

# Using Remote Sensing Data and Machine Learning Methods to Estimate Changes in Hyrcanian Forests along the Southern Coasts of the Caspian Sea

M. Afraz, D. Omarzadeh, M. Eftekhari\* , M. Yaghoobzadeh, and  
A. Haji Elyasi

Forest, Range and Watershed Management Organization, Tehran, Iran. [afraz123879@yahoo.com](mailto:afraz123879@yahoo.com)  
Internet Interdisciplinary Institute (IN3), Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, Catalonia, Spain.  
[domarzadeh@uoc.edu](mailto:domarzadeh@uoc.edu)

Ph.D Student, Water Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran. [mobineftekhari@yahoo.com](mailto:mobineftekhari@yahoo.com)  
Associate Prof., Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.  
[m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir](mailto:m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir)

Ph.D. Student of Water and Hydraulic Structures, School of Civil Engineering, College of Engineering,  
University of Tehran, Tehran, Iran. [alielyasi2015@gmail.com](mailto:alielyasi2015@gmail.com)

Received: July 2024 and Accepted: February 2025

## Abstract

The Hyrcanian Forests, located along the southern coastal areas of the Caspian Sea in northern Iran, are of great environmental, economic, and cultural significance. They play crucial roles not only in preserving water resources, soil, plant, and animal diversity but in mitigating adverse impacts of climate change as well. The present study investigated changes in the Hyrcanian forest cover between 2000 and 2017 using the diverse remote sensing data of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and MODIS Vegetation Continuous Fields (VCF) as well as Sentinel-1, Landsat-5, and Landsat-8 satellite images while the Support Vector Machine (SVM) and Random Forest (RF) methods were employed for classification. The results revealed that approximately 534 square kilometers of the forests had experienced degradation. Moreover, classification accuracy levels were impressive as evidenced by a user accuracy of 93.26% and a Kappa coefficient of 94.62% recorded for SVM and corresponding values of 89.29% 74.63% for RF. Comparison with global forest change datasets confirmed the reliability of the results obtained. The research approach seems to offer promising insights useful for forest conservation management, natural resource planning, and enhanced sustainable utilization of Hyrcanian forests.

**Keywords:** Forest degradation, remote sensing, Hansen method, Support Vector Machine, Random Forest

---

\* - Corresponding author's email: [mobineftekhari@yahoo.com](mailto:mobineftekhari@yahoo.com)  
<https://doi.org/10.22092/Imj.2025.366437.362>

## برآورد تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی جنوب دریای کاسپین با ترکیب داده‌های

### سنجش‌ازدور و روش‌های یادگیری ماشین

مهدی افراز، داوود عمرزاده، مبین افتخاری\* ، مصطفی یعقوب‌زاده و علی حاجی‌الیاسی

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، تهران، ایران. [afraz123879@yahoo.com](mailto:afraz123879@yahoo.com)

موسسه بین‌رشته‌ای اینترنت (IN3)، دانشگاه اوبرتا د کاتالونیا، بارسلون، کاتالونیا، اسپانیا. [domarzadeh@uoc.edu](mailto:domarzadeh@uoc.edu)

دانشجوی دکترای منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. [mobineftekhari@yahoo.com](mailto:mobineftekhari@yahoo.com)

دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. [m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir](mailto:m.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir)

دانشجوی دکترای، گرایش مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران. [alielyasi2015@gmail.com](mailto:alielyasi2015@gmail.com)

#### چکیده

جنگل‌های هیرکانی به دلیل قدمت چند میلیون ساله و تنوع زیستی غنی، در مناطق شمالی ایران و سواحل جنوبی دریای خزر از اهمیت زیست‌محیطی، اقتصادی و فرهنگی برخوردارند و نقش مهمی در حفظ منابع آب، خاک، تنوع گیاهی و جانوری، و تعدیل تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. بررسی تغییرات پوشش جنگلی این جنگل‌ها برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری است. در این پژوهش، برای تحلیل دقیق تغییرات جنگل‌های هیرکانی بین سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۶، از داده‌های متنوع سنجش‌ازدور شامل شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، داده‌های پوشش گیاهی مادیس با عنوان (VCF)، و تصاویر ماهواره‌های سنتینل یک، لندست‌های پنج و هشت استفاده شد. برای طبقه‌بندی، از روش‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۱۷ ساله حدود ۵۳۴ کیلومترمربع از مساحت جنگل‌های هیرکانی تخریب شده است. همچنین دقت کاربر برای SVM، ۹۳/۲۶ و برای RF، ۸۹/۲۹ درصد بود. ضریب کاپا نیز برای SVM، ۹۴/۶۲ و برای RF، ۷۴/۶۳ درصد به دست آمد که حاکی از دقت بالای نتایج به‌دست‌آمده است. مقایسه نتایج میزان تغییرات پوشش جنگل و دقت به‌دست‌آمده حاصل از طبقه‌بندی با الگوریتم‌ها نشان داد که نتایج با تقریب خوبی با داده‌های جهانی تغییر پوشش جنگل هانسن مطابق دارد. رویکرد بکار رفته در این تحقیق و نتایج آن می‌تواند در مدیریت و برنامه‌ریزی حفاظت از جنگل‌ها و مدیریت منابع طبیعی به کار گرفته شود و به بهره‌برداری پایدار از جنگل‌های هیرکانی کمک شایانی کند.

واژه‌های کلیدی: تخریب جنگل، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، روش هانسن، سنجش‌ازدور

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [mobineftekhari@yahoo.com](mailto:mobineftekhari@yahoo.com)

نوع مقاله: پژوهشی



تعهدات جهانی تدوین و اجرا شوند، می‌توانند اثربخشی بیشتری داشته باشند (Scullion et al., 2019).

ایران، کشوری با کمبود جنگل (دارای فقط ۶/۸ درصد مساحت جنگلی از مساحت کل) با چالش‌های جدی ناشی از جنگل‌زدایی مواجه است (Nasiri et al., 2023). در میان سایر جنگل‌های ایران، جنگل‌های هیرکانی، به‌عنوان بازمانده‌ای از جنگل‌های کهن و حاصل فعالیت‌های دوران سوم زمین‌شناسی (Naqinezhad & Zarezadeh, 2013) با درختان پهن‌برگ خزان‌کننده‌ای است که در جهان بی‌نظیر بوده و به شکل کمربندی باریک و طولانی در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز، نزدیک به سواحل جنوبی دریای خزر، گسترده شده‌اند. به‌صورت دقیق‌تر، این جنگل از تالش در جنوب شرقی جمهوری آذربایجان تا گلستان در شمال شرق ایران امتداد دارد و به‌طور عمده شامل بخش‌هایی از سه استان گیلان، مازندران و گلستان در ایران می‌شود. این اکوسیستم ارزشمند نه تنها از نظر زیست‌محیطی اهمیت دارد، بلکه از جنبه‌های اقتصادی و فرهنگی نیز برای ساکنین مناطق شمالی ایران حیاتی است. جنگل‌های هیرکانی منابع ارزشمندی برای تأمین چوب، گیاهان دارویی و خدمات طبیعت‌گردی فراهم می‌کنند (Stritih et al., 2021). با این حال، جنگل‌های هیرکانی در دهه‌های اخیر با چالش‌های متعددی از جمله تغییر کاربری اراضی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی و تغییرات اقلیمی مواجه شده‌اند که باعث کاهش مساحت و تخریب بخش‌های زیادی از این جنگل‌ها شده است (Gu et al., 2021).

طی چند دهه گذشته، تغییرات اساسی در قوانین، برنامه‌ریزی و استراتژی‌های حاکم بر سیاست‌ها و شیوه‌های مدیریت جنگل‌های هیرکانی به وجود آمده است که می‌توان به توقف برش در مقیاس بزرگ، برش‌های نقطه‌ای در تعدادی از مکان‌های انتخاب‌شده اشاره کرد (Jourgholami & Majnounian, 2011). در سال ۱۳۹۵، مجلس ایران برنامه مدیریتی جدیدی به نام طرح

جامعه تحقیقاتی بین‌المللی شواهدی ارائه کرده است که نشان می‌دهد میزان تخریب جنگل‌ها و جنگل‌زدایی در زیستگاه‌های مختلف طی دهه‌های اخیر افزایش یافته است (Hu et al., 2022). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تبدیل جنگل‌ها به کاربری‌های دیگر غیرقانونی و تجارت مرتبط با آن (Lynch et al., 2013) و شیوه‌های مدیریتی نامناسب نظیر قطع درختان برای فعالیت‌های معدنی و توسعه زیرساخت‌ها (Silva Junior et al., 2021) از مهم‌ترین عوامل جنگل‌زدایی هستند. در این بین افزایش فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، ساخت‌وساز و آتش‌سوزی‌های ناشی از مداخلات انسانی نقش مهمی در کاهش و تخریب جنگل‌های هیرکانی داشته است. این فعالیت‌ها با تغییر کاربری اراضی و تخریب منابع طبیعی، به‌ویژه در مناطق حساس و بکر، باعث کاهش پوشش گیاهی و از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی شده‌اند. به‌تبع این تخریب‌ها و همچنین افزایش آگاهی درباره عوارض تخریب جنگل‌ها مانند انتشار کربن، جنگل‌زدایی و تغییر کاربری و پوشش زمین<sup>۱</sup> به شکل‌گیری توافق‌نامه‌ها و چارچوب‌های بین‌المللی مانند REDD+ (کاهش انتشارات ناشی از جنگل‌زدایی و تخریب جنگل‌ها) منجر شده است که هدف آن تعیین اولویت‌های سیاسی روشن و تدوین استراتژی‌های پیشگیرانه برای مقابله با این بحران جهانی است. با این حال، تخریب مداوم جنگل‌ها و جنگل‌زدایی نشان می‌دهد که این ابتکارات بین‌المللی نتوانسته‌اند نتایج مطلوبی ارائه دهند (Sotirov et al., 2020). علاوه بر توافق‌نامه‌های بین‌المللی، سیاست‌ها و قوانین ملی و منطقه‌ای نیز نقش قابل‌توجهی در حفاظت از جنگل‌ها دارند. این سیاست‌ها در صورتی که با چارچوب‌های بین‌المللی جنگل‌ها هماهنگ بوده و مطابق با

