

## Original Article



## Effects of Climate Change on Vegetation Phenology of Urmia Lake Basin Using AVHRR Time Series Data

Farzaneh Hadadi<sup>1\*</sup>, Dayood Ashourloo<sup>2</sup>, Alireza Shakiba<sup>3</sup>, Ali Akbar Matkan<sup>4</sup>, Hosein Aghighi<sup>2</sup>

### Affiliation

1. M.Sc. in Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assistant Prof., Center for Remote Sensing and GIS research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. Associate Prof., Center for Remote Sensing and GIS research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4. Prof. of Center for Remote Sensing and GIS research, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Citation:** Hadad, F., Ashourloo, D., Shakiba, A., Matkan, A. A., Aghighi, H., Effects of Climate Change on Vegetation Phenology of Urmia Lake Basin Using AVHRR Time Series Data, Iran J Remote Sens GIS, 16(1): 1-14.

### ABSTRACT

**Introduction:** Climate change is considered one of the most significant challenges facing humanity. This phenomenon has had notable impacts on agricultural production in most parts of the world, especially in arid and semi-arid regions. The average temperature has also increased in many areas over the past few decades. Today, various studies utilize remote sensing indices as one of the modern methods for identifying climate change. One of the important remote sensing indices is the phenology characteristics of vegetation cover, which has demonstrated a promising ability in identifying and estimating vegetation cover in recent studies.

**Materials and Methods:** The five-day time series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from NOAA-AVHRR images and plant phenology parameters were utilized to examine changes in vegetation cover in rangeland and rainfed agricultural lands of the Urmia Lake basin over the years 1984-2013. Temperature and precipitation data were obtained from meteorological stations in the Urmia Lake basin and were used in comparison with satellite image results.

**Results and Discussion:** The results of the time series analysis over the thirty year period in the Urmia Lake basin revealed that the start of the growing season in Oshnavieh, Saqqez, and Sarab areas in 2013 commenced earlier than in 1984, while in the Maragheh area, it started later. The end of the growing season in Oshnavieh, Saqqez, and Takab ended earlier, and based on the peak growth parameter, vegetation in these counties reached its maximum value earlier. The results also showed the length of the growing season in Oshnavieh, Maragheh, and Saqqez counties has shortened, respectively.

**Conclusion:** The results obtained from satellite images and climate data indicated that the observed changes in phenology parameters are location-dependent. Cold nights and warm days at the start of the growing season decreasing and increasing, respectively. However, warm days increased at the end of the growing season. These changes have increased the slope of the plant growth phenology curve during the senescence period, ultimately reducing the length of the growing season.

**Keywords:** Phenology parameters, NDVI, Climate change, Time series, Urmia lake basin.

\* Corresponding Author: f.haddadi@isrc.ac.ir  
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2021.100998>

Received: 2021.08.31  
Accepted: 2022.05.12



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



# اثر تغییر اقلیم بر فنولوژی پوشش گیاهی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از سری زمانی تصاویر NOAA-AVHRR

فرزانه حدادی<sup>۱\*</sup>، داود عاشورلو<sup>۱</sup>، علیرضا شکیبا<sup>۱</sup>، علی اکبر متکان<sup>۱</sup>، حسین عقیقی<sup>۲</sup>

## چکیده

**سابقه و هدف:** تغییر اقلیم از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر به‌شمار می‌رود. این پدیده تا کنون در بیشتر نقاط جهان، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، تأثیرات شایان توجهی در تولیدات کشاورزی برجای گذاشته است. در بیشتر مناطق دنیا، طی دهه‌های اخیر، متوسط درجه حرارت نیز افزایش یافته است. امروزه در تحقیقات گوناگون، شاخص‌های سنجش از دور به‌منزله یکی از روش‌های نوین در شناسایی تغییر اقلیم استفاده می‌شوند. یکی از شاخص‌های مهم سنجش از دور، ویژگی‌های فنولوژی پوشش گیاهی است که در مطالعات اخیر، توانایی مطلوبی در شناسایی و تخمین پوشش گیاهی نشان داده است.

**مواد و روش‌ها:** با استفاده از سری زمانی پنج‌روزه شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) از تصاویر NOAA-AVHRR و پارامترهای فنولوژی گیاه، تغییرات پوشش گیاهی مناطق مراتع و اراضی دیم حوضه دریاچه ارومیه، در طول سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴ بررسی شد. داده‌های دما و بارش از ایستگاه‌های هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه دریافت و در مقایسه با نتایج تصاویر ماهواره‌ای، استفاده شد.

**نتایج و بحث:** نتایج تحلیل سری زمانی، طی سی سال دوره آماری در حوضه دریاچه ارومیه، نشان داد زمان شروع فصل رشد در منطقه اشنویه، سقز و سراب در سال ۲۰۱۳ نسبت به سال ۱۹۸۴ زودتر و در منطقه مراغه دیرتر آغاز شده است. پارامتر پایان فصل رشد در اشنویه، سقز و تکاب زودتر به‌پایان رسیده و براساس پارامتر اوج رشد، در شهرستان‌های یادشده، پوشش گیاهی زودتر به حداکثر مقدار خود رسیده است. نتایج هم چنین نشان داد که طول فصل رشد در شهرستان‌های اشنویه، مراغه و سقز، به‌ترتیب، کوتاه‌تر شده است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های اقلیمی نشان داد که تغییرات پارامترهای فنولوژی به مکان وابسته است. شب‌های سرد و روزهای گرم در ابتدای فصل رشد نیز، به‌ترتیب، کاهش و افزایش یافته است. این در حالیست که در انتهای فصل رشد، روزهای گرم افزایش داشته است. این تغییرات باعث افزایش شیب منحنی فنولوژی رشد گیاه در زمان پیری گیاه شده و در نهایت، طول فصل رشد را کاهش داده است.

**واژه‌های کلیدی:** پارامترهای فنولوژی، شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، تغییر اقلیم، سری زمانی، حوضه دریاچه ارومیه.

## سمت

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. دانشیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۴. استاد مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

**استناد:** حدادی، ف. عاشورلو، د. شکیبا، ع.، متکان، ع.ا.، عقیقی، ح.، اثر تغییر اقلیم بر فنولوژی پوشش گیاهی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از سری زمانی تصاویر NOAA-AVHRR، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳: ۱-۱۴.



## ۱- مقدمه

توسعه شهرها و صنایع و به‌موجب آن، افزایش مصرف سوخت از یک سو و تغییرات کاربری اراضی، از سوی دیگر باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر شده است. این افزایش سبب اختلال در روند متغیرهای اقلیمی، به‌ویژه دمای کره زمین شده؛ به‌طوری که با بررسی روند تغییرات داده‌های آب‌وهوایی و نتایج مدل‌های اقلیمی، تغییرات وسیعی در اقلیم جهانی مشاهده می‌شود (IPCC, 2007). تغییر اقلیم در عوامل اقلیمی، اقتصاد، اجتماع، کشاورزی تأثیر می‌گذارد و پیامدهایی همچون سیل، خشکسالی و مهاجرت را به‌همراه دارد. بنابراین بررسی این موضوع، برای تعیین سیاست‌های لازم و آمادگی بیشتر به‌منظور مقابله با تأثیرات نامطلوب این پدیده در اقلیم کره زمین، ضروری به‌نظر می‌رسد.

