



Effect of Height and Temperature on Plant Phenological Processes Using Harmonic Analysis of MODIS NDVI Time Series (Case Study: Shirkouh, Yazd province)

Hadi Zare khormizie.^{1*} and Hamid Reza Ghafarian Malamiri.²

1. Ph.D Student of Range Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Assistant Prof., Dep. of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

Phenology studies the occurrence time of repetitive plant life events in relation to living and non-living factors. One of the ways to study plant growth trends is the use of satellite time series observations and Remote sensing techniques. The purpose of the present study is to determine the physical meaning of the Fourier series components in relation to vegetation types and plant phenology processes using NDVI time series analysis calculated from satellite imageries. Another aim is to determine the trends of the Fourier series components in relation to changes in altitude from sea level and Spring temperature. For this purpose, the present study used an 8-day MODIS Sensor NDVI products named MOD09Q1 with 250 m spatial resolution. First, the Fourier series components, amplitude and phase images, were generated using the MODIS one-year NDVI time series in 2013, 2014 and 2015 and HANTS algorithm. Then, the changes and relationship of each of these components with respect to elevation and temperature changes were investigated in the Shirkouh region of Yazd province. According to the results, by decreasing one degree Centigrad of the spring mean temperature that occurs with increasing altitude, a delay of 7 and 5 days were observed in NDVI annual and 6-month cycles, respectively. In the annual cycles, the highest amount of variance is controlled by plants with annual growth periods, and in the 6-month cycles the highest amount of variance is controlled by plants with short and seasonal growth periods. Based on the results, HANTS algorithm and Fourier series analysis can be very effective in understanding the effects of climatic factors on phenological processes and timing of plant growth.

Keywords: Phenology, Phase Difference, Harmonic Analysis, Time Series, Shirkooh.

* Correspondence Address: Faculty of Natural Resources, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Daneshkadeh Ave., Karaj, Tel: +989137078631
Email: hadi.zarekh@gmail.com
<https://doi.org/10.52547/gisj.12.3.1>



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۹
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 3, Autumn 2020

۲۲-۱

مقاله پژوهشی

بررسی اثر ارتفاع و دما در فرایندهای فنولوژی گیاهان، با استفاده از تجزیه و تحلیل هارمونیک سری زمانی NDVI سنجنده MODIS (مطالعه موردی: شیرکوه استان یزد)

هادی زارع خورمیزی^{۱*} و حمیدرضا غفاریان مالمیری^۲
۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استادیار گروه جغرافیا دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۰۲

چکیده

فنولوژی به مطالعه زمان وقوع رخداد‌های تکرارپذیر زندگی گیاهان در رابطه با عوامل زنده و غیرزنده می‌پردازد. یکی از روش‌های بررسی تغییرات روند رشد گیاه استفاده از سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های سنجش از دور است. هدف از پژوهش حاضر تعیین معنای فیزیکی هر یک از مؤلفه‌های سری فوریه، در مورد انواع پوشش گیاهی و فرایندهای فنولوژی گیاهان، با استفاده از تجزیه سری‌های زمانی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حاصل از سنجش از دور است. هدف دیگر نیز تعیین روند تغییرات مؤلفه‌های سری فوریه، در زمینه تغییرات ارتفاع از سطح دریا و درجه حرارت فصل بهار است. بدین منظور، در مطالعه حاضر، از محصول هشت‌روزه شاخص NDVI سنجنده MODIS، با نام MOD09Q1، با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر استفاده شد. ابتدا، با استفاده از الگوریتم HANTS و سری‌های زمانی یک‌ساله NDVI سنجنده MODIS در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵، مؤلفه‌های سری‌های فوریه یا همان تصاویر دامنه و فاز تولید شد. سپس تغییرات و ارتباط هر یک از این مؤلفه‌ها به نسبت تغییرات ارتفاع و دما، در منطقه شیرکوه استان یزد، بررسی شد. براساس نتایج، با کاهش ۱ درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای فصل بهار، که با افزایش ارتفاع از سطح دریا رخ می‌دهد، تأخیر هفت‌روزه‌ای در چرخه‌های سالیانه و تأخیری پنج‌روزه در چرخه‌های شش‌ماهه سری‌های زمانی NDVI ایجاد می‌شود. در چرخه‌های سالیانه، بیشترین مقدار واریانس با استفاده از گیاهان دارای دوره رشد کوتاه و فصلی کنترل می‌شود. براساس نتایج، الگوریتم HANTS و تحلیل سری‌های فوریه می‌تواند، در شناخت تأثیرات عوامل اقلیمی در فرایندهای فنولوژی و زمان شروع رشد گیاهان، بسیار کارآمد باشد.

کلیدواژه‌ها: فنولوژی، اختلاف فاز، تجزیه و تحلیل هارمونیک، سنجش از دور، شیرکوه.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: البرز، کرج، دانشکده منابع طبیعی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. تلفن: ۰۹۱۳۷۰۷۸۶۳۱.

