متنوع را داراست. به طور کلی، مدل سازی با روش های هو شمند به دو دسته طبقه بندی و رگر سیون تقسیم می شود. با توجه به اینکه در اینجا خروجی مدل از نوع عددی نیست و شامل ماشین بردار پشتیبان هر دو قابلیت رگر سیون و طبقه بندی است. ماشین بردار پشتیبان هر دو قابلیت رگرسیون و طبقه بندی را ماشین بردار پشتیبان هر دو قابلیت رگرسیون و طبقه بندی را ماشین بردار پشتیبان داده ها، به سربر گ طبقه بندی رفته و روش ماشین بردار پشتیبان را انتخاب می کنیم. این روش دارای ماشین است که باید تنظیم شوند. تنظیم آنها خود به عنوان یک مسئله بهینه سازی می تواند تعریف شود. ما در اینجا با آزمون و خوا مسئله را تنظیم کرده و دست کم خطای مدل سازی را دنبال خواهیم

تعیین مؤلفههای ماشین بردار پشتیبان

مهم ترین مؤلفه در بین مؤلفه های ماشین بردار پشتیبان، انتخاب کرنل است. کرنل از مجموعه ای از توابع ریاضی تشکیل شده که الگوریتم های ماشین بردار پشتیبان از آنها استفاده می کنند و در حقیقت می توان کرنل را به صورت هسته الگوریتم بر شرد. اصلی ترین کاربرد تابع کرنل این است که داده های ورودی را الگوریتم تبدیل کند. انواع مختلفی از توابع کرنل برای ماشین بردار پشتیبان استفاده می شود که به عنوان مثال می توان توابع کرنل برد. توابع کرنل، برای انواع داده های، تابع پایه شعاعی و سیگموئید را نام متن، تصاویر و همچنین بردارها به کار می رود. تابع کرنل HBF از پر کاربردترین توابع کرنل است؛ برای اینکه دارای پاسخ محلی و متناهی در کل بازه محور X است. در اینجا ما از تابع کرنل RBF از پر کاربردترین توابع کرنل است؛ برای اینکه دارای پاسخ محلی متن، تصاویر و همچنین بردارها به کار می رود. تابع کرنل RBF از پر کاربردترین توابع کرنل است؛ برای اینکه دارای پاسخ محلی می در کل بازه محور X است. در اینجا ما از تابع کرنل RDF از پر مدل سازی استفاده می کنیم؛ زیرا این تابع توانایی خوبی برای و متناهی در کل بازه محور X است. در اینجا ما از تابع کرنل

زمینشناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

عنوان مجموعه داده آزمون در نظر گرفته می شود. این نسبت نیز با ثابت گرفتن سایر مؤلفهها و تغییر درصد دادههای مجموعه داده آموزش و آزمون بهینه شــد (جدول ۱) و مقدار ۸۰ درصــد تعیین شد.

دو مؤلفه است: یکی C (مؤلفه جریمه) و دیگری λ که عرض تابع کرنل را تعیین می کند. رابطه تابع کرنل RBF به صورت زیر است: $K(x_i, x_j) = exp\left\{-\lambda \|x_i - x_j\|^2\right\}, \qquad \lambda > 0$ تقسیمبندی تعداد دادههای آموزش و آزمون به این ترتیب است که ۸۰ درصد داده ها برای مجموعه داده آموزش و مابقی داده ها به

جدول ۱. تعیین میزان بهینه درصد تقسیم مجموعه داده به آموزش و آزمون دادههای منطقه زگلیک

Table 1. Determining the optimal percentage of dividing the dataset into training and testing data for the Zaglic area

training dataset	test dataset	Model accuracy for the test dataset
65	35	77.28 %
70	30	78 %
75	25	78.48 %
80	20	81.12 %
85	15	80.76 %

بهینه آن در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده، مقدار مؤلفه C، ۲ در نظر گرفته می شود.