تغییرات در سطح زمین است (Li et al., 2019). با توجه به اینکه جنگل‌ها می‌توانند مساحت وسیعی از یک منطقه را پوشش دهند، نظارت با استفاده از روش‌های سنتی از نظر اقتصادی و زمانی توجیه‌پذیر نیست. به همین دلیل، به کارگیری تکنیک‌ها و داده‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان روشی بسیار کاربردی و مؤثر در این زمینه مطرح می‌شود (Omarzadeh et al., 2024; Feizizadeh et al., 2023).

در زمینه بررسی تغییرات جنگل و کاربرد روش‌های مختلف در این زمینه تحقیقات زیادی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، (Ahmad et al., 2022) تحقیقی با هدف ارزیابی اثربخشی استراتژی مدیریت جنگل در کنترل تخریب جنگل‌های هندوکش پاکستان و استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور انجام دادند. نتایج نشان داد که نرخ تخریب جنگل در منطقه مورد مطالعه (۰٫۸ درصد در سال) به‌مراتب بالاتر از دیگر مناطق هیمالیا و کاراکورام بود. همچنین، کمترین تخریب جنگل با رژیم‌های مدیریتی شامل نظارت مؤثر و مشارکت جامعه مرتبط بود. در نهایت، پیشنهاد شد که بهبود رژیم‌های مدیریتی با تمرکز بر حقوق پایدار و نظارت قوی، به حفاظت از جنگل کمک می‌کند. در تحقیقی دیگر (Akike & Samanta 2016) پوشش جنگلی استان موروبه<sup>۴</sup> در پاپوا گینه‌نو<sup>۵</sup> را با استفاده از لندست ۸ در سه طبقه با دقت کلی ۸۸ درصد و ضریب کاپا ۰٫۸۳ تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پوشش جنگلی کم تراکم با تراکم کمتر از ۷۱ درصد، بیشترین سطح را داشت. به دنبال آن، جنگل نیمه انبوه (تراکم ۷۱ تا ۸۰ درصد) و جنگل انبوه تراکم بیشتر از ۸۰ درصد) قرار گرفتند.

هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از ماهواره لندست، تغییر پوشش جنگل، مراتع و اراضی زراعی را در حوضه سیاه مزگی استان گیلان بررسی کردند و نشان دادند که مساحت این جنگل‌ها در سال ۲۰۱۵ نسبت به سال

استراحت جنگل (FRP<sup>۳</sup>) را تصویب کرد که هرگونه بهره‌برداری و برداشت تجاری از جنگل‌های هیرکانی را ممنوع اعلام کرد (Nasiri et al., 2023). هدف این طرح، بهبود پوشش جنگلی، افزایش انعطاف‌پذیری و بهره‌وری جنگل‌ها بود. به دنبال اجرای FRP، هیچ‌یک از قراردادهای برداشت تمدید نشدند و این امر منجر به تغییرات قابل توجهی در رویه‌های مدیریتی شد.

وضع و اجرای قوانین حمایتی گامی مثبت در زمینه حفظ منابع طبیعی مانند جنگل‌ها است. برای ارزیابی موفقیت هر استراتژی یا سیاست مدیریت جنگل، وجود سامانه‌های نظارت بلندمدت بر ذخایر ضروری است (Hassan et al., 2023). ارزیابی منظم توسعه منابع جنگلی در یک منطقه خاص، امکان ردیابی تغییرات مرتبط با منابع جنگلی، سلامت جنگل و ظرفیت جنگل برای ارائه خدمات اکوسیستمی را فراهم می‌آورد. این اطلاعات به‌عنوان مبنایی برای بررسی فرآیندهای سیاست و مدیریت و ارزیابی اثربخشی و نتایج آن‌ها عمل می‌کند (Coops et al., 2023). متأسفانه، ایران فاقد برنامه فهرست‌بندی ملی جنگل‌ها است که بتواند چگونگی تغییر ویژگی‌های جنگل، از جمله پوشش جنگل، حجم، بهره‌وری و انعطاف‌پذیری را در پی سیاست مدیریت جدید مرتبط با طرح استراحت جنگل تعیین کند (Haidari & Karamdoost, 2016).

با توجه به پیشرفت سریع و افزایش دسترسی به داده‌های سنجش‌ازدور، روش‌های پردازش و تجزیه و تحلیل مکانی، ردیابی تغییرات جنگل و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر تغییرات، حتی در غیاب طرح‌های معمول ذخایر جنگل، امکان‌پذیر شده است (Hu et al., 2022)؛ بنابراین، بررسی و آشکارسازی تغییرات با استفاده از روش‌های دقیق امری ضروری در استفاده بهینه از منابع طبیعی و سرزمین است (Darvishsefat & Shirvani, 2019). فناوری سنجش‌ازدور با استفاده از تصاویر گرفته‌شده از بالا، مانند تصاویر ماهواره‌ای، بهترین ابزار برای بررسی و پایش

۲۰۰۰ به ۲۱۳۵۵ هکتار کاهش یافته بود، درحالی‌که بر وسعت زراعت دیم و مراتع نیمه متراکم افزوده شده بود. علی‌رغم گسترش استفاده از سنجنش‌ازدور در مطالعات و تحقیقات بین‌المللی، فناوری سنجنش‌ازدور در ایران در حوزه‌های جنگلداری و منابع طبیعی اگرچه در سال‌های اخیر فراگیر شده است اما دارای دقت مطلوب و مناسب نیست. گواه این ادعا آمارهای متفاوت از سوی نهادهای رسمی و غیررسمی از مساحت جنگل‌های هیرکانی است که هیچ‌گاه دقیق نبوده و اغلب تخمین زده شده به روش‌های میدانی است. حتی در گزارش‌های ارائه شده توسط سازمان غذا و کشاورزی FAO<sup>۶</sup> برای مطالعه اراضی جنگلی ایران بعد از سال ۲۰۱۷ از روش‌های مبنی بر داده‌های سنجنش‌ازدور و تخمینی استفاده شده است (FAO, 2022). این در حالی است که با استفاده از تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی متوسط می‌توان از صرف هزینه‌های هنگفت و زمان بسیار طولانی در جمع‌آوری نمونه‌های میدانی جلوگیری نمود (Manfreda et al., 2018). به‌عنوان مثال آماری که از مساحت این جنگل‌ها توسط میرآخوخلو و اخوان در سال ۱۳۹۶ ارائه شد، تقریباً نتایج نزدیکی به آمار کنونی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، بخش حفاظت و بهره‌برداری جنگل‌های هیرکانی دارد که حاکی از ۱۸۱۱ کیلومترمربع در سال ۱۳۸۳ و ۱۶۵۰ کیلومترمربع در سال ۱۳۹۵ است. درحالی‌که با توجه آمارهای منتشرشده مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، بخش حفاظت و بهره‌برداری جنگل‌های هیرکانی، این جنگل‌ها دارای مساحتی حدود ۱۸۵۰ کیلومترمربع در یک پهنه نواری شکل به طول ۸۵۰ کیلومتر، در دامنه‌های سواحل جنوبی دریای خزر گسترده شده است؛ بنابراین همچنان آمار دقیق و هماهنگی برای میزان مساحت جنگل‌های هیرکانی و میزان تخریب آن وجود ندارد.

