

Original Article



Monitoring the Changes of Vegetation Phenological Cycles in Ahvaz City Using Remote Sensing Images

Morteza Sharif¹ and Sara Attarchi^{2*}

Affiliation

1. MSc. Graduate,
Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Assistant professor,
University of Tehran,
Faculty of Geography,
Department of Remote Sensing and GIS, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Introduction: Plant phenology plays an important role in plant ecosystems and serves as a key indicator of ecological changes. With the expansion of urbanization, urban green spaces have become increasingly important in residential areas. On the other hand, the use of plants in urban settings and the green space services they provide have garnered significant attention in recent studies. The value of urban green spaces has been recognized for their numerous benefits to human health and the ecological environment of cities. Therefore, it is essential to study and monitor the phenological cycles of plants in urban areas at various spatial-temporal scales, considering their pivotal role in the urban ecosystem and society health.

Materials and methods: This study utilized the widely used NDVI and EVI indices calculated from Landsat satellite OLI sensor and MOD13Q1 product of MODIS sensor images to investigate the plant phenology cycle in the Ahvaz metropolitan area from 2015 to December 2019. Satellite images were retrieved and processed using the Google Earth Engine platform. The phenological cycle of plants was obtained based on the vegetation indices, categorized according to vegetation type and compared with the phenological cycle obtained from the ground survey data. Due to probability noise and pixels with spectral mixing, a Savitzky-Golay filter was applied to smooth the phenological cycle of plants.

Results and discussion: The results indicate the increasing trend in the values of both NDVI and EVI indices annually, with a rise of 0.03 and 0.04 in the OLI sensor and 0.01 in the MOD13Q1 product, respectively. These positive changes were particularly noticeable in January, March, October, November, and December for both sensors. Variations in plant phenology phases were observed between the two sensors, with the most significant differences occurring in 2018 and 2019. This shows that under favorable weather conditions, there is an increase in plant chlorophyll content, leading to disparities between the results of the two sensors. The transition periods of the growing season identified by the OLI sensor exhibited more detail compared to the MODIS medium resolution dataset. Although the MODIS sensor indicated an earlier start to the growing season than the OLI sensor, the shape of the phenological cycle curves from both sensors appeared similar despite discrepancies in their start and end dates.

Generally, according to the MODIS product, the duration of the growing season (between mid-winter and early summer) is approximately four months. These disparities point to more changes in vegetation that can be better detected using high-resolution images compared to sensors with medium and low spatial resolution. Overall, significant changes in the phenological cycle of plants were observed at the urban area level, reflecting various ground phenomena that contribute to increased heterogeneity in satellite sensor image pixels.

Conclusion: The smallest difference between the periods of the growing season of plants observed by ground observations in OLI and MODIS sensors was 7 and 10 days for the Start of Growing Season (SOS), respectively. The largest difference was noted at the peak of the growing season, with disparities of 20 and 35 days, and for the End of Growing Season (EOS), 20 days later and 20 days earlier, respectively, based on ground observations. However, the length of the growing season (LOS) in the OLI sensor is approximately five months, indicating closer alignment with ground observations. This divergence is attributed to increased heterogeneous conditions in the target phenomena and/or the spatial resolution of MODIS sensor images. It is evident that the results obtained from the OLI sensor enhance our understanding of human interactions with the natural environment in urban areas. Addressing these findings in future studies can help mitigate environmental challenges and provide more accurate information for planning purposes.

Keywords: MODIS, SOS, EOS, OLI, EV

Citation: Sharif, M., and Attarchi, S., Monitoring the Changes of Vegetation Phenological Cycles in Ahvaz City Using Remote Sensing Images, Iran J Remote Sens GIS. 16(3):1-24.





پایش روند تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان در شهر اهواز با استفاده از تصاویر سنجش از دور

مرتضی شریف^۱ و سارا عطارجی^{۲*}

سمت

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، رشته سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. استادیار و عضو هیئت علمی گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

سابقه و هدف: فنولوژی گیاهان نقش مهمی در اکوسیستم‌های گیاهی ایفا می‌کند و شاخصی مهم در تغییرات بوم‌شناختی به شمار می‌رود. با توجه به گسترش شهرنشینی، فضای سبز شهری گاهی نقشی حیاتی در این مناطق مسکونی دارد. از طرف دیگر، استفاده از گیاهان در سطح شهرها و خدمات فضای سبزی که آنها ارائه می‌دهند، توجه زیادی را هم در سطح عمومی و هم در مطالعات جدید به خود جلب کرده است. ارزش فضای سبز شهری به دلیل مزایای متعدد آن برای سلامتی انسان و محیط بوم‌شناختی شهرها حائز اهمیت است. از این رو، با توجه به اهمیت نقش گیاهان در اکوسیستم شهری و نقش آن در سلامت جامعه، مطالعه و پایش چرخه فنولوژیکی گیاهان در فصل‌های مختلف سال در مناطق شهری در مقیاس‌های مکانی-زمانی مختلف ضروری است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، با استفاده از دو شاخص پرکاربرد NDVI و EVI محاسبه‌شده از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست-۸ و تصاویر محصول MODIS3Q1 سنجنده مودیس ماهواره تراه، چرخه فنولوژی گیاهان در سطح کلان‌شهر اهواز در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۹ تحلیل شد. تصاویر ماهواره‌ای از طریق پلتفرم گوگل ارت انجین فراخوانی و تهیه شد. سپس، با توجه به نوع پوشش گیاهی، چرخه فنولوژیکی گیاهان براساس شاخص‌های پوشش گیاهی به دست آمد و با چرخه فنولوژیکی به‌دست‌آمده از بررسی‌های زمینی مقایسه شد. با توجه به احتمال وجود نویز و پیکسل‌هایی با اختلاط طیفی، برای هموارسازی چرخه فنولوژیکی گیاهان از فیلتر Savitzky-Golay استفاده شد.

نتایج: نتایج به‌دست‌آمده حاکی از روند افزایش مقادیر هر دو شاخص NDVI و EVI به ترتیب با ۰/۰۳ و ۰/۰۴ در سنجنده OLI و ۰/۰۱ (در سال) در محصول سنجنده مودیس است. این تغییرات در ماه‌های ژانویه، مارس، اکتبر، نوامبر و دسامبر در هر دو سنجنده افزایشی بوده است که به معنای شرایط بهتر زیستی گیاه است. زمان دوره‌های فنولوژی گیاهان در هر دو سنجنده متفاوت بود. بیشترین اختلاف در هر دو سنجنده در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ مشاهده شد. با توجه به مناسب‌تر بودن شرایط محیطی در این دو سال در مقایسه با سایر سال‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان کلروفیل گیاه، میزان اختلاف بین نتایج این دو سنجنده بیشتر می‌شود. دوره‌های انتقال فصل رشد به‌دست‌آمده از سنجنده OLI جزئیات بیشتری را در مقایسه با مجموعه داده‌های با وضوح متوسط مودیس نشان داد. در سنجنده مودیس در مقایسه با سنجنده OLI زمان شروع دوره‌های فصل رشد، زودتر بود. این تفاوت‌ها گویای تغییرات بیشتر پوشش گیاهی است که استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک بالا قابلیت تشخیص بهتری نسبت به سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین دارند. به‌طور کلی، نتایج قابل قبولی از تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان در سطح یک منطقه شهری با انواع مختلف پدیده‌های زمینی که سبب ناهمگنی بیشتر در پیکسل‌های تصاویر سنجنده‌های ماهواره‌ای می‌شود، مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: نتایج مقایسه دوره‌های فصل رشد در سنجنده OLI و مودیس (به ترتیب) با واقعیت زمینی نشان می‌دهد کمترین اختلاف در شروع فصل رشد با ۷ و ۱۰ روز بوده است. بیشترین اختلاف بین نتایج به‌دست‌آمده از سنجنده‌های OLI و مودیس (به ترتیب) با واقعیت زمینی در اوج فصل رشد با ۲۰ و ۳۵ روز و پایان فصل رشد ۲۰ روز دیرتر و ۲۰ روز زودتر بوده است. طول فصل رشد در سنجنده مودیس حدود چهار ماه و در سنجنده OLI حدود پنج ماه مشاهده شد که نتایج لندست به واقعیت زمینی نزدیک‌تر است. این تفاوت را می‌توان به افزایش تعداد پیکسل‌های مخلوط با توجه به قدرت تفکیک مکانی تصاویر سنجنده مودیس نسبت داد. نتایج این پژوهش، می‌تواند راهگشای بررسی تغییرات چرخه‌های فنولوژیکی در پاسخ به تغییرات محیطی با استفاده از تصاویر سنجش از دور در مناطق شهری باشد.

واژه‌های کلیدی: مودیس، شروع فصل رشد، پایان فصل رشد، OLI, EVI

استناد: شریف، م. و عطارجی، س.، پایش روند تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان در شهر اهواز با استفاده از تصاویر سنجش از دور، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳: ۱-۲۴.



۱- مقدمه

فنولوژی گیاهی، زمان وقایع زیستی دوره‌ای فصلی (مثلاً، باز شدن برگ تا دوره پیری گیاه)، در پاسخ به تغییرات نشانه‌های محیطی، از جمله دما (Richardson et al., 2013)، بارش (Cook et al., 2012) و طول روز (Menzel et al., 2006) است. درک محرک‌ها و مکانیسم‌های فنولوژی برای پیش‌بینی و کاهش تأثیرات احتمالی صدمات ناشی از تغییرات آب‌وهوا و پوشش زمین بر تنوع زیستی، عملکرد اکوسیستم و چرخه کربن زمینی بسیار حیاتی است (Penuelas et al., 2009). از طرفی مطالعه فنولوژی پوشش گیاهی و شاخص‌های مرتبط به طور گسترده‌ای برای ارزیابی تأثیر عوامل محیطی مانند انتشار کربن، تنوع زیستی، تغییر درجه حرارت سطح زمین و تغییرات پوشش زمین بر اکوسیستم‌های زمینی استفاده می‌شود (Da Silva et al., 2015). مثلاً تغییرات در فنولوژی پوشش گیاهی تحت تأثیر شرایط آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در سیستم‌های شهری گزارش شده است (Brown et al., 2010).

مطالعات در زمینه فنولوژی پوشش گیاهی شهری از جمله شاخص‌های تعامل بین سیستم‌های طبیعی و انسانی است که سبب افزایش شناخت پژوهشگران از تحولات اقلیمی نیز به شمار می‌رود (Jochner and Menzel, 2015). برای شناخت این عوامل با توجه به روند رو به گسترش فناوری‌های روز دنیا، استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور یکی از راه‌های مؤثر در پایش این تغییرات محسوب می‌شود. از مهم‌ترین سنجنده‌ها برای پایش پوشش‌های گیاهی با دوره زمانی بلندمدت می‌توان به سنجنده‌های مودیس (۲۲ سال)، سری تصاویر ماهواره‌ای اسپات (۳۶ سال)، سری لندست (۵۰ سال) و سنجنده AVHRR با ۵۲ سال تصویربرداری (تا سال ۲۰۲۰) اشاره کرد که تصاویری از سراسر کره زمین را جمع‌آوری می‌کنند و در اختیار کاربران قرار می‌دهند. این تصاویر، آرشو مهمی در تغییر و تحول اکوسیستم‌های گیاهی هستند. با بررسی چنین تصاویری می‌توان چگونگی سیر تغییرات این اکوسیستم‌ها را ارزیابی کرد.