در حال حاضر، دانشمندان و سیاست‌گذاران این عرصه به‌دنبال روش‌هایی نوین برای بررسی تغییر اقلیم‌اند. برای شناسایی تغییرات، به مجموعه‌ای از داده‌ها و روش‌های تحلیلی در مقیاس‌های گوناگون زمانی و مکانی نیاز است. روش‌های معمول اندازه‌گیری زمینی، به‌دلیل صعب‌العبور بودن مناطق و زمان‌بر بودن برداشت داده‌ها، اطلاعات دقیقی در اختیار کارشناسان قرار نمی‌دهند. در این شرایط، لازم است داده‌های بیشتری در سطح لیتوسفر، اتمسفر، هیدروسفر، با استفاده از داده‌های سنجش از دور جمع‌آوری شوند. این داده‌ها، به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر به‌روز بودن، چندطیفی بودن، گستره وسیع و رقومی بودن، توانایی مناسبی در بررسی تغییر اقلیم دارند (Brown et al., 2012).

در روش‌های سنجش از دوری، از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مناسب و شاخص‌های پوشش گیاهی متفاوت استفاده می‌شود. این تصاویر، از طریق پارامترهای فنولوژی، قادر به تشخیص مراحل رشد پوشش گیاهی‌اند. به‌منظور استخراج پارامترهای فنولوژی، اغلب از شاخص‌های گیاهی مانند شاخص

نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)<sup>۱</sup>، شاخص پوشش گیاهی بارزسازی‌شده (EVI)<sup>۲</sup> و شاخص تفاضلی نرمال‌شده آب (NDWI)<sup>۳</sup> استفاده می‌شود (Heumann et al., 2007). این شاخص کلروفیل گیاه، شدت متابولیسم و تغییرات فصلی و سالیانه گیاه را بازتاب می‌دهد. در این مطالعه، به‌منظور استخراج پارامترهای فنولوژی، از شاخص NDVI استفاده شده است. این شاخص فرایند محاسباتی ساده‌ای دارد و حساسیت کمتری در مقابل تأثیرات جَوّی و زمینه خاک نشان می‌دهد.

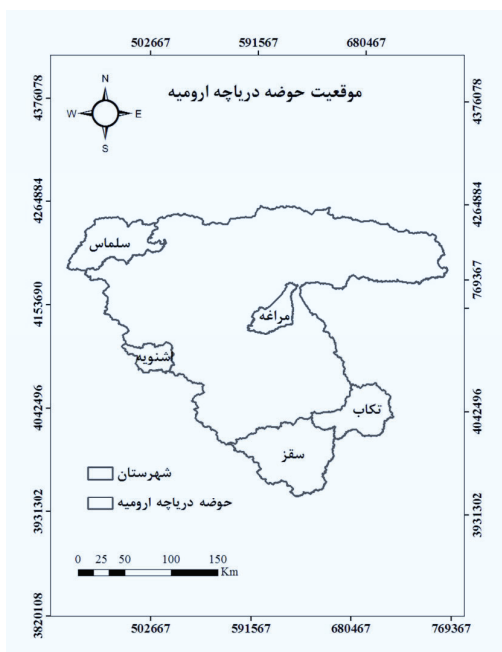
فنولوژی گیاه را «مطالعه زمانی مراحل متفاوت چرخه فصلی پوشش گیاهی، مانند برگ‌دهی، گل‌دهی و پیری، در رابطه با پارامترهای اقلیمی» تعریف کرده‌اند. مراحل فنولوژیکی گیاه را می‌توان از طریق پارامترهای متعددی، مانند آغاز فصل رشد (SOS)<sup>۴</sup>، پایان فصل رشد (EOS)<sup>۵</sup>، دامنه فصل رشد (AMP)<sup>۶</sup> و طول فصل رشد (LOS)<sup>۷</sup> شناسایی کرد. روش‌های مورد استفاده برای شناسایی پارامترهای فنولوژی گیاه، براساس سری زمانی داده‌های شاخص NDVI، اغلب شامل روش آستانه‌گذاری (White et al., 1997; Heumann et al., 2007; Tang et al., 2015)، شیب حداکثر (Zhang et al., 2004)، برآزش منحنی (Zhang et al., 2003; Duchemin et al., 1999) و معادله رگرسیون تجربی (Moulin et al., 1997; Myneni et al., 1997; Zhou et al., 2001; Tang et al., 2017; Yu et al., 2015) می‌شود. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که دمای کره زمین، از سال ۱۹۷۰، به‌ویژه در نیم‌کره شمالی افزایش یافته است. افزایش دما به شروع زود هنگام فصل بهار و وقوع پاییز دیر هنگام منجر شده و در نهایت، طول مدت فصل رشد افزایش یافته است (Cook & Vizy, 2012). به‌علاوه در نتایج این مقالات، به رابطه معنادار بین شاخص‌های پوشش

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Enhanced Vegetation Index
3. Normalized Difference Water Index
4. Start-of-Season
5. End-of-Season
6. Seasonal Amplitude
7. Length-of-Season

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در محدوده ۴۵/۵ تا ۴۶ طول شرقی و ۳۷/۵ تا ۳۸/۱۵ عرض شمالی و در ناحیه کوهستانی شمال غرب ایران و بین استان‌های آذربایجان غربی، شرقی و کردستان واقع شده است (شکل ۱). وسعت تقریبی این حوضه ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع است. مساحت دریاچه ارومیه در حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع برآورد شده است. این حوضه آبریز در ارتفاعی بین ۱۲۸۰ تا ۳۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد و از لحاظ شرایط اقلیمی، دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است. متوسط میزان بارش در منطقه ۳۵۰ میلی‌متر تخمین زده شده است که بخش عمده بارش از فصل پاییز تا میانه بهار رخ می‌دهد. جدول ۱ مختصات جغرافیایی شهرستان‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شهرستان‌های مورد مطالعه در حوضه دریاچه ارومیه که شامل پوشش گیاهی مرتع و زمین‌های دیم است

گیاهی و عناصر اقلیمی، مانند دما و بارش، اشاره شده است (Zhou et al., 2001; Gong & Ho, 2003; de Beurs & Henebry, 2005; White & Nemani, 2006).

