



## ارزیابی تأثیر روش‌های هموارسازی بر محاسبه فنولوژی در جنگل‌های زاگرس با استفاده از داده‌های ماهواره مودیس (مطالعه موردی: مریوان)

فاطمه مهدوی پور<sup>۱</sup>، حسین ترابزاده<sup>۲\*</sup> و مرتضی حیدری مظفر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار سنجش از دور، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران  
<sup>۳</sup>استادیار سنجش از دور، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴)

### چکیده

**مقدمه:** تغییر اقلیم به تغییرات عوامل آب‌وهوایی یک منطقه در دوره بلندمدت اطلاق می‌شود و تأثیر مهمی بر فرایندهای اکولوژیکی آن منطقه دارد. بررسی تغییرات فنولوژی گیاهان، اهمیت زیادی در درک رفتار اکوسیستم‌های زمین در مواجهه با تغییرات اقلیمی دارد. روش‌های سنجش از دور امکان بررسی تغییرات فنولوژی را در عرصه وسیع فراهم می‌کنند. هدف از این تحقیق بررسی این تغییرات با استفاده از سری زمانی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در بخشی از جنگل‌های زاگرس است.

**مواد و روش‌ها:** مرسوم‌ترین روش سنجش از دور در محاسبه پارامترهای فنولوژی گیاهان، استفاده از سری زمانی شاخص‌های گیاهی است که به‌طور معمول پیوستگی روزانه آنها به دلیل پوشش ابر مخدوش شده و مقدار آنها نیز تحت تأثیر نویز قرار دارد. این مشکلات با به‌کارگیری فیلترهای هموارسازی تا حدودی قابل رفع است، هرچند مشخصات فیلترها باید با دقت انتخاب شود. به‌منظور استخراج پارامترهای فنولوژیکی، از داده‌های سری زمانی شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته مستخرج از تصاویر سنجنده مودیس در یک دوره ده‌ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۹) استفاده شد. برای استخراج پارامترهای فنولوژی، از جمله شروع و پایان فصل رویش، سری‌های زمانی  $NDVI_{ratio}$  و  $EVI_{ratio}$ ، با اعمال دو تابع ساویتزکی-گولای و میانگین متحرک هموارسازی شدند. برای اعتبارسنجی نتایج نیز از داده‌های زمینی که با مشاهده مستقیم وضعیت درختان (با نمونه‌برداری تصادفی) در منطقه جمع‌آوری شده‌اند استفاده شد.

**نتایج:** به‌کارگیری تابع میانگین متحرک با اندازه پنجره ۶ و تابع ساویتزکی-گولای با اندازه پنجره ۱۱ و درجه ۲، موجب بیشترین افزایش دقت برای هر دو شاخص گیاهی شده است. پس از اعمال تابع هموارسازی بهینه، پارامتر شروع فصل، حاصل از  $EVI_{ratio}$  برآورد دقیق‌تری ( $R^2 = 0.92$ ) از نتیجه حاصل از  $NDVI_{ratio}$  ارائه داده است. شروع فصل رویش در طول این ده سال به‌صورت متوسط ۰/۵ روز در سال کاهش یافته و پایان فصل رویش به‌صورت متوسط ۱/۳ روز در سال افزایش یافته است.

**نتیجه‌گیری:** به‌صورت کلی، در اغلب مناطق زمان شروع فصل رویش روند کاهشی و پایان فصل رویش روند افزایشی داشته‌اند. به‌عبارت دیگر، روند تعجیل در شروع فصل و تأخیر در پایان فصل، سبب افزایش طول فصل رویش در اغلب مناطق تحت بررسی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر اقلیم، فنولوژی، مودیس،  $NDVI$ ،  $EVI$ .

## مقدمه

فنولوژی مبتنی بر مقایسه مقادیر شاخص‌های گیاهی (VI)<sup>۴</sup> است که خود براساس داده‌های بازتاب انرژی از سطح زمین در طول موج‌های مختلف محاسبه می‌شوند. تغییرات قابل مشاهده در سری زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی، به تشخیص تغییرات در ویژگی‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی گیاهان، تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی منجر می‌شود (McCloy, 2010). بیشترین طول موج‌هایی که در محاسبه شاخص‌های گیاهی استفاده می‌شوند در محدوده باندهای سرخ و فروسرخ نزدیک قرار دارند که با فتوسنتز گیاهان مرتبط است.

در بین شاخص‌های گیاهی مختلفی که در تحقیقات فنولوژی سطح زمین استفاده شده‌اند، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)<sup>۵</sup>، مهم‌ترین و پرکاربردترین آنها شناخته می‌شود (Zhang et al., 2020). همچنین شاخص گیاهی توسعه یافته (EVI)<sup>۶</sup> برای داده‌های سنجنده MODIS<sup>۷</sup> به صورت فراگیر استفاده شده و نتایج قابل قبولی در مطالعات فنولوژی ارائه داده است (Matsushita et al., 2007).

سیگنال‌های دریافتی توسط سنجنده‌ها تحت تأثیر خطاهای هندسی، رادیومتری و اتمسفری قرار می‌گیرند (Cai et al., 2017). علی‌رغم اجرای فرایند تصحیحات، مقداری نویز در داده‌های سنجنش از دور باقی می‌ماند. قبل از بهره‌برداری از سری‌های زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی، باید اثر نویزهای باقی‌مانده نیز تا حد ممکن کاهش یابند. روش محاسباتی کاهش نویز در تصاویر ماهواره‌ای، فیلتر کردن یا هموارسازی خوانده می‌شود. بررسی مطالعات موجود نشان می‌دهد که انتخاب روش هموارسازی بر دقت برآورد پارامترهای فنولوژی تأثیر مستقیم دارد (Tian et al., 2021).

به‌عنوان نمونه (Kowalski et al., 2020) در

اقلیم، متوسط شرایط جوی هر منطقه در مدت زمان طولانی است (Zarei et al., 2019) که بر اثر عوامل مختلف طبیعی و انسانی تغییر می‌کند. تغییرات اقلیمی از بزرگ‌ترین تهدیدها برای تنوع زیستی در سطح جهان است و در حال حاضر عملکرد، ترکیب و ساختار بسیاری از اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر قرار داده است (Verrall et al., 2020). در بین شاخص‌های مختلف، بررسی فنولوژی پوشش گیاهی، به‌عنوان ساده‌ترین و مؤثرترین شاخص تغییرات اقلیمی، به درک واکنش اکوسیستم‌های زمین به این تغییرات کمک شایانی می‌کند (Caparros-Santiago et al., 2021). فنولوژی به بررسی روابط وقایع زیستی متناوب، مانند زمان وقوع رخدادهای تکرارپذیر در چرخه زندگی سالانه گیاهان می‌پردازد که از آن جمله می‌توان به شروع فصل رشد<sup>۱</sup> (SOS)، طول فصل رشد<sup>۲</sup> (LOS) و پایان فصل رشد<sup>۳</sup> (EOS) اشاره کرد (Zhang et al., 2018). تغییر در فنولوژی گیاهان پیامدهای زیادی برای فرایندهای اکولوژیکی، کشاورزی، جنگلداری، سلامت انسان و اقتصاد جهانی دارد (Han et al., 2020).

