



Study the effect of meteorological variables variation on phenology of temperate forest in Gorgan region using MODIS sensor

Hamoon Makvandi¹ | Nozar Ghahreman² |

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hamoonmakvandi@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: nghahreman@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 18, 2024

Revised: Nov. 23, 2024

Accepted: Feb. 23, 2025

Published online: June. 2025

Keywords:

Precipitation,

Forest,

Temperature,

Phenology,

Time Series Smoothing.

ABSTRACT

In this research, the temporal changes of three phenological events of the start (SOS), End (EOS) and Length (LOS) of the growing season of the temperate forest located in the south of Gorgan city, north of Iran, in response to meteorological variables variations was investigated. Temperature and rainfall data and the time series of the Vegetation Index (EVI) of the MODIS sensor, were collected and analyzed using three smoothing approaches. Results showed that in all three smoothing methods, with an increase in T_{max} and T_{min} in the 10-day period prior to SOS phenology stage, it would be delayed. Similarly any decrease in T_{max} and T_{min} in a 10-day period before the EOS, would delay its onset. In Gaussian and Savitzky-Golay ($p < 0.05$) and Double Logistic ($p < 0.01$) methods, correlation between LOS and T_{min} and T_{max} in spring; and in all three smoothing methods, the correlation of SOS and EOS with T_{max} in the summer season was significantly positive ($p < 0.05$). A weak positive correlation of SOS and EOS with T_{min} in the summer season was observed. Also, SOS, EOS and LOS phenological stages have not shown any significant relationship with precipitation in different seasons. According results, temperature is the most important factor in the variability of SOS, EOS, and LOS occurrence time in study forest. Any increase and decrease of T_{max} and T_{min} cause shifts in the time of occurrence of these phenology stages.

Cite this article: Makvandi, H., & Ghahreman, N. (2025). Study the effect of meteorological variables variation on phenology of temperate forest in Gorgan region using MODIS sensor. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (4), 881-897.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383968.669815>

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383968.669815>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Phenology is the study of the annual life cycles of plants, animals, and other living organisms, particularly the timing of cyclical patterns of major events driven by changes in weather and climate. Phenology is both biological and meteorological, thus providing a key perspective for investigating biosphere–atmosphere interdependence in spatial, temporal, and specific ecological contexts. The timing behaviors of plant and animal species are coordinated with the annual changes of sunlight, temperature and precipitation in different weather conditions. Land Surface phenology is the study of plant phenology at a regional to global scale, derived from data obtained from space-based optical sensors. The most common vegetation indices are NDVI and EVI index, which are examples of reflectance-based greenness information. The time of SOS, LOS and EOS of plant growth season are the most important phenological parameters that can be extracted from the time series of satellite vegetation indicators. In this study, using TIMESAT software and EVI index, the phenology stages of Gorgan city forest have been extracted and the sensitivity of these stages to climate fluctuations was investigated.

Methods and Materials

In this article, the land use map of Golestan province was retrieved using the global land cover product of the European Space Agency (ESA) with a resolution of 10 meters in the Google Earth Engine software, and drawn in 9 classes. To obtain temperature and precipitation data, agrometeorological data of AgERA5 database were obtained using a Python programming code. Then these data ($\bar{T}_{min}$, $\bar{T}_{max}$ and P) were prepared seasonally and during the statistical period of 2001-2022 in the four seasons of winter, spring, summer and autumn. To extract the time series of the EVI index, the 16-day data of the MODIS sensor with a resolution of 250 meters was called in the Google Earth Engine system, and the SOS, EOS and LOS phenology stages of vegetation growth were calculated using TIMESAT software version 3.3 and they were prepared with three smoothing methods of Gaussian, Double Logistic and Savitzky-Golay. Then the relationship between EVI index and meteorological variables of temperature and precipitation in winter, spring, summer and autumn seasons was calculated by Pearson correlation method.

Results and Discussion

Results showed that in all three smoothing methods, an increase in $\bar{T}_{max}$ and $\bar{T}_{min}$ in the 10-day period prior to SOS phenology stage, it would be delayed, similarly any decrease in $\bar{T}_{max}$ and $\bar{T}_{min}$ in a 10-day period before the EOS, this stage is also delayed. In Gaussian and Savitzky-Golay ($p < 0.05$) and Double Logistic ($p < 0.01$) methods, correlation between LOS and $\bar{T}_{min}$ and $\bar{T}_{max}$ in spring; and in all three smoothing methods, the correlation of SOS and EOS with $\bar{T}_{max}$ in the summer season was significantly positive ($p < 0.05$), and the correlation of SOS and EOS with $\bar{T}_{min}$ in the summer season was weak and positive. Also, SOS, EOS and LOS phenological stages have not shown any significant relationship with precipitation in different seasons. According results, temperature is the most important factor in the variability of SOS, EOS, and LOS occurrence time in study forest. Any increase and decrease of $\bar{T}_{max}$ and $\bar{T}_{min}$ cause daily shifts in the time of occurrence of these phenology stages.

Conclusion

The results indicate that the annual shift in of SOS and EOS occurrence date has an increasing trend in all three smoothing methods, which indicates the high sensitivity of these phenology stages to meteorological variables and climate variations during the study period. Satellite LSP monitoring is directly driven by meteorological variables, and among them, temperature plays the most important role. It should be noted that some limitations such as the distinct phenology of plant species in a pixel, affect the change in timing of LSP criteria. Therefore, it is necessary to perform frequent field monitoring of plant species in the region. Availability of high-quality meteorological data within the forest region and finer spatial resolution of satellite images are also quite important to achieve reliable results. Therefore, it is suggested to use other satellite images with higher resolution in order to increase the accuracy in the time series of satellite spatial greenness information and consider the asymmetric effects of $\bar{T}_{max}$ and $\bar{T}_{min}$ in satellite vegetation phenology simulations.

Author Contributions

Conceptualization, N.G. and H.M.; methodology, N.G and H.M.; software, H.M.; validation, H.M. and N.G.; formal analysis, H.M.; investigation, H.M.; resources, H.M.; data curation, H.M.; writing—original draft preparation, H.M.; writing—review and editing, N.G.; visualization, H.M.; supervision, N.G.; funding

acquisition, N.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

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

Data Availability Statement

The authors confirm that the data supporting the findings of this study are available within the article

Acknowledgements

The authors would like to thank Iran Meteorological Organization and Iran Forest and rangeland organization for providing some of required datasets

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of Tehran (Ethical code: IR.UT.RES.2024.500). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی تاثیر نوسان متغیرهای هواشناسی بر مراحل فنولوژی درختان جنگل‌های معتدله منطقه شهر گرگان با استفاده از سنجنده مودیس

هامون مکوندی^۱ | نوذر قهرمان^۲ |

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

hamoonmakvandi@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

nghahreman@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۴	
تاریخ انتشار: تیر ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: بارش، جنگل، دما، فنولوژی، هموارسازی سری زمانی.	در این تحقیق با استفاده از داده‌های هواشناسی دما و بارش و سری زمانی شاخص پوشش گیاهی (EVI) سنجنده MODIS، تغییرات زمانی در مراحل فنولوژی شروع (SOS)، پایان (EOS) و طول (LOS) فصل رشد جنگل‌های معتدله جنوب شهر گرگان با سه روش هموارسازی سری زمانی تجزیه و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که در هر سه روش هموارسازی با افزایش میانگین دمای حداکثر (T_{max}^-) و میانگین دمای حداقل (T_{min}^-) در بازه ۱۰ روز قبل از مرحله فنولوژی SOS، این مرحله به تأخیر می‌افتد و با کاهش T_{max}^- و T_{min}^- در بازه ۱۰ روز قبل از مرحله فنولوژی EOS، این مرحله نیز با تعویق مواجه می‌شود. در روش‌های گوسی و ساویتسکی گولای ($p < 0.05$) و لجستیک دوگانه ($p < 0.01$)، همبستگی بین T_{max}^- و T_{min}^- در فصل بهار؛ و در هر سه روش هموارسازی، همبستگی SOS و EOS با T_{max}^- در فصل تابستان، به طور معنی داری مثبت ارزیابی شد ($p < 0.05$) و همبستگی SOS و EOS با T_{min}^- در فصل تابستان ضعیف و مثبت بود. همچنین مراحل فنولوژی SOS، EOS و LOS هیچ ارتباط معنی داری را با بارش در فصول مختلف نشان نداده‌اند. بر اساس این مطالعه، دما مهمترین عامل در تغییرپذیری زمان وقوع SOS، EOS و LOS در جنگل مطالعاتی در استان گلستان است و افزایش و کاهش T_{max}^- و T_{min}^- باعث نوسانات روزانه معنی داری در زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌شود.
استناد: مکوندی، هامون و قهرمان، نوذر. (۱۴۰۴). بررسی تاثیر نوسان متغیرهای هواشناسی بر مراحل فنولوژی درختان جنگل‌های معتدله منطقه شهر گرگان با استفاده از سنجنده مودیس. <i>مجله تحقیقات آب و خاک ایران</i> ، ۵۶ (۴)، ۸۸۱-۸۹۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383968.669815	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.	
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383968.669815	



