Journal of Forest Ecosystems Research, 2025, 4(2): 88-102

Research Article

Evaluating the role of spectral library–derived indices in improving forest type classification in the central Zagros using sentinel-2 imagery

Zahra Amiri [1], Mozhgan Abbasi [1], Saleh Kahyani [1], Hamidreza Riyahi Bakhtiyari[1*]

Extended Abstract

Background and objectives: The Zagros forests, one of Iran's natural ecosystems, possess significant ecological diversity, and understanding their typology is crucial for sustainable management. The forests of Flard County in Chaharmahal and Bakhtiari Province, primarily covered by oak (*Quercus brantii*) and pistachio (*Pistacia mutica*), are part of the central Zagros region. These forests play a prominent role in ecological sustainability, biodiversity conservation, and providing environmental services. However, the lack of current and accurate typological maps has hindered their scientific management. Traditional ground-based survey methods are inefficient due to high costs and difficult terrain. This study aimed to use modern remote sensing technologies and evaluate how spectral indices derived from a spectral library improve the accuracy of supervised classification of Sentinel-2 satellite imagery for discriminating forest types.

Materials and methods: To investigate the impact of spectral indices derived from the spectral library on distinguishing the region's dominant species, this study was conducted in three forest areas: two pure types and one mixed type. These areas were Mishan (pure oak), Kate-Siah (pure pistachio), and Vandun (mixed oak-pistachio cover) in Flard County, Chaharmahal and Bakhtiari Province. Three different classification scenarios were used. In Scenario 1, only Sentinel-2 images from October 15, 2024, were classified for all three study areas. In Scenario 2, in addition to the sensor's main bands, general spectral indices—NDVI, SAVI, MSAVI, GNDVI, and EVI—were applied to the Sentinel-2 data and incorporated into the classification process. These indices, respectively, assess greenness, reduce soil background effects, measure chlorophyll health, and enhance sensitivity to dense canopies. In Scenario 3, besides the main bands, specialized spectral indices—PRI, CRI, MCRI, CAI, NDVI800, NPCI, RENDVI, and ARI—extracted from the spectral library data of the oak and pistachio species were included in the classification process. Data classification in all three areas was performed using three supervised algorithms: Support Vector Machine (SVM), Maximum Likelihood Classification (MLC), and Minimum Distance (MinDist). Accuracy was assessed using a ground truth map, the Kappa coefficient, and overall accuracy criteria.

Results: Results indicated that in Scenario 1, the Maximum Likelihood Classification (MLC) algorithm performed best with overall accuracies and Kappa coefficients of 98.4% and 0.71 in Mishan, 77.5% and 0.32 in Kate-Siah, and 86.7% and 0.67 in Vandun, respectively. In Scenario 2, the same algorithm was best in Mishan (97.7% overall accuracy, 0.65 Kappa coefficient) and Kate-Siah (75.9% overall accuracy, 0.38 Kappa coefficient). However, in Vandun, the SVM algorithm was superior, achieving an overall accuracy of 77.9% and a Kappa coefficient of 0.57. In Scenario 3, accuracy assessment results demonstrated that the SVM algorithm reported the highest accuracy in all three regions: Mishan (99.2% overall accuracy, 0.81 Kappa coefficient), Kate-Siah (98.2% overall accuracy, 0.74 Kappa coefficient), and Vandun (89.0% overall accuracy, 0.67 Kappa coefficient). A comparison of the three scenarios showed that specialized spectral indices derived from the spectral library were more effective in increasing classification accuracy than general indices. Despite the high accuracy of the algorithms, limitations such as spectral similarity between soil and vegetation in low-density areas affected the results.

Conclusion: Based on these findings, integrating valid spectral data with machine learning algorithms is an effective tool for preparing detailed forest cover maps. Using a spectral library alongside Sentinel-2 imagery enables more accurate discrimination of forest. The SVM algorithm is a suitable option for classifying forest types in areas with dense cover and complex structures. The findings of this research are applicable to conservation-management planning and the continuous monitoring of Zagros Forest ecosystems.

Keywords: Falard forests, Forest type, Machine learning algorithms, *Pistacia mutica*, *Quercus brantii*, Sentinel-2, Spectral library.

[1]Department of forest sciences, Department of forest sciences and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

*Corresponding Author, Email: : hriyahi@sku.ac.ir

DOI: 10.21859/jfer.4.2.78
ISSN: 2423-4427 (Online); 2423-4095 (Print)

Received: 18.07.2026, Accepted: 15.09.2026,
Online Published: 05.10.2026

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

مقاله پژوهشی

ارزیابی نقش شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از کتابخانه طیفی در بهبود طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی زاگرس مرکزی با استفاده از تصاویر Sentinel-2

زهرا امیری[۱]، مژگان عباسی[۱]، صالح کهیانی[۱]، حمیدرضا ریاحی بختیاری[۱*]

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های طبیعی کشور، دارای تنوع اکولوژیکی قابل‌توجهی هستند و تیپ‌بندی آن‌ها نقش کلیدی در مدیریت پایدار دارد. جنگل‌های شهرستان فلارد در استان چهارمحال و بختیاری با پوشش غالب بلوط و بنه بخشی از زاگرس مرکزی را تشکیل می‌دهند و نقش برجسته‌ای در پایداری اکولوژیک، تنوع‌زیستی و تأمین خدمات زیست‌محیطی منطقه دارند. بااین‌حال، نبود نقشه‌های تیپ‌بندی به‌روز و دقیق، مدیریت علمی این عرصه‌ها را با دشواری مواجه ساخته است. روش‌های سنتی برداشت زمینی به‌دلیل هزینه‌های بالا و محدودیت‌های دسترسی فیزیوگرافیکی، کارایی لازم را ندارند. پژوهش پیش‌رو با هدف بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سنجش از دور و ارزیابی تأثیر به‌کارگیری شاخص‌های طیفی مستخرج از کتابخانه طیفی بر افزایش دقت طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در تفکیک تیپ‌های جنگلی انجام شد.

مواد و روش‌ها: به منظور بررسی تاثیر شاخص‌های طیفی حاصل از کتابخانه طیفی در تفکیک گونه‌های غالب منطقه، این مطالعه در سه منطقه جنگلی با دو تیپ خالص و یک تیپ مخلوط به ترتیب میشان (بلوط خالص)، کته‌سیاه (بنه خالص) و وندون (پوشش آمیخته بلوط و بنه) در شهرستان فلارد استان چهارمحال و بختیاری و با سه سناریو مختلف طبقه‌بندی انجام شد. در سناریو اول تنها تصاویر Sentinel-2 مربوط به تاریخ ۲۴ مهر ۱۴۰۳)برای هر سه منطقه‌ی مورد مطالعه، مورد طبقه‌بندی قرار گرفت. در سناریو دوم علاوه بر باندهای اصلی سنجنده، شاخص‌های طیفی عمومی (NDVI ، SAVI، MSAVI، GNDVI، EVI) که به‌ترتیب برای ارزیابی سبزینگی، کاهش اثر خاک، سنجش سلامت کلروفیلی و افزایش حساسیت به پوشش‌های متراکم هست، بر روی داده‌های Sentinel-2 اعمال و وارد فرایند طبقه‌بندی شدند. در سناریو سوم علاوه بر باندهای اصلی، شاخص‌های طیفی تخصصی (PRI، CRI، MCRI، CAI، NDVI800، NPCI، RENDVI و ARI) مستخرج از داده‌های کتابخانه‌ی طیفی دو گونه بلوط و بنه در فرایند طبقه‌بندی قرار گرفتند. طبقه‌بندی داده‌ها در هر سه منطقه با سه الگوریتم نظارت‌شده شامل ماشین بردار پشتیبان (SVM)، حداکثر احتمال(MLC) و حداقل فاصله از میانگین (MinDist) انجام شد. صحت طبقه‌بندی با استفاده از نقشه واقعیت زمینی و معیارهای ضریب کاپا و دقت کلی بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در حالت اول، الگوریتم حداکثر احتمال به ترتیب با صحت کلی و ضریب کاپا در میشان (۹۸/۴٪، ۰/۷۱)، کته‌سیاه (۷۷/۵٪، ۰/۳۲) و وندون (۸۶/۷٪، ۰/۶۷) عملکرد بهتری داشت. در حالت دوم، همین الگوریتم در میشان (۹۷/۷٪، ۰/۶۵) و کته‌سیاه (۷۵/۹٪، ۰/۳۸) بهترین بود، اما در وندون، ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی ۷۷/۹٪ و ضریب کاپای ۰/۵۷ برتر بود. در حالت سوم، نتایج حاصل از بررسی صحت نشان داد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در هر سه منطقه میشان (۹۹/۲٪، ۰/۸۱)، کته‌سیاه (۹۸/۲٪، ۰/۷۴) و وندون (۸۹/۰٪، ۰/۶۷) بالاترین دقت را گزارش کرده است. مقایسه‌ی سه حالت نشان داد که شاخص‌های طیفی تخصصی حاصل از کتابخانه طیفی در افزایش دقت طبقه‌بندی، مؤثرتر از شاخص‌های عمومی عمل کردند. با وجود دقت بالای الگوریتم‌ها، محدودیت‌هایی مانند شباهت طیفی خاک و پوشش گیاهی در مناطق کم‌تراکم، بر نتایج تأثیر گذاشت.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق داده‌های طیفی معتبر و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ابزار مؤثری در تهیه نقشه‌های دقیق پوشش جنگلی است. استفاده از کتابخانه طیفی در کنار تصاویر سنتینل-۲، امکان تفکیک دقیق‌تر گونه‌های جنگلی را فراهم می‌کند. همچنین الگوریتم SVM به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی در مناطق با پوشش متراکم و ساختار پیچیده پیشنهاد می‌شود. یافته‌های این پژوهش در برنامه‌ریزی حفاظتی- مدیریتی و پایش مستمر اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس قابل کاربرد است.