۱- مقدمه

فنولوژی^۱ یکی از مباحث گسترده دانش بوم‌شناسی است و چرخه حیاتی و زمان وقوع پدیده‌های تکرارپذیر زندگی گیاهان را، در رابطه با عوامل محیطی، مطالعه و بررسی می‌کند (Lesica and Kittelson, 2010; White et al., 2009; Richardson et al., 2013). مطالعه فنولوژی در مقیاس‌های کوچک برای تنظیم برنامه‌های چرای دام در مراتع، بهره‌برداری صحیح از گیاهان مرتعی، جلوگیری از چرای زودرس و شناخت خوش‌خوراکی و ارزش غذایی گونه‌های گیاهی در مراحل گوناگون حیاتی بسیار اهمیت دارد (رشوند و همکاران، ۱۳۹۳). مطالعه فنولوژی، در مقیاس‌های کلان، نشان‌دهنده پاسخ و سازگاری اکوسیستم‌ها به تغییرات اقلیمی است (Shang et al., 2018; Fu et al., 2015; Ge et al., 2015) و می‌تواند برای درک تأثیر این تغییرات در چرخه کربن (Wu et al., 2016)، چرخه آب (Zhou et al., 2014) و تبادل انرژی (Fu et al., 2014) بسیار کاربرد داشته باشد. مطالعه فنولوژی گیاهان، در سال‌های اخیر، با توجه به ارتباط قوی بین وقایع بیولوژیکی و آب‌وهوایی، توجهات خاصی را به خود جلب کرده (Dannenbergh et al., 2015; Richardson et al., 2016; Liu et al., 2013) و یکی از حساس‌ترین شاخص‌های زیست‌شناختی^۲، در پاسخ به گرمایش جهانی و افزایش دمای کره زمین، شناخته شده است (Bertin, 2008; Yu et al., 2010).

دما یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در شروع رشد و فرایندهای فنولوژی گیاهان محسوب می‌شود (Pellerin et al., 2012; Piao et al., 2007). پژوهش‌های بسیاری تأثیر دما در فرایندهای فنولوژی گیاهان را بررسی کرده‌اند (Scheifinger et al., 2002; Menzel et al., 2008; Nordli et al., 2008). نتایج پژوهشی نشان داد، با افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد در دمای فصل بهار، شروع رشد گیاهان در منطقه چینگهای - شیزانگ^۳ در فلات تبت چین ۴.۱ روز تسریع می‌یابد (Piao et al., 2011). نتایج پژوهشی

دیگر نشان داد که، با افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای فصل بهار، شروع فصل رشد گونه *Larix decidua* Mill در منطقه آلپ هفت روز تسریع می‌یابد (Busetto et al., 2010). در مطالعه دیگری نتایج نشان داد، با افزایش هر ۱ درجه سانتی‌گراد دمای فصل بهار، فصل رشد در فنواسکاندیا پنج تا شش روز زودتر آغاز می‌شود (Karlsen et al., 2007). در منطقه‌ای از چین نیز، نتایج نشان داد افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد دمای بهار منجر به پیشرفت ۴.۲ روز در آغاز رشد می‌شود (Liu et al., 2014).

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های سنجش از دور بازتابی در ارزیابی متغیرهای گوناگون پوشش‌های گیاهی، همچون بررسی مراحل فنولوژیکی و پایش تغییرات آن، گسترش روزافزونی داشته است (Kobayashi et al., 2018). شاخص‌های پوشش گیاهی و اطلاع از میزان سبزیگی گیاهان، در هر مرحله از رشد، نتایج مهمی در زمینه مراحل فنولوژی و نیز، مدیریت بهینه آن به‌همراه دارد. میزان سبزیگی، در واقع، بیانگر عوامل مؤثر در رشد گیاه است و از آن جمله، می‌توان به متغیرهای هواشناسی و فیزیولوژیکی اشاره کرد (اخوان و همکاران، ۱۳۹۷). مطالعات بسیاری، با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای و میدانی، فرایندهای فنولوژیکی گیاهان را بررسی کرده‌اند (Fu et al., 2014; Wang et al., 2015; Pastor-Guzman et al., 2018; Peng et al., 2018; Klosterman et al., 2014). این نتیجه توانایی ردیافت مکرر داده‌ها به‌دلیل امکان بازدید مجدد^۴ و استفاده از سری‌های زمانی داده‌های سنجش از راه دوری است که اطلاعات بسیاری درمورد تغییرات و پویایی‌های پوشش گیاهی به‌دست می‌دهند (Xue et al., 2014). بنابراین، تجزیه و تحلیل این سری‌های زمانی می‌تواند در شناخت ویژگی‌های فنولوژیکی گیاهان مؤثر باشد. اما مطالعات فنولوژی و چرخه رشد گیاهان نیازمند دراختیارداشتن