با ظهور داده‌های سنجنش‌ازدور و در دسترس بودن آن‌ها برای همگان روش‌های مورد استفاده در این زمینه نیز توسعه قابل‌توجهی پیدا کرده‌اند. به‌عنوان مثال Beygi و Heidarlou و همکاران (۲۰۲۳) از روش LTM<sup>۷</sup> به‌عنوان یک مدل مبتنی بر شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی جنگل‌زدایی و بازیابی اراضی جنگلی در سرده‌ها استفاده کردند. آن‌ها از ۱۴ متغیر برای این منظور استفاده کرده و نتایج آن‌ها نشان داد که جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه بسیار بالاتر از بازیابی آن بوده است. روش آن‌ها با دقت بالای ۰/۸ ترکیب قدرت تکنیک‌های GIS<sup>۸</sup> و شبکه‌های عصبی در مطالعات جنگل را نمایان می‌کند. نتایج نهایی آن‌ها نشان داد که در ۳۰ سال آینده میزان تخریب جنگل ۲۲۲،۹۶ کیلومترمربع خواهد بود. در پژوهشی دیگر Karimzadeh Jafari و همکاران (۲۰۲۰) از داده‌های ماهواره لندست ۸ و سنجنده OLI آن برای تخمین زیست‌توده سطح زمین در جنگل‌های هیرکانی استفاده کردند. روش مورد استفاده آن‌ها RF و SVM با تعداد ۱۸۶ نمونه زمینی بود که در نهایت RF عملکرد بهتری نشان داد. در پژوهشی نزدیک به تحقیق حاضر، Sharif, M & Attarchi (۲۰۲۴) از داده‌های سنجنش‌ازدور ماهواره ALOS-PALSAR-1 و ALOS/PALSAR-2 اقدام به اندازه‌گیری تغییرات جنگل‌های هیرکانی از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ کردند. آن‌ها از روش RF برای اندازه‌گیری پهنه‌های جنگلی استفاده کردند. نتایج با نقشه‌های جنگلی و غیرجنگلی (F/NF<sup>۹</sup>) سازمان اکتشاف هوافضای ژاپن (JAXA<sup>۱۰</sup>) که از داده‌های PALSAR تهیه شده بودند، برای اعتبارسنجی مقایسه شدند. دقت کلی و ضرایب کاپا به ترتیب برای سال‌های ۲۰۰۷ برابر با ۹۲٪/۵۵ و ۰/۸۲، برای سال ۲۰۱۰ برابر با ۹۱/۱۴٪ و ۰/۷۹ و برای سال ۲۰۱۷ برابر با ۸۸/۱۹٪ و ۰/۷۴ به دست آمد.

همان‌طور که در مطالعات بررسی شده مشاهده شد، بیشتر این مطالعات از یک یا دو نوع داده‌های

محدوده مطالعاتی و حوزه جنگل‌های هیرکانی مورد مطالعه است جنگل‌های هیرکانی (خزری)، اکوسیستم‌های جنگلی منحصربه‌فردی هستند که در جنوب دریای کاسپین و بر دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز واقع شده‌اند. این جنگل‌ها از نوع جنگل‌های طبیعی مناطق معتدله با ظرفیت تولیدی بالا محسوب می‌شوند و میزان بارندگی سالانه در آن‌ها تا ۲۰۰۰ میلی‌متر گزارش شده است (Tohidifar et al., 2016). گستره جغرافیایی پوشش گیاهی هیرکانی از آستارا در شمال غرب تا گلیداغی در شمال شرق ایران امتداد می‌یابد. از نظر توپوگرافی، منطقه هیرکانی طیف وسیعی از ارتفاعات را در برمی‌گیرد، از نواحی پایین‌تر از سطح دریا در سواحل کاسپین تا ارتفاع ۲۷۰۰ متر از سطح دریا. این تنوع ارتفاعی منجر به شکل‌گیری جوامع گیاهی متنوعی شده است که از گونه‌های حساس به سرما تا گونه‌های مقاوم به سرما را شامل می‌شود. برخلاف اکثر مناطق نیمه‌خشک ایران، منطقه هیرکانی (خزری) در شمال کشور، مشخصاً دارای جنگل‌های خزان‌کننده با تاج پوشش متراکم است.

حضور برخی گونه‌های منحصربه‌فرد در جنگل‌های هیرکانی، نشان‌دهنده بقایای اکوسیستم‌های دوره کواترنری است (Nakhutsrishvili et al., 2015). مناطق پایین‌دست این جنگل‌ها که در مجاورت دریای کاسپین قرار دارند، نسبت به سرما حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. این نواحی شامل برخی از بازمانده‌های جوامع جنگلی توسکا هستند که گونه غالب آن‌ها توسکای قشلاقی<sup>۱۱</sup> است. این‌گونه از عناصر آب‌دوست فلور منطقه اوکسینو-هیرکانی<sup>۱۲</sup> محسوب می‌شود که عمدتاً در مناطق باتلاقی پایین‌دست یافت می‌شود و تا ارتفاع ۱۰۰ متری نفوذ می‌کند.

ماهوره‌ای برای طبقه‌بندی پوشش زمین استفاده می‌کنند. یا به دلیل محدودیت‌های نرم‌افزاری در پردازش تصاویر با حجم بالا با مشکلات محاسباتی مواجه می‌شوند. از این رو پژوهش حاضر باهدف پر کردن خلأهای مطالعات پیشین، به ارزیابی تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی با استفاده از ترکیبی از داده‌های سنجنش‌ازدور و روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین در بستر ابری برای رفع وابستگی به سخت‌افزار با قدرت بالا می‌پردازد. نوآوری این تحقیق در استفاده از ترکیب شاخص NDVI ماهانه و سالانه، داده‌های پوشش گیاهی VCF حاصل از محصولات مادیس و تصاویر راداری سنتینل ۱، لندست ۵ و ۸ است. همچنین، مقایسه عملکرد روش‌های RF و SVM در طبقه‌بندی و ارزیابی نتایج با محصول طبقه‌بندی هانسن (Hansen et al., 2013) از دیگر جنبه‌های نوآورانه این پژوهش است که دقت بالای نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. بخش‌های مختلف این مقاله به‌صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم با عنوان مواد و روش‌ها ابتدا منطقه مورد مطالعه معرفی شده است، سپس نحوه جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مورد استفاده شرح داده شده است و در نهایت به روش‌های اعمال شده پرداخته شده است. در بخش بعدی با عنوان نتایج و بحث به خروجی مدل طراحی شده پرداخته شده است که شامل نقشه‌های جنگل هیرکانی در سال‌های مورد مطالعه و هر یک از تکنیک‌های استفاده شده است. در نهایت در بخش نتیجه‌گیری به جمع‌بندی روش‌ها و نتایج حاصل و رهیافت‌ها برای تحقیقات آینده پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده‌های مورد مطالعه در این تحقیق استان‌های گلستان، مازندران و گیلان می‌باشند. شکل ۱ بیانگر



شکل ۱ - محدوده جغرافیایی مورد مطالعه و کمربند سبز جنگل‌های هیرکانی جنوب دریا کاسپین

Figure 1 - Geographic study area and the green belt of Hyrcanian forests in the southern Caspian Sea

پژوهش به منظور اطمینان بیشتر از نتایج شاخص پوشش گیاهی آن را در مقیاس‌های ماهانه و فصلی محاسبه کرده و در نهایت با ترکیب آن‌ها یک نقشه نهایی برای هر یک از سال‌های مورد مطالعه به دست آمد (شکل ۲).

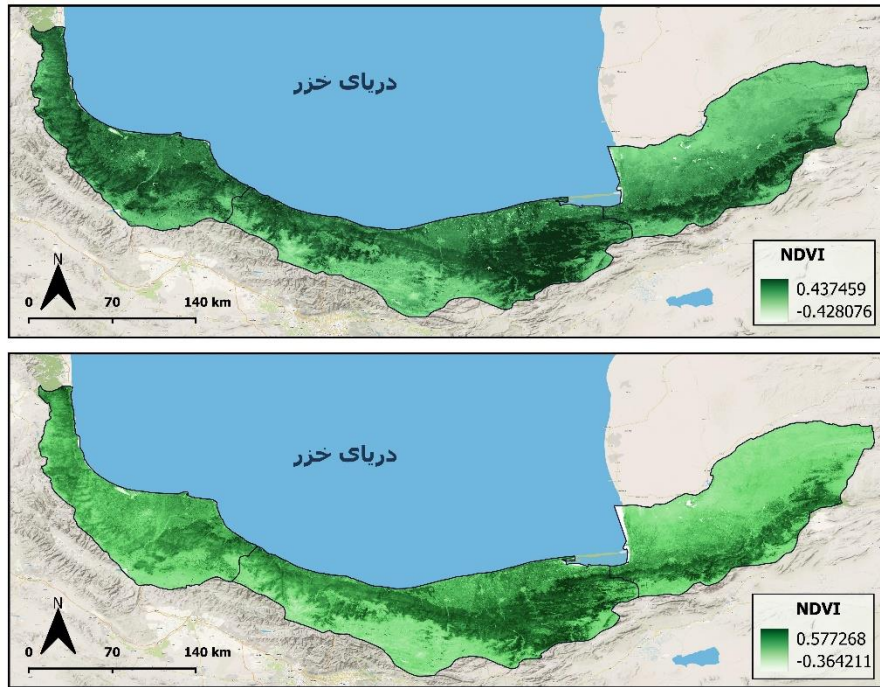
یکی دیگر از داده‌های سنجنش ازدور که در به دست آوردن نمونه‌های آموزشی در فرآیند طبقه‌بندی استفاده شد VCF بود. این محصول از داده‌های MODIS به دست آمده است که نمایی از برآورد پوشش گیاهی سطح زمین در مقیاس جهانی ارائه می‌دهد. این محصول به گونه‌ای طراحی شده است که نمایش پیوسته‌ای از سطح زمین را به عنوان نسبت‌هایی از ویژگی‌های اصلی پوشش گیاهی نشان دهد و به صورت درصدی از سه مؤلفه سطحی ارائه می‌شود که شامل سه کلاس پوشش درختی، پوشش غیر درختی و زمین برهنه (بدون پوشش گیاهی) است. در شکل شماره ۴ این داده برای سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۶ نمایش داده شده است. این داده در نمونه‌برداری پهنه‌های جنگلی برای تهیه داده‌های آموزش الگوریتم‌های طبقه‌بندی و همچنین برای ارزیابی نتایج حاصل از این فرآیند مورد استفاده قرار گرفت.