مطالعات گذشته نشان داده، مشاهدات مبتنی بر تصاویر با قدرت تفکیک مناسب همچون سری‌های لندست به‌طور بالقوه توانایی به دست آوردن جزئیات دقیق ویژگی‌های فنولوژی را دارند، زیرا دارای قدرت تفکیک مکانی مناسب (۳۰ متر) هستند (Li and Gong, 2016; Li et al., 2017). تصاویر ماهواره‌ای سری لندست ترکیبی از ویژگی‌های زمانی و مکانی مورد نیاز را برای ایجاد سری زمانی شاخص‌های گیاهی با کیفیت بالا ارائه می‌دهند و در صورت عدم ابرناکی و یا میزان بالای مه و دیگر ذراتی همچون ریزگرد که اخذ تصاویر ماهواره‌ای اپتیک را دچار مشکل می‌کند، مناسب‌اند. در حال حاضر، استفاده از سری زمانی مشاهدات مبتنی بر سری لندست برای تشخیص فنولوژی را می‌توان به دو بخش عمده تقسیم کرد. اولین بخش از اطلاعات زمانی طولانی مدت برای آشکار کردن الگوی رایج فنولوژی اکوسیستم‌های گیاهی بهره می‌برد (Li et al., 2017). مثلاً فیشر و همکاران (۲۰۰۶) با ۵۷ تصویر سری لندست برای دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۲ الگوی فنولوژی جنگل‌های خزان‌پذیر را در منطقه جنوب نیوانگلند ایالات متحده با موفقیت بازسازی کردند. آنها تنوع سالیانه فنولوژی این اکوسیستم‌ها را براساس الگوی تغییر یافته شاخص‌های گیاهی در یک سال خاص نسبت متوسط به درازمدت تخمین زدند. این رویکرد در مطالعات دیگر، با تعداد تصاویر بیشتر (Melaas et al., 2013)، یا برای مطالعه تنش‌های گیاهان (Fisher and Mustard, 2007) استفاده شده است. بخش دوم پژوهش‌ها بیشتر براساس ادغام کردن تصاویر نظیر سری سنجنده مودیس و لندست به‌عنوان یک محصول ادغام‌شده برای استفاده از روش‌های مکانی و زمانی بهتر بنا شده است که برای تشخیص پویایی فنولوژی گیاهان برای دوره‌های خاصی مطالعه شده‌اند (Li and Gong, 2016). مثلاً واکر و همکاران (۲۰۱۲) مدل تلفیقی بازتابی مکانی و زمانی (STARFM)^۱ را برای ترکیب داده‌های ۳۰ متر لندست

1. Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model

دانش نویسندگان، این مطالعه اولین تلاش در بررسی فنولوژی پوشش گیاهی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در ایران به‌شمار می‌آید. از این‌رو در این پژوهش، تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی در سطح کلان‌شهر اهواز در استان خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI لندست (با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) و تصاویر محصول MOD13Q1 سنجنده مودیس (با قدرت تفکیک ۲۵۰ متر) از طریق دو شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده گیاهی $NDVI^1$ و شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته EVI^2 ، بین سال‌های ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۹ بررسی شد. هر دو شاخص $NDVI$ و EVI از جمله متداول‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی برای پایش چرخه فنولوژیکی گیاهان به‌شمار می‌روند (Chang et al., 2019). سؤالات این پژوهش به شرح زیر است:

۱- فنولوژی پوشش گیاهی تا چه حد تحت تأثیر قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌ها قرار می‌گیرد؟
 ۲- آیا تأثیر تفکیک مکانی برای فنولوژی گیاهان در دوره‌های زمانی مختلف متفاوت است؟ در این صورت مکانیسم‌های اساسی توضیح‌دهنده الگوی زمانی چرخه فنولوژی گیاهان کدام‌اند؟

۲- داده‌ها و روش پژوهش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر اهواز در استان خوزستان واقع در محدوده جغرافیایی $20^{\circ} 31'$ عرض شمالی و $48^{\circ} 40'$ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱.ب). شهرستان اهواز با مساحتی بالغ بر $8196/4 \text{ km}^2$ که کلان‌شهر اهواز با $255/2$ حدود $3/11$ درصد از مساحت این شهرستان را شکل می‌دهد. این منطقه شرایط آب‌وهوایی نسبتاً معتدل با بارش سالانه بین ۲۹۳ میلی‌متر و متوسط دمای هوا ۲۷ درجه سانتی‌گراد با حداکثر دمای $52/7$ و حداقل دمای

و ۵۰۰ متر مودیس برای مطالعات فنولوژی در مناطق خشک (آریزونا در ایالات متحده) انجام داده‌اند. باین‌حال، عدم قطعیت‌های معرفی‌شده توسط پوشش‌های ناهمگن با توجه به قدرت تفکیک متوسط مودیس، بازیابی اطلاعات دقیق فنولوژی را براساس این روش دشوار می‌کند (Melaas et al., 2013). به‌طور کلی، چرخه فنولوژیکی گیاهان محاسبه‌شده از طریق تصاویر سنجنده لندست در مقایسه با محصولات گیاهی سنجنده مودیس، به‌ویژه برای مناطق ناهمگن همچون مناطق شهری و اکوسیستم‌های ناهمگن گیاهی که از تنوع گونه‌های گیاهی بیشتری برخوردارند، اطلاعات درخور توجهی ارائه می‌دهند (Ganguly et al., 2010).

در بسیاری از مطالعات گذشته برای مشاهده تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط مودیس استفاده شده است. به نظر می‌رسد این مطالعات تحت تأثیر قدرت تفکیک مکانی سنجنده و تنوع گونه‌های گیاهی هدف قرار گرفته‌اند. بنابراین، اغلب به نتیجه‌گیری موضعی و حتی بحث‌برانگیز در نتایج نهایی منجر می‌شوند که ناشی از تصاویر با مخلوطی از پدیده‌های مختلف در هر پیکسل است (Ganguly et al., 2010). با توجه به اینکه مناطق شهری در جهان از اواسط قرن بیست و یکم به‌سرعت در حال گسترش‌اند (Chen et al., 2020)، پیش‌بینی می‌شود تأثیرات این گسترش بر اکوسیستم‌های مختلف زمین افزایش یابد. بنابراین، داشتن بینشی عمیق درباره توانایی سنجنده‌های مختلف از پایش تغییرات پوشش‌های گیاهی امری ضروری و ارزشمند است (Jochner and Menzel, 2015). بررسی چنین مطالعاتی در ایران بسیار اندک و بیشتر در ارتباط با تخمین دوره‌های فصل رشد گیاهان به روش‌های سنتی است. با توجه به گسترش تصاویر سنجنده‌ازدور، این مجموعه داده‌ها می‌تواند فرصت مهمی برای پایش تغییرپذیری گیاهان در مقیاس‌های مختلف مکانی - زمانی و همچنین شناخت ویژگی‌های ساختاری و بیولوژیستی اکوسیستم‌های گیاهی در ایران باشد. بنا بر

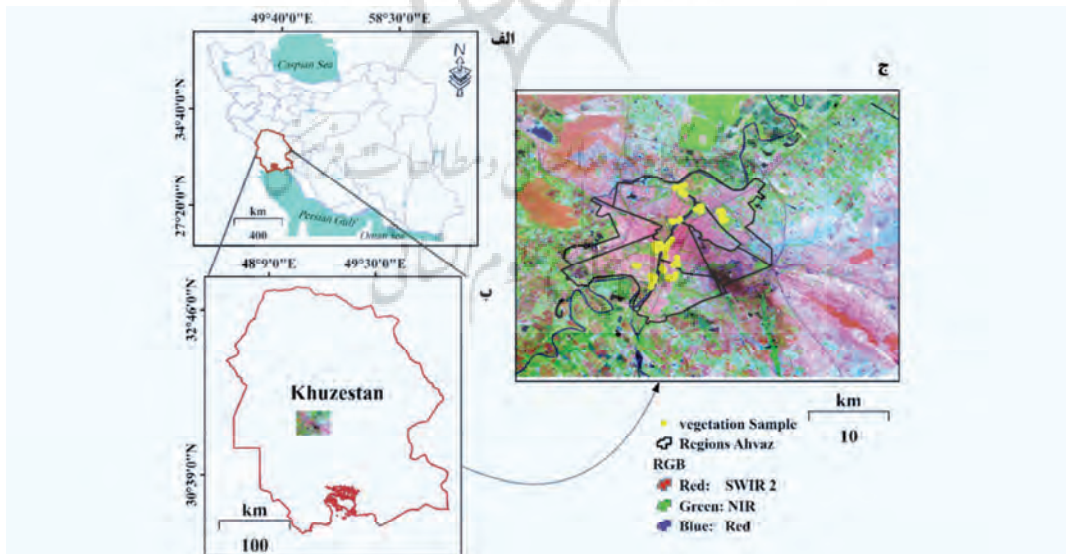
1. Normalized Difference Vegetation Index
 2. Enhanced Vegetation Index

در پیرامون این رودخانه نیز وجود دارد (Sharif et al., 2022). همچنین، پارک‌های ساحلی اطراف رودخانه شامل درختان مختلفی از جمله کهور، کنوکارپوس، اکالیپتوس و دیگر درختان وجود دارد که طی سال‌های اخیر بیشتر از گونه‌های مهاجم به شمار می‌روند.

۲-۲- داده‌های پژوهش

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌های سنجنده OLI و محصول MOD13Q1 سنجنده مودیس برای پایش پوشش گیاهی استفاده شده است. همچنین دما و بارش از داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی اهواز از سایت هواشناسی ایران (<https://data.irimo.ir>) تهیه شده است. با توجه به تغییرات آب‌وهوایی در سال‌های اخیر، افزایش گونه‌های درختی مهاجم و همچنین روند افزایش آلرژی‌های فصلی که ناشی از پوشش‌های گیاهی درختی در سطح شهر اهواز است، این مطالعه در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۹ صورت گرفت. برای پردازش‌های تصاویر پژوهش، از پلتفرم گوگل ارت انجین استفاده شد. سپس نتایج نهایی شاخص‌های گیاهی گردآوری و تحلیل شد.

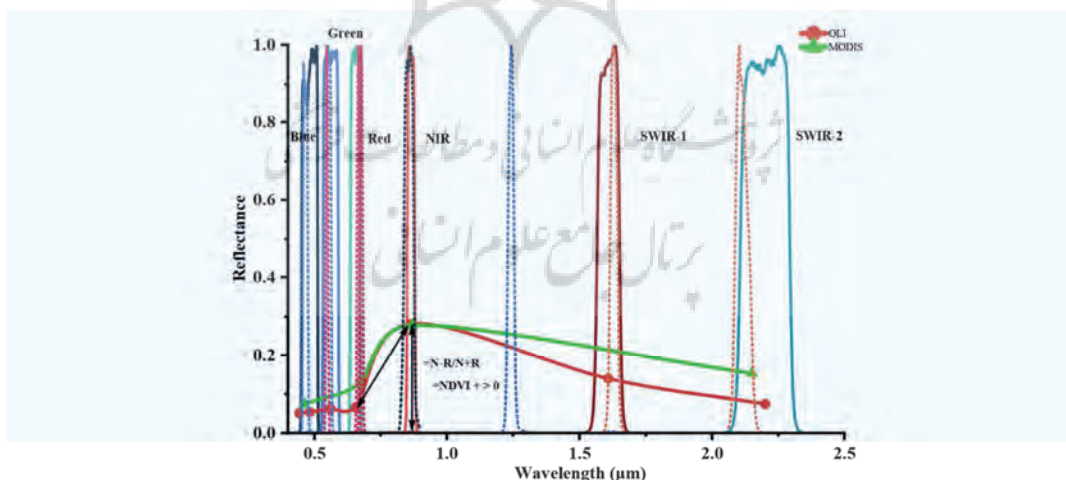
۱ درجه سانتی‌گراد است. رطوبت نسبی بین ۹۰ تا ۹۵ درصد در دی و کمترین میزان رطوبت بین ۵ تا ۱۰ درصد در خرداد (بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹) گزارش شده است (<https://data.irimo.ir>). شرایط توپوگرافی نسبتاً هموار شهرستان با متوسط ارتفاع ۱۵ متر از سطح دریا سبب شده تا شرایط جلگه‌ای آن و همجواری با کرانه‌های خلیج فارس، تحت تأثیر شرایط رطوبتی این بخش از دریا قرار گیرد. همچنین هموار بودن سطح شهر اهواز چالش‌های زیادی در مواقع سیل و افزایش رواناب سطحی که از حوضه آبخیز کارون بزرگ وارد شهرستان می‌شود، در پی دارد. همچنین با توجه به مطالعه و بررسی میدانی نویسندگان، مناطق شمالی کلان‌شهر اهواز شامل مجموعه‌ای از پوشش گیاهی کشاورزی، پوشش گیاهی بیشه‌زارها پیرامون دو رودخانه کارون و دز است. اما در منطقه جنوبی آن بیشتر پوشش‌های گیاهی شامل نخلستان‌ها و اراضی کشاورزی را تشکیل می‌دهد. با توجه به گذر رودخانه کارون بزرگ (مجموعه دو رودخانه کارون و دز که از ۳۰ کیلومتری شمال اهواز به هم می‌پیوندند)، مجموعه‌ای از پوشش گیاهی بیشه‌زارها و نیزارها



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در پژوهش: الف) موقعیت جغرافیایی استان خوزستان در کشور ایران، ب) موقعیت کلان‌شهر اهواز در استان خوزستان، ج) تصویر سنجنده OLI از سطح کلان‌شهر اهواز و محدوده پیرامون آن همراه با موقعیت نمونه‌های زمین از پوشش درختی در سطح شهر اهواز، تصویر رنگی کاذب سنجنده OLI (RGB: SWIR2, NIR, Red)

NDVI و EVI و چهار باند طیفی بازتاب سطح در محدوده‌های آبی، قرمز، مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز کوتاه (SWIR) دارد. اطلاعات این محصول از طریق سایت Earth Data ناسا (<https://lpdaac.usgs.gov/tools/data-pool>) در فایل همراه (<https://lpdaac.usgs.gov/tools/data-pool>) قابل مشاهده است. اختلاف بازتابندگی در محدوده طیفی NIR و جذب در محدوده Red مهم‌ترین ویژگی در تشخیص میزان تغییرات کلروفیل گیاهان به شمار می‌رود (Huete et al., 2002; Foroughi et al., 2020). این تفاوت بازتاب و جذب در باندهای طیفی مختلف هر دو سنجنده OLI و مودیس در شکل ۲ برای پوشش گیاهی مورد مطالعه نشان داده شده است. بیشترین تفاوت در هر دو سنجنده، میزان جذب در محدوده Red است (شکل ۲). این اختلاف با توجه به استفاده شاخص NDVI از دو باند NIR و Red بیشترین تفاوت را در نتایج این شاخص پوشش گیاهی به همراه خواهد داشت. این تفاوت در انواع پوشش گیاهی متفاوت خواهد بود.