1. phenology
2. biological
3. Qinghai-Xizang
4. revisiting time

در پژوهشی، از تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی NDVI ماهواره NOAA برای شناسایی نوع محصول استفاده شد. براساس نتایج این پژوهش، محصولاتی مانند ذرت، که دارای یک دوره رشد هستند، بیشترین مقدار واریانس تغییرات در آنها با استفاده از هارمونیک اول کنترل می‌شود؛ در صورتی که در مورد گندم زمستانه، با دو دوره رشد متفاوت، بیشترین مقدار واریانس با استفاده از هارمونیک دوم کنترل می‌شود (Jakubauskas et al., 2002). در پژوهشی دیگر، الگوریتم HANTS برای تعیین زمان شروع و پایان فصل رشد در پوشش‌های متفاوت استفاده شد (De Wit and Su, 2005). طبق نتایج، هیستوگرام‌های آغاز فصل رشد، برای کلاس‌های متفاوت پوشش زمین، با دانش عمومی در مورد زمان فنولوژیکی آن هم‌خوانی دارد. در پژوهشی، تغییرات و ویژگی‌های پوشش گیاهی چین با استفاده از NDVI-AVHRR، طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۱، بررسی شد (Jiang et al., 2008). در این مطالعه، با محاسبه مؤلفه‌های سری فوریه، معنای فیزیکی این مؤلفه‌ها با تغییرات پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج، میانگین NDVI یا دوره (هارمونیک) مرتبه صفر نشان‌دهنده سطح کل پوشش گیاهی است. اولین جزء دوره‌ای (هارمونیک اول) ارزش دامنه و فاز داده‌های سالیانه NDVI و دوره دوم ارزش دامنه و فاز داده‌های NDVI شش‌ماهه را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، در زمینه کاربرد اجزای هارمونیک سری‌های زمانی طی برنامه‌های مدیریت پوشش گیاهی در مراتع و بخش کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک، پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر تعیین معنی فیزیکی هر یک از مؤلفه‌های سری فوریه، با توجه به انواع پوشش گیاهی، و همچنین تعیین روند تغییرات این مؤلفه‌ها، طبق تغییرات ارتفاع از سطح دریا و درجه حرارت فصل بهار است. نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت مراتع و نیز سایر برنامه‌های مدیریتی پوشش گیاهی کاربرد داشته باشد.

داده‌های زمانی پیوسته کامل، بدون خطا و جافتادگی در طول زمان است. پیوستگی زمانی داده‌های سنجنش از راه دور به دلیل عواملی همچون وجود گردوغبارهای جوی، ذرات معلق در هوا و گازها و به‌ویژه، حضور ابرها ممکن است دستخوش تغییر معنابهی شود (Ghafarian Malamiri et al., 2018) که این، خود، با تأثیر در انرژی بازتاب‌یافته از سطح، قرائت سنجنده‌های اپتیکی را با خطا مواجه می‌کند (زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶). الگوریتم تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS)^۱ برای حذف داده‌های دورافتاده و پرکردن فاصله داده‌های جافتاده در داده‌های سری زمانی شاخص NDVI^۲ با فاصله نمونه‌برداری نامنظم و استخراج اطلاعات فنولوژیکی گیاه توسعه یافته است (Verhoef, 1996; Verhoef et al., 1996; Roerink et al., 2000). تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی پدیده‌های دوره‌ای را به اجزای آن، یا همان سینوس‌ها و کسینوس‌های متفاوت، با دامنه و فازهای متفاوت، تجزیه می‌کند (Jakubauskas et al., 2002). این الگوریتم طی چند سال اخیر، به‌منظور حذف داده‌های دورافتاده و یا بازسازی داده‌های از بین رفته بر اثر ابر در سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای، کاربرد گسترده‌ای داشته است (غفاریان مالمیری و زارع خورمیزی، ۱۳۹۶؛ زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶) (Wen et al., 2004; Zhou et al., 2015; Xu and Shen, 2013; Julien and Sobrino, 2010). با این حال، تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی، برای تحلیل اطلاعات فنولوژی گیاهان و تأثیر عوامل محیطی در فنولوژی گیاهان، کمتر به کار رفته است. براساس اینکه انواع متفاوت پوشش‌های زمین و گونه‌های گیاهی دارای الگوهای فصلی و فنولوژی متفاوتی در تغییرات سری‌های زمانی NDVI هستند (Jakubauskas and Legates, 2000; Jakubauskas et al., 2002)، از این الگوریتم برای تفکیک و طبقه‌بندی پوشش‌های گیاهی گوناگون استفاده شده است (Atzberger and Eilers, 2011; Yan et al., 2015).

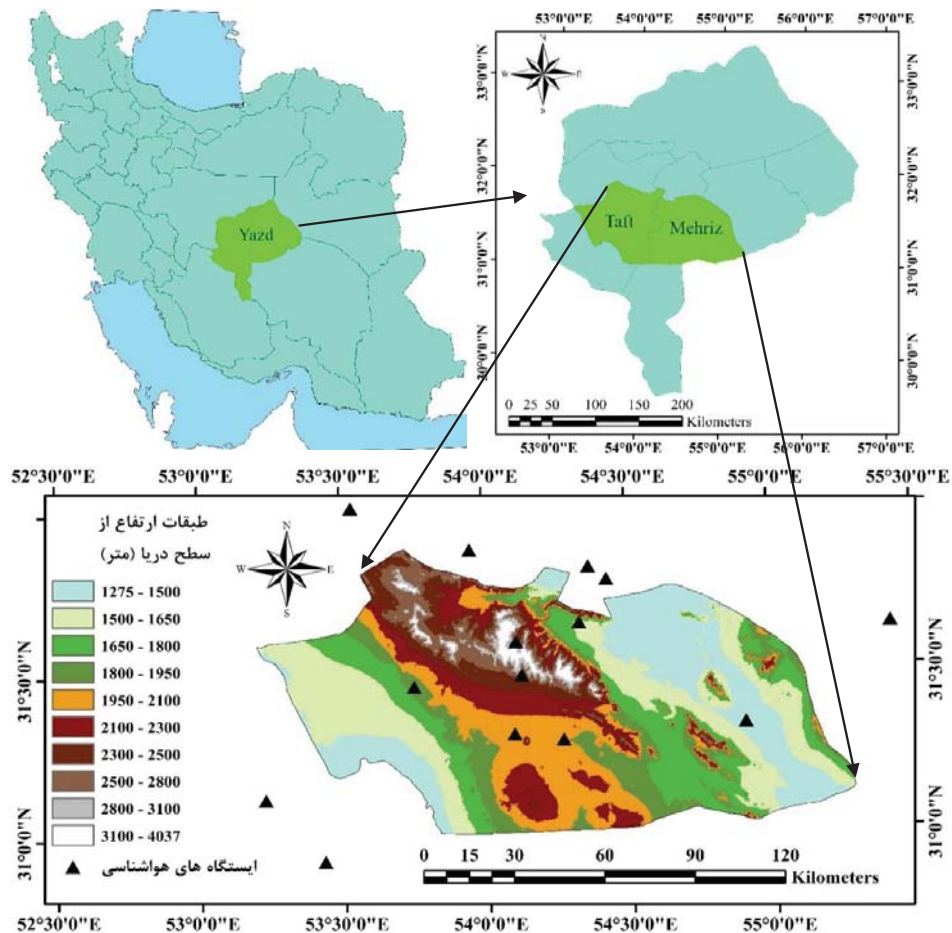
1. Harmonic Analysis of Time Series
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. period
4. First Periodic Component