بعد از تقسیم مجموعه داده به دو مجموعه داده آموزش و آزمون، نوبت به تعیین دو مؤلفه λ و C می رسید. با ثابت در نظر گرفتن مقدار λ، مقدار بهینه C را پیدا می کنیم. مقادیر مختلف C و مقدار

le 2. Deter	rmining the optimal va	alue of the C parameter for the data of the Zaglic
	C value	Model accuracy for the test dataset
	0.5	80.52 %
	1	88.74 %

88.82 %

89.93 %

89.63 %

جدول ۲. تعیین مقدار بهینه مؤلفه C داده های منطقه زگلیک Tab area

> مقدار ایسیلون نیز با آزمون و خطا، میزان ۲۰-۱۰ تعیین شد. در نهایت، مقدار لم با استفاده از مقادیر مختلف و اجرای مدل بهینه شد که نتایج آن در جدول ۳ نشانداده شده است.

با بهینه سازی مؤلفه های مورد نیاز، چنان که در جدول ۳ نشان داده شده است؛ بهترین مقدار به دست آمده برای مدلسازی، دقت ۹۰/۲۴ در صد به دست آمد.

1.5

2

2.5

زمين شناسي اقتصادي، ؟، دوره ؟، شماره ؟

Table 3. Determining the optimal value of λ		
λ value	Model accuracy for the test dataset	
0.001	74.64 %	
0.01	81.12 %	
0.1	83.16 %	
1	90.24 %	
1.5	85.20 %	

جدول ۳. تعیین مقدار بهینه λ دادههای منطقه زگلیک

با استفاده از دادههای خروجی مدل ماشین بردار پشتیبان که نوع دگرسانی هر نقطه را پیش بینی می کند، نقشه دگرسانی منطقه مورد بررسی رسمشد که در شکل ۶ نشانداده شده است.

ترسیم نقشههای د گرسانی

بعد از تعیین مؤلفههای بهینهشده ماشین بردار پشتیبان، مدلسازی با استفاده از دادهها انجامشده و نقشه خروجی بر اساس پیشربینی نوع دگرسانی در محدوده مورد بررسی رسم میشود که در اینجا به آن مي پردازيم:



شکل ٦. نقشه دگرسانی پیش بینی شده محدوده زگلیک بر اساس خروجی ماشین بردار پشتیبان Fig. 6. Predicted alteration map of the Zaglic area based on the output of the support vector machine

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

زمين شناسي اقتصادي، ؟، دوره ؟، شماره ؟

همچنین به منظور مقایســه با نقشــه دگرســانی موجود منطقه مورد پ بررسـی، نقشـه پیش.بینی شـده بر روی نقشـه دگرسـانی محدوده

یادهسازی شد که در شکل ۷ نشانداده شده است.



شکل ۲. مقایسه نقشه خروجی مدل با نقشه دگرسانی محدوده زگلیک Fig. 7. Comparison of the model output map with the alteration map of the Zaglic area

درستی، متعلق به رده آرژیلیک با درستی طبقهبندی ۹۶ درصد، همچنین کمترین درستی مربوط به رده استو کورک با دقت حدود ۷۷ درصد بود. ردههای رگه سیلیسی و پروپلیتیک درستی طبقهبندی حدود ۸۳ درصد نشان دادند. در نهایت، با در نظر گرفتن همه نفاط، درستی طبقهبندی، ۹۰/۲۴ درصد تعیین شد که برای مدلسازی که فقط از تصاویر ماهوارهای برای تفکیک د گرسانی استفاده می کند، دقت مناسبی است. در نهایت، نقشه د گرسانی منطقه با استفاده از خروجی مدل بر اساس پیشبینی نوع د گرسانی هر نقطه رسم شد. با توجه به نتایج به دست آمده، موارد زیر

بحث و نتیجه گیری در این پژوهش، تفکیک دگرسانی با استفاده از داده های دورسنجی و همچنین ماشین بردار پشتیبان در منطقه کانی زایی زگلیک انجام شد. نقشه دگرسانی مبنا (شکل ۵) با استفاده از عملیات برداشت زمینی نمونه ها و بررسی های کانی شناسی تهیه شد، لذا به عنوان مبنای درستی طبقه بندی مدل، مورد استفاده قرار گرفت. با بهینه سازی مدل و اجرای آن، پیش بینی رده متعلق به هر نقطه در نقاط مورد نظر تعیین شد. مقایسه نتایج خروجی مدل و پیش بینی رده نقاط نشان داد که در بین ۴ رده تعریف شده، بالاترین

زمینشناسی اقتصادی، ؟، دوره ؟، شماره ؟

تخمین عناصر مانند میزان مس و یا سایر عناصر، به عنوان خروجی در نظر گرفته و مدلسازی انجام شود.