سری‌های ماهواره‌ای لندست طولانی‌ترین اطلاعات پیوسته از سطح زمین (۵۰ سال، از سال ۱۹۷۲ تا ۲۰۲۲) را در اختیار کاربران سنجش‌ازدور قرار داده است (Sharif et al., 2023). این امر سبب می‌شود با بررسی روند تحولات و تغییرات پدیده‌های زمینی بتوان برای جلوگیری از بحران‌ها، خطرات محیطی و جلوگیری از افزایش مخاطرات طبیعی به مدیریت آنها پرداخت. سری ماهواره‌های لندست با همکاری سازمان‌های USGS^۱ و NASA^۲ اداره می‌شود. ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ پرتاب شد که دارای ۷ باند چندطیفی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، دو باند حرارتی (TIRS) و یک باند پانکروماتیک ۱۰ متری است (Li et al., 2017). تصاویر سنجنده مودیس نیز با ۲۲ سال تصویربرداری از سطح زمین (از مارس ۲۰۰۰) از دیگر تصاویر مهم در پایش گیاهان به شمار می‌رود. این سنجنده علاوه بر باندهای خام و تصحیح‌شده محصولات مختلفی نیز به کاربران ارائه می‌کند که در این مطالعه از محصول پوشش گیاهی MOD13Q1 استفاده شده است. این محصول با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و با دوره تناوب ۱۶ روزه دو شاخص گیاهی



شکل ۲. رفتار طیفی پوشش گیاهی مورد مطالعه براساس نمونه‌های برداشت‌شده در اوج فصل رشد گیاهان در تصاویر سنجنده OLI (منحنی قرمز رنگ) و تصاویر سنجنده مودیس (منحنی سبز رنگ)، پلات شده بر روی محدوده طیفی باندهای سنجنده OLI (خطوط ممتد) و سنجنده مودیس (خطوط نقطه‌چین)

1. U.S. Geological Survey
2. National Aeronautics and Space Administration

۲-۳- شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در پژوهش

شاخص‌های طیفی گیاهی محاسبات ریاضی هستند که از ترکیب باندها و الگوریتم‌های متعددی که در این خصوص طراحی شده‌اند بر روی دو یا چند باند صورت می‌گیرند تا پوشش گیاهی، متمایزتر نمایش داده شود. با توجه به نحوه محاسبه شاخص‌های گیاهی و خصوصیات باندهای سنجنده به‌کاررفته در هر کار پژوهشی باید از شاخص‌هایی که با ویژگی‌های آن سنجنده مرتبط است، استفاده کرد تا نتیجه‌ای بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت به دست آید. اکثر شاخص‌های گیاهی براساس افزایش جذب در محدوده باند آبی و قرمز (به دلیل وجود کلروفیل در گیاهان) و بازتاب بالا در محدوده طیفی مادون قرمز نزدیک و همچنین جذب در محدوده طیفی مادون قرمز میانی (به دلیل وجود آب در گیاهان) استوار است. سنجنده‌هایی که باندهای طیفی بیشتر و باریک‌تری در این محدوده‌ها دارند انواع پوشش‌های گیاهی را بهتر تفکیک می‌کنند. مقادیر مختلف شاخص‌های گیاهی می‌تواند بیانگر پوشش‌های متفاوت گیاهی باشد. این شاخص‌ها به تغییرات پس‌زمینه تاج پوشش (خاک پس‌زمینه) حساسیت بالایی نشان می‌دهند. مقدار NDVI به‌ویژه در پس‌زمینه‌های تاریک بالاست (Huete et al., 2002). شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در این پژوهش شامل شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI است. NDVI از جمله شاخص‌های گیاهی مهم و پرکاربرد برای پایش و برآورد انواع پوشش‌های گیاهی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی به شمار می‌رود (Huete et al., 2002). همچنین این شاخص برای مقایسه تغییرات فصلی و بین سال‌های مختلف پوشش گیاهی کاربرد دارد. شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI) به خاک پس‌زمینه حساس است و از ویژگی‌های آن می‌توان به سطح بالای اشباع و دامنه تغییرات وسیع اشاره کرد. شاخص EVI نسبت به NDVI توانایی بیشتری برای

مطالعه میزان تغییرات ساختاری تاج پوشش گیاهی و میزان کلروفیل گیاهان دارد (Huete, Justice, & Liu, 2002; Huete et al., 1994). برای محاسبه شاخص‌های گیاهی مورد استفاده از باندهای طیفی آبی، قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده شده است. شاخص NDVI از طریق رابطه (۱) و EVI از طریق رابطه (۲) به دست می‌آیند.

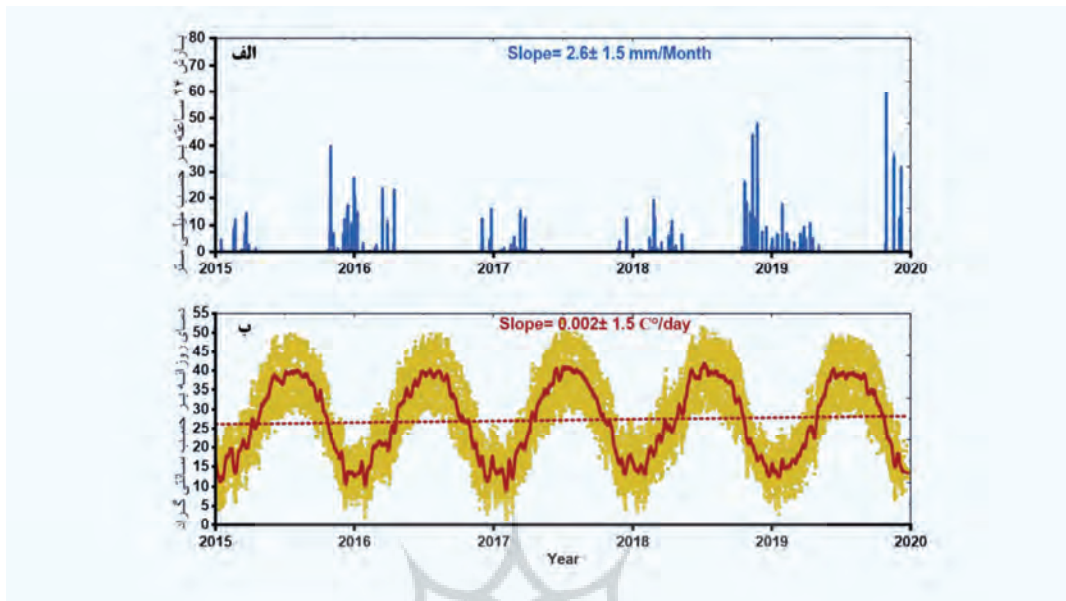
$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{NDVI} = \frac{(\rho\text{NIR} - \rho\text{Red})}{\rho\text{NIR} + \rho\text{Red}}$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{EVI} = 2.5 \times \frac{(\rho\text{NIR} - \rho\text{Red})}{\rho\text{NIR} + C1 \times \rho\text{Red} - C2 + \text{Blue} + L}$$

که در هر دو رابطه، باندهای ρBlue و ρNIR ، ρRed به ترتیب بازتاب در باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی هستند. در رابطه (۲) نیز ضرایب $C1$ ، $C2$ و L ضریب مقاومت در برابر آتروسل است که از باند آبی برای تصحیح اثرات آتروسل در باند قرمز استفاده می‌کند. مقادیر این ضرایب به ترتیب برابر ۶، ۷/۷۵ و ۱ است (Huete et al., 2002).

۲-۴- روند تغییرات بارش و دمای در کلان‌شهر اهواز

برای اطلاع از چگونگی روند تغییرات پارامترهای جوی از ایستگاه هواشناسی کلان‌شهر اهواز داده‌های بارش و دما از طریق سایت هواشناسی کشور (<https://data.irimo.ir>) گردآوری و نمودار روند تغییرات هر دو پارامتر ترسیم شد. شکل ۳ روند تغییرات دما و بارش را بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. متوسط دمای روزانه ۲۷ درجه سانتی‌گراد بوده است (شکل ۳، ب)، با متوسط بین ۲۶/۷، ۲۷/۱، ۲۷/۳، ۲۶/۷ و ۲۷/۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ ثبت شد. بارش روزانه نیز بین ۵ تا ۶۵ میلی‌متر است که متوسط سالانه با ۲۴۹، ۱۴۸، ۷۵، ۳۲۳ و ۲۸۵ میلی‌متر به دست آمد. سال ۲۰۱۷ با ۷۵ میلی‌متر بارش کم‌بارش‌ترین و سال ۲۰۱۸ با ۳۲۳ میلی‌متر بیشترین بارش سالانه را داشته است (شکل ۳، الف).



شکل ۳. الف) متوسط بارش ۲۴ ساعته، ب) دمای روزانه (محدوده زرد رنگ) و ماهانه (نمودار قرمز رنگ) کلان‌شهر اهواز بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ (<https://data.irimo.ir>)

۲-۵- چرخه فنولوژیکی گیاهان مورد مطالعه

در جدول ۱، زمان وقایع مهم چرخه فنولوژیکی پوشش گیاهی مورد مطالعه با استفاده از مطالعات میدانی و بررسی پژوهش‌ها گذشته ارائه شده است. در این جدول پنج پارامتر مهم در چرخه‌های فنولوژیکی گیاهان شامل شروع فصل رشد (SOS)^۱، حداکثر مقدار کلروفیل گیاه (Max Green)^۲ یا پیک (Peak) کلروفیل گیاه، پایان فصل رشد (EOS)^۳ و طول فصل رشد (LOS)^۴ در نظر گرفته شده است (Cai et al., 2019; Cai et al., 2020). به‌طور کلی با توجه به شرایط آب‌وهوایی خوزستان، گیاهان طبیعی با پوشش‌های درختی در سطح شهرها از دهه دوم بهمن (ماه فوریه) شروع به جوانه زدن می‌کنند و تا دهه اول خرداد (ماه ژوئن) به حداکثر تراکم شاخ و برگ و میزان سبزی‌نگی خود می‌رسند (Sharif et al., 2022; Sharif & Attarchi 2024). اما با شروع فصل تابستان (ماه ژوئیه) به دلیل افزایش گرمای هوا میزان سبزی‌نگی و کلروفیل آن کاهش می‌یابد. این روند کاهشی تا اواخر شهریور (دهه سوم سپتامبر) ادامه می‌یابد. از اواخر شهریور

بعضی از گیاهان، به دلیل افزایش میزان رطوبت و خنک‌تر شدن هوا، طی یک دوره حدوداً یک‌ماهه رشد اندکی پیدا می‌کنند (Sharif et al., 2022). باین‌حال، بدیهی است که تغییرات شرایط آب‌وهوایی سبب تغییر در دوره‌های فصل رشد می‌شود.

پوشش گیاهی در سطح شهر اهواز در پارک‌های ساحلی اطراف رودخانه و فضاهای سبز شهر اغلب شامل کهور، کنوکارپوس، درخت صدر با نام محلی گنار، درختچه‌های گل‌های کاغذی، شیشه‌شور اهوازی، درختان نخل و اکالیپتوس می‌شوند. باین‌حال، در گستره پیرامون رودخانه کارون در مرکز شهر، پوشش گیاهی بیشه‌زار شامل درختان بید، درختچه‌های گز و نیزار نیز وجود دارد. از این‌رو، چرخه فنولوژیکی به صورت کلی تغییرات مهم پوشش گیاهی درختان با بیشترین تعداد که تأثیر زیادی در میزان NDVI دارند، ارائه شده است. در پوشش گیاهی درختی در سطح

1. Start of Growing Season
2. Time of maximum greenness
3. End of Growing Season
4. Length of Growing Season

اتمسفری مورد نیاز را دارند و محصول گیاهی MOD13Q1 سنجنده مودیس با استفاده از پلتفرم گوگل ارت انجین فراخوانی و تهیه شد. از ویژگی‌های مهم پلتفرم گوگل ارت انجین فراخوانی محصولاتی است که تصحیحات اولیه رادیومتریک بر روی آنها صورت گرفته است. سپس، با توجه به نمونه‌هایی از نوع پوشش گیاهی درختی که در شکل ۱، ج نیز پراکنندگی آنها نشان داده شده است، هر دو شاخص پوشش گیاهی استخراج شد. برای حذف میزان نویز در سری زمانی مورد مطالعه با اعمال فیلتر S-G^۴ هموارسازی و دوره‌های فنولوژیکی گیاهان هدف شامل SOS، Peak، EOS و LOS به دست آمد. در نهایت، نتایج پژوهش با استفاده از ترکیبی از مشاهدات فنولوژی در هر دو محصول گیاهی سنجنده مودیس و OLI ماهواره لندست-۸ در مدت مشابه برای مناطق مورد بررسی، تحلیل شد. در این پژوهش، برای تعیین نمونه‌های واقعیت زمینی از پوشش گیاهان درختی در هر منطقه از طریق تصاویر با قدرت تفکیک بالای گوگل ارت که در بستر پلتفرم گوگل ارت انجین قرار دارد، تعداد ۱۲۰ نمونه برای پوشش گیاهی در سطح کلان‌شهر اهواز انتخاب شد (شکل ۱، ج). این امر با توجه به شناخت میدانی نویسندگان از منطقه و پوشش گیاهی مورد

شهر اهواز دوره‌های فصل رشد شامل شروع فصل رشد (از شروع جوانه زدن شاخ و برگ‌های ریز تا باز شدن برگ درختان) از دهه دوم بهمن تا دهه سوم اسفند (بین دهه اول فوریه تا دهه سوم مارس) در تغییر است. اما رشد شاخ و برگ درختان در یک دوره زمانی تقریباً دو ماهه کامل می‌شود. اوج فصل رشد نیز بین دهه سوم اردیبهشت تا دهه دوم خرداد (دهه سوم مه تا دهه دوم ژوئن) رخ می‌دهد. دوره پایان فصل رشد با توجه به افزایش دمای هوا از ابتدای تیر (دهه اول ژوئیه) است (جدول ۱). برای گیاهان همیشه سبز همچون درختان خرما و یا درختان کنوکارپوس، این چرخه فنولوژیکی متفاوت است. برای درختان نخل شروع سبزیگی گیاه از دهه سوم آبان (اواخر نوامبر) و اوج میزان کلروفیل در اواخر بهمن تا اوایل اسفند (دهه سوم فوریه تا دهه سوم مارس) و پایان فصل رشد بین ماه‌های فروردین تا اواخر اردیبهشت (آوریل و مه) است (جدول ۱).