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی شهرستان‌های مهریز و تفت، واقع در استان یزد، از کشور ایران را شامل می‌شود. این شهرستان‌ها بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه تا ۵۳ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی از نصف‌النهار مبدأ قرار گرفته‌اند. وسعت منطقه مورد مطالعه حدود ۱۲۶۰۷ کیلومترمربع است. مرتفع‌ترین نقطه آن قله شیرکوه، با ارتفاع ۴۰۳۷ متر، و کمترین ارتفاع آن ۱۲۷۵ متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه

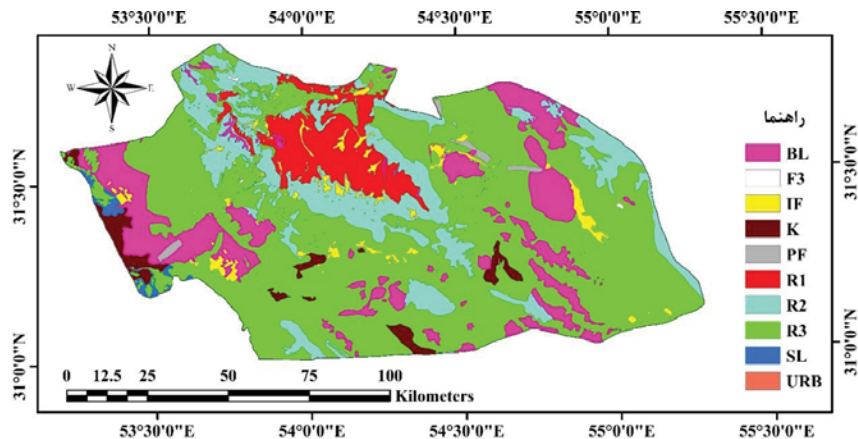
مورد مطالعه را، به‌همراه نقشه طبقات ارتفاع از سطح دریا و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، نشان می‌دهد. شکل ۲ نقشه پوشش زمین^۱ در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان یزد آن را تهیه کرده است. با توجه به جدول ۱، اراضی با پوشش کمتر از ۵٪ و مراتع کم‌تراکم و مراتع نیمه‌تراکم، به ترتیب، ۳۵.۷٪، ۴۷.۳٪ و ۱۱.۳٪ پوشش منطقه مورد نظر را تشکیل می‌دهند. با توجه به اینکه مراتع کم‌تراکم، نیمه‌تراکم، متراکم و اراضی زراعی و باغی دارای پوشش گیاهی مطلوبی‌اند، تغییرات اجزای هارمونیک در سال ۲۰۱۳ در این مناطق بررسی شد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان یزد، به‌همراه نقشه ارتفاع از سطح دریا و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

1. land cover

بررسی اثر ارتفاع و دما در فرایندهای فنولوژی گیاهان ...



شکل ۲. نقشه نوع پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. معرفی نشانه‌ها و نوع پوشش زمین و درصد مساحت آن

درصد پوشش	معرفی نوع پوشش	نشانه
۷	مراتع متراکم: مراتع با تراکم تاج پوشش بیش از ۵۰٪ (گیاهان یکساله و چندساله)	R1
۱۵.۹	مراتع نیمه متراکم: مراتع دارای تراکم تاج پوشش ۲۵-۵۰٪ (گیاهان یکساله و چندساله)	R2
۵۶.۱	مراتع کم تراکم: مراتع با تراکم تاج پوشش ۲۵-۵٪ (گیاهان یکساله و چندساله)	R3
۲.۹	زراعت آبی و باغات (با غالب بودن پوشش درختی)	IF
۰.۱	جنگل تنک تا نیمه انبوه: جنگل دارای تراکم تاج پوشش ۵-۵۰٪	F3
۰.۵	جنگل های در دست کاشت	PF
۰.۶	اراضی شور و نمکزار: اراضی دارای سطوح نمکی (حاوی لایه‌ای از نمک در سطح خاک)	SL
۲.۴	کوبیر: اراضی پست بیابانی بدون پوشش گیاهی و اغلب دارای املاح بسیار زیاد	K
۱۴.۵	اراضی با تراکم تاج پوشش گیاهان مرتعی کمتر از ۵٪ و بیرون زدگی های سنگی	BL
۰.۱	مناطق مسکونی: شامل مناطق شهری و روستایی	URB

۲-۲- تصاویر NDVI سنجنده MODIS

سنجنده MODIS یکی از پنج سنجنده مستقر روی ماهواره تراست است که در نیمه‌های سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد. این سنجنده دارای ۳۶ باند در محدوده ۰.۴ تا ۱۴.۴ میکرومتر طیف الکترومغناطیس است که بیست باند آن در محدوده مرئی و شانزده باند آن در ناحیه حرارتی قرار دارد (Frey et al., 2008).