در تحقیقات اخیر، به منظور استخراج پارامترهای فنولوژی، از بسته نرم‌افزاری TIMESAT استفاده شده است (Li et al., 2013; Yu et al., 2017). این نرم‌افزار امکان استخراج پارامترهای فنولوژی گیاه را از طریق سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای و توابع متفاوت، به منظور کاهش نویز تصاویر ماهواره‌ای، فراهم می‌کند. در این بسته، روش‌های برازش توابع در مدل‌های گوناگون شامل سری فوریه، منحنی لجستیک، روش MVC<sup>۱</sup> و استخراج شیب در دسترس است. در نهایت، به ازای هر پیکسل، یک سری زمانی هموار از داده‌های پوشش گیاهی ارائه می‌دهد و به کمک مدل‌های رگرسیون خطی، میزان تغییرات پارامترهای فنولوژی در یک دوره زمانی استخراج می‌شود و اطلاعات مفیدی درباره اکوسیستم گیاه و شرایط کشاورزی، در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، این نرم‌افزار نوسانات داخلی و سالیانه پوشش گیاهی، در مقیاس‌های محلی و جهانی را به خوبی نشان می‌دهد (Heumann et al., 2007). ملایری<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی، با استفاده از سری زمانی داده‌های AVHRR و نرم‌افزار TIMESAT، فنولوژی مراتع واقع در دامنه جنوبی البرز مرکزی را بررسی کردند.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران، با توجه به شرایط خاص اقلیمی و اهمیت کشاورزی، یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر تغییر اقلیم محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر، دچار تنش‌های فراوانی شده است. از این رو در تحقیق حاضر، با استفاده از استخراج پارامترهای فنولوژی آغاز، پایان و طول فصل رشد از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای NOAA-AVHRR و تابع Savitzky-Golay، اثر تغییر اقلیم در پارامترهای فنولوژی پوشش گیاهی مرتعی و اراضی دیم، در حوضه دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴، بررسی شده است.

1. Maximum Value Compositing
2. Malayeri

ارومیه، جمع‌آوری شد. سپس به‌منظور استخراج پارامترهای فنولوژی و محاسبه شاخص‌های تغییر اقلیم، نرم‌افزارهای TIMESAT و RCLindex به‌کار رفت. در مراحل بعد، برای کاهش نویز تصاویر ماهواره‌ای، از فیلتر Savitzky-Golay به‌منزله فیلتر مناسب در تحلیل سری زمانی داده‌ها استفاده شد (Jönsson & Eklundh, 2004). درنهایت پس‌از استخراج روند پارامترهای فنولوژی، به‌منظور ارزیابی نتایج با مقدار شیب، شاخص‌های حدی تغییر اقلیم مقایسه شد.

### ۲-۱- داده‌های اقلیمی

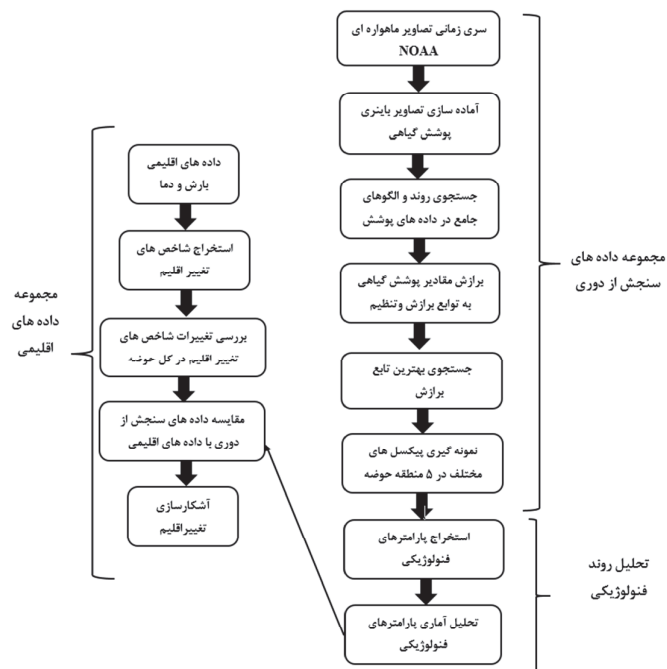
مجموعه داده‌های اقلیمی روزانه بارش و دما متعلق به پنج ایستگاه اشنویه، مراغه، سقز، سراب و تکاب، در سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴، از سازمان هواشناسی ایران جمع‌آوری شد. همگنی داده‌ها، با استفاده از آزمون ران تست، بررسی و سپس نرمال بودن آنها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، از طریق نرم‌افزار SPSS 21، انجام شد (طرح کلان ملی بررسی تأثیرات تغییر اقلیم و مدیریت خشکسالی\_ شورای عالی عتف، ۱۳۹۱).

جدول ۱. مشخصات شهرستان‌های مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
سلماس	44°47'E	38°11'N
اشنویه	45°60'E	37°2'N
تکاب	47°7'E	36°8'N
سقز	46°17'E	36°14'N
مراغه	46°12'E	37°30'N

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این بخش، مجموعه داده‌های اقلیمی و ماهواره‌ای مورد استفاده توضیح داده خواهد شد. در ادامه، مراحل تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. ابتدا داده‌های روزانه بلندمدت (سی‌ساله) شاخص NDVI، از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای AVHRR با فاصله زمانی پنج‌روزه انتخاب شدند. این تصاویر از پایگاه ثبت داده‌های اقلیمی (CDR)<sup>۱</sup> برداشت شدند و به تصحیحات هندسی و اتمسفری نیاز نداشتند و تصحیحات روی آنها اعمال شده است. داده‌های اقلیمی مورد استفاده شامل داده‌های دما و بارش روزانه ایستگاه‌های سلماس، اشنویه، تکاب، سقز و مراغه، در محدوده حوضه دریاچه



شکل ۲. مراحل تحقیق

1. NOAA Climate Data Record

## ۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی براساس باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک معرفی شده است. این شاخص در موارد متفاوت، مانند تشخیص سلامت گیاه، برآورد بایومس و تولید، شاخص سطح برگ و تفکیک پوشش گیاهی، مناسب است. در این مطالعه، از داده‌های اقلیمی ثبت‌شده (CDR) در سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) استفاده شده است. این مجموعه داده‌ها شامل شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، از داده‌های بازتاب سطحی، به صورت روزانه است. در این تصاویر، از شش سری ماهواره‌های NOAA-AVHRR استفاده شده و طولانی‌ترین تصاویر ماهواره‌ای را به منظور مطالعه پوشش گیاهی در مقیاس جهانی، ارائه داده است. این تصاویر دارای کیفیت مناسب از تغییرات مداری سنجنده‌ها در مدار، کاهش ارتفاع سنجنده‌ها در مدار، تغییرات مداری ماهواره، زاویه اوج خورشیدی و تصحیح تأثیرات آئروسول استراتوسفر هستند. مشخصات تصاویر NOAA-AVHRR در جدول ۲، به صورت خلاصه، نشان داده شده است.

