

## **Investigating the phenology changes of three plant species in different ecosystems using radar and optical data**

Morteza Sharif<sup>1</sup>, Sara Attarchi<sup>2\*</sup>, Ataollah Abdollahi Kakroudi<sup>3</sup>.

1- M.Sc. Student in Remote Sensing and GIS, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor Department of Remote Sensing and GIS, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Associate Professor Department of Remote Sensing and GIS, University of Tehran, Tehran, Iran

**Received: 28 December 2021**

**Accepted: 27 April 2022**

### **Extended Abstract**

#### **Introduction**

The Earth's ecosystems play an important role in regional and global climate. Most natural vegetation covers change through the year- as they are influenced by the seasons. In vegetation studies, different types of remote sensing images such as optics and synthetic aperture radar (SAR) have been used in different scales from leaf area to global scale. These images provide data that is difficult to access through other methods such as field surveys. Remote sensing sensors capture images from the Earth surfaces with an adequate spatial and temporal resolution for the environmental studies. In remote sensing approaches, the study of the phenological cycle (the study of plant life cycles and the way is affected by weather) is mainly based on changes in reflectance values in different spectral bands of optic sensors or vegetation indices (VI), such as normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI), and soil-adjusted vegetation index (SAVI). Spectral indices have been widely used to monitor the seasonal cycle of vegetation photosynthesis over the past decades. Many of these studies have reported promising results. SAR systems can capture images in all weather conditions and overcome the limitation of optic sensors in cloudy weather. Increased access to SAR images broadens the image application in vegetation studies. SAR sensors operate at a microwave range of electromagnetic spectrum and are able to penetrate more in vegetation canopy. In this study, the efficiency of Landsat 8, Sentinel-2, and Sentinel-1 images in monitoring vegetation phenological cycle have been verified. For that, three regions with different vegetation types including mangrove forests, woodland, and Shadegan date palms in Iran have been studied.

#### **Methodology**

All available Landsat 8, Sentinel-2, and Sentinel-1 images in 2017 have been acquired. The Landsat 8 and Sentinel-2 images have been pre-processed. NDVI, EVI, and SAVI have been calculated from corresponding optical bands. Field survey was not possible at the study areas, therefore, sample points have been chosen by the help of high-resolution Google Earth images. For that, archive Google Earth images with the acquisition date close to the acquisition date of images have been used to confirm the presence the vegetation covers at the specific location. The NDVI, EVI, and SAVI values have been extracted in the location of sample points. The Sentinel-1 images have been processed; speckle effect has been minimized and radiometric

---

\*. Corresponding Author (Email: [satarchi@ut.ac.ir](mailto:satarchi@ut.ac.ir))

terrain corrections have been implemented by means of digital elevation model (DEM). Median filter with 5\*5 window size has been applied. Median Filter has been chosen, because it is not affected by very high or low DN values and it is one of the efficient filter in minimizing speckle effect in SAR images. Then, digital number (DN) values have been converted into backscattering coefficient in dB. Backscattering responses in VV (vertical-vertical) and VH (vertical-horizontal) polarimetric bands have been extracted at the same sample location. The extracted NDVI, EVI, SAVI, VH, and VV values on different days of the year (DOY) have been separately analyzed for each study site.

### **Results and discussion**

In woodlands, EVI and SAVI indices in comparison to NDVI are more compatible with natural phenological cycles. However, optical images were not available for the whole year, therefore the changes of optical indices cannot be surveyed completely over the year. The changes of backscattering values follow the natural trend of vegetation cover, however, optical indices match better with the natural cycle. The growth cycle of woodlands is affected by temperature and rainfall variation; therefore, it will change in different years.

The changes in spectral curves in date palms show that spectral indices present the initial steps of the growth cycles better than the final steps. Few optical images were available because there was cloud cover in this area. Spectral indices do not follow the last stages of natural phenological cycles. In this stage, backscattering values increase due to the increased volume scattering of the trees, therefore radar images are more efficient in presenting the last part of phenological cycles of date palms in comparison to optical images. Spectral indices are sensitive to the greenness of the leaves; in this stage, no substantial changes in vegetation greenness occur, therefore the spectral indices do not change accordingly.

Mangrove forests have specific phenological cycles and are affected more by environmental conditions. Both spectral indices and backscattering values follow the natural trend of this kind of vegetation.

VH backscattering values are more compatible with spectral indices in comparison to VV backscattering values. Spectral indices and VH backscattering values follow the natural seasonal changes of vegetation especially in deciduous vegetation such as woodlands. This matches with previous studies. The highest values of backscattering are observed in the time that vegetation cover reaches the highest amount of biomass. EVI and SAVI trends are more similar to the backscattering values trend in comparison to NDVI values. This study only considers images captured during one year (2017). Vegetation cover is influenced by seasonal, gradual, and sudden changes, therefore monitoring of vegetation in a longer period and shorter revisit time will provide complete monitoring of vegetation growth cycles.

### **Conclusion**

Backscattering values in the cross-polarized VH (in comparison to the VV band) band show more sensitivity to vegetation changes over the year and are therefore more suitable for monitoring the annual growth cycle of plants. Among the optics indices, EVI and SAVI have shown more acceptable results since their variations are more consistent with the natural phenological cycle. In an aquatic ecosystem where mangrove forest grows, SAR responses show promising results as they can better represent the phenological cycle in comparison to spectral reflectance or vegetation indices. The results of this study show that backscattering responses at C-band follow the natural vegetation's phenological cycle and can be used in vegetation monitoring in these three ecosystems. The results of this study can be further used to identify vegetation phenological stages in similar ecosystems. Additional studies are necessary to generalize these results to other areas.

**Keywords:** Sentinel-1, OLI, phenology, vegetation.

## بررسی تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی در سه اکوسیستم مختلف با استفاده از تصاویر راداری و اپتیک

مرتضی شریف - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
سارا عطارچی<sup>۱</sup> - استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
عطاءاله عبداللهی کاکرودی - دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷

### چکیده

امروزه، تصاویر ماهواره‌ای فرصتی کم‌نظیر در بررسی تغییرات فنولوژی پوشش‌های گیاهی فراهم کرده است. تحقیق حاضر با هدف بررسی کارایی تصاویر رادار قطبی سنتینل-۱ در دو قطبش VV و VH و تصاویر اپتیک (لندست-۸ و سنتینل-۲) برای پایش تغییرات فنولوژی گیاهی بر روی سه منطقه با شرایط محیطی و اکوسیستمی مختلف در جنوب و جنوب غرب ایران (نخل‌های منطقه شادگان، جنگل‌های حرا، و بیشه‌زار) در سال ۲۰۱۷ انجام گرفته است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که شاخص‌های طیفی گیاهی بهتر از ضرایب بازپخش راداری چرخه فنولوژی و پویایی فصلی پوشش‌های گیاهی را نمایش می‌دهند. اما، در عین حال، ضریب بازپخش راداری در قطبش VH نیز قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات گیاهان نشان می‌دهد. تغییرات قطبش VH نسبت به قطبش VV با تغییرات شاخص‌های گیاهی شامل EVI، SAVI، و NDVI تطابق بیشتری دارد. نتایج همچنین بیانگر این مطلب است که شاخص SAVI و EVI نسبت به NDVI روند مراحل اولیه فنولوژیکی را برای بیشه‌زارها و نخل‌های شادگان به واقعیت زمینی نزدیک‌تر نشان می‌دهد. در صورتی که ضرایب بازپخش راداری در قطبش VH تصاویر سنتینل-۱ تغییرات سالیانه جنگل‌های حرا را در مقایسه با شاخص‌های پوشش گیاهی کامل‌تر نمایش می‌دهد. به‌طور کلی، می‌توان گفت، تصاویر راداری توانایی جای‌گزینی در شرایط در دسترس نبودن تصاویر اپتیک را دارند.

واژگان کلیدی: سنتینل-۱، لندست-۸، شاخص‌های پوشش گیاهی، SAVI، EVI.

## مقدمه

اکوسیستم‌های مختلف کره زمین در تنظیم آب و هوای منطقه‌ای و جهانی نقش ویژه‌ای دارند (باروز و همکاران، ۲۰۱۱؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، اکوسیستم‌ها خود به علت تفاوت‌های آب و هوایی و پوشش‌های گیاهی شرایط متفاوتی دارند (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پیائو و همکاران، ۲۰۲۰). اغلب پوشش گیاهی محیط‌های طبیعی در طول سال با تأثیرپذیری از فصل‌ها تغییر می‌کنند (ریچاردسون و همکاران، ۲۰۱۸). این تأثیرات بسیاری از فرایندهای اکوسیستم گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که تغییر در چرخه فنولوژیکی گیاهان از جمله این تغییرات است. چرخه فنولوژیکی پوشش‌های گیاهی واقع در عرض‌های جغرافیایی میانه تا عرض‌های بالا در پاسخ به این تغییرات آب و هوایی حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند (لو و همکاران، ۲۰۱۸؛ بویتن‌ورف و همکاران، ۲۰۱۵؛ پیائو و همکاران، ۲۰۲۰). در اقلیم‌های مختلف چرخه فنولوژیکی گیاهان تحت تأثیر عوامل مختلف دچار تغییر می‌شود. در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تغییرات میزان آب در دسترس گیاه مهم‌ترین عاملی است که زمان وقایع فنولوژیکی گیاهان را تعیین می‌کند (کریستیان و همکاران، ۲۰۱۵؛ فرانکی و همکاران، ۱۹۷۴؛ ریچ و بورچارت، ۱۹۸۴؛ مورفی و لیاگو، ۱۹۸۶). در مطالعات پوشش گیاهی از انواع متفاوت تصاویر سنجش از دور اپتیک و رادار قطبی در مقیاس‌های مختلف از سطح برگ تا مقیاس جهانی استفاده شده است (فیلد و همکاران، ۱۹۹۵؛ چمبرز و همکاران، ۲۰۰۷؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰)، زیرا این تصاویر داده‌هایی فراهم می‌کنند که دستیابی به آن از طریق روش‌های دیگر دشوار و مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است (فیلد و همکاران، ۱۹۹۵؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰). توسعه سنجنده‌های راداری و افزایش دسترسی به این تصاویر سبب استفاده روزافزون در مطالعات پوشش‌های گیاهی شده است. سنجنده‌های رادار قطبی دو برتری عمده نسبت به سنجنده‌های اپتیک دارند: اول آنکه این سنجنده‌ها به دلیل فعالیت در طول موج بلندتر نسبت به محدوده مرئی طیف الکترومغناطیس قابلیت نفوذ<sup>۱</sup> بیشتری در تاج پوشش گیاهی دارند (فلورس اندرسون و همکاران، ۲۰۱۹)؛ در نتیجه بسته به طول موج اطلاعات کامل‌تری از ساختار پوشش‌های گیاهی را ثبت می‌کنند. علاوه بر این، این سنجنده‌ها قادرند در شب و همچنین شرایط ابری و مه از سطح زمین تصویربرداری کنند (ریچاردز، ۲۰۰۹). از این رو، تصاویر راداری ویژگی‌های متفاوتی از پوشش گیاهی در مقایسه با تصاویر اپتیک ارائه می‌کنند (اشلوند و ایراسمی، ۲۰۲۰). میزان بازپخش<sup>۲</sup> ثبت‌شده از پوشش گیاهی در این سنجنده‌ها به زاویه فرود، طول موج و قطبش سنجنده، نوع پوشش گیاهی و تراکم آن، ساختار حجمی تاج پوشش گیاهی، قطر برابر سینه<sup>۳</sup> شاخص سطح برگ، و زبری و رطوبت گیاه و خاک بستگی دارد (جنسن، ۱۹۹۶). بیشتر مطالعاتی که در آن‌ها از تصاویر سنجش از دور در نظارت بر چرخه فنولوژیکی گیاهان استفاده شده است مربوط به تصاویر اپتیک است (فیشر و همکاران، ۲۰۰۶؛ لیائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ تیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ سونگ و وودکاک، ۲۰۰۳)، اما مطالعات کمی با استفاده از تصاویر رادار قطبی انجام گرفته است (پروسی و همکاران، ۲۰۰۰؛ روتسچی و همکاران، ۲۰۱۸؛ فروشن و همکاران، ۲۰۱۸؛ اشتاین داردی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هو و همکاران، ۲۰۲۰). این مطالعات محدود بوده و ضروری است. باید کارایی این تصاویر در پایش چرخه فنولوژی انواع متفاوت پوشش گیاهی بررسی شود. در رویکردهای مبتنی بر تصاویر اپتیک، مطالعه چرخه فنولوژی عمدتاً بر مبنای تغییرات مقادیر بازتاب در باندهای مختلف طیفی یا بر اساس شاخص‌های گیاهی (VI)، نظیر EVI، LAI و NDVI قرار دارد (هلمن، ۲۰۱۸). از شاخص‌های طیفی برای نظارت بر چرخه فصلی تغییرات پوشش گیاهی طی دهه‌های گذشته بسیار استفاده شده است و بسیاری از این

- 1 Penetration
- 2 Backscatter
- 3 Diameter at Breast Height (DBH)
- 4 Vegetation Index
- 5 Leaf Area Index
- 6 Enhanced Vegetation Index

مطالعات نتایج مناسبی از کاربرد شاخص‌های طیفی در پایش پوشش‌های گیاهی و تغییرات فنولوژیکی آن‌ها گزارش کرده‌اند (لو و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعات زیادی از محصولات جهانی مودیس برای بررسی چرخه‌های فنولوژیک گیاهان استفاده شده است (کریستیان و همکاران، ۲۰۱۵؛ هیوته و همکاران، ۲۰۰۲). در بسیاری از این تحقیقات، از تغییرات شاخص‌هایی نظیر پوشش سطح برگ و شاخص فنولوژی گیاه (PPI) برای تفکیک تغییرات فصلی پوشش‌های گیاهی استفاده شده است (جین و اکالاند، ۲۰۱۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای که وانگ و همکاران (۲۰۱۷) انجام دادند نشان داده شد رابطه NDVI-LAI با تغییرات فنولوژیکی درختان هماهنگ است که با توجه به نوسانات شرایط محیطی به صورت فصلی تغییر می‌کند. همچنین، اشاره شد NDVI پایدارترین شاخص گیاهی برای برآورد LAI است و نسبت به تغییر محتوای کلروفیل حساس است (کیائو و همکاران، ۲۰۱۹). با وجود این، استفاده از تصاویر اپتیک دارای محدودیت‌هایی همچون وجود ابر و مه است. برای غلبه بر این محدودیت تصاویر اپتیک، استفاده از تصاویر رادار قطبی مهم است. این تصاویر به ساختار پوشش گیاهی حساس‌اند (روتسچی و همکاران، ۲۰۱۸) و می‌توانند مکمل تصاویر اپتیک باشند. از جمله سنجنده‌های راداری که در پایش چرخه فنولوژیکی گیاهان طی سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته می‌توان به سنتینل-۱ اشاره کرد (والاس و همکاران، ۲۰۲۰؛ بازی و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج بیشتر این مطالعات نشان‌دهنده حساسیت بالای قطبش VH به تغییرپذیری پوشش‌های گیاهی خزان‌پذیر است (روتسچی و همکاران، ۲۰۱۸؛ فروشن و همکاران، ۲۰۱۸).