روش‌های میدانی برای تعیین پارامترهای فنولوژی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است. ضمن اینکه مشاهدات مستقیم، به‌صورت نمونه‌های پراکنده انجام می‌گیرند و تعمیم آنها در مناطق وسیع موجب کاهش دقت می‌شود. درحالی که اندازه‌گیری فنولوژی به روش‌های سنجنش از دور معایب فوق را ندارد و به دلیل سهولت در تکرار مشاهدات ماهواره‌ای، در مطالعات مختلف از مقیاس محلی تا جهانی استفاده شده است (Miri et al., 2024). با وجود این، اختلافاتی بین تاریخ وقوع پدیده‌های فنولوژی بین روش‌های سنجنش از دور و مشاهدات میدانی وجود دارد (Chen et al., 2020).

به‌طور کلی، روش سنجنش از دور در ارزیابی

4. VI: Vegetation Index

5. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

6. Enhanced Vegetation Index

7. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

1. Start-of-season

2. Length-of-season

3. End-of-season

ذخیره زیستی را در برابر تغییرات اقلیمی و محیطی نشان دهد. همچنین، درک بهتر روند تغییرات زمانی رویش گیاهان در این اکوسیستم، حفاظت و مدیریت مؤثرتر منابع طبیعی را میسر خواهد کرد. برای نمونه تخمین زمان شروع فصل، در صدور مجوز حضور دام در جنگل و جلوگیری از تخریب مراتع نقش کلیدی دارد.

فراگیر شدن استفاده از سری‌های زمانی با توان تفکیک زمانی زیاد، ضرورت توجه به مرحله هموارسازی را دوچندان کرده است. روش‌های رایج هموارسازی سری زمانی، تفاوت‌های زیادی در ساختار مدل‌ها پدید می‌آورند که سبب ارزیابی اشتباه فنولوژی گیاهان می‌شود. این عدم قطعیت، به‌ویژه در مناطقی که تنوع ساختاری بیشتری در پوشش گیاهی دیده می‌شود، موجب کاهش کارایی روش‌های سنجش از دور می‌شود. تحقیقاتی در این زمینه انجام گرفته است، اما با توجه به وابستگی نتایج به نوع پوشش گیاهی منطقه، توصیه مشخصی برای جنگل‌های باز، نظیر جنگل‌های زاگرس صورت نگرفته است. از این‌رو در این پژوهش سعی شد با به‌کارگیری داده‌های سری زمانی NDVI و EVI که از تصاویر سنجنده MODIS در دامنه زمانی ده‌ساله استخراج شده، اثر هموارسازهای مختلف و پارامترهای آنها بر شاخص‌های فنولوژی در جنگل‌های زاگرس شمالی ارزیابی شود. به‌منظور بررسی دوره رشد فصلی پوشش گیاهی از سیگنال‌های ماهواره‌ای دارای نویز، روش‌های پردازش هموارسازی سری‌های زمانی SG و میانگین متحرک (MA)<sup>5</sup> استفاده شده است. نظر به اهمیت دو پارامتر شروع و پایان فصل رویش و امکان اعتبارسنجی آنها، این تحقیق تنها بر برآورد SOS و EOS متمرکز شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه پژوهش

براساس شرایط اقلیمی، پهنه رویشی زاگرس به دو

تحقیقی در جنگل‌های پهن‌برگ، از سری زمانی دو شاخص NDVI و EVI، حاصل از تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 و Landsat، به‌منظور برآورد پارامترهای فنولوژی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که در صورت هموارسازی دقیق، شاخص EVI همبستگی بیشتری با مشاهدات زمینی دارد. در تحقیقی توسط Xu et al. (2017)، با اعمال روش‌های هموارساز Linear, FFT<sup>1</sup>, Spline و فیلتر ساویتزکی-گولای (SG)<sup>2</sup> روی سری زمانی شاخص NDVI، مشخص شد که روش SG نتیجه بهتری در مقایسه با سه الگوریتم دیگر دارد. با وجود این، همیشه نتایج گزارش‌شده مورد اتفاق نظر نیستند. در همین زمینه، Cai et al. (2017) روش‌های هموارساز AG, Spline, LO<sup>3</sup>, SG, DL<sup>4</sup> را روی سری زمانی NDVI سنجنده MODIS استفاده کردند و نشان دادند که روش‌های DL و AG در این مورد بهترین عملکرد را نسبت به روش‌های دیگر ارائه می‌دهند. آنها در تحقیقات خود دریافتند که هموارسازها حدود ۸۹ درصد از خطای بین شاخص‌ها را کاهش می‌دهند. نتیجه اینکه علاوه بر به‌کارگیری یک روش هموارسازی مناسب، پارامترهای آن نیز باید به‌درستی انتخاب شوند. بنابراین با توجه به دقت مورد نیاز در برآورد پارامترهای فنولوژی، باید فرایند هموارسازی قبل از پردازش سری‌های زمانی به‌درستی اعمال شود.

جنگل‌های زاگرس گسترده‌ترین اکوسیستم ایران است که در ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی مختلف واقع شده و مأمون گونه‌های گیاهی و جانوری متنوعی است و از لحاظ منابع آب و خاک نیز مهم‌ترین راهبردی‌ترین منطقه کشور به شمار می‌آید (Izadi et al., 2022). چنین ویژگی‌هایی، نقش این جنگل‌ها را از نظر اکولوژیکی برجسته کرده است. بررسی فنولوژی جنگل‌های زاگرس در بلندمدت می‌تواند وضعیت این