یکی از شاخص‌هایی که در زمینه پایش تغییرات پوشش گیاهی کاربردهای فراوانی دارد شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است. این شاخص با توجه به رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Rouse et al., 1973).

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

NIR و *RED* در این رابطه، به ترتیب، بازتاب طیفی باند فرورسرخ نزدیک (باند ۲ سنجنده MODIS در محدوده ۸۴۱ تا ۸۷۶ نانومتر) و باند قرمز (باند ۱ سنجنده MODIS در محدوده ۶۲۰ تا ۶۷۰ نانومتر) هستند. دامنه به دست آمده از این شاخص بین ۱- تا ۱+ متغیر است. در این مطالعه، از محصول هشت روزه شاخص NDVI سنجنده MODIS در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ با نام MOD09Q1 با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر استفاده شد. بنابراین، طبق دوره

۲-۳-۲- میان‌نظری

۲-۳-۱- الگوریتم HANTS

الگوریتم HANTS براساس مفهوم تبدیل فوریه گسسته است که برای مدل‌سازی سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای به کار می‌رود (Menenti et al., 1993; Verhoef, 1996; Verhoef et al., 1996; Roerink et al., 2000). در ابتدا، الگوریتم توضیح داده می‌شود و سپس، پارامترهای مورد نیاز برای به‌دست‌آوردن مدلی مورد اعتماد با استفاده از الگوریتم شرح داده می‌شود. اگر y_i یک سری زمانی با N مشاهده باشد (i از ۱ تا N)، این سری زمانی را می‌توان با یک سری فوریه توصیف کرد (رابطه (۲)).

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^M a_j \cos(w_j t_i - \phi_j) \quad \text{رابطه (۲)}$$

w_j فرکانس N دوره هارمونیک در سری فوریه و t_i زمانی است که نمونه N ام دریافت شده است. M تعداد فرکانس سری فوریه ($M \leq N$)، a_j و ϕ_j دامنه و فاز N ام دوره هارمونیک‌اند. از آنجاکه فرکانس صفر فاز ندارد، دامنه مربوط به فرکانس صفر (a_0) با میانگین همه N مشاهده از متغیر y برابر است. فرکانس‌های هارمونیک (w_j) از حاصل ضرب یک فرکانس پایه (مثلاً $w_1 = 2\pi / N$) در اعداد صحیح i ($i = 1, 2, \dots, N$) به‌دست می‌آیند (رابطه (۳)).

$$w_j = \left(\frac{2\pi}{N}\right) \times i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad \text{رابطه (۳)}$$

در الگوریتم HANTS، پس از انتخاب تعداد فرکانس (M) و فرکانس (w_j)، پارامترهای ناشناخته از سری فوریه دامنه (a_j) و ارزش فازها (ϕ_j) هستند که با استفاده از برازش سری زمانی از مشاهدات به‌روش کمترین مربعات^۳ تعیین می‌شوند. برای ایجاد مدلی مورد اعتماد از یک سری زمانی با الگوریتم HANTS، پارامترهایی وجود دارد که کاربر باید آنها را تعریف کند:

1. outlier
2. gap
3. least square method

بازگشت هشت‌روزه، در هر سال ۴۶ تصویر NDVI استفاده شده است. با توجه به بارندگی مناسب و پوشش گیاهی مطلوب در سال ۲۰۱۳ (زارع خورمیزی و غفاریان مالمیری، ۱۳۹۶)، در ابتدا، نقشه‌های مؤلفه‌های هارمونیک سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳ بررسی شد تا معنای فیزیکی هریک از مؤلفه‌های سری فوریه مطابق با انواع پوشش گیاهی تعیین شود و تغییرات این مؤلفه در پوشش‌های متفاوت زمین نیز مطالعه شد. در مرحله بعد، از میانگین اجزای هارمونیک تولیدشده طی سه سال ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ برای بررسی روابط بین تغییرات ارتفاع از سطح دریا، دما و تغییرات اجزای هارمونیک استفاده شد.

یکی از مشکلات تصاویر NDVI مورد استفاده وجود داده‌های پرت^۱ و داده‌های از دست‌رفته^۲ با فواصل بسیار کوتاه و با توزیع پراکنده در سری‌های زمانی است (زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶). یکی از مهم‌ترین علل حضور این داده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای وجود ابر است. در این پژوهش، برای حذف داده‌های از دست‌رفته و دورافتاده و نیز، تولید اجزای هارمونیک مانند تصاویر دامنه و فاز در سری‌های زمانی تصاویر NDVI سال ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS) استفاده شد. جدول ۲ پارامترهای به‌کاررفته در الگوریتم HANTS به‌منظور حذف نویز و تولید اجزای هارمونیک در سری زمانی NDVI را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده به‌منظور بازسازی تصاویر NDVI، با استفاده از الگوریتم HANTS

پارامتر	مقدار
محدوده داده معتبر	۱-۰
دوره پایه	۴۶ تصویر NDVI
تعداد فرکانس	۳
آستانه میزان خطای قابل قبول	۰.۰۲
جهت نقاط دورافتاده	LOW
DOD	۵

فرایندهای تعیین سیگنال مشاهده شده و وزن نسبی آنها فراهم می‌آورد. می‌توان از تحلیل سری فوریه برای تجزیه یک سیگنال پیچیده به اجزای سینوسی یا اجزای کسینوسی استفاده کرد.