واژه‌های کلیدی: Sentinel-2، جنگل‌های فلارد، تیپ جنگلی، الگوریتم، بلوط و بنه، کتابخانه طیفی.

[۱]گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

[*]پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hriyahi@sku.ac.ir

DOI: 10.21859/jfer4.2.78

شاپا: ۴۴۲۷-۲۴۲۳ (برخط)؛ ۴۰۹۵-۲۴۲۳ (چاپی)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۴

تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۵/۰۷/۱۳

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

مقدمه

ناحیه رویشی زاگرس، یکی از مهم‌ترین زیست بوم‌های طبیعی ایران، با گستره‌ای وسیع از پوشش‌های جنگلی و مرتعی، در حفظ تعادل اکولوژیکی، تغذیه منابع آبی، ترسیب کربن و حفاظت از تنوع زیستی نقش بنیادین دارد (Nasiri *et al*., 2022). این ناحیه، به‌ویژه در استان چهارمحال و بختیاری، میزبان گونه‌های شاخصی مانند بلوط ایرانی *Quercus brantii* و بنه *Pistacia mutica* است که در ساختار تیپ‌های جنگلی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. جنگل‌های زاگرس مرکزی، به‌ویژه در محدوده شهرستان فلارد، در جنوب استان چهارمحال و بختیاری با ویژگی‌های فیزیوگرافی خاص، شیب‌های تند و پوشش‌های گیاهی خالص و آمیخته، نمونه‌ای منحصر به فرد از این اکوسیستم‌ها را در خود جای داده است. وجود جنگل‌هایی با تیپ‌های متنوع، نظیر بلوط خالص، بنه خالص و ترکیب این دو، اهمیت این منطقه را در برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت منابع طبیعی دوچندان کرده است (Luhrabi *et al*., 2018). برای مدیریت پایدار چنین مناطقی، تهیه نقشه‌های دقیق تیپ جنگلی الزامی است. نقشه‌های تیپ جنگلی، به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع طبیعی، توزیع مکانی و پراکندگی پوشش گیاهی، ساختار، تراکم، فراوانی و ترکیب گونه‌های درختی و درختچه‌ای را در اکوسیستم‌های جنگلی با جزئیات به تصویر می‌کشند (Amiri *et al*., 2019; Luhrabi *et al*., 2018). این نقشه‌ها نه‌تنها در ارزیابی وضعیت موجود جنگل‌ها، بلکه در پایش تغییرات اکولوژیکی، تشخیص تنوع گونه‌ای، برآورد موجودی زیستی و تحلیل خطرات زیست‌محیطی مانند شیوع آفات و بیماری‌ها کاربرد دارند. با وجود اهمیت زیاد این نقشه‌ها، روش‌های سنتی تهیه آن‌ها مانند برداشت‌های میدانی را با چالش‌هایی چون هزینه بالا، زمان‌بر بودن و پیچیدگی فیزیوگرافی مناطق جنگلی مواجه‌اند (Abedi & Bonyad, 2013).

در سال‌های اخیر، فناوری سنجش از دور به‌عنوان جایگزینی کارآمد برای روش‌های زمینی در پایش جنگل‌ها مطرح شده است. در این میان، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 به دلیل داشتن اندازه تفکیک مکانی مناسب، پوشش طیفی گسترده و دسترسی رایگان، کاربرد گسترده‌ای در مطالعات پوشش گیاهی پیدا کرده‌اند (Grabska *et al*., 2019; Hościło & Lewandowska, 2019). این تصاویر با ۱۳ باند در محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز نزدیک، قابلیت شناسایی ویژگی‌های بازتابی گیاهان را با دقتی مطلوب‌تر از داده‌های طیفی ماهواره‌های چند طیفی نظیر لندست، فراهم می‌آورند. با وجود این مزایا، شباهت طیفی بین گونه‌های جنگلی یکی از چالش‌های اصلی در افزایش دقت طبقه‌بندی محسوب می‌شود. برای رفع این محدودیت، استفاده از کتابخانه‌های طیفی به‌عنوان یک منبع مرجع طیفی مورد توجه قرار گرفته است. کتابخانه‌های طیفی شامل امضای طیفی دقیق گونه‌های گیاهی هستند که معمولاً از داده‌های طیف‌سنجی زمینی و در محدوده طول موجی وسیع تهیه می‌شوند. این پایگاه‌های داده بر مبنای اطلاعات طیفی در دامنه وسیع طول موج از ۳۵۰ تا۲۵۰۰ نانومتر حاصل از از طیف سنجی زمینی، امکان طراحی شاخص‌های هدفمند در راستای تشخصی گونه‌ها و افزایش دقت الگوریتم‌های طبقه‌بندی را فراهم می آورد (Abbasi *et al*., 2009; Yang *et al*., 2023). مطالعات متعددی کاربرد داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در طبقه‌بندی پوشش‌های جنگلی و تفکیک گونه‌های درختی بررسی کرده‌اند. Laurinو همکاران (۲۰۱۶) توانایی داده‌های ابرطیفی و داده‌های شبیه‌سازی‌شده سنتینل-۲ را در تفکیک تیپ‌های جنگلی مناطق گرمسیری غنا ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تلفیق اطلاعات طیفی و ویژگی‌های بافتی می‌تواند به‌طور مؤثری دقت تفکیک گونه‌های درختی را افزایش دهد و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) عملکرد بهتری نسبت به روش حداکثر احتمال ارائه می‌کند. همچنین، Ginindza (۲۰۲۵) با مقایسه تصاویر Sentinel-2و PlanetScope در شناسایی گونه‌های تجاری در اسواتینی، گزارش کرد که تصاویر سنجنده Sentinel-2در ترکیب با الگوریتم SVM دقت بیشتری در تفکیک گونه‌های درختی دارد.

در پژوهشی دیگر، Isbaex و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تصاویر Sentinel-2 و الگوریتم‌های KNN و Random Forest اقدام به طبقه‌بندی پوشش‌های جنگلی در جنوب پرتغال کردند و نشان دادند که الگوریتم Random Forest با دقت کلی ۹۲ درصد عملکرد بهتری

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

نسبت به KNN دارد. Mirki و همکاران (۲۰۲۳) نیز با بهره‌گیری از تصاویر Sentinel-2 و سامانه Google Earth Engine موفق به تهیه نقشه پوشش جنگل‌های مانگرو استان هرمزگان شدند و دقت طبقه‌بندی بیش از ۹۵ ٪ را گزارش کردند. همچنین Mohammadpour و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که تلفیق شاخص‌های طیفی و ویژگی‌های بافتی استخراج‌شده از تصاویرSentinel-2 می‌تواند دقت طبقه‌بندی پوشش‌های گیاهی را تا حدود ۹۲ ٪ افزایش دهد.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نسبت به روش‌های کلاسیک مانند حداکثر احتمال و فاصله حداقل میانگین، عملکرد بهتری در طبقه‌بندی پوشش‌های گیاهی ناهمگن دارند. با این وجود، اغلب پژوهش‌ها تنها از شاخص‌های طیفی عمومی استفاده کرده‌اند و بهره‌گیری از شاخص‌های استخراج‌شده از کتابخانه طیفی در زیست‌بوم‌های ناهمگن مانند جنگل‌های بلوط و بنه زاگرس مورد توجه قرار نگرفته است (Laurin *et al*., 2016; Cho *et al*., 2015).

