



## Research Article

### Combination of Landsat-8 and Sentinel-2 images in order to detect alterations of porphyry deposits (Masjed Daghi), northwest Iran

Maryam Khani Alamooti<sup>1</sup>, Susan Ebrahimi<sup>1\*</sup> , Behnaz Bigdeli<sup>2</sup>

1-Department of Mineral Exploration, Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2-Department of Geotechnical and Transport Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 27 Apr 2024 Accepted: 21 Sep 2024

## Extended Abstract

### Introduction

Remote sensing is one of the widely used methods in geology and exploration of mineral deposits and plays an important role in identifying changes. Different methods of remote sensing have made it possible to investigate and study a wide range with accuracy, speed and less cost. Since the change related to porphyry mineralization have a suitable expansion; therefore, this type of deposits can be suitable index in the methods and discoveries of porphyry deposits. Masjed Daghi copper porphyry area is located 35 km east of Julfa in the East Azerbaijan province. The formation of epithermal gold veins on the porphyry deposit and the spatial and temporal relationship of two deposits have been investigated. The simultaneous use of Sentinel-2 sensor and Landsat-8 satellite and supervised classification methods based on machine learning was done for the first time in this research on Masjed Daghi porphyry deposit in northwest Iran. The aim of this study is to identify the types of alteration associated with porphyry deposits using different techniques of processing images from Sentinel-2 and Landsat-8 satellites; which can be a suitable exploration guide for porphyry copper deposits in Iran. In this study, band combination, band ratio (BR) and least squares regression (LS-Fit) methods have been used to determine the location of alteration zones. Also, supervised classification methods based on machine learning such as: maximum similarity (ML), neural network methods (ANN) and support vector machines (SVM) and the combination of these three classifications using the maximum voting (MV) method have been used for the accuracy and precision of using these images, and the positive impact and performance of these classifications in separating lithologies in geological maps has been investigated and confirmed (Farhadi et al., 2024). Also, these methods have been investigated in the chemical distribution of elements in the Iran Kouh lead and zinc deposit, and the results of this study showed that these methods were promising for predicting the elemental distribution of minerals (Farhadi et al. 2022). In this study, the results obtained were verified and confirmed using field evidence and geological studies. Simultaneous use of the Sentinel-2 sensor and the Landsat-8 satellite and classification methods supervised machine learning-based classification was performed for the first time in this research on a porphyry deposit in northwestern Iran. Also, using the output of the band ratio and band combination methods and the least squares regression as initial inputs as training and test data for use in machine learning methods and combining three classifications with the maximum voting method in the Landsat-8 satellite and the Sentinel-2 sensor was used for the first time, which has yielded good results.

**Citation:** Khani Alamooti, M., Ebrahimi, S. and Bigdeli, B., 2025. Combination of Landsat-8 and Sentinel-2 images in order to detect alterations, *Res. Earth. Sci.* 16(1), (104-127) DOI: 10.48308/esrj.2024.234408.1211

\* Corresponding author E-mail address: ebrahimisun@shahroodut.ac.ir



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## Materials and Methods

Detailed studies have been conducted on the alterations of the Masjed Daghi region, and based on them, six alterations have been recognized in the region. These alterations include potassic, phyllic, intermediate argillic, advanced argillic, silicic, and propylitic. Silicic, advanced argillic, intermediate argillic, and propylitic alterations are associated with epithermal gold mineralization and extend from the inside of the vein outwards, respectively. Alterations associated with porphyry copper mineralization include potassic, phyllic, intermediate argillic, and propylitic.

**Potassic alterations:** This alteration is visible with a small extension (2000 m<sup>2</sup>) around and on the adjacent of the Arpachay River. Geological studies in the area show that potassic alteration is affected by phyllic and argillic alterations and causes overlap between these alterations. The mineralogy of this alteration includes potassium feldspar, biotite, and magnetite with some sericite, chlorite, and clay minerals. **Phyllic alterations:** This alteration covers a large part of the area and covers the potassic alteration in the form and haloes around and on the adjacent of the Arpachay River. Mineralogical studies show that silicate minerals such as plagioclase, potassium feldspar, and ferromagnesian minerals (hornblende and biotite) in the parent rock have been altered and replaced by sericite and quartz as the main minerals and chlorite as the secondary mineral along the sulfide minerals. This alteration is widely overlapped by argillic alteration. Also, stony silica veins with minerals show a relatively good spread at the regional level and in the phyllic zone. **Advanced argillic:** This alteration is limited and formed in the vicinity of gold-bearing silica veins. This alteration had a great impact on the host rock (trachyandesite) and has transformed the plagioclase in the host rock into the clay minerals and destroyed the original texture of the rock. The minerals constituting this alteration include quartz, kaolinite, hypogene alunite, barite, pyrite and tourmaline. **Moderate argillic alteration:** It is spread with a relatively high spread in the middle part of the mineralization area and in many cases overlaps with phyllic alteration. The mineralogical composition of this alteration includes kaolinite, illite, quartz, and carbonate. **Propylitic alteration:** This alteration is the outermost alteration zone observed on the eastern margin of the region with a relatively limited extension. The characteristic minerals of this alteration are epidote, chlorite, and calcite, where hornblende and pyroxene have been transformed into chlorite and calcite, and plagioclase has been replaced by calcite, epidote, chlorite and also clay minerals. **Siliceous alteration:** This type of alteration is found around mineralized veins, which has provided a suitable environment and conditions for gold mineralization. The high silica values in the region indicate that the hydrothermal solutions are saturated with silica.

The siliceous alteration zone is one of the most alteration important alterations in the region, which appears in the form of veins and veinlets, these types of alterations are the main hosts of the gold mineralization. **Mineralization:** The Masjeddaghi mineralization system consist of two types of porphyry copper mineralization and epithermal gold. The most important mineralization in the Masjeddaghi porphyry deposit include rutile, molybdenite, magnetite, pyrite, chalcopryrite, bornite, sphalerite, chalcocite, and covellite. Epithermal gold mineralization include pyrite, chalcopryrite, bornite, galena, sphalerite, and gold associated with quartz, barite and anhydrite.

## Results and Discussion

The oldest rock unit of the region includes flysch sediment of Eocene age associated limestone, shale and conglomerate. The lithological volcanic composition are Eocene trachyandesite associated Oligocene monzodiorite. These host rock suffering potassic, phyllic, argillic, propylitic and silicic alteration. Mineralization system consist of two types of porphyry and epithermal systems. The most important minerals are molybdenite, magnetite, pyrite, bornite, chalcopryrite, and sphalerite in the porphyry system and pyrite, chalcopryrite, sphalerite, gold associated quartz, barite, and anhydrite in the epithermal system. Landsat-8 satellite images of the three supervised classifications of ANN, ML and SVM have the accuracy of 77.71%, 70.48% and 79.23% respectively. In the Sentinel-2 sensor, the tree supervised classifications of ANN, ML and SVM in Masjed Daghi region have the accuracy of 78.69%, 59.16% and 7.75%, respectively. The obtained results show the superiority of Sentinel-2 sensor over Landsat-8 in highlighting the variations in the study area of Masjed Daghi. Also, by comparing to kappa coefficients obtained from Landsat-8 and Sentinel-2, it emphasizes the superiority of Sentinel-2. Among the classifications applied on the images, SVM classification is more accurate in both satellites and sensors; this point indicates the better performance of Support Vector Machine (SVM) algorithm. But ML classification in Landsat-8 has a better performance than sentinel-2, which the kappa coefficient results will also confirm this issue. The output results of overall accuracy (OA) for the maximum voting (MV) method compared to support vector machine algorithm method have increased by about 3.75% in the Landsat-8 satellite. Maximum voting with 82.38% overall accuracy and 0.6868 kappa coefficient for Landsat-8 satellite indicate; the combining the output data of the

classification with the maximum voting method improve the identification of changes. Also, for the Sentinel-2 coefficient  $f$  0.7070 has increased by about 4.5% compared to the support vector machine method.

### Conclusion

1. Landsat-8 and Sentinel-2 data and its compliance with the geological range of Masjed Daghi region show that the Sentinel-2 sensor has better and higher accuracy than the Landsat-8 satellite. 2. The classification of the support vector in the Landsat-8 satellite and Sentinel-2 sensor in the study area of Masjed Daghi has a higher accuracy and kappa coefficient, and the Sentinel-2 sensor has a higher accuracy and precision than the Landsat-8 satellite. Using the classification (Neural network, maximum similarity and support vector machine) using the Sentinel-2 sensor and the Landsat-8 satellite shows; the support machine classification in the Landsat-8 satellite and the Sentinel-2 sensor in the Masjeddaghi study area has higher accuracy and kappa coefficient, and the Sentinel-2 sensor has higher accuracy and precision than the Landsat-8 satellite. Also these three classification compared to the band ration methods, the last squares regression and the band combination have higher accuracy for highlighting the changes in the study area. In the accuracy section, all three classification are compared with each other in numerical formed finally their combination. 3. Sentinel-2 and Landsat-8 data show the overall accuracy output for the maximum voting method compared to the support vector machine algorithm method in satellite Landsat-8 has increased by about 75.3%, which shows that combining the output data of the classifications using the maximum voting approach has improved the identification of changes. 4. Sentinel-2 detector has a very high accuracy in the presented classifications and in the maximum ratio voting method due to its better spectral and spatial power to the Landsat-8 satellite.

**Keywords:** Arasbaran, Sentinel-2, Landsat-8, Porphyry copper, Masjed Daghi.

## استفاده هم‌زمان تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ جهت بارزسازی دگرسانی‌های مس پورفیری (مسجدداغی)، شمال غرب ایران

مریم خانی الموتی<sup>۱</sup>، سوسن ابراهیمی<sup>۱\*</sup> ID، بهناز بیگدلی<sup>۲</sup>

۱- گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- گروه مهندسی راه و نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

### چکیده گسترده

#### مقدمه

سنجش از دور یکی از روش‌های پرکاربرد در زمین‌شناسی و اکتشافات ذخایر معدنی است و نقش مهمی در شناسایی دگرسانی‌ها ایفا می‌نماید. روش‌های متفاوت سنجش از دور امکان بررسی و مطالعه بر روی یک محدوده گسترده را با دقت، سرعت و هزینه کم‌تر میسر ساخته است. از آنجا که دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی پورفیری از گسترش مناسبی برخوردار هستند؛ لذا این نوع ذخایر می‌توانند شاخص مناسبی در روش‌های دورسنجی و اکتشافات ذخایر پورفیری باشند. محدوده مس پورفیری مسجدداغی در ۳۵ کیلومتری شرق شهرستان جلفا در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. تشکیل رگه‌های اپی‌ترمال طلا بر روی کانسار پورفیری و ارتباط مکانی و زمانی این دو کانسار مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده هم‌زمان سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ و روش‌های طبقه‌بندی‌کننده نظارت‌شده مبتنی بر یادگیری ماشین برای اولین بار در این تحقیق بر روی کانسار پورفیری مسجدداغی در شمال غرب ایران انجام شد. هدف از این پژوهش تشخیص انواع دگرسانی‌های مرتبط با ذخیره پورفیری با استفاده از تکنیک‌های مختلف پردازش تصاویر سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ می‌باشد؛ که می‌تواند راهنمای اکتشافی مناسبی برای ذخایر مس پورفیری در ایران باشد. در این پژوهش از روش‌های ترکیب باندی، نسبت باندی (BR) و روش کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit) جهت تعیین موقعیت زون‌های دگرسانی استفاده شده است. همچنین از روش‌های طبقه‌بندی‌کننده نظارت‌شده مبتنی بر یادگیری ماشین مانند: بیشترین شباهت (ML)، روش‌های شبکه‌های عصبی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) و تلفیق این سه طبقه‌بندی با استفاده از روش رای‌گیری حداکثری (MV) جهت صحت و دقت استفاده از این تصاویر استفاده شده است که تاثیر و عملکرد مثبت این طبقه‌بندی‌ها در تفکیک لیتولوژی‌ها در نقشه‌های زمین‌شناسی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است (Farhadi et al, 2024). همچنین این روش‌ها در توزیع شیمیایی عناصر در کانسار سرب و روی ایران کوه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج این تحقیق نشان داد، این روش‌ها برای پیش‌بینی توزیع عنصری مواد معدنی امیدوار کننده بوده است (Farhadi et al, 2022). در این تحقیق نتایج به‌دست آمده با استفاده از شواهد صحرایی و مطالعات زمین‌شناسی مورد راستی‌آزمایی و تأیید قرار گرفت. استفاده هم‌زمان سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ و روش‌های طبقه‌بندی‌کننده نظارت‌شده مبتنی بر یادگیری ماشین برای اولین بار در این تحقیق بر روی کانسار پورفیری در شمال غرب ایران انجام شد.

استناد: خانی الموتی، م.، ابراهیمی، س. و بیگدلی، ب.، ۱۴۰۴. استفاده هم‌زمان تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ جهت بارزسازی

دگرسانی‌های مس، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۱)، (۱۲۷-۱۰۴)، DOI: 10.48308/esrj.2024.234408.1211

E-mail: ebrahimisun@shahroodut.ac.ir

\* نویسنده مسئول:



همچنین استفاده از خروجی روش‌های نسبت باندی و ترکیب باندی و کمترین مربعات رگرسیون شده به عنوان ورودی‌های اولیه به صورت داده‌های آموزشی و آزمایشی جهت استفاده در روش‌های یادگیری ماشین و تلفیق سه طبقه‌بندی با روش رای گیری حداکثری در ماهواره لندست-۸ و سنجنده سنتینل-۲ برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفت که نتایج خوبی را به همراه داشته است.

## مواد و روش‌ها

مطالعات دقیقی بر روی دگرسانی‌های منطقه مسجدداغی صورت گرفته است و بر مبنای آن شش دگرسانی در منطقه تشخیص داده شده است. این دگرسانی‌ها شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک حدواسط، آرژیلیک پیشرفته، سیلیسی و پروپیلیتیک است. دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک پیشرفته، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک با کانی‌سازی طلاپی‌ترمال مرتبط بوده و به ترتیب از داخل رگه به سمت خارج گسترش دارد. دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک حدواسط و پروپیلیتیک است.