رابطه (۲) را می‌توان به صورت ماتریس (رابطه (۴)) نوشت:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(t_1) & \dots & f_M(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(t_N) & \dots & f_M(t_N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$y = Fa \quad \text{رابطه (۵)}$$

اگر دو طرف رابطه را در ترانهاده ماتریس F ضرب کنیم، خواهیم داشت:

$$F^T y = F^T F a \quad \text{or} \quad a = (F^T F)^{-1} F^T y \quad \text{رابطه (۶)}$$

سپس بردار (a) ، با روش حداقل مربعات، برآوردی از دامنه و فاز را برای هر یک از مؤلفه‌ها به دست می‌آورد. تبدیل فوریه سریع (FFT) یک الگوریتم برای محاسبه ضرب ماتریس در رابطه (۶) با استفاده از تعداد نسبتاً کمی از عملیات محاسباتی است.

نتایج حاصل از FFT، در یک سری زمانی با تعداد N داده، دامنه‌ها و فازهای تمامی فرکانس‌ها (N فاز و N فرکانس) را شامل می‌شود.

برطبق بسط سری فوریه، هر تابع متناوب را می‌توان از مجموع چند موج سینوسی یا کسینوسی با فرکانس‌های متفاوت به دست آورد. بنابراین، می‌توان موج غیرسینوسی حاصل را به مؤلفه‌های معنی‌دار سینوسی با فرکانس‌های گوناگون تجزیه کرد. با معکوس نمودن بسط سری فوریه می‌توان، از مجموع موج‌های سینوسی حاصل، شکل موج اصلی را به دست آورد. برای مثال، شکل ۳ (الف) سیگنال اصلی روند تغییرات شاخص NDVI در طول یک سال را برای یک نقطه نشان می‌دهد. با استفاده از الگوریتم HANTS و

محدوده داده‌های معتبر^۱: محدوده مورد قبول از مقادیر مشاهده شده است. مشاهدات خارج از این محدوده، در مرحله اول، با اختصاص وزن صفر به آنها حذف می‌شوند؛

دوره: تعداد نمونه‌های زمانی در هر مؤلفه‌ی دوره‌ای در سری فوریه است؛

تعداد فرکانس (NOF):^۲ NOF میزان جزئیاتی را، که می‌تواند در سیگنال بازسازی استفاده شود، تعیین می‌کند. تعداد فرکانس پایین سیگنالی با جزئیات کمتر از یک تعداد فرکانس بالا ایجاد می‌کند؛

جهت نقاط دورافتاده (پرت):^۳ جهت نقاط دورافتاده (پرت) را با اشاره به مدل فعلی منحنی نشان می‌دهد. برای نمونه، پوشش ابر منجر به کاهش مقادیر NDVI می‌شود؛ بنابراین، جهت نقاط دورافتاده در الگوریتم را به صورت کاهش (Low) انتخاب می‌کنیم؛

آستانه میزان خطای مورد قبول (FET):^۴ انحراف مطلق از رقم کنونی منحنی در جهت انتخاب شده را، که هنوز هم مورد قبول است، مشخص می‌کند. پس از هر تکرار، مشاهدات دارای انحراف بزرگ‌تر از FET با عنوان نقاط دورافتاده تنظیم و با اختصاص وزن صفر به آنها، از محاسبات حذف می‌شوند؛

درجه فرامعین‌بودن (DOD):^۵ حداقل تعداد نقاط داده‌های اضافی را نشان می‌دهد که باید در برازش منحنی استفاده شوند. تعداد مشاهدات معتبر باید همیشه بیشتر از تعداد پارامترهای مورد نیاز برای توصیف سیگنال باشد ($2 \times \text{NOF} - 1$). از سویی، DOD فقط زمانی کارایی دارد که FET کوچک انتخاب شود. تکرار در الگوریتم HANTS در دو حالت خاتمه می‌یابد: الف) زمانی که تعداد نقاط باقی‌مانده کمتر از $\text{DOD} + 2\text{NOF} - 1$ باشد؛ ب) تمامی نقاط، قبل از رسیدن به مقدار $\text{DOD} + 2\text{NOF} - 1$ ، از مقدار FET کوچک‌تر باشند.

1. valid data range
2. Number of Frequency
3. direction of outliers
4. Fit Error Tolerance

۲-۳-۲- تبدیل فوریه سریع (FFT)

