

# ارزیابی توابع مختلف TIMESAT در بازسازی روند فنولوژی پوشش گیاهی

## مطالعه موردی: شهرستان خرم آباد

لیلاکرمی<sup>۱</sup>

سیدمحمد توکلی صبور<sup>۲</sup>

علی اصغر تراهی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

\*\*\*\*\*

### چکیده

مطالعه روند رشد پوشش گیاهی به طور ویژه‌ای برای تحقیقات محیط زیستی مهم است. برآورد پارامترهای فنولوژی پوشش گیاهی به داده‌های زمانی پیوسته NDVI در یک بازه زمانی نیاز دارد. ممکن است در برخی موارد رطوبت خاک، وجود ابر و ذرات معلق بر انرژی بازتابی از پوشش گیاهی اثر بگذارد و منجر به ایجاد تصاویری با داده‌های از دست رفته یا دارای خطا شود. در این مطالعه از چهار مزرعه گندم واقع در بخش‌های مختلف شهرستان خرم‌آباد، برای بررسی رفتار فنولوژی گیاه و استخراج پارامترهای فنولوژی استفاده شد. به این منظور برای از بین بردن این خطاها در سری زمانی NDVI از مدل TIMESAT استفاده شد. سه تابع مختلف برای از بین بردن نویزها و هموارسازی داده‌ها در مدل TIMESAT وجود دارد. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد توابع گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای در استخراج پارامترهای فنولوژیکی خصوصاً در مناطق کوهستانی است. در ابتدا شاخص NDVI با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده MODIS برای سال ۲۰۲۰ در سامانه گوگل ارث انجین محاسبه شد. پس از برطرف کردن خطاهای موجود در سری زمانی NDVI، از مدل TIMESAT به منظور تولید منحنی فنولوژی گیاه گندم در مزارع گرمسیر و سردسیر در نرم‌افزار TIMESAT3.3 استفاده شد. از توابع گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر ساویتزکی-گولای برای بازسازی داده‌های NDVI استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده فیلتر هموارسازی ساویتزکی-گولای به طور میانگین RMSE برابر ۲ دارد. ولی میانگین RMSE توابع گاوسین نامتقارن و لجستیک دوگانه به ترتیب ۴ و ۱۱ است. در نتیجه فیلتر ساویتزکی-گولای در بازسازی داده‌ها و برآورد پارامترهای شروع و پایان فصل رشد دارای صحت بالاتری است.

واژه‌های کلیدی: فنولوژی، سری زمانی، پوشش گیاهی، NDVI، مدل TIMESAT

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران. leyalakarami 1995@gmail.com

۲- استادیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران (نویسنده مسئول) tavakkoli@khu.ac.ir

۳- استادیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران atorahi@khu.ac.ir

## ۱- مقدمه

پایش تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان، کاربردهای فراوانی دارد (Blaes et al, 2016). تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی NDVI به شکل قابل توجهی برای تحقیقات محیط زیستی که در ارتباط با پویایی محیط زیست، تغییر آب و هوا، پویایی پوشش گیاهی، تغییر پوشش زمین و توزیع گونه‌های جانوری هستند با اهمیت است (Geng et al, 2014) (Cao, Chen, et al, 2018). سری‌های زمانی NDVI برای آشکارسازی پارامترهای فنولوژی سطح زمین استفاده می‌شود. فنولوژی شاخه‌ای از علم است که روابط بین وقایع دوره‌ای بیولوژیکی مربوط به چرخه زندگی گیاهان و حیوانات و تغییرات محیط را مطالعه می‌کند (Denny et al, 2010). فنولوژی گیاهی و اثرات محیط زیستی آن در تغییرات اقلیم در سطح جهان اهمیت بالایی دارد و به همین علت مورد توجه است. پوشش گیاهی در طول زمان دارای یک چرخه فنولوژیکی است. پارامترهای فنولوژیکی شامل زمان شروع رشد، اوج پوشش گیاهی، طول بازه رشد و زمان پایان رشد هستند. پارامترهای فنولوژیکی اطلاعات مفید و مهمی در مورد وضعیت پوشش گیاهی می‌دهند (Cao, Shen, et al, 2018). خشکسالی (Rousta et al, 2020)، آفات (Wu et al, 2020)، بیماری‌های گیاهی، تقویم و نوع کشت (Yang et al, 2021) بر پارامترهای فنولوژیکی پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارند. از این رو، برای برنامه‌ریزی مدیریتی منابع طبیعی، کشاورزی، آب و غیره لازم است روند فنولوژیکی پوشش گیاهی به نحو مطلوب استخراج شود (Hosseini and Ghafarian Malamiri, 2017).

بنابراین استخراج پارامترهای فنولوژی از سری زمانی داده‌های سنجنش از دور یک تکنیک مهم و مؤثر بر پویایی پوشش گیاهی است. برای استخراج پارامترهای فنولوژی به داده‌های زمانی پیوسته، بدون خطا و جاافتادگی<sup>۱</sup> نیاز است. علاوه بر این، پیوستگی زمانی و مکانی داده‌های سنجنش از دور به‌عنوان مثال سری زمانی NDVI به‌دلیل عواملی همچون وجود ابر، ذرات معلق و رطوبت پس‌زمینه به‌طور

پوشش گیاهی طبیعی یکی از عناصر اصلی اکوسیستم زمین می‌باشد. شناخت ویژگی‌های پوشش گیاهی و نیز عوامل محیطی همواره مورد توجه بوده است (Magee Ringold and Bollman 2008; Hoersch et al, 2002). اهمیت پوشش گیاهی به‌عنوان تنها تولیدکنندگان اکوسیستم‌های زمین از نظر زیستگاهی، تولید انرژی و وابستگی زندگی انسان‌ها به گیاهان است. کسب اطلاعات درباره پوشش گیاهی همچون میزان تاج پوشش و پراکنش آن‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار است. در سال‌های اخیر، سنجنش از دور به دلیل مزایایی همچون پوشش وسیع، امکان برداشت داده با فاصله زمانی منظم، هزینه کمتر نسبت به برداشت زمینی، بهبود توان تفکیک مکانی برای شناسایی پدیده‌ها در مناطق مختلف و قابل دسترس بودن، همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع جمع‌آوری اطلاعات مکانی قابل توجه بوده است (Lu et al, 2004). داده‌های ماهواره‌های سنجنش از دور مشاهدات بزرگ و مستمری را ارائه می‌دهد که تغییرات ایجاد شده بر روی زمین را مشخص می‌کند (Coppin et al, 2004). به‌طور کلی سیستم‌های سنجنش از دور قابلیت‌های بسیار مناسبی برای بررسی روند تحولات پوشش گیاهی را دارا می‌باشد. سیستم‌های سنجنش از دوری این امکان را می‌دهد که در مناطقی که به دلایلی همچون کوهستانی بودن، دره‌های عمیق و نظایر آن امکان بررسی میدانی وجود ندارد، راه را برای مطالعه در این مناطق و در سطح گسترده تسهیل کند. شاخص‌های گیاهی از پرکاربردترین محاسبات بانندی در حوزه سنجنش از دور هستند که با هدف بررسی و محاسبه درصد پوشش گیاهی، انواع پوشش گیاهی و درجه سبزیگی یک ناحیه در سال‌های مختلف به‌کار می‌روند. تاکنون شاخص‌های مختلفی بر اساس سبزیگی و پارامترهای بیوفیزیکی ارائه شده است. شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)<sup>۱</sup> یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های طیفی است که در زمینه مطالعه

جین چنا و همکاران در سال ۲۰۰۴ بازسازی داده‌های سری زمانی را براساس فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای در مدل TIMESAT انجام داده‌اند. در این مطالعه نشان دادند که اجرای این روش نسبت به روش فوریه و الگوریتم استخراج بهترین شیب (BISE)<sup>۴</sup> زمان کمتری نیاز دارد و در به‌دست آوردن سری‌های زمانی NDVI با کیفیت بالا مؤثرتر است (Chen et al, 2004).

بک و همکاران در سال ۲۰۰۶ در پژوهشی با استفاده از داده‌های NDVI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ نشان دادند تابع لجستیک دوگانه داده‌ها را بهتر از روش فوریه بازسازی می‌کند و علاوه بر این داده‌های پرت را بهتر شناسایی می‌کند (Beck et al, 2006).

تستا و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ قابلیت مدل TIMESAT را در سری زمانی اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده مورد بررسی قرار داده‌اند که از تابع لجستیک دوگانه در مدل TIMESAT برای اصلاح سری زمانی استفاده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده در سری زمانی اصلاح‌شده با مدل TIMESAT، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقادیر NDVI ایجاد شده است و تابع لجستیک دوگانه عملکرد خوبی در زمینه کاهش نویز و بازسازی داده‌ها داشته است (Testa, Mondino, and Pedroli, 2014).

