

Comparison of Data Fusion Algorithms' Performance in Improving the Accuracy of Landsat 9 Digital Data Classification: A Case Study of Eastern Isfahan

Saeideh Kalantari ^{1*}, Mahdi Tazeh ², Mahla Hasanzadeh ³

1. Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran

2. Associate Professor., Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran

3. MSc in Desert Management and Control, Department of Nature Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Iran

*Corresponding Author: skalantari@ardakan.ac.ir

Received date: 03/07/2026

Accepted date: 04/09/2026



[10.22034/jdmal.2026.2093286.1532](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2093286.1532)

Abstract

Enhancing land-use classification accuracy with digital satellite data is a key challenge in land management, and data fusion algorithms can help improve the results. This study compares the performance of different data fusion algorithms in improving land-use classification accuracy. In this study, Landsat 9 data from 2024 was utilized as the most recent available information. During the fusion process, Landsat 9 multispectral data with a 30m resolution and panchromatic data with a 15m resolution were combined. After necessary preprocessing and corrections, a land-use map was prepared, including classes for orchards and agricultural lands, residential and industrial areas, mountainous and foothill areas, and clayey areas and covered plains. Then, the data fusion algorithms including Simple, Brovey, IHS, Gram-Schmidt, and ESRI were applied to the digital data. A land-use map was generated for each dataset using the Support Vector Machine algorithm. The methods' performance was then assessed and compared based on the overall accuracy and Kappa coefficient. The results indicated that the overall classification accuracy was 80.29% before applying data fusion algorithms and increased to 89.87% afterward, showing a 9.58% improvement. The performance varied among the evaluated algorithms, with the Simple method achieving the highest accuracy of 89.87% and demonstrating better results than the other data fusion techniques. Map accuracy assessed with the Kappa coefficient revealed that the Simple method also scored the highest, with a value of 0.82, followed by Brovey (0.78), Gram-Schmidt (0.745), ESRI (0.63), and IHS (0.568). Overall, choosing an appropriate data fusion algorithm significantly influences classification accuracy, with the Simple method being the most effective for creating land-use maps from Landsat 9 data in the study area.

How to cite this article

Kalantari, S., Tazeh, M., and Hasanzadeh, M. (2026). Comparison of Data Fusion Algorithms' Performance in Improving the Accuracy of Landsat 9 Digital Data Classification: A Case Study of Eastern Isfahan. *Desert Management*, 14(1), 85-102. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2093286.1532](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2093286.1532)



Extended Abstract

Introduction

Land use is a vital indicator of how humans use land and plays a crucial role in managing natural resources, spatial planning, and environmental monitoring. Accurate maps of land use are especially critical in dry and semi-arid regions due to scarce water resources, delicate ecosystems, and swift changes driven by human activities. Remote sensing data offers an effective method for acquiring current spatial information for land-use mapping and environmental monitoring, thanks to their wide coverage and capability to deliver detailed spatial and spectral data. Landsat data have been widely used for land-use and land-cover studies because of their continuous data availability, broad spatial coverage, and suitability for monitoring changes in terrestrial environments (13, 20). A major limitation of satellite remote sensing data is the trade-off between spatial and spectral resolution. Panchromatic data provide relatively high spatial resolution but limited spectral information, whereas multispectral data provide richer spectral information but lower spatial resolution (1, 13). This limitation may reduce classification performance, particularly in heterogeneous landscapes. Image fusion is therefore an important approach for integrating spatial and spectral information and improving satellite data quality. Pixel-level fusion methods can combine information before classification and potentially improve land-use class representation (3, 5, 9). However, fusion performance depends on input data characteristics, the algorithm used, and the study area's environmental conditions. Previous studies have demonstrated differences among fusion techniques in preserving spatial and spectral information (3, 5). Therefore, evaluating alternative fusion algorithms is necessary for identifying an appropriate method for improving land-use classification accuracy. This study compared the performance of different data fusion algorithms in improving land-use classification accuracy using Landsat 9 digital data in eastern Isfahan, Iran, and identified the most effective fusion method for producing a reliable land-use map under the study area's environmental conditions.

Materials and Methods

The study took place in the Fasaran region in eastern Isfahan, situated within Iran's central plain. Covering about 63,500ha, the area features a fairly uniform plain landscape and a semi-arid climate. Fig. 1 illustrates the geographical location of the study area. A Landsat 9 OLI-2 image for Path 163 and Row 37, acquired on 19 April 2025, was used. Multispectral Bands 1 to 7, with a spatial resolution of 30m, and Panchromatic Band 8, with a spatial resolution of 15m, were selected for image fusion. The characteristics of the Landsat 9 image and the spectral and spatial specifications of the bands used in the study are presented in Table 1. Once the satellite data was retrieved from the USGS database, initial preprocessing steps, including preparing an appropriate color composite and clipping the study area, were carried out. Image fusion was then performed in ArcGIS 10.8 to integrate the spectral information from multispectral data with spatial information from the panchromatic band. Fig. 2 presents the overall processing workflow. Five fusion algorithms were evaluated: Brovey, IHS, Esri, Simple Mean, and Gram–Schmidt. In the Brovey method, the fused pixel value is computed with Equation 1, while in the IHS method, the intensity component is determined using Equation 2. In the simple mean method, the fused pixel value is calculated as the average of the multispectral and panchromatic pixel values, according to Equation 3. The Gram–Schmidt method involved creating a simulated panchromatic band by combining multispectral bands based on Equation 4. These images were then classified with a supervised support vector machine algorithm. Four land-use categories were identified: mountainous and foothill areas, clay and plain lands, residential and industrial zones, and orchards and agricultural fields. Training samples were collected through field observations, local knowledge, high-resolution imagery, and visual analysis of Google Earth. Classification accuracy was assessed using overall accuracy and the Kappa coefficient.

Results and Discussion

The classification process produced land-use maps with different spatial representations and classification accuracies. In the present study, ground truth data for each land use were used, as shown in Fig 3. The results obtained from the Simple Mean, Gram–Schmidt, ESRI, Brovey, and IHS fusion methods are presented in Fig 4. The spatial distribution of the four land-use classes differed among the fusion methods, indicating that the selected algorithm influenced the representation and delineation of land-use classes. The estimated areas of the land-use classes obtained from the five fusion methods are presented in Table 2. For orchard and agricultural lands, Brovey produced the largest estimated area at 14,791.7ha, whereas IHS produced the smallest area at 8,223.01ha. For residential and industrial lands, Esri produced the largest estimated area at

28,334.8ha, while Brovey produced the smallest at 18,430.7ha. In clayey and covered-plain lands, the IHS method identified the largest extent (25,914.1 ha), while the Esri method produced the smallest (18,341.1ha). For lands in mountainous and foothill regions, Brovey estimated the largest area, while Esri estimated the smallest. These variations show that the fusion algorithm can significantly influence the spatial representation and area calculations of specific land-use categories. Table 3 clearly shows the differences in classification accuracy among the evaluated methods. The Simple Mean Method achieved the highest overall accuracy (89.87%), with Brovey close behind at 83.6 percent. IHS followed at 79.19 percent, Gram–Schmidt at 77.07 percent, and Esri at 65.08 percent. The highest Kappa coefficient was also for Simple Mean at 0.82, then Brovey at 0.78, Gram–Schmidt at 0.745, Esri at 0.63, and IHS at 0.56. The unfused multispectral image achieved an overall accuracy of a certain percentage. Using the simple mean method, the classification accuracy improved by 9.58 percentage points over the original multispectral image. These findings indicate that combining spatial information from the panchromatic band with the spectral details of multispectral data can enhance classification results. However, the variations in estimated areas between different fusion methods suggest that overall accuracy alone does not fully capture how each algorithm performs for specific land-use categories.

Conclusion

The results showed that choosing a data fusion algorithm significantly impacts land-use classification accuracy and how land is spatially represented. Of the five methods tested, Simple Mean achieved the highest overall accuracy of 89.87% and a Kappa coefficient of 0.82. It also increased accuracy by 9.58 percentage points compared to the unfused multispectral image. Variations in the estimated land areas across the methods further highlighted the influence of fusion algorithms on land-use depiction. In eastern Isfahan's environmental conditions, Simple Mean proved to be the most effective among the tested algorithms for creating a land-use map from Landsat 9 data.