> تعارض منافع هیچ گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان بیاننشده است.

قدردانی از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین شناسی اقتصادی به خاطر نظرات مفید و ارزشمند صمیمانه قدردانی به عمل می آید. پیشنهاد می شود: - مدل به دست آمده قابلیت تفکیک دگرسانی و واحدهای سنگی را دارد و پیشنهاد می شود در بررسی های مشابه استفاده شود. - پیشنهاد می شود از داده های سایر ماهواره ها نیز استفاده شده و با نتایج به دست آمده از داده های استر مقایسه شود. - برای انجام کار پژوهشی مقایسه ای، طبقه بندی با سایر روش های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و... انجام شود.

- خروجی مدل و هدف در این پژوهش، تعیین نوع دگرسانی بود. پیشنهاد می شود با استفاده از دادههای زمین شیمیایی موجود منطقه،

- 1. Support Vector Machine (SVM)
- 2. Random forests (RF)
- 3. Principal component analysis (PCA)
- 4. Zone Dispersed Mineralization (ZDM)
- 5. Precursore IperSpettrale della Missione Applicativa (PRISMA)
- 6. Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
- 7. Arasbaran Magmatic Belt (AMB)
- 8. Lesser Caucasus (LS)
- 9. Inclusion
- 10. Maximum margin
- 11. Quadratic programming (QP)
- 12. Phi function
- 13. Kernel function
- 14. Region of Interest (ROI)
- 15. Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis)
- 16. Data Preprocessing
- 17. Classification
- 18. Clustering
- 19. Regression
- 20. Associate Rules
- 21. Feature Extraction
- 22. Data Visualization
- 23. Attribute
- 24. Attribute class
- 25. Kernel
- 26. Radial basis function (RBF)
- 27. epsilon

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

References

- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2012. Geology, alteration, mineralization, petrogenesis, geochronology, geochemistry and airborne geophysics of Kuh Shah prospecting area, SW Birjand. Journal of Economic Geology, 4(1): 77– 107. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13394
- Adib, H., Kazerooni, N., Falsafi, A., Adhami, M.A., Dehghan, M. and Golnari, A., 2018. Prediction of sulfur content in propane and butane after gas purification on a treatment unit. Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 73: 70.

https://doi.org/10.2516/ogst/2018021

- Aghazadeh, M., Castro, A. and Badrzadeh, Z., 2012. U-Pb age dating of Cenozoic plutonism in the Arasbaran magmatic zone, NW Iran. 34th International Geological Congress, brisbane convention and exhibition centre, Brisbane, Australia.
- Alikhani, M., Shamanian, G.H. and Jafari Zanglanlou, M., 2014. Mineralization and hydrothermal alteration of the Tajroud vein system, south of Neyshabour. Journal of Economic Geology, 5(2): 325–339. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v5i2.31886

- Bahrambeygi, B. and Moeinzadeh, H., 2017. Comparison of support vector machine and neutral network classification method in hyperspectral mapping of ophiolite mélanges–A case study of east of Iran. The Egyptian. Journal of Remote Sensing and Space Science, 20(1): 1– 10. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.007
- Bazi, Y. and Melgani, F., 2006. Toward an optimal SVM classification system for hyperspectral remote sensing images. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 44(11): 3374– 3385.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.880628

- Boomeri, M., Biabangard, H. and Zeinadini, Z., 2019. Investigation of petrography, mineralogy and alteration of northern part of the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, northwest of Shar-e-Babak, Kerman. Journal of Economic Geology, 11(1): 57–80. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v11i1.63353
- Brown, M., Lewis, H.G. and Gunn, S.R., 2000. Linear spectral mixture models and support

vector machines for remote sensing. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 38(5): 2346–2360.