تاکنون کارایی تصاویر رادار قطبی در بررسی تغییرات فنولوژیکی در اکوسیستم‌های گیاهی مختلف ایران بررسی نشده است. با توجه به پهنه سرزمینی ایران و گستره پوشش گیاهی که شرایط رویشی مختلفی دارند، بررسی تغییرات چرخه فنولوژی انواع اکوسیستم‌های گیاهی حائز اهمیت است. با در نظر گرفتن انواع متفاوت تصاویر ماهواره‌ای و چرخه فنولوژی متفاوت انواع پوشش‌های گیاهی ضروری است توانایی و کارایی هر کدام از انواع متفاوت سنجنده‌ها در پایش تغییرات فنولوژی گیاهان بررسی شود. از این رو، هدف اصلی این مطالعه ارزیابی و مقایسه توانایی تصاویر رادار قطبی سنتینل-۱ و تصاویر اپتیک ماهواره‌های سنتینل-۲ (سنجنده MSI) و لندست-۸ (سنجنده OLI) در پایش چرخه فنولوژیکی سه نوع پوشش گیاهی است، که از لحاظ شرایط اکوسیستمی، ساختار تاج پوشش گیاهی، و ارتفاع درختان متفاوت‌اند. جنگل‌های حرا، به‌عنوان پوشش گیاهی واقع در اکوسیستم ماندابی، شرایط ویژه‌ای دارند. تغییرات دو اکوسیستم ماندابی و خشکی، دمای هوا، و میزان آب تازه‌وارد شده به محیط خاکی درختچه‌های مانگرو<sup>۴</sup> سبب پیچیدگی بررسی این نوع پوشش گیاهی می‌شود (زارع‌زاده مهریزی و همکاران ۱۳۹۰؛ ونتر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). کاهش جریان‌ات آبی و در نتیجه کاهش دسترسی به آب تازه به نرسیدن اکسیژن کافی به گیاه، القای تنش شوری، و کمبود مواد غذایی منجر خواهد شد (الیسون و سایموندز، ۲۰۰۳؛ لوه‌لوک و همکاران (۲۰۰۷)؛ خویلی و خدر، ۲۰۰۷؛ نایدو، ۲۰۱۰). بررسی پاسخ طیفی و ضرایب بازپخش درختان نخل به دلیل ارتفاع بلند و فرم خاص تاج پوشش، با توجه به همیشه سبز بودن و همچنین نوع شاخ و برگ درختان نخل حائز اهمیت است. بیشه‌زارها ترکیبی از گیاهان درختی و درختچه‌ای خزان‌پذیرند. متفاوت بودن چشم‌انداز طبیعی و ساختار رویشی این سه پوشش گیاهی امکان ارزیابی توانایی تصاویر ماهواره‌ای در مطالعه دوره فنولوژی گیاه و همچنین بررسی مقایسه کارایی آن‌ها در مناطق متفاوت را فراهم می‌کند. در این مطالعه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱، لندست-۸ و سنتینل-۲، ارتباط دوره‌های فنولوژیکی گیاهان با تغییرات شاخص‌های طیفی و ضرایب بازپخش راداری این سه نوع پوشش گیاهی در دوره یک‌ساله (۲۰۱۷) بررسی شده

1 Plant Phenology Index  
 2 MultiSpectral Instrument  
 3 Operational Land Imager  
 4 Mangrow

است. برای رسیدن به این هدف، تصاویر موجود با حداقل فاصله زمانی نسبت به همدیگر تهیه شده‌اند. در برخی موارد ممکن است سه تا چهار روز اختلاف بین زمان اخذ تصاویر اپتیک و رادار وجود داشته باشد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸ و تصاویر رادار قطبی سنتینل-۱ برای بررسی تغییرات فنولوژیکی در طول یک دوره یک‌ساله (۲۰۱۷) استفاده شده است (جدول ۳). ماهواره لندست ۸ شامل یک سنجنده در محدوده طیفی مرئی (OLI) و یک سنجنده در محدوده حرارتی (TIRS) طیف الکترومغناطیس است که از ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ در مدار خود قرار گرفته است. تصاویر این ماهواره توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) از طریق سایت <https://earthexplorer.usgs.gov> به صورت رایگان به کاربران ارائه می‌شود. سنتینل-۱ در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ توسط آژانس فضایی اروپا برای جمع‌آوری اطلاعات از سطح زمین در مدار زمین قرار گرفت. باندهای طیفی سنجنده MSI سنتینل-۲ و نیز زمان گذر از خط استوا به گونه‌ای طراحی شده است تا با سری تصاویر لندست هماهنگی داشته باشد. ماهواره سنتینل-۱ (A1) در تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ توسط آژانس فضایی اروپا به فضا پرتاب شده است. سنتینل-۱ در باند C در طول موج ۵/۴۰۵ گیگاهرتز و در دو پولاریزه (VH, VV) تصویربرداری می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). این تصاویر در مد IW<sup>۳</sup> (برای هر ماه یک تصویر، در نزدیک‌ترین زمان تصویربرداری به سنجنده OLI) برای سه منطقه مورد مطالعه از سایت [www.search.asf.alaska.edu](http://www.search.asf.alaska.edu) دریافت و پردازش شده است (جدول ۱).

جدول شماره ۱. زمان اخذ تصاویر مورد استفاده

| Sensor | تاریخ تصویربرداری سنجنده (۲۰۱۷) DOY |     |     |                |     |     |              |     |     |
|--------|-------------------------------------|-----|-----|----------------|-----|-----|--------------|-----|-----|
|        | نوع پوشش گیاهی                      |     |     |                |     |     |              |     |     |
|        | بیشه‌زارها                          |     |     | نخل‌های شادگان |     |     | جنگل‌های حرا |     |     |
|        | S1                                  | S2  | OLI | S1             | S2  | OLI | S1           | S2  | OLI |
| Jan    | ۵                                   | ۳   | ۵   | ۵              | ۱۳  | ۵   | ۲            | ۱۴  | -   |
| Feb    | ۵۳                                  | ۵۳  | ۵۳  | ۴۱             | ۵۳  | ۵۳  | ۴۳           | -   | ۵۰  |
| Mar    | ۷۷                                  | ۷۳  | ۶۹  | ۷۷             | ۶۳  | ۶۹  | ۶۲           | -   | ۶۶  |
| Apr    | ۱۰۱                                 | ۱۱۶ | -   | ۱۱۸            | ۱۰۳ | -   | ۹۵           | ۱۰۴ | ۱۴۴ |
| May    | ۱۲۵                                 | ۱۴۳ | ۱۴۹ | ۱۲۵            | ۱۳۳ | ۱۳۳ | ۱۲۲          | ۱۴۴ | ۱۳۰ |
| Jun    | ۱۶۱                                 | ۱۵۳ | ۱۶۵ | ۱۶۶            | ۱۷۶ | ۱۶۵ | ۱۶۳          | ۱۶۴ | ۱۶۲ |
| Jul    | ۱۹۷                                 | ۱۹۳ | ۲۰۴ | ۱۹۰            | ۱۹۸ | ۱۹۷ | ۱۹۴          | ۲۰۴ | ۲۱۰ |
| Aug    | ۲۳۳                                 | ۲۳۳ | ۲۲۹ | ۲۲۶            | ۲۱۳ | ۲۲۹ | ۲۳۰          | ۲۲۴ | ۲۲۶ |
| Sep    | ۲۵۷                                 | ۲۵۳ | ۲۶۸ | ۲۵۰            | ۲۶۳ | ۲۶۱ | ۲۵۴          | ۲۶۴ | ۲۵۸ |
| Oct    | ۲۸۱                                 | ۲۸۳ | ۲۷۷ | ۲۸۶            | ۲۹۳ | ۲۹۳ | ۲۷۶          | ۲۹۹ | ۲۷۴ |
| Nov    | ۳۲۹                                 | ۳۳۳ | ۳۳۲ | ۳۲۹            | ۳۲۱ | -   | ۳۲۶          | ۳۱۹ | ۳۲۲ |
| Dec    | ۳۴۷                                 | ۳۴۸ | ۳۴۸ | ۲۵۸            | ۳۴۳ | -   | ۳۲۸          | ۳۴۴ | ۳۳۸ |
| Source | USGS, ESA                           |     |     |                |     |     |              |     |     |

### پیش‌پردازش تصاویر

مقادیر اعداد رقومی لندست-۸ و سنتینل-۲ با استفاده از تصحیح اتمسفری به بازتاب سطح تبدیل شدند. پیش‌پردازش‌های تصاویر سنتینل-۱ شامل تصحیح توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی هر منطقه و

1 Thermal Infrared Sensor

2 U.S. Geological Survey

3 Interferometric Wide swath

است. با توجه به اینکه در تصاویر راداری اثر اسپکل VH و VV کالیبره کردن و کاهش اثرات اسپکل در هر دو قطبش یکی از چالش‌های جدی به‌شمار می‌رود، از این رو کاهش آن ضروری است. در این مطالعه از فیلتر میانه با اندازه پنجره  $5 \times 5$  برای به حداقل رساندن اثر اسپکل استفاده شد. فیلتر میانه تحت تأثیر اعداد بسیار بزرگ یا کوچک قرار نمی‌گیرد و پس از اعمال، عدد جدیدی ایجاد نمی‌کند و از فیلترهای پُر کاربرد در این زمینه است (بیکویت، ۲۰۱۰). سپس، اعداد (تبدیل شد (شیمادا و همکاران، ۲۰۱۴). dB رقومی با استفاده از رابطه ۱، به ضرایب بازپخش در واحد دسی بل (

$$\sigma^{\circ}(dB) = 10 \times \text{Log}_{10}(DN)$$

رابطه ۱

که  $\sigma^{\circ}$  مقدار ضریب بازپخش در باندهای VH و VV سنجنده سنتینل - ۱ است.

### شاخص‌های گیاهی

در این تحقیق از پُر کاربردترین شاخص‌های پوشش گیاهی شامل شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده گیاهی (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل کننده اثر خاک (SAVI) و شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته (EVI) که به ترتیب از طریق معادله‌های ۲، ۳، و ۴ محاسبه می‌شوند، استفاده شده است. این شاخص‌ها در مطالعات گذشته در مناطق مختلف جغرافیایی کارایی مناسبی در پایش چرخه فنولوژی گیاهان داشته‌اند (هویت و همکاران، ۲۰۰۲؛ لو و همکاران، ۲۰۱۸؛ بویتن‌ورف و همکاران، ۲۰۱۵؛ کریستین و همکاران، ۲۰۱۵؛ پیائو و همکاران، ۲۰۲۰). NDVI یکی از شاخص‌های گیاهی مهم و پُر کاربرد برای پایش انواع پوشش‌های گیاهی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای، و جهانی به‌شمار می‌رود (هویت و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین، این شاخص برای مقایسه تغییرات فصلی و بین سال‌های مختلف پوشش گیاهی در مناطق مختلف کره زمین کاربرد دارد (پاتر و همکاران، ۱۹۹۹؛ هیوته و همکاران، ۲۰۰۲). شاخص SAVI اثر خاک پس‌زمینه را حذف می‌کند و با در نظر گرفتن فاکتور L برای حذف اثر پس‌زمینه نسبت به NDVI دارای برتری است (هویت، ۱۹۸۸؛ هیوته و لو، ۱۹۹۴). همچنین، شاخص‌های SAVI و EVI نسبت به NDVI دیرتر اشباع شده و تغییرات میزان کلروفیل گیاهان را بهتر نمایش می‌دهند (هویت و همکاران، ۲۰۰۲؛ روچا و شاور، ۲۰۰۹؛ کریستین و همکاران، ۲۰۱۵). برای محاسبه شاخص‌های گیاهی، از باندهای آبی، قرمز، مادون قرمز نزدیک لندست - ۸، و سنتینل - ۲ استفاده شده است.