جدول ۲. ویژگی‌های تصاویر NOAA-AVHRR

مشخصات	پارامتر
TIFF	نوع تصویر
0/05 درجه	قدرت تفکیک مکانی
جغرافیایی	سیستم مختصات
WGS84	سیستم تصویر
AVHRR	سنجنده
NOAA 7, 9, 11, 14, 16	ماهواره

## ۲-۲-۳- شاخص‌های تغییر اقلیم

به منظور تحلیل پارامترهای فنولوژی و آستانه‌های اقلیمی، شاخص‌های متعددی در گروه‌بندی‌های اقلیم و هواشناسی، اقیانوس، یخ، برف و اکوسیستم مطرح شده است. در این تحقیق از شاخص‌های حدی اقلیم و هواشناسی، معرفی شده از طریق مرکز EPA<sup>۱</sup> آمریکا استفاده شد. در این مرکز، شاخص‌های تغییر اقلیم به دو

گروه اصلی جهانی و منطقه‌ای تقسیم شده است. جدول ۳ شاخص‌های تغییر اقلیم را نشان می‌دهد که از وبسایت گروه متخصصان شناسایی تغییر اقلیم استخراج شده است ([http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)).

## ۲-۲-۴- فیلتر Savitzky-Golay

شاخص‌های گیاهی تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان را از سری زمانی داده‌های سنجش‌ازدوری، در مراحل متفاوت رشد گیاه، نشان می‌دهند. پس از ساخت سری زمانی تصاویر شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی، به منظور استخراج پارامترهای فنولوژی گیاه در حوضه دریاچه ارومیه و هموارسازی داده‌ها، از روش هموارسازی Savitzky-Golay استفاده شد. ضرایب این فیلتر با استفاده از تابعی چندجمله‌ای با درجه معلوم تعیین می‌شود. در ادامه، روش کار این تابع توضیح داده شده است.

در این روش، پارامترهای فنولوژی هر پیکسل با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شوند (Jönsson & Eklundh, 2004):

$$t_j = \sum_{i=-n_L}^{n_R} c_j f_{i+j} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$n_L$  و  $n_R$ ، به ترتیب، تعداد نقاطی است که در سمت چپ و راست نقطه  $i$  قرار می‌گیرند.  $c_j$  ضرایب مدل‌اند که طبق معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$c_j = 1 / (n_R + n_L + 1) \quad \text{رابطه (۲)}$$

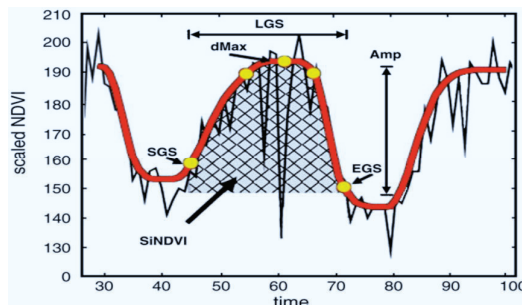
در این روش، مقدار تابع  $f_i$  با میانگین مقادیر درون پنجره جایگزین می‌شود.

با اعمال این فیلتر روی تصاویر، سری زمانی به‌ازای هر پیکسل در منطقه مورد نظر ترسیم می‌شود. پارامترهای فنولوژی مانند آغاز، پایان و طول فصل رشد، مقدار نقطه پیک و زمان رسیدن به نقطه اوج تعیین می‌شود (شکل ۳).

1. National Oceanic and Atmospheric Administration  
2. U.S. Environmental Protection Agency

جدول ۳. شاخص‌های تغییر اقلیم

علامت	شاخص	تعریف	واحد
TN10p	فراوانی روزهایی که تعداد آنها مساوی میانگین صدک دهم میانگین دمای روزانه یا کمتر از آن است	شب‌های سرد	روز
TG10	فراوانی روزهایی که تعداد آنها مساوی میانگین صدک دهم میانگین دمای روزانه یا کمتر از آن است	روزهای سرد	روز
TN90p	فراوانی روزهایی که تعداد آنها مساوی میانگین صدک ۹۰ام حداقل دمای روزانه یا بیشتر از آن است	شب‌های گرم	روز
TX90p	فراوانی روزهایی که تعداد آنها مساوی میانگین صدک ۹۰ام حداکثر دمای روزانه یا بیشتر از آن است	روزهای گرم	روز
WSDI	فراوانی روزهایی که حداقل شش روز متوالی از صدک ۹۰ام حداکثر دما بیشتر باشند	طول دوره گرم	روز
DTR	اختلاف دمای حداکثر از دمای حداقل روزانه	نوسان دمای روزانه	روز
CWD	مجموع مقدار بارش روزهایی از سال که مقدار بارش بیش از صدک ۹۵ام و دور از مینا باشد	روزهای شدیداً مرطوب	روز



شکل ۳. پارامترهای فنولوژی: شروع فصل رشد (SGS)، پایان فصل رشد (EGS)، طول فصل رشد (LGS)

### ۲-۳- آزمون رگرسیون خطی

شکل عمومی معادله رگرسیون خطی ساده براساس رابطه (۳) است.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادله،  $Y$  متغیر وابسته مورد مطالعه (اختلاف روزهای جابه‌جاشده در طول سی سال دوره آماری)،  $x$  متغیر مستقل (سال)،  $\beta_1$  شیب خط و  $\beta_0$  عدد ثابت این معادله است. پس از برازش، با استفاده از همبستگی پیرسون، معنی‌دار بودن شیب معادله رگرسیون خطی در

پارامترهای آغاز SGS و پایان فصل رشد EGS از طریق مشتق اول منحنی شاخص NDVI، در طول سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴، محاسبه شده است و نقاط ماکزیمم و مینیمم مشتق اول، به ترتیب، آغاز و پایان فصل رشد را نشان می‌دهند (Butt et al., 2011). اولین تاریخ پس از مقدار حداکثر شاخص NDVI، زمان شروع پیری گیاه است. در این زمان، ۸۰٪ از حداکثر شاخص NDVI کاهش یافته است. طول فصل رشد LGS طبق تفاوت بین آغاز و پایان فصل رشد محاسبه می‌شود (Butt et al., 2011).