https://doi.org/10.1109/36.868891

- Cortes, C. and Vapnik, V., 1995. Support-Vector Networks. Machine Learning 20: 273–297. https://doi.org/10.1007/BF00994018
- Cracknell, M.J. and Reading, A.M., 2013. The upside of uncertainty: Identification of lithology contact zones from airborne geophysics and satellite data using random forests and support vector machines. Geophysics, 78(3): WB113– WB126. https://doi.org/10.1190/geo2012-0411.1
- Cracknell, M.J. and Reading, A.M., 2014. Geological mapping using remote sensing data: A comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information. Computers & Geosciences, 63: 22–33.

https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.008

Curilem, M., Acuña, G., Cubillos, F. and Vyhmeister, E., 2011. Neural networks and support vector machine models applied to energy consumption optimization in semiautogeneous grinding. Chemical Engineering Transactions, 25: 761–766.

http://dx.doi.org/10.3303/CET1125127

- Ebrahimi, S., Alirezaei, S. and Pan, Y., 2011. Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. A.N. Sial, J. S. Bettencourt, C.P.D. Campos and V.P. Ferreira, (Editors), Granite-Related Ore Deposits, Geological Society of London, England, pp. 133– 147. https://doi.org/10.1144/SP350.8
- Ezzati, S.A., Mehrnia, S.R. and Ajayebi, K.S., 2016.
 Remote Sensing Analysis of Mineralized Alteration in the Ramand Area (Qazvin Province). Journal of Economic Geology, 8(1): 223–238. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v8i1.20972
- Foody, G.M. and Mathur, A., 2004. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 42(6): 1335– 1343.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.827257

Forson, E.D. and Amponsah, P.O., 2023. Mineral prospectivity mapping over the Gomoa Area of

Journal of Economic Geology, ?, Vol. ?, No. ?

Ghana's southern Kibi-Winneba belt using support vector machine and naive bayes. Journal of African Earth Sciences, 206: 105024. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105024

- Gasmi, A., Gomez, C., Zouari, H., Masse, A. and Ducrot, D., 2016. PCA and SVM as geocomputational methods for geological mapping in the southern of Tunisia, using ASTER remote sensing data set. Arabian Journal of Geosciences, 9(20): 753. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2791-1
- Ge, W., Cheng, Q., Jing, L., Armenakis, C. and Ding, H., 2018. Lithological discrimination using ASTER and Sentinel-2A in the Shibanjing ophiolite complex of Beishan orogenic in Inner Mongolia, China. Advances in Space Research, 62(7): 1702–1716.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.036

- Ghoneim, S.M., Hamimi, Z., Abdelrahman, K., Khalifa, M.A., Shabban, M. and Abdelmaksoud, A.S., 2024. Machine learning and remote sensing-based lithological mapping of the Duwi Shear-Belt area, Central Eastern Desert, Egypt. Scientific Reports, 14(1): 17010. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66199-3
- Gualtieri, J.A. and Cromp, R.F., 1999. Support vector machines for hyperspectral remote sensing classification. 27th AIPR Workshop: Advances in Computer-Assisted Recognition, International Society for Optics and Photonics, Bellingham, USA. https://doi.org/10.1117/12.339824
- Harvey, A. and Fotopoulos, G., 2016. Geological mapping using machine learning algorithms. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences XLI-B8: 423–430. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-423-2016
- Hashemian, E., Jamali, H. and Ahmadian, J., 2019.
 Mineralogy, alteration, fluid inclusion and geochemical constraints of the Tappeh-Khargoosh Cu-Au deposit (SW Ardestan).
 Journal of Economic Geology, 10(2): 299–324. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v10i2.62445
- Hassanpour, S., 2013. The alteration, mineralogy and geochronology (SHRIMP U–Pb and 40 Ar/39 Ar) of copper-bearing Anjerd skarn, north of the Shayvar Mountain, NW Iran. International Journal of Earth Sciences, 102: 687–699. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.1007/s00531-012-0819-7