مقدمه

رشد گیاه، افزایش ابعاد در طول زمان و نمو گیاه، تغییر در ساختار گیاه، اغلب به عنوان دو فرآیند جداگانه مورد مطالعه قرار می‌گیرند. نمو گیاه به عنوان مجموعه‌ای از رویدادهای قابل شناسایی که منجر به تغییر کیفی (جوانه‌زدن، گلدهی و غیره) یا کمی (تعداد برگ، تعداد گل و غیره) در ساختار گیاه می‌شود (Gatsuk, 1980; Bonhomme, 2000) تعریف می‌شود. مراحل نمو با بررسی تخصصی مشخص می‌شوند، اما انتقال بین دو مرحله متوالی نمو ممکن است همیشه واضح نباشد (مثلاً تغییر رنگ برگ)، و این یک منبع عدم اطمینان در هنگام شناسایی مراحل متوالی نمو است (Dambreville et al., 2014). فنولوژی مطالعه چرخه‌های زندگی سالانه گیاهان، حیوانات و سایر موجودات زنده است، به ویژه زمان‌بندی آنها (اغلب با اشاره به الگوهای چرخه‌ای رویدادهای مهم) که توسط تغییرات آب و هوا و اقلیم هدایت می‌شود (Lieth, 1974; Schwartz, 2013). اصطلاح فصلی بودن^۱ کلی‌تر است و برای نشان دادن هر گونه الگوی دوره‌ای (زنده یا غیر زنده) در چرخه‌های فاصله بین دو اعتدال بهاری متوالی استفاده شود. فنولوژی هم بیولوژیکی و هم هواشناسی است، بنابراین دیدگاهی کلیدی برای بررسی وابستگی متقابل بیوسفر و جو در زمینه‌های مکانی، زمانی و اکولوژیکی خاص ارائه می‌کند. رفتارهای زمان‌بندی گونه‌های گیاهی و جانوری با تغییرات سالانه نور خورشید، دما و بارندگی در شرایط مختلف آب و هوایی هماهنگ است. برگ‌دهی و رنگ‌پذیری برگ‌ها، شکوفایی گل‌ها، رسیدن میوه و رسیدن پرندهای مهاجر به یک مکان، همگی پدیده‌های فنولوژیکی هستند که به صورت رویدادهای واضح در تقویم طبیعت نمایش داده می‌شوند (Liang, 2019). فنولوژی گیاهی عبارت است از رویدادهای مکرر چرخه زندگی گیاهان که دوره‌های رشد و پیری آنها را توصیف می‌کند. فنولوژی سطح زمین^۲ (LSP) مطالعه فنولوژی گیاهی در مقیاس منطقه‌ای تا جهانی است که از داده‌های به دست آمده از حسگرهای نوری فضایی بدست می‌آید (Helman, 2018). LSP با اندازه‌گیری ماهواره‌ای به طور گسترده‌ای برای ارزیابی الگوها و فرآیندهای فنولوژیکی در مقیاس بزرگ استفاده شده است. با این حال به دلیل عدم تطابق مقیاس مکانی-زمانی، دقت LSP به ندرت با داده‌های میدانی تأیید می‌شود (Liang et al., 2011). پوشش گیاهی معتدله^۳ حساسیت شدیدی به تغییرات آب و هوایی نشان می‌دهد (Menzel et al., 2006; Schwartz et al., 2006).

روش‌های مختلف پایش فنولوژی عبارتند از دیدبانی‌های فردی معمول (مقیاس کوچک)، اندازه‌گیری‌های نزدیک سطح (مقیاس منطقه‌ای تا محلی) و سنجش از دور ماهواره‌ای (مقیاس منطقه‌ای تا جهانی) (Katal et al., 2022). آب و هوا بر روی پوشش گیاهی زمینی تأثیر می‌گذارد و چرخه زندگی گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Keenan et al., 2014; Fu et al., 2015; Liu et al., 2016a, 2016b). زمان شروع فصل^۴ (SOS)، پایان فصل^۵ (EOS) و طول فصل^۶ (LOS) رشد، یک کنترل اساسی بر تولید اولیه و ترسیب کربن توسط گیاهان دارد (Richardson et al., 2012; Wu et al., 2012; Xia et al., 2015). برای بررسی تغییرات فنولوژی گیاهی در مقیاس جهانی، استفاده از اطلاعات پایش مبتنی بر ماهواره معمولاً در قالب نمایه LSP مورد نیاز است. فنولوژی سطح زمین (از اطلاعات سبزیگی فضایی برای پایش فنولوژی گیاهی در سطح زمین متأثر از تغییرات مستمر آب و هوایی از مقیاس منطقه‌ای تا جهانی استفاده می‌کند).

برخی محدودیت‌های روش‌شناختی مرتبط با این دیدبانی‌های ماهواره‌ای ممکن است منجر به تفسیر نادرست سیگنال‌های حاصل از ماهواره شود. به عنوان مثال، تغییرات در ترکیب گونه‌ها، تاج پوشش‌های چند لایه و فنولوژی متمایز گونه‌های گیاهی در یک پیکسل، می‌تواند منجر به تغییر در سری زمانی اطلاعات سبزیگی شود. بنابراین تغییر در سیگنال، به اشتباه به عنوان یک تغییر فنولوژیکی تعبیر می‌شود، در حالی که در واقع به تغییرات در ترکیب گونه‌ها در پیکسل ارتباط دارد. محدودیت‌های دیگر مانند انتخاب تکنیک هموارسازی و روش استخراج معیارهای LSP هستند که بر تغییر در زمان‌بندی معیارهای LSP تأثیر می‌گذارد (Helman, 2018). متداول‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی عبارتند از شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۷ (NDVI) و شاخص پوشش گیاهی تقویت شده^۸ (EVI)، که نمونه‌ای از اطلاعات سبزیگی مبتنی بر بازتاب هستند. شاخص EVI به دلیل استفاده از باند آبی و وابستگی کمتر به طیف قرمز، نسبت به شاخص NDVI مزیت دارد و امکان استفاده از آن را در مناطق انبوه پوشش گیاهی مانند جنگل‌ها فراهم می‌کند (Huete, 2012).

1 Seasonality

2 Land Surface Phenology (LSP)

3 Temperate vegetation

4 Start of Season (SOS)

5 End of Season (EOS)

6 Length of Season (LOS)

7 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

8 Enhanced Vegetation Index (EVI)

پیشینه پژوهش

در ایران و جهان مطالعات مشابهی درباره تاثیر اقلیم بر مراحل فنولوژی انجام شده است. برای نمونه در پژوهشی اطلاعات فنولوژیکی و تولید گیاهی به دست آمده از ماهواره و میزان تاثیرپذیری آن از داده‌های اقلیمی در استان تهران بررسی شد و دریافتند که در قسمت‌های شمالی استان تهران شروع فصل رشد افزایش و طول فصل رشد گیاهان کاهش یافته است و قسمت‌های جنوبی کاهش در شروع فصل و افزایش در طول فصل رویش را نشان می‌دهد (رایگانی و همکاران، ۱۳۹۸).

مسیح‌پور و همکاران، (۱۳۹۹) در تحقیقی روند زمان شروع، پایان و طول فصل رویش و رابطه آنها با متغیرهای اقلیمی بارش و دما با استفاده از سری زمانی ماهواره‌ای MODIS-NDVI در جنگل‌های زاگرس جنوبی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییر در زمان پایان فصل رویش بیشتر از تغییر در زمان شروع فصل رویش است و بین تغییرات دما و بارش و تغییرات مشخصه‌های فنولوژیک همبستگی ضعیفی وجود دارد.

یافته‌های مطالعه دیگری به بررسی تاثیر تغییرپذیری‌های اقلیمی روی پارامترهای فنولوژیکی پوشش گیاهی در دو سطح ارتفاعی بالاتر و پایینتر از ۲۰۰۰ متر در دامنه جنوبی البرز پرداخته است و به این نتیجه رسیدند که طول فصل رشد در هر دو سطح ارتفاعی به واسطه تاخیر در آغاز فصل رشد و پایان زود هنگام پایان فصل رشد، کاهش پیدا کرده است، اما بازه تغییرپذیری آن در ارتفاعات پایینی بیشتر از ارتفاعات بالایی آن است (ملایری و همکاران، ۱۳۹۷).

Liang et al., 2011 مشاهدات فنولوژیکی بهار را در یک جنگل فصلی مخلوط، طی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ بررسی نمودند و از دیدبانی‌های منفرد شاخص‌های فنولوژی منظر^۱ (LP) به منظور اعتبارسنجی مشاهدات مبتنی بر سنجش از دور (LSP) استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که معیار شروع فصل (SOS) بهار، به دست آمده از شاخص EVI ماهواره مودیس، قادر به پیش‌بینی تاریخ شکفتن کامل جوانه (LP) با خطای مطلق کمتر از ۲ روز بود. علاوه بر این SOS مشتق شده از LSP، تغییرات بین سالانه و تفاوت‌های فضایی را که با مشاهدات زمینی مطابقت داشت، ثبت کرد. مقایسه سری‌های زمانی کامل LP و LSP نشان داد که تفاوت‌های اساسی بین دو میانگین مشاهده شده وجود دارد، بنابراین استفاده از LSP مشتق شده از تکنیک‌هایی مانند مدل‌سازی منحنی لجستیک برای استخراج نشانگرهای فصلی امیدوارکننده‌تر به نظر می‌رسد.