### داده‌ها و روش‌شناسی

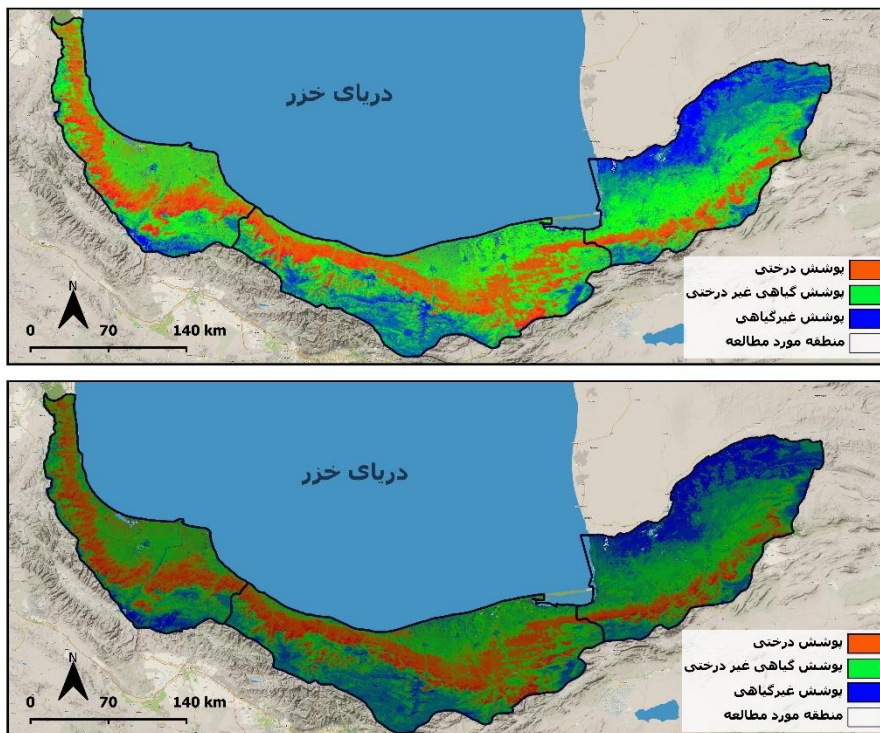
این پژوهش طی یک بازه زمانی ده‌ساله، از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای لندست ۵، لندست ۸ به علاوه تصاویر راداری سنتینل ۱ به همراه VCF به منظور تشخیص پهنه‌های دارار پوشش درختی استخراج گردیدند. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و باندهای محدوده قرمز و مادون قرمز نزدیک شاخص پوشش گیاهی NDVI با استفاده از فرمول شماره یک به دست آمد. این داده‌ها در بازه زمانی یادشده با استفاده از GEE پردازش شدند.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

در این فرمول  $NIR^{13}$  بازتاب نور در طیف مادون قرمز نزدیک است که توسط پوشش گیاهی سالم به خوبی جذب نمی‌شود. درحالی‌که R بازتاب نور در طیف قرمز است که توسط گیاهان سالم بیشتر جذب می‌شود. مقادیر NDVI در بازه‌ای بین -۱ تا ۱ قرار می‌گیرند. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم و متراکم است، درحالی‌که مقادیر نزدیک به ۰ یا منفی، نواحی بدون پوشش گیاهی یا با پوشش گیاهی کم را نشان می‌دهند. در این



شکل ۲ - شاخص پوشش گیاهی نرمال شده حاصل از تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های ۱۳۷۹ (بالا) و ۱۳۹۶ (پایین)  
 Figure 2 - NDVI derived from satellite imagery for the years 2000 (top) and 2017 (bottom)



شکل ۳ - درصد پوشش درختی سال ۱۳۷۹ (بالا) و درصد پوشش درختی سال ۱۳۹۶ (پایین)  
 Figure 3 - Tree cover percentage in 2000 (top) and tree cover percentage in 2017 (bottom)



می‌کند (Omarzadeh et al., 2021; Feizizadeh et al., 2022). بنابراین در این مطالعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از کدنویسی جاوا در محیط این پلتفرم بکار گرفته شدند. SVM و RF دو الگوریتم پرکاربرد در طبقه‌بندی تصاویر سنجنش‌ازدور هستند که به دلیل کارایی بالا در پردازش داده‌های پیچیده مورد توجه قرار گرفته‌اند (Sheykhoumousa et al., 2020; Liu et al., 2017). این الگوریتم‌ها که پیشرفت‌های چشمگیری را در فناوری داده‌کاوی ارائه داده‌اند، در سنجنش‌ازدور به دلیل قابلیت آن‌ها در مدیریت داده‌های چندبعدی (مانند تصاویر ماهواره‌ای با باندهای طیفی متعدد) بسیار مؤثر هستند و برای طبقه‌بندی‌های باینری و چندکلاسه کاربرد دارند (Mehmood et al., 2022; Tariq et al., 2023). به همین منظور با توجه به کارایی و دقت این الگوریتم‌ها در تفکیک پوشش‌های گیاهی از سایر پوشش‌ها (Mohammadpour et al., 2022)، آن‌ها برای طبقه‌بندی و شبیه‌سازی پوشش جنگل انتخاب شدند. فرآیندها نیز در این محیط با سعی و خطا مطابق سایر مطالعات (Zhao et al., 2024) به نحوی تنظیم شدند تا بهترین نتیجه حاصل شود. از این رو برای جنگل تصادفی تعداد ۱۵۰ درخت در نظر گرفته شد و برای ماشین بردار نیز کرنل خطی در نظر گرفته شد. ۷۰ درصد نمونه‌های برداشت زمینی از کاربری‌های مختلف برای آموزش و ۳۰ درصد نیز برای تست و صحت‌سنجی نتایج به صورت تصادفی به الگوریتم‌ها داده شدند تا تخمین میزان مساحت جنگل‌های هیرکانی و وضعیت تغییرپذیری آن از این طریق مشخص شود.

#### صحت‌سنجی

در این مطالعه از ضریب کاپا و ضریب دقت کاربر و تولیدکننده برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از طبقه‌بندی پهنه‌های جنگلی استفاده شد. ضریب کاپا، دقت را با در نظر

یکی دیگر از داده‌های مورد استفاده در این تحقیق قطبش  $VV^{۱۲}$  از تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ بود که در جمع‌آوری نمونه‌های آموزشی برای شناسایی مناطق شهری و ساخته‌شده بسیار مفید بود. ساختمان‌ها، جاده‌ها و سایر ساختارهای مصنوعی معمولاً سطوح صاف و صیقلی دارند که امواج راداری قطبش یافته‌ی عمودی (VV) را به شدت بازتاب می‌دهند. این امر باعث افزایش سیگنال بازگشتی در تصاویر می‌شود و به تمایز این مناطق از پوشش‌های طبیعی کمک می‌کند (Huang & Zhang, 2022). علاوه بر پایداری داده‌های راداری در شرایط جوی نامناسب مانند هوای ابری و یا مه‌آلود که در منطقه مورد مطالعه نیز شایع است، قطبش VV کمتر از سایر قطبش‌ها (مانند  $HV^{۱۵}$ ) تحت تأثیر پوشش گیاهی قرار می‌گیرد. در نتیجه، در تشخیص مناطق شهری و ساخته‌شده در مناطق با پوشش گیاهی بالا نیز می‌تواند تصاویر واضح‌تر و قابل تفکیک‌تری تولید کند.

#### طبقه‌بندی تصاویر

از آنجایی که طبقه‌بندی تصاویر یکی از عملیات‌های مهم در پردازش و پس پردازش تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شود آن را هسته اصلی در حل مسئله طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی می‌دانند (Ebrahimi et al., 2021). لذا هسته اصلی این تحقیق نیز در بخش طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از ترکیب نوآورانه داده‌های ماهواره‌ای است. لازم به ذکر است که تمامی مراحل طبقه‌بندی تصاویر از جمع‌آوری داده‌های آموزش، فراخوانی و پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای چند زمانه تا طبقه‌بندی و استخراج و ارزیابی تغییرات در محیط منبع باز GEE صورت گرفت. GEE دسترسی آنلاین و آسان به مخزن بزرگی از تصاویر ماهواره‌ای را فراهم می‌کند، از جمله داده‌های ماهواره‌های لندست که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) تولید شده‌اند. این پلتفرم نیاز به دانلود دستی تصاویر ماهواره‌ای را حذف کرده و فرآیند تحقیق را ساده‌تر

در رابطه ۲،  $P_0$  درستی مشاهده شده و  $P_C$  توافق مورد انتظار است. در رابطه ۳، پارامتر  $UA$  نشان‌دهنده صحت کاربر است و  $t_a$  بیانگر تعداد پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده به عنوان کلاس  $a$  است و  $n_1$  بیانگر تعداد پیکسل‌های کلاس  $a$  در نتیجه طبقه‌بندی است. همچنین در رابطه ۴ نیز  $PA$  نشان‌دهنده صحت تولید کننده است و  $ga$  بیانگر تعداد پیکسل‌های کلاس  $a$  روی زمین است.