- Hassanpour, S., Alirezaei, S., Selby, D. and Sergeev, S., 2015. SHRIMP zircon U–Pb and biotite and hornblende Ar–Ar geochronology of Sungun, Haftcheshmeh, Kighal, and Niaz porphyry Cu– Mo systems: evidence for an early Miocene porphyry-style mineralization in northwest Iran. International Journal of Earth Sciences, 104: 45– 59. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.1007/s00531-014-1071-0
- Hassanpour, S. and Rajabpour, S., 2019. The kighal porphyry Cu–Mo deposit, NW Iran: insights into origin and evolution of the mineralizing fluids. Russian Geology and Geophysics, 60(10): 1141– 1162. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.15372/RGG2019115
- Hassanpour, S. and Rajabpour, S., 2020. Magmatichydrothermal evolution of the Anjerd Cu skarn deposit, NW Iran: perspectives on mineral chemistry, fluid inclusions and stable isotopes. Ore Geology Reviews, 117: 103269. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103269

- He, J., Harris, J., Sawada, M. and Behnia, P., 2015. A comparison of classification algorithms using Landsat-7 and Landsat-8 data for mapping lithology in Canada's Arctic. International Journal of remote sensing, 36(8): 2252–2276. https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1035410
- Heshmatnia, S., Tale Fazel, E. and Oroji, A., 2022. The role of sulfidation of Fe-carbonate rocks in increasing gold contents at the Zarshuran deposit (northern Takab), Takab-Angouran metallogenic district. Journal of Economic Geology 14(4): 89– 114. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.2022.75417.1042
- Hosseini Dinani, H., Bagheri, H. and Shamsipour Dehkordi, R., 2012. Mineralization and geochemical studies in the Kalchouyeh occurrence, southwest of Naein. Journal of Economic Geology, 4(2): 241–256. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v4i2.16494

- Hosseinzadeh, G., 1999. Study of economic geology on the Anjerd skarn, North of Ahar Town. Unpublished MSc. Thesis. University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian)
- Huang, C., Davis, L. and Townshend, J., 2002. An assessment of support vector machines for land cover classification. International Journal of

Journal of Economic Geology, ?, Vol. ?, No. ?

DOI: 10.22067/econg.2025.1138

remote sensing, 23(4): 725-749. https://doi.org/10.1080/01431160110040323

Hussain, M., Li, H., Beshr, A.M. and Memon, F. A., 2025. Remote sensing-based structural and lithological mapping for prospecting polymetallic mineralization at Xiaoshan region, China. Earth Science Informatics 18(1): 82.

https://doi.org/10.1007/s12145-024-01614-x

- Imamalipour, A., Abdeli Eslamlo, H. and Haj Alilou,
 B., 2011. Geochemistry of hydrothermal alterations associated with epithermal gold mineralization in Masjeddaghi area, east of Jolfa, NW Iran. Journal of Economic Geology, 2(2): 199–215. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v2i2.7851
- Kashkoei Jahroomi, M. and Qishlaqi, A., 2016. A new approach for hydrothermal alteration mapping by selecting and interpreting principal components in Landsat ETM+ images. Journal of Economic Geology, 8(1): 181–199. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v8i1.31997

- Kavoshgaran, C. E., 2012. Final report on general gold exploration in the Zeglik-Sarilar area, National Iranian Copper Industries Company (NICICO), Tehran, 254 pp. (in Persian)
- Khodadadzadeh, M., Li, J., Plaza, A., Ghassemian, H., Bioucas-Dias, J. M. and Li, X., 2014. Spectral–spatial classification of hyperspectral data using local and global probabilities for mixed pixel characterization. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 52(10): 6298– 6314.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2296031

- Komeili, S.S., Khalili, M., Asadi Haroni, H., Bagheri, H. and Ayati, F., 2017. The nature of hydrothermal fluids in the Kahang porphyry copper deposit (Northeast of Isfahan) based on mineralography, fluid inclusion and stable isotopic data. Journal of Economic Geology, 8(2): 285–305. (in Persian with English abstract), https://doi.org/10.22067/econg.v8i2.37178
- Kovacevic, M., Bajat, B., Trivic, B. and Pavlovic, R., 2009. Geological units classification of multispectral images by using support vector machines. 2009 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, United States, Ieee.