**دگرسانی پتاسیک:** این دگرسانی با گسترش کم (۲۰۰۰ مترمربع) در اطراف و حاشیه رودخانه آرپاجای قابل مشاهده است (شکل ۲). مطالعات نشان می‌دهد، دگرسانی پتاسیک تحت‌تاثیر دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک قرار گرفته و باعث همپوشانی بین این دگرسانی‌ها شده است. کانی‌شناسی این دگرسانی شامل پتاسیم فلدسپار، بیوتیت و مگنتیت همراه با مقادیری سربیسیت، کلریت و رس می‌باشد.

**دگرسانی فیلیک:** این دگرسانی بخش وسیعی از سطح منطقه را در بر می‌گیرد و در اطراف و حاشیه رودخانه آرپاجای به صورت هاله‌هایی دگرسانی پتاسیک را پوشانده است (شکل ۲). مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد، کانی‌های سیلیکاته مانند پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار و کانی‌های فرومنیزین (هورنبلند و بیوتیت) در سنگ اولیه دگرسان شده و به کانی‌های سربیسیت و کوارتز به عنوان کانی‌های اصلی و کلریت به عنوان کانی فرعی همراه با کانی‌های سولفیدی جانشین شده‌اند. این دگرسانی به‌طور گسترده توسط دگرسانی آرژیلیک همپوشانی شده است. همچنین رگچه‌های سیلیسی استوکورکی همراه با مواد معدنی در سطح منطقه و در زون فیلیک گسترش نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد.

**دگرسانی آرژیلیک پیشرفته:** این دگرسانی به‌طور محدود و در مجاورت رگه‌های سیلیسی طلادار تشکیل شده است. این دگرسانی بر روی سنگ میزبان (تراکی آندزیت) تاثیر زیادی داشته و پلاژیوکلاز موجود در سنگ میزبان را به کانی‌های رسی تبدیل کرده و بافت اولیه سنگ را از بین برده است. کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی شامل کوارتز، کائولینیت، آلونیت، هیپوزن، باریت، پیریت و تورمالین است.

**دگرسانی آرژیلیک متوسط:** با گسترش نسبتاً زیاد در بخش میانی محدوده کانی‌سازی گسترش دارد و در بسیاری موارد با دگرسانی فیلیک همپوشانی حاصل کرده است (شکل ۲). ترکیب کانی‌شناسی این دگرسانی شامل کائولینیت، ایلیت، کوارتز و کربنات است.

**دگرسانی پروپیلیتیک:** این دگرسانی با گسترش نسبتاً محدود خارجی‌ترین زون دگرسانی است که در حاشیه شرقی منطقه مشاهده شده است. کانی‌های شاخص این دگرسانی اپیدوت، کلریت و کلسیت است که هورنبلند و پیروکسن به کلریت و کلسیت تبدیل شده و پلاژیوکلاز توسط کلسیت، اپیدوت، کلریت و هم‌چنین کانی‌های رسی جایگزین شده است.

**دگرسانی سیلیسی:** این نوع دگرسانی در اطراف رگه‌های مینرالیزه یافت می‌شود که محیط و شرایط مناسبی برای کانی‌سازی طلا را فراهم کرده است. مقادیر بالای سیلیس در منطقه، بیان‌گر اشباع بودن محلول‌های هیدروترمال از سیلیس می‌باشد. زون دگرسانی سیلیسی یکی از مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در منطقه است که به‌صورت رگه و رگچه نمایان می‌شود، این نوع دگرسانی‌ها میزبان اصلی کانی‌سازی طلا هستند.

**کانی‌سازی:** سیستم کانی‌سازی مسجدداغی از دو نوع کانی‌سازی مس پورفیری و طلاپی‌ترمال تشکیل شده است. مهم‌ترین کانی‌سازی موجود در کانسار پورفیری مسجدداغی شامل کانی‌های روتیل، مولیبدنیت، منیتیت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت، کالکوسیت و کولیت می‌باشد. کانی‌سازی طلاپی‌ترمال شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، اسفالریت و طلا همراه با کوارتز، باریت و انیدریت است.

در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست-۸ و سنتینل-۲ برای بارزسازی و مشخص کردن دگرسانی‌های موجود در منطقه استفاده شده است. در این پژوهش از روش‌های ترکیب باندی، نسبت باندی (BR) و روش کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit) جهت تعیین موقعیت زون‌های دگرسانی استفاده شده است. همچنین از روش‌های طبقه‌بندی کننده نظارت‌شده مبتنی بر یادگیری ماشین مانند: بیشترین شباهت (ML)، روش‌های شبکه‌های عصبی (ANN) و ماشین‌بردارپشتیبان (SVM) و تلفیق این سه طبقه‌بندی با استفاده از روش رای‌گیری حداکثری (MV) جهت صحت و دقت استفاده از این تصاویر استفاده شده است.

## نتایج و بحث

کانی‌سازی مس- طلا مسجدداغی در شرق شهرستان جلفا و در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، شامل مجموعه‌ای از نهشته‌های تخریبی فلیش مرتبط به زمان ائوسن یا قدیمی‌تر است که گسترش زیادی در شرق و جنوب محدود دارد. نهشته‌های فلیش متشکل از ماسه‌سنگ، آهک، شیل و سیلت همراه با لایه‌هایی از کنگلومرای خاکستری و سبز رنگ است و به دلیل فرسایش‌پذیری غیرهمگن مورفولوژی ملایم تا خشن ایجاد کرده است. ترکیبات سنگ‌شناسی منطقه شامل واحد تراکی آندزیتی ائوسن و توده نفوذی کوارتز مونزودیوریت الیگوسن است که به داخل سنگ‌های آتشفشانی منطقه نفوذ کرده است و در سطح رخنمون کمی دارد. سیستم کانی‌سازی مسجدداغی از دو نوع کانی‌سازی مس پورفیری و طلای اپی ترمال تشکیل شده است. مهم‌ترین کانی‌سازی موجود در کانسار پورفیری مسجدداغی شامل کانی‌های روتیل، مولیبدنیت، منیتیت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت، کالکوسیت و کوولیت می‌باشد. کانی‌سازی طلای اپی ترمال شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، اسفالریت و طلا همراه با کوارتز، باریت و انیدریت است. تصاویر ماهواره لندست-۸ سه طبقه‌بندی نظارت‌شده SVM و ML، ANN به ترتیب از دقت ۷۷/۷۱ درصد، ۷۰/۴۸ درصد و ۷۹/۲۳ درصد برخوردار است. در سنجنده سنتینل-۲ نیز سه طبقه‌بندی نظارت‌شده SVM و ML، ANN در محدوده مسجدداغی به ترتیب از دقت ۷۸/۶۹ درصد، ۵۹/۱۶ درصد و ۷۹/۵۷ درصد برخوردار است. نتایج به دست آمده نشان از برتری سنجنده سنتینل-۲ نسبت به لندست-۸ در بارزسازی دگرسانی‌های موجود در محدوده مطالعاتی مسجدداغی دارد. همچنین با مقایسه ضرایب کاپا به دست آمده از لندست-۸ و سنتینل-۲ بر این برتری سنتینل-۲ تأکید دارد. در بین طبقه‌بندی‌های اعمال‌شده بر روی تصاویر طبقه‌بندی SVM در هر دو ماهواره و سنجنده از دقت بالاتری برخوردار است؛ که این نکته نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم ماشین‌بردارپشتیبان (SVM) است. اما طبقه‌بندی ML در لندست-۸ نسبت به سنتینل-۲ دارای عملکرد بهتری است، که نتایج ضریب کاپا نیز این موضوع را تأیید خواهد کرد. نتایج خروجی دقت کلی (OA) برای روش رای‌گیری حداکثری (MV) نسبت به روش الگوریتم ماشین‌بردارپشتیبان (SVM)، در ماهواره لندست-۸ حدود ۳/۷۵٪ افزایش یافته است. رای‌گیری حداکثری با دقت کلی ۸۲/۳۸٪ و ضریب کاپا ۰/۶۸۶۸ برای ماهواره لندست-۸ نشان‌دهنده این است؛ که تلفیق داده‌های خروجی طبقه‌بندی‌ها به روش رای‌گیری حداکثری (MV) موجب بهبود در شناسایی دگرسانی‌ها است. همچنین برای ماهواره سنتینل-۲ رویکرد رای‌گیری حداکثری با دقت کلی ۸۴/۰۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۰۷۰، نسبت به روش ماشین‌بردارپشتیبان، حدوداً ۴/۵ درصد افزایش داشته است.

## نتیجه‌گیری

- ۱: سنجنده سنتینل-۲ نسبت به ماهواره لندست-۸ در روش‌های ترکیب‌باندی، نسبت‌باندی، کمترین مربعات رگرسیون‌شده دارای دقت بهتر و بالاتری است.
- ۲: طبقه‌بندی ماشین‌بردارپشتیبان در ماهواره لندست-۸ و سنجنده سنتینل-۲ در محدوده مطالعاتی مسجدداغی از دقت و ضریب کاپا بالاتری برخوردار است و سنجنده سنتینل-۲ نسبت به ماهواره لندست-۸ دارای دقت و صحت بالاتری است.
- ۳: تلفیق داده‌های خروجی طبقه‌بندی‌ها به روش رای‌گیری حداکثری موجب بهبود در شناسایی‌های دگرسانی‌ها شده است. همچنین برای سنجنده سنتینل-۲ رویکرد رای‌گیری حداکثری با دقت کلی ۸۴/۰۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۰۷۰، نسبت به روش ماشین‌بردار پشتیبان حدوداً ۴/۵ درصد افزایش داشته است.

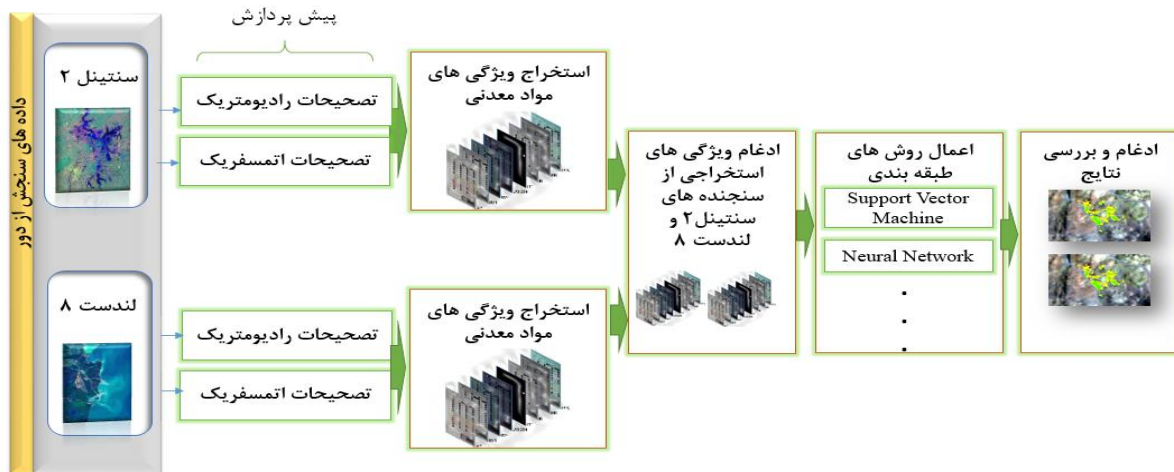
۴: ادغام دو سنجنده جهت مطالعات اکتشافی بسیار کارآمد و سودمند است، همچنین سنجنده سنتینل-۲ به دلیل قدرت طیفی و مکانی بهتر دارای دقت بسیار بالایی در طبقه‌بندی‌های ارائه شده و در روش رای‌گیری حداکثری نسبت به ماهواره لندست-۸ دارد.

**واژگان کلیدی:** ارسباران، سنتینل-۲، لندست-۸، مس پورفیری، مسجدداغی.

## مقدمه

سنجش از دور یکی از روش‌های پرکاربرد در زمین‌شناسی و اکتشافات ذخایر معدنی است و نقش مهمی در شناسایی دگرسانی‌ها ایفا می‌نماید. روش‌های متفاوت سنجش از دور امکان بررسی و مطالعه بر روی یک محدوده گسترده را با دقت، سرعت و هزینه کم‌تر میسر ساخته است. از آنجا که دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی پورفیری از گسترش مناسبی برخوردار هستند؛ لذا این نوع ذخایر می‌توانند شاخص مناسبی در روش‌های دورسنجی و اکتشافات ذخایر پورفیری باشند. محدوده مس پورفیری مسجدداغی در ۳۵ کیلومتری شرق شهرستان جلفا در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. تشکیل رگه‌های اپی‌ترمال طلا بر روی کانسار پورفیری و ارتباط مکانی و زمانی این دو کانسار مورد بررسی قرار گرفته است (Ebrahimi et al, 2017). بیش از ۴۰ گمانه حفاری در منطقه جهت مطالعات اکتشافی انجام شده است که بر اساس حفاری‌های انجام شده ذخیره مس این کانسار ۳۴۰ میلیون تن برآورد شده است. مولیبدن و طلا به صورت محصول جانبی با آن همراه است و میانگین مقدار مس ۰/۳ درصد و مولیبدن ۶۰ میلی‌گرم در تن است (Afzal et al, 2023). از طرفی مطالعات شبیه‌سازی آماری و فرکتال در این منطقه نشان می‌دهد؛ بخش‌های حاشیه‌ای این کانسار منابع استنباط شده را تشکیل داده است که نیاز به حفاری‌های بیشتر دارد (Afzal et al, 2023). هدف از این پژوهش تشخیص انواع دگرسانی‌های مرتبط با ذخیره پورفیری با استفاده از تکنیک‌های مختلف پردازش تصاویر سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ می‌باشد؛ که می‌تواند راهنمای اکتشافی مناسبی برای ذخایر مس پورفیری در ایران باشد. در این پژوهش از روش‌های ترکیب باندی، نسبت باندی (BR) و روش کمترین مربعات رگرسیون شده

(Ls-Fit) جهت تعیین موقعیت زون‌های دگرسانی استفاده شده است. همچنین از روش‌های طبقه‌بندی‌کننده نظارت‌شده مبتنی بر یادگیری ماشین مانند: بیشترین شباهت (ML)، روش‌های شبکه‌های عصبی (ANN) و ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) و تلفیق این سه طبقه‌بندی با استفاده از روش رای‌گیری حداکثری (MV) جهت صحت و دقت استفاده از این تصاویر استفاده شده است که تاثیر و عملکرد مثبت این طبقه‌بندی‌ها در تفکیک لیتولوژی‌ها در نقشه‌های زمین‌شناسی مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است (Farhadi et al, 2024). همچنین این روش‌ها در توزیع شیمیایی عناصر در کانسار سرب و روی ایران کوه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج این تحقیق نشان داد، این روش‌ها برای پیش‌بینی توزیع عنصری مواد معدنی امیدوار کننده بوده است (Farhadi et al, 2022). در این تحقیق نتایج به دست آمده با استفاده از شواهد صحرایی و مطالعات زمین‌شناسی مورد راستی آزمایی و تایید قرار گرفت. استفاده هم‌زمان سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ و روش‌های طبقه‌بندی‌کننده نظارت‌شده مبتنی بر یادگیری ماشین برای اولین بار در این تحقیق بر روی کانسار پورفیری در شمال‌غرب ایران انجام شد. همچنین استفاده از خروجی روش‌های نسبت باندی و ترکیب باندی و کمترین مربعات رگرسیون شده به عنوان ورودی‌های اولیه به صورت داده‌های آموزشی و آزمایشی جهت استفاده در روش‌های یادگیری ماشین و تلفیق سه طبقه‌بندی با روش رای‌گیری حداکثری در ماهواره لندست-۸ و سنجنده سنتینل-۲ برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفت که نتایج خوبی را به همراه داشته است. روش و نحوه انجام کار در یک فلوجارت مشخص شده است (شکل ۱).



