

Original Article



Mangrove Forest Change Monitoring and Mapping in Mahshahr Using Integrated Remote Sensing and Machine Learning

Received: 2025.12.29

Accepted: 2026.02.14

Sima Farivar Ghaziani¹, Yousef Rashidi^{1*}, Hossein Mahmoudi²

¹ Department of Environmental Technologies, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Mangrove forests are among the richest coastal ecosystems in tropical and subtropical regions and have high ecological and economic value; however, their increasing degradation worldwide has made monitoring of their extent, distribution, and changes essential for effective conservation and management. In recent decades, industries in the Bandar Mahshahr Special Economic Zone have implemented restoration projects, including mangrove seedling planting, to expand these areas; however, up-to-date information on ecosystem dynamics in the Mahshahr tidal creeks remains limited. This study examined regional mangrove changes from 2003 to 2023 and produced an accurate classification map for 2023 to support conservation planning and evaluation of restoration effectiveness.

Materials and methods: Spatiotemporal changes in mangrove forests from 2003 to 2023 were monitored using Landsat-7 and Landsat-8 imagery acquired at low tide with minimal cloud cover. Four spectral indices—NDVI, NDWI2, MVI, and CMRI—were calculated for 2003, 2013, and 2023. Detection thresholds were calibrated using the 2023 baseline map, and a distribution map was generated for each year; the final change map was then derived by integrating the four indices and applying a majority rule. To produce the 2023 classification map, Sentinel-2 imagery and a dataset of spectral bands and calculated indices were used. Training samples for the mangrove class were obtained from a baseline map provided by the petrochemical company, whereas samples for other classes were collected through visual interpretation of high-resolution imagery. A Random Forest model was trained and optimized. Classification accuracy was assessed using a confusion matrix, and the area of each class was calculated. All image processing, index extraction, statistical analyses, classification, and accuracy assessment were performed in R.

Results and discussion: Long-term monitoring using Landsat data showed that planted mangrove area increased from approximately 2 ha in 2003 to 109.5 ha in 2013 and 221.6 ha in 2023. This net increase of 219.6 ha over two decades confirms the overall success of the restoration projects. The final map derived from Sentinel-2 data and the Random Forest algorithm achieved an overall accuracy of 94.78% and estimated established mangrove area in 2023 at 630.8 ha. The approximately 55% difference between the Landsat estimate of 285 ha and the Sentinel-2 estimate showed that moderate-resolution imagery has limitations in detecting small, scattered, and linear patches and causes systematic underestimation. Comparison with studies based on simpler methods or lower-spatial-resolution data also showed that the integrated multi-index and multi-class approach improved spectral discrimination, mangrove identification, and separation from mudflats and spectrally similar coastal vegetation.

Conclusion: The integrated framework provided an accurate and reliable estimate of planted mangrove extent in the Bandar Mahshahr Special Economic Zone and demonstrated that reliance on moderate-resolution imagery can lead to substantial underestimation. In addition to documenting the quantitative success of the restoration projects, the high-accuracy map provides a reliable baseline for future monitoring of forest health, assessment of ecosystem services, and sustainable management of these valuable ecosystems in industrial-coastal environments. For future research, continuous time-series monitoring and integration of auxiliary data, such as LiDAR for forest-structure analysis, are recommended.

Keywords: Mangrove forests, Bandar Mahshahr Special Economic Zone, Spectral indices, Random Forest model, Classification

How to cite this article: Farivar Ghaziani, S., Rashidi, Y., and Mahmoudi, H. 2026. Mangrove Forest Change Monitoring and Mapping in Mahshahr Using Integrated Remote Sensing and Machine Learning. Adv. Environ. Sci. 24 (2): 525-544.

* Corresponding Author Email Address: y_rashidi@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2026.243048.1562



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

پایش تغییرات و نقشه‌برداری جنگل‌های مانگروی ماهشهر با تلفیق سنجش‌ازدور و یادگیری ماشین



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

سیما فریور قاضیانی^۱، یوسف رشیدی^{۱*}، حسین محمودی^۲

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: جنگل‌های مانگرو از غنی‌ترین اکوسیستم‌های ساحلی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به شمار می‌روند و ارزش اکولوژیکی و اقتصادی بالایی دارند؛ با این حال، تخریب فزاینده آن‌ها در جهان، پایش دقیق وسعت، پراکنش و تغییراتشان را برای حفاظت و مدیریت مؤثر ضروری ساخته است. در دهه‌های اخیر، صنایع منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر برای گسترش این پهنه‌ها، پروژه‌های احیایی از جمله کاشت نهال حرا را اجرا کرده‌اند؛ اما اطلاعات به‌روز درباره پویایی این اکوسیستم‌ها در خوربات ماهشهر محدود است. این پژوهش تغییرات جنگل‌های مانگرو را در منطقه طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ بررسی و نقشه طبقه‌بندی دقیق آن‌ها را برای سال ۲۰۲۳ تهیه کرد تا مبنایی برای برنامه‌ریزی حفاظتی و ارزیابی اثربخشی پروژه‌های احیا فراهم شود.

مواد و روش‌ها: تغییرات زمانی-مکانی جنگل‌های مانگرو در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ با استفاده از تصاویر لندست-۷ و لندست-۸ در شرایط جزر و با حداقل پوشش ابر پایش شد. چهار شاخص طیفی با نمادهای NDVI, NDWI2, MVI, CMRI برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ محاسبه شد. آستانه‌های تشخیص با نقشه پایه سال ۲۰۲۳ کالبره و نقشه پراکنش هر سال تولید شد؛ سپس نقشه نهایی تغییرات با تلفیق چهار شاخص و اعمال قاعده اکثریت استخراج شد. برای تهیه نقشه طبقه‌بندی دقیق سال ۲۰۲۳، تصاویر سنتینل-۲ و مجموعه‌ای شامل باندهای طیفی و شاخص‌های محاسبه‌شده به کار رفت. نمونه‌های آموزشی کلاس مانگرو از نقشه پایه ارائه‌شده توسط شرکت پتروشیمی و نمونه‌های سایر کلاس‌ها از تفسیر بصری تصاویر با وضوح بالا تهیه شدند. مدل جنگل تصادفی آموزش و بهینه‌سازی شد. دقت طبقه‌بندی با ماتریس خطا ارزیابی و مساحت هر کلاس محاسبه شد. همه مراحل پردازش تصاویر، استخراج شاخص‌ها، تحلیل‌های آماری، طبقه‌بندی و ارزیابی دقت در نرم‌افزار R انجام شد.

نتایج و بحث: پایش بلندمدت با داده‌های لندست نشان داد مساحت جنگل‌های مانگروی دست‌کاشت از حدود ۲ هکتار در سال ۲۰۰۳ به ۱۰۹/۵ هکتار در سال ۲۰۱۳ و ۲۲۱/۶ هکتار در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. این افزایش خالص ۲۱۹/۶ هکتاری طی دو دهه، موفقیت کلی پروژه‌های احیا را تأیید می‌کند. نقشه نهایی حاصل از داده‌های سنتینل-۲ و الگوریتم جنگل تصادفی، با دقت کلی ۹۴/۷۸ درصد، مساحت جنگل‌های مانگروی مستقر در سال ۲۰۲۳ را ۶۳۰/۸ هکتار برآورد کرد. اختلاف حدود ۵۵ درصدی میان برآورد لندست، معادل ۲۸۵ هکتار، و برآورد سنتینل-۲ نشان داد تصاویر با وضوح متوسط در شناسایی لکه‌های کوچک، پراکنده و خطی محدودیت دارند و موجب کم‌برآوردی سیستماتیک می‌شوند. مقایسه با مطالعات مبتنی بر روش‌های ساده‌تر یا داده‌های با وضوح مکانی پایین‌تر نیز نشان داد رویکرد تلفیقی چندشاخصه و چندکلاسه این پژوهش، با افزایش قدرت تفکیک طیفی، شناسایی مانگرو و جداسازی آن از پهنه‌های گلی و پوشش‌های گیاهی مشابه ساحلی را بهبود داده است.

نتیجه‌گیری: چارچوب تلفیقی این پژوهش، برآوردی دقیق و قابل اتکا از وسعت جنگل‌های مانگروی دست‌کاشت منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر ارائه کرد و نشان داد اتکا به تصاویر با وضوح متوسط می‌تواند به کم‌برآوردی شدید منجر شود. نقشه تولیدشده با دقت بالا، ضمن مستندسازی موفقیت کمی پروژه‌های احیا، خط‌پایه‌ای معتبر برای پایش آتی سلامت جنگل، ارزیابی خدمات اکوسیستمی و مدیریت پایدار این اکوسیستم‌های ارزشمند در محیط‌های صنعتی-ساحلی فراهم می‌کند. برای پژوهش‌های آینده، پایش پیوسته با سری‌های زمانی و تلفیق داده‌های کمکی مانند لیدار برای تحلیل ساختار جنگل پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های مانگرو، منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر، شاخص‌های طیفی، مدل جنگل تصادفی، طبقه‌بندی

استناد به این مقاله: فریور

قاضیانی، س.، رشیدی، ی.، ح. محمودی. ۱۴۰۴. پایش تغییرات و نقشه‌برداری جنگل‌های مانگروی ماهشهر با تلفیق سنجش‌ازدور و یادگیری ماشین. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۴ (۲): ۵۴۴-۵۲۵.

* Corresponding Author Email Address: y_rashidi@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2026.243048.1562



مقدمه

2023; Maung *et al.*, 2023; Rondon *et al.*, 2023; Guo *et al.*, 2021; Nguyen *et al.*, 2020). با این حال، این شاخص‌های کلاسیک در تفکیک دقیق مانگروها از سایر پوشش‌های ساحلی مشابه، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده جزرومدی^۹، با محدودیت‌هایی مواجه هستند (Umar & Abbas, 2025). برای فائق آمدن بر این محدودیت‌ها، شاخص‌های طیفی اختصاصی‌تر نظیر شاخص پوشش گیاهی مانگرو (MVI)^{۱۰} و شاخص مقاوم ترکیبی مانگرو (CMRI)^{۱۱} طراحی و توسعه یافته‌اند (Baloloy *et al.*, 2020; Gupta *et al.*, 2018). همپوشانی طیفی ناشی از پیچیدگی ذاتی مانگروها، حتی دقت این شاخص‌های اختصاصی را نیز محدود می‌سازد و تکیه صرف بر آن‌ها را برای نقشه‌برداری دقیق این اکوسیستم‌ها ناکافی می‌نماید (Umar and Abbas, 2025; Tran *et al.*, 2022). این چالش، لزوم به‌کارگیری رویکردهای ترکیبی و پیشرفته‌تری را نمایان می‌سازد. در این راستا، تلفیق این شاخص‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین^{۱۲} به عنوان یک چارچوب نوین و کارآمد مطرح شده است. در عرصه جهانی، تلفیق سنجش‌ازدور با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به یک رویکرد استاندارد و کارآمد برای پایش و نقشه‌برداری دقیق مانگروها تبدیل شده است (Sunkur *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2025; Caiza-Morales *et al.*, 2024). در این چارچوب، تصاویر ماهواره‌ای لندست^{۱۳} و سنتینل-۲^{۱۴} به دلیل دسترسی گسترده، پوشش زمانی طولانی و وضوح مکانی مناسب، کاربرد گسترده‌ای دارند (Athukorala *et al.*, 2025; Chan-Bagot *et al.*, 2024; Doughty *et al.*, 2024; Vasquez *et al.*, 2024; Win and Sasaki, 2024). همچنین، از میان الگوریتم‌های یادگیری ماشین، جنگل تصادفی^{۱۵} به دلیل اثربخشی بالا در طبقه‌بندی و غلبه بر چالش‌هایی مانند پوشش ابری و همپوشانی طیفی، به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Xu *et al.*, 2025; Jian *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024; Purwanto *et al.*, 2022). این تلاش‌های جهانی،

جنگل‌های مانگرو^۱ یکی از غنی‌ترین و حاصلخیزترین اکوسیستم‌ها در سواحل گرمسیری و نیمه گرمسیری جهان هستند (Kumar *et al.*, 2025). این جنگل‌ها علاوه بر ارزش اقتصادی بالا، با ارائه خدمات کلیدی مانند حفاظت از خطوط ساحلی، تصفیه آب، ذخیره‌سازی کربن^۲ و حفظ تنوع زیستی^۳، به عنوان زیرساختی طبیعی برای تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی^۴ و توسعه پایدار عمل می‌نمایند (Gargaran *et al.*, 2024; Rumondang *et al.*, 2024; Haseeba *et al.*, 2025). با این وجود، این اکوسیستم‌های ارزشمند به شدت در معرض تهدید ناشی از فعالیت‌های انسانی قرار دارند که کاهش چشمگیر مساحت آن‌ها در دهه‌های اخیر را در پی داشته است (Rahmadi *et al.*, 2023). بنابراین، پایش مستمر و تهیه نقشه‌های دقیق از این جنگل‌ها، به عنوان پیش‌نیازی حیاتی برای درک دینامیک آن‌ها و طراحی برنامه‌های مدیریتی پایدار، ضرورتی انکارناپذیر به شمار می‌رود.