نوآوری این پژوهش استخراج شاخص‌های طیفی مستخرج از کتابخانه طیفی گونه‌های بلوط و بنه زاگرس و محاسبه آنها بر داده‌های چند طیفی Sentinel-2 جهت افزایش دقت طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی است. بر این اساس، هدف این پژوهش ارزیابی کارایی شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از کتابخانه طیفی در بهبود طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی زاگرس مرکزی با استفاده از تصاویر Sentinel-2 است. در این راستا، تأثیر به‌کارگیری شاخص‌های طیفی اختصاصی حاصل از کتابخانه طیفی بر دقت طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی، در مقایسه با شاخص‌های متداول پوشش گیاهی، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین عملکرد الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی در تفکیک تیپ‌های جنگلی خالص و آمیخته ارزیابی شد تا مناسب‌ترین روش برای تهیه نقشه‌های تیپ جنگلی در منطقه مورد مطالعه معرفی شود

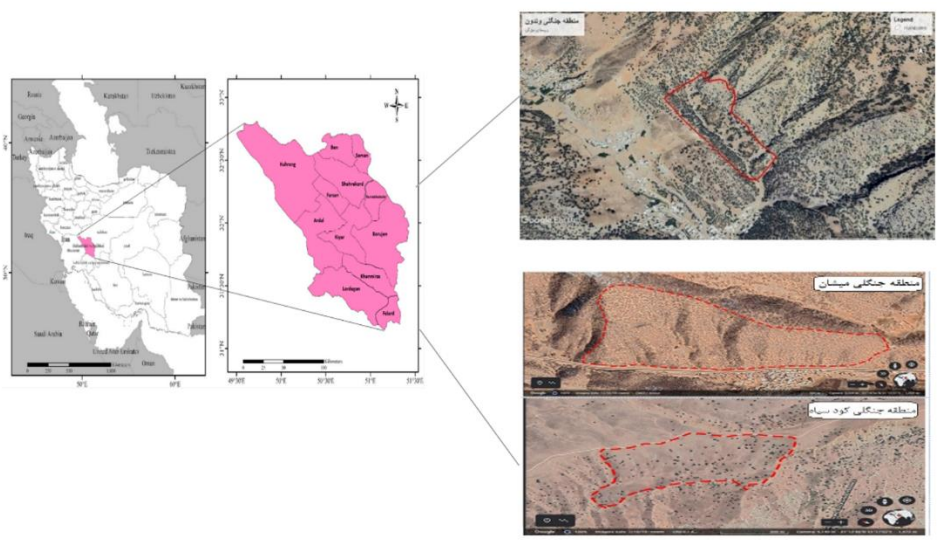
مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

این مطالعه در سه منطقه از جنگل‌های شهرستان فلارد، واقع در استان چهارمحال و بختیاری که بخشی از جنگل‌های زاگرس مرکزی هستند انجام گرفت. مناطق مورد مطالعه در سه منطقه جنگلی میشان، کته‌سیاه و وندون جنگل‌های فلارد به ترتیب با مساحت ۶۵، ۲۰ و ۳۰ هکتار انتخاب شدند (شکل ۱). علت انتخاب این سه منطقه، قرارگیری دو تیپ خالص و یک تیپ مخلوط بلوط و بنه در یک شرایط اقلیمی و رویشگاهی یکسان و در دسترس بودن کتابخانه طیفی گونه‌های همین منطقه بوده است که امکان بررسی تاثیر استفاده از کتابخانه طیفی در شناسایی بهتر تیپ‌های مخلوط نسبت به خالص و همچنین بررسی عملکرد الگوریتم مناسب در شناسایی تیپ مخلوط نسبت به خالص را فراهم می‌کند.

این شهرستان از نظر جغرافیایی در محدوده‌ی عرض ۱۰°۳۱′ تا ۲۰°۳۱′ شمالی و طول ۰۵°۵۱′ تا ۲۰°۵۱′ شرقی قرار دارد. از شمال به خانمیرزا، از غرب به لردگان، از شرق به سمیرم و از جنوب به کهگیلویه و بویر احمد محدود می‌شود. این شهرستان با حدود ۵۸۰ کیلومترمربع مساحت و با حداقل ارتفاع از سطح دریا ۱۸۰۰ متر، در منطقه‌ای کوهستانی و جنگلی واقع شده‌است. گونه جنگلی غالب در این منطقه بلوط ایرانی *(Quercus persica)* و سپس بنه *(Pistacia mutica)* است. هدف از انتخاب این سه منطقه وجود تیپ‌های خالص بلوط و بنه و همچنین تیپ آمیخته بلوط و بنه بود تا بررسی شود اولا استفاده از کتابخانه طیفی در شناسایی بهتر تیپ‌های مخلوط نسبت به خالص چه تاثیری دارد و دوما کدام الگوریتم در شناسایی تیپ مخلوط نسبت به خالص عملکرد بهتری دارد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]



شکل ۱- موقعیت مناطق جنگلی مورد مطالعه در شهرستان فلارد استان چهارمحال و بختیاری
Figure 1- Study forest areas in Flard County, Chaharmahal and Bakhtiari Province

داده‌های مورد استفاده

تصاویر سنجنده Sentinel-2 مربوط به تاریخ ۱۵ اکتبر ۲۰۲۴ (۲۴ مهر ۱۴۰۳) برای هر سه منطقه‌ی مورد مطالعه از پایگاه داده کوپرنیکوس دانلود شد. این تصاویر از نوع L2A بودند که تصحیحات اتمسفری روی آن‌ها اعمال شده‌است؛ بنابراین، نیازی به انجام تصحیحات مجدد نبود. در انتخاب تصاویر، درصد پوشش ابری به‌عنوان معیار اصلی در نظر گرفته شد و تنها تصاویر با حداقل میزان ابر انتخاب شدند. با توجه به تفکیک مکانی متفاوت باندهای این سنجنده (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر)، تنها باندهای ۱۰ و ۲۰ متری انتخاب شدند. انتخاب این تاریخ تصویربرداری با هدف کاهش اختلاف زمانی با تاریخ آماربرداری میدانی (۲۶ مهر ۱۴۰۳) انجام شد تا هماهنگی زمانی بین داده‌های زمینی و ماهواره‌ای حفظ شود و دقت تحلیل افزایش یابد.

شاخص‌های طیفی مورد استفاده

برای بهبود توان تفکیک تیپ‌های پوشش گیاهی، شاخص‌های طیفی NDVI، GNDVI، SAVI، MSAVI و EVI از تصاویر محاسبه گردید. هدف از استفاده‌ی این شاخص‌ها، افزایش دقت طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی با توجه به ویژگی‌های بیوشیمیایی برگ گونه‌ها و همچنین کاهش اثر بازتاب خاک مورد مطالعه بود. شاخص‌هایی مانند SAVI و MSAVI برای کاهش اثر خاک در مناطق با تاج‌پوشش باز و شاخص‌هایی مانند NDVI و EVI برای افزایش حساسیت در مناطق با پوشش متراکم انتخاب شدند. همچنین، GNDVI به‌منظور بررسی تفاوت‌های کلروفیلی بین گونه‌های بلوط و بنه به‌کار گرفته شد.

کتابخانه طیفی

در این تحقیق از کتابخانه طیفی مرتبط با دو گونه شاخص جنگلی یعنی بلوط و بنه در شهرستان فلارد، که پیش‌تر در تحقیق Pourghasemi (۲۰۲۱) تهیه شده بود، استفاده گردید. منحنی بازتاب طیفی این دو گونه با استفاده از دستگاه ASD Fieldspec (در محدوده طیفی ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) از ۲۰ پایه بلوط و ۲۰ پایه بنه و از هر پایه درختی چهار نمونه در چهار جهت جغرافیایی، تهیه شده بود. این داده‌ها مبنای ارزیابی ویژگی‌های بازتابی این دو گونه در محدوده طیفی مرتبط با باندهای سنجنده Sentinel-2 بودند.

شاخص‌های طیفی موثر در تفکیک گونه‌های بلوط و بنه و تحلیل آماری آن‌ها

به منظور شناسایی شاخص‌های طیفی مؤثر در تفکیک دو گونه بلوط و بنه، در ابتدا مجموعه‌ای از نه شاخص طیفی که از لحاظ بازه طیفی با باندهای Sentinel-2 و کتابخانه طیفی تطابق داشتند و پتانسیل بالایی در جداسازی دو گونه مورد نظر نشان می‌دادند از منابع علمی مختلف اعم از رساله و مقاله‌های منتشر شده، انتخاب گردید. به‌منظور استفاده از شاخص‌های استخراج‌شده از کتابخانه طیفی بر روی تصاویر Sentinel-2، ابتدا شاخص‌هایی انتخاب شدند که طول موج‌های مورد استفاده در فرمول آن‌ها با باندهای

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

سنجنده Sentinel-2 دارای بیشترین انطباق را داشتند. در مواردی که طول موج دقیق شاخص با باند Sentinel-2 منطبق نبود، نزدیک‌ترین باند Sentinel-2 با توجه به مرکز طول موج و تابع پاسخ طیفی سنجنده انتخاب شد و فرمول شاخص متناسب با باندهای متناظر Sentinel-2 بازنویسی گردید. شاخص‌های منتخب شامل PRI PRI، CRI، MCRI، CAI، NDVI800، NPCI، RENDVI، ARI و TCARI بودند. جدول ۱ مشخصات شاخص‌های عمومی و تخصصی منتخب و نحوه محاسبه آنها همچنین حساسیت هر کدام را گزارش می دهد.