Keywords: Land use, Remote sensing, Support Vector Machine, Accuracy assessment

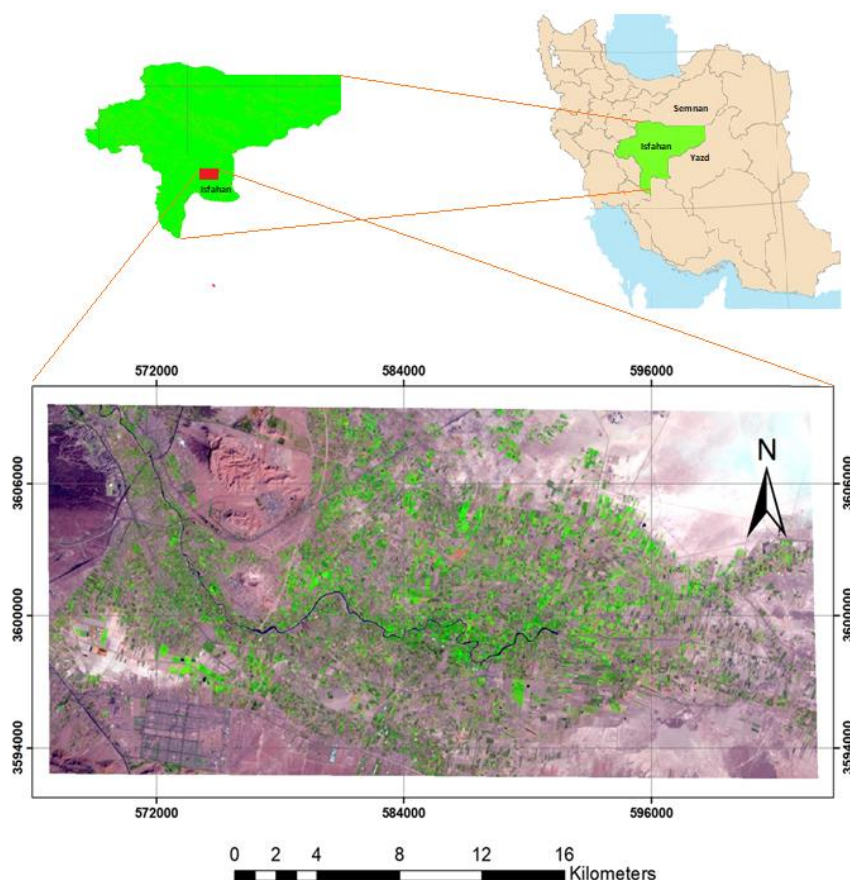
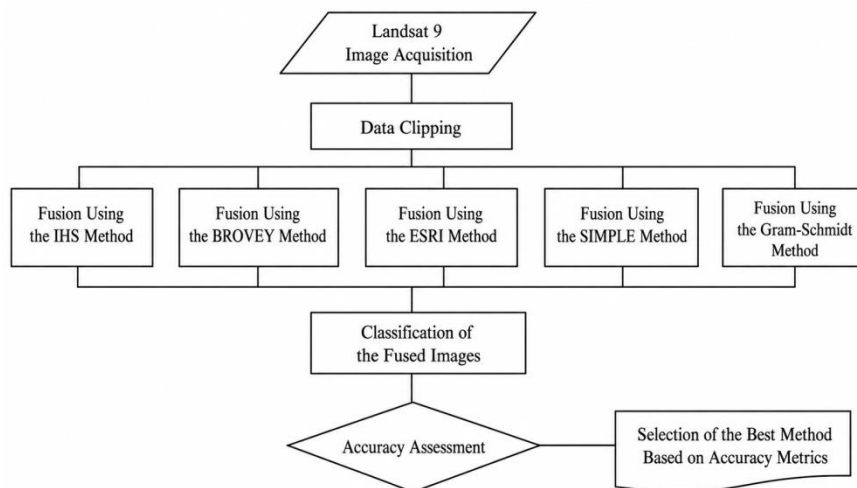


Fig 1. Geographical location of the study area

Table 1. Characteristics of Landsat 9 spectral bands

Band Name	Wavelength (μm)	Spatial Resolution	Band Number
Coastal aerosol	0.45-0.43	30	Band 1
Blue	0.51-0.45	30	Band 2
Green	0.59-0.53	30	Band 3
Red	0.67-0.64	30	Band 4
Near Infrared	0.88-0.85	30	Band 5
Short Infrared1	1.65-1.57	30	Band 6
Short Infrared2	2.29-2.11	30	Band 7
Band 8 panchromatic	0.90-0.52	15	Band 8
Clrrus	1.38-1.36	30	Band 9
Thermal Infrared1	11.19-10.60	100	Band 10
Thermal Infrared2	12.51-11.50	30	Band 11

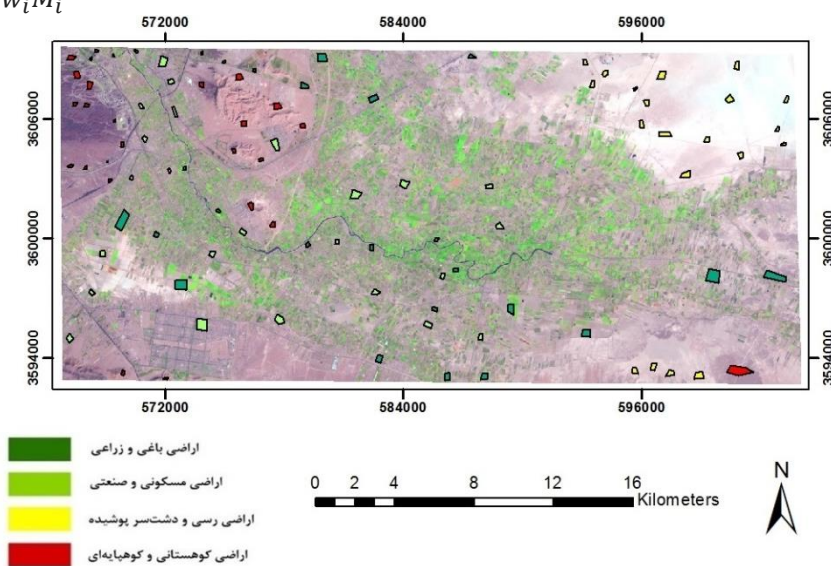
**Fig 2. Flowchart illustrating the research methodology**

$$F_i = \frac{M_i}{\sum_{k=1}^n M_k} \times P \quad (1)$$

$$I = \frac{R+G+B}{3} \quad (2)$$

$$F = \frac{M+P}{2} \quad (3)$$

$$P_s = \sum (i = 1)^n w_i M_i \quad (4)$$

**Fig 3. Ground truth map of the study area**

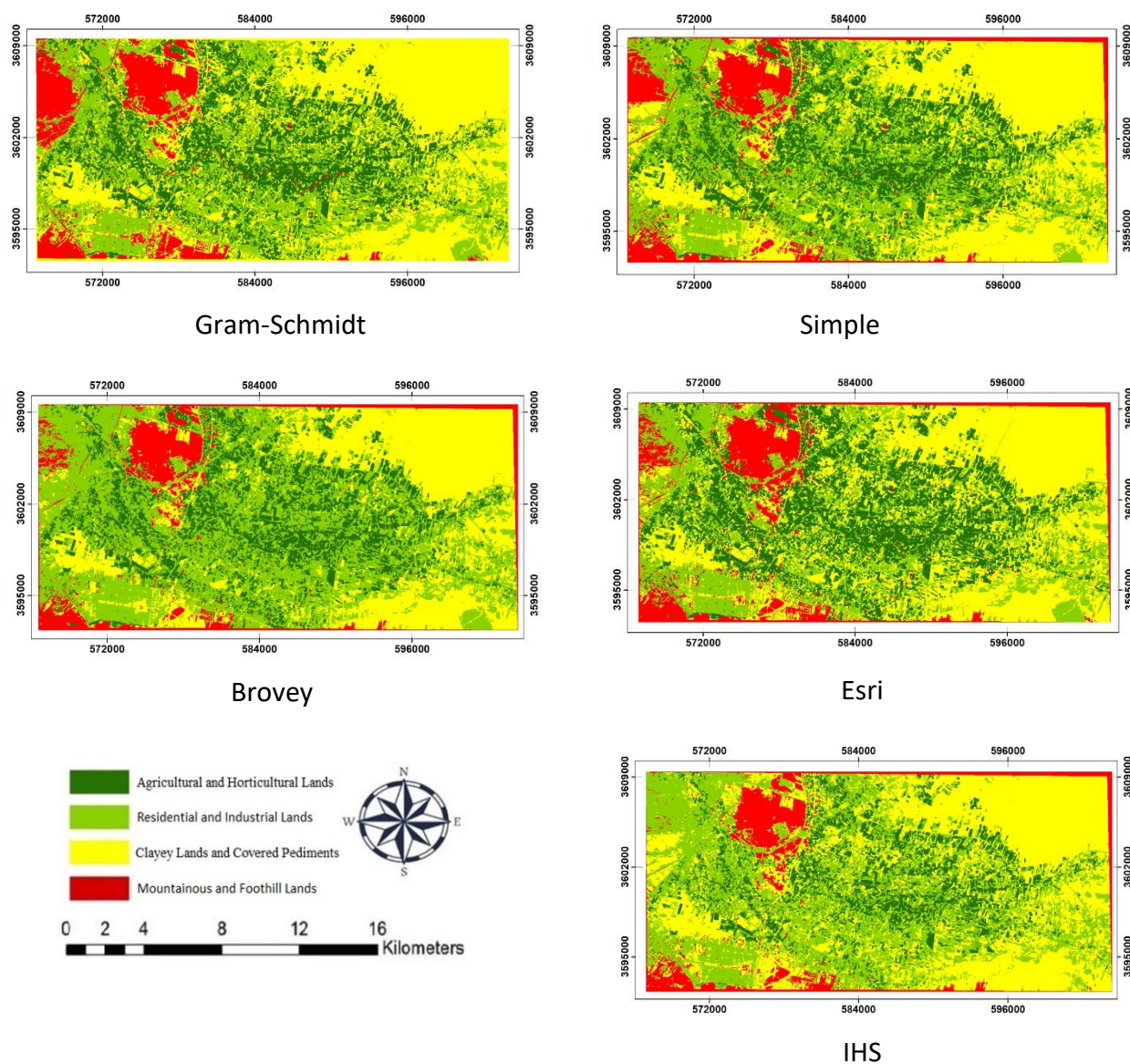


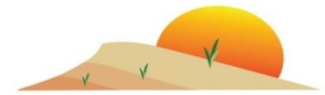
Fig 4. Land-use classification maps generated through various fusion techniques