اگرچه پایش میدانی بینش‌های ارزشمندی از ساختار و عملکرد جنگل‌های مانگرو ارائه می‌دهد، اما چالش‌هایی نظیر دشواری دسترسی، هزینه بالا و دامنه زمانی و مکانی ناکافی، قابلیت کاربرد آن را در مطالعات مقیاس بزرگ و بلندمدت محدود می‌سازد (Arai *et al.*, 2021). در مقابل، سنجش‌ازدور^۵ ماهواره‌ای به عنوان یک چارچوب روش-شناختی کارآمد و مقرون به صرفه، امکان پایش یکپارچه، تکرارپذیر و گسترده این اکوسیستم‌ها را فراهم می‌کند (Xu *et al.*, 2025; Rondon *et al.*, 2023; Lu & Wang, 2022; Maurya *et al.*, 2021).

یکی از روش‌های رایج و مؤثر در مطالعات سنجش‌ازدور برای شناسایی و تفکیک جنگل‌های مانگرو از سایر پوشش‌های گیاهی و عوارض زمینی، بهره‌گیری از شاخص‌های طیفی^۶ است (Tran *et al.*, 2022). در این حوزه، شاخص‌های عمومی مانند شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)^۷ و شاخص تفاضل نرمال شده آب (NDWI)^۸ کاربرد گسترده‌ای دارند (Al-Huqail *et al.*, 2025; Fu *et al.*, 2025).

چارچوب روش‌شناختی قوی برای مطالعات منطقه‌ای و محلی با هدف درک پویایی مانگرو و اطلاع‌رسانی استراتژی‌های مدیریت پایدار فراهم می‌کنند.

در ایران نیز مطالعات متعددی با بهره‌گیری از این چارچوب به پایش جنگل‌های مانگرو پرداخته‌اند. عمده این پژوهش‌ها بر رویشگاه‌های طبیعی و با قدمت، مانند منطقه حفاظت‌شده حرای قشم و جنگل‌های هرمزگان متمرکز بوده و کارایی داده‌های چندسنگنده‌ای (مانند لندست و سنتینل) و الگوریتم‌هایی نظیر جنگل تصادفی را در شناسایی و ردیابی تغییرات به اثبات رسانده‌اند (Mahdavi et al., 2023; Erfanifard et al., 2022; Miraki et al., 2023; Ghorbanian et al., 2021; Bihamta Toosi et al., 2020; Mafi-Gholami et al., 2019; Mafi-Gholami et al., 2017). در یک مطالعه ملی جامع و اخیر، Erfanifard and Lotfi (2023) Nasirabad با به‌کارگیری تصاویر سنتینل-۲ (اکتبر ۲۰۲۱)، شاخص اختصاصی *MVI* و الگوریتم جنگل تصادفی در پلتفرم گوگل ارث انجین، پهنه‌بندی دقیقی از کل جنگل‌های مانگروی سواحل جنوبی ایران ارائه دادند. نتایج این پژوهش، مساحت کل این رویشگاه‌ها را حدود ۱۲۴۷۲ هکتار برآورد کرد که از این مقدار، سهم رویشگاه بندر ماهشهر در استان خوزستان حدود ۲۹۰ هکتار گزارش شد. یافته‌های این مطالعات، ضمن تأیید کاربرپذیری روش‌های جهانی در شرایط منطقه، بر چالش‌های جدی ناشی از کاهش پیوستگی و افزایش قطعه‌قطعه‌شدگی این جنگل‌ها در اثر توسعه زیرساخت‌های ساحلی تأکید دارند که به طور مستقیم یکپارچگی اکولوژیک و توانایی اکوسیستم را در ارائه خدمات حیاتی تضعیف می‌کند (Sobhani and Danehkar, 2025; Bihamta Toosi et al., 2024; Ghayoumi et al., 2022). این چالش به‌ویژه برای جنگل‌های دست‌کاشت جدیدی که در مجاورت کانون‌های توسعه (مانند منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر) استقرار یافته‌اند، حائز اهمیت بیشتری است، چرا که پایداری و رشد آتی آن‌ها در گرو حفظ پیوندهای اکولوژیک و کاهش فشارهای محیطی پیرامونی است. با این حال،

علی‌رغم ارزش بالای چنین مطالعات گسترده‌ای در ترسیم نقشه کلی پراکنش، یک شکاف پژوهشی مهم در رابطه با تحلیل عمیق روند تغییرات زمانی-مکانی و پایش دقیق اکوسیستم‌های دست‌کاشت مانگرو در مقیاس محلی باقی مانده است. پژوهش‌های ملی مانند مطالعه Erfanifard and Lotfi (2023)، بر شناسایی پهنه‌ها در یک مقطع زمانی واحد متمرکز هستند و تحلیل پویایی بلندمدت و ارزیابی کمی نرخ تغییرات را به‌طور عمقی پوشش نمی‌دهند. این کمبود، به‌ویژه با توجه به فقدان داده‌های پایه مدون در این مناطق، امکان ارزیابی واقع‌بینانه از موفقیت پروژه‌های احیا و مدیریت هوشمند آن‌ها را محدود می‌سازد.

برای پر کردن این شکاف، پژوهش حاضر به عنوان یک مطالعه عمیق موردی با دو هدف مکمل طراحی شد: نخست، پایش و تحلیل کمی روند تغییرات مکانی-زمانی بلندمدت (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳) جنگل‌های مانگروی دست‌کاشت ماهشهر با استفاده از تصاویر لندست؛ و دوم، تهیه نقشه‌ای با وضوح و صحت بسیار بالا برای سال پایه ۲۰۲۳ با تلفیق داده‌های سنتینل-۲ و یک چارچوب پیشرفته مبتنی بر یادگیری ماشین. نوآوری کلیدی این تحقیق، نه در شناسایی پهنه، بلکه در ارائه تحلیل زمانی از توسعه این پهنه و ارائه روشی تلفیقی برای افزایش دقت تشخیص است. این چارچوب، چهار شاخص طیفی مکمل (*NDWI2*, *NDVI*، *CMRI* و *MVI*) را در مدل جنگل تصادفی ادغام می‌کند تا بر محدودیت‌های روش‌های تک‌شاخصه غلبه کرده و امکان تفکیک بهتر مانگرو از عوارض مشابه ساحلی را فراهم آورد. دستاوردهای این مطالعه، مکمل یافته‌های مطالعات ملی بوده و پایه کمی دقیق‌تری برای مدیریت عملیاتی، ارزیابی سلامت و تدوین برنامه‌های حفاظتی در سطح محلی فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

قلمروی مکانی این پژوهش، منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی^{۱۶} بندر ماهشهر واقع در استان خوزستان است.

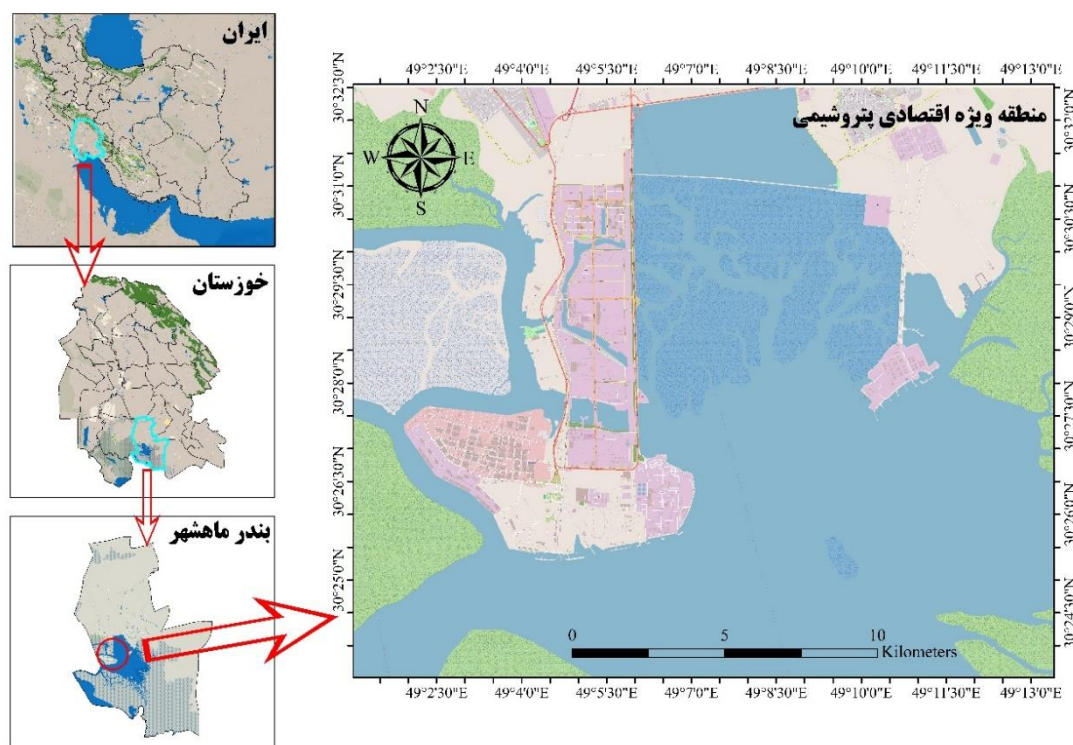
وسیع (مادفلات)، خورها و آبراهه‌های جزرومدی از ویژگی‌های بارز این ناحیه است که بستر فیزیکی لازم برای استقرار مانگروها را فراهم می‌کند. از لحاظ اقلیمی، منطقه دارای آب‌وهوای گرم‌وخشک است. میانگین بارندگی سالانه در این ناحیه کم و دمای هوا در تابستان‌ها بسیار بالا است. این شرایط سخت، از منظر اکولوژیکی زیستگاهی استرس‌زا ایجاد می‌کند. شوری بالای آب‌وخاک همراه با رژیم جزرومدی و دسترسی محدود به آب شیرین، از عوامل کلیدی کنترل‌کننده پراکنش و سلامت جوامع مانگرو در این منطقه به شمار می‌روند (Haseeba *et al.*, 2025; Yap and Al-Mutairi, 2025).

با توجه به کارکردهای اکولوژیک ثابت شده حرا از جمله پالایش طبیعی آلاینده‌های آب‌وخاک و حفاظت از خط ساحلی، کاشت هدفمند آن در مجاورت کانون صنعتی ماهشهر صرفاً یک اقدام احیایی نیست، بلکه یک راهبرد هوشمندانه برای به‌کارگیری خدمات اکوسیستمی در راستای کاهش اثرات محیطی و افزایش تاب‌آوری منطقه محسوب می‌شود.