Hufkens et al., 2012 مشاهدات مبتنی بر سنجش از دور ماهواره‌ای و نزدیک به سطح پایش شده توسط دوربین‌های RGB نصب شده بر روی برج‌های بالای تاج پوشش جنگل را با فنولوژی پوشش گیاهی در چهار سایت جنگل‌های برگریز مقایسه کردند و توافق قابل توجهی بین سری‌های زمانی فنولوژیکی و معیارهای به دست آمده از این دو منبع داده به دست آوردند. با این حال باید توجه داشت که مسائل مربوط به مقیاس، بازنمایی و میدان دید دوربین در داده‌های سنجش از دور نزدیک به سطح می‌تواند به طور قابل توجهی بر اندازه‌گیری‌ها تأثیر بگذارد.

Gerst et al., 2017 از مشاهدات فنولوژیکی چهار گونه بلوط، در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ استفاده کردند تا چگونگی پاسخ به اقلیم (دما و بارش) و موقعیت جغرافیایی (طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع) را در دو منطقه غرب آمریکای شمالی و شرق میانه آمریکای شمالی بررسی کنند. آنها دریافتند که گونه‌های شرق میانه ایالات متحده از نظر فنولوژیکی نسبت به گونه‌های غربی به تغییرات مکانی و زمانی در بارش و T_{max} فصول زمستان، بهار و پاییز واکنش‌پذیرتر بودند. از نظر پاسخ‌دهی این گونه‌ها به محرک‌های آب و هوایی به این نتیجه رسیدند که T_{max} بهار برای پیش‌بینی شروع فنوفازها در گونه‌های شرقی مفیدتر بود، به طوری که T_{min} در زمستان برای گونه‌های غربی مهم‌تر بود. آنها شواهد قوی برای تاثیر بارش به عنوان یک محرک اصلی در شروع فنوفازها در گونه‌های غربی در مقایسه با گونه‌های شرقی پیدا نکردند. از نظر موقعیت جغرافیایی، طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع، برای دو فاز گلدهی و شکفتن جوانه در گونه‌های غربی، بیشتر از گونه‌های شرقی تاثیرگذار بود.

Li et al., 2021 در تحقیقی برای بررسی تغییرات نیمکره شمالی در شروع فصل رشد (SOS) از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۲ (PLSR) برای ساخت یک شاخص ارزیابی حساسیت استاندارد شده استفاده کردند و اثر ترکیبی دمای هوا (T)، ترازمندی آب (Wbi)، تشعشع (Srad) و فنولوژی سال قبل را روی SOS، تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت ترکیبی SOS به تغییرات آب و هوایی (SCom) به دمای فصل قبل است. پوشش گیاهی و دمای بهار، عامل غالب تأثیرگذار بر الگوی فضایی حساسیت SOS بودند و موازنه

1 Landscape Phenology

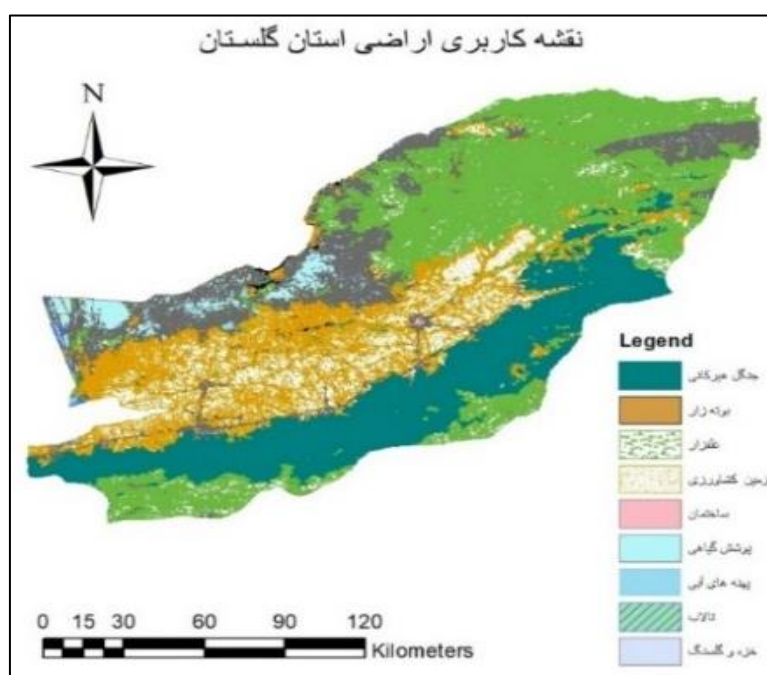
2 Partial Least Squares Regression (PLSR)

آب ضعیف‌ترین اثر را داشت. اگرچه دما عامل اصلی اقلیمی است که باعث تغییرات زمانی در SCom می‌شود، اما اثرات دما بین بهار و زمستان نامتقارن بود (T_{spring}/T_{winter}). همچنین رطوبت بیشتر ممکن است پاسخ نامتقارن SCom به گرم شدن بهار/زمستان را کاهش دهد. این پژوهش با دو هدف اصلی انجام شد (۱) بررسی چگونگی روند تغییرات مراحل فنولوژی پوشش گیاهی جنگل‌های گرگان طی سال‌های ۲۰۲۲ - ۲۰۰۱ (۲) تعیین واکنش رخدادهای فنولوژی SOS، EOS و LOS پوشش گیاهی جنگلی در فصول مختلف به متغیرهای هواشناسی در منطقه مطالعاتی. نتایج حاصل از بررسی تاثیر متغیرهای فصلی هواشناسی میانگین دمای کمینه، میانگین دمای بیشینه و بارندگی ($\bar{T}_{min}$ ، $\bar{T}_{max}$ و P) بر EOS، SOS و LOS پوشش گیاهی جنگل‌های شهر گرگان با استفاده از فناوری سنجش از دور ماهواره‌ای و سه روش هموارسازی سری زمانی گوسی نامتقارن^۱، لجستیک دوگانه^۲ و ساویتسکی-گولای^۳ ارائه شده است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

استان گلستان واقع در شمال ایران از شمال به کشور ترکمنستان، از جنوب به استان سمنان، از شرق به استان خراسان شمالی و از غرب به استان مازندران و دریای خزر محدود می‌شود و بخشی از جنگل‌های هیرکانی در آن واقع است. در این مقاله برای تهیه نقشه کاربری اراضی استان گلستان، محصول جهانی پوشش زمین آژانس فضایی اروپا^۴ (ESA) با وضوح ۱۰ متر (برای سال ۲۰۲۱ و با داده‌های ماهواره سنیتل ۱ و ۲) در نرم افزار گوگل ارث انجین فراخوانی شد و نقشه کاربری اراضی استان با ۹ کلاس جنگل، بوته‌زار، علفزار، زمین کشاورزی، ساختمان، پوشش گیاهی، پهنه‌های آبی، تالاب و خزه و گل‌سنگ ترسیم گردید (شکل ۱). گونه‌های غالب پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه را درختان انجیلی، ممرز و راش تشکیل می‌دهند.



شکل ۱: نمایش کاربری اراضی استان گلستان

از آنجائی که چرخه زندگی سالانه گیاهان (شروع فصل رشد، طول فصل رشد و خاتمه فصل رشد) به شرایط محیطی مانند طول روز، دما و بارندگی واکنش نشان می‌دهند و این واکنش حسب ارتفاع، نوع گونه و شرایط آب و هوایی متغیر، متفاوت می‌باشد، لذا انتخاب منطقه ای با ارتفاع و گونه‌های مشابه و در وسعت کم نتایج قابل اعتمادتری را به همراه دارد. از این رو طی بازدید میدانی، یک منطقه جنگلی در

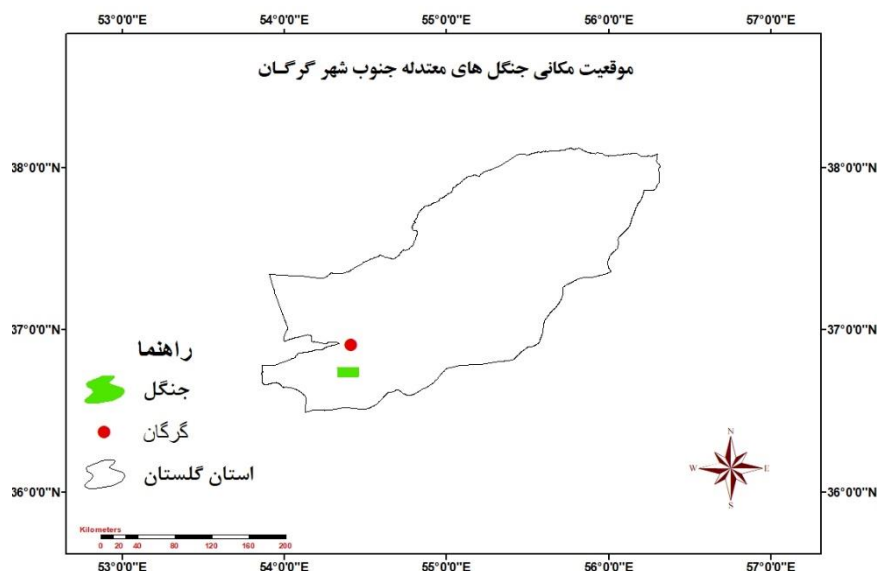
1 Asymmetric Gaussian

2 Double Logistic

3 Savitzky-Golay

4 The European Space Agency

گرگان و در حد فاصل $54^{\circ}27'35''$ تا $54^{\circ}19'47.22''$ طول شرقی و $36^{\circ}46'10.13''$ تا $36^{\circ}19'31.73''$ عرض شمالی با وسعت تقریبی ۷۸ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۹۰۰ متر، برای تعیین واکنش مراحل فنولوژی به نوسانات متغیرهای هواشناسی انتخاب شد (شکل ۲) و لایه داده‌های مکانی و توصیفی آن با استفاده از نرم افزار گوگل ارث در محیط GIS تهیه گردید. اقلیم منطقه جنگلی شهر گرگان بر اساس روش دمارتن گسترش یافته، خیلی مرطوب نوع الف تعیین شد