Table 2. Comparison of land-use class areas (ha) using different fusion algorithms

land-use	Brovey	Gram	Esri	IHS	Simple
Agricultural & Horticultural	14791.7	13240.7	11445.3	8223.01	12473.1
Residential & Industrial	18430.7	18636.4	28334.8	23985.4	21314.4
Clayey & covered Pediments	23186	25718.5	18341.1	29514.1	23313.2
Mountainous and Foothills	6852.33	5962.19	5436.7	5435.42	6456.94

Table 3. Classification accuracy percentages based on different fusion algorithms

Fusion	Esri	Gram	IHS	Brovey	Simple
Overall Accuracy	65.08	77.07	79.19	83.6	89.87
Kappa Coefficient	0.63	0.745	0.56	0.78	0.82



مقایسه عملکرد خوارزمیک‌های ادغام داده، در بهبود صحت طبقه‌بندی داده‌های رقومی لندست ۹، بررسی موردی: شرق اصفهان

سعیده کلانتری^{۱*}، مهدی تازه^۲، مهلا حسن زاده^۳

۱. دانشیار گروه طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، یزد، ایران.
 ۲. دانشیار گروه طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، یزد، ایران.
 ۳. کارشناسی ارشد مدیریت و کنترل بیابان، گروه طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، یزد، ایران.
- * نویسنده مسئول: skalantari@ardakan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳



[10.22034/jdmal.2026.2093286.1532](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2093286.1532)

چکیده

بهبود صحت طبقه‌بندی کاربری اراضی، با استفاده از داده‌های رقومی ماهواره‌ای، یکی از چالش‌های مهم در مدیریت اراضی است و الگوریتم‌های ادغام داده می‌توانند، دقت طبقه‌بندی را افزایش دهند. هدف پژوهش حاضر، بررسی میزان تأثیر روش‌های مختلف ادغام داده، بر دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی و تعیین روش مؤثرتر در بهبود نتایج طبقه‌بندی است که در آن، از داده‌های رقومی لندست ۹ مربوط به سال ۱۴۰۴ (۲۰۲۵)، به‌عنوان جدیدترین داده‌های در دسترس، استفاده شد. در فرآیند ادغام، از داده‌های چندطیفی و پانکروماتیک لندست ۹، به‌ترتیب با قدرت تفکیک مکانی ۳۰m و ۱۵m، استفاده شد. پس از انجام پیش‌پردازش‌ها و تصحیحات لازم، نقشه کاربری اراضی، شامل طبقات باغی و زراعی، مسکونی و صنعتی، کوهستانی و کوهپایه‌ای و رسی و دشت‌سرپوشیده، تهیه شد. سپس الگوریتم‌های ادغام داده شامل میانگین ساده، IHS، Brovey، ESRI و Gram-Schmidt بر روی داده‌های رقومی، اعمال شد. برای هر یک از داده‌های حاصل، نقشه کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان تهیه و عملکرد روش‌ها، بر اساس شاخص صحت کلی و ضریب کاپا، ارزیابی و مقایسه شد. نتایج نشان داد، صحت کلی طبقه‌بندی، پیش از اعمال الگوریتم‌های ادغام داده ۸۰/۲۹٪ بود و پس از اعمال این الگوریتم‌ها به ۸۹/۸۷٪ افزایش یافت، بیانگر افزایش ۹/۵۸٪، در دقت طبقه‌بندی است. عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی یکسان نبود و روش میانگین ساده، با بیشترین صحت کلی معادل ۸۹/۸۷٪، نسبت به دیگر روش‌های ادغام داده، عملکرد بهتری را نشان داد. ارزیابی صحت نقشه‌های بدست آمده، با بهره‌گیری از ضریب کاپا، نشان داد، روش میانگین ساده، با ضریب کاپای ۰/۸۲ بیشترین صحت را دارد و پس از آن، روش‌های Brovey، ESRI، Gram-Schmidt، IHS و به‌ترتیب مقدارهای ۰/۷۸، ۰/۷۴۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۷ را نشان دادند. به‌طورکلی، انتخاب خوارزمیک مناسب ادغام داده، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود دقت طبقه‌بندی دارد و روش میانگین ساده، در شرایط منطقه، کارآمدترین الگوریتم برای تهیه نقشه کاربری اراضی بر پایه داده‌های رقومی لندست ۹، بود.

واژگان کلیدی: کاربری اراضی؛ سنجش از دور؛ ماشین بردار پشتیبان؛ ارزیابی دقت

استناد به این مقاله

کلانتری، سعیده، تازه، مهدی و حسن زاده، مهلا. (۱۴۰۵). ب مقایسه عملکرد خوارزمیک‌های ادغام داده، در بهبود صحت طبقه‌بندی داده‌های رقومی لندست ۹، بررسی موردی: شرق اصفهان. مدیریت بیابان، ۱۴(۱)، ۸۵-۱۰۲. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2093286.1532](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2093286.1532)



■ مقدمه

کاربری اراضی، یکی از مهم‌ترین شاخص‌های توصیف‌کننده نحوه بهره‌برداری انسان از سرزمین و عامل کلیدی در مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی فضایی و پایش تغییرات محیطی است. تهیه نقشه‌های دقیق کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با عوامل محیطی مانند خشکسالی، نقش مهمی در مدیریت و پایش تغییرات سرزمین دارد. از اینرو، دستیابی به اطلاعات مکانی دقیق و به‌روز از کاربری اراضی، یکی از نیازهای اساسی بررسی محیط‌زیستی و بررسی تغییرات سرزمین است (۱۵). در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های سنجش از دور و افزایش دسترسی به داده‌های رقومی ماهواره‌ای، امکان پایش مستمر کاربری اراضی را در مقیاس‌های مختلف فراهم کرده است (۶). این داده‌ها، با فراهم کردن اطلاعات مکانی و طیفی از سطح زمین، از داده‌های مهم برای استخراج و تحلیل اطلاعات مربوط به ویژگی‌ها و کاربری‌های سطح زمین به شمار می‌روند (۱۳). داده‌های ماهواره Landsat 8 و سنجنده OLI نیز با فراهم کردن اطلاعات چندطیفی با قدرت تفکیک مکانی متوسط، در بررسی‌های مربوط به پایش و تحلیل ویژگی‌های سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۰، ۲۱). این داده‌ها به دلیل پوشش وسیع، تناوب زمانی مناسب و قابلیت استخراج اطلاعات مکانی، کاربرد زیادی در مدیریت منابع طبیعی، پایش تغییرات محیطی، برنامه‌ریزی شهری و بررسی‌های کاربری اراضی دارد (۱۶). همچنین، کاربرد داده‌های سنجش از دور در شناسایی و پایش پدیده‌های محیطی، از جمله رخدادهای سیلابی، در مطالعات مختلف مورد توجه قرار گرفته است (۱۷). با این وجود، در پردازش داده‌های رقومی سنجش از دور، تفاوت در ویژگی‌های مکانی و طیفی داده‌ها، ضرورت بهره‌گیری از اطلاعات مکمل آنها را مطرح می‌کند؛ از اینرو، روش‌های ادغام داده و تصویر در سطح پیکسل می‌توانند با ترکیب اطلاعات موجود در داده‌های مختلف، زمینه را برای دستیابی به اطلاعات جامع‌تر از سطح زمین فراهم کنند (۸). این محدودیت می‌تواند، دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی را، به‌ویژه در مناطق ناهمگن،

تحت تأثیر قرار دهد. در راستای رفع این محدودیت، ادغام داده، یکی از متداول‌ترین روش‌های پردازش داده‌های رقومی سنجش از دور است که با تلفیق اطلاعات مکانی و طیفی، امکان تولید داده‌هایی با کیفیت بیشتر را فراهم می‌کند (۲۲). این فرایند که در منابع علمی با عنوان ادغام^۱ نیز شناخته می‌شود، با ترکیب اطلاعات حاصل از داده‌های مختلف، زمینه بهبود دقت طبقه‌بندی و افزایش قابلیت استخراج اطلاعات از داده‌های رقومی را فراهم می‌کند (۲). روش‌های مختلف ادغام داده، برپایه نحوه ترکیب اطلاعات و ویژگی‌های داده‌های ورودی، رویکردهای متفاوتی را برای ایجاد داده تلفیقی ارائه می‌دهند (۱). به‌طور کلی، در بررسی‌های سنجش از دور، استفاده از روش‌های مختلف ادغام داده‌ها به منظور بهره‌گیری هم‌زمان از اطلاعات مکانی و طیفی و بهبود قابلیت استخراج اطلاعات از داده‌های سنجش از دور مورد توجه قرار گرفته است (۹، ۱۱).