هدف از انتخاب این شاخص‌ها بررسی توانایی آن‌ها در نمایش تفاوت‌های طیفی بین گونه‌های بلوط و بنه و استفاده از آن‌ها در طبقه‌بندی تیپ‌های پوشش گیاهی و تهیه نقشه تیپ با دقت خوب بود. در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های کتابخانه طیفی دو گونه بلوط و بنه، مقادیر شاخص‌های منتخب محاسبه شدند. سپس برای ارزیابی معنی‌داری تفاوت شاخص‌ها بین دو گونه، با وجود نرمال بودن داده‌ها، آزمون آماری t-test جفت شده در سطح اطمینان ۹۵٪ با استفاده از نرم‌افزار آماری Statistica انجام شد. در مرحله بعد، با درنظر گرفتن محدوده طیفی هر شاخص و تطابق آن با طول موج باندهای Sentinel-2، تصاویر مربوط به شاخص‌ها در محیط نرم‌افزار ENVI برای هر سه منطقه تولید گردید. سپس با استفاده از نمونه‌های تعلیمی تهیه‌شده در مراحل پیشین، طبقه‌بندی نهایی با سه الگوریتم مورد استفاده در حالت‌های قبلی انجام شد و ارزیابی صحت طبقه‌بندی صورت گرفت.

تهیه نقشه واقعیت زمینی

برای صحت‌سنجی نتایج طبقه‌بندی، عملیات برداشت میدانی صرفاً در منطقه‌ی وندون با اختلاط دو گونه بلوط (*Quercus brantii*) و بنه (*Pistacia mutica*) به‌عنوان منطقه‌ی آمیخته انجام شد. این آماربرداری در تاریخ ۲۶ مهر ۱۴۰۳ صورت گرفت. در این مرحله، تعداد ۱۰۰ پایه درخت بنه به‌صورت تصادفی انتخاب شد. برای هر پایه، یک پلات دایره‌ای با شعاع ۱۸ متر درنظر گرفته شد که در آن، درخت بنه به‌عنوان مرکز پلات قرار گرفت و مختصات آن با استفاده از گیرنده GPS ثبت شد. سپس، تمامی درختان بنه و بلوطی که در شعاع ۱۸ متری این درخت بنه قرار داشتند، شناسایی و ثبت شدند. این روش به‌دلیل پراکنش طبیعی و اختلاط گونه‌ها در منطقه، امکان بررسی دقیق‌تر ساختار پوشش گیاهی را فراهم کرد. سپس باتوجه به موقعیت مکانی و الگوی پراکنش گونه‌ها، محدوده‌هایی به‌صورت پلیگون برای این نقاط در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد و نقشه‌ی واقعیت زمینی منطقه‌ی وندون به‌صورت سطحی تهیه گردید. بدین ترتیب نقشه واقعیت زمینی برای حدود یک سوم منطقه وندون تهیه شد. برای دو منطقه‌ی میشان و کته‌سیاه با وجود تیپ خالص (به ترتیب بلوط و بنه)، نقشه‌ی واقعیت زمینی بر اساس کار میدانی و همزمان استفاده از تصاویر Google Earth با ترسیم حدود منطقه تهیه شد.

الگوریتم‌های طبقه‌بندی و ارزیابی صحت

به منظور انجام طبقه‌بندی نظارت شده ابتدا نمونه‌های تعلیمی برای تیپ‌های جنگلی از مناطقی با تیپ‌های خالص بلوط، بنه و منطقه تیپ مخلوط بلوط- بنه برداشت شد. همچنین، بخش‌هایی از تصاویر که فاقد پوشش بلوط یا بنه بودند، به‌عنوان کلاس دوم باعنوان (غیر بلوط- بنه) تعریف گردیدند. همچنین تلاش شد که به‌جای نمونه‌های بزرگ و متمرکز، از نمونه‌های کوچک‌تر با پراکندگی بیشتر استفاده شود؛ چرا که این کار احتمال نمایندگی بهتر انواع پوشش‌های موجود در تصویر را افزایش می‌دهد.

سه الگوریتم نظارت‌شده ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine)، حداکثر احتمال (Maximum Likelihood) و حداقل فاصله از میانگین (Minimum Distance) برای طبقه‌بندی سه منطقه‌ی جنگلی مختلف شامل میشان (بلوط خالص)، کته‌سیاه (بنه خالص) و وندون (ترکیب بلوط و بنه) صورت گرفت. در حالت اول، الگوریتم های طبقه‌بندی با استفاده از باندهای اصلی ماهواره Sentinel-2 (بدون ترکیب با شاخص) انجام شد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

جدول ۱- مشخصات شاخص‌های طیفی معمول و تخصصی حاصل از داده‌های Sentinel-2 و منحنی بازتاب طیفی گونه‌ها

Table1- Details of the common and specialized spectral indices obtained from Sentinel-2 imagery and the spectral reflectance curves of the species

منبع Source	کاربرد Application	توضیح اجزای فرمول Explain the components of the formula	فرمول Formula	نام شاخص Index Name
شاخص‌های طیفی معمول بر اساس باندهای Sentinel-2 Common Spectral indices based on bands of Sentinel-2				
Luhrabi *et al*., 2018	سنجش تراکم و سبزینگی پوشش گیاهی	NIR: مادون‌قرمز نزدیک Red: باند قرمز	(NIR - Red) / (NIR + Red)	NDVI
Mohammadpour *et al*., 2022	ارزیابی سلامت کلروفیلی گیاهان	Green: باند سبز	(NIR - Green) / (NIR + Green)	GNDVI
Isbaex *et al*., 2021	کاهش اثر بازتاب خاک در مناطق کم‌پوشش	L: معمولا ۰/۵درنظر گرفته می‌شود.	[(NIR - Red) / (NIR + Red + L)] (1 + L)	SAVI
Luhrabi *et al*., 2018	بهبود SAVI با تنظیم خودکار اثر خاک	NIR: مادون‌قرمز نزدیک Red: باند قرمز	0.5[2 × NIR + 1 - √((2 × NIR + 1)² - 8 (NIR - Red))]	MSAVI
Mohammadpour *et al*., 2022	افزایش دقت در پوشش‌های متراکم و کنترل اثر جو	G=2.5, C_1=6, C_2=7.5, L=1	G × (NIR - Red) / (NIR + C_1 × Red - C_2 × Blue + L)	EVI
شاخص‌های طیفی حاصل از کتابخانه طیفی Spectral indices based on spectral library				
Pourghasemi, 2021	حساسیت به تغییرات کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی	R 570: حساس به رنگدانه‌های فتوسنتزی R 531: حساس به رنگدانه‌های فتوسنتزی	((R531 - R570) / (R531 + R570)	PRI
Pourghasemi, 2021 Abbasi, 2009	ارزیابی تغییرات کلروفیل در برگ‌ها	Red430: جذب شدید توسط کلروفیل Red680: جذب شدید کلروفیل و حساس به کاهش آن	(R680 - R430) / (R680 + R430)	NPCI
Pourghasemi, 2021	بررسی میزان کاروتنوئیدها و سلامت گیاه	R510: حساس به کارتنوئید R550: حذف اثرات روشنایی	(1 / R510) - (1 / R550)	CRI
Pourghasemi, 2021	حساسیت بالا به تغییرات کلروفیل	R670: جذب شدید کلروفیل R700: لبه قرمز، حساس به تغییرات کلروفیل R550: حساس به ساختار برگ	((R700 - R670) - 0.2(R700 - R550)) (R700 / R670)	MCARI
Zarco-Tejada *et al*., 2005	ارزیابی میزان سلولز در برگ‌ها	R2000 و R2200: ناحیه جذب سلولز R2100: بیشترین جذب سلولز	0.5(R2000 + R2200) - R2100	CAI
Pourghasemi, 2021	بررسی تغییرات پوشش گیاهی در ناحیه Red Edge	R750: لبه قرمز، حساس به ساختار تاج و سلامت R705: حساس به کلروفیل	(R750 - R705) / (R750 + R705)	RENDVI
Zarco-Tejada *et al*., 2005	تفکیک تیپ گیاهی و بررسی سلامت و استرس گیاه	R800: بازتاب زیاد در NIR، نشان‌دهنده‌ی سلامت و تراکم R680: جذب کلروفیل	(R800 - R680) / (R800 + R680)	NDVI800
Zarco-Tejada *et al*., 2005	بررسی میزان آنتوسیانین در برگ‌ها	R550: باند سبز، حساس به آنتوسیانین R700: باند مرجع	(1 / R550) - (1 / R700)	ARI
Zarco-Tejada *et al*., 2005	کاهش اثرات پس زمینه خاک، روشنایی، سایه و ساختار برگ	R550: باند سبز R670: باند قرمز R700: باند مرجع	3 [(R700 - R670) - 0.2 (R700 - R550) (R700 / R670)]	TCARI