#### فرآیند روش انجام کار

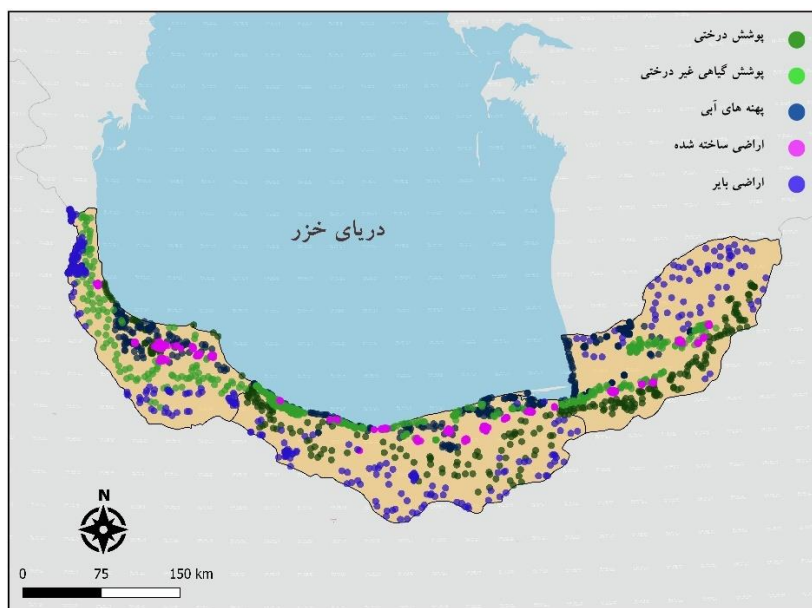
در این تحقیق برای طبقه‌بندی ابتدا تصاویر سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۶ ماهواره لندست فراخوانی شد. سپس این تصاویر به منظور کاهش سطح ابرناکی طی عملیات فیلترسازی پوشش ابری به صورت میانگین تهیه و موزاییک شدند. برای هر یک از تصاویر مربوط به سال‌های مذکور نمونه‌های آموزشی به صورت اختصاصی هر سال جمع‌آوری شد. نمونه‌های آموزشی برای پنج طبقه جنگل، پوشش گیاهی (شامل باغات، مزارع و مراتع)، پهنه‌های آبی، اراضی ساخته شده و زمین‌های بایر جمع‌آوری شد (شکل ۴).

گرفتن پیکسل‌هایی که به درستی یا نادرستی طبقه‌بندی شده‌اند، ارزیابی می‌کند (Aziz et al, 2024) که مطابق رابطه ۲ این ضریب محاسبه می‌شود. همچنین صحت کاربر به عنوان احتمال طبقه‌بندی صحیح یک پیکسل تعریف می‌شود که مطابق رابطه ۳ این ضریب محاسبه می‌شود. صحت تولیدکننده (رابطه ۴) نیز احتمال این است که یک نمونه برداشت شده روی تصویر با یک کلاس خاص مطابقت داشته باشد (محرمی و همکاران، ۱۴۰۳). مطابق با مطالعه Congalton (۱۹۹۱) دستیابی به دقتی بیش از ۷۰٪ در این روش‌ها، برای مطالعات مرتبط با طبقه‌بندی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور بیانگر قابل قبول بودن نتایج در نظر گرفته می‌شود (Congalton, 1991). در این مطالعه ۳۰٪ از نمونه‌هایی که برای مرحله آزمون به صورت تصادفی جداسازی شده بودند، برای ارزیابی صحت و دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده با توجه به شاخص‌های ارزیابی مذکور استفاده شدند.

$$k = \frac{P_0 - P_C}{1 - P_C} \quad (2)$$

$$UA = \frac{t_a}{n_1} \times 100 \quad (3)$$

$$PA = \frac{ta}{ga} \times 100 \quad (4)$$



شکل ۴- نمونه‌های برداشت شده برای آموزش الگوریتم‌های طبقه‌بندی و ارزیابی نتایج نهایی

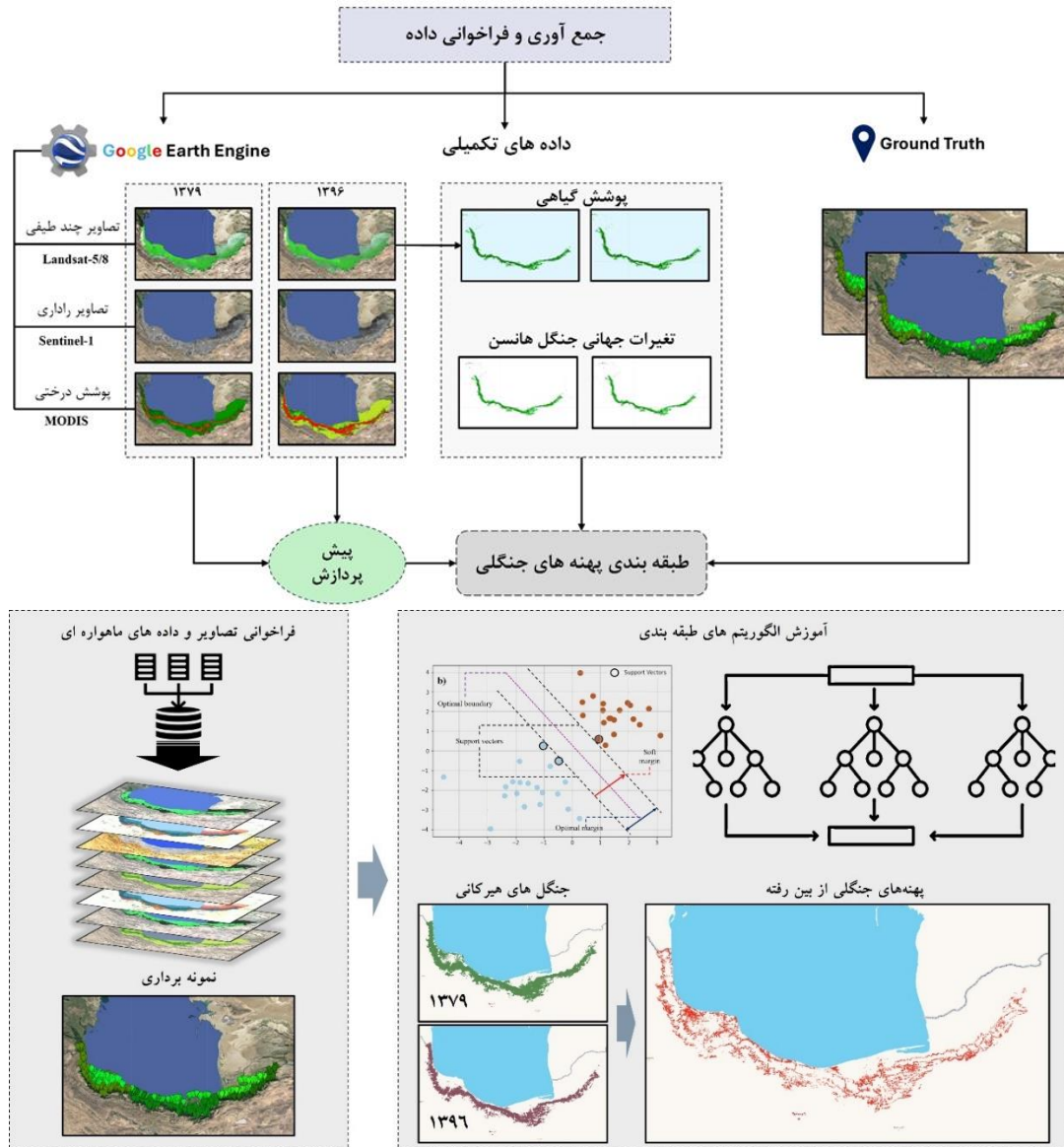
Figure 4 - Collected samples for training classification algorithms and evaluating final results