این منطقه در پهنه‌ای به وسعت حدود ۲۸۵۰ هکتار در جنوب غربی ایران و در ساحل شمالی خلیج فارس قرار دارد و به عنوان یکی از قطب‌های اصلی صنایع پتروشیمی کشور، از اهمیت اقتصادی و راهبردی ویژه‌ای برخوردار است.

ویژگی متمایز و منحصربه‌فرد این عرصه، توسعه جنگل‌های دست‌کاشت مانگرو در مجاورت مستقیم تأسیسات صنعتی است. برخلاف رویشگاه‌های طبیعی مانگرو در استان‌های هرمزگان یا بوشهر، خوربات این منطقه (از جمله خور موسی، زنگی و جعفری) فاقد پوشش طبیعی مانگرو بوده‌اند؛ بنابراین، جنگل‌های مانگروی کنونی حاصل یک ابتکار زیست‌محیطی داوطلبانه و منسجم توسط صنعت پتروشیمی هستند که از سال ۱۳۷۸ با کاشت اولیه حدود ۴۰۰ اصله نهال توسط پتروشیمی بندر امام و با نظارت اداره منابع طبیعی شهرستان آغاز شد و تاکنون ادامه یافته است. این جنگل‌ها عمدتاً متشکل از گونه حرا^{۱۷} هستند (Haseeba *et al.*, 2025).

از منظر ویژگی‌های محیطی، این عرصه عمدتاً از رسوبات ریزدانه آبرفتی-دریایی تشکیل شده است. وجود پهنه‌های گلی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1- Geographic location of the study area

داده‌ها

اساس تحلیل تغییرات زمانی-مکانی بلندمدت جنگل‌های حرا در این پژوهش، بر بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ (*ETM+*) برای سال ۲۰۰۳ و لندست ۸ (*OLI/TIRS*) برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ استوار شد. این انتخاب، تداوم تاریخی بلندمدت این مأموریت ماهواره‌ای، یکسانی شرایط طیفی و قدرت تفکیک مکانی (۳۰ متر) در سنجنده‌های اصلی و در نتیجه قابلیت مقایسه‌پذیری بالا را برای مطالعات سری‌های زمانی تضمین می‌نماید. برای اطمینان از کیفیت داده‌های سال ۲۰۰۳، تصاویر لندست ۷ متعلق به دوره قبل از وقوع خطای راه‌راه‌شدگی (*SLC-Off*)^{۱۸} در مه ۲۰۰۳ انتخاب شدند تا از اثرات ناخواسته این خطا بر نتایج اجتناب شود. تمامی تصاویر از وبگاه *EarthExplorer* متعلق به سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (*USGS*)^{۱۹} و با تطابق بر مشخصات مداری منطقه مورد مطالعه (*ROW 35* و *PATH 169*) اخذ شدند. انتخاب نهایی هر تصویر با در نظر گرفتن دو معیار کلیدی صورت گرفت: نخست، گزینش تصاویری با حداقل پوشش ابر (کمتر از ۱۰٪) برای کاهش تداخل در بازتاب طیفی پوشش زمین؛ و دوم، انتخاب تصاویر منطبق بر حالت جزر که با بررسی بصری تصاویر و تطبیق آن‌ها با زمان‌بندی جزر و مد در منطقه مطالعه محقق شد تا پوشش درختان حرا در عرصه‌های بین جزرومدی به‌وضوح آشکار شده و از اختلاط طیفی با آب در حالت مد جلوگیری به عمل آید. برای تضمین دقت تحلیل‌های کمی، از محصولات آماده سطح ۲۰۲ استفاده گردید که پیش‌تر تحت تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی^{۲۱} کامل قرار گرفته‌اند. این امر، نیاز به تصحیحات پیچیده توسط کاربر را مرتفع ساخته و فرآیند پیش‌پردازش را به اعمال ضرایب مقیاس و تبدیل به بازتاب سطحی^{۲۲} محدود کرد.

به منظور تهیه نقشه‌ای با دقت مکانی و طیفی بالا از وضعیت پراکنش جنگل‌های حرا در منطقه، از تصاویر

ماهواره سنتینل-۲ برای سال پایه ۲۰۲۳ استفاده شد. مزیت اصلی این تصاویر، وضوح مکانی بالاتر (۱۰ و ۲۰ متر) و غنا و حساسیت طیفی بیشتر به‌ویژه در باندهای لبه قرمز^{۲۳} است که امکان تشخیص دقیق‌تر ساختار و سلامت پوشش گیاهی در محیط‌های پیچیده ساحلی مانند مانگروها را فراهم می‌آورد. تصویر مورد استفاده از پلتفرم دسترسی آزاد کوپرنیکوس^{۲۴} اخذ شد. مشابه فرآیند انتخاب تصاویر لندست، تصویر سنتینل-۲ نیز با در نظر گرفتن معیارهای حداقل پوشش ابر و انطباق با حالت جزر انتخاب گردید تا شرایط بهینه برای آشکارسازی پوشش حرا مهیا شود. از محصول *Level-2A* این ماهواره استفاده شد که داده‌های بازتاب سطحی تصحیح‌شده اتمسفریکی را ارائه می‌دهد و مستقیماً برای تحلیل‌های کمی آماده است.

روش‌شناسی

برای پایش تغییرات جنگل‌های حرای دست‌کاشت طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳، چهار شاخص طیفی *NDVI*، *NDWI2*، *MVI* و *CMRI* از مجموعه تصاویر بازتاب سطحی لندست برای سه مقطع زمانی ۲۰۰۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ استخراج شدند. انتخاب این شاخص‌ها مبتنی بر اثربخشی آن‌ها در مطالعات گذشته برای تشخیص پوشش گیاهی، محتوای آب و به‌ویژه شناسایی اختصاصی اکوسیستم‌های مانگرو بود. شاخص *NDVI*، پرکاربردترین شاخص برای ارزیابی سلامت و تراکم پوشش گیاهی است. این شاخص از تفاوت بازتاب شدید گیاهان سالم در باند فرورسرخ نزدیک (با جذب بالا توسط کلروفیل در باند قرمز) بهره می‌برد و به عنوان معیار پایه تغییرات سرسبزی در این پژوهش استفاده شد. شاخص *NDWI2* به طور خاص برای پایش رطوبت درون‌بافتی پوشش گیاهی و تشخیص پهنه‌های آبی در محیط پیچیده صنعتی-ساحلی ماهشهر به کار رفت. شاخص *MVI* به عنوان یک شاخص اختصاصی، توسط *Baloloy et al.* (2020) برای نقشه‌برداری دقیق از مانگروها طراحی شده

است. منطق این شاخص، ترکیب دو ویژگی کلیدی «سرسبزی» و «رطوبت متمایز» مانگروها است که امضای طیفی آن را از سایر پوشش‌های گیاهی ساحلی و خشکی جدا می‌کند. هدف از کاربرد MVI در این تحقیق، غلبه بر چالش همپوشانی طیفی و شناسایی اختصاصی پیکسل‌های مانگرو بود. شاخص $CMRI$ که توسط Gupta *et al.* (2018) معرفی شد، با یکپارچه‌سازی منطقی اطلاعات دو شاخص $NDVI$ (نماینده پوشش گیاهی) و $NDWI2$ (نماینده حضور آب) عمل می‌کند. شاخص $CMRI$ به طور مؤثر پیکسل‌هایی را که هم‌زمان دارای ویژگی‌های گیاهی و آبی هستند (مانند اکوسیستم مانگرو) برجسته می‌سازد و به عنوان یک نشانگر قوی برای افزایش دقت تشخیص نهایی در منطقه مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص‌ها به ترتیب بر اساس فرمول‌های ۱ تا ۴ محاسبه شدند.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

$$-1 < NDVI < +1$$

$$NDWI2 = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (2)$$

$$-1 < NDWI2 < +1$$

$$MVI = (NIR - Green) / (SWIR1 + Green) \quad (3)$$

$$CMRI = NDVI - NDWI2 \quad (4)$$

در فرمول‌های فوق NIR ، RED ، $Green$ و $SWIR1$ به ترتیب معرف باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز، سبز و مادون قرمز موج کوتاه ۱ در طیف موج الکترومغناطیسی هستند. باندهای متناظر هر شاخص برای سنجنده‌های مختلف (لندست و سنتینل-۲) و تاریخ تصاویر مورد تحلیل در جدول ۱ ارائه شده است. گام بعدی در تحلیل تغییرات بلندمدت جنگل‌های

مانگروی منطقه، تبدیل مقادیر پیوسته شاخص‌های طیفی به نقشه‌های طبقه‌بندی شده قابل اطمینان برای پایش کمی تغییرات این عرصه‌ها بود. چارچوب روش‌شناختی این مرحله بر پایه کالیبراسیون آستانه با داده میدانی و تلفیق چندشاخصه برای افزایش اطمینان استوار شد. نقشه پراکنش منتشرشده توسط شرکت ملی صنایع پتروشیمی، به عنوان تنها منبع معتبر میدانی، مبنای انتخاب و تصحیح آستانه‌ها قرار گرفت. با توجه به در دسترس بودن این نقشه تنها برای سال پایه ۲۰۲۳، فرآیند کالیبراسیون بر این سال متمرکز شد. در این سال، بازه‌ای از مقادیر آستانه محتمل بر اساس توزیع آماری هر شاخص استخراج و مقدار بهینه نهایی، با حداکثرسازی همپوشانی مکانی نتایج با عرصه‌های مانگرو در نقشه مرجع، انتخاب گردید. در ادامه، با اعمال این آستانه‌ها بر هر شاخص، چهار لایه دودویی برای هرسال تولید شد. برای کاهش عدم قطعیت ذاتی هر شاخص منفرد و ایجاد یک خروجی قوی‌تر، یک رویکرد تلفیق مبتنی بر قاعده اکثریت طراحی شد. در این رویکرد، لایه‌های دودویی هرسال با یکدیگر جمع جبری شدند تا یک نقشه درجه توافق (مقادیر ۰ تا ۴) ایجاد شود. این مقدار بیانگر تعداد شاخص‌هایی است که یک پیکسل را مانگرو تشخیص داده‌اند. در نهایت، با اعمال یک آستانه محافظه کارانه بر این نقشه (توافق حداقل ۳ شاخص از ۴ شاخص)، نقشه نهایی پراکنش قطعی مانگرو برای هرسال استخراج گردید. مساحت این پیکسل‌های قطعی در یک سیستم مختصات تصحیح شده، مبنای کمی‌سازی روند تغییرات در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ قرار گرفت.