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

رابطه ۲

$$SAVI = \frac{(1+L) * (\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + L}$$

رابطه ۳

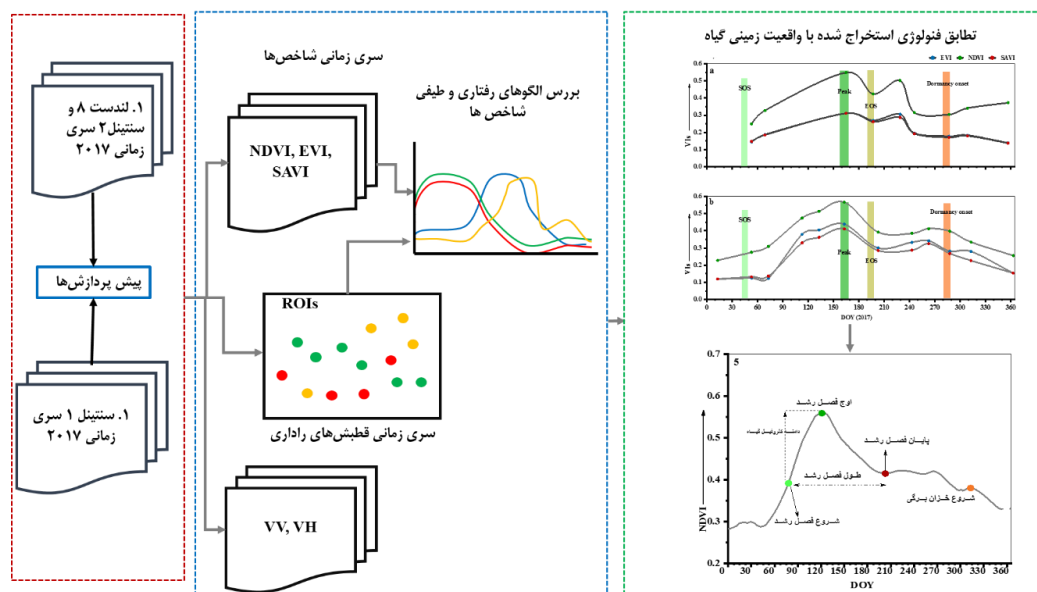
$$EVI = 2.5 \times \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{\rho_{NIR} + C1 * \rho_{Red} - C2 + Blue + L}$$

رابطه ۴

که در هر سه رابطه، باندهای  $\rho_{NIR}$ ،  $\rho_{Red}$  و  $\rho_{Blue}$  به ترتیب بازتاب زمینی باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز، و آبی‌اند. در رابطه ۳ پارامتر L برای کاهش تأثیر پس‌زمینه خاک استفاده شد (هویت، ۱۹۸۸؛ هیوته و همکاران، ۲۰۰۲) که مقدار آن با توجه به میزان تراکم تاج پوشش گیاهی منطقه  $0/5$  در نظر گرفته شده است. در رابطه ۳ نیز ضرایب C1، C2، و L اصطلاح مقاومت در برابر آتروسل است که از باند آبی برای تصحیح اثرات آتروسل در باند قرمز استفاده می‌شود. مقادیر این ضرایب به ترتیب برابر ۶، ۷/۷۵، و ۱ است (هویت و همکاران، ۱۹۹۷، ۲۰۲۰).

در شکل ۴ مراحل انجام تحقیق ارائه شده است. در مرحله اول، تصاویر ماهواره‌های لندست - ۸، سنتینل - ۲، و سنتینل -

۱ در فصل‌های مختلف سال تهیه شد. سپس، تصحیحات لازم بر روی هر تصویر صورت گرفت. در مرحله سوم، شاخص‌های پُرکاربرد گیاهی همچون NDVI، EVI، SAVI، و ضرایب بازپراکنش پوشش‌های گیاهی در دو قطبش VH و VV سنجنده سنتینل-۱ در DOYهای مختلف استخراج و جداگانه بررسی شد. برای بررسی روند تغییرات هر نوع پوشش گیاهی با توجه به اینکه نمونه‌های واقعیت زمینی در سال مورد مطالعه در دسترس نبود، این نمونه‌ها از طریق تصاویر آرشیوی Google Earth برای سال ۲۰۱۷ تهیه و بررسی شد. در بسیاری از مطالعات گذشته نشان داده شده است که تصاویر با قدرت تفکیک بالای Google Earth از دقت مکانی بالایی برخوردار است و می‌توان از آن‌ها جهت تعیین وضعیت پدیده‌ها استفاده کرد (پوتر، ۲۰۰۸؛ مونتسیانو و همکاران، ۲۰۰۹؛ کوهن و همکاران، ۲۰۱۰). از این رو، برای گیاهان بیشه‌زارها ۱۲۴۰، نخل‌های شادگان ۱۱۵۰، و جنگل‌های حرا ۱۳۰۰ نمونه واقعیت زمینی انتخاب شد. این نمونه‌ها همچنین با تصاویر زمینی موجود و شناخت میدانی نویسندگان از دو منطقه بیشه‌زارها و نخل‌های شادگان تطابق داده شد. پراکندگی نمونه‌های تعلیمی در شکل ۳ قابل مشاهده است. در نهایت، چرخه فنولوژیکی به‌دست‌آمده در این تحقیق با واقعیت زمینی تطابق داده شد.



شکل ۲. فلوچارت تحقیق

### محدوده مورد مطالعه

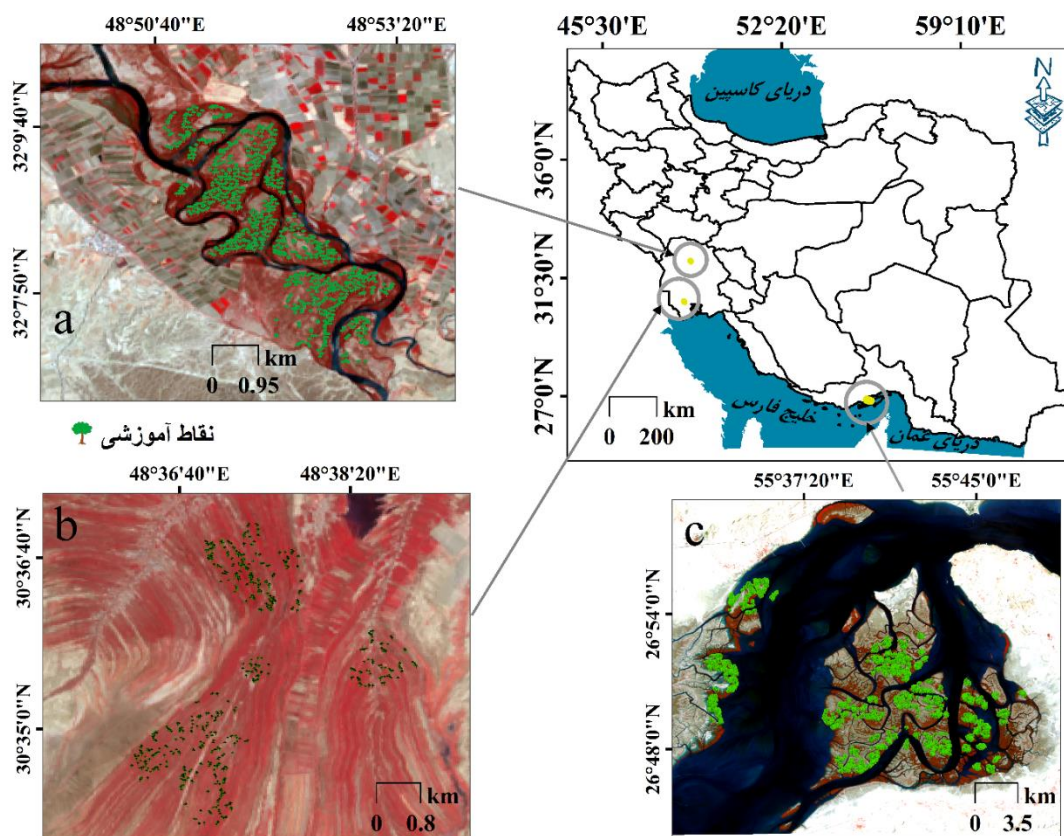
در این تحقیق، سه نوع پوشش گیاهی متفاوت مطالعه شده است: بیشه‌زارهای اطراف رودخانه کارون، جنگل‌های حرا، و نخل‌های اطراف تالاب شادگان. بیشه‌زارهای اطراف رودخانه کارون، به‌عنوان نمونه‌ای از پوشش‌های گیاهی خزان‌پذیر که تحت نام جنگل‌های کران رودی نیز از آن‌ها یاد می‌شود (توز و همکاران، ۲۰۰۸؛ ترشکین، ۲۰۱۲؛ میائو و همکاران، ۲۰۲۰)، در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و ۴۹ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی قرار دارند (شکل ۱- a). از گونه‌های درختی در این اکوسیستم گیاهی می‌توان به درختان بید، درختچه گز، درخت سدر (با نام محلی کنار)، درختچه سریم وحشی، و بوته‌های جاز اشاره کرد. در شکل ۲- a عکس‌های بازدید میدانی در روز ۱۵۲ سال (۲۰۲۰/۰۶/۰۱) ارائه شده است.

جنگل‌های حرای مورد مطالعه در این تحقیق بین محدوده عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و طول



جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی در استان هرمزگان قرار دارند (شکل ۳- c). جنگل‌های حرا شامل گیاهان درختچه‌ای به نام مانگرو هستند که همیشه سبزند و ارتفاعی کمتر از یک متر دارند (دوک و همکاران، ۲۰۰۷؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). اکوسیستم‌های گیاهی ساحلی، همچون مانگروها، به صورت دائمی در معرض تنش‌های چندگانه محیطی قرار دارند (ونتر و همکاران، ۲۰۰۶؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۱). حرکت آب تازه به درون زیستگاه‌های رویشی درختچه‌های مانگرو مهم‌ترین برطرف‌کننده نیاز غذایی و همچنین اکسیژن مورد نیاز این نوع پوشش گیاهی به‌شمار می‌رود و نرسیدن آب تازه کافی سبب تنش در پوشش درختچه‌ای مانگرو می‌شود (زارع‌زاده مهریزی و همکاران، ۱۳۹۰) (شکل ۴- c).

از دیگر پوشش‌های گیاهی مورد مطالعه نخل‌های پیرامون تالاب شادگان در عرض ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و ۴۹ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی واقع در استان خوزستان هستند (شکل ۳- b). ویژگی‌های ساختاری آن‌ها (تاج همیشه سبز و ارتفاع آن‌ها) با سایر گیاهان متفاوت است. درختان نخل خزان‌پذیر نیستند، برگ‌های این درخت بین ۱ متر تا ۲ متر بزرگ می‌شود. در طول یک سال و حتی بیشتر از آن سبزیگی خود را حفظ می‌کنند. با رشد برگ‌های جدید، برگ‌های قدیمی‌تر را با هرس کردن از تاج نخل‌ها جدا می‌کنند. همچنین، ریزش برگ نخل‌ها بیشتر به صورت شاخه‌ای اتفاق می‌افتد و ممکن است به علت خشکیدگی بر اثر بیماری و شکستگی شاخ و برگ آن‌ها نیز رخ دهد (شکل ۴- b).



شکل شماره ۳. مناطق مورد مطالعه مربوط به پوشش گیاهی: (a) بیشه‌زارها، (b) نخل‌های دشت شادگان، (c) جنگل‌های حرا، تصاویر رنگی کاذب لندست-۸ (RGB: NIR, Red, Blue)



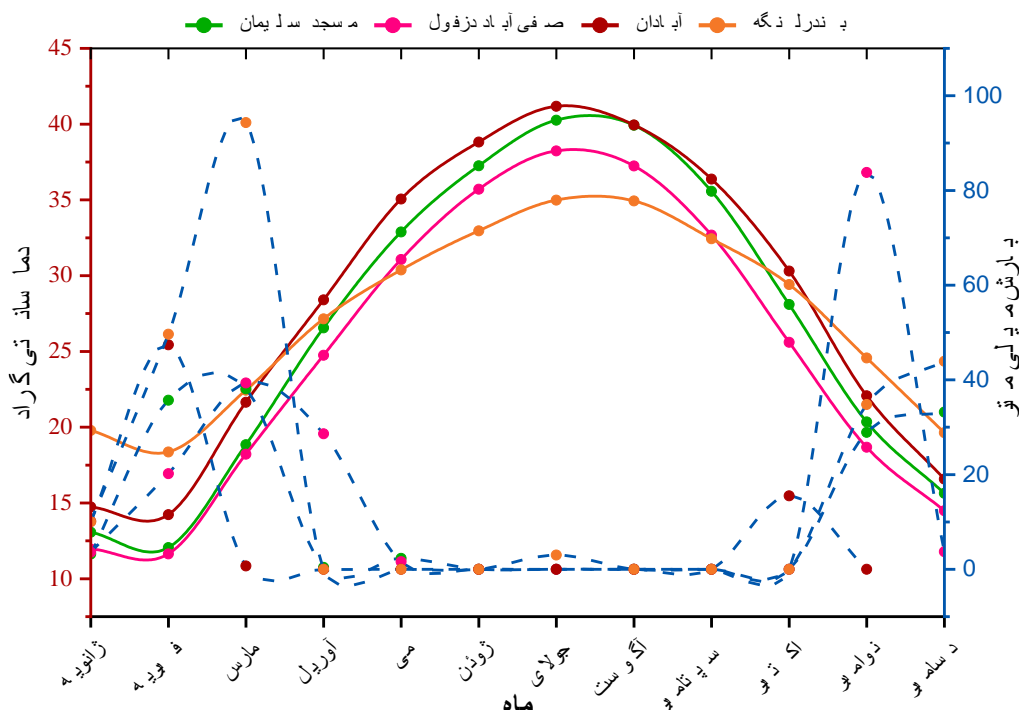
شکل شماره ۴. عکس‌های میدانی از سه نوع پوشش گیاهی: (a) بیشه‌زارها، (b) نخل‌های دشت شادگان، (c) جنگل‌های حرا (تصاویر فصل بهار)

### شرایط آب و هوای مناطق مورد مطالعه

در تحقیق حاضر داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه‌های زمینی با کمترین فاصله به مناطق مورد مطالعه از طریق سایت هواشناسی ایران (<https://data.irimo.ir>) دریافت شد (جدول ۲). دو ایستگاه هواشناسی مسجد سلیمان و صفی‌آباد دزفول برای بیشه‌زارها، ایستگاه هواشناسی آبادان برای نخل‌های شادگان، و همچنین ایستگاه بندر لنگه برای جنگل‌های حرا انتخاب و داده‌های سال ۲۰۱۷ دریافت شد. متوسط بارندگی (سال ۲۰۱۷) در ایستگاه‌های صفی‌آباد دزفول، مسجد سلیمان، آبادان، و بندرلنگه به ترتیب ۱۸۰، ۱۴۲، ۷۴، و ۲۳۵ میلی‌متر با بیشترین میزان بارش‌ها در  $DOY$  ۳۰ تا ۹۵ و همچنین  $DOY$  ۳۲۰ تا ۳۶۰ سال (فصل پاییز و اواخر زمستان) است. متوسط دمای سالانه آبادان  $26/4$ ، مسجد سلیمان  $25/6$ ، صفی‌آباد دزفول  $24/3$ ، و بندر لنگه ۲۱ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۵). دامنه تغییرات دمای هوا در ایستگاه بندر لنگه بین ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است و دمای سه ایستگاه دیگر بین ۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد در طول سال در نوسان است.