شکل ۲: موقعیت مکانی جنگل انتخابی

داده‌های هواشناسی و پوشش گیاهی

در این تحقیق از نمایه های هواشناسی کشاورزی^۱ پایگاه داده کوپرنیکس (AgERA5)، با گام زمانی روزانه و فرمت netCDF و بر اساس توپوگرافی با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه استفاده شد. برای استخراج داده‌های دما و بارش از مجموعه داده‌های AgERA5 و بر اساس لایه مکانی و توصیفی جنگل شهر گرگان، از رابط کاربری اسپایدر^۲ در نرم افزار آناکوندا^۳ و زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شد. سپس داده‌های دما و بارش به صورت فصلی ($\bar{T}_{min}$ و $\bar{T}_{max}$ و P) و طی دوره آماری ۲۰۲۲-۲۰۰۱ در چهار فصل زمستان، بهار، تابستان و پاییز آماده سازی شدند (Liu et al., 2023). میانگین دمای حداکثر سالانه ۱۴/۱ درجه سانتیگراد، میانگین دمای حداقل سالانه ۶/۷ درجه سانتیگراد و میانگین بارندگی سالانه ۹۰۶/۵ میلی‌متر در یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۲) برآورد شد. همچنین محصول MOD13Q1 V6.1 (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD13Q1) سنجنده مودیس ماهواره ترا و آکوا، شاخص پوشش گیاهی^۴ (VI) را بر اساس هر پیکسل ارائه می‌دهد که یکی از محصولات آن شاخص EVI است. در این مطالعه از داده‌های ۱۶ روزه سنجنده مودیس با توان تفکیک ۲۵۰ متر دارای بازتاب‌های سطحی دو جهته تصحیح شده در جو (برای بخار آب، ابر و هواویزهای غلیظ)، استفاده شده است.

روش تحقیق

فرض اساسی در تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی فنولوژی، فرض الگوهای منظمی است که چرخه‌های فصلی برگ گیاه را توصیف می‌کند (Jönsson and Eklundh, 2004). به صورت کلی یک چرخه فصلی سالانه را می‌توان به دو حالت توصیف کرد: الف) یک مولفه که سیگنال دائمی یا پس زمینه است. ب) یک مولفه متغیر که تابعی از پویایی فصلی است. مورد دوم با یک دوره رشد مشخص می‌شود، که در طی آن شدت سیگنال پوشش گیاهی افزایش می‌یابد، در زمان معینی به حداکثر سیگنال (t_{MAX}) می‌رسد و در نهایت به سمت سطح پس زمینه (دوره پیری) کاهش می‌یابد. این الگو تحت تأثیر تعدادی متغیر است که سیگنال‌های شاخص پوشش گیاهی را تغییر می‌دهند، مانند عوامل

1 Agrometeorological indicators

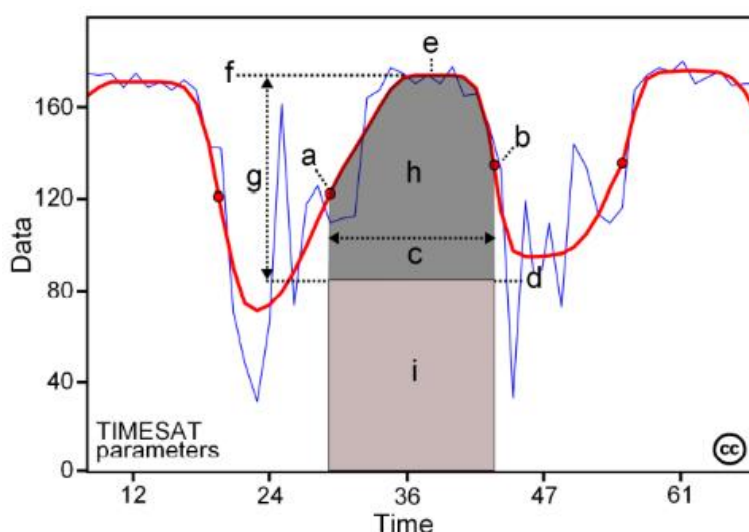
2 Spyder

3 Anaconda

4 Vegetation Index (VI)

هواشناسی (برف، یخبندان، پوشش ابر) یا تغییرات در پوشش گیاهی (فرآیندهای تغییر پوشش زمین، وضعیت سلامت، اثرات خشکسالی و غیره) (Clerici et al., 2012).

در این تحقیق جهت محاسبه و پایش پویایی زمانی و مکانی شاخص EVI در جنگل شهر گرگان با متغیرهای هواشناسی (AgERA5)، تصاویر سنجنده مودیس در سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی شد و داده‌های لازم برای استخراج پارامترهای فنولوژی و تغییرات فصلی پوشش گیاهی با استفاده از نسخه ۳/۳ نرم افزار TIMESAT آماده گردید. سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی حاصل از اندازه‌گیری طیفی ماهواره‌ای می‌تواند برای تعیین اطلاعات لازم در زمینه تغییرات فصلی پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گیرد. نرم‌افزار TIMESAT یک ابزار کاربردی برای تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و بررسی تغییرات فصلی پوشش گیاهی متشکل از تعدادی کد در نرم افزار متلب و فورترن می باشد. استخراج پارامترهای فنولوژی در این نرم افزار از طریق فیلتر نمودن سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای با روش‌های مختلف هموارسازی مانند گوسی، لجستیک دوگانه و ساویتسکی گولای انجام می‌شود. بر اساس این توابع برازشی یک سری پارامترهای نوسانی مانند SOS، EOS و LOS رشد پوشش گیاهی را می‌توان استخراج نمود. سه پارامتر مهم فصلی تولید شده در نرم افزار TIMESAT عبارتند از: (a: شروع فصل رشد (زمانی که لبه سمت چپ سری زمانی به ۲۰٪ مقدار EVI رسیده باشد) (b: پایان فصل رشد (زمانی که لبه سمت راست سری زمانی به ۸۰٪ مقدار EVI رسیده باشد) (c: طول فصل رشد (فاصله زمانی مابین شروع و پایان فصل). خط آبی نشان دهنده سری زمانی شاخص پوشش گیاهی و خط قرمز نشان دهنده سری زمانی هموارسازی شده می‌باشد (شکل ۳) (Eklundha and Jönsson, 2017).



شکل ۳: برخی از پارامترهای فصلی تولید شده در نرم افزار TIMESAT

روش‌های هموارسازی سری زمانی

سه روش هموارسازی داده موجود در نرم افزار TIMESAT بر اساس حداقل مربعات برازش و بالاترین ارزش عددی شاخص پوشش گیاهی انجام می‌شوند. روش ساویتسکی گولای بر پایه توابع چند جمله‌ای محلی بوده که این روش به عنوان فیلتر انطباقی ساویتسکی گولای می‌تواند طبقه‌بندی شود. این فیلتر یک فیلتر رقومی است که بر روی مجموعه‌ای از نقاط، به منظور هموار کردن داده‌ها به کار گرفته می‌شود. دو روش گوسی نامتقارن و لجستیک دوگانه، اطلاعات را با توابع غیر خطی پیچیده برازش می‌دهند. هر سه روش پردازش از یک تعریف مقدماتی از فصل رویشی واقعی تک‌وجهی^۱ یا دو وجهی^۲ همراه با زمان تقریبی فصل رشد استفاده می‌کنند.

روش ساویتسکی گولای

یکی از راه‌های هموارسازی سری زمانی و از بین بردن اختلالات، استفاده از یک فیلتر و جایگزینی هر مقدار داده y_i با ترکیب خطی مقادیر نزدیک در یک پنجره است.