شکل ۱: روش و نحوه انجام کار با استفاده از داده‌های سنتینل ۲ و لندست ۸

Fig. 1: Method of the using of Sentinel-2 and Landsat-8

کانی‌سازی طلا اپی‌ترمال مرتبط بوده و به ترتیب از داخل رگه به سمت خارج گسترش دارد. دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک حدودا وسط و پروپیلیتیک است.

**دگرسانی پتاسیک:** این دگرسانی با گسترش کم (۲۰۰۰ مترمربع) در اطراف و حاشیه رودخانه آرپاجای قابل مشاهده است (شکل ۲). مطالعات نشان می‌دهد، دگرسانی پتاسیک تحت‌تاثیر دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک قرار گرفته و باعث همپوشانی بین این دگرسانی‌ها شده است. کانی‌شناسی این دگرسانی شامل پتاسیم فلدسپار، بیوتیت و مگنتیت همراه با مقادیری سریسیت، کلریت و رس می‌باشد.

**دگرسانی فیلیک:** این دگرسانی بخش وسیعی از سطح منطقه را در بر می‌گیرد و در اطراف و حاشیه رودخانه آرپاجای به‌صورت هاله‌هایی دگرسانی پتاسیک را پوشانده است (شکل ۲). مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد، کانی‌های سیلیکاته مانند پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار و کانی‌های فرومنیزین (هورنبلند و بیوتیت) در سنگ اولیه دگرسان شده و به کانی‌های سریسیت و کوارتز به عنوان کانی‌های اصلی و کلریت به عنوان کانی فرعی همراه با کانی‌های سولفیدی جانشین شده‌اند. این دگرسانی به‌طور گسترده توسط دگرسانی آرژیلیک همپوشانی شده است. همچنین رگچه‌های سیلیسی استوکورکی همراه با مواد معدنی در سطح منطقه و در زون فیلیک گسترش نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

### زمین‌شناسی

کانی‌سازی مس- طلا مسجداغی در شرق شهرستان جلفا و در استان آذربایجان شرقی واقع شده است و از لحاظ زمین‌شناسی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ جلفا قرار دارد. محدوده مورد مطالعه با وسعت تقریبی ۸ کیلومتر مربع در بازه طول شرقی  $45^{\circ} 55' 53''$  تا  $45^{\circ} 57' 21''$  و عرض شمالی  $38^{\circ} 52' 16''$  تا  $38^{\circ} 53' 14''$  قرار دارد. قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، شامل مجموعه‌ای از نهشته‌های تخریبی فلیش مرتبط به زمان ائوسن یا قدیمی‌تر است که گسترش زیادی در شرق و جنوب محدوده دارد (شکل ۲). نهشته‌های فلیش متشکل از ماسه‌سنگ، آهک، شیل و سیلت همراه با لایه‌هایی از کنگلومرای خاکستری و سبز رنگ است و به دلیل فرسایش‌پذیری غیرهمگن مورفولوژی ملایم تا خشن ایجاد کرده است. ترکیبات سنگ‌شناسی منطقه شامل واحد تراکی‌اندزیتی ائوسن و توده نفوذی کوارتز مونوزودیوریت الیگوسن است که به داخل سنگ‌های آتشفشانی منطقه نفوذ کرده است و در سطح رخنمون کمی دارد (Mohammadi et al, 2006). مطالعات دقیقی بر روی دگرسانی‌های منطقه مسجداغی صورت گرفته است و بر مبنای آن شش دگرسانی در منطقه تشخیص داده شده است (Emamalipour et al, 2011; Mohammadi et al, 2006; Ebrahimi et al, 2017). این دگرسانی‌ها شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک حدودا وسط، آرژیلیک پیشرفته، سیلیسی و پروپیلیتیک است. دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک پیشرفته، آرژیلیک حدودا وسط و پروپیلیتیک با



توسط کلسیت، اپیدوت، کلریت و هم چنین کانی‌های رسی جایگزین شده است.

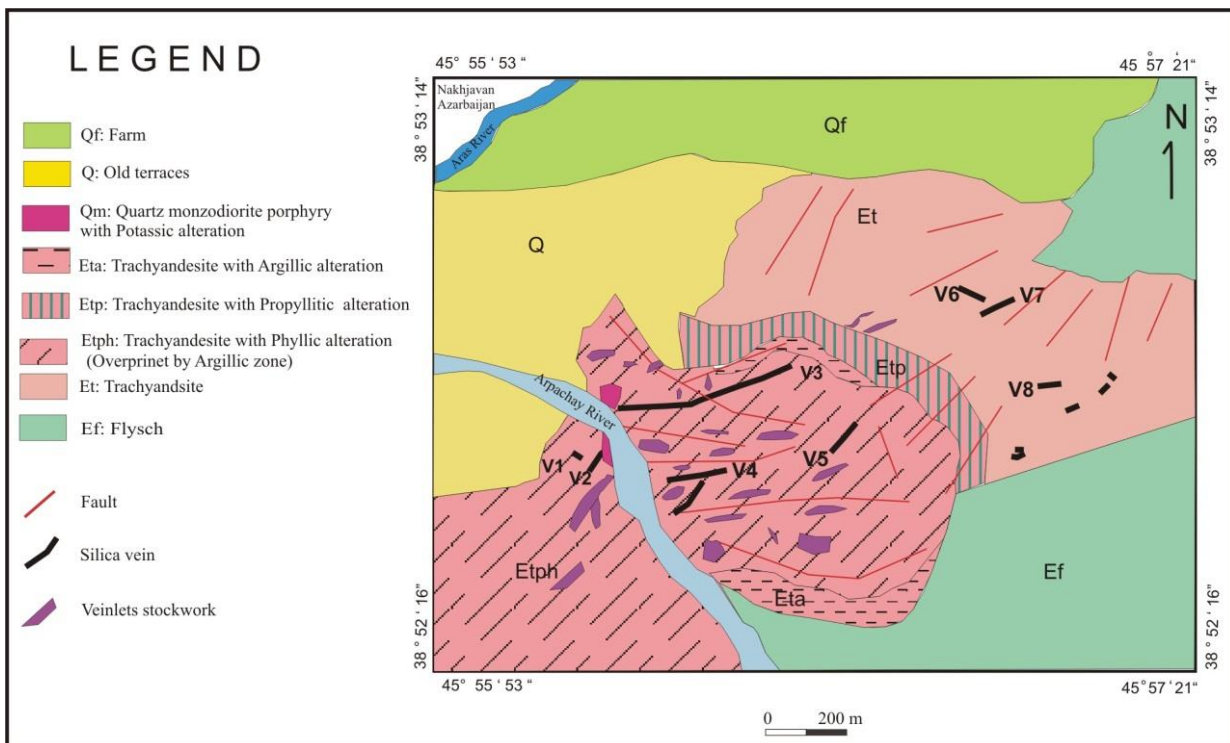
**دگرسانی سیلیسی:** این نوع دگرسانی در اطراف رگه‌های مینرالیزه یافت می‌شود که محیط و شرایط مناسبی برای کانی‌سازی طلا را فراهم کرده است. مقادیر بالای سیلیس در منطقه، بیان‌گر اشباع بودن محلول‌های هیدروترمال از سیلیس می‌باشد. زون دگرسانی سیلیسی یکی از مهم‌ترین دگرسانی‌های موجود در منطقه است که به‌صورت رگه و رگچه نمایان می‌شود، این نوع دگرسانی‌ها میزبان اصلی کانی‌سازی طلا هستند (Ebrahimi et al, 2017).

**کانی‌سازی:** سیستم کانی‌سازی مسجدداغی از دو نوع کانی‌سازی مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال تشکیل شده است (Mohammadi et al, 2006; Ebrahimi et al, 2017). مهم‌ترین کانی‌سازی موجود در کانسار پورفیری مسجدداغی شامل کانی‌های روتیل، مولیبدنیت، منیتیت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، اسفالریت، کالکوسیت و کوولیت می‌باشد. کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال شامل پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، اسفالریت و طلا همراه با کوارتز، باریت و انیدریت است.

**دگرسانی آرژیلیک پیشرفته:** این دگرسانی به‌طور محدود و در مجاورت رگه‌های سیلیسی طلادار تشکیل شده است. این دگرسانی بر روی سنگ میزبان (تراکی آندزیت) تاثیر زیادی داشته و پلاژیوکلاز موجود در سنگ میزبان را به کانی‌های رسی تبدیل کرده و بافت اولیه سنگ را از بین برده است. کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی شامل کوارتز، کائولینیت، آلونیت هیپوژن، باریت، پیریت و تورمالین است (Emamalipour et al, 2011).

**دگرسانی آرژیلیک متوسط:** با گسترش نسبتاً زیاد در بخش میانی محدوده کانی‌سازی گسترش دارد و در بسیاری موارد با دگرسانی فیلک همپوشانی حاصل کرده است (شکل ۲). ترکیب کانی شناسی این دگرسانی شامل کائولینیت، ایلیت، کوارتز و کرنات است.

**دگرسانی پروپیلیتیک:** این دگرسانی با گسترش نسبتاً محدود خارجی‌ترین زون دگرسانی است که در حاشیه شرقی منطقه مشاهده شده است. کانی‌های شاخص این دگرسانی اپیدوت، کلریت و کلسیت است که هورنبلند و پیروکسن به کلریت و کلسیت تبدیل شده و پلاژیوکلاز

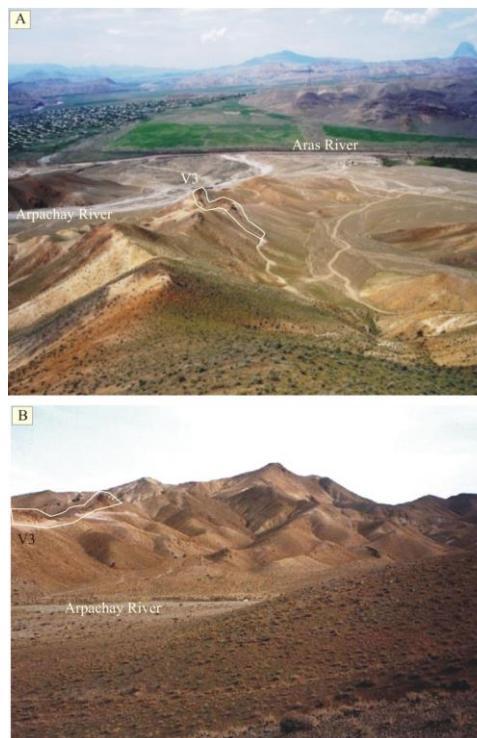


شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده کانی‌سازی مسجدداغی (Mohammadi et al, 2006).  
Fig. 2: Simplified geological map of the Masjed Daghi area (Mohammadi et al, 2006).

## مشاهدات زمین‌شناسی

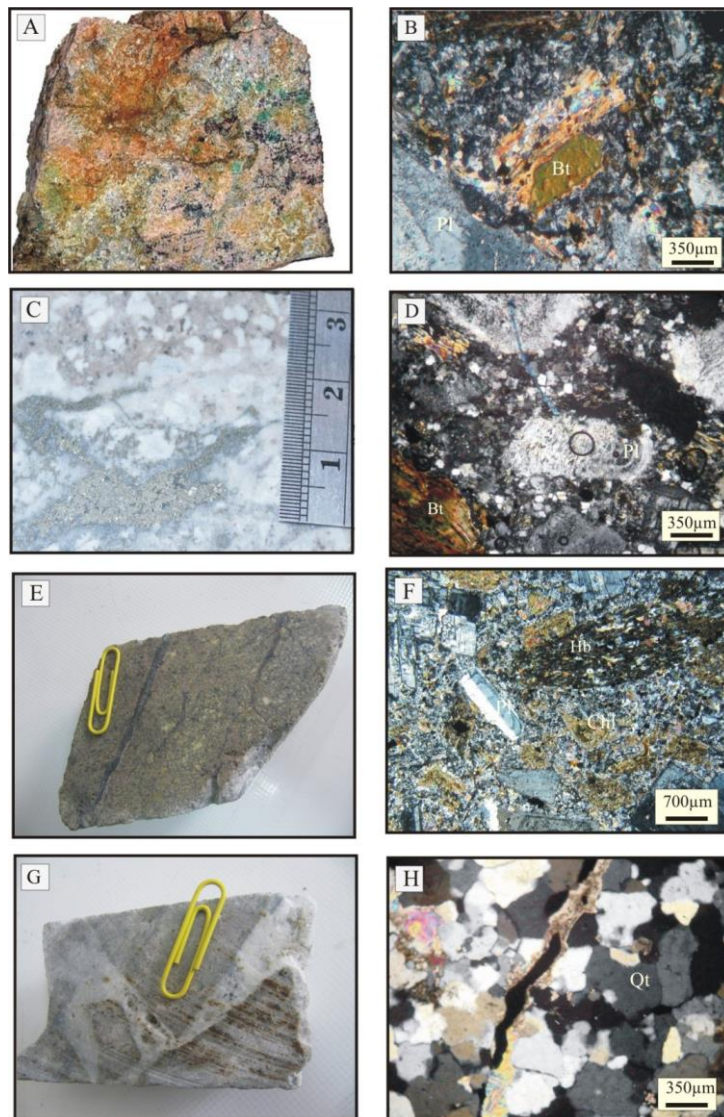
نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی با داده‌های زمین‌شناسی منطقه مسجدداغی مورد مقایسه قرار گرفت. دگرسانی‌های موجود در منطقه که عمدتاً سنگ میزبان تراکی آندزیت را تحت‌تاثیر قرار داده است در شکل ۳ مشخص شده است. مناطق وسیعی از منطقه به هیدروکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند که در شکل به رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۳ A). همچنین در حاشیه رگه سیلیسی V3 که بزرگترین رگه معدنی طلادار در منطقه است دگرسانی آرژیلیک قابل رویت است (شکل ۳ A). دگرسانی فیلیک که قسمت اصلی محدوده معدنی مسجدداغی را تشکیل داده است به رنگ خاکستری در تصویر قابل مشاهده می‌باشد که به‌طور گسترده توسط دگرسانی آرژیلیک همپوشانی شده است (شکل ۳ A). این همپوشانی به خوبی در منطقه قابل مشاهده است (شکل ۳ B). به‌دلیل همپوشانی دگرسانی‌های فیلیک و آرژیلیک در بیشتر