۲-۶- روش پژوهش

روش کلی پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است. در این پژوهش ابتدا، برای دوره زمانی ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۹، شاخص‌های گیاهی EVI و NDVI براساس باندهای لندست محصول (TOA) که تصحیحات

جدول ۲. تقویم زمینی دوره‌های فنولوژی گیاهان در سطح شهر اهواز

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
ten-day	EML	EML	EML	EML	EML	EML	EML	EML	EML	EML	EML	EML
بیشه‌زار		۱	۲	۳	۴	۵						
درختان صدر		۱	۲	۳	۴	۵						
درخت‌های برهان		۱	۲	۳	۴	۵						
اکالیپتوس		۱	۲	۳	۴	۵						
درختان کنوکارپوس		۱	۲	۳	۴	۵						
نخل	۲	۳	۴	۵							۱	

^۱ ten-day بیانگر دوره‌های ده روز در هر ماه است. اولین دوره ده‌روزه ماه (E)، ده روز میانی ماه (M)، آخرین دوره ده روز ماه (L)؛^۲ دوره‌های فنولوژی گیاهان مورد مطالعه شامل شروع فصل رشد شامل جوانه زدن و باز شدن برگ درختان (۱ و ۲)، کامل شدن رشد شاخ و برگ گیاهان (۳)، اوج فصل رشد گیاه (۴)، پایان فصل رشد (۵).

1. Early ten-day
2. Middle ten-day
3. Last ten-day
4. Savitzky-Golay

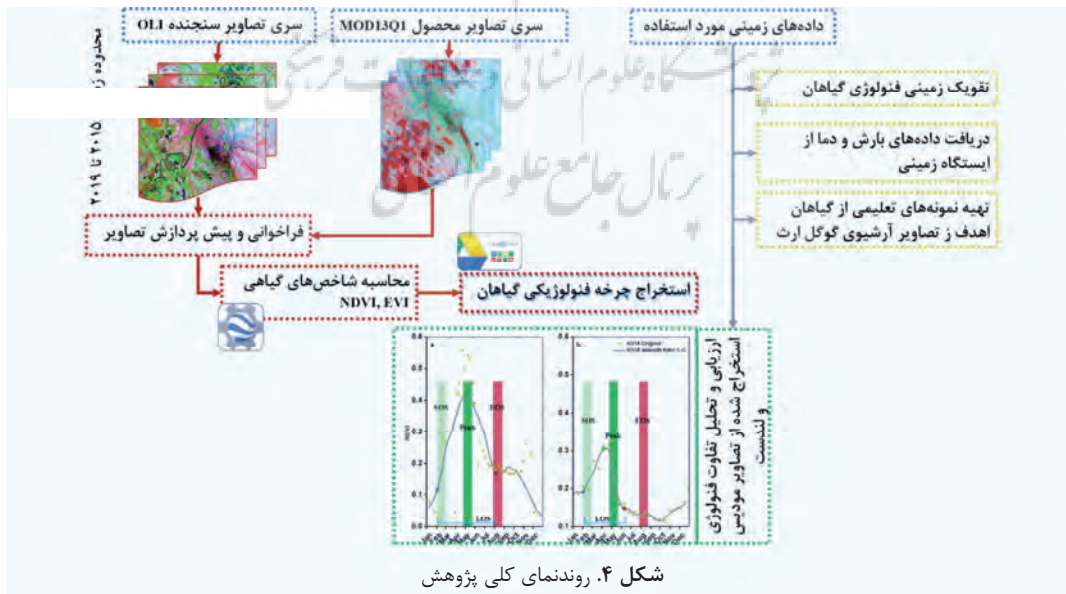
رشد گیاهان به منظور هموارسازی داده‌ها و همچنین کاهش نویز در روند شاخص‌ها از فیلتر Savitzky-Golay (S-G) استفاده شد. این فیلتر می‌تواند تغییرات جزئی روند مقادیر شاخص‌ها در چرخه فنولوژیکی گیاهان منطقه مورد مطالعه را توصیف و نتایج مناسبی از تغییرپذیری فصلی گیاهان نشان دهد (Kontgis et al., 2015; Cai et al., 2020). فیلتر S-G با یک پنجره متحرک سازگار به صورت محلی انجام می‌شود (Cai et al., 2017; Wu et al., 2017). این فیلتر از رگرسیون حداقل مربعات چندجمله‌ای متناسب با میزان داده‌های سری زمانی استفاده می‌کند (Cai et al., 2017; Huang et al., 2021). هنگامی که منحنی شاخص‌های گیاهی مبتنی بر شاخص NDVI هموار شده به دست آمد، تاریخ دوره‌های انتقال فصل رشد تهیه شد (شکل ۵، الف، ب). تاریخ انتقال چرخه فصل رشد گیاهان براساس سری شاخص NDVI با استفاده از دو سنجنده مودیس (شکل ۵، الف) و OLI (شکل ۵، ب) نشان داده شده است. در این شکل از تاریخ‌های فنولوژیکی شامل دوره‌های مهم فصل رشد شامل Peak، SOS و EOS و LOS قابل مشاهده است. همچنین تفاوت در هر دو سنجنده برای مشاهده چرخه فنولوژی گیاهان را می‌توان مشاهده کرد. SOS به‌عنوان

ارزیابی، صورت گرفت. تصاویر با قدرت تفکیک بالای گوگل ارت کمک می‌کند تا انتخاب نمونه واقعیت زمین با دقت مناسبی صورت گیرد (Cohen et al., 2010). در نتیجه، پدیده‌های مختلف سطح زمین به‌ویژه نوع پوشش گیاهی (همچون پوشش گیاهان کشاورزی، مناطق مرتع و/یا گونه‌های درختچه‌ای) به صورت بصری از همدیگر قابل تفکیک باشند (Wang et al., 2015). در صورتی که تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی متوسط این وضوح را ندارند.

۲-۷- استخراج فنولوژی پوشش گیاهی مبتنی بر

شاخص‌های گیاهی EVI, NDVI

برای استخراج چرخه فنولوژی گیاهان ابتدا تصاویر سنجنده OLI برای محاسبه شاخص‌های فنولوژی گیاهی در پلتفرم گوگل ارت انجین فراخوانی شدند. سپس با توجه به محاسبه سری‌های شاخص گیاهی برای هر دو منطقه مورد مطالعه و با توجه به پیکسل‌های هدف مرتبط با گیاهان هدف که به‌عنوان نمونه‌های از پوشش گیاهی مورد ارزیابی انتخاب شده بود، مقادیر شاخص‌های گیاهی NDVI و EVI به دست آمد. در نهایت برای استخراج تاریخ انتقال دوره‌های فصل



شکل ۴. روندنمای کلی پژوهش

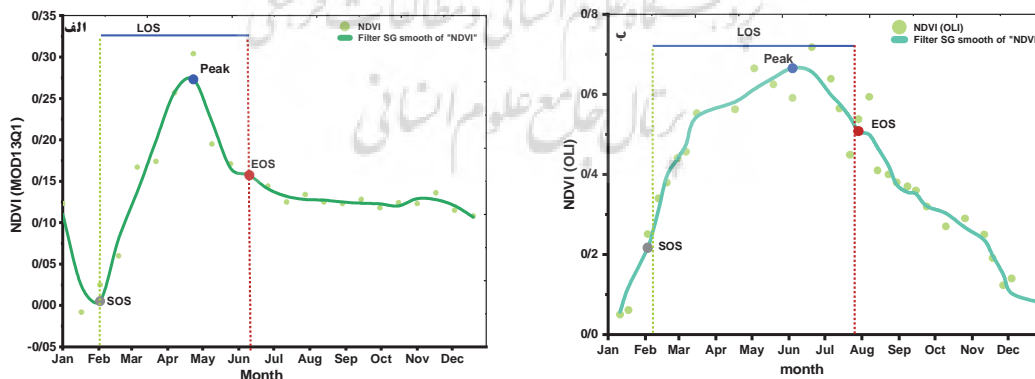
باین حال دامنه تغییرات هر پارامتر در پیش و یا پس از دوره‌های فنولوژیکی گیاهان اثرات متفاوتی دارد. سایر پارامترهای مرتبط همچون میزان تبخیر، رطوبت هوا، آلاینده‌های جوی و یا آفت‌های مختلف نیز در این تغییرپذیری تأثیر گذارند.

نتایج روند تغییرات دمای هوا در ایستگاه هواشناسی اهواز طی دوره مورد مطالعه با شیب افزایشی اندک معادل $0/002$ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. همچنین تغییرات بارشی بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ با $2/6$ میلی‌متر در روز افزایشی بود که این میزان شیب ناشی از تأثیر افزایش بارش در سال آبی ۲۰۱۸ است. شیب روند تغییرات بارش با $2/5$ میلی‌متر در ماه و شیب افزایشی $0/002$ سانتی‌گراد دمای روزانه حاکی از روند افزایشی هر دو پارامتر جوی در منطقه است (شکل ۳، ب). باین حال، شیب تغییرات در ماه‌های مختلف یکسان نبوده است. روند تغییرات بارش و دما برای ماه‌های مختلف سال در جدول ۲ ارائه شده است. این تغییرات می‌تواند در درازمدت تغییرات چرخه فنولوژیکی پوشش‌های گیاهی را با تنش‌های جدی‌تری روبه‌رو کند، هر دو پارامتر از عوامل تأثیرگذار بر دوره‌های فصل رشد گیاهان به شمار می‌روند (Fisher and Mustard, 2007; Huang et al., 2021).

تاریخی که پوشش گیاهی در پایین‌ترین میزان کلروفیل خود قرار دارد (شکل ۵ نقاط خاکستری رنگ) و EOS به‌عنوان نقطه‌ای که حداقل میزان سبز بودن پس از اوج فصل رشد را دارد، تعریف می‌شود. این تعریف از مشاهده پیک‌های فنولوژیکی گیاهان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نسبتاً کامل است و در سایر مطالعات به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است (Fisher and Mustard, 2006; Fisher et al., 2007). برخی پیکسل‌های هدف که به‌عنوان نقاط برداشت زمینی از طریق تصاویر با قدرت تفکیک بالای گوگل ارت انتخاب شده‌اند، به‌دلیل تفاوت در نوع پوشش گیاهی/تغییر پوشش زمین و یا محدودیت‌های هر دو شاخص گیاهی NDVI و EVI مناسب نیستند. این پیکسل‌ها حذف شد، زیرا باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شوند که این کار با اعمال فیلتر S-G صورت گرفت. این مسئله سبب می‌شود تا چرخه فنولوژیکی گیاهان با واقعیت زمینی اختلاف کمتری داشته باشد و از لحاظ منحنی دوره فنولوژیکی گیاهان با همواری مناسب‌تری نشان داده شود (شکل ۵، الف، ب).

۳- نتایج و بحث

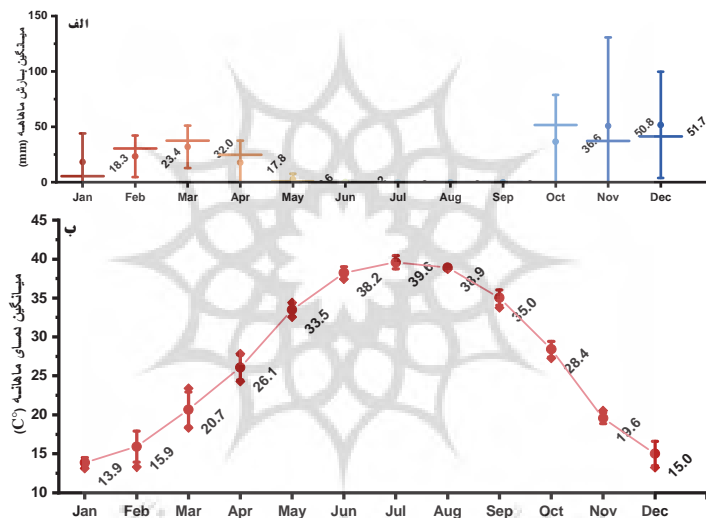
بارش و دمای هوا دو عامل تأثیرگذار بر تغییرات پوشش‌های گیاهی هستند (Huang et al., 2021).