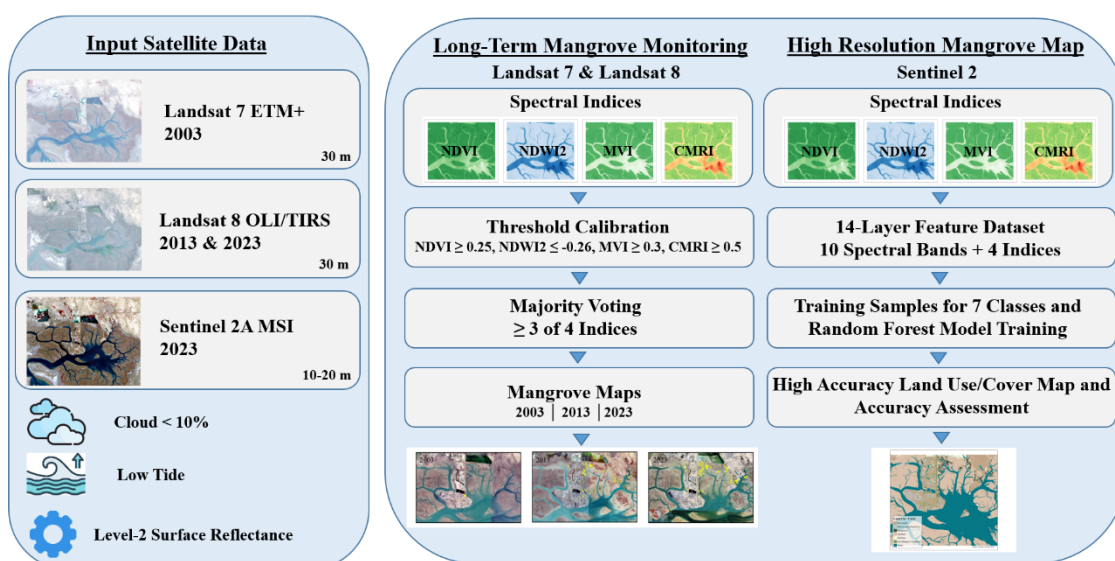
برای دستیابی به هدف دوم پژوهش، یعنی تهیه نقشه‌ای با دقت مکانی و موضوعی بالا از پراکنش جنگل‌های حرا در سال ۲۰۲۳، یک چارچوب روش‌شناختی پیشرفته مبتنی بر تلفیق داده‌های سنتینل-۲ و الگوریتم یادگیری ماشین پیاده‌سازی شد. ده باند طیفی اصلی در وضوح‌های ۱۰ و ۲۰ متر از تصویر سنتینل-۲ متعلق به سال ۲۰۲۳

به عنوان داده پایه اصلی این بخش مورد استفاده قرار گرفت. سپس، چهار شاخص طیفی $NDVI$ ، $NDWI2$ ، $CMRI$ و MVI با تطبیق بر باندهای سنتینل-۲ (مطابق جدول ۱) برای تقویت سیگنال مربوط به پوشش‌های مختلف و به‌ویژه مانگروها محاسبه گردید. یک مجموعه داده پیش‌بین جامع از تلفیق ۱۰ باند طیفی اصلی سنتینل-۲ (پس از یکسان‌سازی وضوح به ۱۰ متر) و لایه‌های چهارگانه شاخص‌های طیفی ایجاد شد. با توجه به چالش کمبود داده‌های میدانی معتبر و نقشه‌های پایه دقیق در منطقه، یک روش نمونه‌گیری تعاملی نیمه‌نظارتی با اتکا بر تفسیر بصری چندمنبعی به کار گرفته شد. ابتدا بر مبنای نقشه پراکنش منتشرشده توسط شرکت پتروشیمی، دانش از منطقه و مشاهدات میدانی، ۷ کلاس موضوعی اصلی شامل «زمین‌های بایر»، «سازه‌ها/مناطق صنعتی»، «پهنه‌های گلی»، «جنگل‌های مانگرو»، «حوضچه‌های نمک»، «پوشش‌های گیاهی غیر مانگرو» و «آب» تعریف شدند. سپس، با استفاده هم‌زمان از تصویر سنتینل-۲ با وضوح ۱۰ متر، تصاویر با وضوح بسیار بالای موجود در پلتفرم گوگل ارث پرو^{۲۵} برای سال ۲۰۲۳ و تصاویر رنگی کاذب حاصل از ترکیب باندهای مختلف (مانند ترکیب کاذب رنگ طبیعی و ترکیب مخصوص تشخیص پوشش گیاهی)، چندصد نمونه آموزشی خالص برای هر کلاس به‌صورت دستی و با دقت بالا جمع‌آوری گردید. برای اطمینان از کیفیت نمونه‌ها، از مناطق همگن و بدون اختلاط آشکار استفاده شد. این نمونه‌ها به طور تصادفی به دو مجموعه مستقل مجموعه آموزشی (۷۰٪) برای ساخت مدل و مجموعه آزمون (۳۰٪) برای ارزیابی دقت نهایی نقشه تقسیم شدند. الگوریتم جنگل تصادفی به دلیل سابقه موفق در مطالعات مشابه، مقاومت در برابر بیش‌برازش^{۲۶} و توانایی بالا در پردازش داده‌های چندبعدی به عنوان الگوریتم یادگیری ماشین برای این مرحله انتخاب شد. این الگوریتم بر اساس ساخت مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری

مستقل عمل کرده و خروجی نهایی را بر اساس قاعده اکثریت آرای این درختان تعیین می‌کند. مدل‌سازی با استفاده از بسته *caret* در محیط نرم‌افزار *R* انجام پذیرفت. ورودی مدل، یک جدول ویژگی-مقدار بود که در آن هر ردیف متناظر با یک پیکسل نمونه آموزشی و هر ستون شامل مقادیر آن پیکسل در ۱۴ لایه ورودی (۱۰ باند طیفی + ۴ شاخص طیفی) به همراه برچسب کلاس مربوطه بود. پارامترهای کلیدی مدل، شامل تعداد درختان (*ntree*) و تعداد متغیرهای تصادفی آزمون شده در هر گره (*mtry*)، از طریق یک فرآیند بهینه‌سازی مبتنی بر اعتبارسنجی متقابل^{۲۷} بر روی مجموعه آموزشی تنظیم شدند. مدل نهایی آموزش دیده، سپس برای پیش‌بینی کلاس هر پیکسل در کل منطقه مطالعه اعمال شد و نقشه پوشش زمین تولید گردید. بر مبنای این نقشه و با احتساب مساحت هر پیکسل (۱۰×۱۰ متر)، مساحت دقیق هر یک از هفت کلاس برحسب هکتار محاسبه و گزارش شد. دقت و صحت نقشه تولیدشده به‌صورت کمی و با استفاده از ماتریس خطا^{۲۸} حاصل از مجموعه نمونه‌های اعتبارسنجی مستقل ارزیابی شد. شاخص‌های اصلی گزارش‌شده برای ارزیابی دقت نقشه طبقه‌بندی تولیدی شامل دقت کلی^{۲۹}، ضریب کاپا^{۳۰}، حساسیت و دقت کلاس مانگرو^{۳۱} هستند. همچنین، با استفاده از خروجی مدل، تحلیل اهمیت متغیرها^{۳۲} انجام گرفت تا سهم هر یک از باندها و شاخص‌های طیفی در فرآیند تصمیم‌گیری مدل کمی‌سازی شود. درنهایت، نقشه حاصل از این روش پیشرفته با نقشه مبتنی بر آستانه‌گذاری با استفاده از سنجنده لندست ۸ برای سال ۲۰۲۳ مقایسه شد تا بهبودهای حاصل، به‌ویژه در حذف پوشش‌های گیاهی مشابه و کاهش خطای کمی برآورد مساحت، به وضوح نشان داده شود. تمامی پردازش‌های مکانی و محاسباتی این مطالعه در محیط نرم‌افزار *R* انجام پذیرفت. چکیده تصویری پژوهش در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱- باندهای موردنیاز و تاریخ تصاویر به کاررفته برای محاسبه شاخص‌های طیفی در هر سنجنده
Table 1- Required Bands and Image Acquisition Dates for Calculating Spectral Indices per Sensor

تاریخ تصویر Date of Image	باندهای ورودی شاخص طیفی Corresponding Bands for Spectral Indices				ماهواره Satellite
	CMRI	MVI	NDWI2	NDVI	
2003-01-07		Green: B2 NIR: B4 SWIR1: B5	Green: B2 NIR: B4	NIR: B4 RED: B3	لندست ۷ Landsat 7 (ETM+)
2013-11-26 2023-10-05	NDVI - NDWI2	Green: B3 NIR: B5 SWIR1: B6	Green: B3 NIR: B5	NIR: B5 RED: B4	لندست ۸ Landsat 8 (OLI/TIRS)
2023-06-26		Green: B3 NIR: B8A SWIR1: B11	Green: B3 NIR: 8A	NIR: 8A RED: B4	سنتینل ۲- Sentinel-2 (2A MSI)



شکل ۲- چکیده تصویری پژوهش
Fig.2- Graphical Abstract of research

نتایج و بحث

پیوسته‌ای را از حدود ۴/۹ هکتار در سال ۲۰۰۳ به حدود ۳۵۶ هکتار در سال ۲۰۱۳ و ۴۸۹ هکتار در سال ۲۰۲۳ نشان می‌داد (جدول ۳). این افزایش کمی، به‌ویژه در دهه اول، چشمگیر به نظر می‌رسید. با این حال، اعتبارسنجی این خروجی‌ها با تصاویر تاریخی با وضوح بسیار بالا در پلتفرم گوگل ارث پرو و نقشه پراکنش معتبر میدانی تهیه‌شده توسط شرکت ملی صنایع پتروشیمی، یک مغایرت سیستماتیک را آشکار کرد. محدودیت وضوح ۳۰ متری داده‌های لندست و پدیده «آشکارسازی مختلط طیفی»، منجر به طبقه‌بندی نادرست پیکسل‌های حاوی پهنه‌های گلی مرطوب، پوشش‌های گیاهی غیرمانگرو، یا حتی سطوح مشابه در داخل تأسیسات صنعتی به عنوان مانگرو

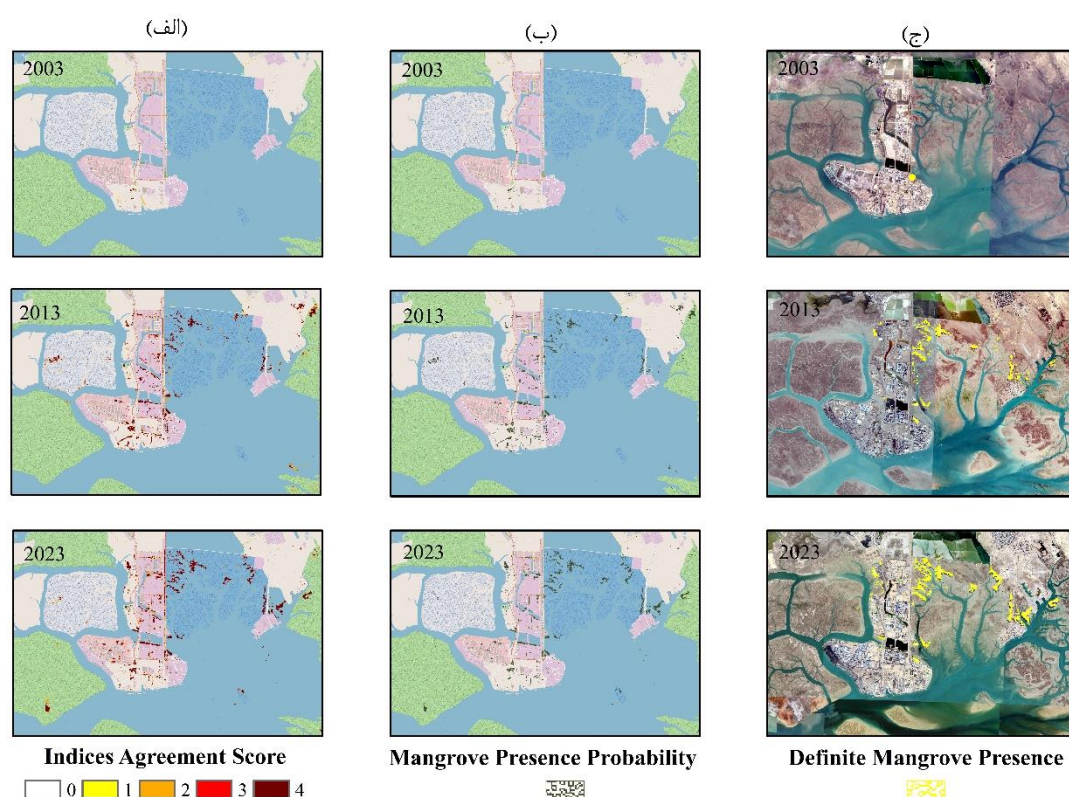
پایه‌سازی یک چارچوب پایش تغییرات مبتنی بر اعمال آستانه‌های کالیبره شده و تلفیق شاخص‌های طیفی لندست، بینش‌های ارزشمندی از الگوهای مکانی و زمانی عرصه‌های مانگرو در منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر ارائه داد. آستانه‌های بهینه برای شناسایی مانگرو از هر شاخص طیفی، از طریق کالیبراسیون آماری با نقشه پایه سال ۲۰۲۳ تعیین شد (جدول ۲). با اعمال یکسان این آستانه‌ها بر تصاویر لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، نقشه‌های پراکنش اولیه مانگروها استخراج و تلفیق شدند (شکل ۳-ب). برآورد مساحت جنگل‌های مانگرو از این نقشه‌های اولیه، روند افزایشی