تصاویر ماهواره‌ای این دو دگرسانی اغلب با هم دیده می‌شوند. مطالعات مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های برداشت شده دگرسانی‌های موجود در منطقه را به خوبی نشان می‌دهد. دگرسانی پتاسیک با گسترش بسیار کم در حاشیه رودخانه آرپاچای رخمون دارد (شکل ۲). تبدیل پلاژیوکلاز به آلکالی فلدسپارهای صوتی رنگ و تبدیل بیوتیت و هورنبلند به بیوتیت ثانویه در سنگ میزبان مونزودیوریت مشاهده شده است (شکل ۴ A,B). دگرسانی فیلیک همراه با رگچه‌های سیلیسی حاوی ماده معدنی در سنگ میزبان تراکی آندزیت مشاهده شده است؛ در این نمونه فلدسپارها به سریسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۴ C,D). همچنین دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ سبز که هورنبلند به کلریت تبدیل شده است (شکل ۴ E,F). نمونه سیلیسی برداشت شده از رگه‌های سیلیسی که حاوی رگچه‌های سیلیسی و کربناتی است (شکل ۴ G,H).



شکل ۳: نمایی از منطقه مسجدداغی، A: رگه سیلیسی طلادار V3 که بزرگترین رگه معدنی در منطقه است همراه با مناطق اکسید آهن با رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای، مناطق دگرسانی آرژیلیک به رنگ کرم و مناطق دگرسانی فیلیک با رنگ خاکستری در سنگ میزبان تراکی آندزیت مشاهده می‌شود (دید به سمت شمال غرب)، B: همپوشانی دگرسانی فیلیک و آرژیلیک در سنگ میزبان تراکی آندزیت همراه با رگه معدنی V3 در حاشیه رودخانه آرپاچای (دید به سمت شمال شرق).

Fig. 3: A view of Masjed Daghi area; A) Gold silicic vein V3 in the area associated iron oxide with red to brown color and argillic and phyllic alteration with creamy and grey color in the trachyandesite host rock, B) Overprinted of the phyllic and argillic alterations in the trachy andesite associated V3 vein around the Arpachay river.



شکل ۴: تصاویری از نمونه‌های دستی و مقاطع نازک دگرسانی‌های منطقه مسجدداغی؛ A: دگرسانی پتاسیک که آلکالی فلدسپارهای صورتی در آن مشخص است، B: تبدیل بیوتیت اولیه به بیوتیت ثانویه در سنگ میزبان کوارتز مونزیونیت؛ C: دگرسانی فیلیک همراه با رگچه سیلیسی و ماده معدنی در سنگ میزبان تراکی آندزیت؛ D: تبدیل پلاژیوکلاز به سریسیت در سنگ میزبان تراکی آندزیت؛ E: دگرسانی پروپیلیتیک همراه با رگچه‌های سیلیسی در سنگ میزبان تراکی آندزیت؛ F: تبدیل هورنبلند به کلریت در سنگ میزبان تراکی آندزیت؛ G: دگرسانی سیلیسی همراه با رگچه‌های سیلیسی؛ F: کواتز در دگرسانی سیلیسی همراه با رگچه حاوی ماده معدنی. (بیوتیت: Bt، پلاژیوکلاز: Pl، هورنبلند: Hb، کلریت: Chl، کوارتز: Q).

Fig. 4: Macroscopic and microscopic images from alterations in the Masjed Daghi area; A: Potassic alteration with pink alkali-feldspar, B: Primary biotite replaced by secondary biotite in the quartz monzonite host rock, C: Phyllic alteration associated silicic veinlets and ore in the quartz monzonite host rock, D: Plagioclase replaced by sericite in the trachyandesite host rock, E: Propylitic alteration associated silicic veinlets in the trachyandesite host rock, F: Hornblende replaced by chlorite in the trachyandesite, G: Silicic alteration associated silicic veinlets, H: Quartz in the silicic alteration associated ore minerals veinlets. (Biotite: Bt, Plagioclase: Pl, Hornblende: Hb, Chlorite: Chl, Quartz: Q)

از ماهواره لندست-۸ برای بارزسازی و مشخص کردن دگرسانی‌های موجود در منطقه استفاده شده است. داده‌های برداشت شده توسط ماهواره لندست-۸ در سال ۲۰۲۰ از پایگاه داده‌های ایالات متحده آمریکا (USGS) دریافت

#### پردازش داده‌های ماهواره لندست-۸

تصاویر ماهواره‌ای به دلیل داشتن پوشش چند طیفی و چند زمانی وسیع، از پتانسیل بالایی جهت شناخت و بررسی محدوده‌های دگرسان شده برخوردار است. در این پژوهش

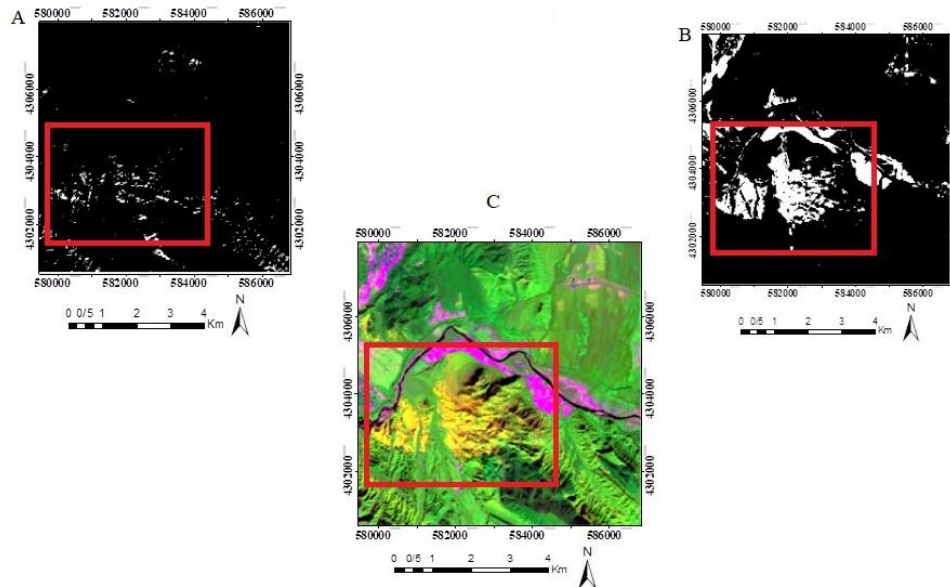
پیکسل‌های روشن مشخص کننده این دگرسانی‌ها در منطقه است (شکل ۵ B).

روش ترکیب رنگی کاذب: استفاده و شناخت رنگ‌ها اطلاعات بهتر و مفهومی‌تری از تصاویر ماهواره‌ای در اختیار قرار می‌دهد. نمایش هم‌زمان بیش از یک باند در تصاویر بسیار سودمند و کارآمد است؛ که اغلب توسط به کارگیری تصاویر ترکیب رنگی میسر می‌شود. لذا با استفاده از ترکیب رنگی RGB(6/7,4/2,5/4) پیکسل‌های زرد موجود در تصویر نشان دهنده دگرسانی‌های فیلک-آرژیلیک موجود در منطقه می‌باشد (شکل ۵ C).

روش کمترین مربعات رگرسیون شده: این روش براساس تخمین زدن خطی صورت می‌گیرد که با روش کمترین مربعات به دست آمده، پایه‌گذاری شده است. با استفاده از اختلاف موجود بین کانی‌هایی که نسبت به یک باند خاص حساس هستند و از نظر شاخص جذب یا انعکاس با آن باند اختلاف قابل قبولی نشان می‌دهند، می‌توان تصویر خروجی مناسب جهت جداسازی دگرسانی‌های مورد نیاز به دست آورد (Moor et al, 2006). در تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ از باند ۷ به عنوان باند مدل، جهت شناسایی کانی‌های رسی استفاده شده است. با استفاده از روش کمترین مربعات رگرسیون شده کانی‌های رسی (دگرسانی آرژیلیک-فیلک) موجود در منطقه به صورت نواحی تیره مشخص شده است (شکل ۶ A). همچنین ترکیب رنگی کاذب نسبت به باند ۷ (تصویر منفی شده باقی مانده) و باند ۳ و ۴ برای تشخیص نقاط مشترک کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن و پوشش گیاهی استفاده شده است (شکل ۶ B). رنگ بنفش نشان دهنده بازتاب بالا در باند ۳ و جذب بالا در باند ۷ است و مشخص کننده پیکسل‌های مشترک دارای کانی-های رسی و اکسید آهن است. پیکسل قرمز مشخص کننده کانی‌های ایلیت، سرسیت و کائولینیت و پیکسل زرد و نارنجی نشان دهنده مجموع کانی‌های ایلیت، سرسیت، کائولینیت و اکسید آهن می‌باشد.

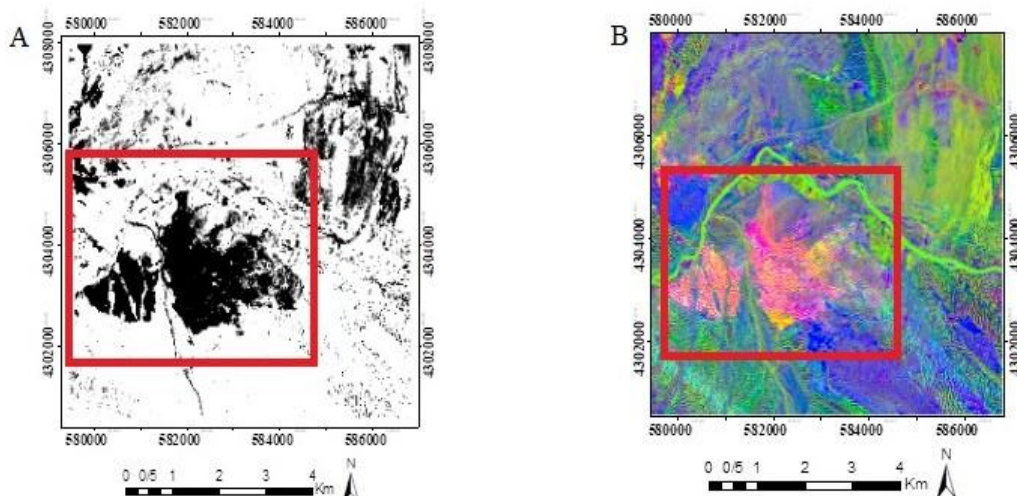
شده است و تحلیل این داده‌ها در نرم‌افزار دورسنجی ENVI-5.3 انجام شده است. به منظور شناسایی و شناخت دگرسانی‌های موجود در منطقه و اکسیدهای آهن از روش‌های نسبت باندی، ترکیب رنگی کاذب و کمترین مربعات رگرسیون شده استفاده گردید. در ابتدا تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری بر روی داده‌های ماهواره لندست-۸ اعمال شده است (Rosich and Meadow, 2004) و با به کارگیری روش‌های مورد نظر، تصاویر مناسبی از محدوده مورد مطالعه به دست آمده است.

نسبت باندی: یکی از روش‌های پرکاربرد و رایج در پردازش و مطالعه تصاویر ماهواره‌ای روش نسبت باندی است؛ که از تقسیم دو باند بر یکدیگر به دست می‌آید. باند بازتاب که هدف مورد بررسی در آن بیشتر است در صورت کسر و باندی که جذب آن برای همان هدف در آن بالاتر است در مخرج کسر قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش می‌توان اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را در تصویر کاهش داد و اختلاف موجود بین درجات روشنایی را از بین برد، هم‌چنین برای جداکردن مرز واحدهای سنگی و نیز شناسایی سنگ‌ها به کار می‌رود. نسبت‌های باندی در شناسایی و تفکیک نهایی تصاویر هنگام پردازش مفید هستند. در این تصاویر به دلیل حذف اثرات زیان‌آور نظیر اثر توپوگرافی تغییرات ظریف طیفی پدیده‌ها بهتر از تصاویر خام مشخص می‌شود، لذا بر اساس محدوده و نوع کاربرد آن‌ها باید باندهای مناسب برهم تقسیم گردد تا بهترین نتیجه حاصل شود (Rowan et al, 1997; Rouskav et al, 2005). در کانسارهای مس پورفیری وجود کلاهک‌های آهنی و اکسیدهای آهن ناشی از تجزیه کانی‌های آهن‌دار نشانه خوبی برای شناخت و شناسایی مناطق کانی‌سازی است (Seo et al, 2005). برای مشخص کردن مناطق دارای کانی‌های آهن‌دار از نسبت باندی ۴ به ۲ استفاده شده است؛ که نواحی با پیکسل‌های روشن مشخص کننده مناطق آهن‌دار موجود در منطقه است (شکل ۵ A). همچنین برای مشخص کردن دگرسانی فیلک-آرژیلیک از نسبت باندی ۶ به ۷ استفاده شد که



شکل ۵: روش نسبت باندهای تصاویر لندست-۸ در منطقه مسجدداغی، A: نسبت باندهای ۴ به ۲ پیکسل‌های روشن نشان دهنده اکسید آهن در منطقه است، B: نسبت باندهای ۶ به ۷ پیکسل‌های روشن نشان دهنده دگرسانی فیلیک-آرژیلیک می‌باشد، C: ترکیب رنگی کاذب در منطقه است، B(5/4)، G(4/2)، R(6/7) داده‌های لندست-۸ در محدوده مسجدداغی که رنگ زرد نشان دهنده دگرسانی فیلیک-آرژیلیک است.