## نتایج و بحث

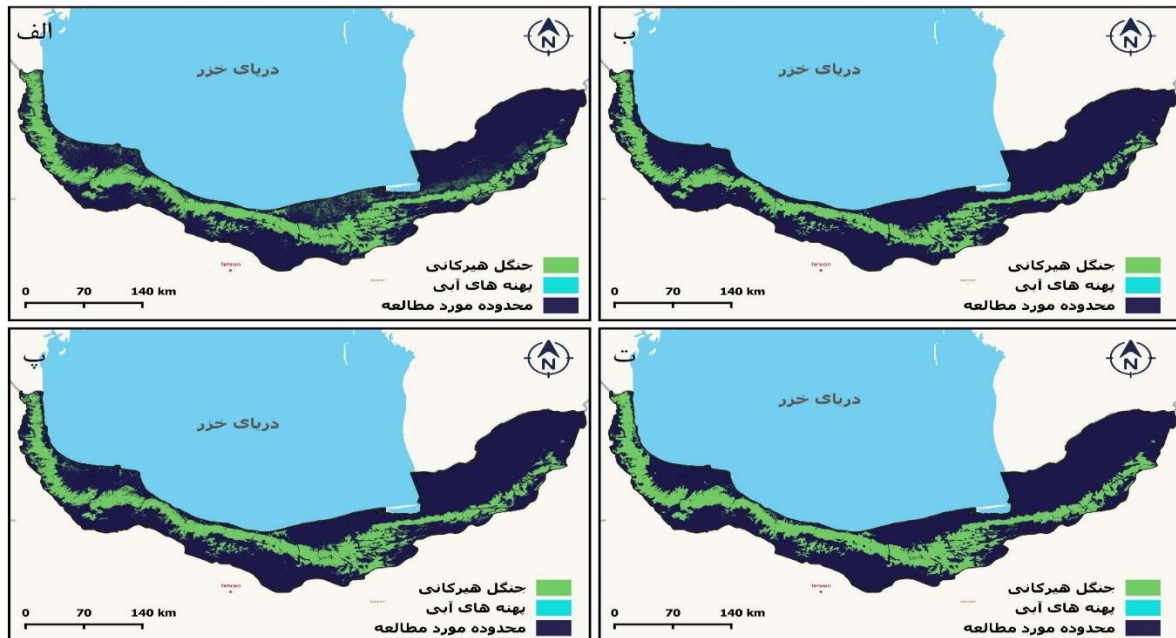
در این تحقیق نتایج نهایی با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی کننده یادگیری ماشین به دست آمده است و صحت نقشه‌های تولید شده نیز با استفاده از ضریب کاپا و داده‌های کنترل زمینی (شکل ۶) مورد ارزیابی قرار گرفته است. پهنه‌بندی و طبقه‌بندی جنگل‌های هیرکانی با استفاده از الگوریتم‌های SVM و RF برای سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۶ انجام شد تا ضمن مشخص شدن میزان مساحت تغییر یافته در طی ۱۷ سال، بتوان دقت نقشه‌های تولید شده را نیز ارزیابی کرد. در شکل ۷ که از چهار قسمت تشکیل شده است در هر بخش پهنه جنگلی استخراج شده با استفاده از الگوریتم‌های SVM و RF در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۶ به نمایش در آمده است.

نتایج حاصل از ارزیابی دقت مدل‌ها نیز بیانگر این بود که میزان ضریب کاپا برای الگوریتم SVM معادل ۹۴/۶۲ و برای الگوریتم RF معادل ۷۴/۹۳ درصد شد که در نتیجه الگوریتم SVM برای طبقه‌بندی در این پژوهش به عنوان روش بهینه انتخاب و معرفی شد. بر اساس داده‌های زمینی برداشت شده به کمک تصاویر سنتینل ۱ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و نیز داده‌های برداشت شده در مناطق مختلف تعداد ۹۶۴ نقطه کنترل زمینی مورداستفاده قرار گرفت. با توجه به داده‌های زمینی و نقشه طبقه‌بندی شده دقت کاربر و دقت تولیدکننده نیز برای هرکدام از الگوریتم‌ها محاسبه شد. جدول ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر میزان دقت کاربر و تولیدکننده در دو روش SVM و RF با تشکیل ماتریس خطا می‌باشند.

همانطور که در بخش داده‌ها بیان شد، برای نمونه‌برداری دقیق‌تر علاوه بر استفاده از تصویر مربوط به هر سال، از داده‌های مکمل از جمله VCF برای تشخیص دقیق محل درختان، NDVI برای تشخیص پوشش گیاهی از سایر کاربری‌ها و قطبش VV تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ به منظور شناسایی اراضی ساخته شده مانند محدوده‌های شهری استفاده شد. با استفاده از انعکاسات طیفی تصاویر لندست در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک و تعریف نمونه‌های آموزشی به الگوریتم‌های موردنظر عملیات طبقه‌بندی صورت گرفت. بدین ترتیب مراحل اصلی طبقه‌بندی و استخراج جنگل‌ها در محیط GEE انجام شد. سپس از پردازش تصاویر لندست، داده‌های شاخص پوشش گیاهی استخراج شده و به عنوان داده تکمیلی در فرآیند طبقه‌بندی استفاده شد. از داده تغییرات جهانی جنگل که توسط Hansen و همکاران (۲۰۱۳) توسعه یافته و داده‌هایش در پایگاه داده GEE قابل دریافت است نیز برای ارزیابی دقت خروجی نهایی و مقایسه میزان تغییرات مساحت جنگل‌های هیرکانی حاصل از طبقه‌بندی الگوریتم‌های RF و SVM با داده‌های این محصول جهانی استفاده شد. با استفاده از عملیات‌های پس پردازش، طبقه جنگل از سایر کاربری‌ها جدا شده و پهنه‌های جنگلی مربوط به هر سال به صورت مجزا مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۵). در نهایت به منظور ارزیابی دقت نقشه‌های طبقه‌بندی شده نیز معیارهای ارزیابی عملکرد مدل طبقه‌بندی کننده مانند ضریب کاپا و دقت تولیدکننده و کاربر برای هر کاربری و برای نقشه تغییرات مساحت جنگل محاسبه شد.



شکل ۵- فرآیند فراخوانی داده های ماهواره ای، نمونه برداری و طبقه بندی پهنه های جنگلی  
 Figure 5 - Process of satellite data retrieval, sampling, and classification of forest areas



شکل ۶ - جنگل‌های هیرکانی شمال ایران در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۶ با استفاده از الگوریتم‌های SVM و RF: الف) پهنه جنگلی استخراج شده سال ۱۳۹۶ با استفاده از الگوریتم RF، ب) پهنه جنگلی استخراج شده سال ۱۳۹۶ با استفاده از الگوریتم SVM، ج) پهنه جنگلی استخراج شده سال ۱۳۷۹ با استفاده از الگوریتم RF، د) پهنه جنگلی استخراج شده سال ۱۳۷۹ با استفاده از الگوریتم SVM

**Figure 6 - Iran's Hyrceanian Forests in 2000 and 2017 using SVM and RF algorithms: A) Forest area extracted for 2017 using RF algorithm, B) Forest area extracted for 2017 using SVM algorithm, C) Forest area extracted for 2000 using RF algorithm, D) Forest area extracted for 2000 using SVM algorithm**

جدول ۱- ماتریس خطای دقت کاربر و تولیدکننده برای هر کلاس با استفاده از نتایج SVM

Table 1 - Error matrix User and Producer Accuracy for Each Class Using SVM Results

نام کلاس	جنگل	کشاورزی	اراضی ساخته شده	زمین خالی	آب	مجموع	دقت کاربر <sup>۱۶</sup>
جنگل	526	0	0	0	38	564	93/26
کشاورزی	0	71	2	0	0	73	97/26
اراضی ساخته شده	0	1	198	0	1	200	99
زمین خالی	0	0	1	95	2	98	96/94
آب	0	0	0	0	29	29	100
مجموع	526	72	201	95	70	964	
دقت تولیدکننده <sup>۱۷</sup>	100	98/61	98/51	100	41/42		

جدول ۲- ماتریس خطای دقت کاربر و تولیدکننده برای هر کلاس با استفاده از نتایج RF

Table 2 - Error matrix of User and Producer Accuracy for Each Class Using RF Results

نام کلاس	جنگل	کشاورزی	اراضی ساخته شده	زمین خالی	آب	مجموع	دقت کاربر
جنگل	450	0	0	0	54	504	89/29
کشاورزی	52	60	1	4	1	118	85/50
اراضی ساخته شده	15	1	194	2	0	212	91/51
زمین خالی	5	6	2	88	0	101	78/13
آب	0	5	4	1	15	25	60
مجموع	522	72	201	95	70	960	
دقت تولیدکننده	86/20	83/33	96/52	92/26	21/42		

16 -User Accuracy

17 -Producer Accuracy

طی ۱۲ سال) است. این تفاوت ممکن است ناشی از اختلاف در روش‌های ارزیابی باشد؛ درحالی‌که سازمان جنگل‌ها عمدتاً از داده‌های میدانی و تخمینی استفاده می‌کند، این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک مکانی بالا (ستینل-۱ و لندست) و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین بهره برده است. با این حال، همخوانی نسبی نتایج این تحقیق با داده‌های جهانی تغییرات جنگل (روش هانسن) نشان‌دهنده دقت بالای روش پیشنهادی است. پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به تخمین‌های دقیق‌تر، تلفیقی از روش‌های سنجش‌ازدور و داده‌های میدانی در پایش تغییرات جنگل‌های هیرکانی به کار گرفته شود. مقایسه نتایج این مطالعه با روش هانسن برای برآورد تخریب جنگل‌های هیرکانی در دوره ۱۷ ساله نشان داد که روش منتخب (SVM) با اختلاف مثبت ۱۴۸ کیلومترمربع در مجموع، میزان تخریب را بیشتر از روش هانسن پیش‌بینی کرده است. به طوری‌که مقایسه نتایج نشان می‌دهد این میزان اختلاف در سال ۱۳۷۹ معادل ۸۹ کیلومترمربع و در سال ۱۳۹۶ معادل ۵۹ کیلومترمربع بود. این تفاوت می‌تواند به دلیل استفاده از داده‌های راداری ماهواره ستینل ۲ باشد که نسبت به روش هانسن که از داده‌های لندست بهره برده است، تفکیک‌پذیری دقیق‌تری را با توجه به افزایش کیفیت تصاویر دارد و در نتیجه دقت بالاتری از آن حاصل شده است. این یافته با نتایج Forkuor و همکاران (۲۰۱۷) نیز که نشان دادند ستینل ۲ در مقایسه با لندست، چهار تا پنج درصد افزایش دقت در طبقه‌بندی کاربری اراضی دارد، همخوانی دارد.