لارا و همکاران در سال ۲۰۱۶ عملکرد توابع مختلف مدل TIMESAT و تأثیر آن‌ها را بر ویژگی‌های فنولوژیکی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند فیلتر ساویتزکی-گولای نسبت به روش تابع گاوسین نامتقارن و لجستیک دوگانه عملکرد بهتری در بازسازی سری زمانی دارد و هر سه روش برای تخمین پارامترهای فنولوژیکی مناسب هستند (Lara and Gandini, 2016).

کای و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های مادیس پژوهشی را با هدف بررسی عملکرد پنج روش هموارسازی برای بازسازی سری زمانی NDVI و تخمین فنولوژی گیاه انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که روش

چشمگیری دستخوش تغییراتی می‌شوند که این تغییرات سبب کاهش کیفیت داده‌ها می‌شود (Julien and Sobrino, 2010). برای دستیابی به سری زمانی پیوسته، می‌بایست داده‌های دارای خطا شناسایی و اصلاح شوند. از داده به‌صورت خام (NDVI اصلاح‌شده) نمی‌توان پارامترهای مختلف فنولوژی را استخراج کرد چون ممکن است دارای خطا باشد و این خطاها از روند فنولوژیکی تبعیت نمی‌کنند و نتایج دقیقی نمی‌توان استخراج کرد، در نتیجه به تابعی برای هموارسازی نیاز است. یکی از مدل‌های تحلیل سری زمانی که بر مبنای به‌کارگیری شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش از دوری نظیر NDVI استفاده می‌شود، مدل TIMESAT است. مدل TIMESAT برای بازسازی داده‌های از دست رفته و تجزیه و تحلیل در سری‌های زمانی توسط لارس اکلوند و پر جونسون در دانشگاه لوند سوئد توسعه داده شده است. این الگوریتم شامل چند تابع مختلف می‌باشد، تابع گاوسین نامتقارن<sup>۱</sup> (Jonsson and Eklundh, 2002)، تابع لجستیک دوگانه<sup>۲</sup> (Beck et al, 2006) (X. Zhang et al, 2003) و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای<sup>۳</sup> (Savitzky and Golay, 1964) (Chen et al, 2004) که این توابع برای هموارسازی و شناسایی داده‌های پرت استفاده می‌شوند (Eklundh and Jönsson, 2012). هر کدام از این روش‌ها کارایی و قابلیت‌های متفاوتی دارند که می‌تواند منجر به حصول نتایج مختلف شود. بنابراین لازم است توابع مختلف مدل TIMESAT مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد تا دقت آن‌ها در تولید سری زمانی پیوسته مشخص شود.

برخی مطالعات به ارزیابی توابع هموارسازی گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای در مدل TIMESAT برای حذف مشاهدات دارای خطا و داده‌های پرت در سری زمانی و همچنین بازسازی داده‌های سری زمانی و استخراج پارامترهای فنولوژیکی پرداخته‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

1-Asymmetric Gaussian

2- Double Logistic

3-Savitzky-Golay

4-Best Index Slope Extraction

به‌عنوان یک چالش باقی مانده است. بنابراین در پژوهش حاضر، ارزیابی توابع هموارسازی گاووسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای در مدل TIMESAT برای حذف مشاهدات دارای خطا و داده‌های پرت در سری زمانی و همچنین در برآورد پارامترهای فنولوژیکی در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان لرستان با مساحت ۲۹۴۲۸ کیلومترمربع در ناحیه جنوب‌غربی ایران بین مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته است (نگاره ۱).

میانگین ارتفاع آن بیش از ۲۲۰۰ متر از سطح دریا است. خرم‌آباد مرکز شهرستان خرم‌آباد و استان لرستان است. این شهرستان از شمال به شهرستان سلسله، از شمال‌شرق به شهرستان بروجرد، از شرق به شهرستان‌های دورود و الیگودرز، از جنوب به شهرستان اندیمشک و از غرب و جنوب‌غربی به شهرستان‌های کوه‌دشت و پلدختر محدود می‌شود. طبق آمار سال ۱۳۸۵، خرم‌آباد بیستمین شهر بزرگ کشور است. شهر خرم‌آباد دارای آب و هوایی مدیترانه‌ای با میزان بارندگی بسیار به ویژه در فصل‌های بهار و زمستان است و از این روی ششمین مرکز استان پربارش در ایران محسوب می‌شود. رشته‌کوه زاگرس در استان لرستان توپوگرافی متنوعی که شامل گونه‌های گیاهی و فاکتورهای آب و هوایی است را ایجاد کرده است (Mehrnia, 2017).

### ۲-۲- داده‌ها

در این پژوهش از داده‌های سنجنده MODIS که بر روی ماهواره Terra نصب گردیده، استفاده شده است. با استفاده از سری زمانی سال زراعی ۲۰۲۰ (سال زراعی در یک سال میلادی قرار گرفته است که طول رشد، شروع و پایان فصل

تابع گاووسین نامتقارن و لجستیک دوگانه نسبت به روش‌های ساویتزکی-گولای، روش هموارسازی باریک<sup>۱</sup> و هموارسازی پراکندگی محلی<sup>۲</sup> عملکرد دقیق‌تری را در بازسازی داده‌ها نشان می‌دهد (Cai et al, 2017).

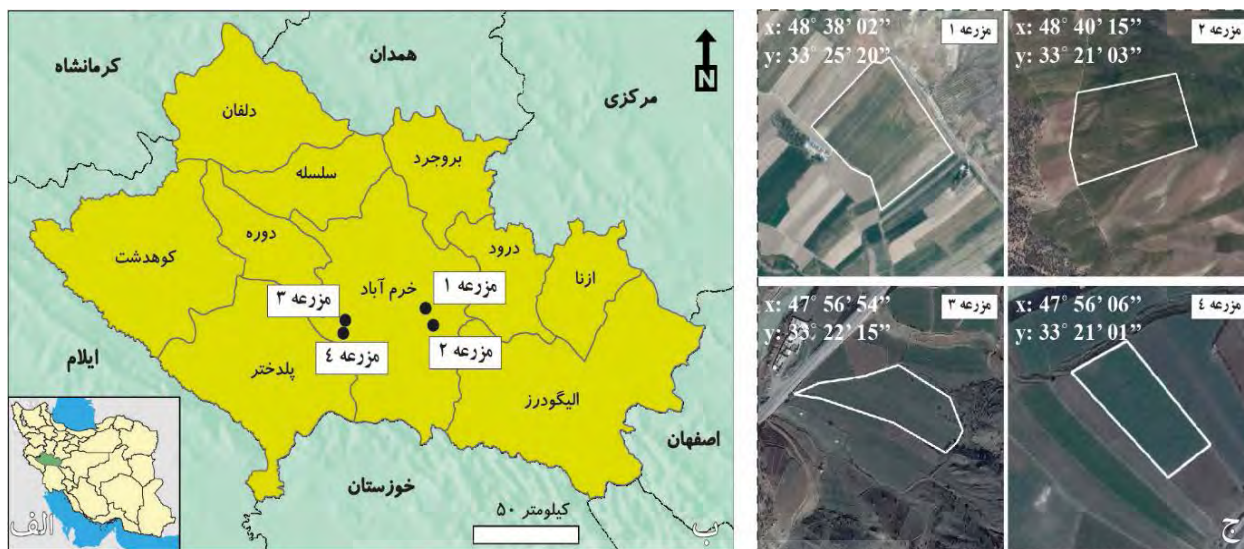
مؤ و همکاران در سال ۲۰۱۹ از تابع گاووسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای برای ساخت منحنی سری زمانی و استخراج پارامترهای فنولوژی شروع و پایان فصل در منطقه شمال و جنوب آسیای شرقی استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که مدل گاووسین نامتقارن نسبت به دو روش دیگر در این منطقه عملکرد بهتری داشته است (Mo et al, 2019).

در سال ۲۰۲۰ هوانگ و همکاران (Huang et al, 2020) و ژو و همکاران (Zhou et al, 2020) برای استخراج پارامترهای فنولوژیکی و بازسازی سری زمانی NDVI با مقایسه روش‌های مختلف هموارسازی مانند روش فوریه و هارمونیک و از مدل TIMESAT، فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای استفاده کرده‌اند و طبق نتایج فیلتر ساویتزکی-گولای برای بازسازی سری زمانی سازگارتر است. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی تأثیر مدل‌ها، در بازسازی و پیش‌بینی سری زمانی را در منطقه‌ای از آمریکا مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه عملکرد انواع مدل‌های سری زمانی مورد ارزیابی قرار گرفته است که شامل مدل‌های هارمونیک، مدل اتورگرسیون، مدل حالت فضای گوسی، مدل spline مکعبی، تابع لجستیک دوگانه و تابع گاووسین نامتقارن می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده نتایج حاکی از آن است که تابع لجستیک دوگانه و تابع گاووسین نامتقارن نسبت به روش‌های دیگر در بازسازی داده‌ها با دقت بیشتری عمل می‌کند و مدل‌های هارمونیک در پیش‌بینی داده‌ها مؤثرتر است (J. Zhang et al, 2021).