جدول شماره ۲. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

| نام ایستگاه      | ارتفاع از سطح دریا | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی |
|------------------|--------------------|---------------|---------------|
| صفی‌آباد (دزفول) | ۸۲٫۹               | ۴۸٫۴۳         | ۳۲٫۲۵         |
| مسجد سلیمان      | ۳۲۰٫۵              | ۴۹٫۲۴         | ۳۱٫۹۸         |
| آبادان           | ۶۶                 | ۲             | ۳۰٫۳۸         |
| بندر لنگه        | ۲۲٫۷               | ۵۴٫۸۳         | ۲۶٫۵۳         |



شکل شماره ۵. تغییرات دمای هوا و میزان بارش در نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به مناطق مورد مطالعه (<https://data.irimo.ir>)

#### چرخه فنولوژیکی گیاهان مورد مطالعه

چرخه فنولوژیکی هر کدام از انواع پوشش گیاهی مورد مطالعه با استفاده از مطالعات میدانی و بررسی تحقیقات گذشته نظیر مطالعه کوهپایه و همکاران (۲۰۱۹) برای درختان نخل، تحقیق یوسفی در سال ۱۳۹۲ برای درختان بید که از مهم‌ترین درختان بیشه‌زارها به‌شمار می‌آیند و مقاله پاسترگوزمان و همکاران (۲۰۱۸) برای جنگل‌های مانگرو تهیه شد (جدول ۳). در این جدول پنج پارامتر اصلی در چرخه‌های فنولوژیکی گیاهان ارائه شده است: شروع فصل رشد (SOS)، طول فصل رشد (LOS)، حداکثر مقدار کلروفیل گیاه (Max Green) یا پیک کلروفیل گیاه؛ پایان فصل رشد (EOS) گیاه و در گیاهان خزان‌پذیر شروع خزان‌پذیری گیاه (یا شروع خواب گیاه) (کای و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ کای و همکاران، ۲۰۲۰؛ کانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

در خوزستان، با توجه به شرایط آب و هوایی، اکوسیستم پوشش گیاهان طبیعی در اواخر زمستان شروع به جوانه‌زدن می‌کنند و تا خردادماه (ماه ژوئن) به حداکثر تراکم شاخ و برگ و میزان سبزیگی خود می‌رسند. اما با شروع فصل تابستان (ماه ژوئیه) به دلیل افزایش گرمای هوا میزان سبزیگی و کلروفیل آن کاهش می‌یابد. این روند کاهش تا اواخر شهریورماه ادامه می‌یابد. از اواخر شهریورماه دوباره بعضی گیاهان، به دلیل افزایش میزان رطوبت و خنک‌تر شدن هوا، طی یک دوره حدوداً یک‌ماهه رشد اندکی پیدا می‌کنند. بدیهی است تغییرات شرایط آب و هوایی سبب تغییر در دوره‌های رشد می‌شود (کای و همکاران، ۲۰۱۹). اما برای نخل‌ها، که از گیاهان همیشه سبز به‌شمار می‌روند، این چرخه فنولوژیکی متفاوت است با شروع سبزیگی گیاه از اواخر نوامبر و اوج میزان کلروفیل در اواسط تا اواخر فوریه (بهمین تا اوایل اسفند)

1. Start of green up season
2. Length of growing season
3. Time of maximum greenness
4. Peak
5. End of growing season
6. Dormancy onset

و پایان فصل رشد بین ماه‌های آوریل و می (فروردین تا اواخر اردیبهشت) (جدول ۳). درختچه‌های حرا نیز گرچه جزو گیاهان خزان‌پذیر به‌شمار نمی‌روند، با توجه به تنش‌های زیادی که در طول سال تجربه می‌کنند (زارع‌زاده مهریزی و همکاران، ۱۳۹۰؛ پاسترگوزمان و همکاران، ۲۰۱۸) دامنه تغییرات بالایی در طول سال دارند. دوره‌های انتقالی فصل رشد آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

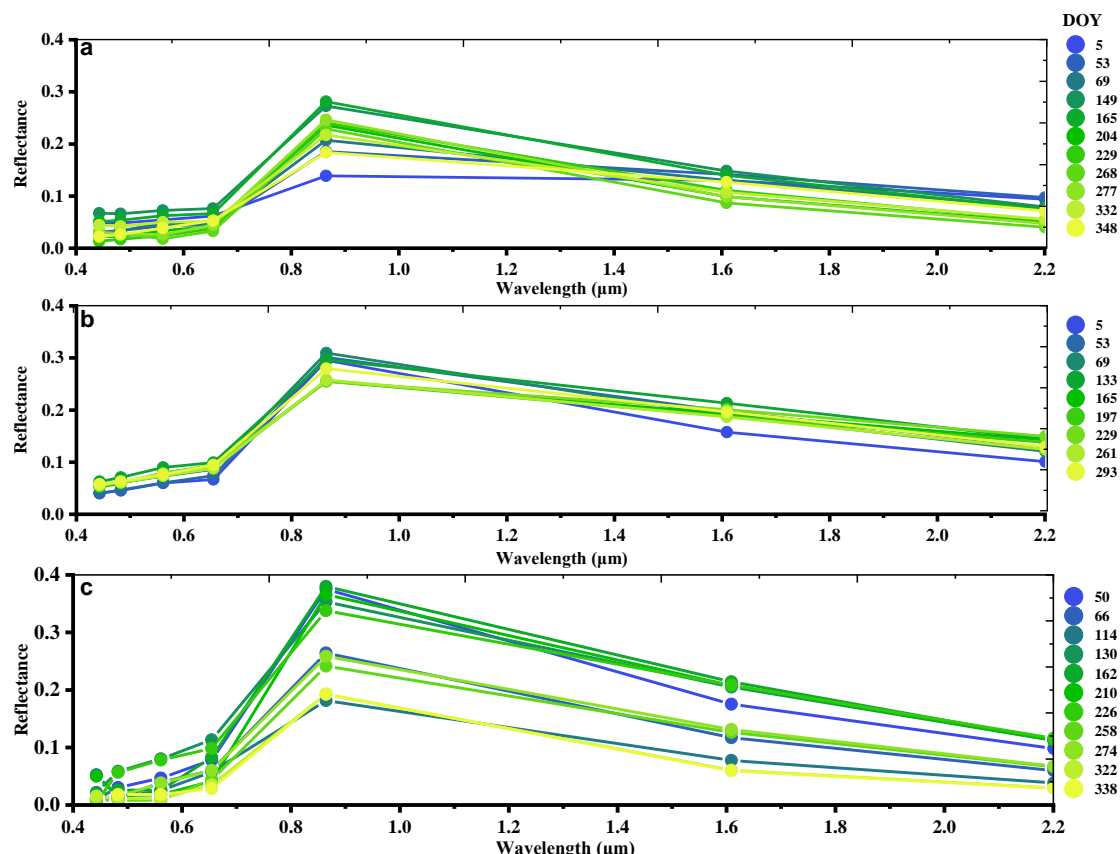
جدول شماره ۳. تقویم زمینی دوره‌های فنولوژی گیاهان مورد مطالعه

| ماه            | Jan   | Feb   | Mar   | Apr   | May   | Jun   | Jul   | Aug   | Sept  | Oct   | Nov   | Dec   |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ten-day        | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L | E M L |
| بیشه زار       |       | ۱     | ۲     | ۳     |       | ۴     | ۵     |       |       | ۶     |       |       |
| نخل‌های شادگان | ۲     | ۳     | ۴     | ۵     |       |       |       |       |       |       | ۱     |       |
| درختچه‌های حرا | ۴     |       |       | ۵     |       |       | ۱     |       |       | ۲     | ۳     | ۴     |

## بحث و یافته‌ها

### ارتباط تغییرات رفتار طیفی گیاهان با تغییرپذیری فصلی

در شکل ۶ منحنی بازتاب طیفی باندهای مختلف در طول یک سال برای گیاهان مورد مطالعه نمایش داده شده است. میزان بازتاب جنگل‌های حرا در محدوده مادون قرمز بیشتر از بازتابندگی درختان نخل و بیشه‌زارها مشاهده شد (شکل ۶- c). در نخلستان‌ها، برای چرخه یک‌ساله، کمترین میزان تغییرات (حدود ۰/۰۷) نسبت به دو نوع پوشش گیاهی دیگر مشاهده شد (شکل ۶- b). سپس، بیشه‌زارها به دلیل خزان‌پذیر بودن و همچنین جنگل‌های حرا به دلیل تأثیرپذیری از جریان‌های جزر و مد، که سبب تنش‌های آبی و افزایش شوری آب که تنش‌های گیاه را به دنبال دارد (زارع‌زاده مهریزی و همکاران، ۱۳۹۰؛ پاسترگوزمان و همکاران، ۲۰۱۸)، تغییرات بیشتری (حدود ۰/۳۴ در بیشه‌زارها و ۰/۴ در جنگل‌های حرا) را در طی فصول مختلف سال نشان می‌دهند (شکل ۶- a و c). با توجه به تغییرات مشاهده‌شده در طول موج‌های مختلف، محدوده مادون قرمز نزدیک قابلیت بیشتری در مشاهده تغییرپذیری فصلی گیاهان دارد (شکل ۵).



شکل شماره ۶. تغییرات منحنی طیفی پوشش گیاهی در سری زمانی (۲۰۱۷) در سنجنده OLI، (a) بیشه‌زارها، (b) نخل‌های شادگان، و (c) جنگل‌های حرا

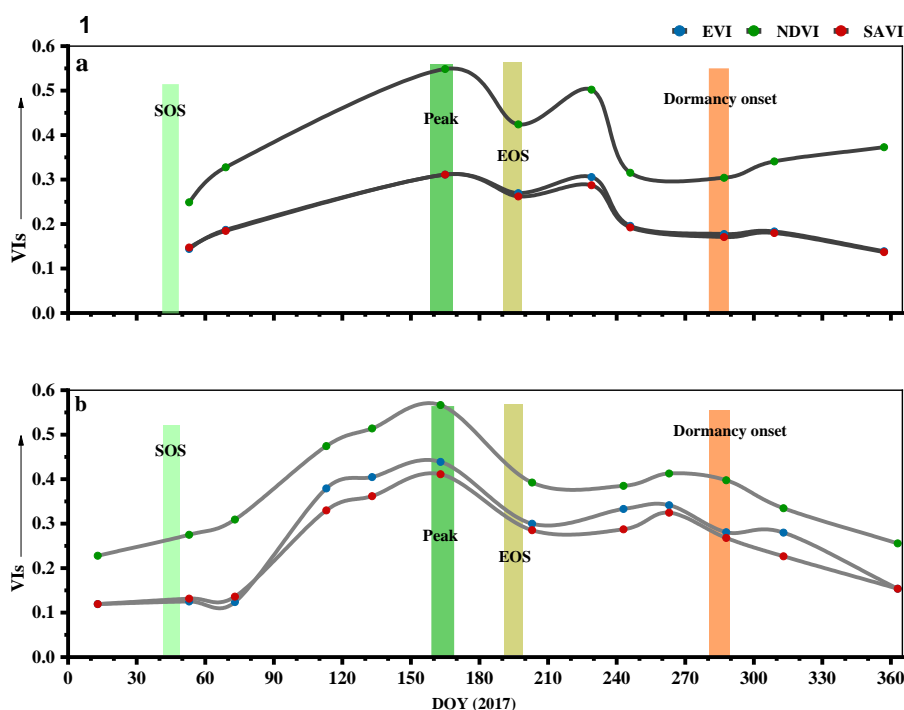
#### نتایج بررسی چرخه فنولوژی گیاهان مورد مطالعه

