



Comparative analysis of vegetation indices (NDVI, SAVI, NDPI) for assessing Phenological events of Mangrove forests in Southern Iran

Azin Balouchestani Asl¹ | Hossein Moradi² | Sedighe Abdollahi³ | Zahra Najjar-Khodabakhsh⁴ | Saeid Pour Manafi⁵

1. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: azinballoochestani99@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hs.moradi@ut.ac.ir
3. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: baharabdollahi94@gmail.com
4. School of Forest Resources, University of Maine, 5755 Nutting Hall, Orono, ME 04469-5755, USA. E-mail: zahra.najjar@maine.edu
5. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: spourmanafi@iut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 24 April 2026

Received in revised form 12

June 2026

Accepted 02 July 2026

Keywords:

Avicennia marina,
Mangrove phenology cycle,
Mixed-linear model,
Remote sensing,
Vegetation indices.

ABSTRACT

Mangrove forests, as one of the most vital coastal ecosystems, play a crucial role in the environmental sustainability of Iran's southern regions. Investigating the phenological patterns of these ecosystems, particularly through remote sensing, enables continuous and efficient monitoring of vegetation health and dynamics. Vegetation indices are primary tools for extracting phenological information; however, their relative accuracy and efficiency in marginal and complex environments like the mangroves of southern Iran require rigorous comparative evaluation. This study aimed to compare the performance of three indices: NDVI, SAVI, and NDPI, in assessing the phenological components—start of grow season (SOS), end of grow season (EOS), and length of grow season (LOS)—were extracted and analyzed over a 30-year period (1993–2023) across seven selected mangrove sites. A mixed-linear model in R software was employed to evaluate temporal trends of these events and to compare differences arising from various indices and regions. The results indicated that all three indices exhibited an upward trend over the past 30 years, suggesting a gradual increase in mangrove greenness and canopy density, and that the type of vegetation index did not have a significant impact ($P > 0.05$) on the phenological components. These findings provide a framework for more effective monitoring and management of mangrove ecosystems in Iran's coastal areas, facilitating the identification of regions with specific conservation or management needs.

Cite this article: Balouchestani Asl, A., Moradi, H., Abdollahi, S., Najjar Khodabakhsh, Z., & Pour Manafi, S. (2026). Comparative analysis of vegetation indices (NDVI, SAVI, NDPI) for assessing Phenological events of Mangrove forests in Southern Iran. *Journal of Natural Environment*, 79 (2), 407-425. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.415057.2917>



Introduction

Monitoring phenology at broad temporal and spatial scales using field data is difficult, time-consuming, and costly. Remote sensing, however, offers an efficient tool for continuous monitoring of vegetation cover over long-term periods. Vegetation indices derived from satellite data are among the most important tools for extracting phenological information, and numerous indices have been developed for vegetation monitoring. Despite this, most mangrove phenology studies have focused on Southeast Asia, Australia, and Latin America, with limited research conducted on the mangroves of the Middle East, particularly the southern coasts of Iran. The mangrove forests of southern Iran, predominantly composed of the *Avicennia marina* species, are among the country's most significant coastal ecosystems, extending along the coasts of the Persian Gulf and the Sea of Oman. These ecosystems are influenced by hot and arid climatic conditions, severe salinity fluctuations, tidal cycles, and limited freshwater resources. Despite the high importance of these forests, long-term remote sensing-based phenology studies in these areas are very limited, and no comprehensive study has yet been conducted to compare the performance of different vegetation indices in extracting the phenological components of the mangroves of southern Iran. Therefore, the main objective of this research is to investigate and compare the performance of three vegetation indices – NDVI, SAVI, and NDPI – in estimating the phenological components of the mangrove forests of southern Iran based on long-term time series. To this end, key phenological components, including the Start of Season (SOS), End of Season (EOS), and Length of Season (LOS), were extracted in seven mangrove habitats over the period from 1993 to 2023 and analyzed using a linear mixed-effects model.

Material and Methods

The mangrove forests of Iran are located along the southern coasts of the Persian Gulf and the Sea of Oman (25°10'–27°55' N, 51°25'–61°25' E). These areas have an arid climate with low annual rainfall (100–200 mm) and high average air temperatures (26–30 °C). Seven representative sites were selected within the distribution range across southern Iran, as these locations encompass the ecological and climatic diversity of Iran's mangroves, making them ideal for a comparative phenology study. In this research, a systematic and precise approach was employed for data collection and preprocessing using the Google Earth Engine (GEE) platform to ensure high-quality datasets with appropriate spatial alignment. Time series of surface reflectance (SR) images from Landsat satellites covering the period from 1993 to 2023 were utilized, including Landsat 5 (1993–2002) TM, Landsat 7 (2003–2012) ETM+, and Landsat 8 (2013–2023) OLI/TIRS, all with a spatial resolution of 30 meters. Vegetation indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), and the Normalized Difference Phenology Index (NDPI), were extracted to more accurately capture the seasonal and inter-annual dynamics of the mangrove forests. The phenological components under investigation were calculated using smoothed time series of the vegetation indices. The Start of Season (SOS) was defined as the date when the vegetation index exceeded 20% of the range between the minimum index value of the preceding period and the seasonal maximum. The End of Season (EOS) was identified as the date when the vegetation index decreased to 20% of the range between the post-season minimum and the seasonal maximum, using the same threshold criterion applied for SOS. The Peak of Season (POS) refers to the date when the vegetation index reached its maximum value between SOS and EOS, indicating the period of peak vegetation activity. The Length of Season (LOS) was calculated as the time difference between SOS and EOS and expressed in months. To compare the performance of the vegetation indices in estimating the phenological components of the mangrove forests, a linear mixed-effects model was used. The year was considered a random effect to control for the temporal autocorrelation of the data over the 30-year period. Analyses were performed in the R software environment using the lme4, lmerTest, and emmeans packages. To assess the significance of main and interaction effects, a Satterthwaite-based F-test (ANOVA) was employed. Furthermore, pairwise comparisons between regions and indices were conducted using the emmeans post-hoc test. The significance level for all tests was set at $P < 0.05$.

Results

The results showed that vegetation index type had no significant effect on any of the phenological components. Specifically, the index effect was non-significant for SOS ($P=0.82$), EOS ($P=0.89$), and LOS ($P=0.94$). This indicates that all three indices exhibit a similar temporal pattern in estimating phenological components. In contrast, the site effect was significantly different for all three phenological components. Significant differences among sites were observed for SOS ($P<0.0001$), EOS ($P<0.001$), and LOS ($P<0.0001$). These results indicate that the studied sites differ considerably in the timing of season onset, season termination, and growing season length. The interaction between index type and site was also non-significant for all three phenological variables ($P>0.87$). Therefore, the observed differences among sites are independent of index type, and the pattern of variation is similar across all indices.

Discussion

The results of this study demonstrated that the vegetation indices used provide relatively similar patterns of phenological changes in the mangrove forests of southern Iran, with no significant differences observed among them in estimating phenological components. In contrast, spatial variations among the studied sites played a more decisive role in the changes of the start of the season, end of the season, and length of the growing season, indicating the significant influence of environmental and climatic conditions on mangrove phenology. The results from the linear mixed-effects model corroborated this finding; the effect of vegetation index was non-significant across all phenological components, while the effect of the region was evaluated as highly significant in all analyses. This finding suggests that at the regional scale, environmental and geographical differences play a more crucial role in controlling the phenological behavior of mangroves compared to the type of vegetation index. It is recommended that future studies utilize Sentinel-2 data with higher spatial resolution, as well as integrate field, optical, and radar data. Additionally, combining machine learning models with climate data could further improve the accuracy of phenological component extraction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRedit authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

بررسی تطبیقی شاخص های پوشش گیاهی (NDVI, SAVI, NDPI) برای ارزیابی مؤلفه های فنولوژیک جنگل های مانگرویی جنوب ایران

آذین بلوچستانی اصل^۱ | حسین مرادی^۲ | صدیقه عبداللهی^۳ | زهرا نجار خدابخش^۴ | سعید پورمنافی^۵

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: azinballoochestani99@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hs.moradi@ut.ac.ir
۳. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: baharabdollahi94@gmail.com
۴. دانشکده منابع جنگلی، دانشگاه مین، ۵۷۵۵ ساختمان ناتینگ، اورونو، مین ۰۴۴۶۹-۵۷۵۵، ایالات متحده آمریکا. رایانامه: zahra.najjar@maine.edu
۵. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: spourmanafi@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱ کلیدواژه ها: چرخه فنولوژی مانگرو، سنجش از دور، شاخص های پوشش گیاهی، گونه حرا، مدل خطی آمیخته.	جنگل های مانگرو به عنوان یکی از مهم ترین اکوسیستم های ساحلی، نقشی کلیدی در پایداری محیط زیستی مناطق جنوبی ایران ایفا می کنند. بررسی الگوهای فنولوژیک این اکوسیستم ها، به ویژه از طریق سنجش از دور، امکان پایش پیوسته و کارآمد وضعیت سلامت و پویایی پوشش گیاهی را فراهم می کند. شاخص های پوشش گیاهی ابزارهای اصلی استخراج اطلاعات فنولوژیک محسوب می شوند، با این حال میزان دقت و کارآمدی نسبی آنها در محیط های حاشیه ای و پیچیده ای مانند مانگروهای جنوب ایران نیازمند ارزیابی تطبیقی دقیق است. این مطالعه با هدف مقایسه عملکرد سه شاخص NDVI، SAVI و NDPI در ارزیابی مؤلفه های فنولوژیک جنگل های مانگرویی جنوب ایران انجام شده است. بدین منظور، تغییرات سه مؤلفه اصلی فنولوژی شامل آغاز فصل رشد، پایان فصل رشد و طول فصل رشد طی بازه ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۳) در هفت منطقه مانگرویی منتخب استخراج و تحلیل شد. برای ارزیابی روند زمانی این مؤلفه ها و نیز مقایسه تفاوت های حاصل از شاخص ها و مناطق مختلف، از مدل خطی آمیخته در محیط نرم افزار R استفاده شد. نتایج نشان داد که هر سه شاخص مورد بررسی در طی ۳۰ سال گذشته روند صعودی داشته اند، که نشان دهنده افزایش تدریجی سبزیگی و تراکم پوشش گیاهی مانگروها است و نوع شاخص پوشش گیاهی تأثیر معنی داری ($P > 0.05$) بر مؤلفه های فنولوژیک ندارد. این یافته ها چارچوبی را برای پایش و مدیریت مؤثرتر اکوسیستم های مانگرو در مناطق ساحلی ایران فراهم می آورد و امکان شناسایی مناطق با نیازهای حفاظتی یا مدیریتی ویژه را تسهیل می کند.