1. Fast Fourier Transform

2. SG: Savitzky-Golay

3. Local Filtering

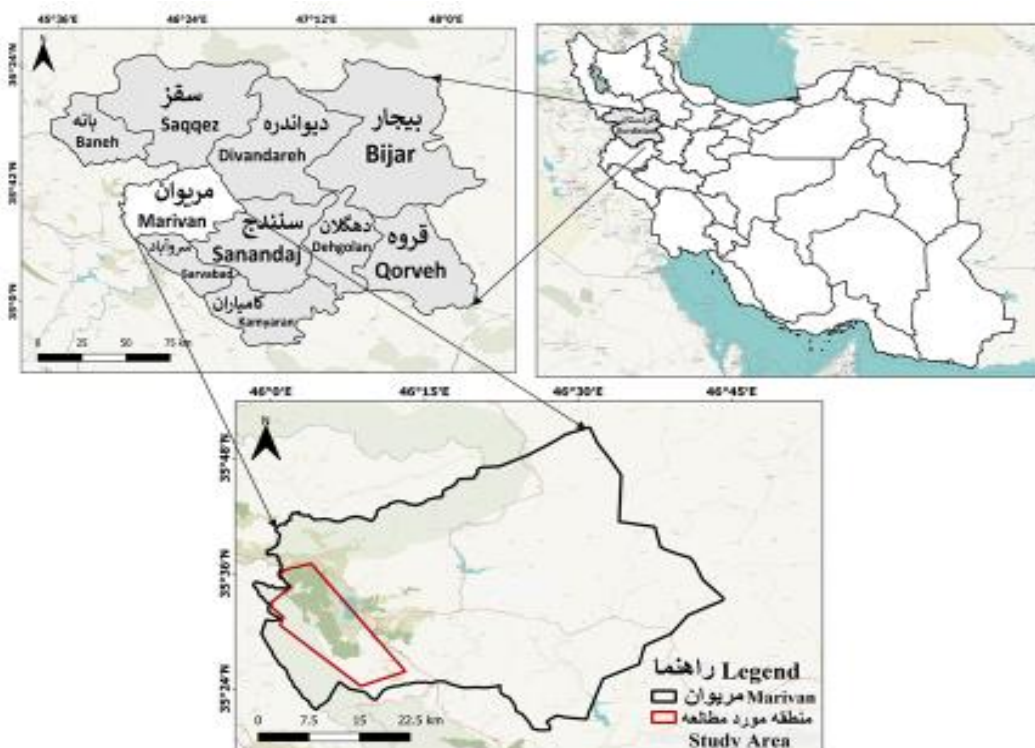
4. Double Logistic Function Fitting

5. MA: Moving Averages

شهرستان را شامل می‌شود (شکل ۱). گونه‌های اصلی درختان منطقه شامل بلوط لبنانی (*Quercus libani*) و برودار (*Quercus brantii* Lindl.)، معروف به بلوط ایرانی است (Salehi & Eriksson, 2010).

به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، تنها مناطق با درصد پوشش درختان بیش از ۵۰ درصد انتخاب شدند. این کار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای که دارای قدرت تفکیک زیادی هستند انجام گرفت.

منطقه زاگرس جنوبی، با رطوبت کمتر و زاگرس شمالی به‌صورت نیمه مرطوب و سرد تقسیم می‌شود. اگرچه، بارش بیشتر در زاگرس شمالی موجب افزایش تراکم جنگل‌ها نسبت به مناطق دیگر در جنوب زاگرس شده، اما تخریب‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی، چهره جنگل‌ها را نیز در این مناطق دستخوش تغییر قرار داده است. منطقه پژوهش شامل بخش‌هایی از جنگل‌های شهرستان مریوان است که با مساحت ۹۷۲۷۰ هکتار، حدود ۳۵ درصد از کل مساحت این



شکل ۱- منطقه پژوهش در شهرستان مریوان

Figure 1. Study area in Marivan County

گیاهی NDVI و EVI که اغلب برای محاسبه تغییرات پوشش گیاهی به‌کار می‌روند در این محصول قرار دارند.

شاخص NDVI توسط Tucker et al. (1979) طراحی شد. این شاخص برحسب دو باند قرمز (R) و مادون قرمز نزدیک (NIR)، از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad \text{رابطه ۱}$$

### شیوه اجرای پژوهش

به‌منظور بررسی پارامترهای فنولوژی از داده‌های سنجنده MODIS بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. دلیل انتخاب این سنجنده، زیاد بودن قدرت تفکیک طیفی زمانی آن است. بدین ترتیب، محصول MOD13Q1، با توان تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، از سامانه<sup>۱</sup> GEE استخراج شد. دو شاخص پوشش

1. Google Earth Engine (GEE)

### روش تحلیل

سری زمانی شاخص‌های NDVI و EVI ممکن است به دلایل مختلف از جمله وجود ابر و تغییرات اتمسفری دارای نویزهایی باشند که اثر آنها باید قبل از تجزیه و تحلیل، با روش‌های هموارسازی کاهش یابد. در این پژوهش عملکرد دو روش هموارسازی شامل Savitzky-Golay و Moving Average بررسی شده است.

#### روش Savitzky-Golay (SG)

این روش براساس برازش چندجمله‌ای حداقل مربعات در یک پنجره متحرک روی داده‌های حوزه زمانی است (Han et al., 2020). انتخاب تعداد نقاط همسایگی (اندازه پنجره) و درجه چندجمله‌ای نیز از اهمیت زیادی برخوردار است تا بتواند ضمن افزایش نسبت سیگنال به نویز، اطلاعات قله‌ها را هم حفظ کند. زیرا اندازه پنجره در این فیلتر به‌عنوان پهنای پنجره استفاده می‌شود و تعیین‌کننده میزان تطابق فیلتر با شکل سیگنال است. اگر پنجره بزرگ‌تر باشد، اثر انتزاعی بیشتری بر سیگنال دارد و اگر پنجره کوچک‌تر باشد، جزئیات بیشتری را حفظ می‌کند. بنابراین باید پنجره را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که بهترین توازن بین حفظ جزئیات و کاهش نویز را فراهم کند.

درجه چندجمله‌ای نیز نشان می‌دهد که فیلتر از چند عبارت برای تخمین سیگنال استفاده می‌کند. بسته به پیچیدگی سیگنال، این درجه باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که فیلتر توانایی تخمین مناسبی از سیگنال را داشته باشد. انتخاب درجه بیشتر، سبب حفظ جزئیات بیشتر و نویز کمتر می‌شود. به‌عبارت دیگر، باید درجه را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که بیشترین توازن بین حفظ جزئیات و کاهش نویز ایجاد شود. در این پژوهش به‌منظور حذف نویزهای موجود در شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با در نظر

مقدار NDVI بین +1 و -1 قرار دارد و عدد بزرگ‌تر نشان‌دهنده فعالیت و حضور بیشتر گیاهان در آن نقطه است. به‌دلیل محاسبه ساده و کاهش اثرهای ناشی از تغییر زاویه خورشید و تغییرات توپوگرافی، NDVI کاربرد گسترده‌ای دارد (Testa et al., 2018). با وجود این، NDVI تحت تأثیر شرایط متغیر جوی و پس‌زمینه تاج‌پوشش گیاهی است.

شاخص EVI توسط Huete et al. (1997)

طراحی شد. مقدار این شاخص نیز در محدوده -1 تا +1 است. EVI با کاهش اثر پس‌زمینه تاج‌پوشش گیاه و اثر اتمسفر، برای نظارت بر پوشش گیاهی با زی‌توده زیاد مناسب‌تر است (Son et al., 2014). این شاخص از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$\text{EVI} = G \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{NIR}} + C_1 * \rho_{\text{red}} - C_2 * \rho_{\text{blue}} + L} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه  $\rho_{\text{NIR}}$ ،  $\rho_{\text{red}}$  و  $\rho_{\text{blue}}$  به ترتیب انعکاس در باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی است؛  $G=2.5$  عامل بهبود یافته و  $L=1$  عامل تعدیل‌کننده پس‌زمینه تاج‌پوشش گیاهی است. همچنین  $C_1=6$  و  $C_2=7.5$  ضرایب مقاومت آئروسول هستند که از باند آبی برای تصحیح تأثیرات آئروسول استفاده می‌کنند (Tian et al., 2021).

همچنین برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی نتایج، از مشاهدات مستقیم فنولوژی در منطقه استفاده شده است. مشاهدات زمینی شامل پارامترهای مختلف فنولوژیک بود، اما تنها از دو پارامتر شروع و پایان فصل رویش استفاده شده است. داده‌ها به‌صورت سالیانه و در فاصله سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ توسط گروهی از کارشناسان سازمان جنگل‌ها و مراتع استان کردستان ثبت شده است. از نظر مکانی، تنها ۴۴ نقطه وجود دارد که پیوستگی مورد نیاز این تحقیق در آنها تأمین شده که همگی درون مناطق پرتراکم جنگلی هستند، هرچند اختلاف در مناطق نمونه‌برداری وجود دارد. شایان ذکر است که مشاهدات فقط روی درختان بلوط که گونه غالب در منطقه است انجام گرفته است و بقیه گونه‌های درختی و مرتعی را شامل نمی‌شود.