1 unimodal

2 bimodal

$$\sum_{j=-n}^n c_j y_i + j \quad \text{رابطه ۱}$$

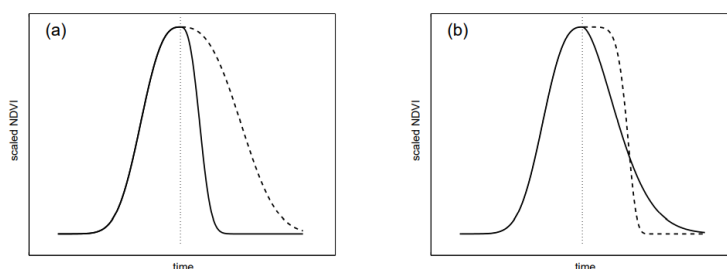
در ساده‌ترین حالت، که به آن میانگین متحرک گفته می‌شود، وزن‌ها $c_j = 1/(2n+1)$ هستند و مقدار داده y_i با میانگین مقادیر در پنجره جایگزین می‌شود. روش میانگین متحرک، مساحت و موقعیت میانگین یک پیک فصلی را حفظ می‌کند، اما عرض و ارتفاع را تغییر می‌دهد. ویژگی دوم را می‌توان با مقدار به‌دست آمده از حداقل مربعات متناسب با یک چند جمله‌ای حفظ کرد. برای هر مقدار داده y_i ، $i = 1, 2, \dots, N$ یک چند جمله‌ای درجه دوم $f(t) = c_1 + c_2 t + c_3 t^2$ را به همه $2n+1$ نقطه در پنجره متحرک برازش می‌دهد و مقدار y_i را با مقدار چند جمله‌ای در موقعیت t_i جایگزین می‌کند. روش فوق معمولاً به عنوان فیلتر ساویتسکی-گولای نامیده می‌شود. برای در نظر گرفتن نوفه با سوگیری منفی، اتصالات در چند مرحله انجام می‌شود و نتیجه آن یک منحنی هموار است که با پوش بالایی^۱ مقادیر در سری زمانی سازگار شده است.

روش گوسی نامتقارن

در این روش توابع مدل محلی در فواصل حول حداکثر و حداقل در سری‌های زمانی، با داده‌ها متناسب هستند. در این مورد تابع پایه یک نوع تابع گوسی به شرح زیر است.

$$g(t; x_1, x_2, \dots, x_5) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t-x_1}{x_2}\right)^{x_3}\right] & \text{if } t > x_1 \\ \exp\left[-\left(\frac{x_1-t}{x_4}\right)^{x_5}\right] & \text{if } t < x_1 \end{cases} \quad \text{رابطه ۲}$$

برای این تابع X_1 موقعیت حداکثر یا حداقل را با توجه به متغیر مستقل زمان t تعیین می‌کند، در حالیکه X_2 و X_3 پهنای کشیدگی نیمه تابع سمت راست را تعیین می‌کند. به‌طور مشابه، X_4 و X_5 پهنای کشیدگی نیمه چپ را تعیین می‌کنند. اثرات تغییر پارامترهای $X_2, \dots, X_5$ در شکل ۴ نشان داده شده است.



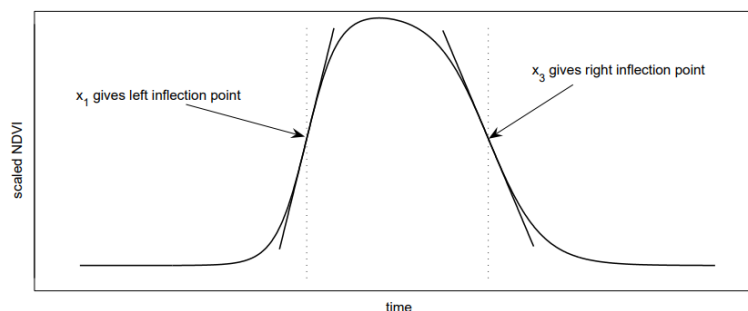
شکل ۴. تأثیر تغییرات پارامتر بر توابع محلی. در (a) پارامتر X_2 که عرض نیمه تابع سمت راست را تعیین می‌کند، نسبت به مقدار نیمه چپ کاهش (خط توپر) و افزایش (خط نقطه چین) یافته است. در (b) پارامتر X_3 که کشیدگی نیمه تابع سمت راست را تعیین می‌کند، نسبت به مقدار نیمه چپ کاهش (خط توپر) و افزایش یافته است (خط نقطه چین).

روش لجستیک دوگانه

در این روش توابع مدل محلی در فاصله حول حداکثر و حداقل در سری‌های زمانی، با داده‌ها متناسب هستند. تابع پایه لجستیک دوگانه به شرح زیر است.

$$g(t; x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - t}{x_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_3 - t}{x_4}\right)} \quad \text{رابطه ۳}$$

X_1 موقعیت نقطه عطف چپ را تعیین می‌کند در حالیکه X_2 سرعت تغییر را نشان می‌دهد (شکل ۵). به‌طور مشابه X_3 موقعیت نقطه عطف راست را تعیین می‌کند، در حالیکه X_4 سرعت تغییر را در این نقطه نشان می‌دهد. همچنین برای این تابع، پارامترها در یک محدوده محصور می‌شوند تا از یک شکل هموار اطمینان حاصل شود (Eklundha and Jönsson, 2017).



شکل ۵. در تابع لجستیک دوگانه، X_1 موقعیت نقطه عطف چپ را تعیین می‌کند در حالیکه X_2 سرعت تغییر را نشان می‌دهد. به طور مشابه X_3 موقعیت نقطه عطف راست را تعیین می‌کند و X_4 سرعت تغییر را در این نقطه نشان می‌دهد.

شاخص پوشش گیاهی تقویت شده (EVI)

شاخص EVI مشابه شاخص NDVI است و می‌تواند برای تعیین کمیت سبزیگی پوشش گیاهی استفاده شود. EVI تأثیرات جوی و خاک را از سیگنال پوشش گیاهی جدا می‌کند و برخی از شرایط جوی و نوفه پس‌زمینه تاج‌پوشش را تصحیح می‌کند و در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم، در تعیین سبزیگی حساس‌تر است. فرمول EVI به صورت رابطه ۴ است:

$$EVI = G \frac{NIR - Red}{NIR + C1Red - C2Blue + L} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن NIR ، Red و $Blue$ به ترتیب بازتاب‌های سطحی در ناحیه مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی، L فاکتور تنظیم خاک، $C1$ و $C2$ ضرایب تصحیح مقاومت آئروسول و G فاکتور مقیاس‌بندی است. ضرایب اتخاذ شده برای الگوریتم EVI سنجنده مودیس عبارتند از: ۱ (Didan et al., 2015) $G = 2/5$ و $C2 = 7/5$ ، $C1 = 6$ ، $L =$

تحلیل‌های آماری

در این تحقیق از روش‌های رگرسیون خطی، همبستگی پیرسون و ضریب تعیین برای تحلیل آماری استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار R و کدهای آماری مربوطه، رابطه بین مراحل فنولوژی تغییرات پوشش گیاهی جنگل معتدله (SOS، LOS و EOS) در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ به روش رگرسیون خطی تحلیل گردید. همچنین رابطه میان شاخص پوشش گیاهی EVI و متغیرهای هواشناسی در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به روش همبستگی پیرسون محاسبه شد.

یافته‌های پژوهشی و بحث

روند تغییرات زمانی و افزایش و کاهش تعداد روزهای رسیدن به مراحل فنولوژی

بر اساس سری زمانی شاخص EVI طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲، میانگین زمان شروع، پایان و طول فصل رشد جنگل گرگان بر حسب روز وقوع در سال (DOY) در جدول ۱ آمده است. روند تغییرات زمانی در مراحل فنولوژی SOS، EOS و LOS جنگل گرگان در این دوره آماری به روش گوسی در شکل ۶ آمده است. این روند در هر سه روش هموارسازی تأخیر داشته است و به منظور خلاصه‌سازی از ارائه روند تغییرات زمانی روش‌های لجستیک دوگانه و سواپتسکی گولای صرف نظر شده است.

جدول ۱: میانگین شروع، پایان و طول فصل رشد پوشش گیاهی جنگل گرگان طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۲ (SOS شروع فصل، EOS پایان فصل، LOS طول فصل و DOY روز وقوع در سال)

روش هموارسازی	SOS (DOY)	EOS (DOY)	LOS (DAY)
گوسی	۱۲۶	۳۳۰	۲۰۴
لجستیک دوگانه	۱۲۵	۳۳۱	۲۰۶
سواپتسکی گولای	۱۲۷	۳۳۱	۲۰۴



شکل ۶: روند تغییرات زمانی در مراحل فنولوژی SOS (a)، EOS (b) و LOS جنگل گرگان از سال ۲۰۰۱-۲۰۲۲ به روش گوسی (SOS) شروع فصل، EOS پایان فصل، LOS طول فصل و DOY روز وقوع در سال

نتایج تحلیل آماری افزایش و کاهش تعداد روزهای رسیدن به مراحل فنولوژی SOS، EOS و LOS با ۳ روش هموارسازی در جدول ۲ ذکر شده است. در روش گوسی (جدول ۲) روند تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی و مرحله فنولوژی SOS، ۲/۴۴ روز در سال افزایش، مرحله فنولوژی EOS، ۲/۷۱ روز در سال افزایش و مرحله فنولوژی LOS، ۰/۲۷ روز در سال افزایش یافت و با $p < ۰/۰۵$ رابطه معنی‌داری بین شروع فصل رشد، پایان فصل رشد و طول فصل رشد در طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ وجود دارد. در روش لجستیک دوگانه (جدول ۲) روند تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی و مرحله فنولوژی SOS، ۲/۳۶ روز در سال افزایش، مرحله فنولوژی EOS، ۲/۸۵ روز در سال افزایش و مرحله فنولوژی LOS، ۰/۵۱ روز در سال افزایش یافت و با $p < ۰/۰۵$ رابطه معنی‌داری بین شروع فصل رشد و پایان فصل رشد در طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ وجود دارد، اما طول فصل رشد معنی‌دار نشده است. در روش ساویتسکی-گولای (جدول ۲) روند تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی و مرحله فنولوژی SOS، ۲/۳۶ روز در سال افزایش، مرحله فنولوژی EOS، ۳/۴۲ روز در سال افزایش و مرحله فنولوژی

LOS، ۱/۰۴ روز در سال افزایش یافت و با $p < ۰/۰۵$ رابطه معنی داری بین شروع فصل رشد، پایان فصل رشد و طول فصل رشد در طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ وجود دارد. ضریب تعیین R^2 برای سه روش گوسی، لجستیک دوگانه و ساویتسکی گولای همبستگی مناسبی بین مراحل فنولوژی SOS و EOS و دوره آماری نشان می‌دهد و همبستگی ضعیفی را بین مرحله فنولوژی LOS و دوره آماری نشان می‌دهد. (جدول ۲).