استناد: بلوچستانی اصل، آذین؛ مرادی، حسین؛ عبداللهی، صدیقه؛ نجار خدابخش، زهرا؛ و پورمنافی، سعید (۱۴۰۵). بررسی تطبیقی شاخص های پوشش گیاهی (NDVI, SAVI, NDPI) برای ارزیابی مؤلفه های فنولوژیک جنگل های مانگرویی جنوب ایران. *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۲)، ۴۲۵-۴۰۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.415057.2917>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

فنولوژی گیاهی به مطالعه زمان‌بندی رخدادهای زیستی گیاهان نظیر آغاز رشد، گل‌دهی، خزان و پایان فصل رشد اطلاق می‌شود و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پاسخ اکوسیستم‌ها به تغییرات اقلیمی و محیطی به شمار می‌رود (Richardson et al., 2013). تغییرات در مؤلفه‌های فنولوژیک می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره پویایی اکوسیستم‌ها، چرخه کربن، بهره‌وری زیستی و واکنش پوشش گیاهی به تنش‌های محیطی فراهم کند. در دهه‌های اخیر، با تشدید تغییرات اقلیمی و افزایش دمای جهانی، پایش بلندمدت فنولوژی پوشش گیاهی اهمیت فزاینده‌ای یافته است (Gao et al., 2023). در میان اکوسیستم‌های ساحلی، جنگل‌های مانگرو از مهم‌ترین و حساس‌ترین زیست‌بوم‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان محسوب می‌شوند. این اکوسیستم‌ها علاوه بر نقش مهم در حفاظت سواحل، تثبیت رسوبات، ذخیره کربن و تنوع زیستی، نسبت به تغییرات اقلیمی، نوسانات سطح آب دریا، تغییرات شوری و تنش‌های محیطی بسیار حساس هستند (Alongi, 2021; 2022). از این‌رو، بررسی الگوهای فنولوژیک مانگروها می‌تواند در درک بهتر پویایی این اکوسیستم‌ها و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی نقش مهمی ایفا کند (Khodabakh et al., 2025). پایش فنولوژی در مقیاس‌های زمانی و مکانی وسیع با استفاده از داده‌های میدانی دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است (Nguyen et al., 2020). در این میان، سنجش‌ازدور به‌عنوان ابزاری کارآمد امکان پایش مستمر پوشش گیاهی را در دوره‌های زمانی بلندمدت فراهم ساخته است (Xue & Su, 2017). شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای از مهم‌ترین ابزارهای استخراج اطلاعات فنولوژیک محسوب می‌شوند و تاکنون شاخص‌های متعددی برای پایش پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند (Pastor-Guzman et al., 2018; Huang et al., 2022). در میان آنها، شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی^۱ یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در مطالعات فنولوژی است. با این حال، حساسیت NDVI به اثرات پس‌زمینه خاک و اشباع طیفی در تراکم‌های بالای پوشش گیاهی باعث توسعه شاخص‌های اصلاح‌شده‌ای نظیر SAVI و NDPI شده است (Giovos et al., 2021). مطالعات متعددی از شاخص‌های پوشش گیاهی برای بررسی فنولوژی اکوسیستم‌های مختلف استفاده کرده‌اند. Pastor-Guzman و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور نشان دادند که شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در استخراج الگوهای زمانی مانگروهای مکزیک عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. همچنین Tran و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه مروری جامع بیان کردند که اگرچه شاخص‌های متنوعی برای پایش مانگروها توسعه یافته‌اند، اما هنوز اجماع روشنی درباره برتری یک شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها وجود ندارد.

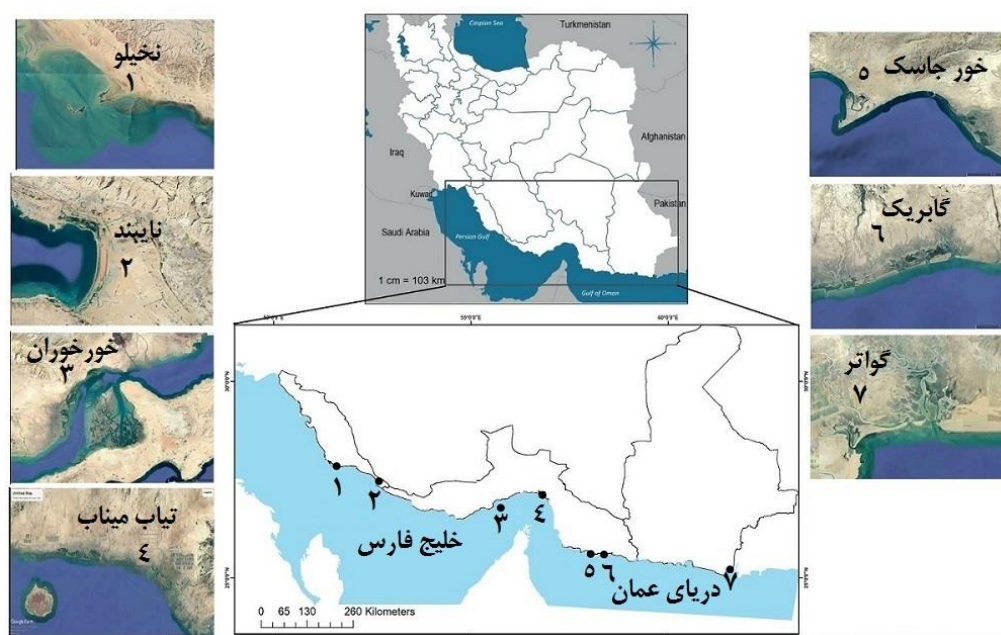
اگرچه در سال‌های اخیر مطالعاتی به بررسی فنولوژی مانگروهای ایران با استفاده از داده‌های سنجش از دور پرداخته‌اند، اغلب این پژوهش‌ها بر استخراج مؤلفه‌های فنولوژیک، تحلیل روندهای زمانی یا بررسی ارتباط آنها با متغیرهای اقلیمی متمرکز بوده‌اند. به‌عنوان مثال Khodabakhsh و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از سری‌های زمانی بلندمدت داده‌های ماهواره‌ای به بررسی پاسخ فنولوژیک گونه‌های *Rhizophora mucronata* و *Avicennia marina* نسبت به تغییرات اقلیمی پرداختند و حساسیت متفاوت گونه‌ها را نسبت به عوامل اقلیمی نشان دادند. با وجود این، ارزیابی آماری و مقایسه عملکرد شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در استخراج مؤلفه‌های فنولوژیک مانگروها، به‌ویژه در مقیاس چند رویشگاهی، همچنان محدود است. از آنجا که شاخص‌های پوشش گیاهی از نظر حساسیت به ساختار تاج‌پوشش، اثر پس‌زمینه خاک، شرایط رطوبتی و نویزهای طیفی تفاوت دارند، ارزیابی عملکرد آنها در اکوسیستم‌های مانگرو می‌تواند به انتخاب شاخص مناسب برای مطالعات بلندمدت فنولوژی کمک کند. بنابراین، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی و مقایسه عملکرد سه شاخص NDVI، SAVI و NDPI در استخراج مؤلفه‌های فنولوژیک جنگل‌های مانگرو جنوب ایران طی یک دوره ۳۰ ساله و ارزیابی پایداری نتایج آنها در رویشگاه‌های مختلف مانگرو است. برخلاف مطالعات پیشین که تمرکز اصلی آنها بر روندهای زمانی یا محرک‌های اقلیمی فنولوژی بوده است، پژوهش حاضر بر مقایسه آماری عملکرد شاخص‌ها در برآورد تاریخ شروع فصل رشد (SOS)^۲، تاریخ پایان فصل رشد (EOS)^۳ و طول فصل رشد

^۱Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)^۲Start of Growing Season^۳End of Growing Season

(LOS)^۴ تمرکز دارد. همچنین با استفاده از مدل خطی آمیخته، اثر شاخص، اثر سایت و اثر متقابل آنها به طور همزمان ارزیابی شده است تا میزان همگرایی یا تفاوت عملکرد شاخص‌ها در رویشگاه‌های مختلف مانگرو جنوب ایران مشخص شود.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه: جنگل‌های مانگرو ایران در سواحل جنوبی خلیج فارس و دریای عمان (۲۷°۵۵' - ۲۵°۱۰' شمالی، ۵۵°۱۰' - ۵۵°۵۵' شرقی) واقع شده‌اند. این مناطق دارای اقلیم خشک با بارندگی سالانه کم (۲۰۰-۱۰۰ میلی‌متر) و دمای متوسط هوای بالا (۲۶-۳۰ درجه سانتی‌گراد) هستند. آب‌های دریایی منجر به رطوبت بالا، نرخ تبخیر بالا و تغییرات محسوس در شوری می‌شوند (Milani, 2018). اگرچه جمعیت‌های متراکمی از مانگرو در اطراف جزیره قشم و بندر خمیر وجود دارد، اما مناطق دیگر شامل لکه‌های پراکنده هستند. در میان دو گونه شناسایی شده از مانگروها، گونه حرا (*Avicennia marina*) غالب است و در بیشتر مناطق استقرارهای تقریباً تک‌گونه‌ای را تشکیل می‌دهد، درحالی‌که گونه چنل (*Rhizophora mucronata*) محدود به جوامع مختلط در سیریک است (Mafi-Gholami et al., 2017). هفت مکان نماینده در محدوده پراکنش در سراسر جنوب ایران انتخاب شدند (شکل ۱): نخلیو و نایبند (استان بوشهر)، ذخیره‌گاه زیست‌کره خور خوران و تیاب-میناب (استان هرمزگان)، گابریک و جاسک (استان هرمزگان)، و خلیج گواتر (استان سیستان و بلوچستان). در مجموع، این مکان‌ها تنوع اکولوژیک و اقلیمی مانگروهای ایران را شامل می‌شوند؛ بنابراین برای مطالعه تطبیقی فنولوژی ایده‌آل هستند.