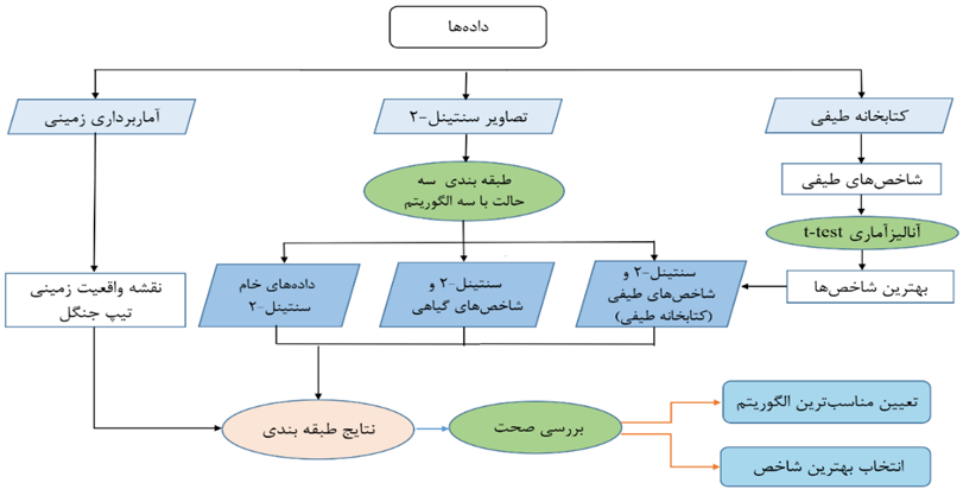
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

در حالت دوم، طبقه‌بندی با استفاده از باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی معمول (NDVI، GNDVI، SAVI، MSAVI و EVI) انجام گرفت و نهایتا در حالت سوم به منظور بررسی تاثیر و نقش کتابخانه طیفی در صحت نتایج طبقه‌بندی فرآیند طبقه‌بندی بر روی باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی حاصل از تحلیل داده‌های کتابخانه طیفی، شاخص‌های PRI، CRI، MCRI، CAI، NDVI800، NPCI، RENDVI و ARI) انجام شد.

الگوریتم‌های طبقه‌بندی و ارزیابی صحت

به منظور انجام طبقه‌بندی نظارت شده ابتدا نمونه‌های تعلیمی برای تیپ‌های جنگلی از مناطقی با تیپ‌های خالص بلوط، بنه و منطقه تیپ مخلوط بلوط- بنه برداشت شد. همچنین، بخش‌هایی از تصاویر که فاقد پوشش بلوط یا بنه بودند، به‌عنوان کلاس دوم باعنوان (غیر بلوط- بنه) تعریف گردیدند. همچنین تلاش شد که به‌جای نمونه‌های بزرگ و متمرکز، از نمونه‌های کوچک‌تر با پراکندگی بیشتر استفاده شود؛ چرا که این کار احتمال نمایندگی بهتر انواع پوشش‌های موجود در تصویر را افزایش می‌دهد.

سه الگوریتم نظارت‌شده ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine)، حداکثر احتمال (Maximum Likelihood) و حداقل فاصله از میانگین (Minimum Distance) برای طبقه‌بندی سه منطقه‌ی جنگلی مختلف شامل میشان (بلوط خالص)، کته‌سیاه (بنه خالص) و وندون (ترکیب بلوط و بنه) صورت گرفت. در حالت اول، الگوریتم های طبقه‌بندی با استفاده از باندهای اصلی ماهواره Sentinel-2 (بدون ترکیب با شاخص) انجام شد. در حالت دوم، طبقه‌بندی با استفاده از باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی معمول (NDVI، GNDVI، SAVI، MSAVI و EVI) انجام گرفت و نهایتا در حالت سوم به منظور بررسی تاثیر و نقش کتابخانه طیفی در صحت نتایج طبقه‌بندی فرآیند طبقه‌بندی بر روی باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی حاصل از تحلیل داده‌های کتابخانه طیفی، شاخص‌های PRI، CRI، MCRI، CAI، NDVI800، NPCI، RENDVI و ARI) انجام شد.



شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام پژوهش

Figure 2- Flowchart of research process

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

نتایج

حالت اول) نتایج صحت‌سنجی، طبقه‌بندی باندهای اصلی Sentinel-2 (بدون ترکیب با شاخص)

طبقه‌بندی با باندهای اصلی Sentinel-2 در حالت نخست، که تنها از باندهای اصلی تصاویر Sentinel-2 بدون افزودن شاخص‌های طیفی استفاده شد، نتایج حاصل از صحت‌سنجی نشان داد که الگوریتم حداکثر احتمال در دو منطقه‌ی جنگلی میشان (صحت کلی ۹۸/۴٪، ضریب کاپا ۰/۷۱) و وندون (صحت کلی ۸۶/۶٪، ضریب کاپا ۰/۶۷) از نظر صحت کلی عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد (جدول ۲). با این حال، در منطقه‌ی کته‌سیاه، الگوریتم‌های SVM (صحت کلی ۷۵٪، ضریب کاپا ۰/۵۰) و حداکثر احتمال (صحت کلی ۷۷/۵٪، ضریب کاپا ۰/۳۲) عملکردی نزدیک به هم داشتند؛ اما باتوجه به تاکید بر صحت کلی، حداکثر احتمال به عنوان الگوریتم برتر انتخاب شد و به طور کلی الگوریتم حداکثر احتمال در حالت اول در هر سه منطقه از دقت بیشتری برخوردار بوده‌است. الگوریتم حداقل فاصله از میانگین در هیچ‌یک از مناطق عملکرد برتری نداشت و در تمامی موارد، ضعیف‌ترین نتایج را از نظر صحت کلی و ضریب کاپا ارائه داد.

به‌طور کلی، هر سه الگوریتم در منطقه‌ی جنگلی میشان (بلوط خالص) از دقت زیادتری برخوردار بودند؛ به‌ویژه ضریب کاپا و صحت کلی در این منطقه نسبت به دو منطقه‌ی دیگر خصوصا کته‌سیاه بیشتر بود، که این مسئله می‌تواند به ساختار جنگل‌های بلوط، تاج‌پوشش متراکم‌تر و بازتاب طیفی منسجم‌تر گونه‌ی بلوط نسبت داده شود. در مقابل، پایین‌ترین دقت در منطقه کته‌سیاه در هر سه الگوریتم می‌تواند ناشی از تراکم پایین، تاج پوشش باز درختان بنه سهم زیاد بازتاب خاک و افزایش ناهمگنی طیفی باشد.

جدول۲- نتایج صحت طبقه‌بندی با باندهای اصلی Sentinel-2 در سه منطقه جنگلی

Table 2- Results of classification accuracy using original Sentinel-2 bands in three forest areas

الگوریتم Algorithm	ماشین بردار پشتیبان SVM		حداکثر احتمال Maximum Likelihood		حداقل فاصله از میانگین Min Dist.	
نتایج results	صحت کلی(٪) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient	صحت کلی(٪) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient	صحت کلی(٪) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient
منطقه جنگلی میشان Mishan Forest area	86.0	0.72	98.4	0.71	85.4	0.68
منطقه جنگلی کته‌سیاه Kotesiyah Forest area	75.0	0.50	77.5	0.32	59.4	0.32
منطقه جنگلی وندون Vandon Forest area	83.0	0.66	86.6	0.67	64.3	0.25

حالت دوم) نتایج صحت‌سنجی، طبقه‌بندی باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی

نتایج حاصل از صحت‌سنجی طبقه‌بندی باندهای Sentinel-2 ترکیب با شاخص‌های طیفی عمومی (NDVI، SAVI، MSAVI، GNDVI و EVI) در حالت دوم، نشان داد که در منطقه‌ی میشان، الگوریتم‌های SVM و حداکثر احتمال ضریب کاپای مشابهی (۰/۶۵) داشتند، اما حداکثر احتمال از صحت کلی زیادتری (۹۷/۷٪) نسبت به SVM (۸۲٪) برخوردار بود (جدول ۳). باتوجه به سهم طبقه موردنظر و وسعت بیشتر آن، صحت کلی نسبت به ضریب کاپا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند بنابراین حداکثر احتمال را به‌عنوان الگوریتم