با وجود مطالعات صورت گرفته در حوزه فنولوژی پوشش گیاهی هنوز هم مشخص نیست کدام روش بهینه و دقیق‌تر، خصوصاً در مناطق کوهستانی عمل می‌کند و این موضوع

1- Spline smoothing

2- Locally weighted regression scatterplot smoothing



نگاره ۱: منطقه مورد مطالعه. الف: موقعیت استان لرستان در کشور ایران، ب: موقعیت شهرستان‌های استان لرستان، ج: مزارع انتخاب شده برای بررسی فنولوژی گیاه

رشد در سال زراعی ۲۰۲۰ به دست آمده است) و مقادیر بازتاب طیفی باند قرمز و مادون قرمز نزدیک شاخص NDVI محاسبه می‌شود. داده‌های MODIS در باندهای ۱ و ۲ با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر مورد استفاده قرار گرفتند. شاخص NDVI در رابطه (۱) نشان داده شده است (سیدحسین ثنائی نژاد و همکاران، ۱۳۸۷).

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

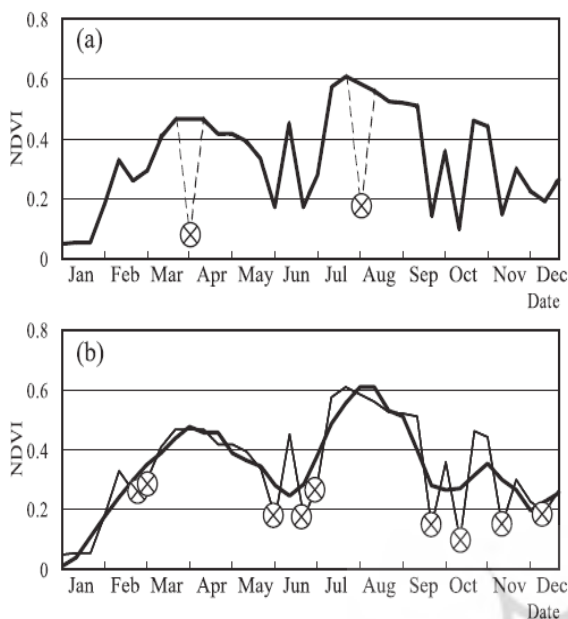
۲-۳- نرم‌افزارهای مورد استفاده در مدل TIMESAT نرم‌افزاری تولید شده است که براساس کتابخانه‌های Matlab ارائه شده است. نرم‌افزار Timesat3.3 برای تولید پارامترهای فنولوژی و اجرای توابع گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، نرم‌افزارهای Arc GIS 10.3 و سامانه تحت وب گوگل ارث انجین برای آماده‌سازی داده‌ها به کار رفته‌اند.

در این رابطه NIR بازتاب طیفی باند ۲ سنجنده MODIS (محدوده طیفی ۸۴۱ تا ۸۷۶ نانومتر) و RED بازتاب طیفی باند ۱ سنجنده (محدوده طیفی ۶۲۰ تا ۶۷۰ نانومتر) هستند. داده‌ها قبل از اینکه وارد مدل شوند پیش پردازش‌ها و تصحیحات لازم بر روی آن‌ها اعمال شده است. این شاخص دارای مقادیر نرمال در دامنه بین +۱ تا -۱ است که بررسی و نمایش مقادیر را به راحتی میسر می‌کند. مناطقی که دارای پوشش گیاهی متراکم باشند این شاخص به سمت +۱ و نواحی که از لحاظ تراکم گیاهی ضعیف باشد و فعالیت فتوسنتزی حداقل باشد به سمت صفر میل می‌نماید. به منظور بررسی و اعتبار سنجی داده‌های حاصل از مدل با داده‌های زمینی از مشاهدات زمینی در منطقه و در هر چهار

#### ۲-۴- مدل TIMESAT

مدل TIMESAT برای تجزیه و تحلیل سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای است. این مدل برای تخمین فصول رشد و همچنین برای محاسبه پارامترهای فنولوژیکی طراحی شده است.

با استفاده از روش‌های هموارسازی مختلف یک سری پارامترهای نوسانی مثل شروع و پایان فصل رشد، را می‌توان استخراج کرد. سه روش موجود در مدل TIMESAT



نگاره ۲: نحوه برازش چندجمله‌ای بر سری زمانی داده‌ها در روش فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای. (a) سری زمانی NDVI اصلی. (b) منحنی روند تغییر سری زمانی با اعمال فیلتر ساویتزکی-گولای (منحنی خطوط تیره)

(Chen et al, 2004)

$$\sum_{j=-n}^n C_j Y_i + j \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$C_j = \frac{1}{2n + 1} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۲)  $n$  تعداد همسایه‌ها می‌باشد که کاربر آن را تعیین می‌کند که به آن پنجره متحرک گفته می‌شود.  $n$  و  $-n$  به ترتیب تعداد نقاطی هستند که در سمت چپ و راست نقطه مورد نظر قرار می‌گیرند. برای انجام این برازش از سه همسایه قبل و سه همسایه بعد از مقداری که قرار است اصلاح شود استفاده شده است.  $j$  نشان‌دهنده چندمین همسایه NDVI است که می‌خواهیم تابع را به آن برازش دهیم.  $C_j$  وزن‌های همسایه‌ها هستند که از رابطه (۳) به دست می‌آید و  $Y_i$  مقادیر اصلاح‌نشده NDVI هستند که این مقادیر توسط یک ترکیب خطی در پنجره متحرک که توسط کاربر از پیش تعیین شده است جایگزین می‌شود. هر مقدار داده  $Y_i$  توسط یک چندجمله‌ای درجه دوم به تمام  $2n + 1$

براساس حداقل مربعات برازش و بالاترین ارزش عددی شاخص گیاهی انجام می‌شود که می‌تواند داده‌های اصلاح‌نشده NDVI را هموار کند (Eklundh and Jönsson, 2012).

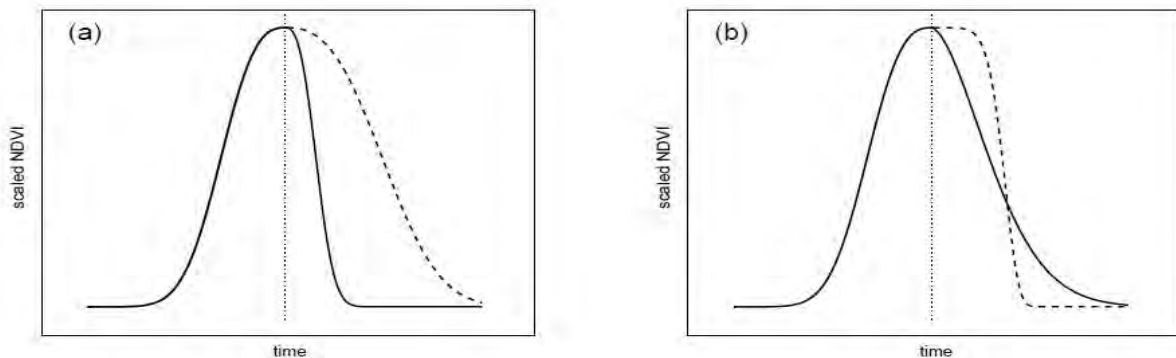
برخی نویزها همچون داده‌های ابری را می‌توان با انجام پیش‌پردازش شناسایی و حذف کرد. اما نویزهای دیگری وجود دارند که تحت‌تأثیر رطوبت، سایه، ذرات گردوغبار، آلودگی هوا و یا خطاهای تصادفی به‌طور مستقل قابل شناسایی و حذف نیستند. زمانی می‌توان این خطاها و نویزها را شناسایی و اصلاح کرد که در سری زمانی و مقایسه با همسایه‌های آن‌ها بررسی شود. به بیان دیگر این خطاها سبب می‌شود که داده‌ها از روند منحنی فنولوژیکی تبعیت نکنند که در این صورت برای برطرف کردن این خطاها از توابع هموارسازی می‌توان استفاده کرد. در پژوهش حاضر برای برطرف کردن نویزها و تشکیل سری زمانی اصلاح‌شده از توابع هموارسازی موجود در مدل TIMESAT استفاده شده است. روش اول برپایه توابع چندجمله‌ای محلی بوده که این روش به‌عنوان فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای می‌تواند طبقه‌بندی شود. دو روش دیگر اطلاعات را با توابع غیرخطی برازش می‌دهند (Eklundh and Jönsson, 2012).

لازم به ذکر است که ورودی این توابع، داده اصلاح‌نشده NDVI است و خروجی حاصل از این توابع داده اصلاح‌شده و هموارشده NDVI است. این سه روش در ادامه تشریح شده‌اند.