شکل ۵. شماتیکی از روش تشخیص دوره‌های فنولوژیکی پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه مبتنی بر محصول گیاهی مودیس (الف) و سنجنده OLI ماهواره لندست (ب). تاریخ‌های شروع فصل (SOS)، اوج فصل رشد (Peak)، پایان فصل رشد (EOS) به‌عنوان بارزترین دوره‌های انتقال رشد گیاهان به شمار می‌روند که در این شکل مشخص شده‌اند

ماه برآورد شد (شکل ۶، الف). این دامنه تغییرات برای دمای هوا در شش ماه نخست سال (در دوره زمانی مورد مطالعه) نسبت به شش ماه دوم سال بیشتر است، اگرچه در آذر (دسامبر) نیز دامنه تغییرات بالا بود. باین حال، متوسط دمای ۱۵ درجه سانتیگراد شرایط مناسبی برای طولانی تر شدن دوره فصل رشد فراهم کرده است. این میزان دما در نیمه دوم سال برای مناطق جنوبی ایران همچون استان خوزستان که شرایط آبوهوایی متفاوتی از بخش های شمال و شمال غرب ایران دارند، عامل بسیار تعیین کننده ای در رشد گیاهان به شمار می رود.

افزایش میزان بارش بین ماه های اسفند تا خرداد ماه (بین مارس تا ژوئن) از جمله موثرترین پارامترهای جوی در تکمیل دوره های فصل رشد گیاهان است. این عامل با روند تغییرات و افزایش میزان NDVI ارتباط مستقیمی دارد. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، دامنه تغییرات بارش در سه ماهه نخست که تأثیر مستقیمی در دوره های شروع و اوج فصل رشد گیاهان دارند، با متوسط ۱۸، ۳۰ و ۳۲ میلی متر در ماه (برای دوره زمانی ۲۰۱۹-۲۰۱۵) پایین است (جدول ۲). اما ماه های مهر و آذر (اکتبر تا دسامبر) متوسط بارش بیشتر از ۳۵ میلی متر در



شکل ۶. میانگین بارش (الف) و دمای هوا (ب) در ماه های مختلف سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹

جدول ۲. روند تغییرات دما و بارش ماهانه در سطح شهر اهواز بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ دسامبر ۲۰۱۹

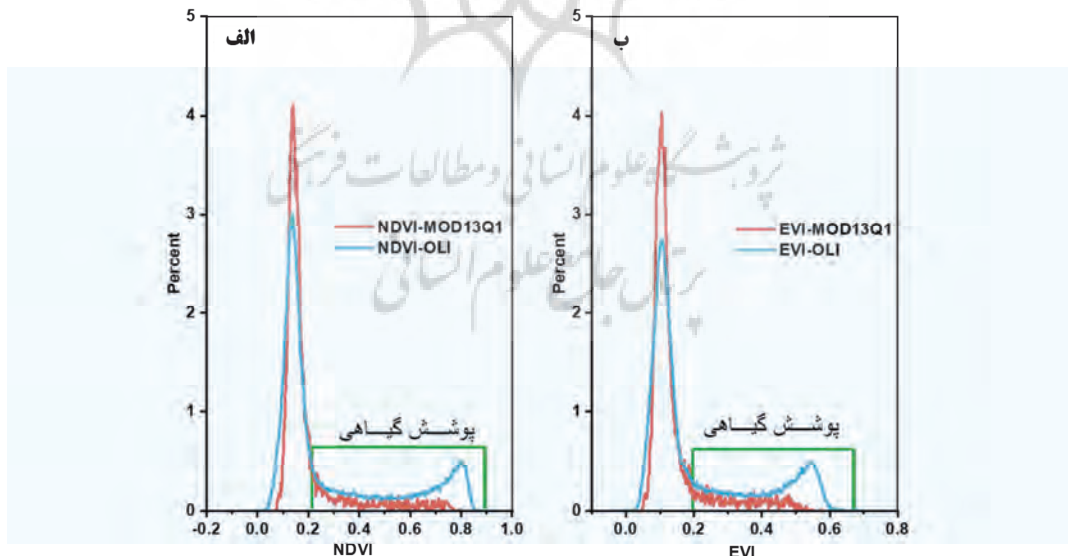
Month	تغییرات دمای ماهانه از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹					تغییرات بارش ماهانه از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹				
	Mean	SD	Min	Max	Slope	Mean	SD	Min	Max	Slope
Jan	13.9	0.5	13.1	14.4	0.2	18.3	20.8	1.9	42.7	3.7
Feb	15.9	1.6	13.3	17.1	-0.2	23.4	15.1	4.7	39.4	3.8
Mar	20.7	1.8	18.3	23.4	-0.2	32.0	15.4	4.8	42.2	-4.2
Apr	26.1	1.3	24.3	27.8	-0.5	17.8	15.8	0.4	35.2	5.5
May	33.5	0.7	32.6	34.4	-0.1	2.6	4.1	0.0	9.7	1.4
Jun	38.2	0.6	37.4	38.8	0.4	0.2	0.4	0.0	1.0	0.1
Jul	39.6	0.7	38.9	40.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Aug	38.9	0.2	38.7	39.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sep	35.0	0.8	33.8	35.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oct	28.4	0.8	27.3	29.2	0.1	36.6	34.0	0.0	68.9	3.9
Nov	19.6	0.6	19.1	20.5	0.0	50.8	64.4	0.0	159.8	13.3
Dec	15.0	1.3	13.2	16.4	0.7	51.7	38.6	12.3	93.1	-1.8

۳-۱- روند تغییرات پوشش‌های گیاهی

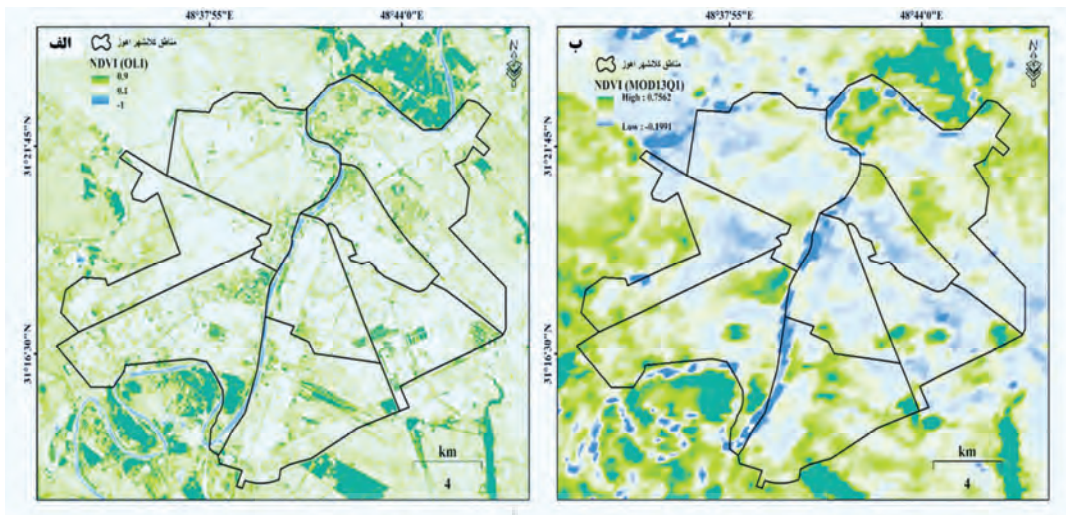
در شکل ۷ مقادیر ارزش شاخص‌های NDVI و EVI به‌دست‌آمده از دو سنجنده مورد مطالعه ارائه شده است. برای نشان دادن این تفاوت با توجه به اوج فصل پوشش گیاهی در منطقه تصویر روز ژولینی ۱۱۰ (نزدیک‌ترین تصویر موجود) انتخاب شد. همان‌طور که نشان داده شد، در سطح کل منطقه درصد فراوانی پیکسل‌هایی که بیانگر پوشش‌های گیاهی کم تراکم و با محدوده بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ هستند در هر دو سنجنده بیشتر است. این افزایش میزان در هر دو شاخص گیاهی NDVI و EVI به‌صورت یکسان مشاهده شد. اما در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ (برای شاخص NDVI) و ۰/۴۵ تا ۰/۶۵ (برای شاخص EVI) سنجنده OLI توانایی بالاتری در تفکیک گونه‌های گیاهی درختی دارد که از میزان کلروفیل بیشتری برخوردارند (شکل ۷، الف، ب).

بین محدوده ۰/۶ تا ۰/۹ (در شاخص NDVI) و ۰/۴۵ تا ۰/۶۵ (در شاخص EVI) بیانگر قابلیت تفکیک انواع پوشش گیاهی با هر دو سنجنده است که سنجنده OLI به‌صورت بارزی توانایی مشاهده آن را دارد. این توانایی در پایش چرخه فنولوژیکی نیز تأثیر خواهد گذاشت، چراکه به‌دلیل کاهش پیکسل‌های ناهمگن، میزان بازتاب خالص‌تری از پدیده هدف در سنجنده ثبت می‌شود. در شکل ۸، الف، ب از طریق شاخص NDVI به‌صورت تصویری در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

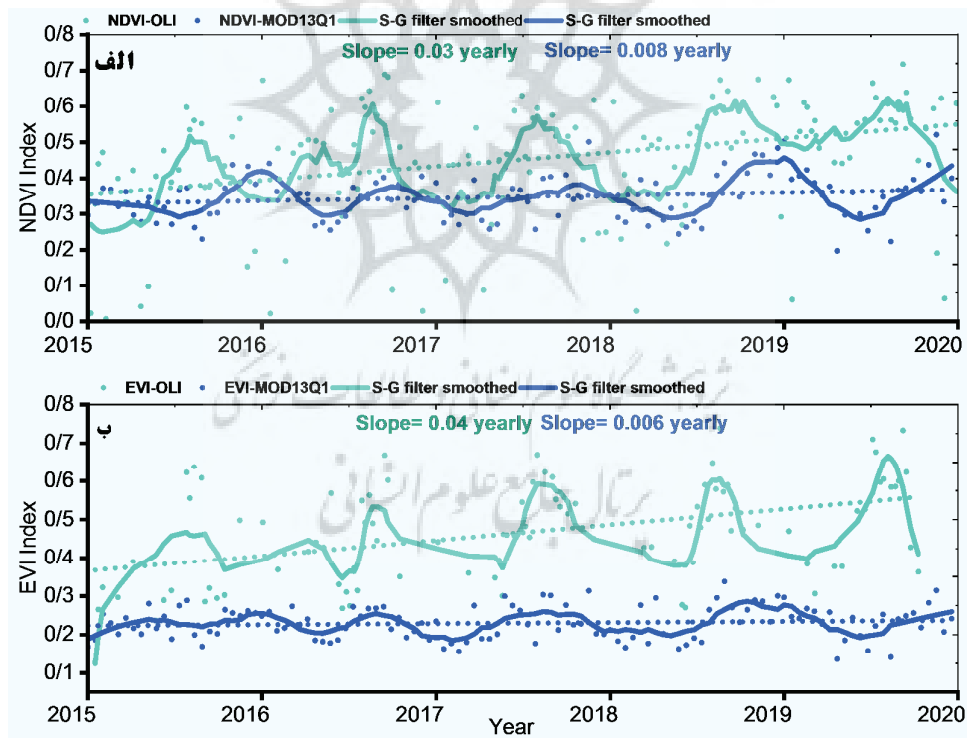
پویایی فصلی پوشش گیاهی مورد مطالعه در سطح کلان شهر اهواز، با استفاده از شاخص‌های گیاهی در هر دو سنجنده با قدرت تفکیک ۳۰ متر لندست و ۲۵۰ متر سنجنده مودیس تهیه شد (شکل ۹). براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش، هر دو شاخص گیاهی روند تغییرات افزایشی را نشان می‌دهند. این تغییرات در ماه‌های مختلف متفاوت است (جداول ۳، ۴).