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی در جنوب ایران
Figure 1. Location of the study area in southern Iran

آماده‌سازی داده‌ها: در این پژوهش، رویکردی نظام‌مند و دقیق برای گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها با بهره‌گیری از پلتفرم گوگل ارث انجین^۵ به کار گرفته شد تا مجموعه داده‌هایی با کیفیت بالا و هم‌ترازی مکانی مناسب فراهم شود. سری‌های زمانی تصاویر بازتاب سطحی^۶ ماهواره‌های لندست طی دوره ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳، شامل لندست ۵ (۱۹۹۳-۲۰۰۲) TM، لندست ۷ (۲۰۱۲-۲۰۱۳)

⁴Length of Growing Season

⁵ Google Earth Engine (GEE)

⁶ Surface Reflection (SR)

۲۰۰۳) ETM+ و لندست ۸ (۲۰۱۳-۲۰۲۳) OLI/TIRS با تفکیک مکانی ۳۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. برای داده‌های لندست ۷، با وجود بروز خطای راه‌راه‌شدگی ناشی از خرابی Scan Line Corrector (SLC) در سال ۲۰۰۳، از الگوریتم ترکیبی پرشده (gap-filled composites) بهره‌گیری شد تا پوشش مکانی و زمانی پیوسته و قابل اعتماد تضمین شود. تمامی تصاویر بازتاب سطحی موجود (در مجموع ۲۶۶۰ تصویر) به‌صورت ماهانه ترکیب شدند و پیکسل‌های تحت تأثیر ابر و سایه با استفاده از باند QA_PIXEL در مجموعه داده‌های Collection 2 Level 2 ماسک گردید تا تنها مشاهدات عاری از اختلالات جوی حفظ شود. نتیجه این فرآیند، تولید یک سری زمانی منسجم، پیوسته و مناسب برای پایش تغییرات پوشش گیاهی بود. از این ترکیبات پیش‌پردازش‌شده، شاخص‌های پوشش گیاهی شامل شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده نسبت به خاک (SAVI) و شاخص اختلاف نرمال شده فنولوژی (NDPI) استخراج شد تا پویایی‌های فصلی و میان‌سالی جنگل‌های مانگرو با دقت بیشتری ثبت گردد. شاخص NDVI یکی از پرکاربردترین شاخص‌های مورد استفاده در مطالعات فنولوژی و پایش اکوسیستم‌های مانگرو محسوب می‌شود، در حالی که SAVI با هدف کاهش اثر پس‌زمینه خاک در مناطق با پوشش گیاهی تنک یا ناهمگن توسعه یافته است. اگرچه شاخص NDPI در ابتدا برای بهبود استخراج سیگنال‌های فنولوژیک و کاهش اثرات پس‌زمینه در برخی اکوسیستم‌ها معرفی شد، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این شاخص در اکوسیستم‌های ساحلی و مانگرویی نیز قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات فنولوژیک دارد (Cao et al., 2023; Jiang et al., 2025; Khodabakhsh et al., 2025). این چارچوب روش‌شناختی، با فراهم‌سازی داده‌هایی سازگار و قابل اتکا در بلندمدت، بنیانی مستحکم برای تحلیل تغییرات ساختاری و سلامت اکوسیستم‌های حرا طی سه دهه فراهم کرده است. جدول ۱ شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه را برای مطالعه چرخه‌های فنولوژی جنگل‌های مانگرو محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد.

جدول ۱- شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده در مطالعه فنولوژی جنگل‌های مانگروی جنوب ایران

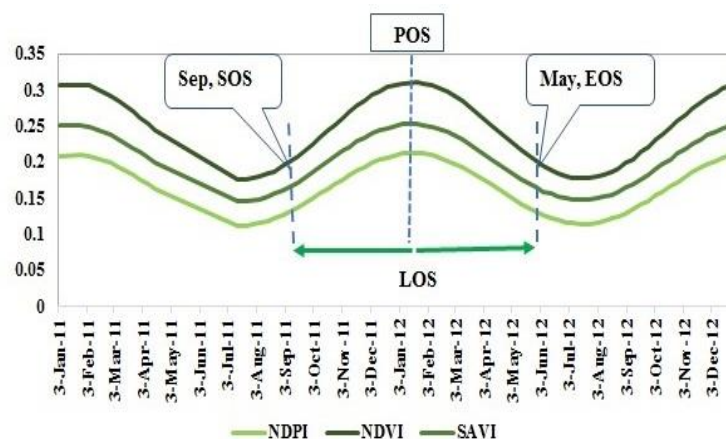
Table 1. Vegetation indices used in the study of phenology of mangrove forests in southern Iran

شاخص پوشش گیاهی	معادله	رفرنس
شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)	$NIR-R/NIR+R$	(Xue and Su 2017)
شاخص اختلاف نرمال شده فنولوژی (NDPI)	$NIR-(\alpha \times Red + (1-\alpha) \times SWIR)/NIR+(\alpha \times Red + (1-\alpha) \times SWIR)$	(Wang et al., 2017)
شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده نسبت به خاک (SAVI)	$(NIR-R) \times (1+L)/(NIR+R+L)$	(Vidican et al., 2023)

هموارسازی داده‌ها: داده‌های سری زمانی سنجش‌ازدور معمولاً با نویز ناشی از شرایط جوی، وجود آثرات ابری در زمان تصویربرداری مواجه هستند (Pastor-Guzman et al., 2018). از این‌رو، هموارسازی و بازسازی سری‌های زمانی به‌عنوان گامی ضروری برای رفع مشکلات مربوط به تداخل نویز و فقدان مشاهدات تلقی می‌شود. مجموعه‌ای از روش‌های هموارسازی همچون فیلترهای مبتنی بر پردازش سیگنال مانند Savitzky-Golay و Whittaker، و نیز رویکردهای برازش تابعی همچون تابع لجستیک دوگانه، تابع گاوسی متقارن، و تحلیل هارمونیک-به‌طور گسترده به‌کار گرفته شده‌اند (Cao et al., 2023). این روش‌ها برای کاهش نویز و بازسازی سیگنال زیربنایی به‌کار می‌روند و نقش مهمی در استخراج دقیق شاخص‌های پدیدارشناختی ایفا می‌کنند (Pastor-Guzman et al., 2018). با توجه به ناپیوستگی‌های موجود در داده‌ها، تحلیل هارمونیک مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد بر این فرض بنا شده است که سیگنال‌های تکرارشونده از جمله نوسانات فصلی و پدیدارشناختی قابل نمایش به‌صورت مجموعی از امواج پایه یا هارمونیک‌ها هستند، یعنی ترکیب خطی توابع سینوسی و کسینوسی (Adole et al., 2016). ترکیب این روش با الگوریتم Clinton (2016)، امکان تنظیم تعداد هارمونیک‌ها برای تولید سری‌های زمانی هموارشده را فراهم می‌کند و به‌طور مؤثری نویز ناشی از داده‌های پرت و مشاهدات تحت تأثیر شرایط نامساعد جوی حذف می‌شود. در فرآیند برازش هارمونیک، یک متغیر مستقل متشکل از مؤلفه‌های هارمونیک، زمان و یک جمله ثابت، به متغیر وابسته‌ای مرتبط می‌گردد که می‌تواند شامل باندهای منفرد یا شاخص‌های پوشش گیاهی باشد (Fawcett et al., 2017; Valderrama-

Landeros et al., 2021). در این مطالعه از یک هارمونیک سالانه^۷ شامل مؤلفه‌های سینوسی و کسینوسی استفاده شد. مدل هارمونیک از طریق رگرسیون خطی بین مؤلفه زمانی و متغیر وابسته برازش گردید و مقادیر هموارشده^۸ برای استخراج مؤلفه‌های فنولوژیک مورد استفاده قرار گرفتند. انتخاب یک هارمونیک به دلیل هدف مطالعه در بازسازی چرخه سالانه غالب پوشش گیاهی مانگرو و مطابق با مطالعات پیشین (Fawcett et al., 2017; Cao et al., 2023) انجام شد.