جدول ۲: تحلیل آماری افزایش و کاهش تعداد روزهای رسیدن به مراحل فنولوژی SOS، EOS و LOS با ۳ روش هموارسازی (SOS شروع فصل، EOS پایان فصل، LOS طول فصل و DOY روز وقوع در سال)

مراحل فنولوژی روش آماری	SOS			EOS			LOS		
	R^2	P-value	نوسانات DOY	R^2	P-value	نوسانات DOY	R^2	P-value	نوسانات DOY
گوسی	۰/۷۲	۰/۰۰	۲/۴۴	۰/۶۱	۰/۰۰	۲/۷۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۲۷
لجستیک دوگانه	۰/۷۰	۰/۰۰	۲/۳۶	۰/۷۷	۰/۰۰	۲/۸۵	۰/۰۵	۰/۳۴	۰/۵۱
ساویتسکی گولای	۰/۷۵	۰/۰۰	۲/۳۶	۰/۷۶	۰/۰۰	۳/۴۲	۰/۱۸	۰/۰۰	۱/۰۴

رابطه بین مراحل فنولوژی و میانگین دمای حداکثر و حداقل ۱۰ روزه و فصلی و مجموع بارش فصلی بررسی میانگین دمای حداکثر و حداقل ۱۰ روز قبل از زمان رسیدن به SOS و EOS رشد، در هر سه روش هموارسازی و در طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۲ نشان داد که با افزایش $\bar{T}_{max}$ در بازه ۱۰ روز قبل از مرحله فنولوژی SOS، این مرحله به تاخیر می‌افتد و با کاهش $\bar{T}_{max}$ در بازه ۱۰ روز قبل از مرحله فنولوژی EOS، این مرحله نیز با تعویق مواجه می‌شود. نوسانات متغیرهای هواشناسی نظیر افزایش میانگین دمای سالانه، بر نرخ فرایندهای بیولوژیکی مانند نمو تاثیر می‌گذارد و آنرا به تاخیر می‌اندازد (Piao et al., 2019). برای تجزیه و تحلیل اثر نوسانات متغیرهای هواشناسی بر مراحل مختلف فنولوژی، همبستگی بین متغیرهای هواشناسی و مراحل فنولوژی پوشش گیاهی جنگل گرگان در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز در طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۲ با سه روش آماری گوسی، لجستیک دوگانه و ساویتسکی گولای بررسی شد (جداول ۳، ۴ و ۵).

جدول ۳: همبستگی پیرسون بین مراحل فنولوژی SOS، EOS و LOS و $\bar{T}_{min}$ ، $\bar{T}_{max}$ و مجموع بارندگی فصلی با روش هموارسازی گوسی (SOS شروع فصل، EOS پایان فصل، LOS طول فصل، DOY روز وقوع در سال، واحد دما درجه سانتیگراد و واحد باران میلیمتر)

گوسی	SOS			EOS			LOS		
	$\bar{T}_{min}$	$\bar{T}_{max}$	Prec	$\bar{T}_{min}$	$\bar{T}_{max}$	Prec	$\bar{T}_{min}$	$\bar{T}_{max}$	Prec
زمستان	۰/۰۶۵	۰/۰۷۶	۰/۲۱۰	۰/۰۲۷	۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۰/۰۹۰	۰/۰۴۹	۰/۱۷۲
بهار	۰/۲۱۵	۰/۲۵۶	۰/۱۳۵	۰/۲۲۲	۰/۱۸۴	۰/۰۰۹	۰/۵۲۲*	۰/۵۱۴*	۰/۱۴۹
تابستان	۰/۳۷۰	۰/۴۷۵*	۰/۳۶۱	۰/۳۰۷	۰/۴۳۸*	۰/۲۸۸	۰/۰۰۳	۰/۰۶۰	۰/۰۱۶
پاییز	۰/۲۵۵	۰/۲۲۴	۰/۲۲۳	۰/۳۹۳	۰/۳۵۴	۰/۱۴۸	۰/۲۳۲	۰/۲۱۴	۰/۰۳۹

(*) مقدار $p\text{-value} < ۰/۰۵$ معنی داری در سطح اطمینان ۹۵٪، ** مقدار $p\text{-value} < ۰/۰۱$ معنی داری در سطح اطمینان ۹۹٪)

جدول ۴: همبستگی پیرسون بین مراحل فنولوژی SOS، EOS و LOS و $\bar{T}_{min}$ ، $\bar{T}_{max}$ و مجموع بارندگی فصلی با روش هموارسازی لجستیک دوگانه

لجستیک دوگانه	SOS			EOS			LOS		
	$\bar{T}_{min}$	$\bar{T}_{max}$	Prec	$\bar{T}_{min}$	$\bar{T}_{max}$	Prec	$\bar{T}_{min}$	$\bar{T}_{max}$	Prec
زمستان	۰/۰۳۱	۰/۰۴۲	۰/۱۶۶	۰/۰۶۹	۰/۱۰۵	۰/۱۱۷	۰/۰۴۴	۰/۰۸۲	۰/۰۳۹
بهار	۰/۲۲۲	۰/۲۵۳	۰/۱۰۰	۰/۲۳۴	۰/۲۰۱	۰/۰۲۶	۰/۵۸۳**	۰/۵۷۲**	۰/۰۶۱
تابستان	۰/۳۷۷	۰/۴۷۹*	۰/۳۵۴	۰/۳۱۸	۰/۴۶۶*	۰/۳۵۴	۰/۰۲۶	۰/۰۵۹	۰/۰۷۸
پاییز	۰/۲۵۹	۰/۲۲۸	۰/۱۹۷	۰/۲۲۶	۰/۱۷۶	۰/۳۱۱	۰/۰۰۷	۰/۰۳۶	۰/۱۹۵

جدول ۵: همبستگی پیرسون بین مراحل فنولوژی EOS، SOS و LOS و $\bar{T}_{min}$ ، $\bar{T}_{max}$ و مجموع بارندگی فصلی با روش هموارسازی سائیتسکی گولای

سائیتسکی گولای	SOS			EOS			LOS		
	Prec	$\bar{T}_{max}$	$\bar{T}_{min}$	Prec	$\bar{T}_{max}$	$\bar{T}_{min}$	Prec	$\bar{T}_{max}$	$\bar{T}_{min}$
زمستان	۰/۱۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۶۰	۰/۰۳۳	۰/۰۸۴	۰/۱۱۱	-۰/۰۰۷	۰/۰۵۹	-۰/۰۰۵
بهار	۰/۱۰۱	-۰/۲۱۶	-۰/۱۸۳	۰/۱۸۷	۰/۱۵۸	۰/۰۱۳	-۰/۰۸۰	۰/۴۸۶*	۰/۴۹۷*
تابستان	-۰/۳۳۶	۰/۴۹۲*	۰/۳۹۲	۰/۴۰۳	۰/۵۲۴*	-۰/۳۵۰	-۰/۱۷۵	۰/۲۸۶	۰/۲۰۶
پاییز	-۰/۱۸۱	-۰/۲۷۲	-۰/۲۹۶	-۰/۳۸۷	-۰/۳۳۰	-۰/۲۰۴	-۰/۱۱۸	-۰/۲۳۱	-۰/۲۹۸