## ۲-۴-۱- فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای

این روش برپایه توابع چندجمله‌ای محلی بوده که به‌عنوان فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای می‌تواند طبقه‌بندی شود (نگاره ۲). این فیلتر، می‌تواند بر روی مجموعه‌ای از نقاط (مقادیر NDVI) به منظور هموار کردن داده‌ها به کار گرفته شود. این فیلتر انطباقی از توابع چندجمله‌ای برای برازش استفاده می‌کند. در این روش، هموارسازی با استفاده از روابط (۲) و (۳) انجام می‌شود (Savitzky and Golay, 1964).





نگاره ۳: اثرات تغییرات پارامترهای عرض پهنا و کشیدگی بر عملکرد تابع گاوسین نامتقارن. شکل (a) پارامتر  $x_2$ ، که عرض نیمه تابع سمت راست را تعیین می‌کند، نسبت به مقدار نیمه چپ (خط پیوسته مشکی) کاهش یافته و (نقطه چین) افزایش یافته است. در شکل (b) پارامتر  $x_3$ ، که صافی عملکرد را تعیین می‌کند، کاهش یافته است (خط پیوسته مشکی) و (نقطه چین) در مقایسه با نیمه چپ نمودار افزایش یافته است. (Eklundh and Jönsson, 2012)

نقاط در پنجره برازش داده می‌شود و مقدار اصلاح شده به دست می‌آید (Vetterling et al, 1992). استفاده می‌شود.  $x_2$  و  $x_3$  پهنا و کشیدگی نیمه راست تابع را تعیین می‌کند. به همین ترتیب  $x_4$  و  $x_5$  پهنا و کشیدگی نیمه چپ تابع را تعیین می‌کنند (نگاره ۳).

## ۲-۴-۲- تابع گاوسین نامتقارن

تابع گاوسین نامتقارن نیمه سمت راست و چپ را جداگانه مدل می‌کند و بین حداقل و حداکثر یک تابع به هر دو قسمت، جداگانه برازش داده می‌شود. برازش به فواصل داده‌ای حول حداقل و حداکثر در سری زمانی است. این فیلتر را می‌توان در سری‌های زمانی مختلف اعمال کرد. تابع گاوسین حساسیت کمتری نسبت به نویز دارد و در مواردی که داده‌ها صحت بالایی دارند و کمتر تحت تأثیر خطا هستند، این تابع از طریق رابطه (۴) اعمال می‌شود (Jonsson and Eklundh, 2002).

۲-۴-۳- تابع لجستیک دوگانه  
تابع لجستیک دوگانه مربوط به توابع چندجمله‌ای و هارمونیک نسبت به دو فیلتر دیگر در الگوریتم TIMESAT سازگارتر است (Beck et al, 2006). این روش یک سری زمانی یک ساله را به عنوان تابعی از زمان با استفاده از رابطه (۵) مدل می‌کند (Jonsson and Eklundh, 2002).

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

رابطه (۵)

که در آن  $x_1$  موقعیت نقطه عطف سمت چپ را تعیین می‌کند. به همین ترتیب،  $x_3$  موقعیت نقطه عطف سمت راست را تعیین می‌کند در حالی که  $x_2$  و  $x_4$  میزان تغییر را در نقاط عطف نشان می‌دهند به عبارت دیگر اگر میزان شیب مماس و میزان انحنایی که در نقطه عطف وجود دارد تغییر کند باعث می‌شود نمودار کشیده یا جمع تر شود و یک سمت نمودار کوتاه‌تر از طرف دیگر شود. در نتیجه این پارامترها می‌توانند باعث شوند سمت چپ و راست نمودار

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

رابطه (۴)

$x_1$  موقعیت حداکثر یا حداقل NDVI را تعیین می‌کند. پارامتر  $t$  متغیر مستقل زمانی می‌باشد. برای مقادیر NDVI که بعد از مقادیر ماکزیمم ( $x_1$ ) قرار می‌گیرند از معادله اول در رابطه (۴) استفاده می‌شود و برای مقادیر NDVI که قبل از مقادیر ماکزیمم قرار می‌گیرند از معادله دوم در رابطه (۴)

جابه‌جا شود در نتیجه نقطه عطف و میزان شیب هم تغییر می‌کند (نگاره ۴).

زمان وسط فصل رشد: به‌عنوان مقدار میانگین فصله زمانی بین شروع و پایان فصل رشد می‌باشد.

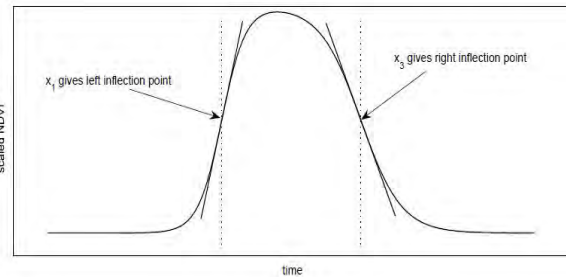
حد و ارزش پایه: میانگین هر دو مینیمم منحنی NDVI سمت چپ و راست منحنی است.

حداکثر ارزش: زمانی که میزان NDVI در بالاترین نقطه در منحنی رشد است به‌دست می‌آید.

دامنه فصل رشد پوشش گیاهی: از طریق اختلاف بین NDVI ماکزیمم و NDVI سطح پایه برآورد می‌شود.

انتگرال فصلی بزرگ: انتگرال (مساحت) نمودار فنولوژی از نقطه شروع تا پایان فصل رشد است.

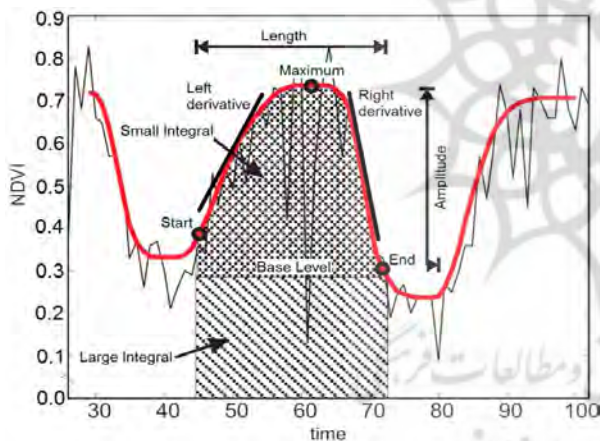
انتگرال فصلی کوچک: انتگرال اختلاف مقدار مساحت زیر نمودار فنولوژی و مساحت زیر سطح پایه است (Jönsson and Eklundh 2004; Eklundh and Jönsson 2012)



نگاره ۴: برازش تابع لجستیک دوگانه.  $x_1$  تعیین موقعیت نقطه عطف سمت چپ و  $x_3$  نقطه عطف سمت راست را نشان می‌دهد. (Eklundh and Jönsson, 2012)

## ۲-۵- استخراج پارامترهای فنولوژی

پس از بازسازی منحنی‌های رشد در سری‌های زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی و هموار شدن منحنی می‌توان پارامترهای مختلف فنولوژی را طبق مراحل زیر استخراج نمود. نمودار فنولوژی یک روند زنگوله‌ای شکل دارد که مطابق (نگاره ۵) شامل یک مینیمم NDVI در سمت چپ، یک مینیمم NDVI در سمت راست نمودار و یک ماکزیمم NDVI می‌باشد. (نگاره ۵) پارامترهای مختلف فنولوژی سری زمانی NDVI را نشان می‌دهد. این پارامترها به شرح زیر محاسبه می‌شوند.



نگاره ۵: پارامترهای مختلف فنولوژی در طول یک دوره رشد (Eklundh and Jönsson, 2012)

زمان شروع فصل: زمانی که مقدار NDVI از ۱۵ درصد مینیمم سمت چپ افزایش یابد زمان شروع فصل آغاز می‌شود. در پژوهش حاضر زمان شروع فصل و پایان فصل رشد، فاصله زمانی از روز اول ژانویه هر سال می‌باشد.

زمان پایان فصل: زمانی که مقدار NDVI از ۱۵ درصد مینیمم سمت راست بیشتر باشد پایان فصل رشد محسوب می‌شود. طول فصل رشد: اختلاف فاصله زمانی بین شروع فصل رشد تا پایان فصل رشد می‌باشد.