زمانی  $NDVI_{ratio}$  و  $EVI_{ratio}$ ، که توسط روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند، استفاده شد.

$$NDVI_{ratio} = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن  $NDVI$  مقادیر اولیه شاخص به صورت روزانه،  $NDVI_{max}$  حداکثر مقدار  $NDVI$  سالانه و  $NDVI_{min}$  حداقل مقدار  $NDVI$  سالانه را نشان می‌دهند.

$$EVI_{ratio} = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه  $EVI$  مقدار شاخص به صورت روزانه،  $EVI_{max}$  حداکثر مقدار  $EVI$  سالانه و  $EVI_{min}$  حداقل مقدار  $EVI$  سالانه را نشان می‌دهند.

در این روش پارامترهای فنولوژیکی را می‌توان از یک آستانه مطلق یا یک آستانه نسبی (حداقل و حداکثر) استخراج کرد. به طور معمول حد آستانه ۵۰ درصد برای هر سال در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، زمان شروع فصل روزی از سال (DOY) است که مقدار شاخص گیاهی، در حالت صعودی، با ۵۰ درصد دامنه تغییرات سالانه برابر شود. پایان فصل رشد نیز روزی از سال است که مقدار شاخص گیاهی، در حالت نزولی، با ۵۰ درصد از دامنه تغییرات سالانه برابر شود (Liu et al., 2018).

برای محاسبه روند تغییرات سری زمانی پارامترهای فنولوژیک از دو روش رگرسیون ساده و ناپارامتری تیل-سن<sup>۱</sup> استفاده شد و سپس معنی‌داری روند با استفاده از آزمون من-کنندال<sup>۲</sup> در سطح اطمینان ۹۵ درصد بررسی شد.

مقادیر SOS و EOS محاسبه شده با داده‌های زمینی اعتبارسنجی شدند. بدین منظور از سه معیار p-value، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. بدیهی است که این اعتبارسنجی زمانی معنی‌دار خواهد بود که مقادیر p-value از 0.05 کوچک‌تر باشند. در این حالت، نزدیکی

گرفتن اندازه پنجره ۵، ۷، ۹، ۱۱ و درجه چندجمله‌ای ۲، ۴ و ۶ برای هموارسازی آزمون شد. معادله این فیلتر به صورت رابطه ۳ است (Zhao et al., 2015):

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن،  $i$  نشان‌دهنده درجه چندجمله‌ای،  $Y_{j+i}$  مقادیر شاخص‌ها و مقادیر فیلترشده شاخص پوشش گیاهی،  $C_i$  مقدار ضرایب چندجمله‌ای و  $N$  تعداد نقاط جهت هموارسازی است که برابر  $(2m+1)$  است.  $m$  تعداد همسایه‌ها در سمت چپ و راست نقطه مورد نظر است که توسط اندازه پنجره تعیین می‌شود.

### روش میانگین متحرک (MA)

روش میانگین متحرک صرفاً براساس محاسبات خطی و تنها دارای یک پارامتر یعنی اندازه پنجره است (Vaiphasa et al., 2006). فیلتر میانگین متحرک با میانگین‌گیری تعدادی از نقاط سیگنال ورودی، برای تولید هر نقطه در سیگنال خروجی عمل می‌کند. این روش تکرار می‌شود، به گونه‌ای که یک پنجره متحرک از نقاط  $M$  برای محاسبه میانگین مجموعه داده‌ها استفاده می‌شود. برای اجرای این روش به تعریف اندازه پنجره نیاز است که در این پژوهش از ابعاد دو، سه، چهار، پنج، شش، هفت استفاده شد. پنجره‌های بزرگ‌تر نتایج هموارتری تولید می‌کنند، اما ممکن است از جزئیات در سیگنال چشم‌پوشی کنند. پنجره‌های کوچک‌تر، تغییرات سریع در سیگنال را نشان می‌دهند، اما ممکن است نویزهای زیادی نیز همراه داشته باشند. عملکرد این فیلتر به صورت رابطه ۴ است:

$$H(q) = \frac{1}{2u+1} \sum_{i=q-u}^{q+u} C(i) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن،  $2u+1$  اندازه پنجره است.

### استخراج پارامترهای فنولوژیکی و ارزیابی روند آنها

به منظور استخراج پارامترهای فنولوژیکی از جمله شروع و پایان فصل رشد، از آستانه‌گذاری روی سری

1. Theil-sen  
2. Mann-Kendall

ارزیابی شروع فصل رویش با داده‌های زمینی نتایج مقایسه آماری مقادیر محاسبه‌شده SOS، مستخرج از هر یک از سری‌های زمانی، با مشاهدات زمینی در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

نتایج حاکی از آن است که SOS به‌دست‌آمده از  $EVI_{ratio}$  هموارسازی‌شده توسط تابع MA و اندازه پنجره ۶، دارای بیشترین همبستگی و کمترین خطا نسبت به مشاهدات زمینی است. در سوی دیگر، بین SOS به‌دست‌آمده از تابع SG با اندازه پنجره ۱۱ و درجه ۲ با داده‌های فنولوژی زمینی، بیشترین همبستگی و کمترین خطا وجود دارد. بنابراین از داده‌های مربوط به  $EVI$ ، نتایج این دو سری زمانی ( $EVI-MA-6$  و  $EVI-SG-11-2$ ) که بیشترین تطابق را با مشاهدات زمینی داشته‌اند بررسی می‌شود. براساس شکل (a) ۲، زمان شروع فصل رویش در سال‌های مدنظر با استفاده از هموارساز SG از ۲۵ اسفند تا ۲۱ فروردین برآورد شده است، درحالی که هموارساز MA این زمان را بین ۴ تا ۳۰ فروردین تخمین زده است. دامنه زمان فصل رویش از ۳ فروردین تا ۴ اردیبهشت است.

$R^2$  به ۱، نشان‌دهنده تطابق بیشتر نتایج با داده‌های زمینی است. کمتر بودن مقدار  $RMSE$  نیز بیانگر دقت بیشتر مدل است. (Sun et al., 2021).

## نتایج

سری زمانی ده‌ساله شاخص‌های NDVI و EVI توسط توابع MA و SG هموارسازی شدند. در هموارسازی به روش MA، اندازه پنجره از ۲ تا ۷ تغییر کرد. هر سری زمانی با پسوند MA-n مشخص شد که n همان اندازه پنجره است. در هموارسازی با تابع SG، اندازه پنجره ۵، ۷، ۹ و ۱۱ و درجه چندجمله‌ای بین ۲، ۴ و ۶ تغییر کرد. در این حالت هر سری زمانی با پسوند SG-n-m مشخص شد که n اندازه پنجره و m درجه چندجمله‌ای است.