خوارزمیک‌های (الگوریتم) مختلف ادغام داده با رویکردهای متفاوتی اطلاعات مکانی و طیفی را تلفیق می‌کنند. در این زمینه روش‌های میانگین ساده، Brovey، IHS، Gram-Schmidt، ESRI ابداع شده‌اند. این الگوریتم‌ها از پرکاربردترین روش‌های ادغام در سطح پیکسل هستند و بررسی‌های مختلف، کارایی آنها در بهبود کیفیت داده‌های رقومی و افزایش دقت طبقه‌بندی را مورد بررسی قرار داده‌اند. بررسی‌های پیشین نیز بر اهمیت انتخاب الگوریتم مناسب ادغام داده، تأکید کرده‌اند. در پژوهشی، کیفیت طیفی و مکانی روش‌های مختلف ادغام مبتنی بر پیکسل مقایسه شد و تفاوت عملکرد الگوریتم‌ها در حفظ ویژگی‌های طیفی و مکانی نشان داده شد (۳). همچنین، در تحقیقی دیگر، با استفاده از روش IHS و اطلاعات منحنی‌های پاسخ طیفی سنجنده، بهبود کیفیت داده‌های ادغام‌شده گزارش شد (۱۰). در پژوهشی دیگر، رویکردهای مختلف ادغام تصویر بر اساس نحوه استخراج و ترکیب اطلاعات و با هدف بهبود کیفیت داده تلفیقی بررسی و دسته‌بندی شده‌اند

¹ fusion

شده است و در پهنه‌ای دشتی و هموار از دشت مرکزی ایران قرار دارد. استقرار روستا در حاشیه محور ارتباطی اصفهان-ورزنه سبب شده است که از نظر ارتباطات، دسترسی نسبتاً مناسبی به کانون‌های جمعیتی و خدماتی پیرامونی، به‌ویژه مرکز استان، داشته باشد. محدوده روستای فساران، بر روی اراضی دشتی با توپوگرافی نسبتاً یکنواخت، توسعه یافته است. این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک است. این محدوده دارای با مساحت ۶۳۵۰۰ ha به دلیل گوناگونی کاربری اراضی انتخاب شد. این محدوده بین طول جغرافیایی ۵۱°۳۷' تا ۵۲°۱۴' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲°۲۸' تا ۳۲°۳۹' شمالی واقع شده است (شکل ۱).

داده‌های مورد استفاده و فرآیند ادغام تصاویر

به‌منظور اجرای فرآیند ادغام تصاویر، تصویر ماهواره‌ای سنجنده OLI-2 ماهواره Landsat 9 مربوط به گذر ۱۶۳ و ردیف ۳۷، در تاریخ ۱۴۰۴/۱/۳۰ (۲۰۲۵/۰۴/۱۹)، مورد بهره‌گیری قرار گرفت. ویژگی‌های کامل تصویر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. انتخاب این سنجنده، بر پایه توانایی زیاد آن، در ارائه داده‌های چندطیفی با وضوح مکانی مناسب، طیف گسترده پوشش الکترومغناطیسی و کاربرد گسترده در بررسی‌های سنجش از دور و پایش محیطی انجام شد (۲۱). با توجه به اهمیت زمان اخذ داده‌های سنجش از دور در بررسی تغییرات سطح زمین، تصاویر مورد استفاده از تاریخ اخذ یکسان انتخاب شدند تا تأثیر تغییرات زمانی کاهش یابد (۷). برای اجرای فرآیند ادغام، باندهای ۱ تا ۷ تصاویر چندطیفی با وضوح مکانی ۳۰ m و باند ۸ تصاویر پانکروماتیک با وضوح مکانی ۱۵ m مورد استفاده قرار گرفتند. این ترکیب داده‌ها، با هدف ارتقای قدرت تفکیک مکانی تصاویر چندطیفی و حفظ ویژگی‌های طیفی اصلی انجام شد. به عبارت دیگر، تصاویر ادغام‌شده، با هدف تلفیق اطلاعات طیفی تصاویر چندطیفی و اطلاعات مکانی باند پانکروماتیک، تولید شدند تا امکان ارزیابی و مقایسه کمی عملکرد روش‌های مختلف ادغام در فرآیند طبقه‌بندی کاربری اراضی، فراهم شود. به

(۱۴). افزون بر این، نتایج حاصل از ادغام داده‌های Landsat 8 و Sentinel-2 نشان داد که ادغام این داده‌ها می‌تواند در بهبود ارزیابی و پهنه‌بندی کیفی آب‌های سطحی مؤثر باشد (۱۹). در فرآیند ادغام داده‌های سنجش از دور، ترکیب اطلاعات مکانی داده‌های پانکروماتیک با اطلاعات طیفی داده‌های چندطیفی، با هدف افزایش جزئیات مکانی و حفظ ویژگی‌های طیفی، از رویکردهای مورد استفاده در روش‌های ادغام داده است (۱۲).

نتایج بررسی‌های پیشین، نشان می‌دهد که عملکرد خوارزمیک‌های مختلف به ویژگی‌های داده‌های رقومی، شرایط منطقه مورد بررسی و نوع کاربری اراضی وابسته است؛ از اینرو، نمی‌توان یک روش را برای تمامی مناطق و داده‌ها به عنوان گزینه برتر معرفی کرد. این موضوع، ضرورت ارزیابی و مقایسه عملکرد بررسی‌های ادغام داده، را در شرایط محیطی و داده‌ای مختلف، بیش از پیش آشکار می‌کند.

مقایسه جامع عملکرد بررسی‌های میانیگین ساده، JHS، Brovey، Schmidt Gram- و ESRI بر روی داده‌های ماهواره Landsat 9، که از آغاز سال ۱۴۰۰ (۲۰۲۲)، در دسترس کاربران قرار گرفته است، از جنبه‌های نوآورانه پژوهش حاضر است. بر این پایه، بررسی‌های مختلف ادغام داده با هدف بهبود دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از داده‌های رقومی Landsat 9 در منطقه‌ای با اقلیم خشک مقایسه شدند و با تمرکز بر مقایسه بررسی‌های کاربردی ادغام داده، مناسب‌ترین روش برای افزایش دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی و بهبود کیفیت داده‌های رقومی شناسایی شد. نتایج به دست آمده، می‌تواند مبنایی علمی برای انتخاب بررسی‌های مناسب ادغام داده در بررسی‌های مرتبط با تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، پایش تغییرات سرزمین، مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی محیط‌زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم کند.

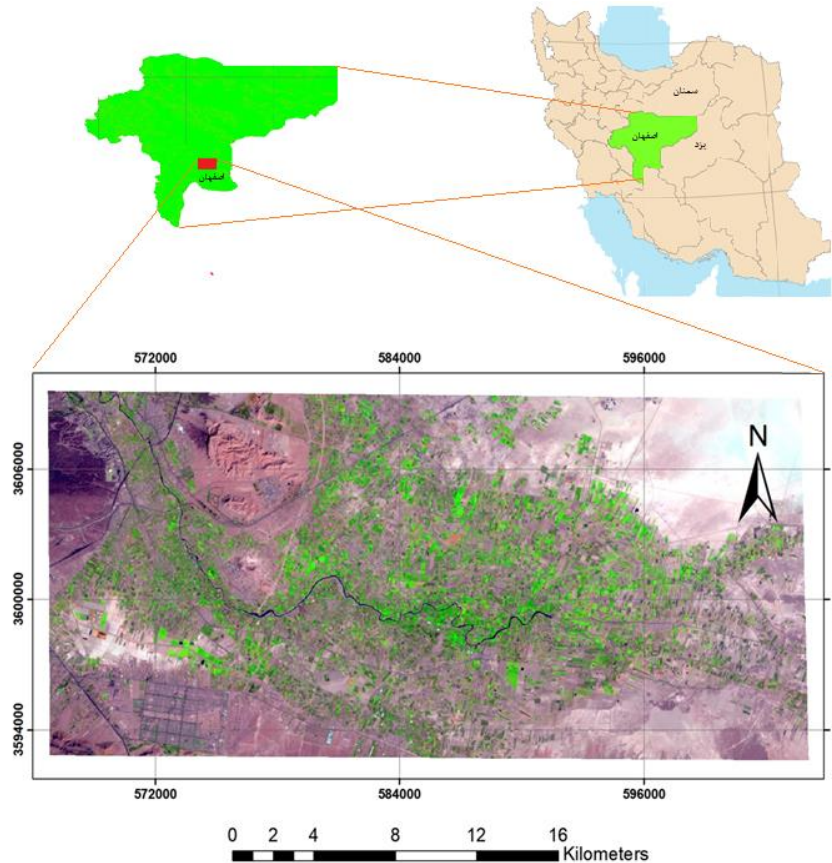
■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه‌ی فساران، در سمت شرقی شهر اصفهان واقع

اراضی، ارزیابی دقت نقشه‌ها و تحلیل اثرات روش‌های مختلف ادغام تصاویر فراهم آورد، به‌طوری که نتایج حاصل از هر روش، به‌صورت مستقیم قابل مقایسه و ارزیابی باشند. ویژگی‌های فنی باندهای تصاویر Landsat 9 در جدول ۱ ارائه شده‌است.