تخمین مؤلفه‌های فنولوژی: روش‌های متعددی برای استخراج اطلاعات فنولوژی از داده‌های سری زمانی جمع‌آوری شده از طریق شاخص‌های سنجش از دور استفاده شده است که شامل تکنیک آستانه، روش میانگین متحرک و تکنیک مشتق است (Cao et al., 2023). در این پژوهش، سری زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی سه دهه‌ای به ۲۹ چرخه یک‌ساله تقسیم شد و برای هر چرخه، چهار شاخص فنولوژی شروع دوره رشد، طول دوره رشد، پایان دوره رشد و نقطه اوج دوره رشد محاسبه گردید (شکل ۲). مؤلفه‌های فنولوژیک مورد بررسی با استفاده از سری‌های زمانی هموارشده شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه شدند. نتایج تخمین تاریخ‌های شروع و پایان فصل رشد در تمامی سایت‌های مورد مطالعه در طول دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۳-۱۹۹۳) نشان می‌دهد که رشد حرا عموماً بین اواسط سپتامبر و اوایل اکتبر آغاز می‌شود، در حالی که پایان چرخه رشد بین اواسط می و اوایل ژوئن رخ می‌دهد. SOS به عنوان تاریخی تعریف شد که در آن شاخص پوشش گیاهی از ۲۰٪ دامنه بین حداقل مقدار شاخص دوره پیشین و حداکثر فصلی فراتر رفت. به طور مشابه، EOS به عنوان تاریخی شناسایی شد که در آن شاخص پوشش گیاهی به ۲۰٪ دامنه بین حداقل پس از فصل و حداکثر فصلی کاهش یافت، با استفاده از همان معیار آستانه اعمال شده برای SOS، POS به تاریخ رسیدن شاخص پوشش گیاهی به حداکثر مقدار خود بین SOS و EOS اشاره دارد که نشان‌دهنده دوره حداکثر فعالیت پوشش گیاهی است (Li et al., 2020). LOS به عنوان تفاوت زمانی بین SOS و EOS محاسبه شد و برحسب ماه بیان گردید (Berman et al., 2020; Gong et al., 2024). برای دوره مشاهده ۳۰ ساله، داده‌های شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی حاصل از لندست که در ابتدا با فواصل ۱۶ روزه در دسترس بودند، به مقادیر ماهانه تجمیع شدند تا سازگاری زمانی تضمین شده و نویز در سیگنال فنولوژی کاهش یابد (Songsom et al., 2019).



شکل ۲- معیارهای فنولوژیکی شامل شروع فصل رشد (SOS)، اوج فصل رشد (POS)، پایان فصل رشد (EOS) و طول فصل رشد (LOS) برای گونه *A. marina* در تالاب خورخوران طی یک چرخه در طول سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲

Figure 2. Phenological metrics including start of season (SOS), peak of season (POS), end of season (EOS) and length of season (LOS) for *A. marina* species in Khorkhoran Wetland during a cycle for 2011 and 2012

تحلیل آماری: به منظور مقایسه عملکرد شاخص‌های پوشش گیاهی در برآورد مؤلفه‌های فنولوژیک جنگل‌های مانگرو، از مدل خطی آمیخته^۹ استفاده شد. این مدل به دلیل توانایی در تحلیل داده‌های تکرارشونده زمانی و لحاظ کردن همزمان اثرات ثابت و

⁷First-order harmonic

⁸Fitted values

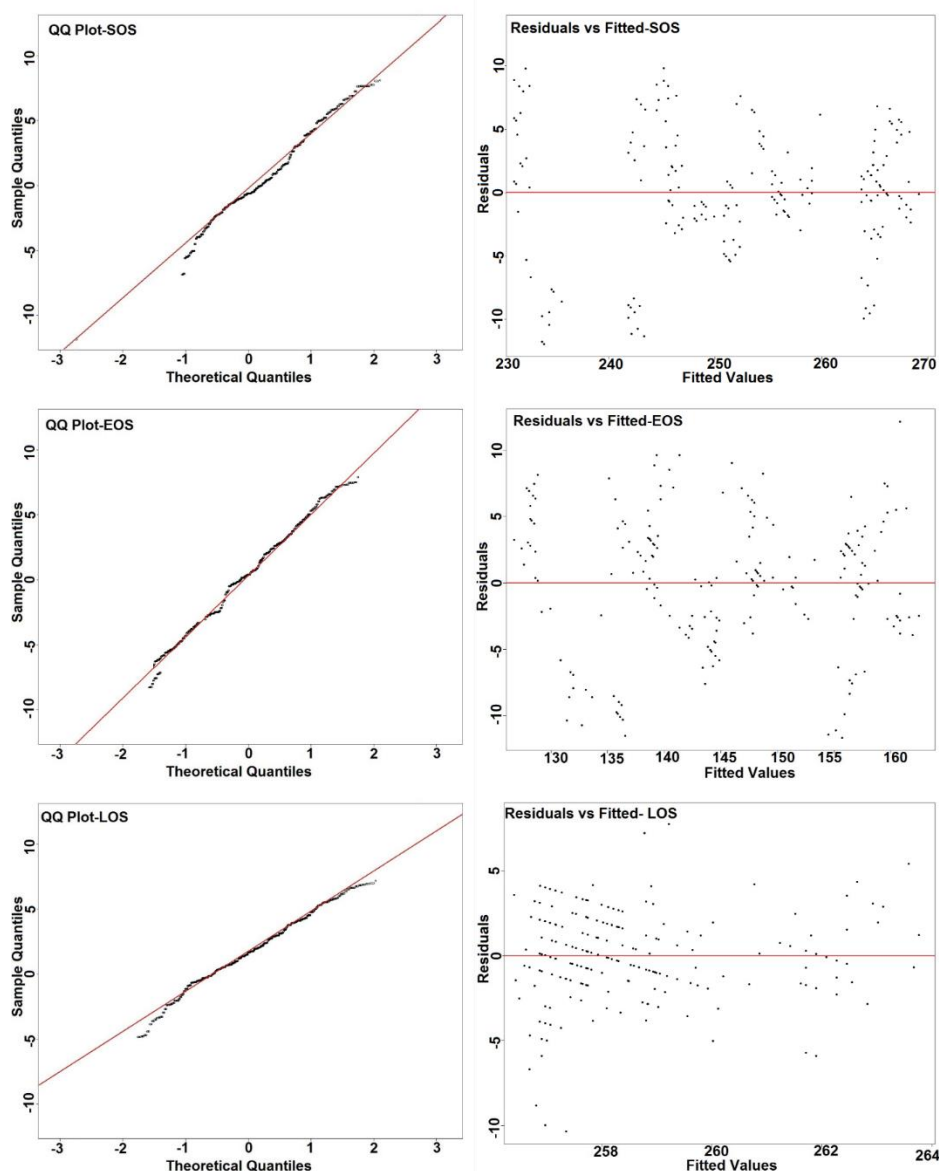
⁹Linear Mixed-Effects Model

تصادفی، یکی از روش‌های مناسب برای مطالعات فنولوژی مبتنی بر سری‌های زمانی محسوب می‌شود (Moore et al., 2019). در این مطالعه برای بررسی اختلاف بین شاخص‌ها و مناطق مورد مطالعه، مدل خطی آمیخته به صورت زیر تعریف گردید:

$$Y_{ijk} = \mu + I_i + S_j + (I \times S)_{ij} + b_k + \varepsilon_{ijk}$$

در این رابطه:

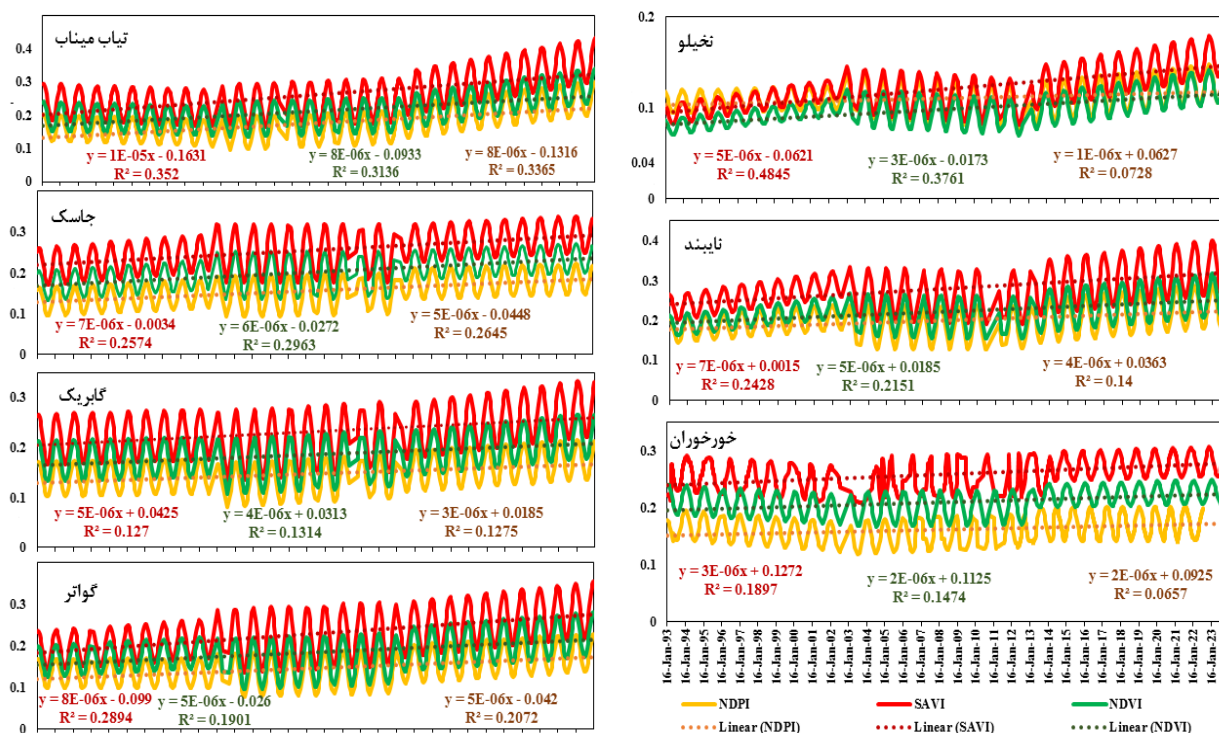
Y_{ijk} مقدار مؤلفه فنولوژیک مورد مطالعه (LOS, EOS, SOS) است؛ μ بیانگر میانگین کلی مؤلفه‌های فنولوژیک مورد مطالعه در کل مشاهدات است. I_i اثر ثابت نوع شاخص پوشش گیاهی و S_j اثر ثابت منطقه است؛ $(I \times S)_{ij}$ اثر متقابل شاخص و منطقه است؛ b_k بیانگر اثر تصادفی سال و ε_{ijk} خطای تصادفی مدل است. در این مطالعه، سال به عنوان اثر تصادفی در نظر گرفته شد تا وابستگی زمانی داده‌ها در طول دوره ۳۰ ساله کنترل گردد. تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار R و با استفاده از بسته‌های `lme4`، `lmerTest` و `emmeans` انجام شد. برای ارزیابی معنی‌داری اثرات اصلی و متقابل، از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) مبتنی بر روش Satterthwaite استفاده شد. همچنین به منظور مقایسه زوجی بین مناطق و شاخص‌ها، آزمون تعقیبی `emmeans` به کار رفت. سطح معنی‌داری در تمامی آزمون‌ها برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی مفروضات مدل خطی آمیخته، نمودارهای تشخیصی شامل نمودار Q-Q باقیمانده‌ها و نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده بررسی شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که باقیمانده‌ها انطباق قابل قبولی با توزیع نرمال داشته و الگوی سیستماتیک یا ناهمگنی آشکار واریانس مشاهده نشد (شکل ۳). همچنین کیفیت برازش مدل با استفاده از ضرایب تعیین حاشیه‌ای و شرطی ارزیابی شد.