سپس به کمک روابط ۵ و ۶، سری‌های زمانی جدیدی از هر یک تولید شد. بدین ترتیب سری‌های زمانی جدیدی به‌دست آمد که به‌صورت NDVI-MA-n، NDVI-SG-n-m، EVI-MA-n و EVI-SG-n-m نامگذاری شدند. در ادامه با آستانه‌گذاری روی هر یک از این سری‌های زمانی، مقادیر شروع و پایان فصل محاسبه شدند.

جدول ۱- نتایج مقایسه آماری بین شروع فصل رویش حاصل از  $EVI_{ratio}-MA$ ،  $NDVI_{ratio}-MA$  با مشاهدات زمینی (مقادیر p-value در تمام حالت‌ها کمتر از ۰/۰۵ است)

Table 1. Statistical comparison results between the start of season derived from  $EVI_{ratio}-MA$  and  $NDVI_{ratio}-MA$  with ground observations (p-values are less than 0.05 in all cases)

Window size	$EVI_{ratio}-MA$		$NDVI_{ratio}-MA$	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
2	0.59	6.6	0.47	9.8
3	0.66	5.7	0.65	6.6
4	0.78	4.5	0.78	4.8
5	0.86	3.5	0.83	3.9
6	0.92	2.7	0.87	3.4
7	0.89	3.3	0.84	3.9

شاخص NDVI در بهترین حالت از هموارسازی MA، برابر با ۳/۴ روز است که ۰/۷ روز از حالت مشابه آن برای شاخص EVI بیشتر است. این اختلاف در هنگام استفاده از تابع هموارساز SG برابر با ۰/۸ روز است. مقایسه ضرایب همبستگی برای این دو شاخص با هم در بهترین حالت

در وضعیت مشابه، SOS به‌دست‌آمده از  $NDVI_{ratio}$  هموارسازی‌شده توسط تابع MA با اندازه پنجره ۶ و همین‌طور با استفاده از تابع SG با اندازه پنجره ۱۱ و درجه دو، بیشترین همبستگی و کمترین خطا را نسبت به مشاهدات زمینی دارند. مقادیر خطای  $RMSE$  برای

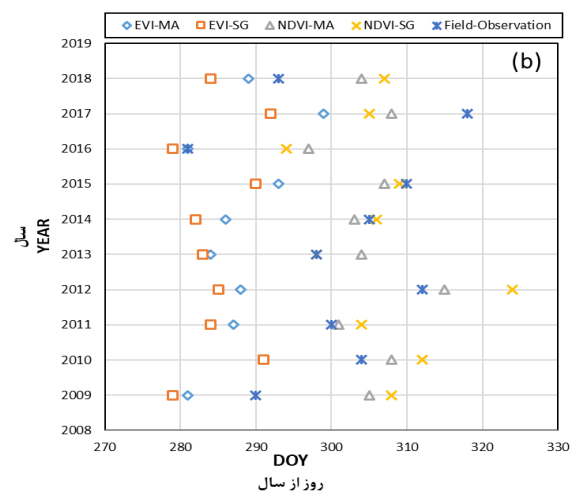
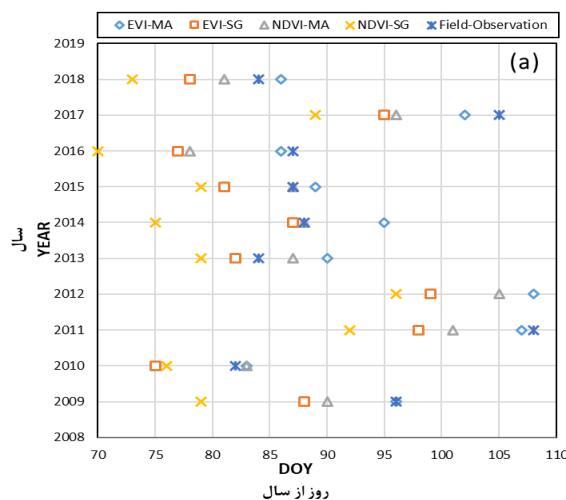
شکل ۲(a) نشان می‌دهد که بر مبنای سری زمانی NDVI، شروع فصل رویش در سال‌های مختلف با استفاده از هموارساز SG از ۲۱ اسفند تا ۱۸ فروردین و با استفاده از هموارساز MA از ۲۹ اسفند تا ۲۷ فروردین متغیر است.

تابع MA، نشان می‌دهد که شاخص EVI با  $R^2=0/92$  همبستگی بیشتری با مشاهدات زمینی دارد. در صورت استفاده از تابع SG، اگرچه ضرایب تعیین کمی کاهش می‌یابند، همچنان همبستگی شاخص EVI با  $R^2=0/91$  با مشاهدات زمینی از شاخص NDVI بیشتر است.

جدول ۲- نتایج مقایسه آماری بین شروع فصل رویش حاصل از  $EVI_{ratio-SG}$ ،  $NDVI_{ratio-SG}$  با مشاهدات زمینی (غیر از موارد ستاره‌دار، مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ است)

Table 2. Statistical comparison results between the start of season derived from  $EVI_{ratio-SG}$  and  $NDVI_{ratio-SG}$  with ground observations (Except for starred cases, p-values are less than 0.05)

Window size	Degree	$EVI_{ratio-SG}$		$NDVI_{ratio-SG}$	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
11	2	0.91	2.8	0.85	3.6
	4	0.69	5.6	0.68	6.1
	6	0.57	6.4	0.53	8.2
9	2	0.82	4	0.8	4.2
	4	0.62	6	0.59	7.3
	6	0.48	7.4	0.41*	11.4
7	2	0.71	5.2	0.68	6.2
	4	0.51	7.1	0.45	10.5
	6	0.5	7.4	0.5*	11.9
5	2	0.53	6.8	0.51	9.2
	4	0.5	7.4		



شکل ۲- مقادیر SOS (a) و EOS (b) حاصل از  $EVI_{ratio-SG}$ ،  $NDVI_{ratio-SG}$ ،  $EVI_{ratio-MA}$ ،  $NDVI_{ratio-MA}$  و داده‌های زمینی  
Figure 2. Values of SOS(a) and EOS(b) derived from  $EVI_{ratio-SG}$ ،  $NDVI_{ratio-SG}$ ،  $EVI_{ratio-MA}$ ،  $NDVI_{ratio-MA}$ ، and ground observations

فصل رویش درختان است، درحالی‌که در جنگل‌های باز اثر پوشش کف جنگل نیز بر فنولوژی محاسبه‌شده از تصاویر ماهواره‌ای شایان توجه است.

به‌منظور بررسی پارامتر EOS، از داده‌های  $EVI_{ratio}$  به‌دست‌آمده از دو تابع SG با اندازه پنجره ۱۱ و درجه ۲ و MA با درجه ۶ که به‌نسبت بیشترین تطابق را با

ارزیابی پایان فصل رویش با داده‌های زمینی

مقادیر محاسبه‌شده EOS که از هر یک از سری‌های زمانی استخراج شده است، به‌صورت آماری با مشاهدات زمینی مقایسه شد که نتایج آن در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است.