در روش گوسی و سائیتسکی گولای (جداول ۳ و ۵) ($p < ۰/۰۵$) و لجستیک دوگانه (جدول ۴) ($p < ۰/۰۱$)، همبستگی بین LOS و $\bar{T}_{min}$ و $\bar{T}_{max}$ در فصل بهار به طور معنی داری مثبت برآورد شد. به طوری که افزایش دما در بهار و زمستان SOS را سرعت می بخشد و در نتیجه LOS را افزایش می دهد. از سوی دیگر در هر سه روش فوق (جداول ۳، ۴ و ۵)، همبستگی EOS و SOS با $\bar{T}_{max}$ در فصل تابستان، به طور معنی داری مثبت ارزیابی شد و رابطه آنها با $\bar{T}_{min}$ در این فصل ضعیف و مثبت بود ($p < ۰/۰۵$). در سه روش فوق (جداول ۳، ۴ و ۵)، مراحل فنولوژی EOS، SOS و LOS هیچ ارتباط معنی داری را با بارش در فصول مختلف نشان نمی دهند. بر اساس نتایج جداول ۳، ۴ و ۵، می توان نتیجه گیری نمود که افزایش دما در تابستان SOS و EOS را افزایش می دهد و علت آن ممکن است این باشد که $\bar{T}_{max}$ در تابستان منجر به افزایش انباشت گرما می شود و آستانه بالایی دماهای کاردینال پوشش گیاهی را تحت تاثیر قرار دهد و با افزایش فعالیت آنزیم های فتوسنتزی و کاهش تخریب کلروفیل در طول پیری برگ، EOS را به تاخیر می اندازد (Liu et al., 2016a; Ma et al., 2022). افزایش $\bar{T}_{min}$ و $\bar{T}_{max}$ در زمستان و بهار LOS را افزایش می دهد و $\bar{T}_{max}$ در زمستان و بهار اثرات قوی تری بر LOS نسبت به $\bar{T}_{min}$ دارد. از یک طرف، افزایش $\bar{T}_{max}$ و $\bar{T}_{min}$ در زمستان و بهار ممکن است باعث افزایش انباشت گرما و کاهش خسارت سرمازدگی شود (Li et al., 2019; Piao et al., 2015). از سوی دیگر مقدار $\bar{T}_{min}$ قبل از سبز شدن پوشش گیاهی، به احتمال زیاد زیر آستانه تجمع گرما است. بنابراین $\bar{T}_{min}$ ممکن است تأثیر ضعیف تری بر سبز شدن گیاهان نسبت به $\bar{T}_{max}$ داشته باشد (Piao et al., 2015). این ممکن است توضیح دهد که چرا افزایش $\bar{T}_{max}$ در زمستان و بهار تأثیر پیشروی قوی تری بر SOS نسبت به $\bar{T}_{min}$ می گذارد. افزایش $\bar{T}_{min}$ و $\bar{T}_{max}$ در زمستان و بهار ممکن است SOS را افزایش دهد، در نتیجه LOS رشد پوشش گیاهی را افزایش می دهد. علاوه بر این همبستگی مثبت LOS با $\bar{T}_{min}$ در بهار، تأیید می کند که گرم شدن $\bar{T}_{min}$ می تواند EOS را به تاخیر بیاندازد و در نتیجه LOS را افزایش دهد (Piao et al., 2006).

نتیجه گیری

نتایج حاکی از آن است که بازه جابجایی روزهای SOS و EOS رشد در هر سال، نوسانات چند روزه دارد و روند صعودی را در هر سه روش هموارسازی نشان می دهد، که این امر بیانگر حساسیت زیاد این مراحل فنولوژی به متغیرهای هواشناسی و تغییرات اقلیمی در طول دوره آماری است. طول فصل رشد به میانگین سالانه دمای هوا بستگی دارد و حدوداً به ازای افزایش هر یک درجه سانتیگراد، ۴-۶ روز افزایش می یابد (White et al., 1999). در این تحقیق نوسانات سالانه میانگین دمای هوا در طول دوره آماری در بازه یک درجه سانتیگراد بوده است و بازه جابجایی روزهای LOS رشد در سال های مختلف تقریباً ثابت بوده است که بیانگر همبستگی ضعیف آن با متغیرهای هواشناسی است. بنابراین برخلاف EOS و SOS، میانگین طول فصل رشد نوسانات روزانه زیادی را نشان نداده است. نوسانات طول فصل رشد (مانند تداوم دوره بدون یخبندان در یک سال) بصورت بهار زودرس و پاییز دیررس، بر الگوهای زمان بندی چرخه ای تأثیر می گذارد (Gallinat et al., 2015). در خصوص تأثیر بارش بر مراحل فنولوژی EOS، SOS و LOS رشد، ارتباط معنی داری در ۳ روش هموارسازی و در فصول مختلف یافت نشد. در تحقیقی مشاهدات فنولوژیکی چهار گونه بلوط در غرب آمریکای شمالی و شرق و مرکز آمریکای شمالی، شواهد قوی برای تأثیر بارش به عنوان یک محرک اصلی در شروع فنوفازها در گونه های غربی در مقایسه با گونه های شرقی پیدا نشد (Gerst et al., 2017). مراحل فنولوژی EOS و SOS رشد با T_{max} تابستان همبستگی دارد و حساسیت بالای LOS به T_{max} و T_{min} در بهار نشان می دهد که با افزایش آنها، EOS به تاخیر افتاده و در نتیجه LOS افزایش می یابد. یافته های یک پژوهش نشان داد که بیشتر تغییرات سالانه در تاریخ های رسیدن به مراحل فنولوژی مربوط به دما است، در حالی که بارش و NAO کمتر از ۱۰٪ از تنوع تاریخ ها را به خود

اختصاص می‌دهند (Gordo and Sanz., 2010). پژوهش حاضر نشان داد که پایش LSP ماهواره‌ای که معرف الگوی چرخه‌ای رویدادهای اصلی زندگی گیاهان است، مستقیماً توسط متغیرهای هواشناسی هدایت می‌شود و در این میان دما مهمترین نقش را دارد. بررسی اثر متغیرهای هواشناسی فصلی ($\bar{T}_{min}$ ، $\bar{T}_{max}$ و P) بر فنولوژی گلدهی گیاه ترلیوم^۱ نشان داد که $\bar{T}_{min}$ گرمتر، سرعت گلدهی را افزایش می‌دهد و بارش بیشتر، گلدهی را به تأخیر می‌اندازد (Matthews and Mazer., 2015). باید توجه داشت که برخی محدودیت‌ها مانند فنولوژی متمایز گونه‌های گیاهی در یک پیکسل بر تغییر در زمان بندی معیارهای LSP تاثیر می‌گذارد. لذا استفاده از پایش‌های میدانی مکرر گونه‌های گیاهی موجود در منطقه، وجود داده‌های هواشناسی در محل و افزایش دقت زمانی-مکانی تصاویر ماهواره‌ای برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین پیشنهاد می‌شود از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالاتر به منظور افزایش دقت در سری زمانی اطلاعات سبزیگی فضایی ماهواره‌ای استفاده شود و تأثیرات نامتقارن $\bar{T}_{min}$ و $\bar{T}_{max}$ در شبیه‌سازی‌های فنولوژی پوشش گیاهی ماهواره‌ای مد نظر قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- بای، ناصر و داوودی، محمود. (۱۳۸۹). تجزیه و تحلیل و پیش بینی برخی عناصر اقلیمی شهر گرگان. فصل نامه جغرافیایی چشم انداز زاگرس، ۲(۴)، ۹۹-۱۱۴. SID. <https://sid.ir/paper/175733/fa>
- خلیلی، علی؛ بذرافشان، جواد و چراغعلی زاده، مجید. (۱۴۰۱). بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربرد روش برای پهنه بندی اقلیم جهان. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۰(۱)، ۳-۱۶. DOI: 10.22125/agmj.۲۰۲۲.۱۶-۳
- رایگانی، بهزاد؛ ارزانی، حسین؛ حیدری علمدارلو، اسماعیل و مقدمی، محمد مهدی. (۱۳۹۸). کاربرد سنجش از دور به منظور ارزیابی تغییر اقلیم بر تولید و فنولوژی گیاهان (منطقه مورد مطالعه: استان تهران). مرتع، ۱۳(۳)، ۴۶۰-۴۵۰.
- مسیح پور، مهرنوش؛ درویش صفت، علی اصغر؛ رحمانی، رامین و فاتحی، پرویز. (۱۳۹۹). روند مشخصه‌های فنولوژیک جنگل‌های زاگرس جنوبی بر مبنای سری زمانی MODIS-NDVI در دامنه ی زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۷. جنگل ایران، ۱۲(۴)، ۵۷۷-۵۹۰. SID. <https://sid.ir/paper/386323/fa>. 590-577
- ملایری، فاطمه؛ عاشورلو، داوود؛ شکیب، علیرضا؛ متکان، علی اکبر و عقیقی، حسین. (۱۳۹۷). بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر فنولوژی پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانی داده‌های AVHRR. کشاورزی بوم شناختی، ۸(۲)، ۹۸-۱۱۷. SID. <https://sid.ir/paper/389071/fa>

REFERENCES

- Bay, N., & Davoudi, M. (2010). Analysis and prediction of some climatic elements of Gorgan city. *The Quarterly Journal of Zagros Geographical Landscape*, 2(4), 99-114. SID. <https://sid.ir/paper/175733/fa>. (in Persian)
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 13(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00058-7).
- Clerici, N., Weissteiner, C.J., Halabuk, A., Hazeu, G.W., Roerink, G.J., & Mùcher, S. (2012). Phenology related measures and indicators at varying spatial scales. Investigation of phenology information for habitat classification using SPOT VGT and MODIS NDVI data. *Applied Spatial Research Earth Observation and Environmental Informatics*, Wageningen, Alterra, Alterra-Report 2259. 112 pp.; 33 figs.; 15 tab.; 34 ref.
- Dambreville, A., Lauri, P.E., Normand, F., & Guedon, Y. (201۴). Analysing growth and development of plants jointly using developmental growth stages. *Annals of Botany*, 115(۱), 93-105. doi: 10.1093/aob/mcu227.
- Didan, K., Munoz, A.B., Solano, R., & Huete, A. (2015). MODIS Vegetation Index User's Guide. (MOD13 Series). Version 3. The University of Arizona, Tucson.
- Eklundha, L., & Jönsson, P. (2017). TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing. Software Manual, Lund University and Malmö University, Sweden.
- Fu, Y.H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., Ciais, P., Huang, M., Menzel, A., Peñuelas, J., Song, Y., Vitasse, Y., Zeng, Z., & Janssens, I.A. (2015). Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526(7571), 104-107. doi: 10.1038/nature15402.