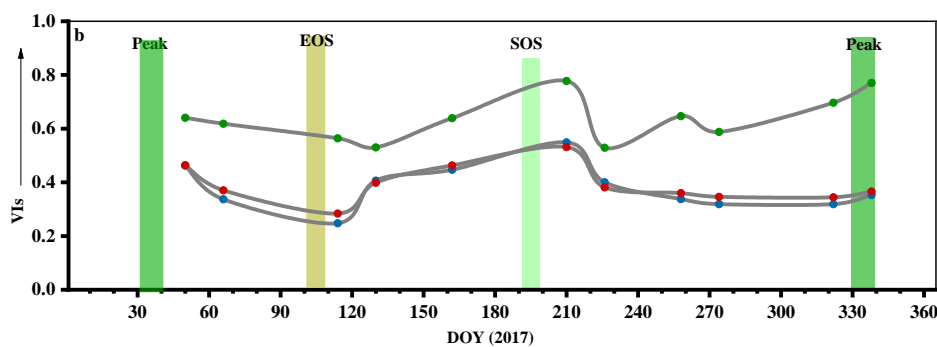
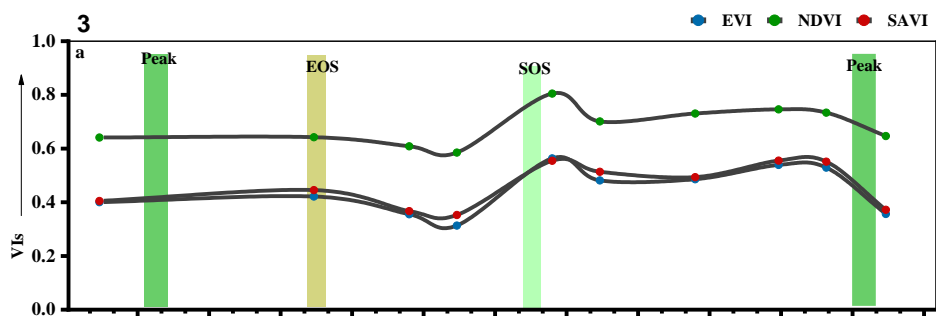
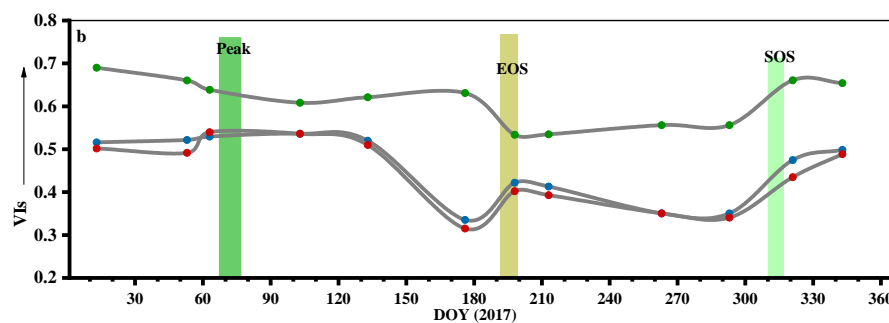
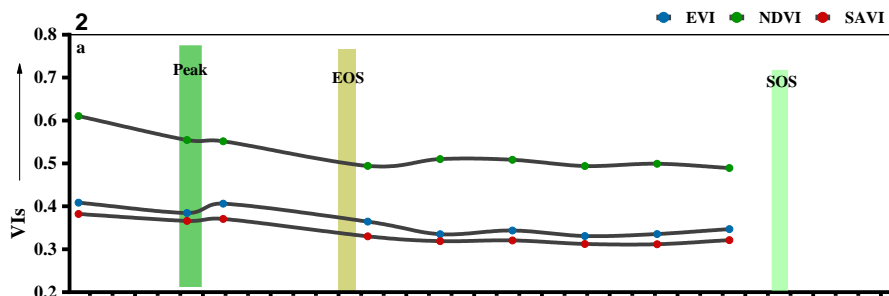
در بیشه‌زارها، مقادیر شاخص‌های SAVI و EVI مشتق‌شده از سنجنده OLI تقریباً بر هم منطبق‌اند (شکل ۷-۱). مقادیر NDVI با متوسط سالانه  $0.53$  و  $0.3$  در دو شاخص SAVI و EVI بالاتر از دو شاخص دیگر است، اما هر سه شاخص روند یکسانی را در تغییرپذیری این نوع پوشش گیاهی نشان می‌دهند. نتایج سنجنده OLI شروع فصل رشد و اوج فصل رشد را منطبق با واقعیت زمینی چرخه فنولوژی نشان می‌دهد، اما پایان فصل رشد را به‌درستی نمایش نمی‌دهد و منحنی این شاخص‌ها دارای نقاط اوج و فرود اضافی است. در شاخص‌های طیفی سنجنده MSI نظیر شاخص‌های سنجنده OLI، مقادیر دو شاخص SAVI و EVI به هم نزدیک‌اند و مقادیر شاخص NDVI از دو شاخص دیگر حدود  $0.2$  (در متوسط سالانه) بیشتر است. تغییرات شاخص‌های گیاهی مشتق‌شده از سنجنده MSI به‌خوبی سه مرحله اصلی شروع فصل رشد، اوج فصل رشد، و پایان فصل رشد را منطبق با چرخه فنولوژی طبیعی بیشه‌زارها نشان می‌دهد (شکل ۷، ۱-b).

به دلیل در دسترس نبودن تصاویر لندست-۸ در دو ماه پایانی سال برای درختان نخل، مطالعه کامل تغییرات فنولوژی مقدور نیست. با این حال، مقادیر شاخص‌های گیاهی مربوط به تصاویر لندست در طول سال تغییرات زیادی نشان نداد. میزان تغییرات شاخص‌های گیاهی سنجنده MSI با  $0.66$  در شاخص NDVI و  $0.49$  و  $0.52$  به ترتیب در دو شاخص SAVI و EVI بیشتر است. شروع فصل رشد در هر سه شاخص قابل مشاهده است. تغییرات مقادیر شاخص طیفی NDVI با شاخص SAVI و EVI در  $180$  DOY کاملاً برعکس است. مقدار NDVI (در سنجنده MSI) در این موقع از سال حدود  $0.5$  و در سنجنده OLI حدود  $0.2$  افزایش می‌یابد، اما در دو شاخص SAVI و EVI برای

هر دو سنجنده کاهشی است که با واقعیت زمینی تطابق دارد (شکل ۷-۲). روند کاهشی در انتهای فصل رشد تا حدودی در هر سه شاخص NDVI، SAVI و EVI قابل مشاهده است. به‌طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنش از دوری اپتیک برای پوشش گیاهی نخل در این تحقیق نشان می‌دهد دوره افزایش کلروفیل برگ‌ها و تغییرات سبزیگی تاج پوشش گیاه و همچنین دوره گل‌دهی نخل‌های خرما- که بین ۷۰ تا ۱۳۸ (اواسط فصل زمستان تا اواخر اردیبهشت) رخ می‌دهد- قابل پایش است. اما مرحله دوم چرخه فنولوژیکی درختان خرما، که همراه با شروع میوه‌دهی آن‌ها (شامل دوره‌های کمیری تا تمار) است، به‌راحتی قابل مشاهده نیست (شکل ۷-۲).

گرچه درختان حرا خزان‌پذیر نیستند، تغییرات سالیانه شاخص‌های گیاهی در آن‌ها زیاد است (شکل ۷-۳). علت آن می‌تواند در حساسیت این درختان به تغییرات شرایط محیطی به‌ویژه میزان آب در دسترس باشد. شاخص‌های گیاهی لندست شروع افزایش میزان سبزیگی را در حدود یک ماه زودتر نشان می‌دهد (شکل ۷-۳). در ادامه سال، میزان شاخص‌ها تغییری نمی‌کند. دامنه تغییرات شاخص‌های گیاهی به‌دست‌آمده از سنجنده MSI نسبت به شاخص‌های سنجنده OLI بیشتر است (شکل ۷-۳). این شاخص‌ها شروع فصل رشد را حدود بیست روز زودتر نشان می‌دهند. حداکثر سبزیگی با حداکثر رسیدن مقادیر شاخص‌های سنجنده MSI منطبق است (شاخص‌های SAVI و EVI در DOY ۳۱۹ به مقدار حداکثر می‌رسند). پس از این افزایش، مقادیر شاخص‌های گیاهی ثابت است و روند کاهشی محسوس در میزان شاخص‌ها، که نشان‌دهنده کاهش سبزیگی باشد، مشاهده نمی‌شود. میزان حداکثر شاخص‌های گیاهی که بین DOY ۱۹۰ تا ۲۱۰ (با ۰/۸ در شاخص NDVI و ۰/۶ در شاخص‌های EVI و SAVI) است در هر دو سنجنده مشاهده می‌شود (شکل ۷-۳).





شکل شماره ۷. تغییرات فصلی گیاهان همراه تاریخ انتقال دوره‌های فنولوژیکی آن‌ها در سه اکوسیستم گیاهی: (۱) بیشه‌زار، (۲) نخل‌های شادگان، (۳) جنگل‌های حرا مشاهده شده از دو سنجنده (a) OLI و (b) MSI

شکل ۷-۱ و ۳ به‌طور کلی دو پیک افزایش سبزیگی را نشان می‌دهد. تغییرات شاخص‌های گیاهی برای نخل‌های شادگان از دو نوع پوشش گیاهی جنگل‌های حرا و بیشه‌زارها متفاوت مشاهده شد و تقریباً در بیشتر طول سال روند تغییرات یکنواختی نشان می‌دهند که فقط در فصل زمستان مقادیر شاخص‌ها افزایشی بود.

نتایج مقادیر ضرایب بازپخش راداری با تغییرات فصلی پوشش‌های گیاه

تحقیقات گذشته نشان داده است که مقادیر ضریب بازپخش در هر دو قطبش VH و VV در باند C برای پایش

پوشش‌های گیاهی مناسب‌اند (ژیائو و همکاران، ۲۰۰۴؛ موران و همکاران، ۲۰۱۱؛ ساووی و مکی، ۲۰۱۵؛ اشتان‌داری و همکاران، ۲۰۱۹). بالاترین مقادیر بازپراکنش  $\sigma^0$  در هر دو قطبش مطابق با دوره‌ای است که پوشش‌های گیاهی به حداکثر زیست‌توده خود می‌رسند (اشتان‌داری و همکاران، ۲۰۱۹). مقادیر بازپراکنش سالانه قطبش VH در پوشش گیاهی بیشه‌زارها بین ۱۳- تا ۱۲٫۶- dB، نخل‌های شادگان بین ۱۳٫۶۰- تا ۱۷٫۴۶- dB، و برای جنگل‌های حرا بین ۱۴٫۵۳- تا ۱۱٫۹۷- dB در تغییر است. در قطبش VV این میزان از ۷٫۴- تا ۸٫۳- برای بیشه‌زارها و ۶٫۰۶- تا ۱۰- dB برای نخل‌های شادگان از ۴٫۸- تا ۷٫۱۶- dB نیز برای جنگل‌های حرا مشاهده شد. به‌طور کلی، مقادیر بازپراکنش در قطبش VV از مقادیر قطبش در باند VH بزرگ‌تر است (جدول ۴).

در بیشه‌زارها، میزان حداکثر ضریب بازپخش در قطبش VV ۷٫۶- dB در ۱۶۱ DOY و در قطبش VH ۱۲٫۳- dB در ۱۹۷ DOY مشاهده شد (جدول ۴). روند تغییرات دو منحنی ضرایب بازپخش در باندهای VH و VV در مشاهده دوره‌های فصل رشد با هم تفاوت دارد. انطباق منحنی شاخص‌های طیفی گیاهی با منحنی VH بیشتر است و این منحنی تغییرپذیری سالیانه را بهتر نمایش می‌دهد. همچنین، انعطاف‌پذیری در طول چرخه فنولوژیکی گیاهان برای قطبش VH با واقعیت زمینی اختلاف اندکی در اوج فصل رشد نشان می‌دهد. در حالی که منحنی VV نقاط حداقل زیادی را نمایش می‌دهد که بر دوره طبیعی رشد گیاه منطبق نیست. نقطه مشترک این منحنی با منحنی شاخص‌های طیفی در زمان مشاهده مقادیر بیشینه است؛ در حالی که مقادیر ضریب بازپخش VH با تأخیر به اوج می‌رسد (شکل ۸).

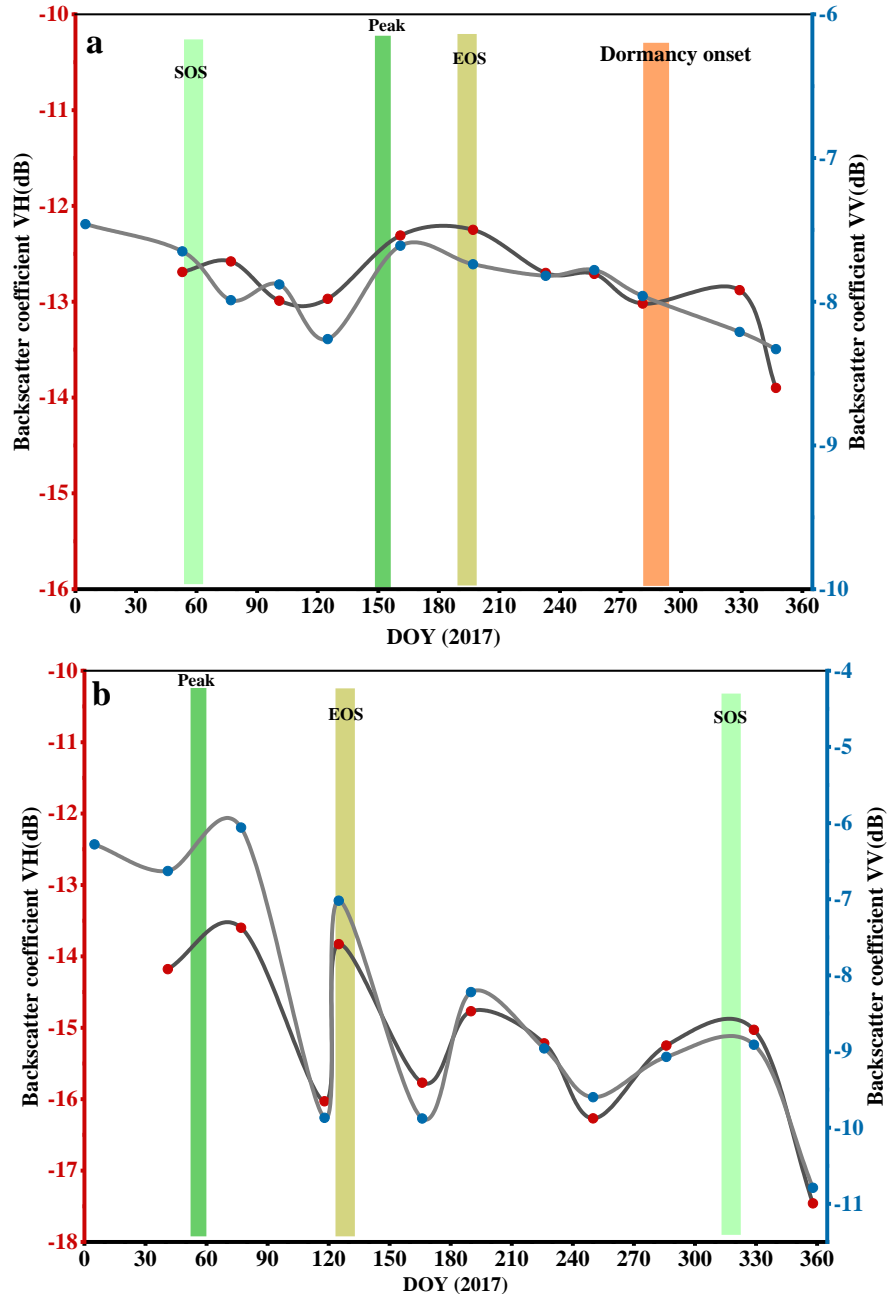
جدول شماره ۴. مقادیر میانگین و انحراف معیار (SD) ضریب بازپخش در قطبش VH و VV سستینل-۱ در سال ۲۰۱۷