عبارت دیگر، تصویرهای پایانی به‌طور همزمان ویژگی‌های مکانی یا اندازه پیکسل‌های تصاویر پانکروماتیک با ویژگی‌های طیفی باندهای چندطیفی یا مولتی اسپکترال را خواهد داشت. استفاده از این باندها و ترکیب آنها، پایه‌ای مناسب برای انجام فرآیندهای طبقه‌بندی کاربری



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات باند های لندست ۹

شماره باند	توان تفکیک مکانی	طول موج (میکرومتر)	نام باند
باند ۱	۳۰	۰/۴۳-۰/۴۵	آئروسول ساحلی
باند ۲	۳۰	۰/۴۵-۰/۵۱	آبی
باند ۳	۳۰	۰/۵۳-۰/۵۹	سبز
باند ۴	۳۰	۰/۶۴-۰/۶۷	قرمز
باند ۵	۳۰	۰/۸۵-۰/۸۸	مادون قرمز نزدیک
باند ۶	۳۰	۱/۵۷-۱/۶۵	مادون قرمز کوتاه ۱
باند ۷	۳۰	۲/۱۱-۲/۲۹	مادون قرمز کوتاه ۲
باند ۸	۱۵	۰/۵۲-۰/۹	باند ۸ پانکروماتیک
باند ۹	۳۰	۱/۳۶-۱/۳۸	سیروس
باند ۱۰	۱۰۰	۱۰/۶۰-۱۱/۱۹	مادون قرمز حرارتی ۱
باند ۱۱	۳۰	۱۱/۵۰-۱۲/۵۱	مادون قرمز حرارتی ۲

مراحل انجام پژوهش

ادغام تصاویر

پس از دریافت داده‌های رقومی ماهواره‌ای، از پایگاه USGS، نخستین گام شامل انجام پردازش‌های آغازین بود. در این مرحله، ترکیب‌های رنگی مناسب برای تفسیر اولیه تصاویر تهیه شد. همچنین، محدوده مورد بررسی با استفاده از ابزار برش از تصاویر اصلی استخراج و برای مراحل بعدی پردازش آماده و برای استخراج محدوده مورد مطالعه از تصاویر اصلی شد. عملیات برش انجام شد، تا حجم داده‌های پردازشی کاهش یافته و تمامی مراحل بعدی تحلیل و طبقه‌بندی تنها بر محدوده پژوهش متمرکز شود. در مرحله بعد، به منظور بهره‌گیری همزمان از مزایای طیفی تصویرهای چندطیفی و وضوح زیاد تصویر پانکروماتیک و ارتقای کیفیت نهایی، فرآیند ادغام تصاویر، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.8 پیاده‌سازی شد. این فرآیند با هدف تلفیق اطلاعات طیفی تصاویر چندطیفی و اطلاعات مکانی باند پانکروماتیک انجام شد تا امکان ارزیابی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف ادغام در بهبود دقت طبقه‌بندی کاربری اراضی فراهم شود. ادغام تصاویر، بر اساس چند روش مختلف، انجام گرفت تا داده‌های تصویری با کیفیت زیاد، هم از لحاظ طیفی و هم مکانی، به‌منظور افزایش دقت تحلیل‌ها و استخراج نقشه‌های کاربری اراضی قابل اعتماد، ایجاد شود. روند کلی اجرای پژوهش و ارتباط مراحل مختلف آن، در نمودار جریانیه انجام پژوهش که در روندنمای شکل ۲ نشان داده شده است.

روش‌های ادغام تصاویر

به منظور ارتقای قدرت تفکیک مکانی و حفظ ویژگی‌های طیفی داده‌های رقومی ماهواره‌ای، روش‌های ادغام تصاویر Brovey، IHS، ESRI، میانگین ساده و Gram-Schmidt مورد بررسی قرار گرفتند. هر یک از این روش‌ها دارای سازوکارهای متفاوتی برای ترکیب داده‌های پانکروماتیک و چندطیفی هستند (۱۲).

در روش Brovey، اطلاعات مکانی باند پانکروماتیک برپایه نسبت شدت روشنایی با اطلاعات طیفی باندهای چندطیفی ترکیب شد. مقدار پیکسل در تصویر ادغام‌شده

در این روش، از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$F_i = \frac{M_i}{\sum_{k=1}^n M_k} \times P \quad (1)$$

که در آن، F_i مقدار پیکسل در باند ادغام‌شده، M_i مقدار پیکسل در باند چندطیفی، P مقدار پیکسل در باند پانکروماتیک و n تعداد باندهای چندطیفی است.

در بررسی‌های ESRI، ادغام تصویرها با بهره‌گیری از بررسی‌های اختصاصی ESRI انجام شد. در این روش، تصویر ادغام‌شده با تلفیق اطلاعات مکانی باند پانکروماتیک و اطلاعات طیفی باندهای چندطیفی تولید شد.

در روش IHS، تصویر رنگی حاصل از باندهای ۲، ۳ و ۴ به مؤلفه‌های روشنایی، نوع رنگ و خلوص رنگ تبدیل و پس از جایگزینی مؤلفه روشنایی با باند پانکروماتیک، تصویر ادغامی، تولید شد. مؤلفه روشنایی در این تبدیل از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (2)$$

که در آن، I مؤلفه روشنایی و R ، G و B به‌ترتیب مقادیر باندهای قرمز، سبز و آبی هستند (۱۰).

در روش میانگین ساده، مقدار هر پیکسل، از میانگین مقادیر متناظر در باندهای چندطیفی و باند پانکروماتیک محاسبه شد. مقدار پیکسل تصویر ادغام‌شده از رابطه (۳) به‌دست آمد:

$$F = \frac{M + P}{2} \quad (3)$$

که در آن، F مقدار پیکسل تصویر ادغام‌شده، M مقدار پیکسل باند چندطیفی و P مقدار پیکسل باند پانکروماتیک است (۳).

همچنین، در Gram-Schmidt، اطلاعات مکانی باند پانکروماتیک از طریق تبدیل متعامد و بازسازی باندها، با اطلاعات طیفی باندهای چندطیفی ترکیب شد. در این روش، اولین مؤلفه تبدیل‌یافته به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$P_s = \sum_{i=1}^n w_i M_i \quad (4)$$

که در آن، P_s بیانگر باند پانکروماتیک شبیه‌سازی‌شده، M_i نشان‌دهنده باند چندطیفی و w_i وزن متناظر با هر یک از باندهای چندطیفی است (۴).

انتخاب شد تا حداقل اختلاط طیفی بین طبقات مختلف وجود داشته باشد. سپس بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان، بر اساس ویژگی‌های طیفی نمونه‌های آموزشی آموزش داده شد و برای طبقه‌بندی کل تصویر و تولید نقشه پایانی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت.

ارزیابی صحت طبقه‌بندی

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف ادغام و بررسی قابلیت داده‌های حاصل از ادغام در استخراج اطلاعات سطح زمین، دقت طبقه‌بندی داده‌های رقومی حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی دقت طبقه‌بندی با استفاده از شاخص‌های ضریب صحت کلی و ضریب کاپا انجام شد. ضریب صحت کلی، میزان نمونه‌های مرجع را که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند، نسبت به کل نمونه‌های مرجع نشان می‌دهد و ضریب کاپا نیز میزان توافق بین نتایج طبقه‌بندی و داده‌های مرجع را با در نظر گرفتن توافق تصادفی بیان می‌کند. این شاخص‌ها برای ارزیابی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف ادغام در طبقه‌بندی داده‌های رقومی مورد استفاده قرار گرفتند (۲۱). طبقه‌بندی تصاویر بهره‌گیری از بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان و به‌صورت نظارت‌شده، انجام شد. بدین منظور، ابتدا برای هر یک از چهار طبقه کاربری اراضی، شامل اراضی کوهستانی و کوهپایه‌ای، اراضی رسی و دشت‌سرپوشیده، اراضی مسکونی و صنعتی و اراضی باغی و زراعی، نمونه‌های آموزشی بر اساس شناخت منطقه، بازدیدهای میدانی و تفسیر تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا انتخاب شدند. سپس بهره‌گیری از ابزار ترسیم چندضلعی در محیط نرم‌افزار، نواحی آموزشی برای هر طبقه مشخص و بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان، بر اساس ویژگی‌های طیفی این نمونه‌ها آموزش داده شد. در پایان، مدل آموزش‌دیده برای طبقه‌بندی کل تصویر به چهار طبقه کاربری اراضی به‌کار گرفته شد. به گونه‌ای که تا حد امکان، محدوده‌های ترسیم شده، نماینده واقعی از آن کاربری باشد. این اطمینان، از روش‌های مختلفی قابل تحصیل است، نمونه‌های آموزشی برای هر طبقه کاربری بر اساس ویژگی‌های قابل تشخیص در تصویر لندست ۹ و

تصاویر حاصل از هر یک از روش‌های ادغام، در ادامه به‌عنوان ورودی بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان مورد استفاده قرار گرفتند و عملکرد آن‌ها از نظر صحت طبقه‌بندی کاربری اراضی با یکدیگر مقایسه شد.