- Gallinat A.S., Primack R.B., & Wagner D.L. (2015). Autumn, the neglected season in climate change research. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(3), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.01.004>.
- Gatsuk, L.E., Smirnova, O.V., Vorontzova, L.I., Zaugolnova, L.B., & Zhukova, L.A. (1980). Age states of plants of various growth forms: a review. *Journal of Ecology*, 68(68), 675–696. DOI:10.2307/2259429.
- Gerst, K.L., Rossington, N.L., & Mazer, S.J. (2017). Phenological responsiveness to climate differs among four species of *Quercus* in North America. *Journal of Ecology*, 105(6): 1610–1622. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12774>.
- Gordo, O., & Sanz, J.J. (2010). Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology*, 16(3): 1082–1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02084.x>.
- Helman, D. (2018). Land surface phenology: What do we really 'see' from space?. *Science of the Total Environment*, 618, 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237>.
- Huete, A.R. (2012). Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring. *Geography Compass*, 6(9): 513–532. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2012.00507.x>.
- Hufkens, K., Friedl, M., Sonnentag, O., Braswell, B.H., Milliman, T., & Richardson, A.D. (2012). Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment*, 117(D11), 307–321. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.006>.
- Jönsson, P., & Eklundh, L. (2004). TIMESAT - a program for analysing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30(8), 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>.
- Katal, N., Rzanny, M., Mäder, P., & Wäldchen, J. (2022). Deep Learning in Plant Phenological Research: A Systematic Literature Review. *Front Plant Science*. **13**, 805738. doi: 10.3389/fpls.2022.805738.
- Keenan, T.F., Gray, J., Friedl, M., Toomey, M., Bohrer, G., Hollinger, D.Y., Munger, J.W., O'Keefe, J., Schmid, H.P., Wing, I.S., Yang, B., & Richardson, A.D. (2014). Net carbon uptake has increased through warming induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, **4**, 598–604. DOI:10.1038/NCLIMATE2253.
- Khalili, A., Bazrafshan, J., & Cheraghizadeh, M. (2022). A Comparative study on climate maps of Iran in extended de Martonne classification and application of the method for world climate zoning. *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1), 3–16. 10.22125/agmj.2022.156309. (in Persian)
- Li, K.; Wang, C., Sun, Q., Rong, G., Tong, Z., Liu, X., & Zhang, J. (2021). Spring Phenological Sensitivity to Climate Change in the Northern Hemisphere: Comprehensive Evaluation and Driving Force Analysis. *Remote Sensing*, 13(10), 1972. <https://doi.org/10.3390/rs13101972>.
- Li, X., Guo, W., Chen, J., Ni, X., & Wei, X. (2019). Responses of vegetation green-up date to temperature variation in alpine grassland on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 104(5972), 390–397. DOI:10.1016/j.ecolind.2019.05.003.
- Liang, L. (2019). Phenology. Elsevier. University of Kentucky, Lexington, KY, United States.
- Liang, L., Mark, D., Schwartz, M.D., & Fei, S. (2011). Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.013>.
- Lieth, H. (1974). Phenology and seasonal modeling. vol. 8. Springer-Verlag. New York.
- Liu, Q., Fu, Y.H., Zeng, Z., Huang, M., Li, X., & Piao, S., (2016a). Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 22(2), 644–655. <https://doi.org/10.1111/gcb.13081>.
- Liu, Q., Fu, Y.H., Zhu, Z., Liu, Y., Liu, Z., Huang, M., Janssens, I.A., & Piao, S. (2016b). Delayed autumn phenology in the Northern Hemisphere is related to change in both climate and spring phenology. *Global Change Biology*, 22(11), 3702–3711. <https://doi.org/10.1111/gcb.13311>.
- Liu, Y., Shen, X., Zhang, J., Wang, Y., Wu, L., Ma, R., Lu, X., & Jiang, M. (2023). Variation in Vegetation Phenology and Its Response to Climate Change in Marshes of Inner Mongolian. *Plants*, 12(11): 2072. <https://doi.org/10.3390/plants12112072>.
- Ma, R., Shen, X., Zhang, J., Xia, C., Liu, Y., Wu, L., Wang, Y., Jiang, M., & Lu, X. (2022). Variation of vegetation autumn phenology and its climatic drivers in temperate grasslands of China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103064>.
- Malayeri, F., Ashourloo, D., Shakiba, A., Matkan, A.A. & Aghighi, H. (2018). Investigating the Effects of Climate Change on Vegetation Phenology Using AVHRR Time Series Data. *Journal of Agroecology*, 8 (2), 98–117. (in Persian)
- Masihpoor, M., Darvishsefat, A.A., Rahmani, R., & 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), 577-590. DOI:10.22034/ijf.2021.127807 . (in Persian)
- Matthews, E.R., & Mazer, S.J. (2015). Historical changes in flowering phenology are governed by temperature * precipitation interactions in a widespread perennial herb in western North America. *New Phytologist*, 210(1), 157-167. doi: 10.1111/nph.13751.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., & Roy, D.B. (2006). Altered geographic and temporal variability in phenology in response to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 15(5), 498-504. doi: 10.1111/j.1466-822X.2006.00247.x
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Ciais, P., & Zhu, B. (2006). Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12(4), 672-685. DOI:10.1111/j.1365-2486.2006.01123.x.
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I.A., Fu, Y.H., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922-1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>.
- Piao, S., Tan, J., Chen, A., Fu, Y.H., Ciais, P., Liu, Q., Janssens, I.A., Vicca, S., Zeng, Z., Jeong, S.J., Li, Y., Myneni, R.B., Peng, S., Shen, M., & Penuelas, J. (2015). Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 6(1), 6911. DOI: 10.1038/ncomms7911.
- Rayegani, B., Arzani, H., Heydari Alamdarloo, E., & Moghadami, M.M. (2019). Application of remote sensing to assess climate change effects on plant productivity and phenology (Case study area: Tehran Province). *Rangelandsrm*, 13(3), 450-460. (in Persian)
- Richardson, A.D., Anderson, R.S., Arain, M.A., Barr, A.G., Bohrer, G., Chen, G., Chen, J.M., Ciais, P., Davis, K.J., Desai A.R., Dietze, M.C., Dragoni, D., Garrity, S.R., Gough, C.M., Grant, R., Hollinger, D.Y., Margolis, H.A., McCaughey, H., Migliavacca, M., Monson, R.K., Munger, J.W., Poulter, B., Raczka, B.M., Ricciuto, D.M., Sahoo, A.K., Schaefer, K., Tian, H., Vargas, R., Verbeeck, H., Xiao, J., & Xue, Y. (2012). Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: Results from the north American carbon program site synthesis. *Global Change Biology*, 18(2), 566-584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02562.x>.
- Schwartz, M.D. (2013). Phenology: An integrative environmental science. Springer, The Netherlands, Dordrecht.
- Schwartz, M.D., Ahas, R., & Aasa, A. (2006). Onset of spring starting earlier across the northern hemisphere. *Global Change Biology*, 12(2), 343-351. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01097.x
- White M.A., Running, S.W., & Thornton, P.E. (1999). The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *International Journal of Biometeorology*, 42(3), 139-145.
- Wu, C., Gonsamo, A., Chen, J.M., Kurz, W.A., Price, D.T., Lafleur, P.M., Jassal, R.S., Dragoni, D., Bohrer, G., Gough, C.M., Verma, S.B., Suyker, A.E., & Munger, J.W. (2012). Interannual and spatial impacts of phenological transitions, growing season length, and spring and autumn temperatures on carbon sequestration: A North America flux data synthesis. *Global and Planetary Change*, 92-93, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.05.021>.
- Xia, J., Niu, S., Ciais, P., Janssens, I.A., Chen, J., Ammann, C., Arain, A., Blanken, P.D., Cescatti, A., Bonal, D., Buchmann, N., Curtis, P.S., Chen, S., Dong, J., Flanagan, L.B., Frankenberg, C., Georgiadis, T., Gough, C.M., Hui, D., Kiely, G., Li, J., Lund, M., Magliulo, V., Marcolla, B., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E.J., Olesen, J.E., Piao, S., Raschi, A., Rouspard, O., Suyker, A.E., Urbaniak, M., Vaccari, F.P., Varlagin, A., Vesala, T., Wilkinson, M., Weng, E., Wohlfahrt, G., Yan, L., & Luo, Y. (2015). Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology. *Ecology*, 112(9): 2788-2793. <https://doi.org/10.1073/pnas.1413090112>.