## ۲-۶- خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)

پارامتر RMSE نشان‌دهنده میزان خطای مدل است. هر چه مقدار RMSE کمتر باشد نشان‌دهنده خطای کمتر مدل

4- Middle of the season

5- Base level

6- Maximum value

7- Amplitude

8- Large seasonal integral

9- Small seasonal integral

10- Root-Mean-Square Error

1- Start of the season

2- End of the season

3- Length of the season



## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

ارزیابی توابع مختلف TIMESAT در بازسازی روند فنولوژی پوشش گیاهی ... / ۱۴۳

محیط سامانه تحت وب گوگل ارث انجین انجام گرفت. اجرای مدل TIMESAT به‌طور کلی طبق مراحل مختلف انجام گرفت:

- (۱) روند موجود در داده‌های سری زمانی NDVI با استفاده از روش تجزیه روند فصلی محاسبه و بررسی شد؛
- (۲) در سری زمانی NDVI پیکسل‌هایی که مقادیر کم دارند حذف شدند؛

(۳) روندهای فصلی موجود در سری زمانی داده‌های NDVI که براساس هارمونیک سینوسی با هدف تعیین فصول رشد کار می‌کنند محاسبه شد؛

(۴) منحنی‌های هموار شده با استفاده از توابع هموارسازی گاوین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی - گولای برای یک سال استخراج شدند (نگاره ۳)؛

(۵) پارامترهای مختلف فنولوژیکی برای هر چهار مزرعه استخراج شد که در جدول (۱) نشان داده شده است. منحنی که با رنگ آبی نمایش داده شده مربوط به داده‌های اصلاح‌نشده است.

همانطور که در (نگاره ۶) دیده می‌شود تعدادی از نقاط از روند فنولوژیکی تبعیت نمی‌کنند که به‌علت خطاهای موجود یا پوشش ابر و ... است که از روند عادی و طبیعی پیروی نمی‌کنند. منحنی به رنگ نارنجی نمایانگر اعمال فیلتر انطباقی ساویتزکی - گولای بر روی منحنی اصلاح‌نشده است. منحنی مربوط به تابع گاوین نامتقارن به رنگ بنفش دیده می‌شود و منحنی زرد رنگ نشان‌دهنده تابع لجستیک دوگانه است.

نتایج حاصل از سری‌های زمانی NDVI در مزرعه یک در منطقه مورد نظر برای گیاه گندم در نگاره (۶ - الف) ارائه شده است. در پیش‌پردازش‌ها خطاهای مربوط به داده‌های ابری حذف شده‌اند. خطاهای باقیمانده عمدتاً به‌دلایل رطوبت خاک، آبیاری و ... هستند که در مزارع مختلف ممکن است این اتفاق در یک زمان یکسان رخ نداده باشد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است مقادیر حداقل و حداکثر NDVI در طول یک سال در حال نوسان

است. بهترین مقدار RMSE برابر صفر است. RMSE از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه  $Y_i$ ،  $X_i$  و  $n$  به ترتیب داده‌های واقعی، داده‌های پیش‌بینی و تعداد نمونه‌های مدل هستند.

$$\text{رابطه (۶)} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

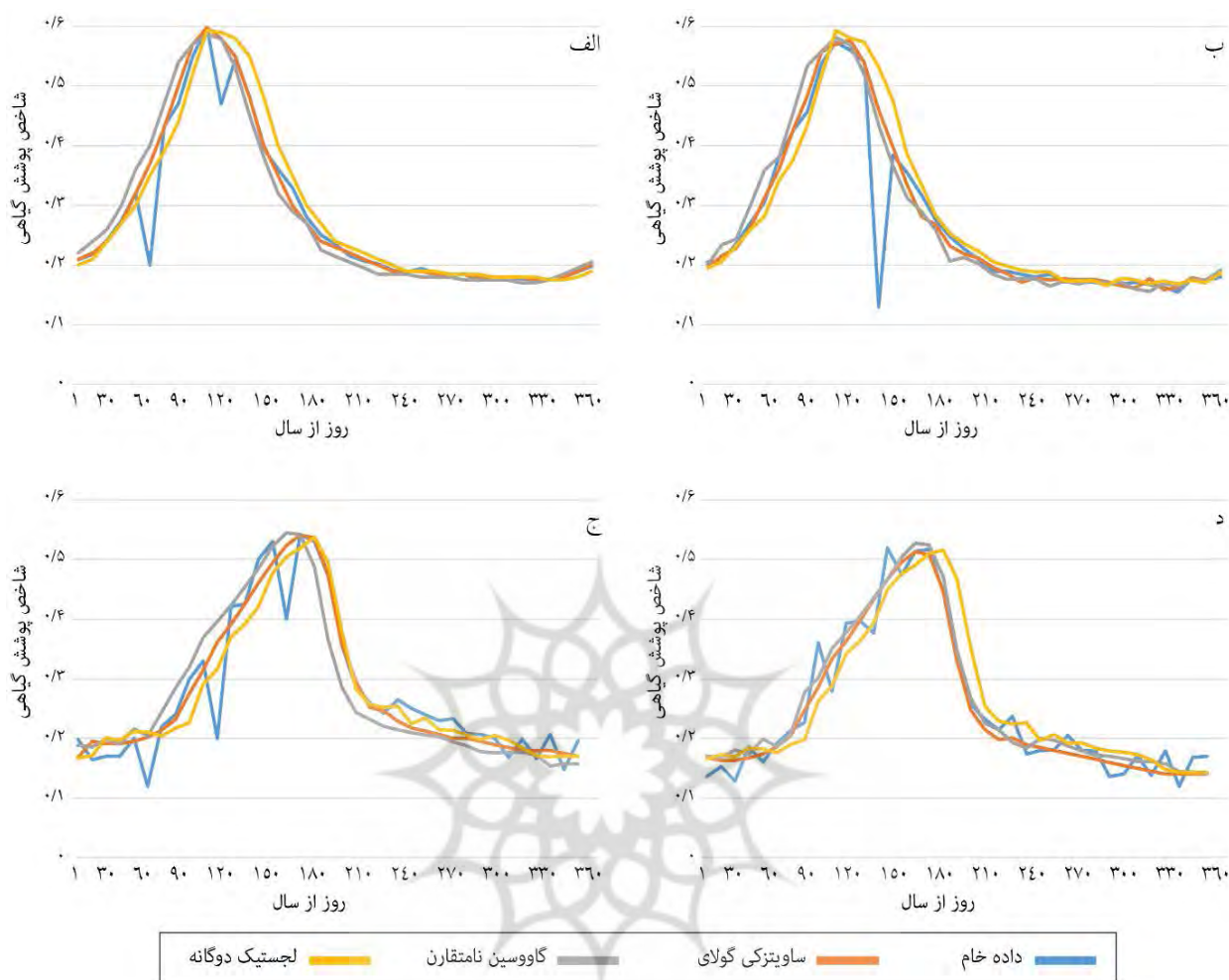
### ۳- بحث و یافته‌های تحقیق

#### ۳-۱- هموارسازی با استفاده از توابع گاوین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی - گولای

در این مطالعه از چهار مزرعه گندم با مشخصات مشخص شده در (نگاره ۱) که از بخش‌های مختلف شهرستان خرم‌آباد می‌باشند، برای بررسی رفتار فنولوژی گیاه و استخراج پارامترهای فنولوژی استفاده شد.

بخش‌های شمالی و شرقی خرم‌آباد جزء مناطق سردسیر استان هستند. بخش‌های جنوبی و غربی از جمله مناطق گرمسیر محسوب می‌شوند. بنابراین، مزرعه ۱ و ۲ با مساحت ۲۱ هکتار از اقلیم سردسیر، مزرعه ۳ با مساحت ۹ هکتار و مزرعه ۴ با مساحت ۱۱ هکتار از اقلیم گرمسیر انتخاب شده‌اند. توان تفکیک مکانی یک پیکسل MODIS در باندهای قرمز و مادون قرمز ۲۵۰ متر است. اراضی کشاورزی در ایران غالباً ابعاد کوچکی دارند و زمین‌های کشاورزی وسیع بسیار محدودند. اما با توجه به این محدودیت‌ها مزارع به گونه‌ای انتخاب شدند که حداقل یک پیکسل MODIS در آن‌ها قرار گیرد. مدل TIMESAT همانطور که در بخش روش‌ها گفته شد، به‌منظور تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی ماهواره‌های ارائه شده است که با به‌کارگیری این مدل نوسانات فصلی داده‌های سری زمانی ماهواره‌ای را در سال ۲۰۲۰ بررسی و ارتباط آن‌ها را با فنولوژی تعیین کردیم. این مدل بر روی شاخص‌های گیاهی NDVI اجرا شد.

برای تولید سری زمانی NDVI از رابطه (۱) و تصاویر ماهواره‌ای MODIS استفاده شده است که این مراحل در



نگاره ۶: منحنی‌های هموار شده با توابع نامتقارن گاوسین، لجستیک دوگانه و ساویتزکی-گولای- الف) مزرعه ۱، ب) مزرعه ۲، ج) مزرعه ۳، د) مزرعه ۴

است. منحنی آبی که منحنی اصلاح نشده می باشد دارای خطاهایی نظیر آبیاری و یا احتمالاً مرطوب بودن خاک است که داده‌های پرت در ۵۰امین و ۱۲۰امین روز از سال دیده می‌شوند که مقدار NDVI کمتر از روزهای دیگر است. پس از حذف خطاهای موجود از سری زمانی NDVI، از طریق برازش منحنی‌های ساویتزکی-گولای (منحنی نارنجی)، گاوسین نامتقارن (منحنی بنفش) و لجستیک دوگانه (منحنی زرد) به منحنی اصلاح نشده (منحنی آبی) سری زمانی هموارسازی شد.