#### نتیجه‌گیری و رهیافت‌ها

در این پژوهش، تغییرات سطح جنگل‌های هیرکانی شمال ایران با استفاده از روش‌های رایج و نوآورانه سنجش‌ازدور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) نشان داد که SVM با ضریب کاپای ۹۷/۴۶ درصد و دقت کاربر ۹۷/۲۹ درصد عملکرد

بر اساس مطالعات انجام‌شده در بخش جنگل توسط میرآخورلو در سال ۱۳۸۰، مساحت جنگل‌های هیرکانی ۱۷۰۰۰ کیلومترمربع گزارش شده است. جالب توجه است که در مطالعه بعدی همان محقق در سال ۱۳۸۳ هجری شمسی (۲۰۰۴)، مساحت این جنگل‌ها با افزایش قابل‌توجه به ۱۸۱۱۷,۸۸ کیلومترمربع رسیده است. این افزایش مساحت که حدود ۱۰۹۳,۷۸ کیلومترمربع را شامل می‌شود، از نظر علمی قابل‌تأمل است، زیرا هیچ‌گونه مستندات یا شواهدی مبنی بر اجرای طرح‌های جنگل‌کاری یا فرآیندهای طبیعی جنگل‌زایی که بتواند این افزایش را توجیه کند، ارائه نشده است. نتایج به‌دست آمده توسط ایشان در سال ۱۳۹۵ حاکی از آن است که مساحت جنگل‌های هیرکانی برابر با ۱۶۵۰۴,۹۸ کیلومترمربع است (Mirakhorlu & Akhwan, 2017). در این تحقیق نتایج حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران، با استفاده از الگوریتم SVM به‌عنوان روش منتخب بدین‌صورت است که ۱۶۹۵۳ و ۱۶۴۱۹ کیلومترمربع برای کاربری جنگل و پوشش گیاهی به ترتیب برای سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۶ برآورد شده است. این مقادیر بیانگر تخریب مساحتی برابر با ۵۳۴ کیلومترمربع در طی ۱۷ سال مطالعه است که به ترتیب گیلان با تخریب ۲۲۱، گلستان با تخریب ۱۸۶ و مازندران با ۱۲۵ کیلومترمربع را به خود اختصاص داده‌اند. بعد از به دست آوردن نتایج با استفاده از الگوریتم‌های ذکرشده و محاسبه میزان تخریب، مقایسه آن‌ها با نتایج روش Hansen و همکاران (۲۰۱۳) برای تغییرات جنگل‌های هیرکانی در نواحی شمال ایران در سه استان گیلان، مازندران و گلستان، مطابق آنچه در شکل ۸ نیز نمایش داده شده است، نشان‌دهنده نزدیکی نتایج به یکدیگر بوده و می‌توان از نتایج داده‌های این پژوهش برای بررسی تغییرات جنگل‌ها در بازه‌های زمانی بلندمدت استفاده نمود. مقایسه با آمارهای سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری ایران نشان می‌دهد که میزان تخریب جنگل‌های هیرکانی در این پژوهش (۵۳۴ کیلومترمربع طی ۱۷ سال) کمتر از مقدار گزارش‌شده توسط این سازمان (حدود ۱۶۱۳ کیلومترمربع

مؤثر این اکوسیستم حیاتی را فراهم آورد. یکی از چشمگیرترین محدودیت‌های این پژوهش عدم دسترسی بودن منبع معتبر برای بررسی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با آمارها و ارقام رسمی بود. علی‌رغم شفاف نبودن اطلاعات آماری از سوی نهادهای رسمی مانند جهاد کشاورزی، سازمان مراتع و جنگل‌ها و مشابه آن درگاه‌های رسمی مانند FAO برای به دست آوردن اطلاعات از این قبیل برای تکمیل کردن گزارش‌های خود از این زیستگاه از روش‌های تخمینی استفاده می‌کند (FAO, 2020). با توجه به اهمیت حفظ تنوع زیستی و خدمات اکوسیستمی جنگل‌های هیرکانی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، داده‌های راداری با قطبش عمودی که در این تحقیق برای شناسایی مناطق ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت، سری زمانی بلندمدت تر و روش‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای بهبود دقت ارزیابی تغییرات جنگل و پیش‌بینی روندهای آینده استفاده شود. این رویکرد جامع و نوآورانه می‌تواند با ارائه اطلاعات و داده‌های موثق در رابطه با روند جنگل‌زدایی و نرخ سالانه از بین رفتن جنگل‌ها به تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان برای حفاظت بهتر و مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ارزشمندترین اکوسیستم‌های کشور و میراث طبیعی جهانی کمک شایانی نماید و راه را برای توسعه پایدار منطقه هموار سازد.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

قابل‌توجهی نسبت به RF داشت. این امر نشان‌دهنده توانایی بالای SVM در تفکیک دقیق کلاس‌های مختلف پوشش زمین، به‌ویژه در مناطق جنگلی پیچیده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مساحت جنگل‌های هیرکانی در سال ۱۳۷۹ با استفاده از الگوریتم SVM حدود ۱۶۹۵۳ کیلومترمربع برآورد شد که این مقدار در سال ۱۳۹۶ به حدود ۱۶۴۱۹ کیلومتر کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده روند نگران‌کننده تخریب جنگل‌های با ارزش هیرکانی در این منطقه است. میزان تخریب جنگل‌های هیرکانی در طول ۱۷ سال با استفاده از الگوریتم SVM حدود ۵۳۴،۴۶ کیلومترمربع تخمین زده شد که رقم قابل توجهی است و نیاز به توجه فوری برای حفاظت از این اکوسیستم ارزشمند را نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات پیشین مانند (Chowdhury, 2023; Aziz et al., 2024) که از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم‌های RF و SVM برای طبقه‌بندی اراضی با پوشش جنگل صورت گرفته بود مطابقت و همخوانی دارد از این رو می‌توان به کارآمدی این روش در طبقه‌بندی جنگل‌های هیرکانی نیز پی برد. همچنین مقایسه نتایج این تحقیق با روش هانسن که یک مرجع جهانی برای ارزیابی تغییرات جنگل است، نشان داد که می‌توان از روش به کار برده شده در این تحقیق برای بررسی تغییرات جنگل‌ها با تقریب خوبی در این منطقه استفاده کرد که این امر اعتبار نتایج این پژوهش را نیز تقویت می‌کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند نقش کلیدی در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی ایفا کند. استفاده از روش‌های پیشرفته سنجنش‌ازدور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، همان‌طور که در این پژوهش نشان داده شد، می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر و به‌روزتر تغییرات پوشش جنگلی کمک کند و امکان پایش مستمر و

### References

1. Ahmad, A., Ahmad, S., Nabi, G., Liu, Q.J., Islam, N. and Luan, X., 2022. Trends in deforestation as a response to management regimes and policy intervention in the Hindu Kush Himalaya of Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 10, p.810806. DOI: 10.3389/fenvs.2022.810806
2. Akike, S. and Samanta, S., 2016. Land use/land cover and forest canopy density monitoring of Wafi-Golpu project area, Papua New Guinea. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, pp.1-14. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2016.48001>