Fig. 5: Band ratio method of Landsat-8 in the Masjed Daghi area, A: Band ratio 4 to 2 that white pixel indicate iron oxide, B: Band ratio 6 to 7 that white pixel indicate phyllic-argillic alteration, C: Band combination R(6/7), G(4/2), B(5/4) for Landsat-8, yellow color indicate phyllic-argillic alteration.



شکل ۶: روش کمترین مربعات رگرسیون شده در تصاویر لندست-۸ در منطقه مسجدداغی، A: پیکسل‌های تیره رنگ نشان دهنده کانی‌های رسی موجود در دگرسانی‌های فیلیک-آرژیلیک است، B: ترکیب رنگی کاذب تصویر منفی شده باقی مانده با (R(7), G(3), B(4) که رنگ‌های زرد و نارنجی نشان دهنده کانی‌های ایلیت، سرسیت، کائولینیت و اکسید آهن است.

Fig. 6: Least squares regression method of Landsat-8 in the Masjed Daghi area, A: Black pixel indicate clays minerals in the phyllic-argillic alteration, B: Band combination R(7), G(3), B(4) for Landsat-8, yellow and orange colors indicate illite, sericite, kaolinite and iron oxide.

2000). این ماهواره‌ها با تصویربرداری در ۱۳ باند توسط سنجنده MSI در ۳ ناحیه مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه است. این سنجنده با تفکیک مکانی که شامل ۴ باند ۱۰ متری، ۶ باند ۲۰ متری و ۳ باند

## پردازش داده‌های سنجنده سنتینل-۲

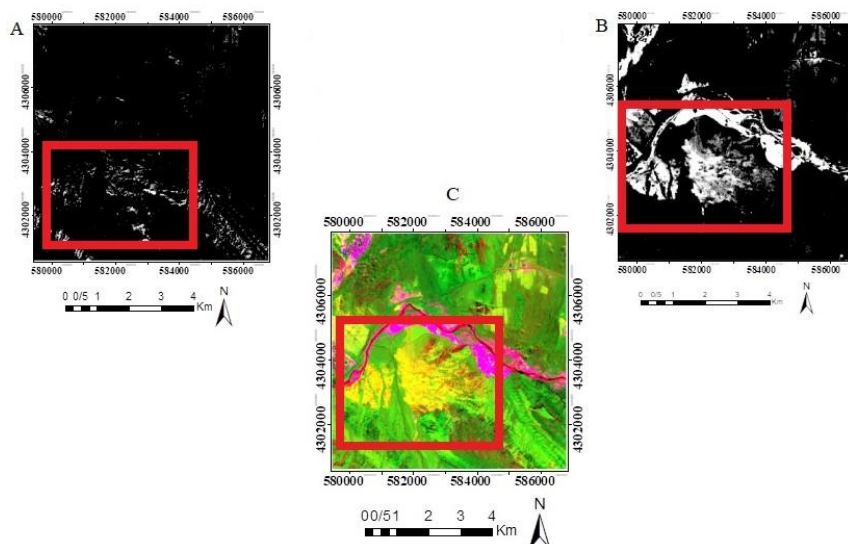
سنجنده Sentinel-2A و Sentinel-2B دومین سری از ماهواره‌های Sentinel به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ در مدار قرار داده شده‌اند (Esa Earth online, )

روش ترکیب رنگی کاذب: با استفاده از ترکیب رنگی RGB(11/12,4/2,8 /4) پیکسل‌های زرد موجود در تصویر نشان دهنده دگرسانی‌های فیلیک-آرژیلیک موجود در منطقه می‌باشد (شکل ۷ C).

روش کمترین مربعات رگرسیون شده: در تصاویر سنتینل-۲ از باند ۱۲ به عنوان باند مدل، جهت شناسایی کانی‌های رسی استفاده شده است. با استفاده از روش کمترین مربعات رگرسیون شده کانی‌های رسی (دگرسانی آرژیلیک-فیلیک) موجود در منطقه به صورت نواحی تیره مشخص شده است (شکل ۸ A). همچنین ترکیب رنگی کاذب نسبت به باند ۱۲ (تصویر منفی شده باقی مانده) و باند ۳ و ۴ برای تشخیص نقاط مشترک کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن و پوشش گیاهی استفاده شده است (شکل ۸ B). رنگ بنفش نشان دهنده بازتاب بالا در باند ۳ و جذب بالا در باند ۱۲ است و مشخص کننده پیکسل‌های مشترک دارای کانی‌های رسی و اکسید آهن است. پیکسل قرمز مشخص کننده کانی‌های ایلیت، سرسیت و کائولینیت و پیکسل زرد و نارنجی نشان دهنده مجموع کانی‌های ایلیت، سرسیت، کائولینیت و اکسید آهن می‌باشد.

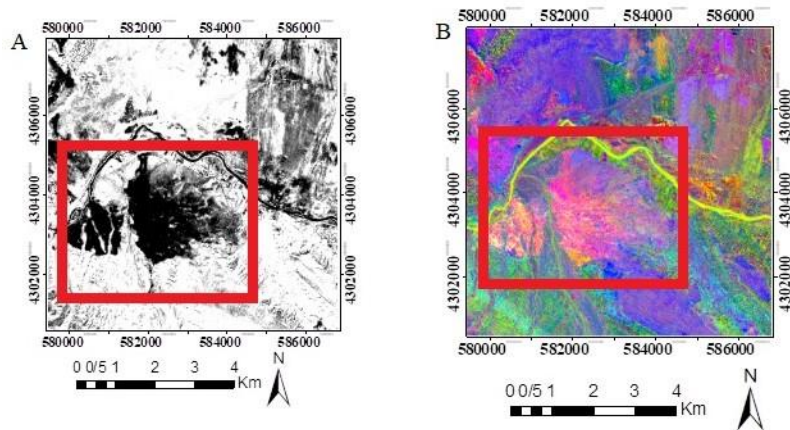
۶۰ متری است دارای میدان دید ۲۹۰ کیلومتری است؛ که از مدار ۵۶ درجه جنوبی تا ۶۴ درجه شمالی را به صورت منظم پوشش جهانی می‌دهد (European Space Agency, 2020). به منظور شناسایی و شناخت دگرسانی‌های موجود در منطقه و اکسیدهای آهن از روش‌های نسبت باندی، ترکیب رنگی کاذب و کمترین مربعات رگرسیون شده استفاده شد. در ابتدا همانند ماهواره لندست-۸ تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری بر روی داده‌های سنجنده سنتینل-۲ اعمال شده است (Rosich and Meadows, 2004) و با به کارگیری روش‌های مورد نظر، تصاویر مناسبی از محدوده مورد مطالعه به دست آمده است که هر یک به طور جداگانه در ادامه مورد بررسی قرار گرفت.

نسبت باندی: برای مشخص کردن مناطق دارای کانی‌های آهن‌دار از نسبت باندی ۴ به ۲ استفاده شده است؛ که نواحی با پیکسل‌های روشن مشخص کننده مناطق آهن‌دار موجود در منطقه است (شکل ۷ A). همچنین برای مشخص کردن دگرسانی فیلیک-آرژیلیک محدوده از نسبت باندی ۱۱ به ۱۲ استفاده شد که پیکسل‌های روشن مشخص کننده این دگرسانی‌ها در منطقه است (شکل ۷ B).



شکل ۷: روش نسبت باندی تصاویر سنتینل-۲ در منطقه مسجدداغی، A: نسبت باندی ۴ به ۲ پیکسل‌های روشن نشان دهنده اکسید آهن در منطقه است، B: نسبت باندی ۱۱ به ۱۲ پیکسل‌های روشن نشان دهنده دگرسانی فیلیک-آرژیلیک می‌باشد، C: ترکیب رنگی کاذب R(11/12), G(4/2), B(8/4) داده‌های سنتینل-۲ در محدوده مسجدداغی که رنگ زرد نشان دهنده دگرسانی فیلیک-آرژیلیک است.

Fig. 7: Band ratio method of Sentinel-2 in the Masjed Daghi area, A: Band ratio 4 to 2 that white pixel indicate iron oxide, B: Band ratio 11 to 12 that white pixel indicate phyllic-argillic alteration, C: Band combination R(11/12), G(4/2), B(8/4) for Sentinel-2, yellow color indicate phyllic-argillic alteration.



شکل ۸: روش کمترین مربعات رگرسیون شده در تصاویر سنتینل-۲ در منطقه مسجدداغی، A: پیکسل‌های تیره رنگ نشان دهنده کانی‌های رسی موجود در دگرسانی‌های فیلیک-آرژیلیک است، B: ترکیب رنگی کاذب تصویر منفی شده باقی مانده با (4)B، (3)G، (12)R که رنگ‌های زرد و نارنجی نشان دهنده کانی‌های ایلیت، سرسیت، کائولینیت و اکسید آهن است.

Fig. 8: Least squares regression method of Sentinel-2 in the Masjed Daghi area, A: Black pixel indicate clays minerals in the phyllic-argillic alteration, B: Band combination R(12), G(3), B(4) for Sentinel-2, yellow and orange colors indicate illite, sericite, kaolinite and iron oxide.

روش شبکه‌های عصبی (NN): شبکه‌های عصبی از جمله شبکه‌های محاسباتی هستند که از شبکه عصبی مغز حیوانات ایده گرفته‌اند، این شبکه‌ها از گره‌های متصلی به نام نورون‌ها تشکیل شده‌اند که آن‌ها را درون یک مغز مدل می‌کند (Watts, 2001). هر یک از این اتصال‌ها می‌تواند هر سیگنال را به‌طور جداگانه به سایر نورون‌ها متصل نماید. این طبقه‌بندی نظارت‌شده به دلیل داشتن ساختار غیرپارامتریک و همچنین استقلال توزیع نرمال آن در طبقه‌بندی در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران سنجش از دور قرار گرفته است (Shi and Horvath, 2006). یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین ویژگی شبکه‌های عصبی، نداشتن نیاز به داده‌های آموزشی و همچنین متغیرهای آماری می‌باشد، که همین موضوع علاوه بر ایجاد سرعت در داده‌های خروجی، کاربرد آن را نیز وسیع‌تر و پیشرفته‌تر خواهد کرد. شبکه‌های عصبی همانند توابع شعاعی پایه، گسترش برگشتی، پرسپترون چندلایه و غیره از گونه‌های مختلف این الگوریتم می‌باشند، که به بررسی و پردازش داده‌ها می‌پردازند (Wijaya, 2005). این طبقه‌بندی‌کننده از سه بخش داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی شبکه و خروجی طبقه‌بندی، تشکیل شده است در شبکه عصبی گسترش برگشتی که مورد نظر است، پس از پردازش داده‌ها در زمان صحت‌سنجی داخلی اگر معیارهای مورد نظر حاصل نگردید، داده‌ها برای بار دیگر بازگشت داده شده و مورد وزن‌دهی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است برای ایجاد

**طبقه‌بندی:** طبقه‌بندی یعنی دسته‌بندی تعداد کثیری از پیکسل‌های منفرد به طبقه‌ها یا بخش‌های موضوعی کوچک که بیشتر قابل مدیریت و رسیدگی هستند. به‌طور کلی طبقه‌بندی یا دسته‌بندی داده‌های ماهواره‌ای به دو صورت نظارت‌شده و نظارت‌نشده صورت می‌گیرد (Huang et al, 2002). در این تحقیق با استفاده از باندهای ماهواره لندست-۸ و سنتینل-۲ و با بهره‌گیری از نقاط انتخابی به صورت پراکنده در محدوده مسجدداغی، با استفاده‌های روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده شبکه‌های عصبی، بیشترین شباهت و ماشین‌بردار پشتیبان با هدف شناسایی مناطق دارای پتانسیل مس-طلا پورفیری استفاده شده است. در طبقه‌بندی نظارت‌شده تلاش بر این است که بین مجموعه پیکسل‌ها با پوشش واقعی سطح زمین ارتباطی ایجاد نماید بدین ترتیب این مجموعه‌ها رده‌های اطلاعاتی نامیده می‌شود. این روش به اطلاعات و داده‌های اولیه همانند تعداد کلاس، نمونه‌های معلوم از هر کلاس و خصوصیات آن‌ها نیاز دارد. این داده‌های اولیه از طریق عملیات میدانی، تفسیر عکس‌های هوایی و همین‌طور نقشه مناسب به دست می‌آید. در طبقه‌بندی نظارت‌شده طبقه‌بندی بر اساس پیکسل‌ها و نقاط کنترلی انتخاب شده (مناطق و عارضه‌های خاص) صورت می‌گیرد (Lu and Weng, 2007). در این تحقیق از سه طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده شده است؛ که هر یک به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

(Joachims, 1999). به صورت جامع و کلی طبقه‌بندی داده‌ها به صورت خطی در اکثر موارد امکان‌پذیر نیست زیرا یک عدم پیوستگی بین اطلاعات ورودی وجود دارد به همین دلیل برای حل این مشکل الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان داده‌ها را به ابعاد بزرگ‌تر انتقال داده تا صفحه‌ای مناسب داده‌ها ایجاد کند، به طور کامل‌تر با استفاده از هسته مرکزی (تابع انتقال) داده‌ها در فضای غیرخطی طبقه‌بندی می‌شوند (Guahieri and Gromp, 1999). به دلیل توانایی بالای ماشین‌بردار پشتیبان برای پردازش حجم بالای داده‌ها و همینطور در یادگیری و آموزش باعث شده‌است؛ که امروزه از این طبقه‌بندی استفاده‌های بسیاری صورت بگیرد (Hsu and Lin, 2002). این طبقه‌بندی قادر است داده‌های دوکلاسه را مورد پردازش قرار دهد به همین دلیل پژوهشگران با تلاش بسیار ماشین‌بردار پشتیبان چندکلاسه را نیز گسترش داده‌اند (Vander Linden et al, 2009). یکی از مزیت‌های روش ماشین‌بردار پشتیبان نسبت به دیگر روش‌ها این است که این الگوریتم در آموزش‌های خود نیازی به بهینه‌کننده‌های محلی ندارد، و کلاسه‌بندی و دسته‌بندی‌ها را با بیشترین احتمال تعمیم بنا خواهد کرد، ساختار خود را به صورت بهینه تعمیم و توابع غیرخطی خود را به آسانی و با کمترین محاسبه، با استفاده از توابع غیرخطی ایجاد می‌کند (Arekhi and Adibnejad, 2011).  
**تلفیق داده‌ها:** سنجنده‌ها دارای طراحی و کاربرد گسترده و هم‌چنین دارای محدودیت‌های فنی بوده، هرکدام از سنجنده‌ها نیز به طور جداگانه دارای کاربرد خاصی بوده و دارای محدودیت‌هایی نسبت به سایر کاربردهای خود است، به همین دلیل برای به دست آوردن و مشخص کردن یک کاربرد خاص و بررسی و تحلیل پدیده‌های مختلف داده‌ها و تصاویر به دست آمده به گونه‌ای با یکدیگر تلفیق خواهد شد که تمامی داده‌ها و تصاویر جدید دارای تمامی خصوصیات داده‌های اولیه باشد (Wang et al, 2005).  
 به تمامی روش‌های اعمال‌شده و تلفیق به کاربرده شده به اصطلاح ادغام تصاویر گفته می‌شود (Romer et al, 2012). که با کمک آن تصاویر تولید شده دارای قدرت تفکیک بهتر و همین‌طور نمایش بهتری از پدیده‌های زمینی است. در حالت کلی پدیده ادغام تصاویر بسیار اقتصادی‌تر و مناسب‌تر از ساخت و طراحی سنجنده‌ها می‌باشد و بدون شک به کاربردن اطلاعات مکانی و طیفی داده‌ها بدون اعمال روش

تعداد لایه‌های پنهان سعی و خطای بسیاری انجام می‌گیرد تا نتیجه مورد نظر به دست‌آید (Aldrich and Aurwt, 2013).