شکل ۷. هیستوگرام شاخص‌های NDVI (الف) و EVI (ب) در سال ۲۰۱۹ استخراج‌شده از داده‌های سنجنده OLI و محصول MOD13Q1 مودیس



شکل ۸. شاخص NDVI محاسبه شده از تصاویر سنجنده OLI 30 m (الف) و محصول MOD13Q1 250 m (ب)، در روز ژوئینی ۱۱۰ (سال ۲۰۱۹)



شکل ۹. روند پوشش گیاهی در سطح کلان شهر اهواز محاسبه شده از شاخص NDVI (الف) و شاخص EVI (ب) در هر دو سنجنده OLI و محصول MOD13Q1 سنجنده مودیس

۳-۲- دامنه تغییرات سالیانه و ماهانه پوشش‌های گیاهی مورد مطالعه

دامنه تغییرات NDVI در سنجنده OLI برای پوشش گیاهی در سطح کلان‌شهر اهواز در سال ۲۰۱۶ بیشتر از سال‌های دیگر بود. اما این دامنه تغییرات در سنجنده مودیس در سال ۲۰۱۹ بیشتر مشاهده شد (شکل ۱۰). همچنین متوسط NDVI در سطح کلان‌شهر اهواز از ۰/۴ (سال ۲۰۱۵) به ۰/۶ در سال ۲۰۱۹ افزایش یافت، این میزان در شاخص NDVI محصول MOD13Q1 از ۰/۳ (سال ۲۰۱۵) به ۰/۴۵ در سال ۲۰۱۹ رسیده است. دامنه تغییرات و روند افزایشی پوشش‌های گیاهی در سنجنده OLI نسبت به محصول مودیس بیشتر بود. بیشترین اختلاف در هر دو سنجنده در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ با متوسط ۰/۴۹ و ۰/۶ در سنجنده OLI به

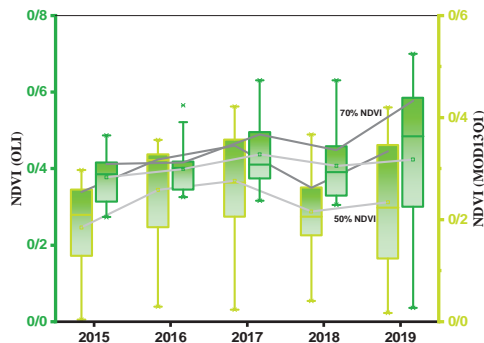
شاخص NDVI در هر دو سنجنده مودیس و OLI به ترتیب با شیب افزایشی ۰/۰۳ و ۰/۰۰۸ (در سال) در سطح کلان‌شهر اهواز مشاهده شد (شکل ۹الف). اما این میزان در شاخص EVI برابر با ۰/۰۴ و ۰/۰۰۶ (در سال) مشاهده شد (شکل ۹ب) که در هر دو شاخص مقادیر به دست آمده از سنجنده OLI شیب افزایشی بیشتر است. این اختلاف شیب در نتایج محاسبه شده از تصاویر لندست با قدرت تفکیک مناسب (۳۰ متر) با شیب بیشتری نسبت به سنجنده مودیس قابل مشاهده بود (شکل ۹). با این حال، تغییرات ماهانه در هر دو سنجنده نیز حاکی از اختلاف میزان شیب تغییرات است. اما در ماه فروردین و اردیبهشت (آوریل و مه) هر دو سنجنده روند کاهش پوشش گیاهی را نشان می‌دهد (جدول ۳، ۴).

جدول ۳. روند تغییرات شاخص‌های NDVI و EVI تهیه شده از سنجنده OLI بین سال‌های ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۹

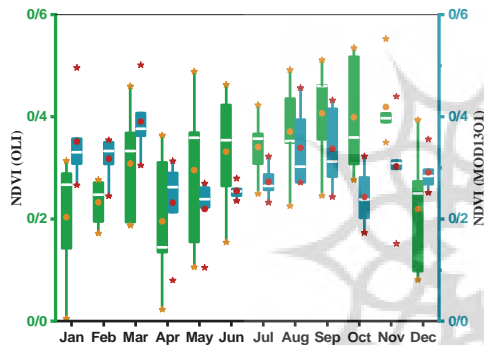
Month	NDVI 2015-2019 (OLI)					EVI 2015-2019 (OLI)				
	Mean	SD	Min	Max	Slope	Mean	SD	Min	Max	Slope
Jan	0.35	0.17	0.14	0.49	0.07	0.20	0.13	0.01	0.31	0.02
Feb	0.35	0.07	0.24	0.43	0.01	0.23	0.05	0.17	0.28	-0.01
Mar	0.37	0.07	0.30	0.45	-0.01	0.31	0.12	0.19	0.46	-0.01
Apr	0.42	0.04	0.38	0.47	-0.02	0.20	0.14	0.02	0.36	-0.01
May	0.38	0.09	0.24	0.50	-0.01	0.30	0.16	0.11	0.49	0.02
Jun	0.40	0.11	0.30	0.52	-0.03	0.33	0.12	0.15	0.46	0.05
Jul	0.54	0.11	0.38	0.65	-0.02	0.34	0.07	0.25	0.42	0.02
Aug	0.60	0.06	0.50	0.65	-0.02	0.37	0.10	0.23	0.49	0.02
Sep	0.52	0.13	0.30	0.61	-0.01	0.41	0.11	0.25	0.51	0.05
Oct	0.39	0.10	0.30	0.53	0.03	0.40	0.12	0.28	0.54	0.01
Nov	0.40	0.11	0.24	0.50	0.03	0.42	0.08	0.35	0.55	0.04
Dec	0.31	0.06	0.23	0.40	0.03	0.22	0.13	0.08	0.39	0.03

جدول ۴. روند تغییرات شاخص‌های NDVI و EVI تهیه شده از محصول MOD13Q1 سنجنده مودیس بین سال‌های ۲۰۱۵ تا دسامبر

Month	NDVI 2015-2019 (MOD13Q1)					EVI 2015-2019 (MOD13Q1)				
	Mean	SD	Min	Max	Slope	Mean	SD	Min	Max	Slope
Jan	0.35	0.09	0.27	0.50	0.02	0.21	0.07	0.15	0.33	0.02
Feb	0.32	0.04	0.25	0.35	-0.02	0.19	0.03	0.14	0.20	-0.01
Mar	0.39	0.07	0.31	0.50	0.04	0.25	0.05	0.19	0.33	0.03
Apr	0.23	0.09	0.08	0.31	-0.02	0.15	0.06	0.06	0.20	-0.02
May	0.22	0.07	0.11	0.27	-0.02	0.15	0.05	0.06	0.19	-0.02
Jun	0.25	0.02	0.24	0.28	0.00	0.18	0.02	0.16	0.21	0.00
Jul	0.27	0.03	0.23	0.32	-0.01	0.19	0.03	0.16	0.22	-0.01
Aug	0.34	0.08	0.27	0.46	0.02	0.23	0.05	0.19	0.31	0.01
Sep	0.34	0.08	0.24	0.43	0.02	0.22	0.05	0.16	0.27	0.01
Oct	0.24	0.06	0.17	0.32	0.01	0.22	0.06	0.17	0.32	0.02
Nov	0.30	0.10	0.15	0.44	0.04	0.19	0.04	0.15	0.26	0.02
Dec	0.29	0.04	0.25	0.36	0.01	0.17	0.02	0.14	0.21	0.01



شکل ۱۰. دامنه تغییرات سالانه پوشش گیاهی محاسبه شده از دو سنجنده مودیس و OLI در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹



شکل ۱۱. دامنه تغییرات ماهانه پوشش گیاهی محاسبه شده از دو سنجنده مودیس و OLI در منطقه مورد مطالعه از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹

۳-۳- استخراج چرخه فنولوژیکی پوشش های گیاهی از سنجنده OLI و محصول MOD13Q1 مودیس استخراج مشخصه های چرخه فنولوژیکی گیاهان مستلزم تعیین حد آستانه از شاخص های گیاهی مورد استفاده است (de Beurs & Henebry, 2010). براساس مطالعات گذشته تعیین این حد آستانه برای هر منطقه به صورت جداگانه توصیه می شود. با توجه به اینکه تعیین این حد آستانه برای هر دوره مستلزم صرف وقت و هزینه چشمگیری است، در بیشتر مطالعات آستانه ۵۰ درصد تغییرات سالانه شاخص پوشش گیاهی مورد استفاده (NDVI, EVI, SAVI) و/یا دیگر شاخص های پوشش گیاهی) در نظر گرفته می شود (Masihpoor et

نسبت ۰/۳۵ و ۰/۳۶ در سنجنده مودیس مشاهده شد که نشان می دهد هرچه شرایط آب و هوا و افزایش میزان کلروفیل گیاه بهتر باشد، اختلاف در نتایج هر دو سنجنده بیشتر می شود (شکل ۱۰). باین حال، دامنه تغییرات در سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ در سنجنده OLI برای شاخص NDVI بیشتر در محدوده پایین تر از ۰/۲۵ بود (شکل ۱۰).

گرچه دامنه تغییرات سالانه پوشش گیاهی در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ در سنجنده OLI و سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ در سنجنده مودیس نسبت به سال های دیگر بیشتر مشاهده شد، اما با توجه به دوره های مختلف چرخه فنولوژیکی گیاه و شناخت بیشتر از تغییرات در ماه های مختلف سال، متوسط NDVI در هر دو سنجنده در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۱۹ بررسی شد (شکل ۱۱). نتایج به دست آمده حاکی از دامنه تغییرات پوشش گیاهی بیشتر در سنجنده OLI نسبت به مودیس طی ماه های مختلف است. این تغییرات در ماه های فروردین، اردیبهشت و خرداد (آوریل، مه و ژوئن) به عنوان سه ماه تعیین کننده در اوج فصل رشد گیاهان (در منطقه مورد مطالعه) و ماه مهر (اکتبر) به عنوان شروع دوره خزان برگی گیاهان بیشتر بوده است (شکل ۱۱). باین حال، محصول MOD13Q1 سنجنده مودیس این دامنه تغییرات را در ماه های مرداد، شهریور و مهر (اوت، سپتامبر و اکتبر) نشان داد. دما در ماه های دی، خرداد و آذر (ژانویه، ژوئن و دسامبر) افزایش داشته است. این تغییرات برای بارش در ماه های ابتدایی سال (ژانویه و فوریه) افزایش و در ماه مارس کاهش یافته است (جدول ۲). این تغییرات می تواند از جمله عوامل تعیین کننده در دامنه تغییرات پوشش گیاهی در این موقع از سال باشد. تغییرات در ماه های مختلف سال برای دمای هوا کمتر بود، باین حال ماه های آذر تا بهمن — دسامبر تا فوریه — (به عنوان ماه های تعیین کننده در دوره های پیش از شروع فصل رشد) بیشترین تغییرات را داشته اند (شکل ۶، ب). در نتیجه این تغییر در فنولوژی پوشش گیاهی تأثیر گذار بوده است.

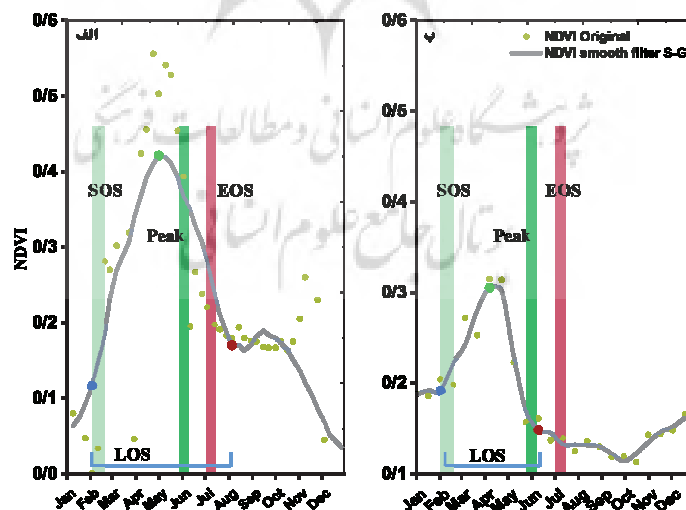
برای پایان فصل رشد، بین هر دو سنجنده حدود یک ماه اختلاف وجود داشت که در سال‌های مختلف نیز متفاوت است. پایان فصل رشد در سنجنده OLI حدود ۲۰ روز دیرتر از واقعیت زمینی مشاهده شد (شکل ۱۲، ب). این تفاوت برای سنجنده مودیس با واقعیت زمینی ۲۰ روز زودتر بود (شکل ۱۲، ب). بنابراین، اختلاف بین مشاهده پایان فصل رشد تفاوت اساسی تری نشان می‌دهد. اما دوره اوج فصل رشد به دست آمده از هر دو سنجنده در مقایسه با واقعیت زمینی زودتر مشاهده شد. الگوهای شروع فصل رشد در دو مجموعه داده در سطح کلان‌شهر اهواز تقریباً کمترین اختلاف را با هم و واقعیت زمینی داشته‌اند. گرچه نمودار شاخص‌های فنولوژی از لحاظ ساختاری مشابه‌اند، اما شروع فصل رشد زودتر و دوره فصل رشد کوتاه‌تر در محصول مودیس در مقایسه با نتایج به دست آمده از تصاویر لندست به دست آمد. در واقع، طبق محصول مودیس یک دوره رشد چهارماهه مشاهده شد (شکل ۱۲، ب). اما طول فصل رشد در تصاویر لندست حدود پنج ماه به دست آمد، بنابراین طول دوره رشد گیاهان در سنجنده OLI لندست به واقعیت زمینی نزدیک‌تر است (شکل ۱۲، الف).