نگاره ۶ - ب) سری زمانی NDVI در مزرعه دو را نشان می‌دهد که حداکثر خطا در ۱۴۰امین روز سال رخ داده است.

نگاره ۶ - ج) سری زمانی را در مزرعه سه نشان می‌دهد که بیشترین خطا در ۷۰امین روز، ۱۲۰امین روز و ۱۵۵امین روز دیده می‌شود.

نگاره ۶ - د) معرف سری زمانی NDVI در مزرعه چهار است که در روزهای بیشتری نسبت به مزارع دیگر دارای خطا می‌باشد.

هر سه تابع هموارسازی، جا افتادگی بین داده‌ها و داده‌های پرت را شناسایی و اصلاح کردند و نموداری که تولید شده است نشان می‌دهد که داده‌های پرت و جا افتاده در فرآیند بازسازی داده‌های سری زمانی حذف و با داده‌های اصلاح شده جایگزین شده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( ... )

ارزیابی توابع مختلف TIMESAT در بازسازی روند فنولوژی پوشش گیاهی ... / ۱۴۵

۲-۳- استخراج پارامترهای فنولوژیکی

گیاهی پارامترهای آغاز فصل رشد، پایان فصل رشد، طول دوره رشد، حد و میزان پایه، زمان اوج دوره رشد، حداکثر مقدار NDVI گیاه گندم، دامنه نوسان، انتگرال فصلی بزرگ و انتگرال فصلی کوچک با استفاده از مدل TIMESAT از سری زمانی یکساله استخراج و در قالب جدول (۱) ارائه شده است.

استخراج پارامترهای فنولوژی از سری‌های زمانی NDVI به یک روند پیوسته و بدون داده‌های از دست رفته نیاز دارد که با استفاده از توابع هموارسازی در مدل TIMESAT این روند به دست آمده است. پس از بازسازی و هموارسازی داده‌ها با استفاده از توابع هموارسازی گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای و تولید منحنی‌های رشد در سری‌های زمانی شاخص‌های پوشش

دوره رشد در مزارع گرمسیر (مزرعه ۱ و ۲) در روش ساویتزکی-گولای به‌طور میانگین در ۸ بهمن ۱۳۹۸ آغاز

جدول ۱: پارامترهای فنولوژیکی محاسبه شده با استفاده از مدل‌های هموارسازی ساویتزکی-گولای، گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه

موقعیت	مدل‌ها	شروع فصل رشد (روز از سال)	پایان فصل رشد (روز از سال)	طول دوره رشد (روز)	ارزش پایه	زمان وسط فصل رشد (روز از سال)	حداکثر مقدار NDVI	دامنه فصل رشد	انتگرال فصلی بزرگ	انتگرال فصلی کوچک
مزرعه ۱	ساویتزکی گولای	۲۹	۱۵۵	۱۲۶	۰/۲۷۲۱	۹۲	۰/۵۹۵۳	۰/۳۲۳۲	۳/۴۳۵	۱/۴۳۰۳
	گاوسین نامتقارن	۳۰	۱۶۰	۱۳۰	۰/۲۵۷۷	۹۵	۰/۵۹۸۱	۰/۳۴۰۴	۳/۳۱۲	۱/۵۶۵۷
	لجستیک دوگانه	۳۶	۱۷۰	۱۳۴	۰/۲۶۱۹	۱۰۳	۰/۵۹۱۲	۰/۳۲۹۳	۳/۵۴۳۴	۱/۵۰۹۹
مزرعه ۲	ساویتزکی گولای	۲۷	۱۵۶	۱۲۹	۰/۲۴۶۵	۹۲	۰/۵۷۰۱	۰/۳۲۳۶	۳/۸۵۶۷	۱/۷۳۴۸
	گاوسین نامتقارن	۳۱	۱۶۴	۱۳۳	۰/۲۳۴۱	۹۸	۰/۵۷۳۳	۰/۳۳۹۲	۳/۷۲۱۹	۱/۷۱۲۳
	لجستیک دوگانه	۳۷	۱۷۲	۱۳۸	۰/۲۳۹۸	۱۰۴	۰/۵۸۲۳	۰/۳۴۲۵	۳/۸۷۶۹	۱/۸۰۱۲
مزرعه ۳	ساویتزکی گولای	۸۰	۱۹۶	۱۱۶	۰/۲۱۶۱	۱۳۸	۰/۵۳۲۶	۰/۳۱۶۵	۳/۳۴۹۸	۱/۳۲۵۹
	گاوسین نامتقارن	۸۹	۱۹۸	۱۰۹	۰/۲۱۹۲	۱۴۳	۰/۵۲۲۷	۰/۳۰۳۵	۳/۰۵۴۳	۱/۲۳۸۷
	لجستیک دوگانه	۱۰۰	۱۹۸	۹۸	۰/۲۰۴۹	۱۴۹	۰/۵۲۴۵	۰/۳۱۹۶	۳/۸۲۰۴	۱/۱۴۵۷
مزرعه ۴	ساویتزکی گولای	۸۷	۱۸۶	۹۹	۰/۲۰۵۲	۱۳۶	۰/۵۱۲۷	۰/۳۰۷۵	۳/۱۵۵۷	۱/۲۳۶۷
	گاوسین نامتقارن	۸۹	۱۸۷	۹۸	۰/۲۱۱۲	۱۳۸	۰/۵۱۴۵	۰/۳۰۳۳	۳/۱۴۳۳	۱/۲۲۸۷
	لجستیک دوگانه	۹۵	۱۹۵	۱۰۰	۰/۲۰۸۷	۱۴۵	۰/۵۰۸۶	۰/۲۹۹۹	۳/۵۶۱	۱/۲۴۵۵

۱۳۹۸ و زمان پایان فصل رشد در ۱۲ خردادماه ۱۳۹۹، زمان جوانه‌زدن گندم در مزرعه دو در ۴ بهمن ماه ۱۳۹۸ و پایان فصل رشد ۱۷ خردادماه ۱۳۹۹، در مزرعه سه زمان جوانه‌زدن گندم در ۴ فروردین ماه ۱۳۹۹ و پایان فصل ۲۵ تیر ماه ۱۳۹۹، زمان شروع فصل رشد گندم در مزرعه چهار در ۹ فروردین ماه ۱۳۹۹ و زمان پایان فصل در ۱۱ تیرماه ۱۳۹۹ اتفاق افتاده است. با توجه به مقادیر زمینی برداشت شده برای پارامترهای شروع و پایان فصل رشد، مقایسه‌ای بین مقادیر زمینی و مقادیر حاصل از توابع گاوسین نامتقارن، لجستیک دوگانه و فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای صورت گرفت.

مطابق با جدول (۲) در نهایت محاسبه RMSE نشان داد که در این مزارع به‌طور متوسط چه مقدار خطا وجود دارد. همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده است اختلاف شروع فصل رشد و پایان فصل رشد با توابع نامتقارن گاوسین و لجستیک دوگانه در هر چهار مزرعه زیاد می‌باشد اما در مزرعه یک اختلاف شروع فصل رشد با روش فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای ۱ روز و پایان فصل رشد ۲ روز، در مزرعه دو اختلاف شروع فصل رشد ۳ روز و اختلاف پایان فصل رشد ۲ روز، در مزرعه سه اختلاف شروع فصل رشد ۳ روز و اختلاف پایان فصل رشد ۱ روز، در مزرعه چهار اختلاف شروع فصل رشد ۱ روز و اختلاف پایان فصل رشد ۳ روز را نشان می‌دهد. بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که RMSE شروع و پایان فصل رشد برای فیلتر هموارسازی ساویتزکی-گولای به‌طور میانگین ۲ می‌باشد. میانگین RMSE شروع و پایان فصل رشد تابع گاوسین نامتقارن به ترتیب ۴ و ۵/۴ به دست آمده است و در نهایت میانگین RMSE شروع و پایان فصل رشد تابع لجستیک دوگانه ۱۱ می‌باشد. با توجه به RMSE محاسبه شده مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای در حذف داده‌های پرت و برآورد پارامترهای فنولوژیکی با دقت بیشتر و خطای کمتری عمل می‌کند. تاکنون ارزیابی توابع مختلف TIMESAT در مطالعات داخل کشور انجام