رفته است. برای به دست آوردن نتایج دقیق تر، پیکسل‌های خالصی که شامل اراضی مرتع با تراکم‌های متفاوت‌اند، در اطراف ایستگاه‌های حوضه این دریاچه انتخاب شد. مقایسه نمودار پارامترهای فنولوژی شهرستان‌های این حوضه در شکل ۴ آورده شده است. همچنین خطوط روند روی هر یک از پارامترهای متفاوت فنولوژی و مناطق مورد مطالعه، برآزش داده شده است. مطابق شکل ۴، پارامترهای آغاز و پایان و زمان اوج رشد فصل رشد، در هر پنج منطقه، روند نزولی و شیب منفی دارد که بیانگر آغاز و پایان زود هنگام فصل رشد و کوتاه شدن زمان اوج رشد گیاه است؛ علت آن ممکن است ناشی از تغییرات بارش و کاربری اراضی طی سال‌های اخیر باشد. اما پارامتر طول فصل رشد، با شیب صعودی و مثبت، افزایش تعداد روزهای فصل رشد در منطقه را نشان می‌دهد. بازه زمانی تغییرات پارامترهای فنولوژی آغاز، پایان، طول فصل رشد و زمان اوج رشد پوشش گیاهی در هر پنج منطقه، به ترتیب، ۱۴۳-۸۱، ۲۹۸-۲۴۸، ۲۱۶-۱۱۶ و ۱۹۲-۱۵۸ روز در سال محاسبه شده است و پارامترهای آغاز و پایان فصل رشد، به ترتیب، با اواخر اسفند تا میانه خرداد و اوایل شهریور تا اواسط آبان مطابقت دارند. زمان اوج فصل رشد میانه خرداد تا اوایل تیر است. نتایج تحلیل پارامترهای فنولوژی تغییرات درخور ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد و به مکان وابسته است. جدول ۴ مقادیر بیانگر ضریب تعیین و معناداری آزمون را در مورد پارامترهای فنولوژی، در پنج منطقه اشنویه، مراغه، سقز، سراب و تکاب نشان داده است. طبق نتایج، ضریب تعیین R برای پارامتر آغاز و پایان فصل رشد، در مناطق اشنویه و تکاب، بهتر از شهرستان‌های دیگر است؛ در حالی که ضریب تعیین پارامتر طول فصل رشد و زمان اوج پوشش گیاهی، در شهرستان‌های سراب و تکاب، عملکرد بهتری داشته است. با توجه به جدول ۴، بیشتر مقادیر P-value بیشتر از ۰/۰۵ برآورد شده‌اند؛ بنابراین مدل‌های موجود برای پارامترهای آغاز، پایان و طول فصل رشد در سطح

سطوح اطمینان ۹۵٪ آزمون می‌شود. اگر علامت شیب منفی باشد، روند داده‌ها نزولی و در صورت مثبت بودن شیب، روند صعودی خواهد بود. نتیجه تحلیل آماری این روش شامل مدلی با ضریب تعیین (R) است و ارزیابی صحت و کفایت مدل با استفاده از همین ضریب انجام می‌شود. فرض صفر این آزمون برپایه نبود شیب و فرض یک مبنی بر وجود شیب است. این آزمون با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS اجرا می‌شود و در صورتی که در جدول ضرایب خروجی، مقدار P-value از ۰/۰۵ کمتر باشد، نشان‌دهنده وجود شیب رگرسیونی و روند معنی‌دار است.

### ۳- نتایج و بحث

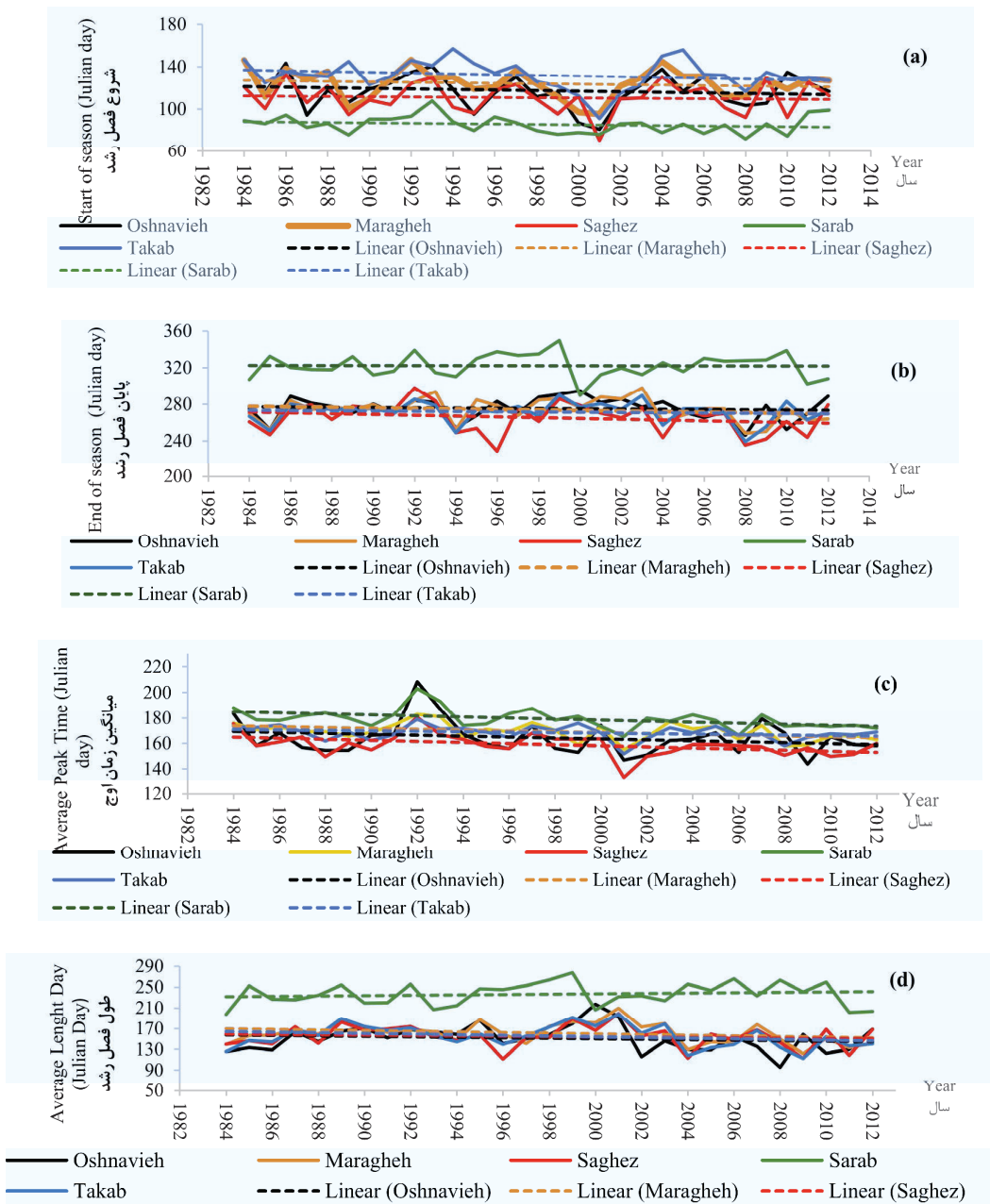
نمودارهای روند پارامترهای فنولوژی گیاه مانند شروع فصل رشد، پایان فصل رشد، طول فصل رشد و زمان اوج رشد منحنی حاصل از پردازش سری زمانی تصاویر شاخص پوشش گیاهی NDVI استخراج و تغییرات آنها در پنج منطقه اشنویه، مراغه، سقز، سراب و تکاب بررسی و به صورت جداگانه در شکل ۴ (نمودارهای a، b، c و d) و جدول ۴ نشان داده شده است. در ادامه، این نتایج با مقادیر شیب شاخص‌های حدی دما و بارش مقایسه شده است. نرم‌افزار RCLimindex، براساس آستانه‌های تعریف شده در مورد هر شاخص، میزان شیب آنها را طی دوره آماری محاسبه می‌کند. این نرم‌افزار براساس محاسبه روند شاخص‌های حدی دما و بارش توسعه یافته است.