شده بود. برای نمونه، در سال ۲۰۰۳، الگوریتم پیکسل‌هایی را در محدوده‌های صنعتی شناسایی کرده بود، درحالی‌که تصاویر گوگل ارث پرو، هسته اولیه واقعی توسعه را نهال‌های پراکنده در حاشیه خوریات موسی و مجاورت پتروشیمی بندر امام نشان می‌داد. این چالش ذاتی در نقشه‌برداری از پوشش‌های گیاهی تنک و پراکنده، به‌طور گسترده در پیشینه تحقیق مورد تأکید قرار گرفته است (Cui *et al.*, 2019). رویکرد ما برای غلبه بر این محدودیت، اتخاذ یک فرآیند تصحیح دستی مبتنی بر تفسیر بصری با استفاده از داده‌های با وضوح بالاتر بود. درحالی‌که مطالعات پیشرفته‌تر ممکن است از الگوریتم‌های جداسازی طیفی برای حل این مشکل استفاده کنند (Hu *et al.*, 2020)، دقت چنین روش‌های خودکاری در مراحل اولیه توسعه با پوشش بسیار تنک (مانند سال ۲۰۰۳ در این مطالعه)، اغلب کاهش می‌یابد؛ بنابراین، روش تلفیق و اصلاح دستی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر که توسط (Doughty *et al.*, 2024) نیز برای کمی‌سازی دقیق در مراحل اولیه توسعه ضروری شناخته شده، در این بافت خاص، راه‌حلی عملی و قابل‌اعتماد بود. درواقع، این رویکرد تلفیقی (خودکار+دستی)، یک راه‌حل عملی و بالارزش برای پایش تغییرات در مراحل اولیه توسعه اکوسیستم‌های دست‌کاشت در بافت‌های پیچیده (مانند مناطق صنعتی-ساحلی) ارائه می‌دهد و از نوآوری‌های کاربردی این مطالعه محسوب می‌شود. به همین منظور، پیکسل‌هایی که در نقشه اولیه لندست به عنوان مانگرو شناسایی شده بود، اما در تصاویر با وضوح بالا فاقد الگوی درختی مشخص مانگرو بود یا با عوارض دیگری مانند گل‌زار خالص، علف‌زار یا سازه همپوشانی داشت، حذف گردید (شکل ۳-ج). برآوردهای نهایی اصلاح‌شده حاکی از رشد گسترده عرصه‌های مانگرو از حدود ۲ هکتار در سال ۲۰۰۳ به ۱۰۹/۵ هکتار در سال ۲۰۱۳ و ۲۲۱/۶ هکتار در سال ۲۰۲۳ است که نشان‌دهنده گسترش ۴۵ برابری و رشد خالص حدود ۲۱۶/۷ هکتاری طی دو دهه می‌باشد. میزان و نرخ این گسترش در مقایسه با سایر مطالعات در منطقه خلیج فارس قابل‌تأمل است. برای نمونه، مطالعه (Mafi-Gholami and Baharlouii, 2019) در استان هرمزگان،

نرخ رشد سالانه‌ای در حدود ۳-۲٪ را برای جنگل‌های دست‌کاشت گزارش کردند، درحالی‌که نرخ رشد متوسط سالانه در منطقه ماهشهر در این بازه ۲۰ ساله به طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر (۲۶٪) محاسبه می‌شود. این تفاوت چشمگیر می‌تواند نشان‌دهنده شرایط هیدرولوژیک مساعدتر (مانند دسترسی به آب شیرین)، مدیریت آبیاری هدفمند یا سرمایه‌گذاری متمرکزتر در پروژه‌های احیای منطقه ویژه اقتصادی باشد. یافته ما از یک‌سو روند کلی مثبت احیای مانگروها در ایران و منطقه را که توسط مطالعاتی مانند (Erfanifard *et al.*, 2022) گزارش شده است، تأیید می‌کند و از سوی دیگر، مقیاس و شدت بی‌سابقه این تغییر را در یک کریدور صنعتی‌شده به صورت کمی دقیق‌تر مشخص می‌سازد. کشف و کمی‌سازی این نرخ رشد استثنایی (۲۶٪ در سال) و تبیین بسترهای آن، مهم‌ترین دستاورد علمی-کاربردی این تحقیق برای مدیران و برنامه‌ریزان است که اثربخشی پروژه‌های احیای اکولوژیک حتی در مجاورت فعالیت‌های صنعتی سنگین را به‌طور متقاعدکننده‌ای نشان می‌دهد. این الگوی رشد فزاینده با یافته‌های بسیار جدید در مناطق خشک مشابه خلیج فارس که از توسعه موفقیت‌آمیز جنگل‌های حرا خبر می‌دهند همسو است (Dhawi, 2025; Haseeba *et al.*, 2025). الگوی مکانی گسترش مانگروها در ماهشهر نیز عمدتاً از مجاورت آبراهه‌ها شروع شده و با افزایش تراکم به سمت پهنه‌های گلی اطراف پیش رفته است. این الگو بازتابی کلاسیک از بوم‌شناسی وابسته به جزر و مد این اکوسیستم است و به‌خوبی در مطالعات منطقه‌ای مشابه مانند (Dhawi, 2025) در عربستان مستند شده است. نکته متمایزکننده در این مطالعه، مشاهده این الگو در بافت یک منطقه ویژه اقتصادی صنعتی است. این امر نشان می‌دهد که حتی در مجاورت توسعه‌های صنعتی سنگین، در صورت وجود بسترهای گلی مناسب و رژیم آبی مطلوب، امکان استقرار و گسترش مانگروها وجود دارد. این یافته، پشتوانه‌ای علمی برای سیاست‌های «توسعه سبز» و «احیای اکولوژیک در حین توسعه صنعتی» در سایر مناطق ساحلی مشابه فراهم می‌آورد.

جدول ۲- آستانه‌های بهینه تعیین‌شده برای شاخص‌های طیفی در شناسایی مانگرو بر مبنای کالیبراسیون با نقشه مرجع سال ۲۰۲۳
Table 2- Optimal thresholds of spectral indices for mangrove detection, calibrated based on the 2023 reference map

شاخص طیفی Spectral Index	آستانه بهینه Optimal Threshold
شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	≥ 0.25
شاخص تفاضل نرمال آب-۲ Normalized Difference Water Index (NDWI2)	≤ -0.26
شاخص پوشش گیاهی مانگرو Mangrove Vegetation Index (MVI)	≥ 0.3
شاخص مقاوم ترکیبی مانگرو Combined Mangrove Recognition Index (CMRI)	≥ 0.5



شکل ۳- نقشه الف) درجه توافق شاخص‌ها، ب) احتمال حضور مانگرو (تلفیق شاخص‌ها) و ج) مقایسه با مرجع Google Earth Pro برای پایش تغییرات جنگل‌های مانگرو (۲۰۲۳، ۲۰۱۳، ۲۰۰۳)

Fig.3- Map of (a) spectral index agreement scores, (b) mangrove presence probability (index integration), and (c) comparison with Google Earth Pro reference for monitoring mangrove forest changes (2003, 2013, and 2023)

جدول ۳- مقایسه برآورد اولیه و اصلاح‌شده مساحت جنگل‌های مانگرو طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳
Table 3- Comparison of the primary and modified area estimates for mangrove forests from 2003 to 2023

سال Year	برآورد اولیه (لندست) Primary Estimation (Landsat)	برآورد نهایی (اصلاح‌شده) Final Estimation (Modified)
2003	4.9	2
2013	356.1	109.5
2023	488.8	221.6

(*NDVI*, *NDWI2*, *MVI* و *CMRI*) بود که در مجموع ۱۴ ویژگی را تشکیل می‌دادند. مدل با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع ۱۰-بخشی بر روی مجموعه آموزشی بهینه‌سازی شد و پارامتر *mtry* با مقدار ۸ و تعداد ۱۵۰۰ درخت به عنوان بهینه انتخاب گردید. ارزیابی نهایی مدل بر روی یک مجموعه آزمون مستقل (۳۰٪ از داده‌ها، معادل ۲۱۹۰ نمونه) که در فرآیند آموزش نقش نداشت، نشان‌دهنده عملکرد برجسته مدل بود (جدول ۴).

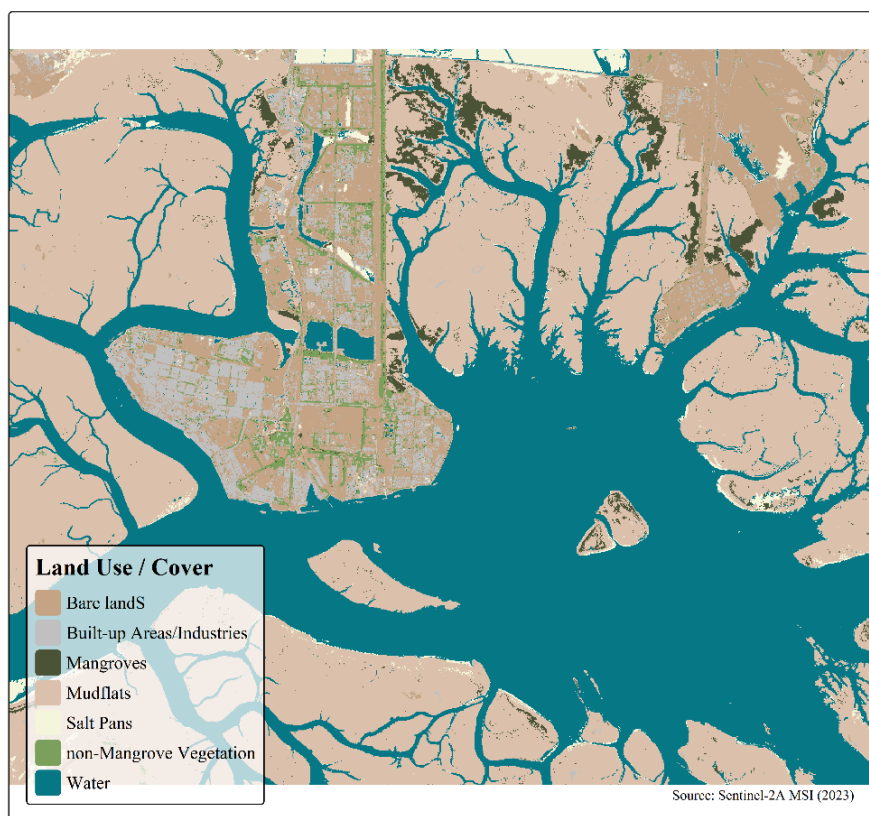
در این مطالعه، یک چارچوب طبقه‌بندی نظارت‌شده با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی پیاده‌سازی شد. مجموعه داده آموزشی متشکل از ۷۳۰۰ نمونه تفسیرشده بصری با توزیع متعادل بین هفت کلاس هدف (زمین‌های بایر، سازه‌ها/مناطق صنعتی، جنگل‌های مانگرو، پهنه‌های گلی، حوضچه‌های نمک، پوشش‌های گیاهی غیر مانگرو و آب) بود. متغیرهای پیش‌بین شامل ۱۰ باند طیفی اصلی تصویر سنتینل-۲ (*B1*, *B2*, *B3*, *B4*, *B5*, *B6*, *B7*, *B8A*, *B11* و *B12*) و ۴ شاخص طیفی محاسبه‌شده

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی
Table 4- Random Forest Model Evaluation Metrics

معیار Metric	مقدار Value	تفسیر فنی Technical Interpretation
دقت کلی Overall Accuracy	94.78%	درصد کل پیکسل‌هایی که کلاس آن‌ها به درستی پیش‌بینی شده است.
ضریب کاپا Kappa Coefficient	0.925	میزان توافق بین پیش‌بینی و واقعیت، با حذف تأثیر شانس. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۸ نشان‌دهنده توافق عالی است.
حساسیت کلاس مانگرو Sensitivity	97.95%	نشان می‌دهد مدل چه نسبتی از پیکسل‌های واقعی مانگرو را به درستی شناسایی کرده است. این شاخص برای کمی‌سازی مساحت حیاتی است.
دقت کلاس مانگرو Precision	96.77%	نشان می‌دهد چه نسبتی از پیکسل‌های پیش‌بینی‌شده به عنوان مانگرو، واقعاً متعلق به این کلاس هستند. این شاخص قابلیت اطمینان نقشه را نشان می‌دهد.