داده‌های زمینی مورد استفاده مربوط به پایان

زمان پایان فصل رویش از ۱۷ مهر تا ۲۳ آبان است. نتایج NDVI نیز با اندازه پنجره ۶ منجر به بیشترین تطابق با داده‌های زمینی شده است، هرچند با توجه به دقت بیشتر EVI، در ادامه تنها از EVI استفاده شده است.

مشاهدات زمینی داشته‌اند استفاده می‌شود. براساس شکل (b) ۲، زمان پایان فصل رویش در سال‌های مدنظر با استفاده از هموارساز SG از ۱۵ مهر تا ۲۷ مهر برآورد شده است، درحالی که هموارساز MA این زمان را بین ۱۶ مهر تا ۴ آبان تخمین زده است. دامنه

جدول ۳- نتایج مقایسه آماری بین پایان فصل رویش حاصل از EVI<sub>ratio</sub>-MA, NDVI<sub>ratio</sub>-MA با مشاهدات زمینی (غیر از موارد ستاره‌دار، مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ است)

Table 3. Statistical comparison results between the end of season derived from EVI<sub>ratio</sub>-MA and NDVI<sub>ratio</sub>-MA with ground observations (Except for starred cases, p-values are less than 0.05)

Window size	EVI <sub>ratio</sub> -MA		NDVI <sub>ratio</sub> -MA	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
2	0.16 *	21.0	0.03 *	39.1
3	0.21 *	7.4	0.00 *	13.3
4	0.35 *	6.5	0.06 *	8.6
5	0.64	4.0	0.52 *	4.6
6	0.68	3.3	0.55	3.4
7	0.66	2.8	0.30 *	7.5

جدول ۴- نتایج مقایسه آماری بین پایان فصل رویش حاصل از EVI<sub>ratio</sub>-SG, NDVI<sub>ratio</sub>-SG با مشاهدات زمینی (غیر از موارد ستاره‌دار، مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ است)

Table 4. Statistical comparison results between the end of season derived from EVI<sub>ratio</sub>-SG and NDVI<sub>ratio</sub>-SG with ground observations (Except for starred cases, p-values are less than 0.05)

Window size	Degree	EVI <sub>ratio</sub> -SG	
		R <sup>2</sup>	RMSE
11	2	0.63	3
	4	0.41	6.9
	6	0.13 *	23
9	2	0.55	4.8
	4	0.21 *	17.6
	6	0.07 *	27.1
7	2	0.31 *	6.9
	4	0.08 *	26.7
	6	0.01 *	14.2
5	2	0.15 *	22.3
	4	0.01	14.4

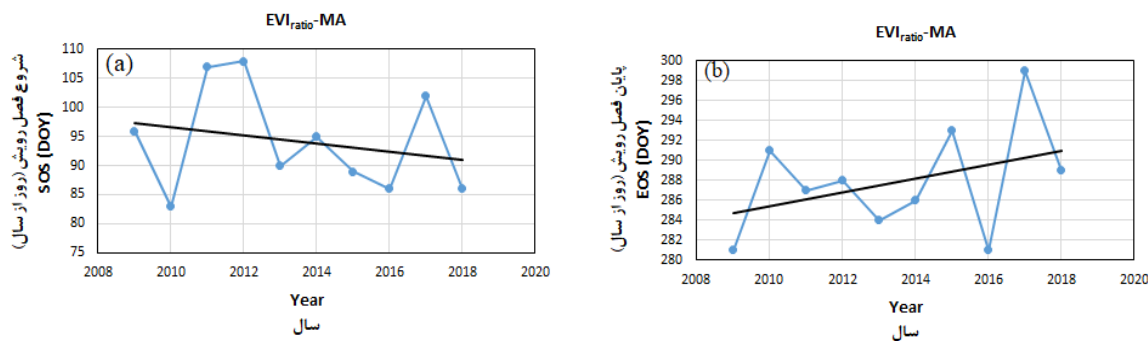
برآورد پارامترهای فنولوژی، مقایسه آماری نشان می‌دهد که زمان شروع و پایان فصل، به دست آمده از شاخص EVI نسبت به نتایج حاصل از شاخص NDVI همبستگی بیشتری با مشاهدات زمینی دارند. همچنین تابع MA، عملکرد بهتری نسبت به تابع SG در برآورد پارامترهای فنولوژی ارائه می‌دهد. بنابراین در ادامه تنها به بیان نتایج استخراج شده از شاخص EVI و روش MA پرداخته می‌شود

نتایج برآوردگر تیل-سن شکل (a) ۳ روند کاهشی شروع فصل رویش حاصل از روش EVI<sub>ratio</sub>-MA را در فاصله سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ در منطقه نشان می‌دهد. با اعمال آزمون من-کندال و با توجه به

۰/۰۱۲۲، p-value = تنها در ۲۵/۰۳ درصد از نمونه‌ها، روند کاهشی معنی‌دار است و بقیه نمونه‌ها روندی بدون تغییر را نشان می‌دهند. شیب کاهش مربوط به شروع فصل، نشان‌دهنده تعجیل در SOS است. به عبارت دیگر، روزهای شروع رویش پوشش گیاهی در طی دوره بلندمدت ده‌ساله به سمت روزهای سرد پیشروی دارد. تعداد روزهای جابه‌جاشده برای پارامتر SOS در این سال‌ها، دارای نوساناتی بین ۱۲+ تا ۱۳- روز نسبت به همان روز در سال ۲۰۰۹ است. با یک برازش خطی ساده، مشخص می‌شود که شیب کاهش SOS به‌طور متوسط ۰/۵ روز در سال در طی این دوره ده‌ساله بوده است.

#### برآورد پارامترهای فنولوژی

نتایج برآوردگر تیل-سن شکل (a) ۳ روند کاهشی شروع فصل رویش حاصل از روش EVI<sub>ratio</sub>-MA را در فاصله سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ در منطقه نشان می‌دهد. با اعمال آزمون من-کندال و با توجه به



شکل ۳- تغییرات سالانه EOS(b) و SOS(a) داده‌های EVIratio-MA در طول سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۱۸  
Figure 3. Annual changes in SOS(a) and EOS(b) of EVIratio-MA data during the years 2009-2018

به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج بررسی حاصل از دو شاخص EVI و NDVI پس از هموارسازی، با داده‌های زمینی مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که دقت هر دو پارامتر SOS و EOS به‌دست‌آمده از شاخص EVI، هموارسازی‌شده توسط دو تابع MA و SG، عملکرد مناسب‌تری از شاخص NDVI داشته است. دقت بهتر شاخص EVI در برآورد SOS، با تحقیقات Stanimirova et al. و Testa et al. (2018) (2019) نیز مطابقت دارد. علاوه‌بر این، تحلیل همبستگی نشان داد که تابع MA نسبت به تابع SG نتیجه بهتری را در برآورد هر دو پارامتر SOS و EOS ارائه می‌دهد. عملکرد بهتر این تابع در پژوهش Bórnez et al. (2019) نیز تأیید شده است.

در زمینه پارامترهای توابع هموارساز نیز این نکته مشخص شد که انتخاب اندازه پنجره ۶ برای تابع MA منجر به بهترین نتایج می‌شود. درحالی‌که تابع SG با اندازه پنجره ۱۱ و درجه ۲ دقت بیشتری دارد و افزایش درجه در آن موجب کاهش دقت می‌شود.