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

منتخب در این منطقه معرفی می‌شود. در منطقه‌ی وندون، الگوریتم SVM با صحت کلی ۷۷/۹٪ و ضریب کاپا ۰/۵۷، هم از نظر دقت و هم ضریب کاپا در طبقه‌بندی، عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشت. الگوریتم حداکثر احتمال (۷۲/۸٪، ۰/۴۵) و حداقل فاصله از میانگین (۶۴/۶٪، ۰/۲۶) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

مقایسه بین حالت دوم و حالت اول نشان داد که در منطقه‌ی میشان، ترکیب با شاخص‌های طیفی موجب افزایش قابل توجه ضریب کاپا در الگوریتم حداقل فاصله از میانگین شد (از ۰/۶۸ به ۰/۸۱)، که نشان‌دهنده‌ی دقت بیشتر طبقه‌بندی است. الگوریتم حداکثر احتمال برای هر دو حالت اول و دوم صحت کلی بسیار خوب و تقریبا مشابهی داشت (۹۸/۴٪ در مقابل ۹۷/۷٪). در منطقه‌ی کته‌سیاه، عملکرد الگوریتم SVM در حالت دوم افت قابل توجهی داشت (صحت کلی از ۷۵٪ به ۶۲/۵٪، کاپا از ۰/۵۰ به ۰/۲۵)، در حالی‌که الگوریتم حداکثر احتمال با بهبود ضریب کاپا (از ۰/۳۲ به ۰/۳۸) عملکرد بهتری ارائه داد و همچنان مشابه حالت اول به عنوان الگوریتم منتخب بود. این افزایش نسبتا کم نشان می‌دهد که شاخص‌های طیفی در مناطق با پوشش باز، تاثیری در بهبود دقت طبقه‌بندی دارند.

به‌طور کلی مشابه حالت اول، هر سه الگوریتم در منطقه‌ی جنگلی میشان (بلوط خالص) از دقت زیادتری برخوردار بودند و ضریب کاپا و صحت کلی در این منطقه نسبت به دو منطقه‌ی دیگر خصوصا کته‌سیاه بیشتر بود که این مسئله می‌تواند به تاج‌پوشش بسته‌تر و متراکم‌تر پوشش طیفی منطقه و بازتاب طیفی منسجم‌تر گونه‌ی بلوط نسبت داده شود. در مقابل، منطقه کته‌سیاه در طبقه‌بندی نسبت به دو منطقه دیگر از صحت کلی و ضریب کاپای کم‌تری برخوردار بود. این مسئله می‌تواند به دلیل تراکم پایین و تاج پوشش باز درختان بنه در این منطقه و تشابه بازتاب طیفی خاک و پوشش گیاهی باشد. هرچند در این حالت از شاخص‌های طیفی استفاده شد که هدف آن کاهش اثر بازتاب خاک و افزایش حساسیت به پوشش گیاهی بود، اما تفاوت چندانی در بهبود نتایج حاصل نشد. این نتایج نشان می‌دهد که تأثیر شاخص‌های طیفی بر دقت طبقه‌بندی، وابسته به نوع پوشش گیاهی، نوع شاخص، ساختار تاج‌پوشش و الگوریتم مورد استفاده است.

جدول ۳- نتایج بررسی صحت طبقه‌بندی با باندهای اصلی Sentinel-2 و شاخص‌های طیفی در سه منطقه جنگلی

Table 3- Results of classification accuracy assessment using main Sentinel-2 bands and spectral indices in three forest areas

الگوریتم Algorithm	ماشین بردار پشتیبان SVM		حداکثر احتمال Maximum Likelihood		حداقل فاصله از میانگین Min Dist	
نتایج results	صحت کلی(٪) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient	صحت کلی(٪) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient	صحت کلی(٪) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient
منطقه جنگلی میشان Mishan Forest area	82	0.65	97.7	0.65	85.0	0.81
منطقه جنگلی کته‌سیاه Kotesiyah Forest area	62.5	0.25	76	0.38	60.5	0.33
منطقه جنگلی وندون Vandon Forest area	77.9	0.57	72.8	0.45	64.6	0.26

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

حالت سوم) نتایج طبقه‌بندی باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی حاصل از طیف سنجی

قبل از استفاده از شاخص‌های محاسبه‌شده روی داده‌های طیفی حاصل از طیف‌سنجی، تحلیل آماری شاخص‌های طیفی به منظور بررسی تفاوت طیفی بین گونه ها با استفاده از نتایج این شاخص ها انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های طیفی مدنظر باتوجه به کتابخانه طیفی برای دو گونه بلوط و بنه در نرم افزار آماری Statistica در جدول (۴) آورده شده که از مجموع نه شاخص (PRI، CRI، MCRI، CAI، NDVI800، NPCI، RENDVI، ARI و TCARI)، هشت شاخص آن معنی‌دار بود و شاخص TCARI از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل آماری شاخص‌ها

Table 4- Results of the Statistical Analysis of the indices

Index Name	value T	P value
PRI	28.999	0.000 ***
CRI	-8.121	0.000 ***
MCRI	-9.245	0.000 ***
CAI	3.099	0.002 **
NDVI800	-12.665	0.000 ***
NPCI	21.242	0.00 ***
RENDVI	-20.187	0.00 ***
ARI	-12.601	0.000 ***
TCARI	-1.720	0.87 ns

نتایج طبقه‌بندی باندهای اصلی Sentinel-2 همراه با شاخص‌های طیفی حاصل از طیف سنجی نشان داد که در منطقه‌ی میشان، الگوریتم SVM با صحت کلی۹۹٪ و ضریب کاپا ۰/۸۱، عملکرد برتری نسبت به الگوریتم حداکثر احتمال (۹۷٪) و الگوریتم حداقل فاصله از میانگین با صحت کلی ۷۶٪ داشت. در منطقه‌ی کته‌سیاه، الگوریتم SVMبا صحت کلی ۹۸٪ و ضریب کاپا ۰/۷۴، بهترین عملکرد را داشت. اگرچه الگوریتم حداقل فاصله از میانگین ضریب کاپای نسبتاً زیادی (۰/۶۹) ارائه داد، اما به‌دلیل صحت کلی و ضریب کاپای کم‌تر از SVM، انتخاب نهایی به SVM تعلق گرفت. در منطقه‌ی وندون نیز، الگوریتم SVMبا صحت کلی ۸۹٪ و ضریب کاپا ۰/۶۷، عملکرد برتری نسبت به حداکثر احتمال (۸۱٪، ۰/۵۷) و حداقل فاصله از میانگین (۶۶٪، ۰/۴۲) داشت. این الگوریتم توانست در منطقه‌ای با پوشش گیاهی آمیخته، طبقه‌بندی دقیق و قابل اعتمادی ارائه دهد. همچنین، مشابه دو حالت قبلی، طبقه‌بندی منطقه‌ی جنگلی میشان با هر سه الگوریتم از صحت کلی و ضریب کاپای بیشتری برخوردار بود، که این مسئله می‌تواند به ساختار یکنواخت‌تر پوشش گیاهی و بازتاب طیفی منسجم‌تر گونه‌ی بلوط نسبت داده شود.نتایج حاصل از حالت سوم نشان داد که ترکیب تصاویر Sentinel-2 با شاخص‌های طیفی منجر به افزایش قابل توجه دقت طبقه‌بندی و ضریب کاپا در تمامی مناطق جنگلی شد. در این میان، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) در هر سه منطقه میشان، کته‌سیاه و وندون بهترین عملکرد را از نظر صحت کلی و ضریب کاپا در طبقه‌بندی ارائه داد.

در مقایسه با حالت دوم که در آن تصاویر سنتینل-۲ با شاخص‌های طیفی عمومی ترکیب شده بودند، نتایج حالت سوم نشان داد که استفاده از شاخص‌های طیفی تخصصی استخراج‌شده از کتابخانه‌ی طیفی منجر به افزایش قابل توجه دقت طبقه‌بندی و ضریب کاپا در تمامی مناطق جنگلی شد. این تفاوت به‌ویژه در منطقه‌ی کته‌سیاه که در حالت دوم به‌دلیل تاج‌پوشش باز و بازتاب خاک عملکرد ضعیف‌تری داشت، بسیار چشم‌گیر بود؛ به‌طوری‌که الگوریتم SVM در حالت سوم صحت کلی ۹۸٪ و ضریب کاپا ۰/۷۴ را ارائه داد، در حالی‌که در حالت دوم این مقادیر به‌ترتیب ۶۲/۵٪ و ۰/۲۵ بودند.