3. Aziz, G., Minallah, N., Saeed, A., Frnda, J. and Khan, W., 2024. Remote sensing-based forest cover classification using machine learning. *Scientific Reports*, 14(1), p.69.  
**DOI: 10.1038/s41598-023-50863-1**
4. Beygi Heidarlou, H., Banj Shafiei, A., Nasiri, V., Niță, M.D., Borz, S.A. and Lopez-Carr, D., 2023. Impact of Iran's forest nationalization law on forest cover changes over six decades: A case study of a zagros sparse coppice oak forest. *Sensors*, 23(2), p.871.  
**DOI: 10.3390/s23020871**
5. Silva Junior, C.H.L., Pessôa, A.C.M., Carvalho, N.S., Reis, J.B.C., Anderson, L.O. and Aragão, L.E.O.C., 2021. The Amazon's deforestation rate in 2020 is projected to be the greatest of the decade. *Nature Ecology & Evolution*, 5, pp.144-145. **DOI:10.1038/s41559-020-01368-x**
6. Chowdhury, M.S., 2023. Comparison of accuracy and reliability of random forest, support vector machine, artificial neural network and maximum likelihood method in land use/cover classification of urban setting. *Environmental Challenges*, p.100800.  
**DOI:10.1016/j.envc.2023.100800**
7. Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), pp.35-46. DOI:10.1016/0034-4257(91)90048-B
8. Coops, N.C., Tompalski, P., Goodbody, T.R., Achim, A. and Mulverhill, C., 2023. Framework for near real-time forest inventory using multi source remote sensing data. *Forestry*, 96(1), pp.1-19. **DOI:10.1093/forestry/cpac015**
9. Darvishsefat, A. and Shirvani, A., 2019. Monitoring and modeling changes of forest area using logistic regression-markov and geomod. *Geographic Space*, 19(65), pp.171-189. (In Persian).
10. Ebrahimi, H., Naboureh, A., Feizizadeh, B., Aryal, J. and Ghorbanzadeh, O., 2021. Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data with the G-SMOTE technique for boosting land cover classification accuracy. *Applied Sciences*, 11(21), p.10309. **DOI:10.3390/app112110309**
11. FAO, 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020. Report Iran*. Rome: FAO
12. Feizizadeh, B., Lakes, T., Omarzadeh, D., Sharifi, A., Blaschke, T. and Karimzadeh, S., 2022. Scenario-based analysis of the impacts of lake drying on food production in the Lake Urmia Basin of Northern Iran. *Scientific Reports*, 12(1), p.6237. **DOI: 10.1038/s41598-022-10228-6**
13. Feizizadeh, B., Omarzadeh, D., Mohammadnejad, V., Khallaghi, H., Sharifi, A. and Karkarg, B.G., 2023. An integrated approach of artificial intelligence and geoinformation techniques applied to forest fire risk modeling in Gachsaran, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(6), pp.1369-1391. **DOI: 10.1080/09640568.2022.2029347**
14. Forkuor, G., Dimobe, K., Serme, I. and Tondoh, J.E., 2017. Landsat-8 vs. Sentinel-2: examining the added value of Sentinel-2's red-edge bands to land-use and land-cover mapping in Burkina Faso. *GIScience & Remote Sensing*, 55(3), pp.331-354. **DOI: 10.1080/15481603.2017.1370169**
15. Gu, F., Ramezani, E., Alizadeh, K. and Behling, H., 2021. Vegetation dynamics, environmental changes, and anthropogenic impacts on the coastal Hyrcanian Forests in Northern Iran. *Journal of Coastal Research*, 37(3), pp.611-619. **DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-20-00067.1**
16. Haidari, M. and Karamdoost Maryan, B., 2016. The study and policy cessation of forest utilization or forest logging in Hyrcanian forests (Case study: Shafarood forests). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(4), pp.724-736.  
**https://doi.org/10.22092/ijfpr.2016.109450**
17. Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O. and Townshend, J.R.G., 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), pp.850-853. **DOI: 10.1126/science.1244693**
18. Hashemi, S.A., Fatemi Talab, S.R., Kavousi Kalashmi, H. and Madanipour Kermanshahi, M., 2016. Change detection in the forest cover of Siyahmezgi watershed of Guilan using LandSat images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 7(3), pp.78-88. (In Persian).
19. Hassan, M.M., Duvencek, M. and Southworth, J., 2023. The role of the refugee crises in driving forest cover change and fragmentation in Teknaf, Bangladesh. *Ecological Informatics*, 74, p.101966. **DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101966**
20. Hu, L., Shariff, A.R.B.M., Omar, H., Song, D.X. and Wu, H., 2022. GEE-based spatiotemporal evolution of deforestation monitoring in Malaysia and its drivers. In: *Remote Sensing*



- Application: Regional Perspectives in Agriculture and Forestry*. Singapore: Springer Nature Singapore, pp.279-302. **DOI: 10.1007/978-981-19-7620-3\_13**
21. Huang, C. and Zhang, C., 2022. Characterizing urban growth in Vientiane from 2000 to 2019 using time-series optical and SAR-based estimates of urban land. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 109, p.102798. **DOI: 10.1016/j.jag.2022.102798**
  22. Jourgholami, M. and Majnounian, B., 2011. Harvesting systems in Hyrcanian Forest, Iran; limitations and approaches.
  23. Karimzadeh Jafari, E., Naghavi, H., Adeli, K. and Latifi, H., 2020. A nondestructive, remote sensing-based estimation of the economic value of aboveground temperate Forest biomass (case study: Hyrcanian Forests, Nowshahr-Iran). *Journal of Sustainable Forestry*, 39(7), pp.750-770. **DOI: 10.1080/10549811.2020.1723113**
  24. Li, H., Wan, W., Fang, Y., Zhu, S., Chen, X., Liu, B. and Hong, Y., 2019. A Google Earth Engine-enabled software for efficiently generating high-quality user-ready Landsat mosaic images. *Environmental Modelling & Software*, 112, pp.16-22. **DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.11.004**
  25. Liu, P., Choo, K.K.R., Wang, L. and Huang, F., 2017. SVM or deep learning? A comparative study on remote sensing image classification. *Soft Computing*, 21, pp.7053-7065. **DOI: 10.1007/s00500-016-2247-2**
  26. Lynch, J., Maslin, M., Balzter, H. and Sweeting, M., 2013. Choose satellites to monitor deforestation. *Nature*, 496(7445), pp.293-294. **DOI: 10.1038/496293a**
  27. Manfreda, S., McCabe, M.F., Miller, P.E., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G. and Toth, B., 2018. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote Sensing*, 10(4), p.641. **DOI: 10.3390/rs10040641**
  28. Mehmood, M., Shahzad, A., Zafar, B., Shabbir, A. and Ali, N., 2022. Remote sensing image classification: A comprehensive review and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), p.5880959. **DOI: 10.1155/2022/5880959**
  29. Mirakhorlu and Akhwan, 2017. Evaluation of changes in the level of Hyrcanian forests from 1383 to 1395. *Nature of Iran*, 2(3), pp.40-45. (In Persian).
  30. Mohammadpour, P., Viegas, D.X. and Viegas, C., 2022. Vegetation mapping with random forest using Sentinel 2 and GLCM texture feature—A case study for Lousã region, Portugal. *Remote Sensing*, 14(18), p.4585. **DOI: 10.3390/rs14184585**
  31. Moharrami, M., Attarchi, S., Gloaguen, R. and Alavipanah, S.K., 2024. Monitoring land cover changes in northwestern Iran using training samples migration method. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 16(1), pp.129-154. **doi:10.48308/gisj.2024.233836.1188**
  32. Nakhutsrishvili, G., Zazanashvili, N., Batsatsashvili, K. and Montalvo, C.S., 2015. Colchic and Hyrcanian forests of the Caucasus: Similarities, differences and conservation status. *Flora Mediterranea*, 25(Special Issue), pp.185-192. **DOI: 10.7320/FIMedit25SI.185**
  33. Naqinezhad, A. and Zarezadeh, S., 2013. Phytosociological survey of Noor and Sisangan lowland Hyrcanian forests Mazandaran province. *Journal of Plant Biological Sciences*, 5(16), pp.103-121. (In Persian).
  34. Nasiri, V., Beloiu, M., Darvishsefat, A.A., Griess, V.C., Maftai, C. and Waser, L.T., 2023. Mapping tree species composition in a Caspian temperate mixed forest based on spectral-temporal metrics and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116, p.103154. **DOI: 10.1016/j.jag.2022.103154**
  35. Nasiri, V., Heidarlou, H.B., Alchin, A.A., Moradi, F., Rahmanian, S., Afshari, S. and Griess, V.C., 2023. How do conservation policies, climate and socioeconomic changes impact Hyrcanian forests of northern Iran? *Ecological Informatics*, 78, p.102351. **DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102351**
  36. Omarzadeh, D., Afraz, M., Akbari, M., Eftekhari, M. and Noghani, Z., 2021. Evaluation of changes in the Forest Environment in Guilan Province using a combination of Remote Sensing Data. *The Malaysian Forester*, 84(1), pp.65-83.
  37. Omarzadeh, D., González-Godoy, A., Bustos, C., Martín-Fernández, K., Scotto, C., Sánchez, C. and Borge-Holthoefner, J., 2024. Explainable automatic detection of fiber-cement roofs in aerial RGB images. *Remote Sensing*, 16(8), p.1342. **DOI: 10.3390/rs16081342**

38. Scullion, J.J., Vogt, K.A., Drahota, B., Winkler-Schor, S. and Lyons, M., 2019. Conserving the last great forests: A meta-analysis review of the drivers of intact forest loss and the strategies and policies to save them. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, p.62.  
**DOI: 10.3389/ffgc.2019.00062**
39. Sefidi, K. and Esmaeilpour, M., 2022. Meta-analysis of snag volume variable in Hyrcanian forests. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 29(2), pp.121-136.  
**DOI:10.22069/jwfst.2022.20263.1971**. (In Persian).
40. Sharif, M. and Attarchi, S., 2024. Estimation of Hyrcanian forests coverage using ALOS PALSAR and MODIS satellite data (2007–2017). *Advances in Space Research*, 73(1), pp.426-439. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.033
41. Sheykhmousa, M., Mahdianpari, M., Ghanbari, H., Mohammadimanesh, F., Ghamisi, P. and Homayouni, S., 2020. Support vector machine versus random forest for remote sensing image classification: A meta-analysis and systematic review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, pp.6308-6325.  
**DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3026724**
42. Sotirov, M., Pokorny, B., Kleinschmit, D. and Kanowski, P., 2020. International forest governance and policy: institutional architecture and pathways of influence in global sustainability. *Sustainability*, 12(17), p.7010. **DOI: 10.3390/su12177010**
43. Stritih, A., Bebi, P., Rossi, C. and Grêt-Regamey, A., 2021. Addressing disturbance risk to mountain forest ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 296, p.113188.  
**DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113188**
44. Tariq, A., Yan, J., Gagnon, A.S., Riaz Khan, M. and Mumtaz, F., 2023. Mapping of cropland, cropping patterns and crop types by combining optical remote sensing images with decision tree classifier and random forest. *Geo-Spatial Information Science*, 26(3), pp.302-320.  
**DOI: 10.1080/10095020.2022.2100287**
45. Tohidifar, M., Moser, M., Zehzad, B. and Ghadirian, T., 2016. Biodiversity of the Hyrcanian forests: A synthesis report.