**روش بیشترین شباهت (ML):** روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت یکی از معروف‌ترین روش‌های آماری طبقه‌بندی است. در این طبقه‌بندی کلاسی به پیکسل مورد نظر انتصاب خواهد شد که بیشترین احتمال تعلق و وجود پیکسل به آن کلاس وجود داشته باشد. در این روش طبقه‌بندی استفاده از حد آستانه مرسوم است، گاهی اوقات به دلیل هم‌پوشانی اتفاق افتاده در طیف‌ها، برای چند کلاس نزدیک به هم یک احتمال محاسبه می‌شود و یا اینکه بزرگ‌ترین احتمال مقدار کوچکی است، در این حالت با اطمینان صددرصد نمی‌توان کلاس کامل را به پیکسل نسبت داد و از یک حد آستانه برای کنترل استفاده می‌شود (Pourkaseb et al, 2018). تعیین حد آستانه بسیار مهم است و به صورت سعی و خطا بر اساس نوع کلاس‌ها و مقدار هم‌پوشانی تعیین می‌شود. این طبقه‌بندی سطح تصمیم‌گیری را به شکل کوادراتیک با استفاده از فرمول توزیع نرمال چندبعدی تشکیل می‌دهد که نتیجه حاصل به شکل‌های بیضوی، دایره و سهمی خواهد بود. علاوه بر حد آستانه در این طبقه‌بندی، ماتریس واریانس-کواریانس مورد استفاده قرار می‌گیرد تا دیگر مزیت‌های داده‌ها نیز مورد پردازش قرار بگیرد و دقت طبقه‌بندی بالاتر قرار گیرد، این روش یکی از روش‌های قابل مدیریت و انعطاف‌پذیر در طبقه‌بندی است (Richards and Jia, 1999).

**روش ماشین‌بردار پشتیبان (SVM):** الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان یکی از روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده است و در مطالعات زمین‌شناسی در حال استفاده است (Vapnik, 1998). به دلیل جای گرفتن طبقه‌بندی SVM در طبقه‌بندی خطی داده‌های ورودی آن را به دو دسته یا کلاس +۱ و -۱ تقسیم‌بندی می‌کنند. هدف اصلی طبقه‌بندی ماشین‌بردار پشتیبان، اختصاص جداگانه هریک از پیکسل‌ها به گروه یا کلاس خاص توسط یک صفحه جداکننده است، به طوری اختلاف هریک از گروه یا پیکسل‌ها در بیشترین حالت خود باشد (Vapnik, 1998). پیکسل‌های ایجاد شده بر روی هریک از مرز کلاس‌ها و یا مرزگروه‌ها را بردار پشتیبان نامیده می‌شود، که الگوریتم آن به تعدادی نقاط تعلیمی و آموزشی نیاز دارد



سنیتل-۲ و اطمینان بر صحت محل دگرسانی در نقاط مورد نظر که به خوبی دگرسانی‌های موجود بر روی محدوده مورد مطالعه را نشان داده است. با استفاده از روش‌های ذکر شده؛ ROI هایی از محدوده مورد نظر تحت عنوان داده‌های آزمایش انتخاب و جدا گردیده است، که در این تصویر ۱۰۸۸ پیکسل مشخص‌کننده دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، ۴۰۵۴ پیکسل مشخص‌کننده دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونتوریلونیت) به رنگ زرد، ۳۹۱۹ پیکسل مشخص‌کننده دگرسانی پروپیلیتیک (کانی اپیدوت و کلریت) به رنگ سبز و ۵۸۷۶ پیکسل مشخص‌کننده مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی است (شکل ۹ B). در نهایت تمامی روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده؛ شبکه‌های عصبی، بیشترین شباهت ماشین‌بردار پشتیبان مورد نیاز تحقیق با ROI های یکسان توسط نرم‌افزار ENVI نسخه ۵/۳ پس از مطابقت دادن داده‌های آموزشی و آزمایشی بر روی یکدیگر و مطابقت آن‌ها با هم، بر روی تصاویر اعمال گردید، و در نهایت دگرسانی‌های مورد نیاز از محدوده مورد نظر به دست آمد. سپس در ادامه خروجی‌های مناسب از هر سه طبقه‌بندی برای هر دو سنجنده Landsat-8 و Sentinel-2 با رویکرد ادغام تصمیم‌گیری و با استفاده از الگوریتم رای‌گیری حداکثری و در محیط نرم‌افزار OTB با یکدیگر تلفیق شدند، و خروجی نهایی با دقتی بالاتر نسبت به نتایج حاصل از دیگر طبقه‌بندی‌ها به دست آمد. به‌طور کلی محدوده مورد نظر از چهار قسمت دگرسانی فیلیک، دگرسانی آرژیلیک، دگرسانی پروپیلیتیک و مناطق دگرسان‌نشده تشکیل شده است. ROI ها به صورت نقاط آموزشی و آزمایشی بر روی دیگر روش‌های ذکر شده (نسبت باندی، ترکیب رنگی کاذب و کمترین مربعات رگرسون‌شده) اعمال شده است. سپس با استفاده از طبقه‌بندی‌های انجام شده بر روی تصاویر دگرسانی‌های مورد نیاز به دست آمده است. در ادامه با استفاده از روش شبکه‌های عصبی در ماهواره لندست-۸ دگرسانی‌های فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونتوریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوت و کلریت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی در محدوده مسجداغی مشخص شده است (شکل ۱۰ A). با استفاده از روش بیشترین شباهت دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت)

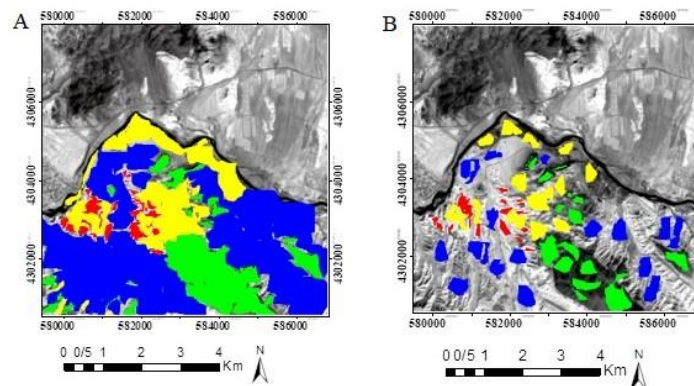
ادغام تصاویر میسر نخواهد بود (Pal and Mather, 2004). در این تحقیق از الگوریتم رای‌گیری حداکثری (MV) برای ادغام تصاویر خروجی به دست آمده از سه طبقه‌بندی شبکه‌عصبی (NN)، بیشترین شباهت (ML) و ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) با استفاده از نرم‌افزار ENVI و OTB و استفاده از مناطق مورد علاقه (Regions of Interest, ROI) به دست آمده از محدوده مورد نظر استفاده شده است. این روش تصاویر ایجاد شده همچنین افزایش قابلیت تفسیر داده‌ها را بیشتر می‌کند، که باعث عملکرد قوی‌تر، افزایش سطح اعتماد و کاهش ابهام در تحلیل تصاویر می‌شود. یکی از پرکاربردترین و البته دقیق‌ترین روش‌های اعمال شده استفاده از رای‌گیری حداکثری (MV) است که بسیار دقیق، ساده و مطمئن است. در این روش پیکسل به کلاسی تعلق خواهد گرفت، که در مقایسه با دیگر کلاس‌ها، بیشترین تکرار را برای آن کلاس داشته باشد. به‌طور کامل‌تر اگر تمامی نتایج به دست آمده دارای دقت و وزن یکسانی باشند، در انتها کلاس نهائی با بالاترین رای به عنوان کلاس انتخاب شده تعیین می‌گردد (Kuncheva et al, 2003; Mani, 2020).

#### طبقه‌بندی تصاویر و تلفیق نتایج در محدوده مورد مطالعاتی مسجداغی

در این تحقیق با استناد بر نقشه مرجع تهیه شده از محدوده مورد مطالعه مسجداغی (شکل ۲)، بازدید صحرایی و به کارگیری روش‌های اعمال شده (نسبت‌باندی، ترکیب‌رنگی کاذب و کمترین مربعات رگرسون‌شده) بر روی تصاویر لندست-۸ و سنیتل-۲، اطمینان بر صحت محل دگرسانی در نقاط مورد نظر حاصل گردید. با استفاده از روش‌های ذکر شده؛ ROI هایی از محدوده مورد نظر تحت عنوان داده‌های آموزشی انتخاب و جدا گردیده است، که در این تصویر ۱۸۳۰ پیکسل مشخص‌کننده دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، ۱۱۳۴۲ پیکسل مشخص‌کننده دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونتوریلونیت) به رنگ زرد، ۱۳۰۰۴ پیکسل مشخص‌کننده دگرسانی پروپیلیتیک (کانی اپیدوت و کلریت) به رنگ سبز و ۴۳۰۳۸ پیکسل مشخص‌کننده مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی است (شکل ۹ A). هم‌چنین با به‌کارگیری روش‌های اعمال شده (نسبت‌باندی، ترکیب‌رنگی کاذب و کمترین مربعات رگرسون‌شده) بر روی تصاویر لندست-۸ و

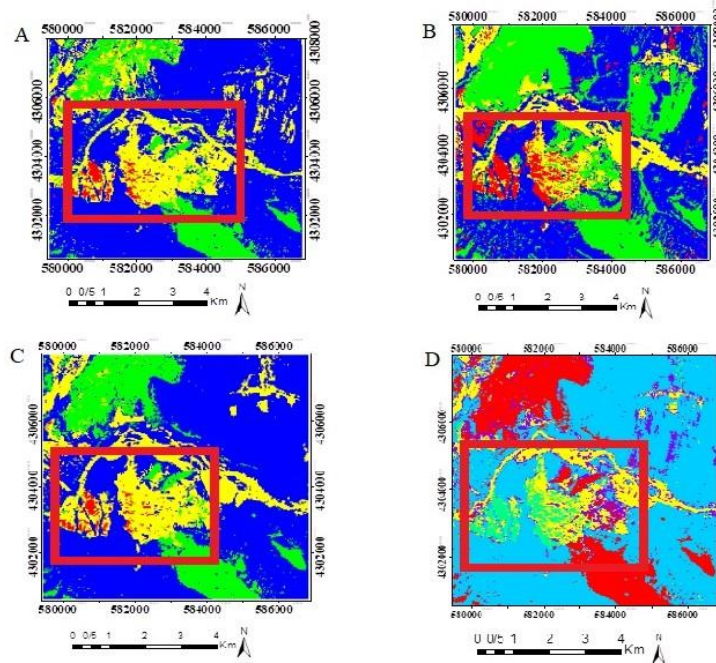
پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی مشخص شده است (شکل ۱۱ A). همچنین با استفاده از روش بیشترین شباهت دگرسانی فیلیک به رنگ قرمز (کانی سرسیت)، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی مشخص شده است (شکل ۱۱ B). استفاده از روش ماشین‌بردار پشتیبان دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی مشخص شده است (شکل ۱۱ C). همچنین با استفاده از روش الگوریتم رای‌گیری حداکثری (MV) در سنجنده سنتینل-۲ دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ سبز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ قرمز و بنفش و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی کم‌رنگ مشخص شده است (شکل ۱۰ D). همچنین با استفاده از روش شبکه‌های عصبی در سنجنده سنتینل-۲ دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی

به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی در محدوده مسجدداهی مشخص شده است (شکل ۱۰ B). با استفاده از روش ماشین‌بردار پشتیبان دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی در محدوده مسجدداهی مشخص شده است (شکل ۱۰ C). در ادامه با تلفیق تصاویر خروجی از سه طبقه‌بندی استفاده شده در تحقیق به روش الگوریتم رای‌گیری حداکثری (MV) در ماهواره لندست-۸ دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ سبز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی پروپیلیتیک (کانی کلریت و اپیدوت) به رنگ قرمز و بنفش و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی کم‌رنگ مشخص شده است (شکل ۱۰ D). همچنین با استفاده از روش شبکه‌های عصبی در سنجنده سنتینل-۲ دگرسانی فیلیک (کانی سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کانی کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد و دگرسانی