شکل ۳- نمودار Q-Q باقیمانده‌ها (چپ) و نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده (راست) مؤلفه‌های فنولوژیک مورد بررسی
Figure 3. Q-Q plot of residuals (left) and plot of residuals versus fitted values (right) of the studied phenological metrics

یافته‌های پژوهش

شکل ۴ نتایج مربوط به نمودارهای سری زمانی ۳۰ ساله شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی را نشان می‌دهد. بر این اساس، شاخص‌های حاصل از تمامی مناطق گونه‌های حرا (*A. marina*) در جنوب ایران دارای الگوی بازتاب یکسان بوده و همچنین الگوی زمانی شاخص‌ها حاکی از تغییرات تدریجی مقادیر در طول دوره مطالعه است.



شکل ۴- نمودارهای سری زمانی شاخص‌های مورد بررسی برای گونه حرا (*A. marina*) در سایت‌های مطالعاتی

Figure 4. Time series graphs of the investigated indicators for the mangrove species (*A. marina*) in the study sites

نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که نوع شاخص پوشش گیاهی اثر معنی‌داری بر هیچ‌یک از مؤلفه‌های فنولوژیک ندارد (جدول ۲). به‌طوری که اثر شاخص برای SOS ($P=0/82$) برای EOS ($P=0/89$) و برای LOS ($P=0/94$) غیرمعنی‌دار بود. این یافته نشان می‌دهد که هر سه شاخص، الگوی زمانی مشابهی را در برآورد مؤلفه‌های فنولوژیک نمایش می‌دهند. در مقابل، اثر سایت برای هر سه مؤلفه فنولوژیک به‌طور معنی‌داری متفاوت بود. برای SOS ($P<0/001$)، EOS ($P<0/001$) و LOS ($P<0/001$) تفاوت معنی‌دار بین مناطق مشاهده شد. این نتایج بیانگر آن است که سایت‌های مورد مطالعه از نظر زمان‌بندی آغاز، پایان و طول دوره رشد، تفاوت قابل‌توجهی دارند. اثر متقابل نسبت شاخص به سایت نیز برای هر سه متغیر فنولوژیک غیرمعنی‌دار ($P>0/87$) بود. بنابراین، تفاوت‌های مشاهده‌شده بین مناطق مستقل از نوع شاخص بوده و الگوی تغییرات در همه شاخص‌ها مشابه است.

جدول ۲- نتایج آزمون ANOVA برای بررسی مؤلفه‌های فنولوژیک مربوط به شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی
Table 2. Results of ANOVA test to examine phenological metrics related to the vegetation indices under study

مؤلفه‌های فنولوژیک	پارامترهای مورد بررسی	مجموع مجذور مربعات	میانگین مجذور مربعات	F-value	P-value
شروع فصل رشد (SOS)	شاخص سایت نسبت شاخص به سایت	1.33×10^{-23} 81336.91	6.67×10^{-24} 13556.15	2.4×10^{-25} 488.26	0.82 <0.0001
پایان فصل رشد (EOS)	شاخص سایت نسبت شاخص به سایت	7.79×10^{-24} 62430.53	3.9×10^{-24} 10405.09	1.37×10^{-25} 367.24	0.89 <0.0001
طول دوره رشد (LOS)	شاخص سایت نسبت شاخص به سایت	1.3×10^{-23} 1741.106	6.52×10^{-24} 290.18	8.39×10^{-25} 37.3	0.94 <0.0001
	نسبت شاخص به سایت	2.86×10^{-22}	2.39×10^{-24}	3.07×10^{-24}	0.92

ضرایب تعیین حاشیه‌ای (mR^2) و شرطی (cR^2) در جدول ۳ ارائه شده است. برای شروع فصل رشد، ضریب تعیین حاشیه‌ای برابر با 0.803 و ضریب تعیین شرطی برابر با 0.822 محاسبه شد. این مقادیر بالا نشان‌دهنده آن است که اثرات ثابت مدل (شامل اثرات شاخص و سایت) توانسته‌اند بخش قابل توجهی (بیش از ۸۰٪) از تغییرات در شروع فصل رشد را تبیین کنند. در مورد پایان فصل رشد، ضریب تعیین حاشیه‌ای (0.744) و ضریب تعیین شرطی (0.780) به دست آمد. این نتایج نیز بیانگر آن است که مدل توانسته بخش عمده‌ای (بیش از ۷۴٪) از واریانس مربوط به EOS را از طریق اثرات ثابت توضیح دهد. اما برای طول دوره رشد، ضرایب تعیین به طور چشمگیری پایین تر بود. ضریب تعیین حاشیه‌ای تنها 0.24 و ضریب تعیین شرطی برابر با 0.303 محاسبه شد. این مقادیر نشان می‌دهد که اثرات ثابت مدل تنها قادر به توضیح حدود ۲۴ تا ۳۰ درصد از تغییرات در LOS بوده‌اند، که حاکی از نقش پررنگ‌تر عوامل ناشناخته یا اثرات تصادفی در تعیین طول فصل رشد است. به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که مدل خطی آمیخته، توانایی بالایی در تبیین واریانس مؤلفه‌های SOS و EOS دارد، در حالی که قدرت تبیین‌کنندگی آن برای LOS کمتر است.

جدول ۳- نتایج ضریب تعیین حاشیه‌ای و شرطی مؤلفه‌های فنولوژیک
Table 3. Results of marginal and conditional coefficient of determination of phenological metrics

مؤلفه‌های فنولوژیک	mR^2	cR^2
شروع فصل رشد (SOS)	0.803	0.822
پایان فصل رشد (EOS)	0.744	0.780
طول دوره رشد (LOS)	0.24	0.303

برای ارزیابی میزان همسویی و تفاوت‌های احتمالی بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، SAVI و NDPI در تعیین مؤلفه‌های فنولوژیک، مقایسه‌های دوتایی انجام شد (جدول ۴). مقادیر P-value در تمام مقایسه‌های دوتایی برای هر سه مؤلفه فنولوژیک بسیار بالا و بزرگتر از سطح معنی‌داری 0.05 بودند (عدم رابطه معنی‌دار بین شاخص‌ها). این نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های NDVI، SAVI و NDPI در تعیین مؤلفه‌های کلیدی فنولوژیک فصل رشد (شروع، پایان و طول دوره رشد) عملکردی بسیار مشابه دارند. این یافته بیانگر آن است که در زمینه مطالعه حاضر، انتخاب هر یک از این شاخص‌ها برای استخراج اطلاعات فنولوژیک، نتایج مشابهی را به همراه خواهد داشت. این همسویی می‌تواند ناشی از تشابه در نحوه محاسبه و حساسیت این شاخص‌ها به پارامترهای اصلی پوشش گیاهی باشد.

جدول ۴- نتایج مقایسه دوتایی مؤلفه‌های فنولوژیک شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی

Table 4. Results of pairwise comparison of phenological metrics of the studied vegetation indices

مؤلفه‌های فنولوژیک	هم‌سنجی	تخمین	خطای استاندارد	t.ratio	P-value
شروع فصل رشد (SOS)	NDPI- NDVI	-3.03×10^{-13}	0.506	-6.01×10^{-13}	0.92
	NDPI- SAVI	-2.3×10^{-13}	0.506	-5.01×10^{-13}	0.93
	NDVI- SAVI	1.26×10^{-23}	0.506	2.5×10^{-23}	0.92
پایان فصل رشد (EOS)	NDPI- NDVI	2.32×10^{-13}	0.511	4.54×10^{-13}	0.91
	NDPI- SAVI	2.01×10^{-13}	0.511	4.43×10^{-13}	0.91
	NDPI- SAVI	5.53×10^{-17}	0.511	1.08×10^{-16}	0.9
طول دوره رشد (LOS)	NDPI- NDVI	3.01×10^{-13}	0.268	1.12×10^{-13}	0.95
	NDPI- SAVI	3.21×10^{-13}	0.268	1.28×10^{-13}	0.92
	NDPI- SAVI	-3.16×10^{-28}	0.268	-1.17×10^{-27}	0.94

تحلیل مقایسه‌های دوتایی زمان شروع فصل رشد بین سایت‌های مورد مطالعه (جدول ۵)، ناهمگنی قابل‌توجهی را در پویایی زمانی پوشش گیاهی نشان داد. یافته کلیدی این تحلیل، وجود تفاوت‌های آماری بسیار معنی‌دار ($P < 0.001$) در زمان SOS بین اکثر جفت سایت‌ها بود که بر پراکندگی مکانی این پدیده تأکید دارد. تنها استثنای بارز در این الگو، مقایسه بین سایت‌های جاسک و خورخوران بود که هیچ تفاوت معنی‌داری ($P > 0.05$) در SOS نشان ندادند، که حاکی از شباهت زمانی در آغاز فصل رشد این دو منطقه است. این یافته‌ها، اهمیت بررسی مؤلفه‌های فنولوژیکی به‌صورت مکانی و در نظر گرفتن تمایزات منطقه‌ای را در مطالعات پوشش گیاهی برجسته می‌سازد. همچنین، مقادیر مثبت t.ratio نشان‌دهنده شروع دیرتر فصل رشد در سایت اول مقایسه نسبت به سایت دوم، و مقادیر منفی نشان‌دهنده شروع زودتر است.