با توجه به حساسیت دوره‌های فنولوژیکی گیاهان به تغییرات اقلیمی و محیطی، همچنین توانایی سنجنده‌های سنجش از دور در پایش این چرخه فصل رشد گیاهان، در این پژوهش شروع فصل رشد، پیک فصل رشد و پایان فصل رشد در پوشش گیاهی هدف برای مقایسه انتخاب شد. این مقایسه بیشتر مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی این پژوهش و تفاوت در مشاهده چرخه فصل رشد گیاهان در سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی متفاوت در شناسایی و تعیین کمی دوره فنولوژیکی پوشش‌های گیاهی را تأیید می‌کند. تفاوت‌های دقیق بین این دو محصول را می‌توان به تفاوت وضوح مکانی و طیفی آنها، روش برازش و تعریف دوره فنولوژی گیاهان نسبت داد. این نتایج با مطالعات گذشته (Penuelas et al., 2009;

al., 2021). برای جنگل‌های جنوب غربی زاگرس میانگین طول فصل رشد با این حد آستانه برابر با ۱۵۱ روز به دست آمد که بسیار کمتر از حد انتظار کارشناسان جنگل بود. در ادامه بررسی‌ها، از حد آستانه ۳۵ درصد برای زمان پایان فصل رشد نیز استفاده شد که با توجه به نتایج آن دوره فصل رشد ۱۹۰ روز یکی از نتایج قابل قبول با واقعیت زمینی است (Masihpoor et al., 2021). بنابراین در این پژوهش، از مقدار آستانه ۳۵ درصد استفاده شده است. شایان ذکر است که شروع تاریخ فصل رشد در مقایسه با نتایج به دست آمده از سنجنده لندست دیرتر (حدود ۱۰ روز) است. با این حال، الگوی زمانی شروع فصل رشد توسط تابع پیشنهادی که با فیلتر S-G به دست آمد و در شکل ۱۲، الف با استفاده از تصاویر لندست محاسبه شد، به خوبی نشان داده شد. اختلاف ۱۵ روز در تصاویر سنجنده مودیس می‌تواند ناشی از قدرت تفکیک سنجنده و وجود پیکسل‌های مخلوط در این نوع تصاویر باشد (شکل ۱۲، ب). نتایج همسو در مطالعه فو و همکاران (Fu et al., 2015) برای سنجنده‌های با قدرت تفکیک متوسط در شروع فصل رشد نیز یافت شده است. در شکل ۱۲ تفاوت کلی در معیارهای فصل رشد (EOS, Peak, SOS و LOS) حاصل از NDVI هر دو سنجنده مودیس و OLI با واقعیت زمینی ارائه شده که به صورت ستونی بر روی نمودار مقادیر NDVI پلات شده است. مقایسه شاخص‌های فنولوژی مشتق شده از مشاهدات تصاویر سنجنده OLI و محصول گیاهی MOD13Q1 مودیس الگوی مشابهی را برای هر دو مجموعه تصاویر سنجش از دور نشان داد. در شروع فصل رشد، بین ۲ تا ۱۰ روز اختلاف بین لندست و محصول MOD13Q1 سنجنده مودیس مشاهده شد که نتایج لندست حدود ۷ روز و مودیس ۱۰ روز با واقعیت زمینی اختلاف دارد. در اوج فصل رشد تفاوت بین دو سنجنده بین ۲۰ تا ۲۵ روز است. نتایج سنجنده OLI کمترین اختلاف (۲۰ روز) و سنجنده مودیس بیشترین اختلاف (۳۵ روز) را با واقعیت زمینی دارد (شکل ۱۲، الف، ب).

هواشناسی اهواز طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۵ نشان داده شد. در سال آبی ۲۰۱۹-۲۰۱۸ شرایط مناسبی در چرخه رشد گیاهان وجود داشته که در نتایج نهایی این پژوهش به‌خوبی روند افزایش کلروفیل برای هر دو سنجنده در این بازه زمانی مشاهده شد (شکل ۹، الف، ب). شناسایی و کمی‌سازی تغییرات فصلی، بین سالیانه و/یا بلندمدت و تنوع در فنولوژی پوشش‌های گیاهی برای درک و نظارت بر اکوسیستم‌های مختلف و سهم آنها در چرخه کربن جهانی ضروری است. طی دهه‌های اخیر مشاهدات سنجنش از راه دور توانایی بالایی برای این منظور ارائه داده‌اند (Fisher and Mustard, 2007; Fisher et al., 2006; Cai et al., 2017; Huang et al., 2021). در این مطالعه، با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست و محصول MOD13Q1 مودیس با استفاده از شاخص‌های NDVI و EVI فنولوژی پوشش‌های گیاهی در سطح کلان‌شهر اهواز پایش شد. روش پیشنهادی برای استخراج شاخص‌های فنولوژی برای اکثر انواع پوشش‌های گیاهی درختی در سطح کلان‌شهرها، عملکرد خوبی نشان داد. اطلاعات فنولوژی مشتق‌شده الگوهای مختلف فنولوژی را با وجود انواع

Jochner and Menzel, 2015; Lu et al., 2006; Neil and Wu, 2006; Fu et al., 2015; Fu et al., 2019 همسو است. پیکسل‌های مخلوط به‌ویژه در مناطق با ناهمگنی بالا سبب می‌شود تا پیکسل‌ها مجموعه بازتاب انعکاسی از چند پدیده را به همراه داشته باشد که این مسئله در نتایج نهایی می‌تواند سبب افزایش یا کاهش در بازتاب باشد. این تفاوت در شکل ۱۲ که برای اوج فصل رشد پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه تهیه شده، قابل مشاهده است. از طرف دیگر، تفاوت پهنای طیفی باندها (پهنای بیشتر باند مادون قرمز نزدیک در مودیس نسبت به سنجنده OLI و پهنای بیشتر باند قرمز در سنجنده OLI نسبت به سنجنده مودیس) که در شکل ۲ نیز ارائه شده است، (محصول MOD13Q1 مودیس با استفاده از مقادیر باندهای قرمز و مادون قرمز محاسبه می‌شود) سبب تفاوت در میزان انرژی جذب و بازتاب‌شده از پوشش گیاهی می‌شود. این مسئله می‌تواند یکی از دلایل احتمالی مقادیر متفاوت شاخص‌ها در دو سنجنده باشد. همچنین، روند پارامترهای جوی بارش و دما که تأثیر مستقیمی بر دوره‌های فنولوژیکی گیاهان دارند از ایستگاه زمینی



شکل ۱۲. چرخه فنولوژیکی پوشش گیاهان مورد بررسی پژوهش محاسبه‌شده از تصاویر سنجنده OLI 30m (الف) و محصول MOD13Q1 (ب). نقاط قهوه‌ای مقادیر NDVI اصلی به‌دست‌آمده و خط خاکستری NDVI هموارشده با استفاده از فیلتر S-G همراه با شروع فصل رشد (نقاط آبی)، اوج فصل رشد (نقاط سبز) و پایان فصل رشد (نقاط قرمز)

سنسور OLI و قدرت تفکیک مکانی مناسب آن نشان داد، این سنسور بهترین گزینه برای نظارت بر پوشش گیاهی در یک منطقه ناهمگن شهری است. با این حال، الگوی مکانی منطقه‌ای از شاخص‌های فنولوژی مشتق شده از مشاهدات سنجنده مودیس، عملکرد قابل اعتماد الگوریتم تشخیص فنولوژی پیشنهادی را در هر دو نوع پوشش گیاهی تأیید می‌کند (Melaas et al., 2013; Li and Gong, 2016). یافته‌های پژوهش همچنین با یافته‌های گزارش شده قبلی که از مشاهدات تصاویر سنجنش از راه دور برای انواع پوشش گیاهی خاص در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی استفاده کرده‌اند (Li and Gong, 2016, Sajadi et al., 2021) سازگار است.

۴- نتیجه‌گیری

پوشش گیاهی در سطح کلان‌شهرها عاملی اساسی در تعدیل شرایط آب‌وهوایی به شمار می‌رود. بررسی تغییرات زمانی در پوشش گیاهی با استفاده از سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی، نقش مهمی در تشخیص تغییرات فنولوژیکی گیاهان دارد. این شناسایی با توجه به تنوع سنجنده‌های ماهواره‌ای اغلب شناسایی سنجنده ایده‌آل برای پایش دوره‌های رشد پوشش گیاهی را چالش برانگیز می‌کند. شناسایی سنجنده با بهترین عملکرد برای پایش پوشش گیاهی ضروری است و یک دید جامع و پایه‌منحصره‌فرد برای مطالعات آینده در این زمینه، به‌ویژه تغییرپذیری فصلی گیاهان (مکانی و زمانی) در سطح کلان‌شهرها فراهم می‌کند. از این‌رو، در این مطالعه، تغییرات چرخه فنولوژی گیاهان در سطح کلان‌شهر اهواز در یک دوره زمانی پنج‌ساله (۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹) پایش و بررسی شد. در پژوهش از دو شاخص پرکاربرد NDVI و EVI در قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (سنجنده OLI) و ۲۵۰ متر (محصول MOD13Q1) استفاده شد. مشاهدات پژوهش حاکی از نتایج ذیل است:

روند تغییرات پوشش گیاهی در سطح منطقه مورد بررسی در هر دو سنجنده شیب افزایشی داشته است.

مختلف پوشش گیاهی ناهمگن در منطقه مورد مطالعه به دست می‌آورد. گرچه مناطق کلان‌شهر اهواز جزء شهرهای با شرایط بسیار چالش برانگیز آلاینده‌ها به شمار می‌روند که می‌تواند در تغییرات چرخه فنولوژی گیاهان در سطح شهر ایجاد تأخیر زیاد داشته باشد. اما همیشه این تغییر صرفاً منفی نخواهد بود (Brown et al., 2010; Imhoff et al., 2010).

در نتایج هر دو نوع تصاویر سنجنش از دوری سنجنده مودیس با قدرت تفکیک ۲۵۰ متر و لندست (۳۰ متر) نشان می‌دهد پوشش گیاهی در سطح کلان‌شهر اهواز بین سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بهترین شرایط رشد را داشته است (شکل ۸)، با اوج فصل رشد در خرداد (ژوئن) که با واقعیت زمینی همخوانی بیشتری دارد. با این حال، با توجه به شرایط بارش مناسب در این سال‌ها که در سطح منطقه در تاریخ قبل از رشد پر بارش‌تر از سال‌های دیگر بود، از جمله پارامترهای تأثیرگذار در چرخه رشد گیاهان است. روند تغییرات دما و بارش طی سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ افزایشی بود که افزایش دما می‌تواند در سال‌های بعد نیز تأثیر بیشتری بر تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان داشته باشد. این تغییرات برای چرخه فنولوژیکی با مطالعات بیش از دو دهه بهتر قابل مشاهده است. روند تغییرات و افزایش میزان کلروفیل گیاهی در سطح شهر اهواز شرایط مناسبی داشته است. با این حال، هر دو شاخص گیاهی محصول مودیس توافق مناسبی با شاخص‌های مشابه به‌دست‌آمده از سنجنده OLI نشان داد.

به‌طور خلاصه، نتایج نشان می‌دهد که مجموعه داده‌های اصلی NDVI و EVI ذاتاً دارای نویز مقادیر پرت هستند (شکل ۹، الف، ب). برای کاهش تناقضات نتایج داده‌های اصلی از شاخص‌های گیاهی، بازسازی (پر کردن شکاف)، هموارسازی (استفاده از فیلترهای هموارسازی داده‌ها) و مدل‌سازی سری‌های زمانی نتایج اصلی شاخص‌ها در مطالعات پوشش گیاهی مورد نیاز است. از این‌رو، برای هموارسازی از فیلتر S-G استفاده شد. در این زمینه، عملکرد بهتر در مدل‌سازی زمانی

نحوه واکنش پوشش‌های گیاهی در سطح کلان‌شهرها به تغییرات ناشی از افزایش سوخت‌های فسیلی و با آلاینده‌ها در مقیاس منطقه‌ای به‌طور چشمگیری افزایش خواهد داد. از این‌رو، می‌تواند به مدیران امر در بخش‌های مختلف سازمان‌ها در مدیریت چالش‌ها و استفاده از گونه‌های گیاهی مناسب در سطح شهرها کمک کند. با این‌حال، برای رسیدن به نتایج مطلوب نیاز به داده‌های بیشتری همچون میزان آلاینده‌های شهری در دوره‌های بلندمدت برای بررسی همبستگی این عوامل با تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان است.

۵- پیشنهادها

هر روش استخراج چرخه فنولوژیکی گیاهان دارای مزایا و معایب مشخصی است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از شاخص‌های متعددی استفاده شود که می‌توانند در تشخیص چرخه فنولوژیکی نتایج متفاوت‌تری ارائه دهند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده شاخص‌های فنولوژیکی مانند PI^1 ، PPI^1 ، $NDPI^2$ ، $SAVI^3$ در بازه‌های زمانی طولانی‌تر و با تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر بررسی و معرفی شوند.

همچنین پیشنهاد می‌شود، برای ایجاد مدل‌های پایش چرخه فنولوژیکی گیاهان برای انواع مختلف گونه‌های گیاهی، تأثیر انواع پارامترهای جوی همچون تغییرات الگویی دما، بارش، تبخیر، رطوبت هوا، همچنین در مناطق شهری تغییرات آلاینده‌ها در فعل و انفعالات تغییرات فنولوژی گیاهان در نظر گرفته شود. این مسائل می‌تواند درک مدیران را از تغییرات صورت‌گرفته افزایش دهند و در فصل‌های سال که این گیاهان در حال تغییر دوره فصل رشد خود هستند، تأثیر آنها بر انواع آرزوی‌ها را بهتر شناسایی کنند و راه‌حلی برای کاهش این چالش‌ها ارائه دهند.