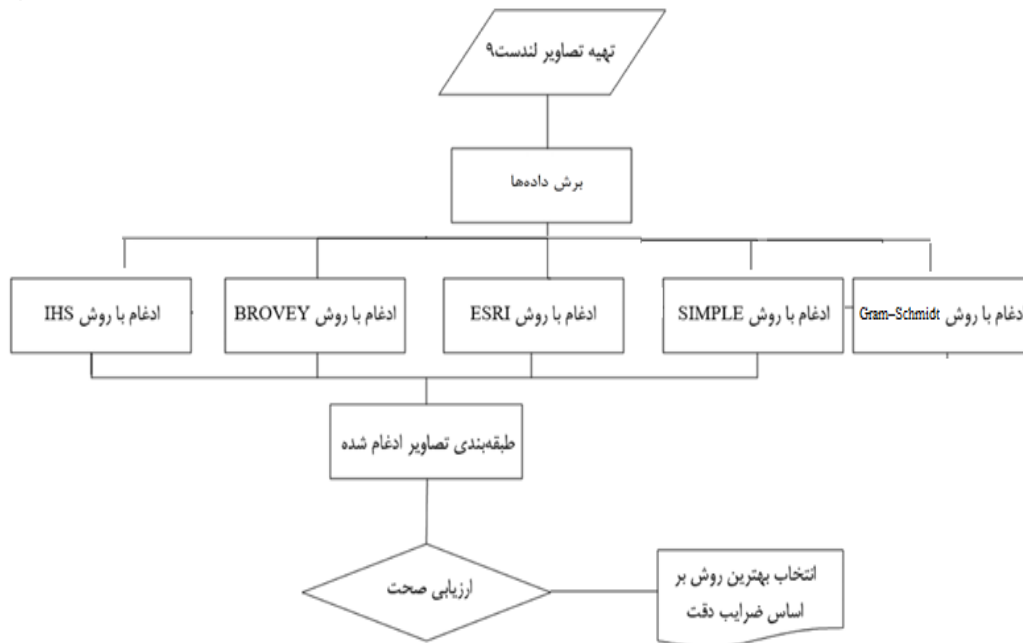
طبقه‌بندی تصاویر

پس از تولید تصاویر ادغام‌شده با هر یک از روش‌های ادغام، طبقه‌بندی انجام شد. به‌منظور تفکیک کاربری اراضی محدوده مورد بررسی، تصویرها به چهار طبقه شامل اراضی کوهستانی و کوهپایه‌ای، اراضی رسی و دشت‌سرپوشیده، اراضی مسکونی و صنعتی و اراضی باغی و زراعی طبقه‌بندی شدند. تعیین طبقه کاربری اراضی، بر اساس ویژگی‌های محیطی منطقه، شناخت محدوده مورد بررسی، بازدیدهای میدانی، تفسیر تصاویر با قدرت تفکیک مکانی زیاد و بررسی الگوی بازتاب طیفی تصاویر Landsat ۹ انجام شد. در این طبقه‌بندی، اراضی کوهستانی و کوهپایه‌ای بر اساس ویژگی‌هایی نظیر موقعیت توپوگرافی، شیب، ناهمواری سطح زمین و الگوی بازتاب طیفی متفاوت از مناطق دشت شناسایی شدند. در مقابل، اراضی رسی و دشت‌سرپوشیده شامل سطوح کم‌شیب و یکنواخت دشت با ویژگی‌های طیفی مشابه در بخش‌های وسیعی از منطقه مورد مطالعه، در نظر گرفته شدند. همچنین، مناطق دارای ساختارهای انسان‌ساخت شامل سکونتگاه‌ها، تأسیسات و سطوح صنعتی در طبقه اراضی مسکونی و صنعتی و مناطق دارای پوشش گیاهی زراعی و باغی بر اساس ویژگی‌های پوشش گیاهی و تفاوت در پاسخ طیفی در طبقه اراضی باغی و زراعی قرار گرفتند. برای این منظور، از بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM^1) استفاده شد که به دلیل توانایی مناسب در تفکیک داده‌های چندبعدی و ایجاد مرزهای تصمیم غیرخطی، یکی از روش‌های پرکاربرد در طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور است (۱۸). نمونه‌های آموزشی هر طبقه بر پایه شناخت منطقه، بازدیدهای میدانی و تفسیر تصاویر با قدرت تفکیک مکانی زیاد، انتخاب شد. همچنین، نمونه‌های آموزشی از مناطق همگن و نماینده هر کلاس

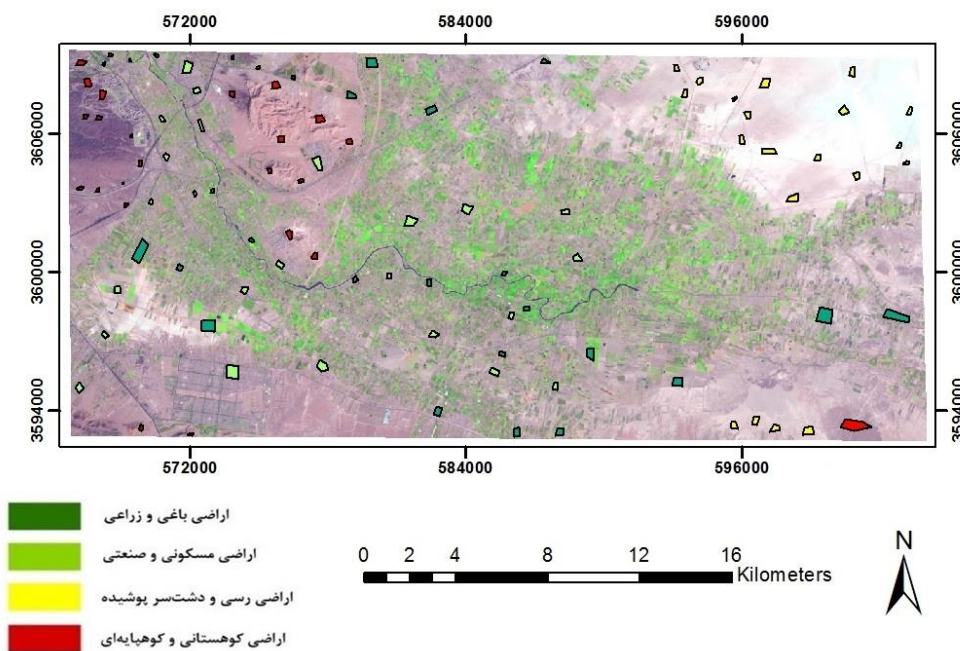
¹ Support vector machine

محدوده مورد مطالعه تعریف گردیدند، تا تنوع طیفی هر طبقه در فرآیند آموزش بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان، به‌طور مناسب لحاظ شود. نرم افزار از این نمونه‌ها به‌عنوان الگوی آموزش استفاده می‌کند و با بهره‌گیری از تغییرات طیفی باندهای مختلف در پیکسل‌های موجود نمونه‌های تعلیمی، دیگر پیکسل‌ها در کل تصویر را طبقه بندی می‌کند.

شناخت محدوده مورد بررسی انتخاب و با ترسیم چندضلعی‌های آموزشی در محیط نرم‌افزار تعریف شدند. از داده‌های واقعیت زمینی در هر کاربری، مطابق شکل ۳ استفاده شد. نقشه‌های واقعیت زمینی برای ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه بندی شده مورد استفاده قرارگرفت. نمونه‌های آموزشی هر طبقه از نواحی همگن و با حداقل اختلاط طیفی انتخاب شدند و با پراکنش مناسب در سطح



شکل ۲. روندنمای انجام پژوهش



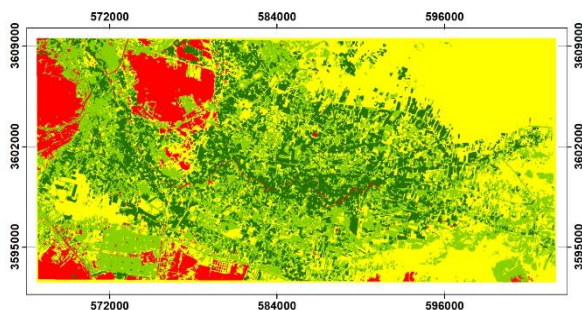
شکل ۳. نقشه نمونه‌های واقعیت زمینی

■ نتایج

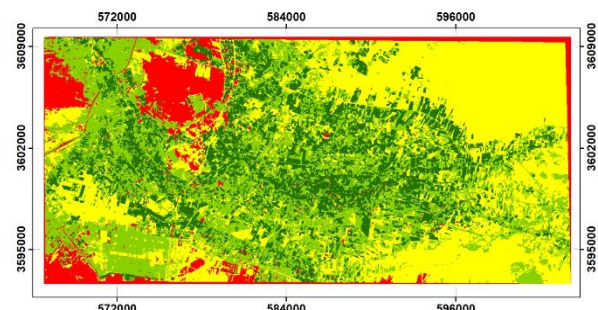
بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان، برای طبقه‌بندی تصاویر ادغام‌شده به‌کار گرفته شد و نتایج حاصل از آن در قالب نقشه‌های کاربری اراضی مختلف ارائه شد (شکل ۴). نتایج حاصل از ارزیابی صحت طبقه‌بندی نشان داد که استفاده از بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان، همراه با روش‌های مختلف ادغام تصاویر، توانست نقشه‌های کاربری اراضی با صحت کلی متفاوت تولید نماید. بر اساس نتایج جدول ۳، بیشترین مقدار صحت کلی مربوط به روش میانگین ساده، با مقدار $89/87\%$ و کمترین مقدار مربوط به روش ESRI با مقدار $65/08\%$ بود. این اختلاف

نشان‌دهنده تأثیر روش ادغام تصاویر بر کیفیت داده ورودی بررسی‌های ماشین بردار پشتیبان و عملکرد پایانی طبقه‌بندی است.