https://doi.org/10.1109/INCOS.2009.44

Lu, J., Han, L., Liu, L., Wang, J., Xia, Z., Jin, D. and

Zha, X., 2023. Lithology classification in semiarid area combining multi-source remote sensing images using support vector machine optimized by improved particle swarm algorithm. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 119: 103318. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103318

Maanijou, M. and Mostaghimi, M., 2014. The mass balance calculation of hydrothermal alteration in Sarcheshmeh porphyry copper deposit. Journal of Economic Geology, 5(2): 175–199. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v5i2.31718

Mazloumi Bajestani, A. and Rasa, I., 2010. Alteration and petrology of Intrusive Rocks associated with Gold Mineralization at Kuh-E-Zar Gold Deposit, Torbat-e-Heydaryeh. Journal of Economic Geology, 1(1): 57–69. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v1i1.3681

- Mehrabi, B., Chaghaneh, N. and Tale Fazel, E., 2014. Intermediate sulfidation epithermal mineralization of No. 4 anomaly of Golojeh deposit (N. Zanjan) based on mineralography, alteration and ore fluid geochemistry features. Journal of Economic Geology, 6(1): 1–22. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v6i1.38302
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M. and Fazeli, T., 2021. Fluid inclusions, mineralogy and mineral chemistry of the porphyry-epithermal Sari Gunay epithermal ore deposit - the Kurdistan province. Journal of Economic Geology, 12(4): 509–530. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v12i4.83516
- Mehvari, R., Shamsipour Dehkordi, R., Bagheri, H., Noghreyan, M. and Mackizadeh, M. A., 2010. Mineralogy and fluid inclusion studies in kalchoye Copper- gold deposit, East of Esfahan. Journal of Economic Geology, 1(1): 47–55. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v1i1.3680
- Melgani, F. and Bruzzone, L., 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 42(8): 1778– 1790.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831865

Mondal, S., Guha, A. and Pal, S.K., 2024. Support vector machine-based integration of AVIRIS NG

Journal of Economic Geology, ?, Vol. ?, No. ?

hyperspectral and ground geophysical data for identifying potential zones for chromite exploration–A study in Tamil Nadu, India. Advances in Space Research, 73(2): 1475–1490. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.048

- Moritz, R., Selby, D., Ovtcharowa, M., Mederer, J., Melkonyan, R., Hovakimyan, S., Tayan, R., Popkhadze, N., Gugushvili, V. and Ramazanov, V., 2012. Diversity of geodynamic settings during Cu, Au and Mo ore formation in the Lesser Caucasus: new age constraints. Proceedings 1st Triennial European Mineralogy and Crystallography Meeting, Frankfurt, Germany.
- Nabavi, M., 1976. An introduction to the Iranian geology. Geological Survey of Iran, Tehran, 110 pp. (in Persian)
- Othman, A. and Gloaguen, R., 2014. Improving lithological mapping by SVM classification of spectral and morphological features: The discovery of a new chromite body in the Mawat ophiolite complex (Kurdistan, NE Iraq). Remote Sensing, 6(8): 6867–6896.

https://doi.org/10.3390/rs6086867

Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. International Journal of remote sensing, 26(1): 217–222.

https://doi.org/10.1080/01431160412331269698

- Pereira, J., Pereira, A., Gil, A. and Mantas, V. M., 2023. Lithology mapping with satellite images, fieldwork-based spectral data, and machine learning algorithms: The case study of Beiras Group (Central Portugal). Catena, 220: 106653. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106653
- Pournamdari, M. and Hashim, M., 2014. Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data. Arabian Journal of Geosciences, 7(5): 1973–1983.

https://doi.org/10.1007/s12517-013-0927-0

- Rahmani, N., Sekandari, M., Pour, A.B., Ranjbar, H. and Carranza, E.J.M., 2025. Evaluation of support vector machine classifiers for lithological mapping using PRISMA hyperspectral remote sensing data: Sahand–Bazman magmatic arc, central Iran. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 37: 101449. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101449
- Rajabpour, S., Hassanpour, S., Radmard, K. and Moghaddasi, S.J., 2022. Nature and genesis of the Zaglic Au deposit, NW Iran: Constraints from

geochemical studies. Journal of Geochemical Exploration, 238: 107001.