تحلیل مقایسه‌های دوتایی زمان پایان فصل رشد (EOS) نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی قابل‌توجهی در میان سایت‌های مورد مطالعه است (جدول ۶). اکثر جفت سایت‌ها تفاوت‌های آماری بسیار معنی‌داری ($P < 0.001$) در EOS از خود نشان دادند که بر پراکندگی زمانی پایان فصل رشد تأکید دارد. نکته قابل توجه، شباهت پایدار بین سایت‌های جاسک و خورخوران بود که هیچ تفاوت معنی‌داری را در EOS نشان ندادند. این یافته، که در مورد SOS نیز مشاهده شده بود، بر همسویی فنولوژیکی این دو سایت دلالت دارد. همچنین، جفت سایت گواتر و نایند با مقدار P برابر با 0.064 ، اگرچه از نظر آماری در سطح 0.05 معنی‌دار بود، اما نسبت به سایر جفت‌های دارای تفاوت معنی‌دار، از شدت ضعیف‌تری برخوردار بود. این یافته، که معمولاً در تحلیل‌های مقایسه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد، نشان‌دهنده نزدیکی نسبی در زمان پایان فصل رشد این دو سایت نسبت به سایر جفت‌ها است.

جدول ۵- نتایج مقایسه دوتایی شروع فصل رشد (SOS) سایت‌های مورد بررسی

Table 5. Results of pairwise comparison of start of season (SOS) of the studied sites

هم‌سنجی	تخمین	خطای استاندارد	t.ratio	P-value
گابریک-گواتر	13.49	0.773	17.45	<0.0001
گابریک-جاسک	-8.39	0.773	-10.85	<0.0001
گابریک-خورخوران	-9.29	0.773	-12.02	<0.0001
گابریک-نخیلو	24.22	0.773	31.35	<0.0001
گابریک-نایبند	9.93	0.773	12.86	<0.0001
گابریک-تیاب میناب	4.52	0.773	5.84	<0.0001
گواتر-جاسک	-21.87	0.773	-28.30	<0.0001
گواتر-خورخوران	-22.77	0.773	-29.47	<0.0001
گواتر-نخیلو	10.74	0.773	13.90	<0.0001
گواتر-نایبند	-3.55	0.773	-4.59	<0.0001
گواتر-تیاب میناب	-8.97	0.773	-11.60	<0.0001
جاسک-خورخوران	-0.903	0.773	-1.17	0.905
جاسک-نخیلو	32.61	0.773	42.20	<0.0001
جاسک-نایبند	18.32	0.773	23.71	<0.0001
جاسک-تیاب میناب	12.90	0.773	16.69	<0.0001
خورخوران-نخیلو	33.52	0.773	43.37	<0.0001
خورخوران-نایبند	19.22	0.773	24.88	<0.0001
خورخوران-تیاب میناب	13.81	0.773	17.87	<0.0001
نخیلو-نایبند	-14.29	0.773	-18.49	<0.0001
نخیلو-تیاب میناب	-19.71	0.773	-25.51	<0.0001
نایبند-تیاب میناب	-5.42	0.773	-7.01	<0.0001

جدول ۶- نتایج مقایسه دوتایی پایان فصل رشد (EOS) سایت‌های مورد بررسی

Table 6. Results of pairwise comparison of end of season (EOS) of the studied sites.

هم‌سنجی	تخمین	خطای استاندارد	t.ratio	P-value
گابریک-گواتر	11.93	0.781	15.29	<0.0001
گابریک-جاسک	-8.09	0.781	-10.37	<0.0001
گابریک-خورخوران	-9.22	0.781	-11.82	<0.0001
گابریک-نخیلو	19.64	0.781	25.17	<0.0001
گابریک-نایبند	9.13	0.781	11.69	<0.0001
گابریک-تیاب میناب	3.64	0.781	4.67	<0.0001
گواتر-جاسک	-20.03	0.781	-25.66	<0.0001
گواتر-خورخوران	-21.16	0.781	-27.11	<0.0001
گواتر-نخیلو	7.71	0.781	9.88	<0.0001
گواتر-نایبند	-2.81	0.781	-3.59	0.0064
گواتر-تیاب میناب	-8.29	0.781	-10.62	<0.0001
جاسک-خورخوران	-1.13	0.781	-1.45	0.776
جاسک-نخیلو	27.74	0.781	35.54	<0.0001
جاسک-نایبند	17.22	0.781	22.07	<0.0001
جاسک-تیاب میناب	11.74	0.781	15.04	<0.0001
خورخوران-نخیلو	28.87	0.781	36.99	<0.0001
خورخوران-نایبند	18.35	0.781	23.51	<0.0001
خورخوران-تیاب میناب	12.87	0.781	16.49	<0.0001
نخیلو-نایبند	-10.52	0.781	-13.47	<0.0001
نخیلو-تیاب میناب	-16.01	0.781	-20.49	<0.0001
نایبند-تیاب میناب	-5.48	0.781	-7.02	<0.0001

تحلیل مقایسه‌های دوتایی طول فصل رشد (LOS) (در میان سایت‌های مورد مطالعه، ناهمگنی مکانی قابل توجهی را در این مؤلفه فنولوژیکی آشکار ساخت (جدول ۷). مقایسه‌های آماری نشان داد که در حالی که برخی جفت سایت‌ها شباهت‌های معنی‌داری در طول فصل رشد از خود نشان می‌دهند، بسیاری دیگر تفاوت‌های آماری چشمگیری دارند. به‌طور کلی، نخیلو با طولانی‌ترین فصل رشد در میان سایر سایت‌ها برجسته می‌شود. این امر با تفاوت‌های آماری بسیار معنی‌دار ($P < 0.0001$) در مقایسه با اکثر سایت‌های دیگر، از جمله گابریک (LOS بلندتر، $t.ratio = -11.59$)، گواتر (LOS بلندتر، $t.ratio = -7.09$) و ... تأیید می‌شود. این یافته نشان‌دهنده یک الگوی متمایز در سایت نخیلو به‌لحاظ مدت زمان دوره رشد است. در مقابل، برخی سایت‌ها شباهت‌های قابل توجهی را در طول فصل رشد نشان دادند. به‌عنوان مثال، هیچ تفاوت آماری معنی‌داری ($P < 0.05$) بین جفت سایت‌های گابریک و جاسک ($P < 0.97$)، گابریک و خورخوران ($P < 0.98$)، گابریک و تیاب میناب ($P < 0.97$)، جاسک و خورخوران ($P < 0.95$)، جاسک و تیاب میناب ($P < 0.97$)، خورخوران و تیاب میناب ($P < 0.94$) مشاهده نشد. این همسویی در طول فصل رشد بین این سایت‌ها، حاکی از وجود عوامل محیطی یا مدیریتی مشترک و مشابهی است که بر دوره رشد آنها تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، مقایسه گواتر با سایر سایت‌ها نیز الگوهای جالبی را آشکار کرد. گواتر فصل رشد کوتاه‌تری نسبت به جاسک (LOS کوتاه‌تر، $t.ratio = 4.65$) و خورخوران (LOS کوتاه‌تر، $t.ratio = 4.73$) دارد، اما فصل رشد بلندتری نسبت به گابریک (LOS بلندتر، $t.ratio = -4.49$) و نایبند (LOS بلندتر، $t.ratio = -2.05$) نشان می‌دهد. همچنین، تیاب میناب فصل رشد بلندتری نسبت به گواتر (LOS بلندتر، $t.ratio = 4.02$) دارد.

جدول ۷- نتایج مقایسه دوتایی طول فصل رشد (LOS) سایت‌های مورد بررسی

Table 7. Results of pairwise comparison of length of season (LOS) of the studied sit

هم‌سنجی	تخمین	خطای استاندارد	t.ratio	P-value
گابریک-گواتر	-1.84	0.409	-4.49	0.0002
گابریک-جاسک	0.064	0.409	0.158	0.97
گابریک-خورخوران	0.097	0.409	0.236	0.98
گابریک-نخیلو	-4.74	0.409	-11.59	<0.0001
گابریک-نایبند	-0.774	0.409	-1.89	0.49
گابریک-تیاب میناب	-0.193	0.409	-0.473	0.97
گواتر-جاسک	1.90	0.409	4.65	<0.0001
گواتر-خورخوران	1.93	0.409	4.73	<0.0001
گواتر-نخیلو	-2.90	0.409	-7.09	<0.0001
گواتر-نایبند	1.06	0.409	2.60	0.127
گواتر-تیاب میناب	1.64	0.409	4.02	0.001
جاسک-خورخوران	0.032	0.409	0.079	0.95
جاسک-نخیلو	-4.81	0.409	-11.75	<0.0001
جاسک-نایبند	-0.839	0.409	-2.05	0.38
جاسک-تیاب میناب	-0.258	0.409	-0.631	0.97
خورخوران-نخیلو	-4.84	0.409	-11.83	<0.0001
خورخوران-نایبند	-0.871	0.409	-2.13	0.34
خورخوران-تیاب میناب	-0.290	0.409	-0.709	0.94
نخیلو-نایبند	3.97	0.409	9.70	<0.0001
نخیلو-تیاب میناب	4.55	0.409	11.12	<0.0001
نایبند-تیاب میناب	0.581	0.409	1.42	0.79