### ۳-۱- نتایج بررسی تغییرات پارامترهای فنولوژی استخراج شده در حوضه دریاچه ارومیه

براساس استخراج پارامترهای فنولوژی از سری زمانی تصاویر شاخص NDVI در طول سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴، مقادیر آغاز، پایان، طول دوره رشد و زمان اوج رشد پوشش گیاهی، در مناطق گوناگون حوضه دریاچه ارومیه با یکدیگر مقایسه شد. تابع  $Y = X$  برای ارزیابی دقت نتایج و محاسبه خطای میانگین مربعات به کار



۰/۹۵٪ معنی دار نیست و فقط پارامتر میانگین زمان اوج رشد در ۴ شهرستان، به جز تکاب، معنی دار است. براساس داده‌های موجود، مدل‌های خطی تاحدودی قادر به بیان تغییرات پارامترهای فنولوژی است.



شکل ۴. نمودارهای فنولوژی به ترتیب میانگین آغاز (a)، پایان (b)، اوج (c) و طول فصل رشد (d) را در شهرستان‌های اشکنویه، مراغه، سقز، سراب و تکاب، در طول سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴ نشان می‌دهند

جدول ۲. مقادیر ضریب تعیین (R) و P-value برای پارامترهای فنولوژی در شهرستان‌های تکاب، سراب، سقز، مراغه و اشنویه

پارامتر	تکاب	سراب	سقز	مراغه	اشنویه
میانگین آغاز فصل رشد	R = 0/16	R = 0/18	R = 0/21	R = 0/18	R = 0/21
	P <sub>value</sub> = 0/45	P <sub>value</sub> = 0/32	P <sub>value</sub> = 0/72	P <sub>value</sub> = 0/33	P <sub>value</sub> = 0/3
میانگین پایان فصل رشد	R = 0/1	R = 0/15	R = 0/22	R = 0/19	R = 0/3
	P <sub>value</sub> = 0/54	P <sub>value</sub> = 0/35	P <sub>value</sub> = 0/24	P <sub>value</sub> = 0/31	P <sub>value</sub> = 0/11
میانگین زمان اوج رشد	R = 0/28	R = 0/44	R = 0/13	R = 0/18	R = 0/21
	P <sub>value</sub> = 0/13	P <sub>value</sub> = 0/01*	P <sub>value</sub> = 0/02*	P <sub>value</sub> = 0/02*	P <sub>value</sub> = 0/02*
میانگین طول فصل رشد	R = 0/26	R = 0/24	R = 0/12	R = 0/21	R = 0/11
	P <sub>value</sub> = 0/52	P <sub>value</sub> = 0/52	P <sub>value</sub> = 0/52	P <sub>value</sub> = 0/17	P <sub>value</sub> = 0/17

پس از محاسبه روزهای جابه‌جاشده در طول دوره آماری، با توجه به پارامتر آغاز فصل رشد در منطقه اشنویه و سقز و سراب طی سال ۲۰۱۳، در قیاس با ۱۹۸۴، فصل رشد با مقادیر متوسط ۷/۶۹، ۳/۲۶ و ۴/۵ روز زودتر در سال آغاز شده اما در منطقه مراغه ۸/۸۹ روز دیرتر شروع شده است. پارامتر پایان فصل رشد در سال ۲۰۱۳، در مقایسه با سال ۱۹۸۴، در اشنویه و سقز و تکاب نشان می‌دهد فصل رشد ۶/۳۷، ۱۲/۰۹ و ۳/۷ روز زودتر پایان یافته اما در مراغه ۶/۳۷ روز دیرتر تمام شده است. همچنین پارامتر اوج رشد، در شهرستان‌های مذکور، نشان می‌دهد پوشش گیاهی زودتر به حداکثر مقدار خود رسیده است. طول فصل رشد در شهرستان‌های اشنویه و مراغه و سقز، به ترتیب، ۲/۲۹

۱۷، ۸/۹۷ روز در سال کوتاه‌تر شده است (جدول ۵). در این تحقیق، براساس پژوهش هویمان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، از تعداد روزهای جابه‌جاشده کمتر از ۱/۵ روز چشم‌پوشی شده است.

### ۳-۲- نتایج بررسی شاخص‌های حدی دما و بارش در حوضه دریاچه ارومیه

در این مطالعه، به منظور ارزیابی نتایج تصاویر ماهواره‌ای، از شاخص‌های حدی دما و بارش استفاده شده است. شیب شاخص‌های حدی در ایستگاه‌های ارومیه، مراغه، سقز، سراب و تکاب در جدول ۶ نشان داده شده است. ایستگاه ارومیه به دلیل نزدیک بودن به منطقه اشنویه انتخاب شده است.

جدول ۵. تعداد روزهای جابه‌جاشده در سال ۲۰۱۳، در قیاس با ۱۹۸۴، در شهرستان‌های تکاب، سراب، سقز، مراغه و اشنویه

پارامتر	تکاب	سراب	سقز	مراغه	اشنویه
میانگین آغاز فصل رشد	۱*+	-4.5	-3/26	+8/89	-7/69
میانگین پایان فصل رشد	۳/۷-	+1	-12/09	+8/15	-6/37
میانگین زمان اوج رشد	۵/۱۸-	-11	-11/89	-8/73	-10
میانگین طول فصل رشد	۱-	+1	-8/97	-17	-2/29

\* علامت مثبت و منفی در جدول افزایش یا کاهش روزهای جابه‌جاشده در پارامترهای فنولوژی را در طول سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۸۴ نشان می‌دهد.

جدول ۶. شیب شاخص‌های حدی دما و بارش در دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۸۴ در ایستگاه‌های مورد مطالعه (علامت منفی روند کاهش و علامت مثبت روند افزایشی را نشان می‌دهد)

پارامترها	تکاب	سراب	سقز	مراغه	ارومیه
شب‌های سرد	-0/1	-0/1	-0/01	-0/5	-2
روزهای سرد	-0/2	-0/2	-0/1	-0/5	-0/5
شب‌های گرم	0/15	0/09	-0/25	0/5	0/5
روزهای گرم	0/2	0/2	-0/02	0/5	0/5
نوسان دمای روزانه	0/01	0/02	0/04	0/03	0/01
روزهای با بارش سنگین	-0/19	-0/05	-0/2	-0/26	-0/07
روزهای با بارش بسیار سنگین	-0/04	-0/02	-0/08	-0/06	0/01
حداکثر یک روز بارش	-0/10	-0/17	-0/4	-0/1	0/07
حداکثر پنج روز بارش	-0/64	-0/20	-0/7	-0/1	0/08
شدت مقادیر آستانه‌ای بارش	-0/02	-0/001	-0/02	-0/05	0/009

روند خاصی ندارد و کمتر از یک روز است. نتایج بیانگر کاهش شدت و فراوانی رویدادهای سرد در حوضه دریاچه ارومیه است؛ درحالی که در دوره مورد مطالعه، رویدادهای گرم روند افزایشی شایان توجهی داشتند.