https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107001

- Rajabzadeh, M.A. and Esmaeili, S., 2013. Study on mineralization at Jian copper deposit, Fars province, using petrographical and geochemical data. Journal of Economic Geology, 5(1): 93–104. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v5i1.22912
- Ramezani, Z., Alirezaei, S. and Einali, M., 2021. The mineralogy, texture and fluid inclusion characteristics of Meideh silicic zone, north Pariz, Kerman copper belt; investigation of genetic relations with porphyry systems. Journal of Economic Geology, 13(4): 667–695. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.2021.51673.84923

Riahi, S., Fathianpour, N. and Tabatabaei, S.H., 2017. Presenting a mapping method based on fuzzy Logic and TOPSIS multi criteria decisionmaking methods to detect promising porphyry copper mineralization areas in the east of the Sarcheshmeh copper metallogenic district. Journal of Economic Geology, 9(2): 357–374. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.45829

- Shebl, A., Abriha, D., Fahil, A.S., El-Dokouny, H.A., Elrasheed, A.A. and Csámer, Á., 2023. PRISMA hyperspectral data for lithological mapping in the Egyptian Eastern Desert: Evaluating the support vector machine, random forest, and XG boost machine learning algorithms. Ore Geology Reviews, 161: 105652. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105652
- Shereif, A.S., Shebl, A., Mahmoud, A.S. and Csámer, Á., 2024. Enhanced Lithological Mapping in El-Missikat and El-Erediya Areas, Central Eastern Desert, Egypt, Leveraging Remote Sensing Techniques and Machine Learning Algorithms. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 62: 4512527. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3471982
- Suykens, J.A., De Brabanter, J., Lukas, L. and Vandewalle, J., 2002. Weighted least squares support vector machines: robustness and sparse approximation. Neurocomputing, 48(1–4): 85– 105.

https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00644-0

Taghipour, B. and Mackizadeh, M.A., 2011. Petrogenesis of skarn related Cu-porphyry

Journal of Economic Geology, ?, Vol. ?, No. ?

intrusion deposit, Ali-Abad- Darreh Zereshk, Yazd. Journal of Economic Geology, 3(1): 79–92. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v3i1.11444

Wang, Z. and ChangYu, Z., 2010. Rocks/Minerals Information Extraction from EO-1 Hyperion Data Base on SVM. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, IEEE Computer Society, Changsha, China. https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.341

- Yousefi, S.J. and Moradian, A., 2012. Mineralization model for Chahar Gonbad copper-gold deposit (Sirjan), using mineralogical, alteration and geochemical data and multivariate statistical methods. Journal of Economic Geology, 4(1): 135–153. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13397
- Yu, L., Porwal, A., Holden, E.-J. and Dentith, M. C., 2012. Towards automatic lithological classification from remote sensing data using support vector machines. Computers & Geosciences, 45: 229–239. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.11.019
- Zarasvandi, A., Asadi, F., Pourkaseb, H., Ahmadnejad, F. and Zamanian, H., 2015.

Hydrothermal Fluid evolution in the Dalli porphyry Cu-Au Deposit: Fluid Inclusion microthermometry studies. Journal of Economic Geology, 7(2): 277–306. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.v7i2.38447

Zarasvandi, A., Tashi, M., Rezaei, M., Saki, A. and Mousivand, F., 2022. Geology and geochemistry of the Choran porphyry-epithermal Cu-Au deposit in the Dehej-Sarduveyeh subzone, Urumieh-Dokhtar magmatic arc. Journal of Economic Geology, 14(1): 39–66. (in Persian with English abstract)

https://doi.org/10.22067/econg.2021.52017.87614

Ziaii, M., Abedi, A. and Ziaii, M., 2007, September.
Prediction of hidden ore bodies by new integrated computational model in marginal Lut region in east of Iran. In Proceedings of Exploration 07:
Fifth Decennial International Conference Mineral Exploration, Toronto, Canada.

https://www.911metallurgist.com/wpcontent/uploads/2015/10/Prediction-of-Hidden-Ore-Bodies-by-New-Integrated-Computational-Model-in-Marginal-Lut-region-in-East-of-Iran.pdf