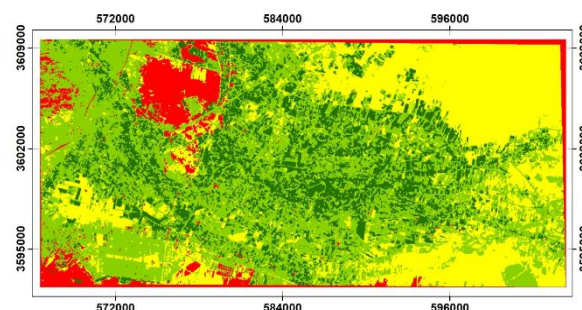
مساحت هر یک از طبقه‌های کاربری اراضی، بر پایه پنج روش ادغام تصاویر در جدول ۲، نشان داده شده‌است. این جدول به‌صورت خلاصه تفاوت‌های ناشی از بررسی‌های اراضی مختلف در تعیین مساحت طبقات اراضی باغی و زراعی، مسکونی و صنعتی، اراضی کوهستانی و کوهپایه‌ای، اراضی رسی و دشت‌سر پوشیده را نشان می‌دهد و بیانگر تأثیر روش ادغام بر بازنمایی دقیق تحلیل فضایی کاربری اراضی است.



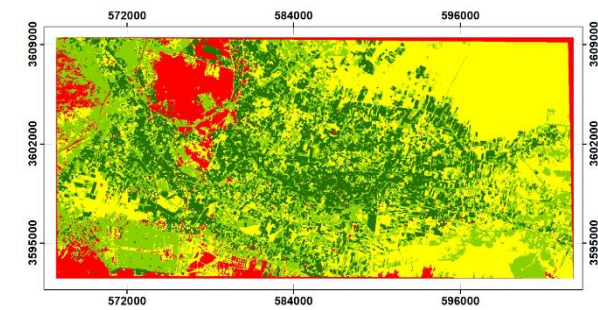
Gram-Schmidt



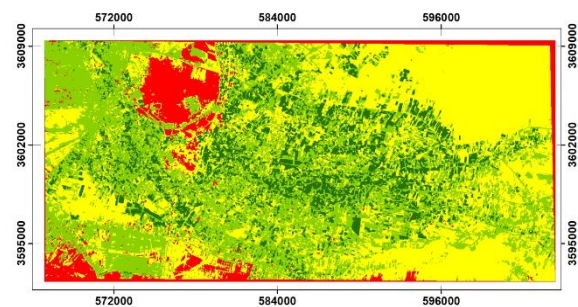
Simple



Brovey



Esri



IHS

شکل ۴. نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی حاصل از روش‌های مختلف ادغام

جدول ۲. مقایسه مساحت طبقات کاربری اراضی (ha) بر اساس بررسی‌های مختلف ادغام

کاربری اراضی	روش Brovey	روش Gram	روش Esri	روش IHS	روش میانگین ساده
باغی و زراعی	۱۴۷۹۱/۷	۱۳۲۴۰/۷	۱۱۴۴۵/۳	۸۲۲۳/۰۱	۱۲۴۷۳/۱
مسکونی و صنعتی	۱۸۴۳۰/۷	۱۸۶۳۶/۴	۲۸۳۳۴/۸	۲۳۹۸۵/۴	۲۱۳۱۴/۶
رسی و دشت‌سر پوشیده	۲۳۱۸۶	۲۵۷۱۸/۶	۱۸۳۴۱/۱	۲۵۹۱۴/۱	۲۳۳۱۳/۲
کوهستانی و کوهپایه‌ای	۶۸۵۲/۳	۵۹۶۲/۲	۵۴۳۶/۷	۵۴۳۵/۴	۶۴۵۶/۹

جدول ۳. درصد ضرایب صحت طبقه‌بندی بر اساس بررسی‌های مختلف ادغام

روش‌های ادغام	روش Esri	روش Gram	روش IHS	روش Brovey	روش میانگین ساده
ضریب صحت کلی	۶۵/۰۸	۷۷/۰۷	۷۹/۱۹	۸۳/۶	۸۹/۸۷
ضریب کاپا	۰/۶۳	۰/۷۴۵	۰/۵۷	۰/۷۸	۰/۸۲

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار صحت کلی به‌دست‌آمده برای نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده، در جدول ۳ ارائه شد و میزان موفقیت هر یک از روش‌های ادغام به‌کار رفته در تفکیک داده‌ها را نشان می‌دهد. این اطلاعات به‌وضوح نشان می‌دهد که کدام بررسی‌های‌ها در حفظ اطلاعات طیفی و ارتقای وضوح مکانی تصاویر مؤثرتر بوده‌اند. علاوه براین، نتیجه حاصل از شاخص صحت، بستر علمی و معتبر برای تحلیل عمیق‌تر، مقایسه عملکرد بررسی‌های مختلف ادغام و ارزیابی آنها در بررسی‌های کاربری اراضی فراهم می‌کند. استفاده از این شاخص نه تنها امکان شناسایی نقاط قوت و ضعف هر روش ادغام را فراهم می‌کند، بلکه اعتبار نتایج نهایی و قابلیت اعتماد به نقشه‌های تولیدشده برای بررسی‌های محیطی، برنامه‌ریزی اراضی و پایش منابع طبیعی را نیز تضمین می‌کند.

برای بررسی اثر واقعی فرآیند ادغام تصاویر، علاوه بر مقایسه روش‌های مختلف ادغام، عملکرد تصویر چندطیفی اولیه بدون اعمال فرآیند ادغام نیز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که صحت کلی طبقه‌بندی تصویر بدون ادغام ۸۰٪ بوده‌است، در حالیکه پس از اعمال روش‌های مختلف ادغام، مقادیر صحت کلی بین ۶۵/۰۸٪ تا ۸۹/۸۷٪ متغیر بود. در بین روش‌های بررسی‌شده، روش Simple Mean با صحت کلی ۸۹/۸۷٪ و ضریب کاپای ۰/۸۲، بیشترین مقدار را در میان روش‌های مورد بررسی به خود اختصاص داد و در مقایسه با تصویر بدون ادغام، موجب افزایش ۹/۵۸٪ صحت کلی طبقه‌بندی شد. مقدار ضریب کاپا برای روش‌های Brovey، Gram-Schmidt، ESRI و IHS نیز به‌ترتیب

۰/۷۸، ۰/۷۴۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۶ به‌دست آمد. در مقابل، روش‌های ESRI، Gram-Schmidt، IHS و Brovey به‌ترتیب صحت کلی ۶۵/۰۸٪، ۷۷/۰۷٪، ۷۹/۱۹٪ و ۸۳/۶٪ را نشان دادند. این نتایج نشان داد که اثر فرآیند ادغام بر صحت طبقه‌بندی به بررسی‌های مورد استفاده وابسته است. نتیجه حاصل از برآورد مساحت طبقه‌های مختلف نیز در تفسیر عملکرد روش‌های ادغام مورد توجه قرارگرفت. اختلاف مشاهده‌شده در مساحت برخی طبقات کاربری بین روش‌های مختلف نشان می‌دهد که انتخاب روش مناسب ادغام باید با توجه به نوع کاربری مورد نظر و هدف بررسی انجام شود.

■ بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش انتخابی برای ادغام تصاویر ماهواره‌ای، بر برآورد مساحت و تفکیک طبقات کاربری اراضی تأثیر قابل توجهی دارد. اختلاف مشاهده‌شده در مساحت طبقات مختلف، ناشی از تفاوت بررسی‌های‌های ادغام در نحوه ترکیب اطلاعات مکانی باند پانکروماتیک و ویژگی‌های طیفی باندهای چندطیفی است. برای مثال، در طبقه اراضی باغی-زراعی، بیشترین مساحت توسط روش Brovey با مقدار ۱۴۷۹۱ ha و کمترین مساحت توسط روش IHS با مقدار ۸۲۲۳ ha برآورد شد. در پژوهشی، روش‌های مختلف ادغام تصاویر سنجش از دور بررسی شد و روش‌های مبتنی بر تبدیل، از جمله IHS و Brovey، به‌عنوان رویکردهای رایج در ادغام اطلاعات مکانی و طیفی مورد بررسی قرارگرفت (۴).

می‌تواند در بهبود کیفیت و دقت تصاویر ادغام‌شده مؤثر باشد (۵). همچنین، در بررسی دیگری، ادغام تصاویر سنجش‌ازدور مبتنی بر تصمیم‌گیری بیزی که با هدف بهبود عملکرد و دقت فرایند ادغام داده‌های سنجش‌ازدور توسعه یافته است (۲۳). این نتایج نشان می‌دهد که ادغام مناسب داده‌های پانکروماتیک و چندطیفی می‌تواند خطاهای احتمالی طبقه‌بندی را کاهش دهد، تصمیم‌گیری نهایی را تقویت کند و تحلیل دقیق‌تر تغییرات کاربری اراضی را ممکن سازد. علاوه بر این، تفاوت عملکرد بررسی‌های در شناسایی طبقات پراکنده و نیمه‌متراکم تأکید می‌کند که انتخاب روش ادغام، اثر مستقیم بر بازنمایی فضایی و صحت نقشه‌های پایانی دارد.