شاخص DTR دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما را نشان می‌دهد. این شاخص، درمورد اغلب ایستگاه‌ها، روند معناداری دارد و طول دوره رشد در مناطق اشنویه، مراغه، سقز از دو تا نه روز کمتر شده است.

شاخص‌های بارش شامل حداکثر یک روز بارش، حداکثر پنج روز بارش و شدت مقادیر آستانه‌ای است. در بررسی همه شاخص‌های بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه، روند کاهشی و منفی مشاهده می‌شود. شاخص حداکثر یک روز بارش، در ایستگاه‌های سقز و سراب، روند افزایشی و در سایر ایستگاه‌ها، روند کاهشی داشته است. شاخص حداکثر پنج روز بارش، در همه ایستگاه‌ها به جز ارومیه، دارای روند کاهشی بوده است. روزهای با بارش سنگین، یعنی تعداد روزهای با مقدار بارش روزانه ۱۰ متر یا بیشتر از آن، در تمامی ایستگاه‌ها به غیر از ارومیه روند کاهشی و منفی داشته است. شاخص ساده شدت روزانه برابر است با شاخص بارندگی کل سالیانه تقسیم بر تعداد روزهای مرطوب در سال، که در تمامی ایستگاه‌ها به جز ارومیه، روند کاهشی

شاخص‌های حدی گرم شامل شاخص‌های شب‌های گرم و روزهای گرم می‌شود که تعریف آنها در جدول ۳ آمده است. شب‌های گرم فراوانی تعداد روزهایی است که تعداد آنها مساوی صدک ۹۰ام حداقل روزانه یا بیشتر از آن است؛ روزهای گرم نیز فراوانی روزهایی است که تعداد آنها برابر با صدک ۹۰ام حداکثر دمای روزانه یا بیشتر از آن است. با توجه به جدول ۶، برآزش این دو شاخص روی داده‌های دمای منطقه مورد مطالعه حاکی از روند معنادار و مثبت این دو شاخص، در اغلب ایستگاه‌ها به جز سقز، است. شاخص روزهای گرم، با روند مثبت، بیانگر افزایش تعداد روزهای گرم بوده است.

شاخص‌های حدی سرد شامل شاخص‌های روزهای سرد و شب‌های سرد می‌شود. شب‌های سرد فراوانی روزهایی است که تعداد آنها مساوی میانگین صدک دهم میانگین دمای روزانه یا کمتر از آن است و روزهای سرد فراوانی است که تعداد آنها برابر میانگین صدک دهم میانگین روزانه یا کمتر از آن است. شاخص‌های حدی سرد، برخلاف شاخص‌های حدی گرم، بیشتر روند کاهشی را نشان می‌دهند. شیب شاخص روزهای سرد، در اغلب ایستگاه‌ها، نشان‌دهنده شیب منفی است و شاخص شب‌های سرد، در سقز،

شهرستان‌های یادشده، پوشش گیاهی زودتر به حداکثر مقدار خود رسیده و طول فصل رشد در شهرستان‌های اشنویه، مراغه و سقز کوتاه‌تر شده است.

نتایج تحلیل شاخص‌های حدی دما و بارش با گرم‌شدن منطقه مطابقت دارد و نشان داد که شاخص‌های حدی گرم، مانند شاخص روزها و شب‌های گرم، در منطقه مورد مطالعه روند افزایشی و شاخص‌های حدی سرد روند کاهشی دارند. نتایج تحقیق حاضر با پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد. برای نمونه، زمان آغاز و طول فصل رشد در کشورهای نیم‌کره شمالی، مانند افریقا (Vrieling et al., 2013) و اروپا (Atzberger et al., 2014)، زودتر و کوتاه‌تر گزارش شده است. ژو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از سری زمانی شاخص NDVI سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۸۱، در شمال اوراسیا، گزارش دادند که فصل بهار یک هفته زودتر آغاز شده و فصل پاییز ده روز دیرتر به پایان رسیده است. ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳) با تلفیق داده‌های GIMMS در سال‌های ۱۹۸۲-۲۰۰۰ و داده‌های SPOT در سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۱، زمان شروع فصل رشد را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که فصل رشد در سال ۲۰۱۱، ۲/۰۴ روز در سال زودتر آغاز شده است. مطالعه حاضر نشان داد پارامترهای فنولوژی با شاخص‌های تغییر اقلیم رابطه معناداری دارند که بیانگر توانایی داده‌های سنجش از دور، در بررسی تغییرات فنولوژی گیاه و آشکارسازی تغییر اقلیم است.

#### ۴- منابع

Atzberger, C., Klisch, A., Mattiuzzi, M. & Vuolo, F., 2014, **Phenological Metrics Derived over the European Continent from NDVI3g Data and MODIS Time Series**, Remote Sensing, 6(1), PP. 257-284, <https://doi.org/10.3390/rs6010257>.

1. Zhou
2. Zhang

داشته است. شاخص تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین، همراه با شیب کاهشی و منفی، نشان‌دهنده کاهش مقدار بارش در حوضه دریاچه ارومیه است.

#### ۳-۳- نتیجه‌گیری

روش‌های آشکارسازی تغییر اقلیم و مدل‌سازی پارامترهای آن همواره با دگرگونی و پیشرفت همراه است. منابع اطلاعاتی جدید و روش‌های گوناگون بهینه‌سازی در مدل‌سازی پارامترهای تغییر اقلیم مؤثر بوده است. در این تحقیق، با استفاده از سری زمانی تصاویر NOAA-AVHRR و انجام دادن مراحل متفاوت پردازش و تصحیح داده‌ها، امکان استخراج شاخص‌های فنولوژی پوشش گیاهی همچون آغاز فصل رشد، پایان فصل رشد، طول فصل رشد و زمان اوج رشد گیاه فراهم شد؛ برای این کار، در طول دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۸۴، منحنی برازش Savizky-Golay به کار رفت. سپس رابطه پارامترهای فنولوژی گیاه بررسی و دقت آنها با شاخص‌های تغییر اقلیم، در پنج ایستگاه حوضه آبریز دریاچه ارومیه، شامل اشنویه، مراغه، سقز، سراب و تکاب مقایسه شد.