. علت این بهبود را می‌توان در ماهیت تخصصی شاخص‌های طیفی دانست. شاخص‌های طیفی عمومی مانند NDVI و SAVI برای ارزیابی کلی سبزینگی و

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

کاهش اثر خاک طراحی شده‌اند، اما در شرایطی که تفاوت‌های طیفی بین گونه‌ها ظریف و پیچیده باشد، این شاخص‌ها توان تفکیک کافی ندارند. در مقابل، شاخص‌های طیفی تخصصی مانند PRI، CRI، ARI و NDVI800، با تمرکز بر رنگدانه‌های حساس و تفاوت‌های کلروفیل خاص دو گونه، توانایی بالاتری در جداسازی گونه‌های بلوط و بنه نشان دادند.

جدول ۵- نتایج صحت طبقه‌بندی با شاخص‌های استخراج‌شده از کتابخانه طیفی در سه منطقه جنگلی

Table 5- Results of classification accuracy using spectral indices derived from the spectral library in three forest areas

الگوریتم Algorithm	ماشین بردار پشتیبان SVM		حداکثر احتمال Maximum Likelihood		حداقل فاصله از میانگین MinDist	
نتایج Results	صحت کلی ٪ Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient	صحت کلی ٪ Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient	صحت کلی ٪ Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa coefficient
منطقه جنگلی میشان Mishan Forest area	99	0.81	97	0.78	76	0.74
منطقه جنگلی کته‌سیاه Kotesiyah Forest area	98	0.74	75	0.62	77	0.69
منطقه جنگلی وندون Vandon Forest area	89	0.67	81	0.57	66	0.42

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که دقت طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی زاگرس مرکزی تحت تأثیر نوع داده‌های ورودی، ویژگی‌های اکولوژیکی منطقه و الگوریتم طبقه‌بندی قرار دارد. در سناریوی نخست که تنها از باندهای اصلی Sentinel-2 استفاده شد، الگوریتم حداکثر احتمال در مناطق میشان و وندون بهترین عملکرد را ارائه داد. این نتیجه با یافته‌های Ahmadi Sani در سال (۲۰۰۹)، Amini در سال (۲۰۰۶)، Ebrahimi در سال (۲۰۱۲) و Abedi & Bonyad در سال (۲۰۱۳) همخوانی دارد. این پژوهش‌ها نشان دادند که الگوریتم Maximum Likelihood در شرایطی که کلاس‌های مورد مطالعه دارای الگوی طیفی نسبتاً مشخص و تعداد نمونه‌های آموزشی مناسب باشند، همچنان می‌تواند دقت قابل قبولی در طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای فراهم کند. عملکرد مناسب این الگوریتم در منطقه میشان را می‌توان به یکنواختی بیشتر تاج‌پوشش بلوط و کاهش پراکنش طیفی درون کلاس‌ها نسبت داد.

با این حال، نتایج نشان داد که استفاده از باندهای اصلی به تنهایی در تمامی شرایط اکولوژیکی پاسخگوی تفکیک دقیق تیپ‌های جنگلی نیست. به‌ویژه در منطقه کته‌سیاه که دارای تاج‌پوشش بازتر و سهم بیشتری از بازتاب خاک است، دقت طبقه‌بندی کاهش یافت. این موضوع با نتایج Hadiyan و همکاران (۲۰۱۲) و نیز Hościło & Lewandowska در سال (۲۰۱۹) مطابقت دارد که تأکید کرده‌اند حضور خاک زمینه، ناهمگنی ساختاری تاج‌پوشش و پدیده پیکسل‌های مختلط از مهم‌ترین عوامل کاهش دقت طبقه‌بندی در جنگل‌های تنک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. در چنین شرایطی، اطلاعات طیفی ثبت‌شده توسط سنجنده صرفاً بازتاب پوشش گیاهی نبوده و ترکیبی از سیگنال خاک، پوشش گیاهی و سایه را شامل می‌شود که فرآیند تفکیک کلاس‌ها را دشوار می‌کند.

در سناریوی دوم، شاخص‌های طیفی عمومی شامل NDVI، SAVI، GNDVI، MSAVI و EVI به داده‌های اصلی افزوده شدند. اگرچه این شاخص‌ها برای ارزیابی سبزینگی، کاهش اثر خاک و برآورد وضعیت فیزیولوژیکی پوشش گیاهی طراحی شده‌اند، اما نتایج نشان داد که تأثیر آن‌ها در تمامی تیپ‌های جنگلی یکسان نیست. این یافته با نتایج Hadiyan و همکاران (۲۰۱۲) و همچنین Mohammadpour و همکاران (۲۰۲۲) همسو است که گزارش کردند رابطه شاخص‌های طیفی با ویژگی‌های تاج‌پوشش و ساختار توده وابسته به شرایط اکولوژیکی منطقه است. در واقع شاخص‌هایی نظیر NDVI و SAVI بیشتر برای پایش وضعیت عمومی پوشش گیاهی

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

مناسب هستند و در شرایطی که تفاوت‌های طیفی بین گونه‌ها ظریف باشد، توان تفکیک محدودی دارند. به همین دلیل در برخی مناطق مورد مطالعه، به‌ویژه وندون و کته‌سیاه، افزودن این شاخص‌ها منجر به بهبود چشمگیر دقت طبقه‌بندی نشد.

مهم‌ترین یافته این پژوهش مربوط به سناریوی سوم بود که در آن از شاخص‌های استخراج‌شده از کتابخانه طیفی گونه‌های بلوط و بنه استفاده شد. نتایج نشان داد که این شاخص‌ها در مقایسه با شاخص‌های طیفی عمومی توانستند دقت طبقه‌بندی را در تمامی مناطق افزایش دهند. این موضوع به‌ویژه در منطقه کته‌سیاه بسیار چشمگیر بود؛ منطقه‌ای که به دلیل تاج‌پوشش باز و سهم بالای بازتاب خاک، یکی از دشوارترین شرایط طبقه‌بندی را داشت. این یافته با سایر مطالعات همخوانی داشت (Abbasi *et al*., 2009; Pourghasemi, 2021; Zhang *et al*., 2020; Nasiri *et al*., 2022; Yang *et al*., 2023). مطالعات مذکور نشان داده‌اند که استفاده از اطلاعات حاصل از کتابخانه‌های طیفی و شاخص‌های طراحی‌شده بر اساس ویژگی‌های اختصاصی گونه‌ها، توان تفکیک کلاس‌های پوشش گیاهی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در واقع چنین شاخص‌هایی به جای تمرکز صرف بر میزان سبزینگی، بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خاص گونه‌ها تمرکز دارند.

از دیدگاه فیزیولوژیکی نیز نتایج قابل تبیین است. شاخص PRI به تغییرات کارایی فتوسنتزی و چرخه زانتوفیل حساس است، در حالی که شاخص‌های CRI و MCRI تغییرات کاروتنوئیدها را منعکس می‌کنند. همچنین شاخص ARI با میزان آنتوسیانین و شاخص‌های RENDVI و NDVI800 با تغییرات کلروفیل و ناحیه Red Edge ارتباط دارند. معنی‌دار بودن هشت شاخص از مجموع نه شاخص بررسی‌شده نشان می‌دهد که تفاوت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مشخصی بین گونه‌های بلوط و بنه وجود دارد که می‌تواند در طبقه‌بندی ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین افزایش دقت طبقه‌بندی در سناریوی سوم را می‌توان ناشی از انتقال اطلاعات اکولوژیکی و فیزیولوژیکی کتابخانه طیفی به فرآیند طبقه‌بندی دانست.

در مقایسه بین الگوریتم‌های مورد استفاده نیز ماشین بردار پشتیبان (SVM) در اغلب موارد، به‌ویژه در سناریوی سوم، بهترین عملکرد را ارائه داد. این نتیجه با یافته‌های دیگر که برتری SVM را نسبت به روش‌های کلاسیک آماری نظیر Maximum Likelihood و Minimum Distance گزارش کرده‌اند، همسو است (Laurin *et al*., 2016; Zhang *et al*., 2020; Jeong & Park 2023). برتری این الگوریتم را می‌توان به توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مقاومت بیشتر در برابر همپوشانی کلاس‌ها و قابلیت عملکرد مناسب در داده‌های با ابعاد بالا نسبت داد. از آنجا که تیپ‌های جنگلی زاگرس دارای ناهمگنی ساختاری زیاد، تنوع طیفی بالا و مرزهای اکولوژیکی پیچیده هستند، استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند دقت تفکیک را نسبت به روش‌های آماری سنتی افزایش دهد.