تجزیه توابع متناوب به اجزای آن بینش مفیدی را در

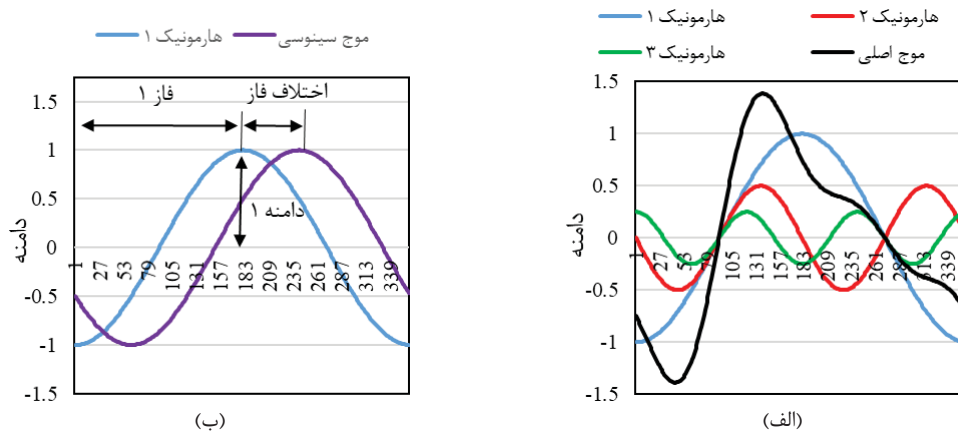
مؤلفه‌های سری فوریه مطابق با انواع پوشش گیاهی و پوشش‌های متفاوت زمین، بررسی شد. باید توجه داشت که فاز و دامنهٔ سوم در یک سری زمانی یک‌ساله از طریق فرکانس‌های بالا استخراج می‌شود. بنابراین، هارمونیک‌های سوم و بعد از آن تحت تأثیر نویز و پوشش ابر قرار می‌گیرند و کمتر حاوی اطلاعات پوشش گیاهی‌اند. از این رو، نقشه‌ها و سایر اطلاعات آن در این مطالعه بررسی نشد. به‌منظور بررسی اثر ارتفاع و دما در مؤلفه‌های سری‌های فوریه، نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع در طبقات ۱۵۰متری طبقه‌بندی شد و سپس، رابطهٔ میانگین ارتفاع هر طبقه با میانگین مؤلفه‌های سری‌های فوریهٔ آن طبقه مورد بررسی قرار گرفت. باید توجه داشت در این مرحله، برای ایجاد مدل‌ها و روابط دقیق، از میانگین اجزای هارمونیک سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ استفاده شد. به‌منظور بررسی اثر ارتفاع از سطح دریا و کاهش دما در تغییرات فاز سری‌های زمانی، با استفاده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقهٔ مورد مطالعه، میانگین دمای فصل بهار در هر ایستگاه با توجه به آمار پانزده‌سالهٔ هر ایستگاه به‌دست آمد (پانزده ایستگاه). سپس، رابطهٔ ارتفاع از سطح دریا و تغییرات میانگین دمای فصل بهار در منطقهٔ مورد مطالعه کسب شد و در نهایت، تأثیر دما و ارتفاع از سطح دریا در تغییرات زمان شروع رشد و فنولوژی گیاهان مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ روند نمای مراحل پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

5. Degree of OverDeterminedness

با در نظر گرفتن تعداد سه فرکانس، سیگنال اصلی را می‌توان به سه موج کسینوسی، با دامنه و فرکانس متفاوت، تجزیه کرد (شکل ۳ الف). از میان موج‌های کسینوسی حاصل شده، آن موجی را، که با شکل موج اصلی هم‌فرکانس باشد، هارمونیک اول در نظر می‌گیریم. اگر فرکانس موج مورد نظر دو برابر موج اصلی باشد، آن را هارمونیک دوم و اگر فرکانس آن n برابر باشد، آن را هارمونیک n ام می‌نامیم. هر یک از موج‌های سینوسی یا کسینوسی، خود، دارای دامنه و فاز و فرکانس خاصی‌اند. از آنجاکه روند تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان دوره‌ای است، با تجزیهٔ سیگنال حاصل می‌توان به اطلاعات مفیدی در زمینهٔ شناخت و طبقه‌بندی فنولوژی گیاهان دست یافت. در شکل ۳ (ب)، مفاهیم دامنه و فاز و اختلاف فاز دو موج نشان داده شده است. دامنهٔ موج به بیشترین میزان جابه‌جایی از میانگین و فاز به کسری از چرخهٔ موج، که نسبت به مبدأ سپری شده است، گفته می‌شود.

۴-۲- روش کار

در پژوهش حاضر، نخست، با استفاده از تصاویر NDVI سنجندهٔ MODIS و نرم‌افزار HANTS و نیز، پارامترهای جدول ۲، مؤلفه‌های سری‌های فوریه یا همان تصاویر دامنه و فاز در هر یک از سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ تولید شد. با استفاده از نقشهٔ پوشش زمین و تصاویر دامنه و فاز تولید شده در سال ۲۰۱۳ (با توجه به بارندگی مناسب این سال)، ابتدا، معنای فیزیکی هر یک از



شکل ۳. موجی فرضی و اجزای هارمونیک آن (الف)؛ مفاهیم متفاوت دامنه، فاز و اختلاف فاز (ب)