بدین ترتیب با به کارگیری پارامترهای به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های اقلیمی دما و بارش، امکان تحلیل داده‌ها فراهم شد که هدف از آن آشکارسازی تغییر اقلیم و مدل‌سازی آن، با استفاده از روش‌های آماری، مانند رگرسیون‌های خطی ساده بود. با توجه به نمودارها و جدول‌های ارائه شده در بخش نتایج، مقادیر پارامترهای فنولوژی در این تحقیق بررسی شد و آغاز و پایان فصل رشد، طول آن و زمان حداکثر اوج رشد گیاه به منزله متغیرهای مؤثر در آشکارسازی تغییر اقلیم تشخیص داده شد. طبق تحلیل پارامترهای فنولوژی در طول دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۸۴، پارامتر آغاز فصل رشد در منطقه اشنویه، سقز و تکاب، زودتر و در مراغه، دیرتر آغاز شده است. براساس پارامتر پایان فصل رشد، این دوره در اشنویه، سقز و تکاب زودتر و در مراغه دیرتر تمام شده است. همچنین طبق پارامتر اوج رشد در

- Brown, M.E., de Beurs, K. M. & Marshall, M., 2012, **Global Phenological Response to Climate Change in Crop Areas Using Satellite Remote Sensing of Vegetation, Humidity and Temperature over 26 Years**, *Remote Sensing of Environment*, 126, PP. 174-183, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.009>.
- Butt, B., Turner, M.D., Singh, A. & Brottem, L., 2011, **Use of MODIS NDVI to Evaluate Changing Latitudinal Gradients of Rangeland Phenology in Sudano-Sahelian West Africa**, *Remote Sensing of Environment*, 115, PP. 3367-3376, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.001>.
- Cook, K.H. & Vizy, E.K., 2012, **Impact of Climate Change on Mid-Twenty-First Century Growing Seasons in Africa**, *Climate Dynamics*, 39, PP. 2937-2955, <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1324-1>.
- de Beurs, K.M. & Henebry, G.M., 2005, **Land Surface Phenology and Temperature Variation in the International Geosphere-Biosphere Program High-Latitude Transects**, *Global Change Biology*, 11(5), PP. 779-790, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00949.x>.
- Duchemin, B., Goubier, J. & Courrier, G., 1999, **Monitoring Phenological Key Stages and Cycle Duration of Temperate Deciduous Forest Ecosystems with NOAA-AVHRR Data**, *Remote Sensing of Environment*, 67, PP. 68-82, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00067-4).
- Gong, D.-Y. & Ho, C.-H., 2003, **Detection of Large-Scale Climate Signals in Spring Vegetation Index (Normalized Difference Vegetation Index) over the Northern Hemisphere**, *J. Geophys. Res.*, 108D, P. 4498, <https://doi.org/10.1029/2002JD002300>.
- Heumann, B.W., Seaquist, J.W., Eklundh, L. & Jönsson, P., 2007, **AVHRR Derived Phenological Change in the SAHEL and Soudan, Africa, 1982-2005**, *Remote Sensing of Environment*, 108(2007), PP. 385-392, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.025>.
- Jönsson, P. & Eklundh, L., 2004, **TIMESAT—A Program for Analyzing Timeseries of Satellite Sensor Data**, *Computers & Geosciences*, 30, PP. 833-845, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>.
- Li, Z., Huffman, T., McConkey, B. & Townley-Smith, L., 2013, **Monitoring and Modeling Spatial and Temporal Patterns of Grassland Dynamics Using Time-Series MODIS NDVI with Climate and Stocking Data**, *Remote Sensing of Environment*, 138, PP. 232-244, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.020>.
- Malayeri, F., Ashourloo, D., Shakiba, A., Matkan, A.A. & Aghighi, H., 2016, **Investigating the Effects of Climate Change on Vegetation Phenology Using Time Series of AVHRR Data**, *Journal of Ecological Agriculture*, 8(2), PP. 98-117, <https://doi.org/10.48308/gisj.2021.100998>.
- Menzel, A. & Fabian, P., 1999, **Growing Season Extended in Europe**, *Nature*, 397(6721), P. 659, <https://doi.org/10.1038/17709>.
- Moulin, S., Kergoat, L., Viovy, N. & Dedieu, G., 1997, **Global-Scale Assessment of Vegetation Phenology Using NOAA-AVHRR Satellite Measurements**, *J. Climate*, 10, PP. 1154-1170, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1154:GSAOVP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1154:GSAOVP>2.0.CO;2).
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. & Nemani, R.R., 1997, **Increased Plant Growth in the Northern High Latitudes from 1981 to 1991**, *Nature*, 386(6626), P. 698, <https://doi.org/10.1038/386698a0>.
- Solomon, S., 2007, **IPCC (2007): Climate Change the Physical Science Basis**, In AGU Fall Meeting Abstracts, Bibcode: 2007AGUFM.U43D.01S.
- Tang, H., Li, Z., Zhu, Z., Chen, B., Zhang, B. & Xin, X., 2015, **Variability and Climate Change Trend in Vegetation Phenology of Recent Decades in the Greater Khingan Mountain Area, Northeastern China**, *Remote Sensing*, 7(9), PP. 11914-11932, <https://doi.org/10.3390/rs70911914>.
- Vrieling, A., De Leeuw, J. & Said, M., 2013, **Length of Growing Period over Africa:**

- Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series**, Remote Sensing, 5(2), PP. 982-1000,  
<https://doi.org/10.3390/rs5020982>.
- White, M.A., Thornton, P.E. & Running, S.W., 1997, **A Continental Phenology Model for Monitoring Vegetation Responses to Interannual Climatic Variability**, Global Biogeochemical Cycles, 11(2), PP. 217-234,  
<https://doi.org/10.1029/97GB00330>.
- White, M.A. & Nemani, R.R., 2006, **Real-Time Monitoring and Short-Term Forecasting of Land Surface phenology**, Remote Sensing of Environment, 104(1), PP. 43-49,  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.014>.
- Yu, L., Liu, T., Bu, K., Yan, F., Yang, J., Chang, L. & Zhang, S., 2017, **Monitoring the Long Term Vegetation Phenology Change in Northeast China from 1982 to 2015**, Scientific Reports, 7(1), P. 14770,  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-14918-4>.
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C., Gao, F., Reed, B.C. & Huete, A., 2003, **Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS**, Remote Sensing of Environment, 84(3), PP. 471-475,  
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9).
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B. & Strahler, A.H., 2004, **Climate Controls on Vegetation Phenological Patterns in Northern Mid-and High Latitudes Inferred from MODIS Data**, Global Change Biology, 10(7), PP. 1133-1145,  
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00784.x>.
- Zhou, L.M., Tucker, C.J., Kaufmann, R.K., Slayback, D., Shabanov, N.V. & Myneni, R.B., 2001, **Variations in Northern Vegetation Activity Inferred from Satellite Data of Vegetation Index During 1981 to 1999**, Journal of Geophysical Research, [Atmospheres], 106, PP. 20069-20083,  
<https://doi.org/10.1029/2000JD000115>.