شده در حالی که آغاز دوره رشد در مزارع سردسیر (مزرعه ۳ و ۴) به‌طور میانگین در ۱۲ اسفند ۱۳۹۸ اتفاق افتاده است. پایان دوره رشد گیاه در مزارع گرمسیر به‌طور متوسط در ۱۴ خرداد ۱۳۹۹ و در مزارع سردسیر به‌طور متوسط در ۱۹ تیر ۱۳۹۹ رخ داده است. طول دوره رشد در مزارع گرمسیر به‌طور متوسط ۱۲۷ روز بوده است و در مزارع سردسیر ۱۰۷ روز بوده است. شروع دوره رشد با استفاده از تابع گاوسین نامتقارن در مزارع گرمسیر جدول (۱) حاکی از آن است که شروع دوره رشد به ۱۱ بهمن و در مزارع سردسیر به ۱۰ فروردین ۱۳۹۹ رسیده است. پایان فصل رشد در مزارع گرمسیر ۲۱ خرداد ۱۳۹۹ و همچنین این پارامتر در مزارع سردسیر در ۲۰ تیر ۱۳۹۹ اتفاق افتاده است. دامنه و طول رشد برای مزارع گرمسیر به‌طور میانگین ۱۳۱ روز و برای مزارع سردسیر ۱۰۳ روز بوده است. شروع فصل رشد با استفاده از تابع لجستیک دوگانه در مزارع گرمسیر به‌طور متوسط در ۱۶ بهمن ۱۳۹۸ بوده است و در مزارع سردسیر در ۱۸ فروردین ۱۳۹۹ رخ داده است. پایان دوره رشد نیز به‌طور متوسط به ترتیب در مزارع گرمسیر و سردسیر در ۳۰ خرداد ۱۳۹۹ و ۲۴ تیر ۱۳۹۹ اتفاق افتاده است. طول دوره رشد نیز به ترتیب در مزارع گرمسیر و سردسیر ۱۳۶ روز و ۹۹ روز بوده است.

### ۳-۳- اعتبارسنجی و ارزیابی مدل‌ها

برای اینکه نشان دهیم کدام مدل بهترین نتیجه را با کمترین خطا ارائه می‌دهد، مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. اعتبارسنجی مقادیر به دست آمده از مدل‌ها با داده‌های زمینی که در بررسی‌های میدانی به دست آمده، مقایسه شده است. تعدادی از پارامترها همچون انتگرال فصلی بزرگ یا کوچک که از مدل TIMESAT به دست می‌آید بر روی سطح زمین قابل اندازه‌گیری نیست، اما پارامترهای شروع فصل رشد و پایان فصل رشد، که مهم‌ترین پارامترهای فنولوژیکی هستند را می‌توان اندازه گرفت. در بررسی‌های میدانی انجام شده زمان جوانه‌زدن گیاه گندم در مزرعه یک، ۸ بهمن‌ماه

جدول ۲: اعتبارسنجی و میزان خطای پارامترهای فنولوژیکی

موقعیت	مدل‌ها	زمان جوانه‌زنی (روز از سال)	زمان برداشت (روز از سال)	شروع فصل رشد (روز از سال)	پایان فصل رشد (روز از سال)	خطای شروع فصل رشد	خطای پایان فصل رشد
مزرعه ۱	سایتزکی گولای	۲۸	۱۵۳	۲۹	۱۵۵	۱	۲
	گاوسین نامتقارن			۳۰	۱۶۰	۲	۷
	لجستیک دوگانه			۳۶	۱۷۰	۸	۱۷
مزرعه ۲	سایتزکی گولای	۲۴	۱۵۸	۲۷	۱۵۶	۳	۲
	گاوسین نامتقارن			۳۱	۱۶۴	۷	۶
	لجستیک دوگانه			۳۷	۱۷۲	۱۳	۱۴
مزرعه ۳	سایتزکی گولای	۸۳	۱۹۷	۸۰	۱۹۶	۳	۱
	گاوسین نامتقارن			۸۹	۱۹۸	۶	۱
	لجستیک دوگانه			۱۰۰	۱۹۸	۱۷	۱
مزرعه ۴	سایتزکی گولای	۸۸	۱۸۳	۸۷	۱۸۶	۱	۳
	گاوسین نامتقارن			۸۹	۱۸۷	۱	۴
	لجستیک دوگانه			۹۵	۱۹۵	۷	۱۲

فنولوژی پوشش گیاهی نظیر آغاز و پایان دوره رشد بین پارامترهای به‌دست آمده در مزارع گرمسیر و سردسیر مقایسه‌ای انجام شده است. در خصوص نقطه اوج پوشش گیاهی در مزارع گرمسیر به‌طور میانگین در ۹ فروردین ۱۳۹۹ اتفاق می‌افتد، در حالی که در مناطق سردسیر در ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۹ این اتفاق رخ می‌دهد.

اوج پوشش گیاهی در مناطق گرمسیر نسبت به مناطق سردسیر، حدود دو ماه زودتر اتفاق می‌افتد. در مزارع گرمسیر عمدتاً به علت اختلاف در ارتفاع، قرارگیری در جبهه هوایی مختلف و جهت شیب، نقطه حداکثر مقدار NDVI به‌طور میانگین به ۰/۵۹ رسیده اما در مزارع سردسیر این مقدار از حدود ۰/۵۱ افزایش نداشته است. بر این اساس می‌توان گفت که در مزارع گرمسیر پوشش گیاهی از تراکم بالاتری نسبت به مناطق سردسیر برخوردار بوده است و این امر به علت محدودیت‌هایی از جمله دما و تابش کم خورشید در مناطق سردسیر است. پارامتر سطح زیر نمودار در مزارع گرمسیر حدود ۳/۶۲ به‌دست آمده است اما برای مزارع سردسیر حدود ۳/۰۹ برآورده شده است. به

نشده است. مطالعاتی که در سطح دنیا انجام شده است نشان می‌دهد که در هر یک از مناطق جهان ممکن است یکی از توابع نتایج بهتری داشته باشد که در مناطق دیگر نیز قابل تعمیم نباشد. نتایج مطالعات (Chen et al, 2004) و (Testa et al, 2014) و (Mo et al, 2019) به ترتیب نشان می‌دهند که فیلتر انطباقی سایتزکی-گولای، لجستیک دوگانه و گاوسین نامتقارن عملکرد بهتری در مناطق مورد مطالعه‌شان داشته‌اند، که این نشان می‌دهد لازم است برای هر منطقه، این ارزیابی به‌صورت جداگانه انجام شود تا تعیین شود کدام تابع بهینه‌تر عمل می‌کند. بررسی و ارزیابی هر سه تابع TIMESAT برای کشور ایران (به‌صورت موردی در استان لرستان) که زمین‌های کشاورزی آن عموماً در دشت‌ها و کوهپایه‌های فلات ایران قرار دارند انجام پذیرفت. طبق نتایج، فیلتر انطباقی سایتزکی-گولای نتیجه بهتری را برای استخراج پارامترهای فنولوژیکی نشان می‌دهد.

۳-۴- تأثیر ارتفاع و دما بر پارامترهای فنولوژیکی  
به‌منظور تجزیه و تحلیل تأثیر اقلیم بر پارامترهای

گرمسیر شهرستان خرم‌آباد در ۳۱/۵ امین روز سال (میلادی) رخ می‌دهد، در حالی که در مناطق سردسیر به‌طور میانگین در ۹۰ امین روز سال اتفاق می‌افتد. حدوداً رشد گیاه گندم در مناطق گرمسیر یک ماه و نیم تا دو ماه نسبت به مناطق سردسیر زودتر رخ می‌دهد. پایان دوره فصل رشد در مناطق گرمسیر در ۱۶۳ امین روز و در مناطق سردسیر به ۱۹۳ امین روز رخ می‌دهد. به‌طور کلی با فرض شرایط یکسان، بازدهی محصولات کشاورزی مناطق سردسیر پایین‌تر از مناطق گرمسیر است. گواه این مطلب کمتر بودن سطح زیر منحنی (انتگرال بزرگ فصلی و انتگرال کوچک فصلی) و همچنین کمتر بودن حداکثر مقدار NDVI در مناطق سردسیر نسبت به مناطق گرمسیر است. در مناطق گرمسیر به علت افزایش سریعتر و بیشتر دما، سرعت روند مراحل فنولوژیکی گیاه افزایش یافته و منجر به شروع سریع‌تر فصل رشد و افزایش طول فصل رشد محصول می‌شود.

#### ۵- پیشنهادات

بر همین اساس با توجه به نتایج به‌دست آمده پیشنهاد می‌شود برای بررسی رفتار فنولوژیکی پوشش‌های گیاهی مختلف در سایر مناطق کوهستانی کشور از فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای استفاده شود. البته با توجه به اینکه در بخش‌های کوهستانی مختلف این مدل اجرا نشده است، پارامترهای مختلف و شرایط محیطی متفاوت هم می‌توانند بر نتایج حاصل از این مدل تأثیر بگذارند. اگر از این مدل در مناطق کوهستانی کشور استفاده شود ترجیح این است از فیلتر ساویتزکی-گولای نسبت به دو تابع دیگر استفاده شود.