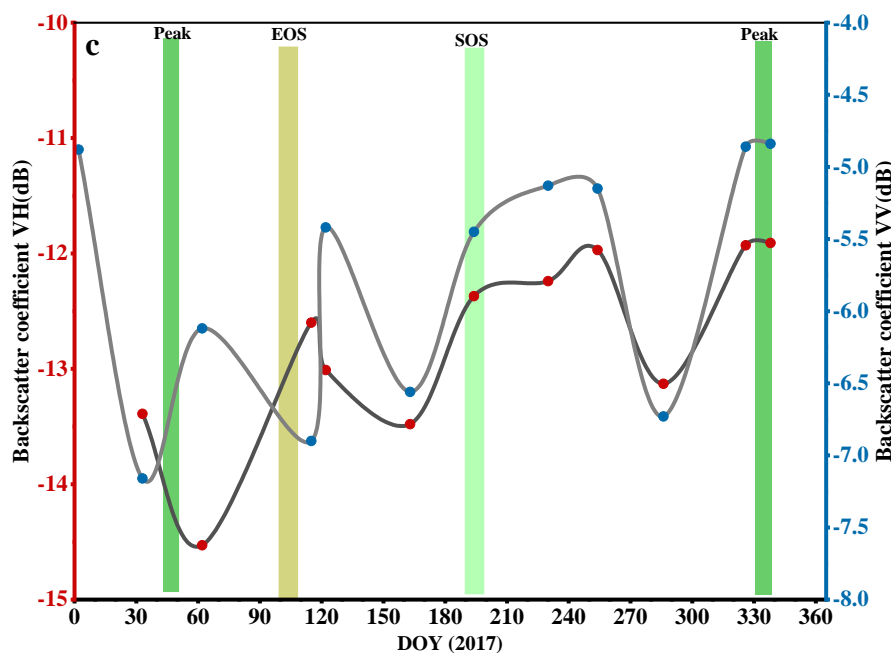
| Month | DOY | بیشه‌زارها |      |         |      | نخل‌های شادگان |        |         |        | جنگل‌های حرا |     |       |      |        |      |
|-------|-----|------------|------|---------|------|----------------|--------|---------|--------|--------------|-----|-------|------|--------|------|
|       |     | VV (dB)    |      | VH (dB) |      | VV (dB)        |        | VH (dB) |        | Mean         | SD  |       |      |        |      |
| Jan   | 5   | -7.46      | 0.87 | --      | --   | 5              | -6.28  | 1.28    | --     | --           | 2   | -4.88 | 1.15 | --     | --   |
| Feb   | 53  | -7.65      | 1.0  | -12.69  | 0.79 | 41             | -6.63  | 1.11    | -14.18 | 0.73         | 33  | -7.16 | 0.99 | -13.39 | 0.86 |
| Mar   | 77  | -7.99      | 1.06 | -12.58  | 0.78 | 77             | -6.06  | 0.94    | -13.60 | 0.73         | 62  | -6.12 | 1.23 | -14.53 | 2.26 |
| Apr   | 101 | -7.88      | 1.02 | -12.99  | 0.87 | 118            | -9.87  | 1.00    | -16.03 | 1.21         | 115 | -6.90 | 0.83 | -12.60 | 0.79 |
| May   | 125 | -8.26      | 0.93 | -12.97  | 0.91 | 125            | -7.02  | 0.80    | -13.83 | 0.65         | 122 | -5.42 | 1.19 | -13.01 | 0.98 |
| Jun   | 161 | -7.61      | 1.10 | -12.31  | 1.04 | 166            | -9.88  | 0.96    | -15.77 | 1.17         | 163 | -6.56 | 0.86 | -13.48 | 1.00 |
| Jul   | 197 | -7.74      | 1.37 | -12.25  | 0.88 | 190            | -8.22  | 0.82    | -14.77 | 0.68         | 194 | -5.45 | 1.19 | -12.37 | 1.09 |
| Aug   | 233 | -7.82      | 1.13 | -12.70  | 0.99 | 226            | -8.96  | 0.89    | -15.22 | 0.74         | 230 | -5.13 | 1.15 | -12.24 | 0.97 |
| Sep   | 257 | -7.78      | 1.00 | -12.71  | 0.91 | 250            | -9.60  | 0.95    | -16.27 | 0.73         | 254 | -5.15 | 1.00 | -11.97 | 0.80 |
| Oct   | 281 | -7.96      | 1.05 | -13.02  | 0.81 | 286            | -9.07  | 0.91    | -15.25 | 0.77         | 286 | -6.73 | 1.08 | -13.13 | 0.80 |
| Nov   | 329 | -8.21      | 0.87 | -12.88  | 0.72 | 329            | -8.91  | 0.78    | -15.03 | 0.84         | 326 | -4.86 | 0.99 | -11.93 | 0.83 |
| Dec   | 347 | -8.33      | 0.85 | -13.90  | 0.93 | 358            | -10.79 | 1.56    | -17.46 | 1.54         | 338 | -4.84 | 0.98 | -11.91 | 0.84 |

بررسی نمودار تغییرات مقادیر ضریب بازپخش نخلستان در سری زمانی یک‌ساله نشان می‌دهد که مقادیر بازپخش نوسانات زیادی دارد. این افزایش نوسان در مقادیر بازپراکنش راداری می‌تواند به دلیل افزایش حجم شاخ و برگ‌های تازه و خوشه‌های میوه درختان نخل در تاج پوشش باشد که به دلیل نوع میوه‌دهی خود تا یک متر هم رشد دارند (شکل ۸- b). درحالی‌که شاخص‌های طیفی این نوع پوشش گیاهی پایدارند و واکنش زیادی نسبت به تغییرات فصلی از خود نشان نمی‌دهند (شکل ۷- ۲). نکته قابل توجه در نخلستان این است که دو منحنی مقادیر بازپخش در دو باند VH و VV تطبیق زیادی با هم دارند و مقادیر حداقل و حداکثر آن در یک تاریخ اتفاق می‌افتد. حداقل مقدار بازپخش راداری در ۱۱۸ DOY و حداکثر مقدار آن در ۷ DOY است (شکل ۸- b). مقایسه این زمان‌ها با زمان وقوع حداقل و حداکثر شاخص‌های طیفی نشان‌دهنده حدود بیست روز رخ‌دادن زودتر مقادیر حداقل و حداکثر بازپخش راداری است. این نوع پوشش گیاهی بین ۱۲۰ تا ۳۶۵ تغییرات فنولوژیکی کمی را تجربه می‌کند که با ویژگی‌های فنولوژیکی گیاه نخل تطابق دارد (شکل ۸).



محدوده مقادیر ضریب بازپخش جنگل‌های حرا در هر دو قطبش VH و VV تغییرات وسیع‌تری به ترتیب برابر با ۲٫۶۲ و ۲٫۲۳ dB نشان داده‌اند (شکل ۸-۷). روند تغییرات شاخص‌های گیاهی شکل ۷ نیز تقریباً با تغییرات مقادیر قطبش هماهنگ است، اگر چه در فواصل DOY ۱۹۷ تا ۲۵۷ منحنی متفاوت است.





شکل شماره ۸. تغییرات فصلی گیاهان همراه تاریخ انتقال دوره‌های فنولوژیکی آن‌ها در سه اکوسیستم گیاهی: (a) بیشه‌زارها، (b) نخل‌های شادگان و (c) جنگل‌های حرا، در هر دو قطبش VH و VV سنجنده سنتینل-۱

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور بررسی قابلیت‌های ماهواره سنتینل-۱، ۲ و لندست-۸ در پایش تغییرات فصلی پوشش‌های گیاهی مختلف، روند تغییرپذیری شاخص‌های گیاهی و مقادیر ضریب بازپخش در قطبش‌های VH و VV در باند C ارزیابی شده است. در مطالعات گذشته نیز اشاره شده است که تغییرات فصلی شاخص‌های گیاهی ارتباط نزدیکی با چرخه فنولوژیکی محاسبه‌شده با شاخص سطح برگ دارند (ژیائو و همکاران، ۲۰۰۴؛ موران و همکاران، ۲۰۱۱؛ ساووی و مکی، ۲۰۱۵).

پوشش‌های گیاهی در مراحل مختلف رشد، با تغییرات کاهشی و افزایشی میزان کلروفیل گیاه، تغییر حجم تاج پوشش گیاه، رشد اندازه شاخ و برگ همراه‌اند که این تغییرات واکنش‌های طیفی متفاوتی در طول موج‌های مختلف نشان می‌دهند (روچا و شاور، ۲۰۰۹؛ کریستین و همکاران، ۲۰۱۵). این ویژگی‌های طیفی گیاهان و تغییرات آن‌ها در سنجش از دور اپتیک اطلاعات مفیدی برای پایش و شناسایی مراحل مختلف چرخه فنولوژیکی گیاهان ارائه می‌دهند. بیشترین ارتباط با تغییرات کلروفیل گیاهان با توجه به فعالیت‌های فتوسنتزی گیاهان بیشترین همبستگی با تغییرپذیری گیاهان را نشان می‌دهد. وقتی گیاهان سالم‌اند و کلروفیل بیشتری تولید می‌کنند سبب افزایش بازتابندگی (در محدوده لبه قرمز) در گیاهان می‌شود که از آن به‌عنوان یکی از کلیدهای مهم در پایش گیاهان نام برده می‌شود (هیوته و همکاران، ۲۰۰۲؛ پیائو و همکاران، ۲۰۲۰). این پدیده معمولاً با افزایش در جذب محدوده ۶۸۰ نانومتر همراه است. زیرا گیاه در فرایند فتوسنتزی انرژی بیشتری را جذب می‌کند (پیائو و همکاران، ۲۰۲۰). حداکثر مقادیر بازتاب گیاهی (نقطه اوج منحنی) در محدوده مادون قرمز نزدیک مشاهده می‌شود که با افزایش کلروفیل گیاهان نیز رابطه مستقیمی دارد (کنیازاخین و همکاران، ۲۰۱۳). این ویژگی محدوده مرئی تصاویر اپتیک با توجه به محدوده مرئی بین ۰/۴ تا ۲/۲ میکرومتر سنجنده OLI برای هر سه نوع پوشش گیاهی بیشه‌زار (گیاهان خزان‌پذیر) و دو نوع پوشش گیاهی نخل و درختچه‌های حرا (گیاهان همیشه سبز) نشان داده شد. درختان نخل در طول یک سال دامنه تغییرات کمی نشان داده‌اند که به علت همیشه سبز بودن آن‌هاست. این ویژگی با توجه به رفتار طیفی در طول سال با واقعیت زمینی آن‌ها هماهنگ است برای

درختچه‌های حرا این تغییرات بیشتر است. این دامنه تغییرات می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری بالا اکوسیستم‌های مانگرو از جزر و مد دریا، تغییرات شوری، دما یا ورود آب شیرین به آن‌ها باشد (زارع‌زاده مهریزی و همکاران ۱۳۹۰؛ پاسترگوزمان و همکاران، ۲۰۱۸).

پروفایل‌های فصلی شاخص‌های گیاهی در سنجنده MSI دوره فصل رشد در هر سه اکوسیستم را به خوبی نشان دادند (شکل ۷- b). در هر سه اکوسیستم گیاهی بیشه‌زارها، نخل‌های خرما، و درختچه‌های حرا دامنه تغییرات شاخص EVI از ۰/۳۲ تا ۰/۴۶ و ۰/۵۶ و در شاخص SAVI بین ۰/۳۲، ۰/۴۴، و ۰/۵۵ متغیر است. در سنجنده OLI به ترتیب بین ۰/۳، ۰/۳۶، و ۰/۳۲ در شاخص EVI و ۰/۲۸، ۰/۳۳، و ۰/۳۴ در شاخص SAVI بود که نشان می‌دهد دامنه تغییرات شاخص‌های گیاهی در سنجنده MSI نسبت به OLI بیشتر است. همچنین، متوسط میزان کلروفیل در درختچه‌های حرا بیشتر از دو اکوسیستم گیاهی دیگر مشاهده شد که در هر دو سنجنده برای شاخص‌های EVI و SAVI این نتایج یکسان بود.