در مرزهای انتقالی بین عرصه‌ها متمرکز بودند و تأثیر ناچیزی بر صحت شناسایی هسته‌های متراکم هر کلاس داشتند. مدل نهایی بر روی کل صحنه تصویر سنتینل-۲ تاریخ ۲۶ ژوئن ۲۰۲۳ اعمال شد تا یک نقشه پوشش زمین با وضوح مکانی ۱۰ متر تولید شود (شکل ۴). این نقشه با دقت بالا، پراکنش مکانی هفت کلاس را در منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر و حاشیه ساحلی آن آشکار می‌سازد. مساحت و سهم هر کلاس پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است.

تحلیل ماتریس درهم‌آمیختگی (اغتشاش) نشان داد که ۹۸٪ از خطاهای مدل ناشی از همپوشانی طیفی ذاتی بین جفت کلاس‌های مشابه از نظر فیزیکی است. عمده‌ترین خطا، تبادله ۴۷ پیکسل (۱/۱٪ از خطاهای کل) بین کلاس‌های «مانگرو» و «پهنه گلی» بود که با توجه به استقرار مانگروها در محیط‌های گلی جزرومدی و رطوبت مشابه خاک، کاملاً قابل انتظار و منطقی است. خطای جزئی دیگر (۱۷ پیکسل) بین «سازه‌ها» و «زمین‌های بایر» رخ داد که می‌تواند ناشی از تشابه طیفی سطوح مصنوعی جدید (بتن) با خاک خشک باشد. این خطاها عمدتاً



شکل ۴- نقشه پوشش/کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، ۲۰۲۳
Fig. 4- Land Use/Cover Map of the Study Area, 2023

جدول ۵- مساحت و سهم هر کلاس پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه
Table 5- Area and percentage share of each land cover class in the study area

تعداد پیکسل Number of pixels	درصد از کل منطقه (%) Percentage of total area (%)	مساحت (هکتار) Area (hectares)	کلاس پوشش زمین Land Use/Cover Class
80460	9.03	3218.40	زمین‌های بایر Bare lands
35494	3.98	1419.76	سازه‌ها Built-up Areas/Industries
16718	1.88	668.72	جنگل‌های مانگرو Mangroves
383856	43.09	15354.24	پهنه‌های گلی Mudflats
16683	1.87	667.32	حوضچه‌های نمک Salt Pans
13664	1.53	546.56	پوشش‌های گیاهی غیرمانگرو non-Mangrove Vegetation
344005	38.61	13760.20	آب Water

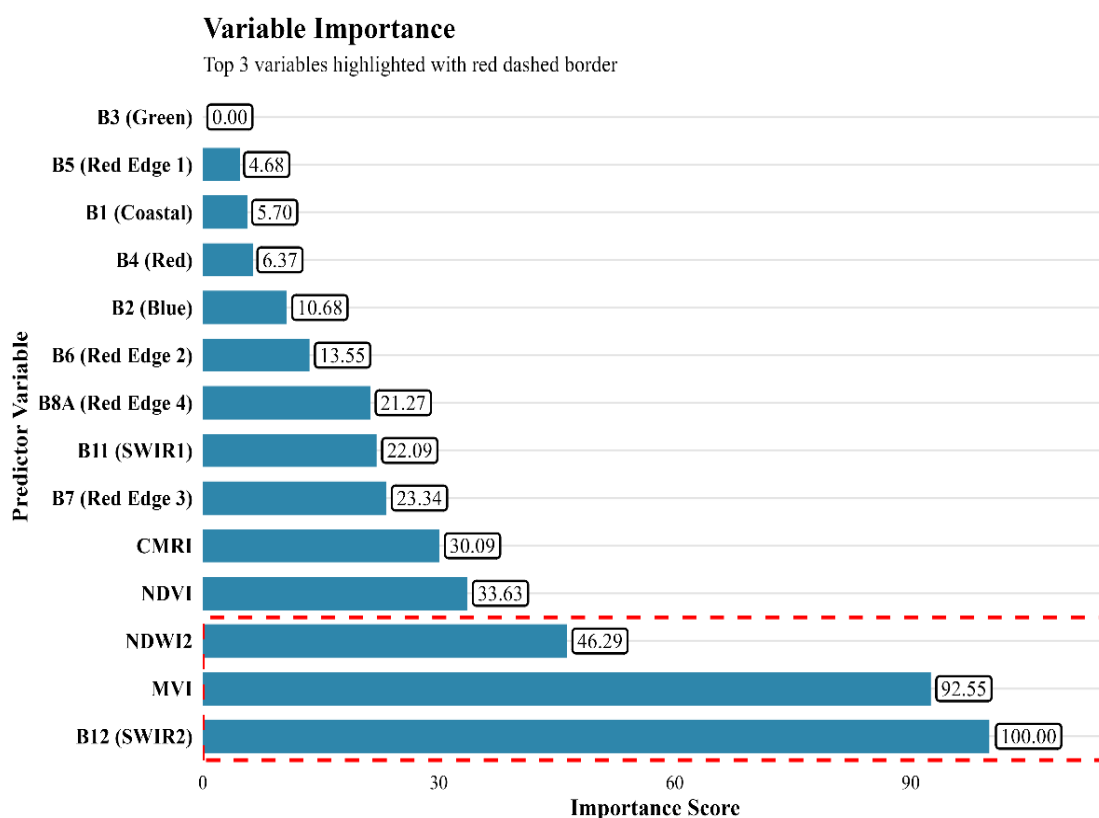
عملکرد استثنایی مدل جنگل تصادفی (دقت کلی ۹۴/۷۸٪ و $\kappa = ۰/۹۲۵$) به وضوح مؤثر بودن چارچوب روش شناختی یکپارچه این مطالعه را تأیید می‌کند. این سطح از دقت، در مقایسه با دقت‌های گزارش‌شده در مطالعات مشابه که از داده‌های سنتینل-۲ و الگوریتم جنگل تصادفی برای نقشه‌برداری مانگرو استفاده کرده‌اند، جایگاه ممتازی دارد. برای مثال، دقت کلی این مدل از دقت گزارش‌شده توسط (Chen (2020) (۹۰/۴۷٪) و (Pratama et al. (2025) (۹۵/۱۹٪) بالاتر یا قابل قیاس است. این بهبود احتمالی می‌تواند ناشی از دو عامل کلیدی باشد: اول، تلفیق هدفمند شاخص‌های طیفی اختصاصی مانگرو (MVI و CMRI) در کنار باندهای استاندارد و دوم، حجم و کیفیت بالای مجموعه داده آموزشی (۷۳۰۰ نمونه) که منجر به مدلی قوی‌تر شده است. دستیابی به این سطح از دقت (بالای ۹۴٪) در یک محیط ساحلی پیچیده و نیمه‌خشک، تأییدی محکم بر برتری چارچوب روش شناختی پیشنهادی این مقاله است و آن را به عنوان یک استاندارد قابل‌اتکا برای مطالعات آتی پایش مانگرو در مناطق مشابه معرفی می‌کند. تلفیق باندهای با وضوح بالا (۱۰ متر) سنتینل-۲ که حاوی اطلاعات غنی از باندهای لبه قرمز است، با شاخص‌های طیفی طراحی‌شده اختصاصاً برای مانگرو (MVI و CMRI)، یک امضای طیفی متمایز و قدرتمند برای تشخیص این اکوسیستم از پوشش‌های مشابه ساحلی فراهم کرد. اثربخشی این رویکرد ترکیبی، یافته‌های پژوهش‌های پیشین در مناطق گرمسیری را که بر مزیت تلفیق داده‌های چندطیفی و یادگیری ماشین تأکید دارند، به‌خوبی تأیید و تقویت می‌کند (Behera et al., 2021; Hu et al., 2020; Wang et al., 2018). حساسیت (۹۷/۹۵٪) و دقت (۹۶/۷۷٪) بسیار بالا برای کلاس مانگرو به این معناست که نقشه تولیدشده هم از کم-برازش ناچیز و هم از بیش‌براز حداقل رنج می‌برد. این نقشه با وضوح ۱۰ متر، به‌عنوان یک مجموعه داده پایه‌ای

دقیق و بی‌سابقه برای منطقه، امکان استفاده در پایش تغییرات آتی، ارزیابی سلامت جنگل و برآورد خدمات اکوسیستمی مانند ذخیره کربن را با قابلیت اطمینان بالا فراهم می‌سازد. برآورد نهایی مساحت (۶۶۸/۷۲ هکتار) نه تنها صحت روش را نشان می‌دهد، بلکه بینش ارزشمندی از الگوی استقرار اکولوژیک ارائه می‌کند. قرارگیری عرصه‌های حرا در مجاورت مستقیم پهنه‌های گلی و آبی وسیع (که مجموعاً $\approx ۸۱\%$ منطقه را تشکیل می‌دهند)، وابستگی شدید این جنگل‌ها به رژیم جزرومدی، بسترهای رسی و دسترسی به آب شیرین را در منطقه ماهشهر تأیید می‌کند. این وابستگی بوم‌شناختی کلاسیک که در مطالعات مربوط به اکوسیستم‌های مانگرو در سراسر خلیج فارس و دریای سرخ نیز به‌خوبی مستند شده است (Dhawi, 2025; Haseeba et al., 2025; Bajahmoum and Almaghamsi, 2025)، در بافت صنعتی ماهشهر نیز کاملاً مشهود است. مساحت نسبتاً محدود پوشش گیاهی خشکی (۱/۵۳٪) نیز گویای تنش‌های محیطی نظیر شوری بالا و شرایط سخت خاک در مناطق دور از ساحل است. این الگوی پراکنش، لکه‌لکه بودن عرصه‌های جنگلی دست‌کاشت را در میان توسعه‌های صنعتی و زیرساختی منطقه نشان می‌دهد که می‌تواند بر پیوستگی اکولوژیک و جریان ژنتیکی جمعیت‌های حرا تأثیر بگذارد. سهم باندهای طیفی و شاخص‌های NDVI، NDWI2، MVI و CMRI در دقت مدل جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی پوشش منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ نمایش داده شده است.

تحلیل اهمیت متغیرها در مدل جنگل تصادفی مبتنی بر معیار کاهش دقت (Mean Decrease Accuracy)، بینش ارزشمندی از مکانیسم تشخیص موفق مدل ارائه می‌دهد. مطابق شکل ۴، باند ۱۲ (SWIR2) با بیشترین اهمیت شناسایی شد. این یافته کاملاً با پیشینه تحقیق همخوانی دارد، چرا که مطالعات متعددی حساسیت بالای این باند

قابل توجه شاخص $NDWI2$ بر نقش محتوای آب به عنوان یک عامل تفکیک کننده کلیدی میان پوشش های گیاهی ساحلی و خشکی صحنه می گذارد. در مقابل، اهمیت نسبی پایین باندهای مرئی (آبی، سبز، قرمز)، هم خوان با انتظارات نظری و یافته های رایج است که از قدرت تمایز محدود این بخش از طیف در محیط های پیچیده ساحلی حکایت دارد. در مجموع، این الگوی اهمیت سنجی، کاربرد ترکیب هدفمند باندهای $SWIR$ و شاخص های طیفی اختصاصی مانند MVI را به عنوان یک راهبرد بهینه و قابل تعمیم برای مدل سازی دقیق پراکنش مانگروها در مناطق نیمه خشک تأیید می کند و نشان می دهد که انتخاب متغیرهای این پژوهش، نه تنها مبتنی بر شناخت صحیح فیزیک سنجش از دور مانگروها بوده، بلکه توسط شواهد تجربی پیشینه مطالعاتی نیز پشتیبانی می شود.