مقادیر خطای استاندارد گزارش شده (۰/۷۷۳، ۰/۷۸۱، و ۰/۴۰۹) در مقایسه با میانگین روز سال برای مؤلفه‌های فنولوژیک مورد بررسی، کوچک و قابل قبول به نظر می‌رسند. این مقادیر نشان می‌دهند که تفاوت‌های مشاهده شده بین سایت‌ها (چه در شروع، پایان یا طول فصل رشد) با دقت خوبی برآورد شده‌اند و نتایج تحلیل آماری از اعتبار آماری بالایی برخوردار است.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده، الگوهای نسبتاً مشابهی از تغییرات فنولوژیک جنگل‌های مانگرو جنوب ایران ارائه می‌کنند و تفاوت معنی‌داری بین آنها در برآورد مؤلفه‌های فنولوژی مشاهده نشد. در مقابل، تفاوت‌های مکانی بین مناطق مورد مطالعه نقش تعیین‌کننده‌تری در تغییرات تاریخ شروع فصل رشد، پایان فصل رشد و طول فصل رشد داشت. اختلافات مشاهده شده میان سایت‌های مورد مطالعه احتمالاً بازتابی از تفاوت شرایط محیطی میان سواحل خلیج فارس و دریای عمان است. سواحل خلیج فارس معمولاً با دماهای بالاتر، تبخیر شدیدتر و شوری بیشتر آب مشخص می‌شوند، در حالی که سواحل دریای عمان تحت تأثیر شرایط اقیانوسی‌تر، نوسانات دمایی کمتر و رطوبت بالاتر قرار دارند (Mafi-Gholami et al., 2020a, 2020b). این تفاوت‌ها می‌توانند بر زمان آغاز رشد، طول دوره فعالیت فتوسنتزی و زمان پایان فصل رشد جنگل‌های مانگرو اثرگذار باشند. علاوه بر این، تفاوت در رژیم جزر و مد، دسترسی به آب و مواد غذایی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی هر منطقه می‌تواند بخشی از ناهمگنی مکانی مشاهده شده در مؤلفه‌های فنولوژیک را توضیح دهد (Richardson et al., 2013; Songsom et al., 2019; Wang et al., 2026). علاوه بر این، در خور آذینی علاوه بر گونه غالب *Avicennia marina*، حضور گونه *Rhizophora mucronata* نیز گزارش شده است (Khodabakhsh et al., 2025). از آنجا که گونه‌های مختلف مانگرو می‌توانند الگوهای رشد و پاسخ‌های فنولوژیک متفاوتی نسبت به شرایط محیطی داشته باشند، بخشی از تغییرات مشاهده شده در این منطقه ممکن است ناشی از تفاوت ترکیب گونه‌ای باشد. با این حال، از آنجا که گونه غالب در تمامی مناطق مورد مطالعه *Avicennia marina* بوده است، انتظار می‌رود الگوی کلی نتایج عمدتاً منعکس‌کننده رفتار فنولوژیک این گونه باشد. مطالعات انجام شده در مانگروهای جنوب شرق آسیا و استرالیا نیز نشان داده‌اند که تغییرات دما، بارش، شوری و جزر و مد مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده زمان‌بندی فنولوژی مانگروها هستند (Younes Cárdenas et al., 2020; Mandal et al., 2020). عدم مشاهده اختلاف معنی‌دار بین شاخص‌های NDVI، SAVI و NDPI را می‌توان به ویژگی‌های ساختاری و طیفی جنگل‌های مانگرو نسبت داد. اگرچه NDVI یکی از متداول‌ترین شاخص‌های مورد استفاده در مطالعات فنولوژی است، اما حساسیت آن به اثرات پس‌زمینه خاک و اشیاع طیفی در پوشش‌های متراکم گیاهی در مطالعات مختلف گزارش شده است (Gao et al., 2023). به همین دلیل شاخص‌هایی نظیر SAVI با هدف کاهش اثر خاک و NDPI برای بهبود تفکیک پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند. با این حال، نتایج این پژوهش نشان داد که در اکوسیستم مانگرو جنوب ایران، هر سه شاخص توانسته‌اند روندهای زمانی مشابهی از تغییرات فنولوژیک را ثبت کنند. این موضوع احتمالاً به دلیل یکنواختی نسبی ساختار تاج پوشش مانگروها و پاسخ طیفی مشابه آنها در مقیاس زمانی بلندمدت است. نتایج این مطالعه با یافته‌های Pastor-Guzman و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه مانگروهای مکزیک همخوانی دارد. آنها گزارش کردند که شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی در استخراج روندهای زمانی فنولوژی مانگرو عملکرد نسبتاً مشابهی داشته و تفاوت چشمگیری در تشخیص تغییرات فصلی مشاهده نمی‌شود. همچنین Tran و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه مروری خود بیان کردند که اگرچه شاخص‌های طیفی متنوعی برای پایش مانگروها معرفی شده‌اند، اما NDVI همچنان یکی از پایدارترین و پرکاربردترین شاخص‌ها در مطالعات بلندمدت فنولوژی مانگرو محسوب می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نیز این موضوع را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های کلاسیک نظیر NDVI همچنان می‌تواند اطلاعات قابل اعتمادی از روندهای فنولوژیک اکوسیستم‌های مانگرو ارائه دهد. از سوی دیگر، غیرمعنی‌دار بودن اثر متقابل شاخص و منطقه نشان داد که الگوی فضایی تغییرات فنولوژیک در تمامی شاخص‌ها تقریباً مشابه بوده است. به عبارت دیگر، اگرچه مناطق مختلف رفتار فنولوژیک متفاوتی داشتند، اما تمامی شاخص‌ها این تفاوت‌ها را به صورت مشابه ثبت کرده‌اند. این موضوع بیانگر پایداری عملکرد شاخص‌های مورد استفاده در پایش فضایی فنولوژی مانگروها است و نشان می‌دهد که انتخاب شاخص در مقایسه با شرایط محیطی منطقه اهمیت کمتری دارد. چنین

نتیجه‌ای در مطالعات سنجش‌ازدور اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که شاخص‌های رایج و ساده‌تر نیز می‌توانند برای تحلیل بلندمدت فنولوژی مانگروها مورد استفاده قرار گیرند (Chamberlain et al., 2021; Aji et al., 2023). همچنین، تحلیل قدرت تبیین مدل خطی آمیخته، بینشی عمیق‌تر در مورد قابلیت مدل در توضیح واریانس مؤلفه‌های فنولوژیک ارائه می‌دهد. قدرت بالای مدل در تبیین شروع و پایان فصل رشد نشان‌دهنده آن است که عوامل مورد استفاده در مدل (شاخص‌های زمانی و مکانی) توانسته‌اند بخش عمده‌ای از تغییرات در زمان شروع و پایان فصل رشد را توضیح دهند. اما قدرت تبیین کمتر برای طول دوره رشد حاکی از آن است که عوامل دیگری، که شاید در مدل به صراحت گنجانده نشده‌اند (مانند نوسانات شدید دمایی، رویدادهای اقلیمی خاص، یا تغییرات در منابع غذایی/آبی)، نقش مهم‌تری در تعیین طول فصل رشد ایفا می‌کنند و نیازمند بررسی‌های آتی هستند. این یافته، پنجره‌ای به‌سوی پیچیدگی‌های اکوفیزیولوژیکی مانگروها باز می‌کند و نشان می‌دهد که مدل‌سازی رشد آنها فراتر از داده‌های صرف سنجش از دور، نیازمند در نظر گرفتن عوامل محیطی چندگانه است. در مجموع، این یافته‌ها بر اهمیت درک تفاوت‌های مکانی در اکوسیستم‌های مانگرو و ضرورت اتخاذ رویکردهای مدیریتی متناسب با شرایط هر منطقه تأکید دارند.

با وجود مزایای قابل توجه داده‌های لندست در فراهم‌کردن سری‌های زمانی بلندمدت، استفاده از این داده‌ها دارای محدودیت‌هایی نیز است که می‌تواند بر نتایج فنولوژیک تأثیر بگذارد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، قدرت تفکیک مکانی متوسط (۳۰ متر) تصاویر لندست است که در اکوسیستم‌های ساحلی و نوارهای باریک مانگرو ممکن است منجر به اختلاط طیفی پیکسل‌های مانگرو با آب، رسوبات ساحلی و سایر پوشش‌های مجاور شود. این موضوع به‌ویژه در مناطق با پراکنش لکه‌ای مانگرو می‌تواند بر دقت شاخص‌های پوشش گیاهی اثرگذار باشد. علاوه بر این، پوشش ابری و شرایط جوی مناطق ساحلی جنوب ایران، به‌ویژه در برخی ماه‌های سال، می‌تواند موجب ایجاد نویز در سری‌های زمانی و کاهش تعداد مشاهدات قابل استفاده شود. اگرچه در این پژوهش از سری‌های زمانی بلندمدت برای کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت استفاده شد، اما همچنان احتمال وجود عدم قطعیت در برخی تاریخ‌های فنولوژیک وجود دارد. از سوی دیگر، شاخص‌های پوشش گیاهی اپتیکی مورد استفاده عمدتاً بازتاب طیفی تاج پوشش را ثبت می‌کنند و ممکن است نسبت به تغییرات ساختاری زیر تاج پوشش یا تغییرات هیدرولوژیک حساسیت محدودی داشته باشند. یکی دیگر از محدودیت‌های این پژوهش، نبود داده‌های میدانی بلندمدت فنولوژی مانگرو در سواحل جنوبی ایران برای اعتبارسنجی مستقیم تاریخ‌های SOS، EOS و LOS بود. با این حال، الگوهای زمانی استخراج‌شده در این مطالعه با نتایج گزارش‌شده توسط Khodabakhsh و همکاران (۲۰۲۵) سازگاری قابل‌توجهی نشان دادند؛ به‌طوری که در هر دو مطالعه، آغاز فصل رشد در اواخر تابستان و اوایل پاییز (سپتامبر) و پایان فصل رشد در اواخر بهار (مه) مشاهده شد. این همخوانی، اعتمادپذیری نسبی نتایج حاصل از سری‌های زمانی سنجش از دور را تقویت می‌کند، هرچند استفاده از داده‌های میدانی و مشاهدات فنولوژیک زمینی در مطالعات آینده برای اعتبارسنجی مستقیم ضروری است. همچنین، تمرکز بر گونه *A. marina* و تأثیر احتمالی شرایط نوری و جزر و مد، نیاز به بررسی‌های جامع‌تر را برجسته می‌سازد. با وجود این محدودیت‌ها، استفاده از داده‌های لندست به‌دلیل تداوم زمانی طولانی، پوشش مناسب و دسترسی رایگان، همچنان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تحلیل روندهای بلندمدت فنولوژی در اکوسیستم‌های مانگرو به‌شمار می‌رود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از داده‌های Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی بالاتر و همچنین ترکیب داده‌های میدانی، اپتیکی و راداری، همچنین، تلفیق مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های اقلیمی برای بهبود دقت استخراج مؤلفه‌های فنولوژیک استفاده شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از سری‌های زمانی بلندمدت سه شاخص پوشش گیاهی NDVI، SAVI و NDPI، مؤلفه‌های فنولوژیک جنگل‌های مانگرو جنوب ایران را طی دوره ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳ مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که هر سه شاخص عملکرد بسیار مشابهی در برآورد تاریخ شروع فصل رشد، پایان فصل رشد و طول فصل رشد دارند و اختلاف معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد. در مقابل، تفاوت بین مناطق مختلف بسیار معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تأثیر غالب شرایط محیطی و مکانی بر الگوهای