نتایج کلی تحقیق نشان می‌دهد دامنه فصل رشد بیشه‌زارها در شاخص‌های EVI و SAVI نسبت به NDVI با واقعیت زمینی هماهنگ‌تر است. اگرچه به علت عدم دسترسی به تصاویر اپتیک کافی در طی چرخه اصلی فنولوژیکی گیاه (تصاویر موجود بین شروع تا پایان فصل رشد گیاه) بررسی رفتار شاخص‌های طیفی کاملاً قابل تحلیل نیست، انعطاف‌پذیری مقادیر ضرایب بازپخش راداری تطابق خوبی با واقعیت زمینی نشان می‌دهد که تا حدودی توانسته است دوره رشد این نوع پوشش گیاهی را نمایش دهد. با این حال، با توجه به حساسیت تصاویر اپتیک به تغییرات کلروفیل گیاهان در طول فصل رشد (هیوته و همکاران، ۲۰۰۲)، شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از تصاویر اپتیک در بیشه‌زارها با روند تغییرات فصلی تطابق بهتری نشان دادند. مراحل مختلف فنولوژیکی این گیاهان تحت تأثیر پارامترهای محیطی نظیر میزان دما و بارش اختلاف چند هفته‌ای در سال‌های مختلف دارند (حسامی و دوازده‌امامی، ۱۳۹۵). همچنین، با توجه به مشاهده پیک دوم در روند افزایشی کلروفیل گیاهی بیشه‌زارها، ضروری است تا سال‌های بیشتری بررسی شود تا علت سبزشدگی و افزایش کلروفیل در دوره‌های خارج از فنوفاز این پوشش گیاهی تعیین شود. منحنی تغییرات مقادیر شاخص‌های طیفی در نخلستان نشان می‌دهد که شاخص‌های طیفی چرخه اول را بهتر نمایش می‌دهند. اگرچه به علت وجود پوشش ابر در این مناطق تعداد تصاویر اپتیک در این بازه کم است. دوره میوه‌دهی این محصول به خوبی با مقادیر شاخص‌های طیفی قابل پایش نیست. با در نظر گرفتن عدم تغییر میزان کلروفیل در درختان نخل، این امر بدیهی است. در مقابل، واکنش مقادیر ضرایب بازپخش نسبت به تغییرات نخلستان‌ها بیشتر بوده و تصاویر رادار قطبی منبع بهتری برای پایش این مرحله از دوره فنولوژیکی درختان نخل به‌شمار می‌آیند. زیرا افزایش میزان بازپخش راداری به دلیل بازپخش حجمی تاج پوشش گیاهان اتفاق می‌افتد. مرحله میوه‌دهی درخت نخل با تراکم تاج پوشش (به دلیل رشد شاخه‌های میوه رطب) همراه است و افزایش کلروفیل در برگ‌های موجود اتفاق نمی‌افتد. در نتیجه، ضرایب بازپخش قطبش‌های راداری باند C سنتینل-۱ تطابق بهتری با تغییرات گیاه در مقایسه با شاخص‌های گیاهی که به تغییرات کلروفیل حساس‌اند در این دوره از رشد گیاهان نخل ارائه می‌دهند. از طرف دیگر، پاجوش‌های نخل خرما که در پایه نخل‌ها رشد می‌کنند می‌تواند دلیل دیگری بر ثبت تغییرات در میزان بازگشت پالس‌های راداری در طول فصل رشد باشد. درختچه‌های حرا نیز با توجه به تفاوت دوره‌های فنولوژیک و تأثیرپذیری از شرایط اکوسیستم ماندابی خود در طول سال روند تغییرپذیری فصلی متفاوتی از دو نوع دیگر پوشش گیاهی دارند. این تغییرات تا حدودی در هر دو نوع تصاویر اپتیک و قطبش‌های رادار قطبی قابل مشاهده است (شکل ۷-۳؛ شکل ۸- C). این تغییرات فصلی می‌تواند ناشی از جریانات جزر و مد دریا باشد؛ به گونه‌ای که در مطالعات زارع‌زاده مهریزی و همکاران (۱۳۹۰) نیز تأثیر این پارامتر بر کاهش میزان تاج پوشش گیاهی درختچه‌های حرا اشاره شده است. دوره رشد جنگل‌های حرا و بیشه‌زارها به‌عنوان درختان با تاج پوشش گیاهی

متراکم بیشتر تحت تأثیرات تغییرات فصلی قرار می‌گیرند؛ همان‌گونه که اوج سبزی‌نگی در فصل مرطوب سال در تحقیق پاسترگوزمان و همکاران (۲۰۱۸) مشاهده شده است.

به‌طور کلی، می‌توان گفت بین بازپراکنش  $\sigma^0$  VH و شاخص‌های طیفی گیاهی تطابق وجود دارد و این پارامترها قادرند که تغییرپذیری فصلی به‌ویژه در پوشش‌های گیاهی خزان‌پذیر (مانند بیشه‌زارها) را پایش کنند. چنان‌که مطالعات روتسچی و همکاران (۲۰۱۸) و اشتان‌داری و همکاران (۲۰۱۹) این مسئله را تأیید کرده‌اند. با این حال، مقایسه این نتایج در یک اکوسیستم گیاهی خزان‌پذیر با ویژگی‌های اقلیمی بیشه‌زارهای خوزستان تاکنون انجام نگرفته است که نتایج این تحقیق گویای توانایی سنجنده‌های راداری در پایش تغییرپذیری فصلی این نوع اکوسیستم‌های گیاهی است. از بین شاخص‌های مورد مطالعه نیز دو شاخص SAVI و EVI نتایج نزدیک‌تری به تصاویر رادار قطبی سنتینل-۱ داشته‌اند. اما در پوشش گیاهی نخل هر دو قطبش تغییرپذیری نزدیک به هم داشته‌اند. بازه زمانی این پژوهش فقط به سال ۲۰۱۷ محدود شده است که برای تفاوت در سال‌های مختلف نیاز است تا این سری مطالعات در دوره‌های زمانی بلندمدت‌تر مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. زیرا تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان تدریجی و ناگهانی‌اند (ورسلت و همکاران، ۲۰۱۰). از این رو، پایش چرخه فنولوژیکی گیاهان با تصاویر بیشتر و با فاصله زمانی کمتر در سری‌های زمانی طولانی‌تر نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهند. شناخت تغییرات فنولوژیکی گیاهان در اکوسیستم‌های گیاهی مختلف می‌تواند درک ما را نسبت به چگونگی شرایط آن‌ها افزایش دهد. از طرف دیگر، منحنی‌های فصلی شاخص‌های EVI و SAVI در پایش دوره‌های فصل رشد متقارن‌تر از شاخص NDVI مشاهده شد. در مقادیر EVI بین گیاهان خزان‌پذیر بیشه‌زار و همیشه سبز خرما و درختچه‌های حرا تفاوت عمده‌ای در تغییرپذیری فصلی گیاهان وجود دارد که می‌تواند در تفکیک انواع این اکوسیستم‌های گیاهی مفید باشد.

- ❖ تغییرپذیری ضرایب بازپخش در تصاویر رادار قطبی متناسب با تغییرات دوره رویش گیاهان است و این تصاویر می‌تواند در تشخیص و پایش چرخه رشد گیاهان مکمل تصاویر اپتیک قرار گیرد.
- ❖ مقایسه پولاتیزاسیون VH و VV نشان می‌دهد که ضریب بازپخش در باند VH حساسیت بیشتری به تغییرات گیاهان دارد و در نتیجه برای پایش چرخه رشد سالیانه گیاهان مناسب‌تر است. گرچه در بعضی پوشش‌های گیاهی، همچون نخل، تغییرپذیری هر دو قطبش تقریباً یکسان است. همچون، قطبش VH نتایج نزدیک‌تری به شاخص‌های EVI و SAVI نشان داد و به واقعیت زمینی نیز نزدیک‌تر است.
- ❖ از بین شاخص‌های اپتیک، شاخص‌های EVI و SAVI نسبت به NDVI تغییرات را بهتر نمایش می‌دهد، اگرچه زمان حداکثر رشد و پایان رشد را کمی زودتر از زمان واقعی خود نشان می‌دهند.
- ❖ نتایج بررسی تصاویر رادار قطبی برای اکوسیستم ماندابی همچون پوشش گیاهی جنگل‌های حرا نشان می‌دهد این تصاویر در مقایسه با تصاویر اپتیک کارایی بهتری برای پایش تغییرات فصلی گیاهان دارند. نتایج همسان در مطالعه هو و همکاران (۲۰۲۰) نیز یافت شد.
- ❖ در دسترس نبودن تصاویر اپتیک در برخی از ماه‌های سال یکی از چالش‌های پایش روند چرخه فنولوژیک گیاهان به‌شمار می‌رود که نتایج بررسی تصاویر رادار قطبی سنتینل-۱ نشان داد چنین خلأهایی با تصاویر رادار پولاریمتری برطرف‌کردنی‌اند.
- ❖ دسترسی رایگان به آرشیو کامل تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۱ و ۲ امکان استفاده از یافته‌های این پژوهش را برای محققان تسهیل می‌کند. از نتایج این تحقیق می‌توان برای تشخیص مراحل فنولوژی در مناطق با ویژگی‌های محیطی و اکوسیستمی نزدیک به مناطق مورد مطالعه استفاده کرد و برای تعمیم آن به سایر مناطق مطالعات تکمیلی ضروری است.

## تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

## منابع

- (۱) ثابتی، ح. (۱۳۵۵). جنگل‌ها، درختان و درختچه‌های ایران، تهران: سازمان تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی.
- (۲) حسامی، س. م. و دوازده‌امامی، س. (۱۳۹۵). بررسی فنولوژی گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) در سه رویشگاه مختلف در استان فارس، مجله تحقیقات جنگل‌های زاگرس، دوره ۳، شماره ۱، صص ۳۳-۴۶.
- (۳) زارع‌زاده مهریزی، ط.; خوشبخت، ک.; مهدوی دامغانی، ع. و کامبوزیا، ج. (۱۳۹۰). مطالعه اثرات کاهش جریان‌ات جزر و مدی بر ساختار رویشی جنگل‌های حرا مطالعه موردی: پارک ملی- ساحلی نای‌بند، علوم محیطی، دوره ۸، شماره ۴، صص ۴۳-۵۸.
- (۴) کوهپایه، ن.; ناصرزاده، م. و حجازی‌زاده بیگم، ز. (۱۳۹۷). طبقه‌بندی و ارتباط‌سنجی الگوهای فشار با مراحل فنولوژی خرما (مناطق سراوان و آبادان)، جغرافیای طبیعی، ۱۲ (۴۳): ۸۹-۱۰۵.
- (۵) یوسفی، ب. (۱۳۹۲). جمع‌آوری، شناسایی، و ارزیابی مورفولوژیک و فنولوژیک بیدهای استان کردستان، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۱(۱): ۱۸۴-۲۰۲.
- 6) Amalisan, B. and Hernina, R. (2017). Land cover analysis by using pixel-based and object-based image classification method in Bogor. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 98, No. 1, p. 012005).
- 7) Bazzi, H.; Baghdadi, N.; El Hajj, M.I Zribi, M.; Minh, D. H. T.; Ndikumana, E.; ... and Belhouchette, H. (2019). Mapping paddy rice using Sentinel-1 SAR time series in Camargue, France. Remote Sensing, 11(7): 887.
- 8) Bequette, B. W. (2010). Continuous glucose monitoring: real-time algorithms for calibration, filtering, and alarms. Journal of diabetes science and technology, 4(2): 404-418.
- 9) Buitenwerf, R.; Rose, L. and Higgins, S. I. (2015). Three decades of multi-dimensional change in global leaf phenology. Nature Climate Change, 5(4): 364-368.
- 10) Burrows, M. T.; Schoeman, D. S.; Buckley, L. B.; Moore, P.; Poloczanska, E. S.; Brander, K. M.; ... and Richardson, A. J. (2011). The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. Science, 334(6056): 652-655.
- 11) Cai, Y.; Lin, H. and Zhang, M. (2019). Mapping paddy rice by the object-based random forest method using time series Sentinel-1/Sentinel-2 data. Advances in Space Research, 64(11): 2233-2244.
- 12) Cai, Y.; Li, X.; Zhang, M. and Lin, H. (2020). Mapping wetland using the object-based stacked generalization method based on multi-temporal optical and SAR data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 92: 102164.
- 13) Chambers, J. Q.; Asner, G. P.; Morton, D. C.; Anderson, L. O.; Saatchi, S. S.; Espírito-Santo, F. D.; ... and Souza Jr, C. (2007). Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. Trends in Ecology & Evolution, 22(8): 414-423.
- 14) Chen, X.; Vierling, L.; Deering, D. and Conley, A. (2005). Monitoring boreal forest leaf area index across a Siberian burn chronosequence: a MODIS validation study. International Journal of Remote Sensing, 26(24): 5433-5451.
- 15) Christian, B.; Joshi, N.; Saini, M.; Mehta, N.; Goroshi, S.; Nidamanuri, R. R. and Krishnayya, N. S. R. (2015). Seasonal variations in phenology and productivity of a tropical dry deciduous forest from MODIS and Hyperion. Agricultural and Forest Meteorology, 214-215: 91-105.
- 16) Clark, R. N.; Kokaly, R. F.; Swayze, G. A.; Livo, K. E.; Hoefen, T. M.; Pearson,