به محتوای رطوبت خاک و پوشش گیاهی را به عنوان عاملی کلیدی در تفکیک اکوسیستم های ساحلی مرطوب (مانند مانگرو و پهنه های گلی) از اراضی خشک معرفی کرده اند (Manna & Raychaudhuri, 2020). نکته برجسته، اهمیت بسیار بالای شاخص پوشش گیاهی مانگرو (MVI) به عنوان دومین متغیر مؤثر بود. این نتیجه، به صورت تجربی و در بافت منطقه ماهشهر، برتری رویکردهای مبتنی بر شاخص های طیفی اختصاصی طراحی شده برای مانگرو را تأیید می کند و مستقیماً از یافته های پژوهش های معتبری که کارایی این شاخص را در شناسایی مانگرو از داده های لندست و سنتینل نشان داده اند، پشتیبانی می کند (Erfanifard & Lotfi Nasirabad, 2023; Erfanifard & Lotfi Nasirabad, 2022; Baloloy et al., 2020). در رتبه های بعدی، اهمیت



شکل ۵- شناسایی متغیرهای کلیدی در تشخیص مانگرو و تمایز آن از دیگر پوشش های ساحلی
Fig. 5- Identifying Key Variables for Mangrove Detection and Discrimination from Other Coastal Covers

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف پایش تغییرات و نقشه‌برداری دقیق از جنگل‌های حرای دست‌کاشت در منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳، یک چارچوب روش‌شناختی جامع را ارائه داد. تحلیل تغییرات بلندمدت با استفاده از تصاویر لندست، رشد قابل توجه و گسترش ۴۵ برابری عرصه‌های حرا را از حدود ۲ هکتار در سال ۲۰۰۳ به بیش از ۲۲۱ هکتار در سال ۲۰۲۳ تأیید کرد. این یافته‌ها، بر توانایی داده‌های لندست در آشکارسازی روندهای کلان و درعین‌حال، لزوم تلفیق آن‌ها با منابع با وضوح بالاتر برای کمی‌سازی دقیق، به‌ویژه در مراحل اولیه توسعه تأکید می‌کنند. نقشه پوشش زمین سال ۲۰۲۳ با دقت کلی ۹۴/۷۸٪ نشان می‌دهد که جنگل‌های مانگرو در منطقه ماهشهر حدود ۶۶۹ هکتار از سطح منطقه را پوشش می‌دهند؛ مقداری که به‌طور معناداری بیش از برآورد حاصل از پایش مبتنی بر تصاویر لندست برای همان سال (حدود ۲۲۲ هکتار) است. این اختلاف عمدتاً بازتاب تفاوت در وضوح مکانی داده‌ها و سطح جامعیت شناسایی عرصه‌هاست؛ به‌گونه‌ای که برآورد مبتنی بر لندست عمدتاً هسته‌های متراکم و تثبیت‌شده مانگرو را نمایندگی می‌کند، درحالی‌که برآورد با وضوح بالاتر قادر است طیف کامل‌تری از توسعه اکوسیستم، شامل لکه‌های جوان، کم‌تراکم و در حال استقرار را نیز آشکار سازد. مقایسه این نتایج با یافته‌های Erfanifard and Lotfi Nasirabad (2023) که مساحت مانگروهای ماهشهر را در سال ۲۰۲۱ حدود ۲۹۰ هکتار گزارش کرده است، نشان می‌دهد که اختلاف نتایج عمدتاً ناشی از تفاوت زمانی تصاویر، تعریف عملیاتی کلاس مانگرو و سطح تعمیم‌پذیری مدل‌ها است. مطالعه حاضر با تمرکز موضعی و تفکیک دقیق کلاس‌های ساحلی مشابه، توانسته است مانگروهای جوان و دست‌کاشت را با حساسیت بالاتری شناسایی کند. علیرغم ارائه بینش‌های کلیدی در مورد دینامیک مکانی-زمانی جنگل‌های مانگرو در منطقه ویژه اقتصادی بندر ماهشهر، این مطالعه دارای محدودیت‌هایی

فراتر از این دستاوردهای روش‌شناختی، یافته‌های این مطالعه پیامدهای عملی مهمی برای حفاظت بوم‌شناختی، مدیریت اکوسیستم و آمایش سرزمین در مناطق ساحلی صنعتی به همراه دارد. از منظر حفاظت بوم‌شناختی، نقشه با دقت بالا و روند تغییرات کمی‌شده، ابزاری حیاتی برای شناسایی و پایش نقاط حساس و بارزش زیستی فراهم می‌کند. تمرکز گسترش مانگروها در مجاورت آبراهه‌ها و پهنه‌های گلی، مناطقی را مشخص می‌کند که برای حفظ پیوستگی اکولوژیک و تنوع ژنتیکی جمعیت‌های حرا از اولویت برخوردارند. این اطلاعات، تعیین کریدورهای حفاظتی و اولویت‌بندی مناطق برای اقدامات احیایی تکمیلی را ممکن می‌سازد. در زمینه مدیریت اکوسیستم، چارچوب پایش ارائه‌شده، یک سیستم هشدار سریع برای مدیران است. امکان پایش متوالی، ارزیابی سلامت جنگل از طریق شاخص‌هایی مانند $NDVI$ و MVI و کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی (مانند میزان ذخیره کربن آبی یا ظرفیت تصفیه آب) را فراهم می‌آورد. شناسایی الگوی پراکنش لکه‌لکه در میان تأسیسات صنعتی، مدیران را به سمت مدیریت یکپارچه و کاهش تعارضات، مانند کنترل آلاینده‌های نفتی یا روان‌آب‌های صنعتی در مجاورت عرصه‌های مانگرو، راهنمایی می‌کند. از نگاه آمایش سرزمینی و برنامه‌ریزی توسعه، این مطالعه شاهدهی قوی ارائه می‌دهد که توسعه اقتصادی (صنعتی) و احیای اکولوژیک می‌توانند هم‌زیستی داشته باشند. نقشه پوشش زمین با وضوح ۱۰ متر، یک لایه اطلاعاتی اساسی برای طرح‌های جامع آمایش سرزمین منطقه است. این لایه می‌تواند برای تعیین پهنه‌های حفاظتی اجباری، تعیین حریم اکولوژیک برای پروژه‌های آبی و طراحی فضای سبز و کمربندهای سبز سازگار با اکولوژی ساحلی مورد استفاده قرار گیرد. موفقیت احیای مانگرو در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر، می‌تواند به عنوان الگویی برای «توسعه سبز» در دیگر مناطق ساحلی صنعتی خلیج فارس که در معرض فشارهای مشابه هستند، معرفی شود.

پی‌نوشت‌ها

- ¹ Mangrove Forests
- ² Carbon Sequestration
- ³ Biodiversity
- ⁴ Climate Change
- ⁵ Remote Sensing
- ⁶ Spectral Indices
- ⁷ Normalized Difference Vegetation Index
- ⁸ Normalized Difference Water Index
- ⁹ Tide
- ¹⁰ Mangrove Vegetation Index
- ¹¹ Combined Mangrove Recognition Index
- ¹² Machine Learning
- ¹³ Landsat
- ¹⁴ Sentinel-2
- ¹⁵ Random Forest
- ¹⁶ Petrochemical Special Economic Zone
- ¹⁷ *Avicennia marina*
- ¹⁸ The Scan Line Corrector
- ¹⁹ The United States Geological Survey
- ²⁰ Collection 2 Level 2
- ²¹ Atmospheric and Radiometric Correction
- ²² Surface Reflectance
- ²³ Red Edge
- ²⁴ Copernicus Open Access Hub
- ²⁵ Google Earth Pro
- ²⁶ Over fitting
- ²⁷ Cross-Validation
- ²⁸ Confusion Matrix
- ²⁹ Overall Accuracy
- ³⁰ Kappa Coefficient
- ³¹ *Sensitivity & Precision*
- ³² Variable Importance

References

- Al-Huqail, A.A., Islam, Z., Al-Harbi, H.F. and Khan, F. 2025. AI-driven mangrove mapping on Farasan Islands, Saudi Arabia: enhancing the detection of dispersed patches with ML classifiers. *Scientific Reports*, 15(1), p.19285. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03280-5>
- Arai, H., Inubushi, K. and Chiu, C.Y. 2021. Dynamics of methane in mangrove forest: will it worsen with decreasing mangrove forests? *Forests*, 12(9), p.1204. <https://doi.org/10.3390/f12091204>
- Athukorala, D., Murayama, Y., Karunaratne, S., Wijenayake, R., Morimoto, T., Fernando, S.L.J. and Herath, N.S.K. 2025. Spatio-Temporal Changes in Mangroves in Sri Lanka: Landsat Analysis from 1987 to 2022. *Land*, 14(9), p.1820. <https://doi.org/10.3390/land14091820>
- Bajahmoum, E.A. and Almaghamsi, A. 2025. Physicochemical degradation of *Avicennia marina* mangrove soils in the Red Sea: implications for coastal ecosystem services. *Frontiers in Soil Science*, 5, p.1621591. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1621591>

است که مسیر پژوهش‌های آینده را مشخص می‌کند. نقشه طبقه‌بندی تولیدشده وضعیت را در یک مقطع زمانی واحد (ژوئن ۲۰۲۳) نشان می‌دهد. پایش زمانی-مکانی پیوسته با استفاده از سری‌های زمانی سنتینل-۲ برای درک پاسخ جنگل‌ها به نوسانات اقلیمی و فشارهای صنعتی ضروری است. اگرچه مدل در تمایز کلاس‌ها عالی عمل کرد، ولی تفکیک گونه‌ای درون جنگل‌های مانگرو (مانند تمایز حرا از سایر گونه‌ها) با داده‌های سنتینل-۲ به تنهایی چالش‌برانگیز است. استفاده از داده‌های هابیراسپکترال (*Hyperspectral*) یا *LiDAR* می‌تواند برای تحلیل ساختار و تنوع گونه‌ای پیشنهاد شود. صحت‌سنجی نهایی می‌تواند با داده‌های میدانی دقیق‌تر از جمله قطعه‌نمونه‌های ثابت و اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای بیوفیزیکی تکمیل شود.

سپاسگزاری

در پایان از شرکت ملی صنایع پتروشیمی و سازمان منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Baloloy, A.B., Blanco, A.C., Ana, R.R.C.S. and Nadaoka, K. 2020. Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 95-117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.001>
- Behera, M.D., Barnwal, S., Paramanik, S., Das, P., Bhattacharya, B.K., Jagadish, B., Roy, P.S., Ghosh, S.M. and Behera, S.K. 2021. Species-level classification and mapping of a mangrove forest using random forest—utilisation of AVIRIS-NG and sentinel data. *Remote Sensing*, 13(11), p.2027. <https://doi.org/10.3390/rs13112027>
- Bihanta Toosi, N., Soffianian, A.R., Fakheran, S., Pourmanafi, S., Ginzler, C. and T. Waser, L. 2020. Land cover classification in mangrove ecosystems based on VHR satellite data and machine learning—an upscaling approach. *Remote Sensing*, 12(17), p.2684. <https://doi.org/10.3390/rs12172684>
- Caiza-Morales, L., Gómez, C., Torres, R., Nicolau, A.P. and Olano, J.M. 2024. MANGLEE: A tool for mapping and monitoring MANGrove ecosystem on Google Earth engine: A case study in ecuador.

- Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 8(1), p.17. <https://doi.org/10.1007/s41651-024-00175-3>
- Chan-Bagot, K., Herndon, K.E., Puzzi Nicolau, A., Martín-Arias, V., Evans, C., Parache, H., Mosely, K., Narine, Z. and Zutta, B. 2024. Integrating SAR, optical, and machine learning for enhanced coastal mangrove monitoring in Guyana. *Remote Sensing*, 16(3), p.542. <https://doi.org/10.3390/rs16030542>
- Chen, N. 2020. Mapping mangrove in Dongzhaigang, China using Sentinel-2 imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(1), pp.014508-014508. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.014508>
- Cui, Y., Sun, H., Wang, G., Li, C. and Xu, X. 2019. A probability-based spectral unmixing analysis for mapping percentage vegetation cover of arid and semi-arid areas. *Remote Sensing*, 11(24), p.3038. <https://doi.org/10.3390/rs11243038>
- Dhawi, F. 2025. Mastering Resilience: Avicennia marina's Survival in Hypersaline Arid Zones. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, p.1598548. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1598548>
- Doughty, C.L., Cavanaugh, K.C., Chapman, S. and Fatoyinbo, L. 2024. Uncovering mangrove range limits using very high resolution satellite imagery to detect fine-scale mangrove and saltmarsh habitats in dynamic coastal ecotones. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 10(6), 686-701. <https://doi.org/10.1002/rse2.394>
- Erfanifard, Y. and Lotfi Nasirabad, M. 2022. Comparison of vegetation and mangrove indices in mangrove mapping on Sentinel-2 imagery based on Google Earth Engine. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 30(3), fa224-fa239. <https://doi.org/10.22092/IJFPR.2022.359648.2063>
- Erfanifard, Y. and Lotfi Nasirabad, M. 2023. Mapping mangrove forest extent in Iran using Sentinel-2 imagery. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(2), 98-112. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.360820.2081>
- Erfanifard, Y., Lotfi Nasirabad, M. and Stereńczak, K. 2022. Assessment of Iran's mangrove forest dynamics (1990–2020) using Landsat time series. *Remote Sensing*, 14(19), p.4912. <https://doi.org/10.3390/rs14194912>
- Fu, B., Yao, H., Lan, F., Li, S., Liang, Y., He, H., Jia, M., Wang, Y. and Fan, D. 2023. Collaborative multiple change detection methods for monitoring the spatio-temporal dynamics of mangroves in Beibu Gulf, China. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1), p.2202506. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2202506>
- Gargaran, J.P.S., Capuno, R.D.Y., Novicio, V.F.P., Petiluna, C.C., Catalba, C.E.T., Paras, D.A.P. and Garcés, J.J.C. 2024. Mangrove ecosystem in Asia: review and synthesis of ecosystem services and economic valuation methods. *Environmental & Experimental Biology*, 22(2). <https://doi.org/10.22364/eeb.22.06>
- Ghayoumi, R., Ebrahimi, E. and Mousavi, S.M. 2022. Dynamics of mangrove forest distribution changes in Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(6), 2479-2489. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.069>
- Ghorbanian, A., Zaghian, S., Asiyabi, R.M., Amani, M., Mohammadzadeh, A. and Jamali, S. 2021. Mangrove ecosystem mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images and random forest algorithm in Google Earth Engine. *Remote sensing*, 13(13), p.2565. <https://doi.org/10.3390/rs13132565>
- Guo, M., Yu, Z., Xu, Y., Huang, Y. and Li, C. 2021. Me-net: a deep convolutional neural network for extracting mangrove using sentinel-2a data. *Remote Sensing*, 13(7), p.1292. <https://doi.org/10.3390/rs13071292>
- Gupta, K., Mukhopadhyay, A., Giri, S., Chanda, A., Majumdar, S.D., Samanta, S., Mitra, D., Samal, R.N., Pattnaik, A.K. and Hazra, S. 2018. An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5, 1129-1139. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.09.011>
- Haseeba, K.P., Aboobacker, V.M., Vethamony, P. and Al-Khayat, J.A. 2025. Significance of Avicennia Marina in the Arabian Gulf environment: A review. *Wetlands*, 45(1), p.16. <https://doi.org/10.1007/s13157-025-01899-8>
- Hu, L., Xu, N., Liang, J., Li, Z., Chen, L. and Zhao, F. 2020. Advancing the mapping of mangrove forests at national-scale using Sentinel-1 and Sentinel-2 time-series data with Google Earth Engine: A case study in China. *Remote Sensing*, 12(19), p.3120. <https://doi.org/10.3390/rs12193120>
- Jian, Z., Ai, B., Zeng, J. and Sun, Y. 2024. A hybrid mangrove identification method by combining the time-frequency threshold of the Mangrove Index with a random forest binary classifier. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, 2077-2092. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3494058>
- Kumar, R.N., Moulidharshan, R., Kabinesh, V., Bargavi, S., Thamizharasu, T., Durgadevi, R. and Kalpana, R. 2025. Mangrove Forests in a Changing World: Distribution, Change, Drivers and Climate Relevance. *International Journal of Environment and Climate Change*, 15(11), 160-169. <https://doi.org/10.9734/ijec/2025/v15i115104>
- Li, Y., Ma, J., Fu, D., Yuan, J. and Liu, D. 2024. Mangrove Extraction Algorithm Based on Orthogonal Matching Filter-Weighted Least Squares. *Sensors*, 24(22), p.7224. <https://doi.org/10.3390/s24227224>

- Lu, Y. and Wang, L. 2022. The current status, potential and challenges of remote sensing for large-scale mangrove studies. *International Journal of Remote Sensing*, 43(18), 6824-6855. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2145584>
- Mafi Gholami, D., Baharlouii, M. and Mahmoudii, B. 2017. Mapping area changes of mangroves using RS and GIS (Case study: mangroves of Hormozgan province). *Advanced Environmental Sciences*, 15(2), 75-92.
- Mafi-Gholami, D. and Baharlouii, M. 2019. Monitoring long-term mangrove shoreline changes along the northern coasts of the Persian Gulf and the Oman Sea. *Emerging Science Journal*, 3(2), 88-100.
- Mahdaviard, M., Ahangar, S.K., Feizizadeh, B., Kamran, K.V. and Karimzadeh, S. 2023. Spatio-Temporal monitoring of Qeshm mangrove forests through machine learning classification of SAR and optical images on Google Earth Engine. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(3), 239-250. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1118542>
- Manna, S. and Raychaudhuri, B. 2020. Mapping distribution of Sundarban mangroves using Sentinel-2 data and new spectral metric for detecting their health condition. *Geocarto International*, 35(4), 434-452. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1520923>
- Maung, W.S., Tsuyuki, S. and Guo, Z. 2023. Improving land use and land cover information of Wunbaik mangrove area in Myanmar using U-Net model with multisource remote sensing datasets. *Remote Sensing*, 16(1), p.76. <https://doi.org/10.3390/rs16010076>
- Maurya, K., Mahajan, S. and Chaube, N. 2021. Remote sensing techniques: Mapping and monitoring of mangrove ecosystem—A review. *Complex & Intelligent Systems*, 7(6), 2797-2818. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00457-z>
- Miraki, M., Sohrabi, H., Sadeghi, S., Fatehi, P. and Immitzer, M. 2023. Application of mangrove recognition index for mapping mangrove forests using Sentinel-2 satellite images in Google Earth Engine. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(3), 40-49. <https://doi.org/10.22113/jmst.2022.318177.2456>
- Nguyen, H.H., Tran, L.T.N., Le, A.T., Nghia, N.H., Duong, L.V.K., Nguyen, H.T.T., Bohm, S. and Premnath, C.F.S. 2020. Monitoring changes in coastal mangrove extents using multi-temporal satellite data in selected communes, Hai Phong city, Vietnam. *Forest and Society*, 4(1), 256-270. <https://doi.org/10.24259/fs.v4i1.8486>
- Pratama, B.B., Pratama, W., Rudiastuti, A.W., Sugara, A. and Nugroho, F. 2025. Optimizing Mangrove Classification with Data Fusion: Machine Learning Approaches for Enggano Island, Indonesia. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 9(5), 1910-1921. <http://dx.doi.org/10.62527/joiv.9.5.3360>
- Purwanto, A.D., Wikantika, K., Deliar, A. and Darmawan, S. 2022. Decision tree and random forest classification algorithms for mangrove forest mapping in Sembilang National Park, Indonesia. *Remote Sensing*, 15(1), p.16. <https://doi.org/10.3390/rs15010016>
- Rahmadi, M.T., Yuniastuti, E., Suciani, A., Harefa, M.S., Persada, A.Y. and Tuhono, E. 2023. Threats to mangrove ecosystems and their impact on coastal biodiversity: A study on mangrove Management in Langsa City. *Indonesian Journal of Earth Sciences*, 3(2), A627-A627. <https://doi.org/10.52562/injoes.2023.627>
- Rondon, M., Ewane, E.B., Abdullah, M.M., Watt, M.S., Blanton, A., Abulibdeh, A., Burt, J.A., Rogers, K., Ali, T., Reef, R. and Mohtar, R. 2023. Remote sensing-based assessment of mangrove ecosystems in the Gulf Cooperation Council countries: a systematic review. *Frontiers in Marine Science*, 10, p.1241928. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1241928>
- Rumondang, R., Feliatra, F., Warningsih, T. and Yoswati, D. 2024. Sustainable management model and ecosystem services of mangroves based on socio-ecological system on the coast of Batu Bara Regency, Indonesia. *Environmental Research Communications*, 6(3), p.035008. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad2d01>
- Sobhani, P. and Danehkar, A. 2025. Evaluation of the function and ecological continuity of landscape in mangrove forests of Iran. *Environmental and Sustainability Indicators*, p.101041. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.101041>
- Sunkur, R., Kantamaneni, K., Bokhoree, C., Rathnayake, U. and Fernando, M. 2024. Mangrove mapping and monitoring using remote sensing techniques towards climate change resilience. *Scientific Reports*, 14(1), p.6949. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57563-4>
- Tran, T.V., Reef, R. and Zhu, X., 2022. A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing*, 14(19), p.4868. <https://doi.org/10.3390/rs14194868>
- Umar, M. and Abbas, S. 2025. Advancing mangrove mapping with the integrated mangrove index (IMI) and the role of tidal dynamics. *International Journal of Remote Sensing*, 46(11), 4409-4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2506159>
- Vasquez, J., Acevedo-Barrios, R., Miranda-Castro, W., Guerrero, M. and Meneses-Ospina, L. 2024. Determining changes in mangrove cover using remote sensing with Landsat images: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(1), p.18. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06788-6>
- Wang, D., Wan, B., Qiu, P., Su, Y., Guo, Q., Wang,

R., Sun, F. and Wu, X. 2018. Evaluating the performance of Sentinel-2, Landsat 8 and Pléiades-1 in mapping mangrove extent and species. *Remote Sensing*, 10(9), p.1468. <https://doi.org/10.3390/rs10091468>

Win, K.S. and Sasaki, J. 2024. The Change Detection of Mangrove Forests Using Deep Learning with Medium-Resolution Satellite Imagery: A Case Study of Wunbaik Mangrove Forest in Myanmar. *Remote Sensing*, 16(21), p.4077. <https://doi.org/10.3390/rs16214077>

Xu, W., Ouyang, X., Xiao, X., Hong, Y., Zhang, Y., Xu, Z., Kwon, B.O. and Yang, Z. 2025. A Review of Applying Drones and Remote Sensing Technology in Mangrove Ecology. *Forests*, 16(6), p.870. <https://doi.org/10.3390/f16060870>

Yang, Y., Meng, Z., Zu, J., Cai, W., Wang, J., Su, H.

and Yang, J. 2024. Fine-scale mangrove species classification based on uav multispectral and hyperspectral remote sensing using machine learning. *Remote Sensing*, 16(16), p.3093. <https://doi.org/10.3390/rs16163093>

Yap, C.K. and Al-Mutairi, K.A. 2025. Mangrove ecosystems in Western Asia: a literature review of trends, conservation gaps, and sustainable management strategies. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8, p.1556158. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1556158>

model, Classification