#### ۶- منابع و مآخذ

۱- ثنایی‌نژاد، شاه‌طهماسبی، صدرآبادی حقیقی، کلارستانی؛ سیدحسین، امیررضا، رضا، کیومرث (۱۳۸۷)، مطالعه تغییرات طیف بازتابی مزارع گندم در مشهد با استفاده از تصاویر MODIS، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۱۲ شماره ۴۵ الف، ص ۱۱-۱۹

همین علت مناطق سردسیر در مجموع دارای NDVI کمتری نسبت به مناطق گرمسیر می‌باشند. اختلاف دما به‌صورت میانگین بین ۱۰-۱۲ درجه بین مزارع گرمسیر و سردسیر و همچنین اختلاف ارتفاع بین ۵۰۰-۴۵۰ متر باعث نوسان در میزان NDVI شده است.

می‌توان گفت که شرایط آب و هوایی در این استان در طول یک سال دارای نوسان است و همین مسئله صرف نظر از موارد مدیریت کشاورزی همچون نوع بذر، نوع آبیاری و کوددهی، دلیل قطعی این تنوع فنولوژیکی است که منجر به تفاوت در آغاز فصل رشد، اوج پوشش و پایان فصل رشد گیاهان در بخش‌های مختلف سردسیر و گرمسیر استان شود. به‌طور کلی دوره رشد گیاهان در مناطق سردسیر در این استان با حدوداً دو ماه تأخیر نسبت به مناطق گرمسیر اتفاق می‌افتد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با به‌کارگیری داده‌های NDVI به‌دست آمده از MODIS با استفاده از توابع مختلف مدل TIMESAT داده‌های پرت شناسایی و با داده‌های اصلاح شده بازسازی و سپس پارامترهای فنولوژیکی استخراج شدند. مطابق نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر می‌توان گفت که فیلتر انطباقی ساویتزکی-گولای با RMSE برابر ۲ نسبت به دو مدل گاوسین نامتقارن و لجستیک دوگانه به‌عنوان مدل مؤثرتری در برطرف کردن داده‌های پرت و استخراج پارامترهای فنولوژیکی در مناطق کوهستانی عمل می‌کند. همچنین تأثیر اقلیم بر رفتار فنولوژیکی گیاهان را در این منطقه نمی‌توان نادیده گرفت. زیرا شرایط آب و هوایی در این منطقه جدا از مسائل مربوط به نوع کشت، نوع بذر و دیگر موارد کشاورزی در طول یک سال متنوع است و این تنوع اقلیمی در گیاهان مختلف می‌تواند منجر به تغییر فاحشی در پارامترهای فنولوژی شود. نتایج در دو منطقه سردسیر و گرمسیر در منطقه مورد مطالعه نشان داد که به‌طور متوسط شروع دوره رشد گیاه گندم در منطقه



2002. "Relation between Landform and Vegetation in Alpine Regions of Wallis, Switzerland. A Multiscale Remote Sensing and GIS Approach." *Computers, Environment and Urban Systems* 26(2-3): 113-39.
- 13- Hosseini, Seyed Zeinolabedin, and Hamid Reza Ghafarian Malamiri. 2017. "Reconstruction of MODIS NDVI Time Series Using Harmonic AN Alysis of Time Series Algorithm (HANTS)." *The Journal of Spatial Planning* 21(3): 221-55.
- 14- Huang, Zhibin et al. 2020. "Remote Sensing Monitoring of Vegetation Dynamic Changes after Fire in the Greater Hinggan Mountain Area: The Algorithm and Application for Eliminating Phenological Impacts." *Remote Sensing* 12(1): 156.
- 15- Jonsson, Per, and Lars Eklundh. 2002. "Seasonality Extraction by Function Fitting to Time-Series of Satellite Sensor Data." *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(8): 1824-32.
- 16- Jönsson, Per, and Lars Eklundh. 2004. "TIMESAT—a Program for Analyzing Time-Series of Satellite Sensor Data." *Computers & geosciences* 30(8): 833-45.
- 17- Julien, Yves, and José A Sobrino. 2010. "Comparison of Cloud-Reconstruction Methods for Time Series of Composite NDVI Data." *Remote Sensing of Environment* 114(3): 618-25.
- 18- Lara, Bruno, and Marcelo Gandini. 2016. "Assessing the Performance of Smoothing Functions to Estimate Land Surface Phenology on Temperate Grassland." *International Journal of Remote Sensing* 37(8): 1801-13.
- 19- Lu, Dengsheng, Paul Mausel, Eduardo Brondizio, and Emilio Moran. 2004. "Change Detection Techniques." *International journal of remote sensing* 25(12): 2365-2401.
- 20- Magee, Teresa K, Paul L Ringold, and Michael A Bollman. 2008. "Alien Species Importance in Native Vegetation along Wadeable Streams, John Day River Basin, Oregon, USA." *Plant Ecology* 195(2): 287-307.
- 21- Mehrnia, Mohammad. 2017. "Floristic Study of the Ghalaiei-Kashkan Region (Lorestan)." *Iranian Journal of Plant Biology* 9(1): 21-44.
- 22- Mo, Yunhua et al. 2019. "Temporal and Spatial Dynamics of Phenology along the North-South Transect
- 2- Beck, Pieter S A et al. 2006. "Improved Monitoring of Vegetation Dynamics at Very High Latitudes: A New Method Using MODIS NDVI." *Remote sensing of Environment* 100(3): 321-34.
- 3- Blaes, Xavier et al. 2016. "Quantifying Fertilizer Application Response Variability with VHR Satellite NDVI Time Series in a Rainfed Smallholder Cropping System of Mali." *Remote Sensing* 8(6).
- 4- Cai, Zhanzhang, Per Jönsson, Hongxiao Jin, and Lars Eklundh. 2017. "Performance of Smoothing Methods for Reconstructing NDVI Time-Series and Estimating Vegetation Phenology from MODIS Data." *Remote Sensing* 9(12): 1271.
- 5- Cao, Ruyin, Miaogen Shen, Ji Zhou, and Jin Chen. 2018. "Modeling Vegetation Green-up Dates across the Tibetan Plateau by Including Both Seasonal and Daily Temperature and Precipitation." *Agricultural and Forest Meteorology* 249: 176-86.5-
- 6- Cao, Ruyin, Yang Chen, et al. 2018. "A Simple Method to Improve the Quality of NDVI Time-Series Data by Integrating Spatiotemporal Information with the Savitzky-Golay Filter." *Remote Sensing of Environment* 217: 244-57.
- 7- Chen, Jin et al. 2004. "A Simple Method for Reconstructing a High-Quality NDVI Time-Series Data Set Based on the Savitzky-Golay Filter." *Remote sensing of Environment* 91(3-4): 332-44.
- 8- Coppin, Pol et al. 2004. "Review Article Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: A Review." *International journal of remote sensing* 25(9): 1565-96.
- 9- Denny, Ellen et al. 2010. "A New Approach to Generating Research-Quality Phenology Data: The USA National Phenology Monitoring System." *Nature Precedings*: 1.
- 10- Eklundh, L, and P Jönsson. 2012. "TIMESAT 3.1 Software Manual." Lund University, Sweden: 1-82.
- 11- Geng, Liying et al. 2014. "Comparison of Eight Techniques for Reconstructing Multi-Satellite Sensor Time-Series NDVI Data Sets in the Heihe River Basin, China." *Remote Sensing* 6(3): 2024-49.
- 12- Hoersch, Bianca, Gerald Braun, and Uwe Schmidt.

of Northeast Asia.” International Journal of Remote Sensing 40(20): 7922–40.

23- Rousta, Iman et al. 2020. “Impacts of Drought on Vegetation Assessed by Vegetation Indices and Meteorological Factors in Afghanistan.” Remote Sensing 12(15): 2433.

24- Savitzky, Abraham, and Marcel J E Golay. 1964. “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.” Analytical chemistry 36(8): 1627–39.

25- Testa, Stefano, Enrico C Borgogno Mondino, and Chiara Pedroli. 2014. “Correcting MODIS 16-Day Composite NDVI Time-Series with Actual Acquisition Dates.” European Journal of Remote Sensing 47(1): 285–305.

26- Vetterling, William T et al. 1992. Numerical Recipes: Example Book C. Cambridge University Press.

27- Wu, Yangxue et al. 2020. “Investigating the Impact of Climate Warming on Phenology of Aphid Pests in China Using Long-Term Historical Data.” Insects 11(3): 167.

28- Yang, Yanjun et al. 2021. “Detecting Recent Crop Phenology Dynamics in Corn and Soybean Cropping Systems of Kentucky.” Remote Sensing 13(9): 1615.

29- Zhang, Junxue et al. 2021. “Evaluating the Impacts of Models, Data Density and Irregularity on Reconstructing and Forecasting Dense Landsat Time Series.” Science of Remote Sensing: 100023.

30- Zhang, Xiaoyang et al. 2003. “Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS.” Remote sensing of environment 84(3): 471–75.

31- Zhou, Xuancheng et al. 2020. “Legacy Effect of Spring Phenology on Vegetation Growth in Temperate China.” Agricultural and Forest Meteorology 281: 107845.