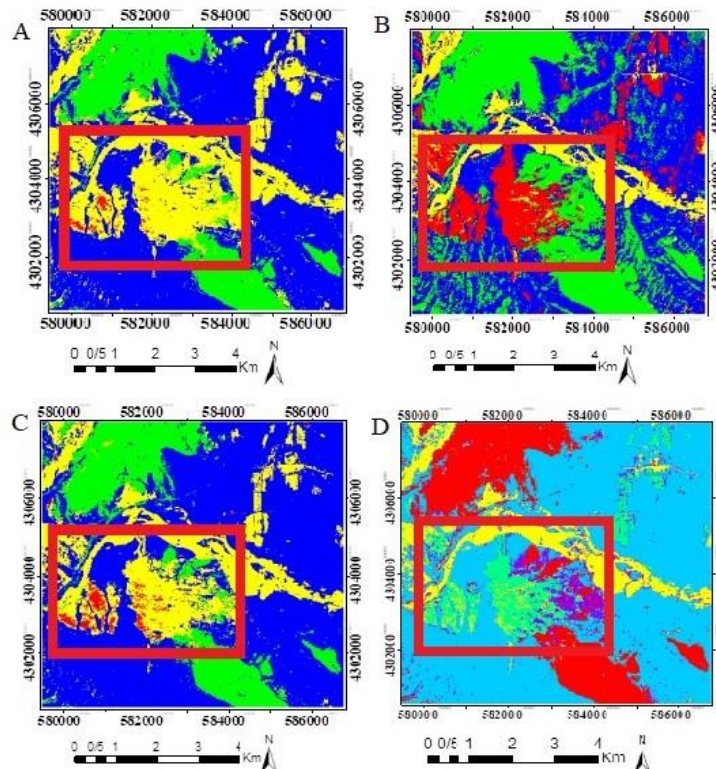
شکل ۹: مناطق مورد علاقه (ROI) آموزشی و آزمایشی جدا شده بر روی تصاویر ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ برای بارزسازی مناطق دگرسانی و غیردگرسانی محدوده مطالعاتی مسجدداهی؛ A: داده‌های آموزشی جدا شده بر روی محدوده که دگرسانی فیلیک (سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد، دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی مشخص شده است. B: داده‌های آزمایشی جدا شده بر روی محدوده که دگرسانی فیلیک (سرسیت) به رنگ قرمز، دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت و مونت‌موریلونیت) به رنگ زرد، دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت و اپیدوت) به رنگ سبز و مناطق غیر دگرسان به رنگ آبی مشخص شده است.

Fig. 9: Educational and experimental data (IRO) for the Landsat-8 and Sentinel-2 for distinction of the alteration and non-alteration area in the Masjed Daghi, A: Educational data on the phyllic alteration (red color), argillic alteration (Kaolinite and montmorillonite) with yellow color, propylitic alteration (chlorite and epidote) with green color and non-alteration with blue color is observed, B: Experimental data on the phyllic alteration with red color, argillic alteration (kaolinite and montmorillonite) with yellow color, propylitic alteration (chlorite and epidote) with green color and non-alteration with blue color.



شکل ۱۰: تصاویر سه طبقه‌بندی نظارت‌شده شبکه‌عصبی (A)، بیشترین شباهت (B)، ماشین بردار پشتیبان (C) و تلفیق نتایج طبقه‌بندی‌ها با استفاده از روش رای‌گیری حداکثری (D) در تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸.

Fig. 10: Images of the 3 classifications of the A: Maximum similarity, B: Support vector machine, C: Combination of classification using maximum vector, D: in the Landsat-8 images.



شکل ۱۱: تصاویر سه طبقه‌بندی نظارت‌شده شبکه‌عصبی (A)، بیشترین شباهت (B)، ماشین بردار پشتیبان (C) و تلفیق نتایج طبقه‌بندی‌ها با استفاده از روش رای‌گیری حداکثری (D) در تصاویر سنجنده سنتینل-۲.

Fig. 11: Images of the 3 classifications of the A: Maximum similarity, B: Support vector machine, C: Combination of classification using maximum vector, D: in the Sentinel-2 images.

صورت یک جدول توافقی تعریف شده است، که اختلاف موجود بین اطلاعات واقعی زمین و تصویر را نشان می‌دهد، داده‌های هر پیکسل مشخص شده با داده پیکسل متناظر خود مقایسه خواهد شد و نتایجی که یکسان است، با یکدیگر جمع می‌شود و داده پیکسل‌هایی که با یکدیگر تفاوت داشته و هم‌خوانی ندارند، نیز محاسبه خواهد شد (Pal and Mather, 2004). در طبقه‌بندی نظارت‌شده نیاز به آموزش و تعلیم دارد؛ لذا جهت آموزش تعدادی نمونه از طبقه‌بندی‌ها انتخاب خواهد شد. همچنین در زمان نمونه‌برداری از داده‌های مطالعاتی که از آن اطمینان کامل حاصل شده است برای داده‌های تست انتخاب خواهد شد. در این حالت تمامی داده‌هایی که برای طبقه‌بندی اعمال شده است، با نقاطی که رخداد آن بر روی زمین حتمی است، مورد صحت‌سنجی قرار گیرد (Jaafari, 2013). در این پژوهش از ۴ کلاسه‌بندی (فیلک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و مناطق غیر دگرسان) استفاده شده است. در جدول ۱ ستون (Total) نشان‌دهنده پیش‌بینی‌ها توسط الگوریتم است و ستون سمت چپ اعدادی است، که برحسب واقعیت (زمین مرجع) استفاده شده است.

**صحت‌سنجی:** برای استفاده بهتر و نتیجه درست از اطلاعات به دست آمده نیاز به دانستن صحت و دقت کار است. بدین‌منظور یکی از بهترین روش‌های ارزیابی دقت طبقه‌بندی کننده‌ها، به دست‌آوردن ماتریس خطا (Confusion Matrix) طبقه‌بندی است (Vidal and Madjar, 1997). در مطالعات سنجش از دور به طور گسترده‌ای از ماتریس خطا استفاده می‌شود. در این روش داده‌های تست و آزمایشی که در کلاس‌های طبقه‌بندی تعریف شده است، با تصاویر طبقه‌بندی به دست آمده از فایل آموزشی تلاقی داده می‌شود، به گونه‌ای که تمامی پیکسل‌های نمونه برداری شده با کلاس‌های موجود در طبقه‌بندی تلاقی پیدا خواهد کرد و در نهایت امکان بررسی و صحت طبقه‌بندی‌ها فراهم خواهد شد (Vidal and Madjar, 1997). بدست‌آوردن دقت و صحت برای فهم و درک نتیجه حاصل بسیار سودمند است. و استفاده از این نتایج به دست‌آمده برای تصمیم‌گیری نهایی معمولاً بر اساس داده‌های آماری استخراج شده از ماتریس خطا می‌باشد (Pal and Mather, 2004). از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین داده‌ها، به دست‌آوردن دقت پارامترهای معیار دقت کلی و پارامتر صحت است. ماتریس خطا به

جدول ۱: نمایی از جدول ماتریس خطا برای طبقه‌بندی چهارکلاسه.

Table 1: Confusion Matrix for 4 class of classification

	C1	C2	C3	C4	Total
C1	a	b	c	d	a+b+c+d=c1corr
C2	e	f	g	h	e+f+g+h=c2corr
C3	w	z	n	m	w+z+n+m=c3corr
C4	r	s	i	q	r+s+i+q=c4corr
Total	a+e+w+r=c1pred	b+f+z+s=c2pred	c+g+n+i=c3pred	d+h+m+q=c4pred	N

اختلافی برای آن‌ها در نظر نمی‌گیرد، به همین دلیل در کارهای اجرائی برای دقت و صحت‌سنجی بهتر، طبقه‌بندی‌ها از شاخص کاپا استفاده می‌شود، زیرا این شاخص پیکسل‌های نادرست طبقه‌بندی را نیز در نظر می‌گیرد که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود. ضریب کاپا (K): یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد و با اهمیت صحت‌سنجی ضریب کاپا می‌باشد. این پارامتر تمامی پیکسل‌های درست و نادرست طبقه‌بندی را همانند رابطه ۲ مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌دهد:

**دقت کلی (OA):** یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین پارامتر برای صحت‌سنجی در ماتریس، خطای دقت کلی است. در این پارامتر با توجه به اطلاعاتی که در قطر ماتریس خطا وجود دارد، پیکسل‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند، نسبت به کل پیکسل‌ها (N) سنجیده می‌شود (Pal and Mather, 2004) که در رابطه ۱ مشخص شده است.

رابطه (۱)

$$OA = \frac{a+f+n+q}{N}$$

از معایب پارامتر دقت کلی می‌توان گفت که با همه‌ی کلاس‌های طبقه‌بندی به صورت یکسان برخورد می‌کند و

رابطه (۲)

$$\text{kappa} = \frac{N \times (a + f + n + q) - (c1_{\text{corr}} \times c1_{\text{pred}} + c2_{\text{corr}} \times c2_{\text{pred}} + c3_{\text{corr}} \times c3_{\text{pred}} + c4_{\text{corr}} \times c4_{\text{pred}})}{N^2 - (c1_{\text{corr}} \times c1_{\text{pred}} + c2_{\text{corr}} \times c2_{\text{pred}} + c3_{\text{corr}} \times c3_{\text{pred}} + c4_{\text{corr}} \times c4_{\text{pred}})}$$

جدول ۲: محدوده تفسیر ضریب کاپا (K)

Table 2: Kappa coefficient range (K)

عملکرد بسیار ضعیف	کمتر از ۰
عملکرد ضعیف	بین ۰ تا ۰/۲
عملکرد متوسط رو به ضعیف	بین ۰/۲۱ تا ۰/۴۰
عملکرد متوسط	بین ۰/۴۱ تا ۰/۶۱
عملکرد خوب	بین ۰/۶۱ تا ۰/۸۱
عملکرد عالی	بین ۰/۸۱ تا ۱

## نتایج

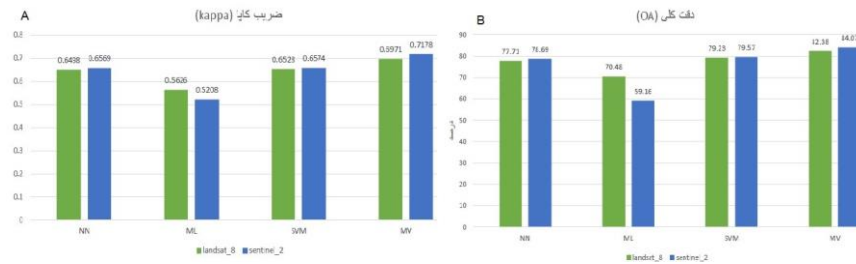
برای اطمینان از نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌ها و تلفیق تصاویر از روش صحت‌سنجی استفاده می‌شود. جدول ۳ صحت‌سنجی خروجی‌های تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ با استفاده از پارامترهای دقت کلی، ضریب کاپا، بر روی محدوده مطالعاتی مسجداغی نشان می‌دهد. تصاویر ماهواره لندست-۸ سه طبقه‌بندی نظارت شده ML، ANN و SVM به ترتیب از دقت ۷۷/۷۱ درصد، ۷۰/۴۸ درصد و ۷۹/۲۳ درصد برخوردار است. در سنجنده سنتینل-۲ نیز سه طبقه‌بندی نظارت شده ML، NN و SVM در محدوده مسجداغی به ترتیب از دقت ۷۸/۶۹ درصد، ۵۹/۱۶ درصد و ۷۹/۵۷ درصد برخوردار است. نتایج به دست آمده نشان از برتری سنجنده سنتینل-۲ نسبت به لندست-۸ در بارزسازی دگرسانی‌های موجود در محدوده مطالعاتی مسجداغی دارد. هم‌چنین با مقایسه ضرایب کاپا به دست آمده از لندست-۸ و سنتینل-۲ بر این برتری سنتینل-۲ تاکید دارد. در بین طبقه‌بندی‌های اعمال شده بر روی

تصاویر طبقه‌بندی SVM در هر دو ماهواره و سنجنده از دقت بالاتری برخوردار است؛ که این نکته نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) است. اما طبقه‌بندی ML در لندست-۸ نسبت به سنتینل-۲ دارای عملکرد بهتری است، که نتایج ضریب کاپا نیز این موضوع را تایید خواهد کرد. نتایج خروجی دقت کلی (OA) برای روش رای‌گیری حداکثری (MV) نسبت به روش الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)، در ماهواره لندست-۸ حدود ۳/۷۵ درصد افزایش یافته است. رای‌گیری حداکثری با دقت کلی ۸۲/۳۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۶۸۶۸ برای ماهواره لندست-۸ نشان‌دهنده این است؛ که تلفیق داده‌های خروجی طبقه بندی‌ها به روش رای‌گیری حداکثری (MV) موجب بهبود در شناسایی دگرسانی‌ها است. هم‌چنین برای ماهواره سنتینل-۲ رویکرد رای‌گیری حداکثری با دقت کلی ۸۴/۰۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۰۷۰، نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان، حدوداً ۴/۵ درصد افزایش داشته است.

جدول ۳: مقایسه نتایج دقت کلی (OA) و ضریب کاپا (K) سه طبقه‌بندی شبکه عصبی (NN)، بیشترین شباهت (ML) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) و ادغام‌گر رای‌گیری حداکثری (MV) در محدوده مطالعاتی مسجداغی با استفاده از ماهواره لندست-۸ و سنجنده سنتینل-۲

Table 3: Comparison of the overall accuracy (OA), Kappa coefficient (K), neural network (NN), Maximum similarity (MI), support vector machine (SVM) and maximum vector (MV) in the Masjed Daghi area with Landsat-8 and Sentinel-2

طبقه بندی کننده		NN		ML		SVM		MV
لندست-۸	OA	٪ ۷۷/۷۱	OA	٪ ۷۰/۴۸	OA	٪ ۷۹/۲۳	OA	٪ ۸۲/۳۸
	K	۰/۶۳۲۸	K	۰/۵۴۹۳	K	۰/۶۵۶۹	K	۰/۶۸۶۹
سنتینل-۲	OA	٪ ۷۸/۶۹	OA	٪ ۵۹/۱۶	OA	٪ ۷۹/۵۷	OA	٪ ۸۴/۰۷
	K	۰/۶۴۷۴	K	۰/۴۱۲۷	K	۰/۶۵۷۰	K	۰/۷۰۷۰



شکل ۱۲: نمودار نتایج حاصل از ادغام و طبقه‌بندی‌ها در محدوده مطالعاتی مسجدداغی، (A): ضریب کاپا، (B): دقت کلی

Fig. 12: Diagram of the combination and classification in the Masjed Daghi area, A: Kappa coefficient, B: Overall accuracy.