با اتکا به نتایج EVIratio-MA، مشخص شد که شروع فصل رویش با متوسط ۰/۵ روز در سال، روند کاهشی داشته است. پایان فصل رویش نیز روند افزایشی داشته که به‌طور متوسط ۱/۳ روز در سال است. بنابراین در دوره مدنظر، علاوه‌بر تعجیل در شروع فصل، تأخیر در پایان فصل نیز رخ داده است که نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن فصل رویش و کاهش فصل سرما و یخبندان در منطقه در این سال‌هاست.

شکل ۳(b) نتایج برآوردگر تیل-سن مربوط به پایان فصل رویش، از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد. با اعمال آزمون من-کندال و با توجه به  $p\text{-value} = ۰/۰۰۴۲$ ، تنها در ۳۲/۸ درصد نمونه‌ها روند افزایش معنی‌داری مشاهده شد و در بقیه نمونه‌ها روند معنی‌داری وجود نداشت. شیب افزایشی مربوط به EOS در این منطقه، نشان‌دهنده تأخیر در زمان پایان فصل رویش در طی دوره ده‌ساله است. نوسانات زیادی بین EOS در این دامنه زمانی است. تعداد روزهای جابه‌جاشده برای پارامتر EOS در این سال‌ها بین ۳ تا ۱۸ روز نسبت به همان روز در سال ۲۰۰۹ نوسان دارند. همچنین شیب افزایش EOS به‌صورت متوسط ۱/۳ روز در سال در طی دوره ده‌ساله است.

#### بحث

ماهواره‌های سنجش از دور منبع مهمی برای استخراج اطلاعات مرتبط با فنولوژی پوشش گیاهی محسوب می‌شوند. در این میان شاخص‌های پوشش گیاهی، عملکرد مطلوبی در این زمینه نشان می‌دهند. این شاخص‌ها به‌طور معمول توسط دو تابع MA و SG هموارسازی می‌شوند. استخراج پارامترهای فنولوژی، مستلزم تعیین حد آستانه برای شاخص‌های پوشش گیاهی است که در این پژوهش از حد آستانه ۰/۵ استفاده شد. تعداد زیادی از محققان برای ارزیابی پارامترهای فنولوژی (Vrieling et al., 2018; Huang et al., 2019; Zhou et al., 2020) برای شاخص‌های پوشش گیاهی این حد آستانه را در نظر گرفتند.

این تحقیق به منظور پرهیز از این چالش، تنها از پیکسل‌هایی که پوشش درختی متراکم داشتند استفاده شد؛ اما پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی از تصاویر با توان تفکیک مکانی بیشتر در کنار تصاویر مودیس استفاده شود.

با وجود این و به صورت کلی، در بیشتر مناطق زمان شروع فصل رویش کاهشی و روند زمان پایان فصل رویش افزایشی بوده است، یعنی شروع فصل زودتر و پایان فصل دیرتر رخ داده است. نتیجه اینکه، تخمین و ارزیابی پارامترهای فنولوژی ده‌ساله اخیر در منطقه زاگرس نشان می‌دهد که مناطق جنگلی، نسبت به سال ۲۰۰۹ با فصول رویش طولانی‌تر مواجه‌اند که اگر با کاهش بارش نیز همراه باشد به ایجاد تنش مضاعف بر گونه‌های گیاهی، به‌ویژه گونه‌های بلوط در زاگرس منجر می‌شود. با توجه به وضعیت نامطلوب پوشش‌های گیاهی در زاگرس، آگاهی از روند تغییرات زمانی رویش گیاهان، کمک شایانی به حفاظت و مدیریت مؤثرتر منابع طبیعی خواهد کرد. تخمین درست زمان شروع فصل، سبب تصمیم‌گیری‌های درست‌تری در زمینه نحوه بهره‌برداری از جنگل‌ها و مراتع همچون تعیین زمان حضور دام در جنگل خواهد شد.

### سپاسگزاری

از حمایت و پشتیبانی آزمایشگاه ژئوماتیک دانشگاه بوعلی سینا و از همچنین ریاست و کارشناسان محترم اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان سروآباد برای ارائه اطلاعات میدانی سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

ممکن است طول دوره ده سال برای نتیجه‌گیری دقیق کافی نباشد، اما نشانه‌هایی را از تغییر اقلیم در منطقه آشکار می‌کند. در همین زمینه (2021) Masihpoor et al. نیز نشان دادند که شروع فصل رویش در جنگل‌های زاگرس جنوبی، در دامنه زمانی ۱۸ ساله، زودتر رخ داده است. این روند تعجیل در شروع فصل رویش (۰/۰۲ روز در سال)، کندتر از مدتی است که در زاگرس شمالی محاسبه شده است که ممکن است به شدت تغییرات آب‌وهوایی در شمال و جنوب زاگرس مرتبط باشد. همچنین نتایج تحقیقات (2017) Kiapasha et al. در جنگل‌های هیرکانی در دامنه زمانی ۲۰۱۲-۱۹۸۲، نشان داد که زمان SOS در هر سال ۰/۱۶ روز زودتر رخ داده است. تصمیم داده‌های زمینی، با توجه به تنک و پراکنده بودن پوشش جنگلی در منطقه، از چالش‌های اصلی محاسبه زمان پایان فصل رویش در پهنه‌های وسیع‌تر است. به طوری که تطبیق آنها با نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی کم (همچون مودیس) دشوار است. دلیل این موضوع، اختلاف فنولوژی درختان با پوشش کف جنگل است. در منطقه زاگرس، به طور معمول پوشش کف جنگل زودتر شروع به رویش می‌کند و بسیار سریع هم زرد می‌شود. اما برگ درختان با تأخیر چندروزه شروع به جوانه زدن می‌کنند و البته چند ماه دیرتر زرد می‌شوند. فنولوژی محاسبه‌شده از تصاویر ماهواره‌ای، وضعیت کلی پارامترها را در یک پیکسل نشان می‌دهد که برای ارتباط مستقیم آن با داده‌های زمینی باید نسبت پوشش درخت به سطح<sup>۱</sup> در دسترس باشد. در

### References

- 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>
- Caparros-Santiago, J.A., Rodriguez-Galiano, V., & Dash, J. (2021). Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 330-347. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019>