- N. C.; ...and Klein, A. J. (2017). USGS Spectral Library Version 7: Data Series 1035. 61.
- 17) Cohen, W. B.; Yang, Z. G. and Kennedy, R. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync - Tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114: 2911-2924.
- 18) Drusch, M.; Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120: 25-36.
- 19) Duke, N. C.; Meynecke, J. O.; Dittmann, S.; Ellison, A. M.; Anger, K.; Berger, U.; ... and Dahdouh-Guebas, F. (2007). A world without mangroves?. *Science*, 317(5834): 41-42.
- 20) Ellison, J.C. and Simmonds, S. (2003). Structure and Productivity of inland mangrove stands at Lake MacLeod, Western Australia. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 86: 25-30.
- 21) ESA (2017). Sentinels Scientific Data Hub. Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu/Dhus/#/home>.
- 22) Field, C. B.; Gamon, J. A. and Peñuelas, J. (1995). Remote sensing of terrestrial photosynthesis. In *Ecophysiology of photosynthesis* (pp. 511-527). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 23) Fisher, J. I.; Mustard, J. F. and Vadeboncoeur, M. A. (2006). Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote sensing of environment*, 100(2): 265-279.
- 24) Flores-Anderson, A. I.; Herndon, K. E.; Thapa, R. B. and Cherrington, E. (2019). Sampling Designs for SAR-Assisted Forest Biomass Surveys. *THE SAR HANDBOOK Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*, 1-307.
- 25) Frankie, G.W.; Baker, H.G. and Opler, P.A., (1974). Comparative phenological studies of trees in tropical wet and dry forests in the lowlands of Costa Rica. *J. Ecol.*, 881-919.
- 26) Frison, P. L.; Fruneau, B.; Kmiha, S.; Soudani, K.; Dufrene, E.; Le Toan, T.; ... and Rudant, J. P. (2018). Potential of Sentinel-1 data for monitoring temperate mixed forest phenology. *Remote Sensing*, 10(12): 2049.
- 27) Hansen, M. C.; Potapov, P. V.; Goetz, S. J.; Turubanova, S.; Tyukavina, A.; Krylov, A. and Egorov, A. (2016). Mapping tree height distributions in Sub-Saharan Africa using Landsat 7 and 8 data. *Remote Sensing of Environment*, 185: 221-232.
- 28) Helman, D. (2018). Land surface phenology: What do we really 'see' from space?. *Sci Total Environ*. 618: 665-673.
- 29) Hesami, M. and Davazdahemami, S. (2016). Phenology of Persian Oak (*Quercus brantii* Lindl.) in Three Different Sites in Fars Province, Iran. 3. 3 (1) :33-46. URL: <http://yujs.yu.ac.ir/jzfr/article-1-79-fa.html>. (in Persian).
- 30) 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*, Vol. 12.
- 31) Huang, N.; Wang, L.; Song, X.-P.; Black, T. A.; Jassal, R. S.; Myneni, R. B.; ...and Ji, D. (2020). Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Science Advances*, 6(41): eabb8508.
- 32) Huete, A. R. (1988); A soil adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- 33) Huete, A. R.; Liu, H. Q.; Batchily, K. and van Leeuwen, W. J. D. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59: 440-451.
- 34) Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X. and Ferreira, L. G.

- (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- 35) Jensen, J. R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- 36) Jiang, Y.; Zhang, L.; Yan, M.; Qi, J.; Fu, T.; Fan, S. and Chen, B. (2021). High-Resolution Mangrove Forests Classification with Machine Learning Using Worldview and UAV Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, Vol. 13.
- 37) Jiao, X.; McNairn, H.; Shang, J. and Liu, J. (2010, July). The sensitivity of multi-frequency (X, C and L-band) radar backscatter signatures to bio-physical variables (LAI) over corn and soybean fields. In *ISPRS TC VII Symposium—100 Years ISPRS* (pp. 317-325).
- 38) Jin, H., Eklundh, L.,. (2014). A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sens. Environ.* 152, 512–525.
- 39) Kang, J.; Hou, X.; Niu, Z.; Gao, S. and Jia, K. (2014). Decision tree classification based on fitted phenology parameters from remotely sensed vegetation data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(9): 148-156.
- 40) Khouly, A.A. and Khedr, A. (2007). Zonation pattern of *Avicennia marina* and *Rhizophora mucronata* along the Red Sea Coast, Egypt. *World applied sciences Journal*, 2(4): 283-288.
- 41) Knipling, E. B. (1970). *Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation*. 1:155-159.
- 42) Knyazikhin, Y.; Schull, M. A.; Stenberg, P.; Mottus, M.; Rautiainen, M.; Yang, Y.; ... Myneni, R. B. (2013). Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): E185–E192.
- 43) Koohpaye, N.; Naserzade, M. and Hejazizade Bigom, Z. (2019). Classification and measurement of pressure patterns with date phenological stages (Saravan and Abadan regions). *Physical Geography Quarterly*, 12(43), 89-104. (in Persian).
- 44) Li, J., Pei, Y., Zhao, S., Xiao, R., Sang, X. and Zhang, C. (2020). A Review of Remote Sensing for Environmental Monitoring in China. *Remote Sensing*, 12(7): 1130.
- 45) Liao, C.; Wang, J.; Dong, T.; Shang, J., Liu, J. and Song, Y. (2019). Using spatio-temporal fusion of Landsat-8 and MODIS data to derive phenology, biomass and yield estimates for corn and soybean. *Science of the total environment*, 650: 1707-1721.
- 46) Louis, J.; Debaecker, V.; Pflug, B.; Main-Knorn, M.; Bieniarz, J.; Mueller-Wilm, U.; ... and Gascon, F. (2016). Sentinel-2 sen2cor: L2a processor for users. In *Proceedings Living Planet Symposium* (pp. 1-8). Spacebooks Online.
- 47) Lovelock, C. E.; Feller, I. C.; Ellis, J.; Schwarz, A. M.; Hancock, N.; Nichols, P. and Sorrell, B. (2007). Mangrove growth in New Zealand estuaries: the role of nutrient enrichment at sites with contrasting rates of sedimentation. *Oecologia*, 153(3), 633-641.
- 48) Lu, X., Cheng, X., Li, X., Chen, J., Sun, M., Ji, M., ... & Tang, J. (2018). Seasonal patterns of canopy photosynthesis captured by remotely sensed sun-induced fluorescence and vegetation indexes in mid-to-high latitude forests: A cross-platform comparison. *Science of the total environment*, 644, 439-451.
- 49) Macelloni, G.; Paloscia, S.; Pampaloni, P.; Marliani, F. and Gai, M. (2001). The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4): 873-884.
- 50) Miao, N.; Jiao, P.; Tao, W.; Li, M.; Li, Z.; Hu, B. and Moermond, T. C. (2020). Structural dynamics of *Populus euphratica* forests in different stages in the upper reaches of the Tarim River in China. *Scientific Reports*, 10(1): 3196.
- 51) Montesano, P. M.; Nelson, R.; Sun, G.; Margolis, H.; Kerber, A. and Ranson, K. J. (2009). MODIS tree cover validation for the circumpolar taiga-tundra transition zone. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2130-2141.

- 52) Moran, M. S.; Vidal, A.; Troufleau, D.; Qi, J.; Clarke, T. R.; Pinter Jr, P. J.; ... and Neale, C. M. U. (1997). Combining multifrequency microwave and optical data for crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61(1): 96-109.
- 53) Moran, M. S., Alonso, L., Moreno, J. F., Mateo, M. P. C., De La Cruz, D. F., & Montoro, A. (2011). A RADARSAT-2 quad-polarized time series for monitoring crop and soil conditions in Barrax, Spain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(4), 1057-1070.
- 54) Murphy, P. G. and Lugo, A. E. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annual review of ecology and systematics*, 17(1): 67-88.
- 55) Naidoo, G. (2010). Ecophysiological differences between fringe and dwarf *Avicennia marina* mangroves. *Trees*, 24: 667-673.
- 56) Niphadkar, M.; Nagendra, H.; Tarantino, C.; Adamo, M. and Glenn, N. F. (2017). Comparing Pixel and Object-Based Approaches to Map an Understorey Invasive Shrub in Tropical Mixed Forests. 8(May), 1-18.
- 57) Pastor-Guzman, J.; Dash, J. and Atkinson, P. M. (2018). Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. *Remote sensing of environment*, 205: 71-84.
- 58) Piao, S.; Wang, X.; Park, T.; Chen, C.; Lian, X. U.; He, Y.; ... and Myneni, R. B. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1); 14-27.
- 59) Potere, D. (2008). Horizontal positional accuracy of Google Earth's high-resolution imagery archive. *Sensors*, 8: 7973-7981.
- 60) Potter, C. S.; Klooster, S. A. and Brooks, V. (1999). Interannual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales. *Ecosystems*, 2: 36-48.
- 61) Proisy, C.; Mougin, E.; Dufrêne, E.; Dantec, V.L. (2000). Monitoring seasonal changes of a mixed temperate forest using ERS SAR observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 38, 540-552.
- 62) Qiao, K.; Zhu, W.; Xie, Z. and Li, P. (2019). Estimating the seasonal dynamics of the leaf area index using piecewise LAI-VI relationships based on phenophases. *Remote Sensing*, 11(6): 689.
- 63) Reich, P. B. and Borchert, R. (1984). Water stress and tree phenology in a tropical dry forest in the lowlands of Costa Rica. *The Journal of Ecology*, 61-74.
- 64) Richards, J.A. (2009). *Remote sensing with imaging radar*. New York, Springer.
- 65) Rocha, A. V. and Shaver, G. R. (2009). Advantages of a two band EVI calculated from solar and photosynthetically active radiation fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(9): 1560-1563.
- 66) Rüetschi, M.; Schaepman, M. E. and Small, D. (2018). Using multitemporal sentinel-1 c-band backscatter to monitor phenology and classify deciduous and coniferous forests in northern switzerland. *Remote Sensing*, 10(1): 55.
- 67) Saadat, M.; Hasanlou, M. and Homayouni, S. (2019). Rice Crop Mapping Using SENTINEL-1 Time Series Images (case Study: Mazandaran, Iran). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 897-904.
- 68) Sabeti, H. (1355). *Forests, trees and shrubs of Iran*. Agricultural and Natural Resources Research Organization, p 810. (in Persian).
- 69) Savoy, P. and Mackay, D. S. (2015). Modeling the seasonal dynamics of leaf area index based on environmental constraints to canopy development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200: 46-56.
- 70) Schlund, M. and Erasmi, S. (2020). Remote Sensing of Environment Sentinel-1 time series data for monitoring the phenology of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 246(March), 111814.
- 71) Song, C. and Woodcock, C. E. (2003). Monitoring forest succession with multitemporal Landsat images: Factors of uncertainty. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11): 2557-2567.



- 72) Shimada, Masanobu; Takuya Itoh; Takeshi Motooka; Manabu Watanabe; Tomohiro Shiraishi; Rajesh Thapa; and Richard Lucas (2014). New Global Forest/Non-Forest Maps from ALOS PALSAR Data (2007-2010). *Remote Sensing of Environment*, 155: 13-31.
- 73) Stendardi, L.; Karlsen, S. R.; Niedrist, G.; Gerdol, R.; Zebisch, M.; Rossi, M. and Notarnicola, C. (2019). Exploiting time series of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery to detect meadow phenology in mountain regions. *Remote Sensing*, 11(5): 542.
- 74) Thevs, Niels; Stefan Zerbe; Jan Peper; and Michael Succow (2008). Vegetation and Vegetation Dynamics in the Tarim River Floodplain of Continental-Arid Xinjiang, NW China. *Phytocoenologia*, 38(1-2): 65-84.
- 75) Tian, H.- Huang, N.- Niu, Z., Qin, Y.- Pei, J. and Wang, J. (2019). Mapping winter crops in China with multi-source satellite imagery and phenology-based algorithm. *Remote sensing*, 11(7): 820.
- 76) Torres, R.; Snoeij, P.; Geudtner, D.; Bibby, D.; Davidson, M.; Attema, E.; ... and Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120: 9-24.
- 77) Treshkin, S. Y. (2012). *The Tugai Forests of Floodplain of the Amudarya River: Ecology, Dynamics and Their*. Springer, 95.
- 78) Vavlas, N. C.; Waine, T. W.; Meersmans, J.; Burgess, P. J.; Fontanelli, G. and Richter, G. M. (2020). Deriving Wheat Crop Productivity Indicators Using Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing*, 12(15): 2385.
- 79) Venter, O.; Brodeur, N. N.; Nemiroff, L.; Belland, B.; Dolinsek, I. J. and Grant, J. W. (2006). Threats to endangered species in Canada. *Bioscience*, 56(11): 903-910.
- 80) Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Remote Sensing of Environment Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115.
- 81) Wang, J.; Xiao, X.; Bajgain, R.; Starks, P.; Steiner, J.; Doughty, R. B. and Chang, Q. (2019). Estimating leaf area index and aboveground biomass of grazing pastures using Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154: 189-201.
- 82) Wang, C., Chen, J., Wu, J., Tang, Y., Shi, P., Black, T.A., Zhu, K. (2017). A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 196, 1–12.
- 83) Yang, W.; Kobayashi, H.; Wang, C.; Shen, M.; Chen, J.; Matsushita, B.; ... and Kondoh, A. (2019). A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 228: 31-44.
- 84) Yousefi, B. (2013). Collection, identification and morphological - phonological evaluation of Willows accessions at Kurdistan province of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(1): 184-202. (in Persian).
- 85) Zare Zadeh Mehrizi, T.; Khoshbakht, K.; Mahdavi Damghani, A. and Kambouzia, J. (2011). Studying Effects of Reduction in Tidal Flooding on the Structure of Mangrove Forests, A Case Study From Nayband Coastal National Park. *Environmental Sciences*, 8(4): 43-58. Retrieved from. (in Persian).
- 86) Zhang, M.; Lin, H.; Wang, G.; Sun, H. and Fu, J. (2018). Mapping paddy rice using a convolutional neural network (CNN) with Landsat 8 datasets in the Dongting Lake Area, China. *Remote Sensing*, 10(11): 1840.
- 87) Zheng, G.; Chen, J. M.; Tian, Q. J.; Ju, W. M. and Xia, X. Q. (2007). Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 616-623.