نقش مهمی در اکتشاف معادن دارند و به‌طور گسترده در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۲ در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین مناطق کمتری به‌خصوص در ارتباط با کانسارهای پورفیری مورد بررسی واقع شده‌اند. خالقی و همکاران (Khaleghi et al, 2020) مطالعات دقیقی با استفاده از تصاویر سنتینل-۲، لندست-۸ و استر بر روی دگرسانی‌ها و نواحی اکسید آهن در نواحی معدن مس پورفیری بهر آسمان در جنوب کرمان انجام داده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داده است تصاویر سنتینل-۲ نسبت به دو تصویر دیگر برای بارزسازی نواحی اکسید آهن عملکرد بهتری داشته است. همچنین بارزسازی نواحی هیدروکسیدهای آهن در نواحی کانسار پورفیری ظفرقند در شمال شرق اصفهان در تصاویر سنتینل-۲ به خوبی نمایان شده است و عملکرد خوبی داشته است (Salehi and Hashemi Tangestani, 2018). استفاده هم‌زمان سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ در این پژوهش و به-کارگیری روش‌های متفاوت و تلفیق این روش‌ها، توانست در تعیین موقعیت دگرسانی‌های مرتبط با کانسار پورفیری مسجدداغی عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد و نسبت به مطالعات انجام شده علاوه بر نواحی اکسید آهن در بارزسازی دگرسانی‌های مرتبط با ماده معدنی موفق عمل کرده است.

### نتیجه‌گیری

۱: تصاویر خروجی از روش‌های ترکیب‌باندی، نسبت‌باندی، کمترین مربعات رگرسیون‌شده بر روی داده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ و انطباق آن با محدوده زمین‌شناسی منطقه مسجدداغی نشان می‌دهد، سنجنده سنتینل-۲ نسبت به ماهواره لندست-۸ دارای دقت بهتر و بالاتری است.

جدول ۳ و شکل ۱۲ نشان می‌دهد، از بین طبقه‌بندی‌های اعمال شده بر روی تصاویر، روش ماشین‌بردار پشتیبان دارای دقت کلی و ضریب کاپا بالاتری نسبت به سایر روش‌ها است. همچنین با ادغام طبقه‌بندی‌ها با روش رای‌گیری حداکثری مشخص شده است؛ که این روش نسبت به طبقه‌بندی دارای دقت و ضریب کاپا بیشتری است. به‌طورکلی با مقایسه روش‌های اعمال شده بر روی داده‌های سنجنده سنتینل-۲ و لندست-۸ نشان داده خواهد شد که سنجنده سنتینل-۲ دارای قدرت و دقت بالاتری است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد، روش نسبت‌باندی در ماهواره لندست-۸ و سنتینل-۲ و کمترین مربعات رگرسیون شده در سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ در بارزسازی نواحی دارای اکسید آهن و مناطق دگرسانی آرژیلیک و فیلیک به خوبی عمل کرده است. روش‌های به کار گرفته شده در سنجنده سنتینل-۲ و لندست-۸ نظیر نسبت‌باندی، ترکیب‌رنگی کاذب و کمترین مربعات رگرسیون شده در بارزسازی دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی پورفیری نظیر آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک مطابقت خوبی با نقشه زمین‌شناسی نشان می‌دهند؛ هم‌چنین پس از بررسی و مقایسه دقت سه طبقه‌بندی‌کننده این نتایج حاصل شده است؛ که ماشین‌بردار پشتیبان نسبت به دو طبقه‌بندی دیگر دارای دقت بسیار مناسبی است و هم‌چنین با استفاده از تلفیق طبقه‌بندی‌ها با روش رای‌گیری حداکثری این نتیجه حاصل شده است؛ که سنجنده سنتینل-۲ نسبت به ماهواره لندست-۸ دارای دقت بیشتر و مناسب‌تری برای تحقیق و موضوع مورد مطالعه بر روی محدوده مورد نظر است.

مقایسه نتایج منطقه مسجدداغی با نواحی مورد مطالعه در ایران: استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و استر در تشخیص و مکان‌یابی دگرسانی‌های مرتبط با ماده معدنی

۳/۷۵ درصد افزایش یافته است، که نشان می‌دهد تلفیق داده‌های خروجی طبقه‌بندی‌ها به روش رای‌گیری حداکثری موجب بهبود در شناسایی‌های دگرسانی‌ها شده است. هم‌چنین برای سنجنده سنتینل-۲ رویکرد رای‌گیری حداکثری با دقت کلی ۸۴/۰۷ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۰۷۰، نسبت به روش ماشین‌بردار پشتیبان حدوداً ۴/۵ درصد افزایش داشته است.

۴: نتیجه کلی در این تحقیق نشان می‌دهد که ادغام دو سنجنده جهت مطالعات اکتشافی بسیار کارآمد و سودمند است، هم‌چنین سنجنده سنتینل-۲ به دلیل قدرت طیفی و مکانی بهتر دارای دقت بسیار بالایی در طبقه‌بندی‌های ارائه شده و در روش رای‌گیری حداکثری نسبت به ماهواره لندست-۸ دارد.

### سپاسگزاری

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

۲: استفاده از سه طبقه‌بندی (شبکه عصبی، بیشترین شباهت و ماشین‌بردار پشتیبان) با استفاده از سنجنده سنتینل-۲ و ماهواره لندست-۸ نشان می‌دهد؛ طبقه‌بندی ماشین‌بردار پشتیبان در ماهواره لندست-۸ و سنجنده سنتینل-۲ در محدوده مطالعاتی مسجداغی از دقت و ضریب کاپا بالاتری برخوردار است و سنجنده سنتینل-۲ نسبت به ماهواره لندست-۸ دارای دقت و صحت بالاتری است هم‌چنین استفاده از این سه طبقه‌بندی در مقایسه با روش‌های نسبت‌بندی، کمترین مربعات رگرسیون شده و ترکیب‌بندی دارای دقت بالاتر برای بارزسازی دگرسانی‌های موجود در منطقه مطالعاتی است. در قسمت صحت سنجی هر سه طبقه‌بندی به صورت اعداد و ارقام با یکدیگر و در نهایت تلفیق آن‌ها نیز با آنها مقایسه شده است.

۳: نتایج استفاده از تکنیک ادغام و تلفیق داده‌های سنجنش از دور با استفاده از روش رای‌گیری حداکثری، بر روی داده‌های سنتینل-۲ و لندست-۸ نشان می‌دهد، خروجی دقت کلی برای روش رای‌گیری حداکثری نسبت به روش الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان، در ماهواره لندست-۸ حدود

### References

- Afzal, P., Gholami, H., Madani, N. and Tasrebi, A.B., 2023. Mineral resource classification using Geostatistical and Fractal Simulation in the Masjed Daghi Cu-Mo porphyry deposit, NW Iran. *Minerals*, v. 13(3), 370 p. <https://doi.org/10.3390/min13030370>
- Aldrich, C. and Auret, L., 2013. Tree-Based Methods, in *Unsupervised Process Monitoring and Fault Diagnosis with Machine Learning Methods*. Springer, p. 183-220. 10.1007/978-1-4471-5185-2
- Arekhi, S. and Asibnejad, M., 2011. Evaluation of the efficiency of support vector machine algorithms for land use classification using Landsat + ETM satellite imagery (case study: Ilam Dam). *Natural Resources Department, Agriculture Sciences Faculty, University of Ilam, Scientific Journal of Research Pasture and Desert of Iran*, v. 18, p. 420-440. <https://doi.org/10.22092/IJRDR.2011.102175>.
- Ebrahimi, S., Alirezaei, S., Pan, Y. and Mohammadi, B., 2018. Geology, mineralogy and ore fluid characteristics of the Masjed Daghi gold bearing vein system, NW Iran. *Journal of Economic Geology*, v. 9, p. 149-174 (In Persian).
- Emamalipour, A., Khatamian, A., Oskoei, R. and Abdollahi Sharif, Ch., 2011. Geological pattern, alteration and magnetic anomaly of the Masjed Daghi (East Julfa). *Journal of Advanced Applied Geology*, v. 1, p. 78-89 (In Persian).
- Esa Earth Online. (nd.)., 2020. Retrieved January 9 <https://earth.esa.int/eogateway>.
- European Space Agency, 2020. Sentinel Online-ESA. European Space Agency- Earth Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel>.
- Farhadi, S., Tatullo, S., Boveri Konari, M. and Afzal, P., 2024. Evaluating staking C and ensemble models for enhanced. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107441>.
- Farhadi, S., Afzal, P., Boveri Konari, M., Daneshvar Saein, L. and Sadeghi, B., 2022. Combination of Machine Learning Algorithm with Concentration-area Fractal method for Soil Geochemical anomaly Detection in sediment hosted Irankuh Pb-Zb deposit, Central Iran. *Minerals*, v. 12(6), p. 68-91.
- Gualtieri, J.A. and Cromp, R.F., 1999. Support Vector Machines for Hyper-spectral Remote Sensing Classification. *Proc SPIE*, v. 358(4), p. 221-232. <https://doi.org/10.1117/12.339824>.
- Hsu, C.W. and Lin, C.J., 2002. A comparison pf methods for multiclass support vector machines, *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 13(2), p. 415-425. <https://doi.org/10.1109/72.991427>
- Jaafari, A., 2014. Automatic path extraction from high-resolution images using dynamic curve model and fuzzy inference system, MSc thesis,

- Khaje Nasir Toosi University of Technology, 98 p (In Persian).
- Joachims, T., 1999. Making large scale SVM learning practical. In *Advances in Kernel Methods-Support Vector Learning*, 169 p. MIT Press, USA
- Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A. and Calagari, A.A., 2020. Synergetic use of the Sentinel-2, Aster, and Landsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale, *Acta Geodynamic and Geometer*, v. 17(19), p. 311-328, DOI: 10.13168/AGG.2020.0023
- Kuncheva, L.I., Whitaker C.J., Shipp, C.A. and Duin, R.P.W., 2003. Limits on the majority vote accuracy in classifier fusion, *Pattern Analysis & Applications*. Springer, v. 6(1), p. 22-31. <https://doi.org/10.1007/s10044-002-0173-7>
- Lu, D. and Weng, Q., 2007. A survey of image classification method and techniques for improving classification performance, *International Journal of Remote Sensing*, v. 28(5), p. 823-870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>.
- Moor, F., Rastmanesh, F., Asadi Harooni, H. and Modabberi, S., 2008. Mapping mineralogical alteration using principal component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran from ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29(10), p. 2851-2867 <https://doi.org/10.1080/01431160701418989>.
- Mohammadi, B., Aliakbari, H., Fard, M. and Samaee, A., 2005. *Geology and drilling report of Masjed Daghi area (scale 1:1000)*. Geological Survey of Iran, Report, 340 p (In Persian).
- Pal, M. and Mather, P.M., 2004. Assessment of the effectiveness of support vector machines for hyperspectral data, *Future generation computer systems*, v. 20(7), p. 1215-1225. <https://doi.org/10.1016/j.future.2003.11.011>.
- Pourkaseb, H., Rangzan, K., Beyranvand, S., Zarasvandi, A. and Ranjbar, H., 2018. Comparison of three classification methods (MLC, SAM and SID) to determine the best petrography map and using spectroscopy and MTMF method to distinguish alteration zones. *Journal of Advanced Applied Geology*, v. 30, p. 28-34 (In Persian).
- Rosich, B. and Meadows, P., 2004. Absolute calibration of ASTER Level 1 products, ESA/ESRIN, ENVI-CLVI-EOPG-TN-03-0010, Revision 5. DOI: 10.4236/ijg.2014.513127
- Richards, J.A. and Gia, X., 1999. *Remote Sensing Digital Image Analysis*, In *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verilog, Berlin, v. 23, p. 193-196 <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03978-6>.
- Romer, H., Willroth, P., Kaiser, G., Vafeidis, A.T., Ludwig, R., Sterr, H. and Revilla Diez, J., 2012. Potential of remote sensing techniques for tsunami hazard and vulnerability analysis-a case study from phangnga province, Thailand. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 12(6), p. 2103-2126. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2103-2012>.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H., and Ashley, R.P., 1997. Discrimination of hydrothermally altered rocks and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images, *Geophysics*, v. 42, p. 522-535. <https://doi.org/10.1190/1.1440723>.
- Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S. and Yamaguchi, Y., 2005. Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER image. In: *Scientific Conference, SES*, 10-13 June, Varna, Bulgaria
- Salehi, T. and Hashemi Tangestani, M., 2018. Evaluation of Sentinel-2 multispectral imaging sensors in detection of alteration zones of porphyry copper deposits, case study NE Isfahan, 1<sup>st</sup> National Conference of Geological Remote Sensing Society of Iran, 12-14 Azar, Isfahan (In Persian).
- Shi, T. and Horvath, S., 2006. Unsupervised learning with random forest predictors, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, v. 15(1), p. 118-138. <https://doi.org/10.1198/106186006x94072>
- Seo, M., Aung Kyaw, T. and Takashima, I., 2005. Application of remote sensing techniques on iron oxide detection from ASTER and Landsat images of Tanintharyi Coastal Area, Myanmar, *Akita University*, v. 26, p. 21-28. <https://gbank.gsj.jp/ld/resource/geolis/200528110>
- Vapnik, V., 1998. *Statistical learning theory*, New York: John Wiley and Sons, New York
- Vidal-Madjar, D., 1997. Application of Dempster-shafer evidence theory to unsupervised classification in multisource remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35(4), p. 1018-1031, Doi: 10.1109/36.602544.
- Wang, Z., Ziou, D., Armenakis, C., Li, D. and Li, Q., 2005. A Comparative Analysis of Image Fusion Methods, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, v. 43(6), p. 1391-1402. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2005.846874>
- Watts, D., 2001. *Land cover flapping by combinations of Multiple Artificial Neural Networks*, M.Sc. Thesis, and Department of Geometrics Engineering University of Cal, USA
- Wijaya, A., 2005. *Application of multi-stage Classification to Detect Illegal Logging with the Use of multi-source Data*, M.Sc. Thesis, TTC, Enschede, Netherlands.