1. forest canopy fractional cover

- Chen, X., Wang, W., Chen, J., Zhu, X., Shen, M., Gan, L., & Cao, X. (2020). Does any phenological event defined by remote sensing deserve particular attention? An examination of spring phenology of winter wheat in Northern China. *Ecological Indicators*, 116, 106456. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106456>
- Han, H., Bai, J., Ma, G., & Yan, J. (2020). Vegetation phenological changes in multiple landforms and responses to climate change. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 111. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020111>
- Huang, X., Liu, J., Zhu, W., Atzberger, C., & Liu, Q. (2019). The optimal threshold and vegetation index time series for retrieving crop phenology based on a modified dynamic threshold method. *Remote Sensing*, 11(23), 2725. <https://doi.org/10.3390/rs11232725>
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K.V., & Van Leeuwen, W.J.D.A. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote sensing of environment*, 59(3), 440-451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- Izadi, H., Savari Mombeni, A., & Savari, M. (2022). Explaining the factors affecting the protection behavior of Zagros forests using the Norm Activation Model (NAM). *Iranian Journal of Forest*, 14(3), 307-327. <https://doi.org/10.22034/ijf.2022.313453.1811> (In persian)
- Kiapasha, K.H., Darvishsefat, A.A., Zargham, N., Julien, Y., Sobrino, J.A., & Nadi, M. (2017). Shifts of Start and End of Season in Response to Air Temperature Variation Based on Gimms Dataset in Hyrcanian Forests. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 155-160. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-155-2017>
- Kowalski, K., Senf, C., Hostert, P., & Pflugmacher, D. (2020). Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102172. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102172>
- Liu, J., Zhu, W., Atzberger, C., Zhao, A., Pan, Y., & Huang, X. (2018). A phenology-based method to map cropping patterns under a wheat-maize rotation using remotely sensed time-series data. *Remote Sensing*, 10(8), 1203. <https://doi.org/10.3390/rs10081203>
- Masihpoor, M., Darvishsefat, A.A., Rahmani, R., & Fateh, 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. <https://doi.org/10.22034/ijf.2021.127807>. (In persian)
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>
- McCloy, K.R. (2010). Development and evaluation of phenological change indices derived from time series of image data. *Remote Sensing*, 2(11), 2442-2473. <https://doi.org/10.3390/rs2112442>
- Miri, N., Fatehi, P., Darvishsefat, A.A., Bavaghar, M.P., & Homolová, L. (2024). Leaf area index estimation in the Zagros forests of Iran using Sentinel-2 image and Gaussian Process Regression. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(4). <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.364041.2129> (In persian)
- Salehi, A., & Eriksson, L.O. (2010). A Management Model for Persian Oak A Model for Management of Mixed Coppice Stands of Semiarid Forests of Persian Oak. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)*, 2(1), 20-29.
- Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Minh, V.Q., & Trung, N.H. (2014). A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agricultural and forest meteorology*, 197, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.007>
- Stanimirova, R., Cai, Z., Melaas, E.K., Gray, J.M., Eklundh, L., Jönsson, P., & Friedl, M.A. (2019). An empirical assessment of the MODIS land cover dynamics and TIMESAT land surface phenology algorithms. *Remote Sensing*, 11(19), 2201. <https://doi.org/10.3390/rs11192201>

- Sun, Q., Jiao, Q., Qian, X., Liu, L., Liu, X., & Dai, H. (2021). Improving the retrieval of crop canopy chlorophyll content using vegetation index combinations. *Remote Sensing*, 13(3), 470. <https://doi.org/10.3390/rs13030470>
- Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L., & Mondino, E.B. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.006>
- Tian, J., Zhu, X., Chen, J., Wang, C., Shen, M., Yang, W., ... & Li, Z. (2021). Improving the accuracy of spring phenology detection by optimally smoothing satellite vegetation index time series based on local cloud frequency. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 29-44. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.003>
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Vaiphasa, C. (2006). Consideration of smoothing techniques for hyperspectral remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 60(2), 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.11.002>
- Verrall, B., & Pickering, C.M. (2020). Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions. *Science of the Total Environment*, 748, 141344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344>
- Vrieling, A., Meroni, M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Wang, T., Zurita-Milla, R., ... & Paganini, M. (2018). Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote sensing of environment*, 215, 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>
- Xu, X., Conrad, C., & Doktor, D. (2017). Optimising phenological metrics extraction for different crop types in Germany using the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *Remote Sensing*, 9(3), 254. <https://doi.org/10.3390/rs9030254>
- Zarei, A.R., Shabani, A., & Mahmoudi, M.R. (2019). Comparison of the climate indices based on the relationship between yield loss of rain-fed winter wheat and changes of climate indices using GEE model. *Science of the Total Environment*, 661, 711-722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.204>
- Zhang, Q., Kong, D., Shi, P., Singh, V.P., & Sun, P. (2018). Vegetation phenology on the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change (1982–2013). *Agricultural and forest meteorology*, 248, 408-417. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.026>
- Zhang, J., Zhao, J., Wang, Y., Zhang, H., Zhang, Z., & Guo, X. (2020). Comparison of land surface phenology in the Northern Hemisphere based on AVHRR GIMMS3g and MODIS datasets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.020>
- Zhao, J., Zhang, H., Zhang, Z., Guo, X., Li, X., & Chen, C. (2015). Spatial and temporal changes in vegetation phenology at middle and high latitudes of the Northern Hemisphere over the past three decades. *Remote Sensing*, 7(8), 10973-10995. <https://doi.org/10.3390/rs70810973>
- Zhou, X., Geng, X., Yin, G., Hänninen, H., Hao, F., Zhang, X., & Fu, Y.H. (2020). Legacy effect of spring phenology on vegetation growth in temperate China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107845. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107845>



## Evaluating the Impact of Smoothing Methods on Phenology Calculation in Zagros Forests using MODIS Satellite Data (Case Study: Marivan)

F. Mahdavi poor<sup>1</sup>, H. Torabzadeh<sup>2\*</sup>, and M. Heidari Mozaffar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Master Graduated Remote Sensing, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Prof., of Remote Sensing, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>3</sup>Assistant Prof., of Remote Sensing, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(Received: 15 January 2024; Accepted: 13 May 2024)

### Abstract

**Introduction:** Climate change refers to long-term alterations in the climatic factors of a region, significantly impacting its ecological processes. The investigation of plant phenological changes is crucial for comprehending the behavioral responses of Earth ecosystems to climate change. Remote sensing methods facilitate the examination of phenological changes over extensive areas. This research aims to explore such changes using time series data obtained from satellite images in a part of the Zagros forests.

**Materials and Methods:** The most common method in remote sensing for calculating plant phenology parameters involves using time series of vegetation indices, which are usually disrupted by cloud cover and affected by noise. These issues can be somewhat mitigated by employing smoothing filters although the characteristics of the filters need to be carefully chosen. To extract phenological parameters, time series data of the normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI) from MODIS data, over a ten-year period (From 2009 to 2018), were used. For the extraction of phenological parameters, including the start of the growing season and end of the growing season, the time series of  $NDVI_{ratio}$  and  $EVI_{ratio}$  were smoothed using two smoothing functions: Savitzky–Golay and Moving Average filters. For the validation of the results, in-situ data were collected in the area through direct observation of tree status (via random sampling).

**Results:** The use of the Moving Average function with a window size of six and the Savitzky–Golay function with a window size of 11 and a degree of two has led to the highest increase in accuracy for both vegetation indices. After employing the optimal smoothing function, the parameter for the start of the season, obtained from  $EVI_{ratio}$ , provided a more accurate estimate ( $R^2 = 0.92$ ) compared to the result from  $NDVI_{ratio}$ . Over the ten year period, the start of the season has been reduced by an average of 0.5 days per year over the ten-year period, and end of the season has been increased by an average of 1.3 days per year.

**Conclusion:** Overall, in most areas, the start and end of the growing season has shown a decreasing and an increasing trend, respectively. In other words, the trend of earlier start and later end of the season has led to an increase in the length of the growing season in most of the study areas.

**Keywords:** Climate change, EVI, MODIS, NDVI, Phenology.