توافق کلی بین هر دو شاخص گیاهی در روند افزایشی تغییرات کلروفیلی گیاهان وجود داشت. با این‌حال، اگر پوشش گیاهی هدف تحت تأثیر تغییراتی در چرخه فصل رشد شوند، مشخص شد EVI در برآورد فنولوژی روند تغییرات گیاهان در مناطق مورد مطالعه عملکرد بهتری از NDVI دارد.

دامنه تغییرات سالانه میزان هر دو شاخص برای سنجنده OLI بیشتر از سنجنده مودیس بود. تفاوت این دامنه تغییرات در بالای ۵۰٪ مقدار NDVI با شیب افزایشی بیشتری از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ در سنجنده OLI مشاهده شد، اما این دامنه تغییرات در سنجنده مودیس یکنواخت‌تر است. همچنین دامنه تغییرات ماهانه پوشش گیاهی در دوره مورد مطالعه برای سنجنده OLI در بیشتر ماه‌های سال از سنجنده مودیس بیشتر بود. این تفاوت‌ها گویای تغییرات بیشتر پوشش گیاهی است که استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک بالا قابلیت تشخیص بهتری نسبت به سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین دارند.

طول فصل رشد گیاهان در تصاویر سنجنده مودیس کوتاه‌تر از نتایج سنجنده OLI مشاهده شد که نتایج سنجنده لندست تطابق بهتری با واقعیت زمینی داشتند. این تفاوت می‌تواند ناشی از قدرت تفکیک طیفی و مکانی سنجنده باشد که در نتیجه پایان فصل رشد را زودتر از سنجنده OLI نشان می‌دهد. در صورتی که اختلاف بین اوج فصل رشد و شروع فصل رشد گیاهان (بین ۲ تا ۱۰ روز) کمتر است. همچنین گرچه تفاوت‌هایی در دوره‌های فصل رشد گیاهان در هر دو نوع سنجنده مشاهده شد، اما نتایج قابل قبولی از تغییرات چرخه فنولوژیکی گیاهان در سطح یک منطقه شهری با انواع مختلف پدیده‌های زمینی که سبب ناهمگنی بیشتر در پیکسل‌های تصاویر سنجنده می‌شود، قابل مشاهده است.

به‌طور کلی نتایج پژوهش، استفاده از شاخص‌های NDVI و EVI محاسبه‌شده از طریق تصاویر ماهواره‌ای را برای روندهای چرخه فنولوژیکی گیاهان برجسته می‌کند. این یافته‌ها درک متخصصان و مدیران را از

1. plant phenology index
2. Phenology Index
3. Normalized Difference Phenology Index
4. Soil Adjust Vegetation Index

- of snow covered forests as estimated by vegetation indices, gross primary production, and solar induced chlorophyll fluorescence. *Agric. For. Meteorol.* 275, 305–316.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.06.002>.
- Chen, G.; Li, X.; Liu, X.; Chen, Y.; Liang, X.; Leng, J.; Xu, X.; Liao, W.; Qiu, Y.a.; Wu, Q., 2020. **Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways.** *Nat. Commun.* 2020, 11.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-14386-x>.
- Cook, B.I.; Wolkovich, E.M.; Parmesan, C., 2012. **Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends.** *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2012, 109, 9000–9005.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1118364109>.
- Cohen, W. B.; Yang, Z. G. and Kennedy, R., 201). **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.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.010>.
- Da Silva, A., Valcu, M., Kempenaers, B., 2015. **Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds.** *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 370, 1–9.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0126>.
- Dahlin, K.M., Fisher, R.A., Lawrence, P.J., 2015. **Environmental drivers of drought deciduous phenology in the Community Land Model.** *Biogeosciences* 12, 5061–5074.
<https://doi.org/10.5194/bg-12-5061-2015>, 2015.
- Fisher, J.I., Mustard, J.F., 2007. **Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data.** *Remote Sensing of Environment.* 109, 261–273.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.004>.
- Fisher, J.I., Mustard, J.F., Vadeboncoeur, M.A., 2006. **Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite.** *Remote Sensing of Environment.* 100, 265–279.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.022>.
- با توجه به دسترسی آنلاین به تصاویر ماهواره‌ای بهنگام استفاده شده در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود نتایج این پژوهش و پژوهش‌های مشابه در سایت‌های سازمان‌های خدمات‌رسان به شهروندان همچون شهرداری‌ها قرار گیرد تا شهروندان و مدیران بخش‌های فضای سبز شهری به صورت مناسبی از چگونگی تغییرات پوشش‌های گیاهی سطح شهر اطلاع کسب کنند.
- ۶-منابع**
- Beurs, K.M., & Henebry, G.M., 2010. **Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology.** In I.L. Hudson & M.R. Keatley (Eds). *Phenological research*, 177-208. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2_9.
- Brown, M.E., De Beurs, K., Vrieling, A., 2010. **The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations.** *Remote Sensing of Environment.* 114, 2286–2296.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.005>.
- Cai, Z., Jönsson, P., Jin, H., & Eklundh, L., 2017. **Performance of smoothing methods for reconstructing NDVI time-series and estimating vegetation phenology from MODIS data.** *Remote Sensing*, 9(12), 1271.
<https://doi.org/10.3390/rs9121271>.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.042>.
- Cai, Y., Li, X., Zhang, M., & 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102164>.
- Chang, Q., Xiao, X., Jiao, W., Wu, X., Doughty, R., Wang, J., Du, L., Zou, Z., Qin, Y., 2019. **Assessing consistency of spring phenology**

- Foroughi, H., Naseri, A. A., Boroomand Nasab, S., Hamzeh, S., Sadeghi, M., Tuller, M., & Jones, S. B., 2020. **A new mathematical formulation for remote sensing of soil moisture based on the Red-NIR space.** *International Journal of Remote Sensing*, 41(20), 8034–8047. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1770365>.
- Fu, Y. H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., ... & Janssens, I. A., 2015. **Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding.** *Nature*, 526(7571), 104-107. <https://doi.org/10.1038/nature15402>.
- Ganguly, S., Friedl, M.A., Tan, B., Zhang, X., Verma, M., 2010. **Land surface phenology from MODIS: characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product.** *Remote Sensing of Environment*, 114, 1805–1816. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.005>.
- Huang, K., Zhang, Y., Tagesson, T., Brandt, M., Wang, L., Chen, N., ... & Fensholt, R., 2021. **The confounding effect of snow cover on assessing spring phenology from space: A new look at trends on the Tibetan Plateau.** *Science of the Total Environment*, 756, 144011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144011>.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H., 1994. **Development of vegetation and soil indices for MODIS EOS.** *Remote Sensing of Environment*, 49, 224–234. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90018-3).
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & 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. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., Bounoua, L., 2010. **Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA.** *Remote Sensing of Environment*, 114, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>.
- Jochner, S., Menzel, A., 2015. **Urban phenological studies – past, present, future.** *Environ. Pollut.* 203, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.003>.
- Masihpoor, M; datvish sefat, A A; rahmani, R; and fatehi, P., 2021. **“Phenological Parameters Trend of the Southern Zagros Forests Based on MODIS-NDVI Time Series during 2000-2017.”** *IRANIAN JOURNAL OF FOREST* 12 (4 #a001336): 577–90.
- Melaas, E.K., Friedl, M.A., Zhu, Z., 2013. **Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM + data.** *Remote Sensing of Environment*, 132, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.011>.
- Menzel, A.; Sparks, T.H.; Estrella, N.; Koch, E.; Aasa, A.; Ahas, R.; Alm-Kübler, K.; Bissolli, P.; Braslavská, O.g.; Briede, A., 2006. **European phenological response to climate change matches the warming pattern.** *Global Chang. Biol.* 2006, 12, 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>.
- Nagendra, H.; Bai, X.; Brondizio, E.S.; Lwasa, S., 2018. **The urban south and the predicament of global sustainability.** *Nat. Sustain.* 2018, 1, 341–349. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0101-5>.
- Neil, K., Wu, J., 2006. **Effects of urbanization on plant flowering phenology: a review.** *Urban Ecosyst.* 9, 243–257. <https://doi.org/10.1007/s11252-006-9354-2>.
- Peñuelas, J., Rutishauser, T., & Filella, I., 2009. **Phenology feedbacks on climate change.** *Science*, 324(5929), 887-888. DOI: 10.1126/science.117300.
- Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Reichstein, M., Luyssaert, S., ... & Vesala, T., 2008. **Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming.** *Nature*, 451(7174), 49-52. <https://doi.org/10.1038/nature06444>.
- Li, X., Gong, P., 2016. **An “exclusion-inclusion” framework for extracting human settlements in rapidly developing**

- regions of China from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*. 186, 286–296.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.029>.
- Li, X., Yu, L., Xu, Y., Yang, J., Gong, P., 2016a. **Ten years after Hurricane Katrina: monitoring recovery in New Orleans and the surrounding areas using remote sensing.** *Sci. Bull.* 61, 1460–1470.
<https://doi.org/10.1007/s11434-016-1167-y>.
- Li, X., Zhou, Y., Asrar, G.R., Mao, J., Li, X., Li, W., 2016b. **Response of vegetation phenology to urbanization in the conterminous United States.** *Glob. Chang. Biol.* 23.
- Lu, P., Yu, Q., Liu, J., Lee, X., 2006. **Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change.** *Agric. For. Meteorol.* 138, 120–131.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.002>.
- Luo, Z., Sun, O.J., Ge, Q., Xu, W., Zheng, J., 2006. **Phenological responses of plants to climate change in an urban environment.** *Ecol. Res.* 22, 507–514.
<https://doi.org/10.1007/s11284-006-0044-6>.
- Richardson, A.D.; Keenan, T.F.; Migliavacca, M.; Ryu, Y.; Sonnentag, O.; Toomey, M., 2013. **Climate change, phenology, and phonological control of vegetation feedbacks to the climate system.** *Agr. Forest Meteorol.* 2013, 169, 156–173.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>.
- Sharif, M., & Attarchi, S. (2024). **Investigating the effect of temperature, precipitation, and soil salinity changes on Riparian Forests' phenology using a remote sensing approach.** *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101194.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101194>.
- Sharif, M., Attarchi, S., & A.Kakroodi, A., 2022. **Investigating the phenology changes of three plant species in different ecosystems using radar and optical data.** *Physical Geography Research Quarterly*, 54(1), 111–133. doi: 10.22059/jphgr.2022.334134.1007658.
- Sharif, M., A. Kakroodi, A., Heidari, S., & Kiani, A. (2023). **Monitoring fifty-year changes in riparian forests of Gotvand County, Iran, using remote sensing images.** *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(3), 203–224. doi: 10.22092/ijfpr.2023.362063.2098
- Wang, Jie, Xiangming Xiao, Yuanwei Qin, Jinwei Dong, Geli Zhang, and Weili Kou., 2015. **“Mapping Paddy Rice Planting Area in Wheat-Rice Double-Cropped Areas through Integration of Landsat-8 OLI, MODIS, and PALSAR Images.”** *Nature Publishing Group* (March):1–11.
<https://doi.org/10.1038/srep10088>.
- Wu, J., 2014. **Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions.** *Landsc. Urban Plan.* 125, 209–221.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.018>.
- Wu, C., Peng, D., Soudani, K., Siebicke, L., Gough, C. M., Arain, M. A., ... & Ge, Q., 2017. **Land surface phenology derived from normalized difference vegetation index (NDVI) at global FLUXNET sites.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 171–182.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.193> .
- Sajadi, P.; Sang, Y.-F.; Gholamnia, M.; Bonafoni, S.; Brocca, L.; Pradhan, B.; Singh, A., 2021. **Performance Evaluation of Long NDVI Timeseries from AVHRR, MODIS and Landsat Sensors over Landslide-Prone Locations in Qinghai-Tibetan Plateau.** *Remote Sens.* 13, 3172.
<https://doi.org/10.3390/rs13163172>.
- Zhang, G.J., Cai, M., Hu, A., 2013. **Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America.** *Nat. Clim. Chang.* 3, 466–470.
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., 2006.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1803>.
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., 2004a. **Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data.**

- Glob. Chang. Biol.* 10, 1133–1145.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00784.x>.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C., Gao, F., ... & Huete, A., 2003. **Monitoring vegetation phenology using MODIS.** *Remote sensing of environment*, 84(3), 471-475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9).
- Zhou, Y., Gurney, K., 2010. **A new methodology for quantifying on-site residential and commercial fossil fuel CO2 emissions at the building spatial scale and hourly time scale.** *Carbon Manage.* 1, 45–56. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.7>.
- Zhou, Y., Smith, S. J., Zhao, K., Imhoff, M., Thomson, A., Bond-Lamberty, B., ... & Elvidge, C. D., 2015. **A global map of urban extent from nightlights.** *Environmental Research Letters*, 10(5), 054011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/5/054011>.