در مجموع، نتایج نشان داد که انتخاب بررسی‌های ادغام، نقش مهمی در نحوه بازنمایی طبقات کاربری اراضی در تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ دارد. تفاوت‌های مشاهده‌شده در مساحت طبقات بین روش‌های مختلف، بیانگر آن است که هر بررسی‌های با توجه به نحوه تلفیق اطلاعات طیفی و مکانی، می‌تواند بر فرآیند تفکیک و مرزبندی عوارض سطح زمین اثرگذار باشد. روش‌های Gram-Schmidt، Brovey، IHS و میانگین ساده، پاسخ‌های متفاوتی در استخراج طبقات ارائه کردند و این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب روش ادغام باید بر اساس هدف مطالعه، ویژگی‌های منطقه و نوع تحلیل مورد نظر انجام شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بسیاری از عوارض سطح زمین دارای شباهت‌های طیفی هستند، توجه همزمان به حفظ اطلاعات طیفی و افزایش جزئیات مکانی اهمیت ویژه‌ای دارد. با وجود قابلیت‌های روش‌های ادغام در بهبود تفسیر تصاویر ماهواره‌ای، انتخاب یک روش برتر، نیازمند ارزیابی همزمان کیفیت تصویر ادغام‌شده و دقت طبقه‌بندی است، شباهت طیفی برخی طبقات، به‌ویژه در مناطق خشک با پوشش گیاهی پراکنده و سطوح بدون پوشش گسترده، می‌تواند فرآیند تفکیک و طبقه‌بندی را با چالش مواجه کند. علاوه بر این، ارزیابی حاضر بر مقایسه مساحت طبقات استخراج‌شده متمرکز است و بررسی جامع‌تر عملکرد روش‌های ادغام نیازمند استفاده همزمان از شاخص‌های کمی کیفیت تصویر و

در طبقه اراضی مسکونی و بایر نیز تفاوت قابل توجهی در برآورد مساحت بین روش‌های مختلف مشاهده شد؛ به‌طوری‌که بیشترین مساحت توسط روش ESRI با مقدار ۲۸۳۳۴ha و کمترین مقدار توسط روش Brovey با مقدار ۱۸۴۳۰ha برآورد شد. این اختلاف نشان‌دهنده حساسیت روش‌های ادغام به نحوه ترکیب اطلاعات مکانی و طیفی در تفکیک سطوح بدون پوشش گیاهی و مناطق دارای الگوهای پراکنده است. به‌همین ترتیب، در طبقه اراضی رسی و دشت‌سر پوشیده، مساحت متفاوتی با بیشترین مقدار در IHS ۲۵۹۱۴ha و کمترین در ESRI ۱۸۳۴۱ha، مشاهده شد، که نشان می‌دهد ترکیب داده‌های پانکروماتیک و چندطیفی و قدرت تفکیک مکانی هر روش، نقش کلیدی در بازنمایی پهنه‌های فاقد پوشش گیاهی دارد. همچنین، برای طبقه اراضی کوهستانی و کوهپایه‌ای، بیشترین مساحت با Brovey و کمترین با ESRI ثبت شده است که نشان‌دهنده حساسیت آنها به شناسایی پوشش‌های نیمه‌متراکم و نواحی با تراکم گیاهی متوسط است. نتایج نشان داد که روش‌های مختلف ادغام، به‌دلیل تفاوت در نحوه ترکیب اطلاعات طیفی و مکانی، موجب تغییر مساحت برآوردشده طبقه‌های گوناگون کاربری اراضی است. این اختلاف‌ها بیانگر تأثیر نوع بررسی‌های ادغام بر فرآیند تفکیک و مرزبندی طبقه‌هاست و اهمیت انتخاب روش مناسب متناسب با ویژگی‌های منطقه مورد بررسی و هدف طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌ها، کارایی مناسب‌تر روش میانگین ساده، در بهبود دقت طبقه‌بندی است. این روش با ترکیب مستقیم پیکسل‌های تصاویر پانکروماتیک و چندطیفی، اطلاعات مکانی و طیفی را همزمان حفظ و عملکرد مطلوبی در بازنمایی دقیق کاربری اراضی ارائه می‌کند. مزیت این روش در سادگی اجرا، سرعت زیاد و کاهش پیچیدگی محاسباتی آن نهفته است، در حالیکه همچنان قادر به افزایش دقت طبقه‌بندی نسبت به حالت بدون ادغام است.

بررسی‌های پیشین نیز نشان داده‌اند که ادغام ویژگی‌های بصری سطح پایین با شبکه‌های عصبی دوکاناله

معیارهای دقیق ارزیابی طبقه‌بندی است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در بررسی‌های آینده، عملکرد روش‌های مختلف ادغام در مناطق جغرافیایی متفاوت، شرایط اقلیمی متنوع و بازه‌های زمانی مختلف بررسی شود. همچنین، استفاده از شاخص‌های کمی ارزیابی کیفیت ادغام، روش‌های طبقه‌بندی پیشرفته و یادگیری ماشین می‌تواند به انتخاب دقیق‌تر روش‌های ادغام تصاویر و افزایش قابلیت

کاربرد آنها در بررسی‌های کاربری اراضی و پایش تغییرات محیطی کمک کند.

■ سپاسگزاری

نویسندگان مقاله، از تمامی افرادی که به نحوی در انجام پژوهش حاضر یاری رساندند، صمیمانه تشکر می‌کنند.

■ References

- Aslantas, V., & Toprak, A. N. (2014). A pixel based multi-focus image fusion method. *Optics Communications*, 332, 350–358. doi.org/10.1016/j.optcom.2014.07.044
- Bashirpour, M., Valadan Zoej, M. J., & Maghsoudi, Y. (2017). FFT-PCA method for fusing remote sensing imagery. *Journal of GeoSpatial Information Technology*, 5(2), 123–140. doi.org/10.29252/jgit.5.2.123. [In Persian].
- Emami, H., & Rahmanizadeh, A. (2023). Implementation and comparison of spectral and spatial quality of pixel-based satellite image fusion methods. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(5), 27–54. doi.org/10.22034/rsgi.2023.54719.1038. [In Persian].
- Ghassemian, H. (2016). A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32, 75–89. doi.org/10.1016/j.inffus.2016.03.003
- Hou, Z., Lv, K., Gong, X., & Wan, Y. (2023). A remote sensing image fusion method combining low-level visual features and parameter-adaptive dual-channel pulse-coupled neural network. *Remote Sensing*, 15(2), 344. doi.org/10.3390/rs15020344
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.
- Joshi, N., Baumann, M., Ehammer, A., Fensholt, R., Grogan, K., Hostert, P., Jepsen, K. J., Kuemmerle, T., Meyfroidt, M., Roy, P. P., Schill, A., Tøttrup, A. T., & Waske, B. (2016). A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring. *Remote Sensing*, 8(1), 70. doi.org/10.3390/rs8010070
- Kabolizadeh, M., Rangzan, K., & Mohammadi, S. (2018). Application of fusion in Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images for environmental monitoring. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(3), 53–71. [In Persian]
- Kabiri, K., & Fatemi, S. B. (2020). Satellite image fusion using FastIHS method based on sensor spectral response curves. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(114), 7–20. doi.org/10.22131/sepehr.2020.44578. [In Persian].
- Khezri Ahmadabad, M., & Soleimani, K. (2017). Application of satellite images for mapping land use in Ghezel Ozan watershed using fusion techniques and object-oriented processing. *Journal of GIS and RS Application in Planning*, 8(3), 13–26. [In Persian].
- Klonus, S., & Ehlers, M. (2007). Image fusion using the Ehlers spectral characteristics preservation algorithm. *GIScience & Remote Sensing*, 44(2), 93–116. doi.org/10.2747/1548-1603.44.2.93
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Liu, Y., Wang, L., Cheng, J., Li, C., & Chen, X. (2020). Multi-focus image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 64, 71–91. doi.org/10.1016/j.inffus.2020.06.013
- Mohammadi, S., Habashi, K., & Pourmanafi, M. (2018). Monitoring and predicting land use/land cover changes and their relation to drought: A case study of the B2 sub-basin of the Zayandeh-Rud watershed. *Journal of RS and*

GIS for Natural Resources, 9(1), 24–39. [In Persian].

16. Melesse, A. M., Weng, Q., Thenkabail, P. S., & Senay, G. B. (2007). Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. *Sensors*, 7(12), 3209–3241. doi.org/10.3390/s7123209
17. Mohammadzadeh, A., & Asadi, S. (2025). Identification of floods from Sentinel-1 data based on the combination of difference images obtained from different radar polarizations. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 14(4), 31–49. doi.org/10.61882/jgst.14.4.31. [In Persian].
18. Pal, M., & Mather, P. M. (2005). Support vector machines for classification in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 26(5), 1007–1011. doi.org/10.1080/01431160512331314083
19. Rangzan, K., Kabolizadeh, M., & Karimi, D. (2020). Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 satellite image fusion capability in seasonal zoning of NSFQI and IRWQIsc qualitative indices in surface water (Case study: Karun River). *Geography and Environmental Planning*, 31(1), 73–102. doi.org/10.22108/gep.2020.123228.1309. [In Persian].
20. Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindaschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001
21. Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., ... Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113195. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195
22. Zhang, J. (2010). Multi-source remote sensing data fusion: Status and trends. *International Journal of Image and Data Fusion*, 1(1), 5–24. doi.org/10.1080/19479830903561035
23. Zhang, H. K., & Huang, B. (2015). A new look at image fusion methods from a Bayesian perspective. *Remote Sensing*, 7(6), 6828–6861. doi.org/10.3390/rs70606828