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه تصاویر Sentinel-2 به تنهایی قادر به تولید نتایج قابل قبول هستند، اما استفاده از شاخص‌های طیفی مبتنی بر کتابخانه طیفی می‌تواند اطلاعات فیزیولوژیکی و اکولوژیکی ارزشمندی را وارد فرآیند طبقه‌بندی کند و موجب بهبود دقت تفکیک تیپ‌های جنگلی شود. این موضوع به‌ویژه در جنگل‌های تنک و ناهمگن زاگرس که اثر خاک و پیکسل‌های مختلط نقش مهمی در کاهش دقت طبقه‌بندی دارند، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری کلی

هدف این پژوهش ارزیابی نقش شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از کتابخانه طیفی در بهبود طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی زاگرس مرکزی با استفاده از تصاویر Sentinel-2 بود. نتایج نشان داد که دقت طبقه‌بندی تحت تأثیر ویژگی‌های اکولوژیکی توده‌های جنگلی، نوع شاخص‌های مورد استفاده و الگوریتم طبقه‌بندی قرار دارد. اگرچه استفاده از باندهای اصلی Sentinel-2 در برخی مناطق به‌ویژه در توده‌های نسبتاً یکنواخت و متراکم مانند منطقه میشان نتایج قابل قبولی ارائه کرد، اما در مناطق دارای تاج‌پوشش باز، پراکنش بیشتر گونه‌ها و اثر بالای بازتاب خاک، توان تفکیک آن محدودتر بود.

مقایسه سه سناریوی مورد بررسی نشان داد که شاخص‌های طیفی عمومی نظیر NDVI، SAVI، GNDVI، MSAVI و EVI اگرچه اطلاعات مفیدی درباره وضعیت عمومی پوشش گیاهی فراهم می‌کنند، اما در

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

تفکیک تیپ‌های جنگلی دارای شباهت طیفی بالا کارایی محدودی دارند. در مقابل، شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از کتابخانه طیفی گونه‌های بلوط و بنه توانستند با بهره‌گیری از تفاوت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گونه‌ها، از جمله تغییرات مرتبط با کلروفیل، کاروتنوئیدها، آنتوسیانین و ناحیه Red Edge، دقت طبقه‌بندی را در تمامی مناطق مورد مطالعه افزایش دهند.

مهم‌ترین یافته پژوهش، برتری شاخص‌های مبتنی بر کتابخانه طیفی در مناطق تنک و ناهمگن جنگلی بود؛ به‌گونه‌ای که بیشترین میزان بهبود دقت در منطقه کته‌سیاه مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که اطلاعات حاصل از کتابخانه طیفی می‌تواند بخشی از محدودیت‌های ناشی از اثر خاک، تاج‌پوشش باز و پیکسل‌های مختلط را جبران کرده و توان تفکیک گونه‌های جنگلی را افزایش دهد. از این رو، استفاده از کتابخانه‌های طیفی بومی می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر برای ارتقای دقت نقشه‌های پوشش جنگلی در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک زاگرس مورد توجه قرار گیرد.

در میان الگوریتم‌های بررسی‌شده، SVM در اغلب سناریوها و به‌ویژه در ترکیب با شاخص‌های طیفی تخصصی، بالاترین دقت را ارائه داد. عملکرد مناسب این الگوریتم را می‌توان به توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مدیریت همپوشانی طیفی کلاس‌ها و سازگاری با شرایط پیچیده اکولوژیکی نسبت داد. بر این اساس، SVM به‌عنوان مناسب‌ترین الگوریتم برای طبقه‌بندی تیپ‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه معرفی می‌گردد.

به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که تلفیق تصاویر Sentinel-2 با شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از کتابخانه طیفی، رویکردی کارآمد برای تهیه نقشه‌های دقیق تیپ‌های جنگلی است. این رویکرد می‌تواند در پایش تغییرات پوشش جنگلی، ارزیابی وضعیت اکولوژیکی توده‌ها، حفاظت از گونه‌های بومی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در جنگل‌های زاگرس مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، از داده‌های چندزمانه، سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر و داده‌های ساختاری نظیر لیدار در کنار کتابخانه‌های طیفی استفاده شود تا امکان تفکیک دقیق‌تر تیپ‌های جنگلی و پایش پویایی‌های اکوسیستم فراهم گردد.

منابع

Abbasi, M., Darvishsefat, A.A., Shepman, M.A., Marvi-Mohajer, M.R. & Sobhani, H. 2009. Spectral reflectance differences of leaves of major tree species in Caspian forests using ground spectrometry. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 4: 568-580.

Abedi, R. & Bonyad, A.A. 2013. Mapping tree species composition using satellite imagery. *National Geomatics Conference*, 1 May 2013, Tehran. Iran.

Ahmadi Sani, N., Darvishsefat, A.A., Zobeiri, M., Farzaneh, A., 2009. Potentiality of ASTER images for forest density mapping in Zagros (Case study: Marivan forests). *Iranian Journal of Natural Resources* 61(4): 603-614.

Amini, M. 2006. Monitoring forest extent changes and its relation with physiographic and human factors using satellite imagery and GIS (Case study: Aramardeh forests, Baneh). M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

Amiri, M., Mostafa, M. & Rahimi, M. 2019. Mapping forest types in Ziarat-Gorgan forest management plan using parametric and non-parametric methods. *Iranian Journal of Forest*, 2: 239-254.

Cho, M.A., Malahlela, O. & Ramoelo, A. 2015. Assessing the utility of World View-2 imagery for tree species mapping in South African subtropical humid forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38: 349-357. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.01.015

Ebrahimi, G. 2012. Forest type mapping using satellite data (Case study: part of Marivan forests).

M.Sc. Thesis, Kurdistan University, Iran.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

Ginindza, Th. 2025. Identification of commercial forest tree species using Sentinel-2 and PlanetScope imageries in the Usutu Forest, Eswatini. *Journal of Geographic Information System*, 17: 1-22. https://doi.org/10.4236/jgis.2025.171001

Grabska, E., Hostert, P., Pflugmacher, D. & Ostapowicz, K. 2019. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 11: 1197. https://doi.org/10.3390/rs11101197

Hadiyan, J., Shataei, S. & Bonyad, A. 2012. Evaluation of vegetation indices for forest canopy density estimation. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 20: 33-45.

Hościło, A. & Lewandowska, A. 2019. Mapping forest type and tree species on a regional scale using multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 11: 929. https://doi.org/10.3390/rs11080929

Isbaex, C., Coelho, A., Gonçalves, A. & Sousa, A. 2024. Mapping of forest species using Sentinel-2A images in the Alentejo and Algarve Regions, Portugal. *Land*, 13: 2-21. https://doi.org/10.3390/land13122184

Jeong, J. & Park, Ch. 2023. Developing a mapping procedure for urban forests using online map services and Sentinel-2A images. *Urban Forestry & Urban Greening*, 89: 128095. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128095

Laurin, G.V., Puletti, N., Hawthorne, W., Liesenberg, V., Corona, P., Papale, D. & Valentini, R. 2016. Discrimination of tropical forest types and dominant species using hyperspectral and simulated Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 176: 163-176. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.017

Luhrabi, Y., Abbasi, M., Soltani, A., Riyahi bakhtyari, H.R. 2018. Determination of the most suitable method for forest type mapping in central Zagros using landsat-8 satellite Images, *Journal of Forest Research and Development*, 4(2): 191-205.

Mirki, M., Sohrabi, H., Sadeghi, S., Fatehi, P. & Immitzaer, M. 2023. Mapping mangrove forests using Sentinel-2 imagery and Google Earth Engine. *Marine Science and Technology Journal*, 22: 40-49.

Mohammadpour, P., Viegas, D. & Viegas, C. 2022. Vegetation mapping with Random Forest using Sentinel-2 and GLCM texture features. *Remote Sensing*, 14: 2-20. https://doi.org/10.3390/rs14184585

Nasiri, V., Beloiu, M., Darvishsefat, A.A., Griess, V., Maftei, C. & Waser, L. 2022. Mapping tree species composition in a Caspian temperate mixed forest using spectral-temporal metrics and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116: 103154. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103154

Pourghasemi, M. 2021. Radiative transfer models at leaf and canopy of trees for two species of *Quercus brantii* and *Pistacia atlantica* in Zagros forests (Case study: Chaharmal-Bakhtiyari province). PhD Thesis, Shahrekord University, Iran, 145p.

Yang, J., Kyung Lee, Y. & Chi, J. 2023. Spectral unmixing-based Arctic plant species analysis using a spectral library and terrestrial hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125: 103583. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103583

Zarco-Tejada, P J., Ustin, S.L., & Whiting, M.L. 2005. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy journal*, 97(3): 641-653. https://doi.org/10.2134/agronj2003.0257

Zhang, J., Wang, Ch., Yuan, L., Zang, Y. & Wu, K. 2020. Construction of a plant spectral library based on an optimized feature selection method. *Biosystems Engineering*, 195: 1-16. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.04.008

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]