فنولوژیک مانگروها است. این یافته‌ها بیانگر آن است که تغییرات فنولوژی در اکوسیستم‌های مانگرو جنوب ایران بیشتر تحت تأثیر عوامل اقلیمی و هیدرولوژیک منطقه‌ای قرار دارد تا نوع شاخص پوشش گیاهی مورد استفاده. بر این اساس می‌توان گفت که برای پایش بلندمدت فنولوژی مانگروهای منطقه، استفاده از شاخص‌های ساده‌تر همچون NDVI نیز کافی است، مگر برای مطالعات دقیق‌تر که به تفکیک ظریف‌تر نیاز داشته باشند. نتایج این پژوهش می‌تواند در پایش بلندمدت اکوسیستم‌های ساحلی و مدیریت حفاظتی جنگل‌های مانگرو مورد استفاده قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرات سازنده و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Adole, T., Dash, J., Atkinson, P.M., 2016. A systematic review of vegetation phenology in Africa. *Ecological Informatics* 34, 117-128.
- Aji, M.A.P.; Kamal, M., Farda, N.M., 2023. Mangrove species mapping through phenological analysis using random forest algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 30(4), 100978.
- Alongi, D., 2021. Responses of mangrove ecosystems to climate change in the anthropocene. In: Rastogi, R.P., Phulwaria, M., Gupta, D.K. (Eds.), *Mangroves: ecology, biodiversity and management*, Springer, Singapore, Singapore. Pp. 201-224.
- Alongi, D., 2022. Impacts of climate change on blue carbon stocks and fluxes in mangrove forests. *Forests* 13(2), 149.
- Berman, E.E., Graves, T.A., Mickle, N.L., Merkle, J.A., Johnston, A.N., Chong, G.W., 2020. Comparative quality and trend of remotely sensed phenology and productivity metrics across the Western United States. *Remote Sensing* 12(16), 2538.
- Cao, J., Xu, X., Zhuo, L., Liu, K., 2023. Investigating mangrove canopy phenology in coastal areas of China using time series Sentinel-1/2 images. *Ecological Indicators* 154(1), 110815.
- Chamberlain, D.A., Phinn, S.R., Possingham, H.P., 2021. Mangrove forest cover and phenology with Landsat dense time series in Central Queensland, Australia. *Remote Sensing* 13 (15), 3032.
- Clinton, N., 2016. Time Series Analysis in Earth Engine. Retrieved from <https://developers.google.com/earth-engine>. (Accessed 11th February 2024)
- Fawcett, D., Leiterer, R., Heisig, H., Wulf, H., Kellenberger, T., Joerg, P.C., 2017. Google Earth Engine Product Prototypes. Retrieved from <https://developers.google.com/earth-engine>. (Accessed 24th March 2024)

- Gao, X., McGregor, I.R., Gray, J.M., Friedl, M.A., Moon, M., 2023. Observations of satellite land surface phenology indicate that maximum leaf greenness is more associated with global vegetation productivity than growing season length. *Global Biogeochemical Cycles* 37(3), e2022GB007462.
- Giovos, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N., Prioivolou, A., 2021. Remote sensing vegetation indices in viticulture: A critical review. *Agriculture* 11(5), 457.
- Gong, Z., Ge, W., Guo, J., Liu, J., 2024. Satellite remote sensing of vegetation phenology: Progress, challenges, and opportunities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 217, 149-164.
- Huang, F., Xia, X., Huang, Y., Lv, S., Chen, Q., Pan, Y., Zhu, X., 2022. Comparison of Winter Wheat Extraction Methods Based on Different Time Series of Vegetation Indices in the Northeastern Margin of the Qinghai–Tibet Plateau: A Case Study of Minhe, China. *MDPI* 14 (2), 343.
- Jiang, R., Shi, C., Tian, J., 2025. Assessment of optical vegetation indices for characterization of mangrove phenology. *Ecological Indicators* 179, 114260.
- Khodabakhsh, Z. N., Moradi, H., Rahimzadeh-Bajgiran, P., Pourmanafi, S., Ahmadi, M. 2025. A 30-year phenological study of mangrove forests at the species level as a function of climatic drivers using multispectral remote sensing satellites. *Ecological Indicators* 178, 114038
- Li, P., Zhu, Q., Peng, C., Zhang, J., Wang, M., Zhang, J., Ding, J., Zhou, X., 2020. Change in autumn vegetation phenology and the climate controls from 1982 to 2012 on the Qinghai–Tibet Plateau. *Frontiers in Plant Science* 15(10), 1677.
- Mafi-Gholami, D., Jaafari, A., Zenner, E.K., Kamari, A.N., Bui, D.T., 2020a. Vulnerability of coastal communities to climate change: Thirty-year trend analysis and prospective prediction for the coastal regions of the Persian Gulf and Gulf of Oman. *Science of the Total Environment* 1(741), 140305.
- Mafi-Gholami, D., Mahmoudi, B., Zenner, E.K., 2017. An analysis of the relationship between drought events and mangrove changes along the northern coasts of the Persian Gulf and Oman Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 199, 141-151.
- Mafi-Gholami, D., Zenner, E.K., Jaafari, A., 2020b. Mangrove regional feedback to sea level rise and drought intensity at the end of the 21st century. *Ecological Indicators* 110, 105972.
- Mandal, M. S.H., Kamruzzaman, M., Hosaka, T., 2020. Elucidating the phenology of the Sundarbans mangrove forest using 18-year time series of MODIS vegetation indices. *Tropics* 29(2), 41-55.
- Milani, A.S., 2018. Mangrove forests of the Persian Gulf and the Gulf of Oman. In: Makowski, C., Finkl Cham, C.W. (Eds.), *Threats to mangrove forests: hazards, vulnerability, and management*. Springer, Amsterdam, Nederland. pp. 53-75
- Moore, R., Casale, F.P., Jan Bonder, M., Horta, D., Franke, L., Barroso, I., Stegle, O., 2019. A linear mixed-model approach to study multivariate gene–environment interactions. *Nature Genetics* 51(1), 180-186.
- Nguyen, M.D., Baez-Villanueva, O.M., Bui, D.D., Nguyen, P.T., Ribbe, L. 2020. Harmonization of Landsat and Sentinel 2 for Crop Monitoring in Drought Prone Areas: Case Studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). *Remote Sensing* 12(2), 281.
- Pastor-Guzman, J., Dash, J., Atkinson, P.M., 2018. Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. *Remote Sensing of Environment* 205, 71-84.
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., Toomey, M., 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology* 169(D24), 156–173.
- Songsom, V., Koedsin, W., Ritchie, R.J., Huete, A., 2021. Mangrove phenology and water influences measured with digital repeat photography. *Remote Sensing*, 13(2), 307.
- Tran, T.V., Reef, R., Zhu, X., 2022. A review of Spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing* 14(19), 4868.
- Valderrama-Landeros, L., Flores-Verdugo, F., Rodríguez-Sobreyra, R., Kovacs, J.M., Flores-de-Santiago, F., 2021. Extrapolating canopy phenology information using Sentinel-2 data and the Google Earth Engine platform to identify the optimal dates for remotely sensed image acquisition of semiarid mangroves. *Journal of Environmental Management* 1(279), 111617.

- Vidican, R., Mălinaş, A., Ranta, O., Moldovan, C., Marian, O., Gheţe, A., Ghiş, C.R., Popovici, F., Cătunescu, G.M., 2023. Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: a critical review. *Agronomy* 13(12), 3040.
- Wang, C., Chen, J., Wu, J., Tang, Y., Shi, P., Black, T.A., 2017. A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 196, 1-12.
- Wang, Y., Liu, Q., Zhu, Y., Wen, W., Yang, S., Gong, M., 2026. Mangrove Phenology from Scale, Data and Species Perspectives. *Ecology and Evolution* 16(1), e72788.
- Xue, J., Su, B., 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors* 2017(1), 1353691.
- Younes Cárdenas, N., Joyce, K.E., Maier, S.W., 2020. A novel approach to modelling mangrove phenology from satellite images: A case study from northern Australia. *Remote Sensing* 12(24), 4008.