شکل ۴. روند مراحل پژوهش

۳- نتایج و بحث

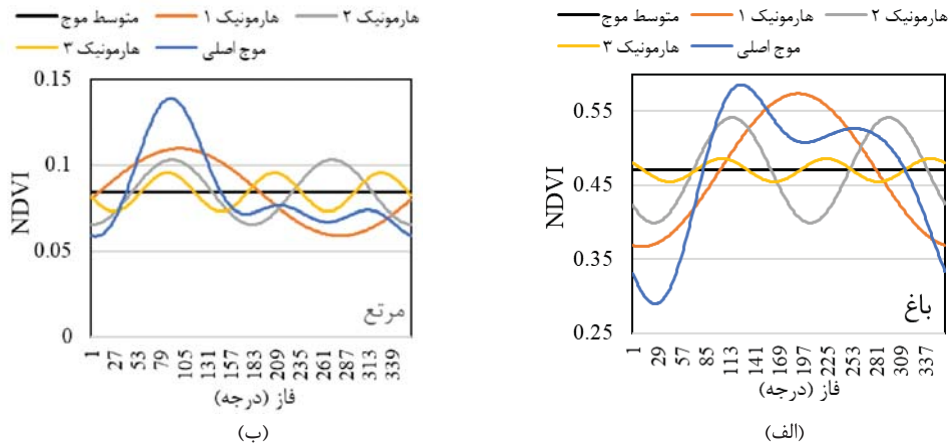
۳-۱- تحلیل میزان و تغییرات اجزای هارمونیک سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳ در پوشش‌های متفاوت زمین در ابتدا، به منظور نمایش رفتار و عملکرد الگوریتم HANTS، مقادیر دامنه و فاز حاصل از تغییرات سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳، در دو پیکسل با کاربری مرتع و باغ، استخراج شد (جدول ۳). شکل ۵ سیگنال اصلی یا همان تغییرات NDVI را در طول یک سال و هارمونیک‌های آن را، براساس پارامترهای دامنه و فاز، در دو پیکسل با کاربری مرتع و باغ نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳ و شکل ۵، باغات دامنه صفر و دامنه اول و دوم و سوم بالاتری به نسبت پیکسل‌های دارای پوشش‌های طبیعی و مرتعی دارند زیرا درصد پوشش گیاهی آنها بیشتر است و طی برگ‌داز شدن درختان در آغاز فصل رشد و ریزش برگ در پایان فصل، تغییراتی ناگهانی در آنها رخ می‌دهد. میزان فاز اول در پیکسل با

کاربری باغ تقریباً در محدوده ۱۸۰ درجه قرار می‌گیرد؛ در صورتی که میزان فاز اول در پیکسل با کاربری مرتع کمتر از ۱۸۰ درجه است. با توجه به اینکه فاز در تصاویر شانزده‌بیتی به ۳۶۰ درجه تقسیم می‌شود، هر درجه در دایره مثلثاتی تقریباً معادل یک روز در یک سری زمانی یک‌ساله است. در نتیجه، واقع شدن فاز اول در محدوده ۱۸۰ درجه نشان می‌دهد که حداکثر میزان NDVI در هارمونیک اول در میانه سری زمانی یک‌ساله‌ای قرار گرفته است؛ در حالی که هرچه میزان فاز اول کمتر از ۱۸۰ درجه باشد، یعنی حداکثر میزان NDVI در شش‌ماهه اول سری زمانی رخ داده است. این موضوع نشان‌دهنده پوشش‌های فصلی و گذار است که در فصل بهار و ابتدای تابستان سبزند. میزان فاز دوم، با توجه به زمان‌بندی پوشش گیاهی دارای دوره رشد شش‌ماهه، در محدوده‌های متفاوتی قرار می‌گیرد.

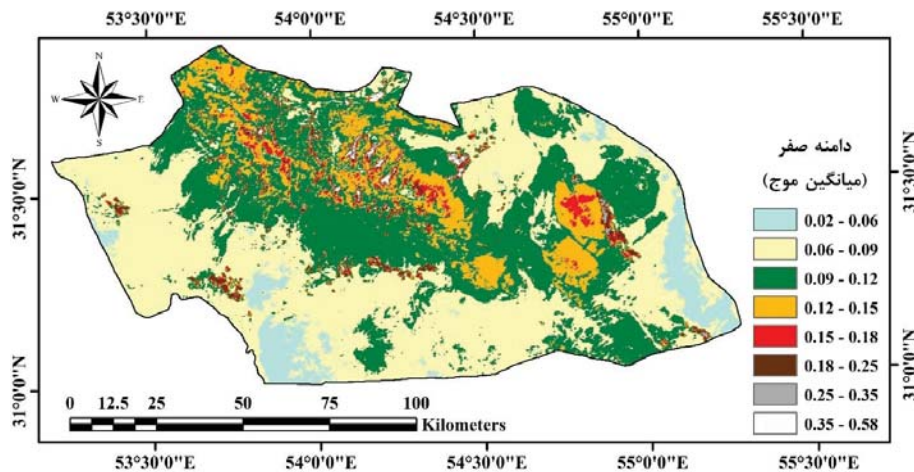
نقشه میانگین NDVI سالیانه یا هارمونیک صفر سری زمانی سال ۲۰۱۳ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که گفته شد، فرکانس صفر فاز ندارد و دامنه مربوط به فرکانس صفر (a_0) با میانگین همه‌ی N مشاهده از متغیر γ در طول زمان برابر است. به عبارت دیگر، دامنه صفر میانگین NDVI در سری زمانی مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، هرچه از مناطق پست دشتی به سمت ارتفاعات بالاتر حرکت کنیم (شکل ۱، نقشه ارتفاعی منطقه) تقریباً میانگین NDVI افزایش می‌یابد. بیشترین میانگین NDVI در اراضی زراعی و باغی مشاهده می‌شود.

جدول ۳. میزان دامنه و فاز در دو سری زمانی یکساله NDVI

نام	مرتج	باغ
دامنه صفر	۰.۰۸۵	۰.۴۷۰
دامنه ۱	۰.۰۲۵	۰.۱۰۳
دامنه ۲	۰.۰۱۸	۰.۷۱۱
دامنه ۳	۰.۱۱۲	۰.۱۵۶
فاز ۱ (درجه)	۱۰۰	۱۹۱
فاز ۲ (درجه)	۱۸۳	۲۳۰
فاز ۳ (درجه)	۲۶۰	۳۱۰



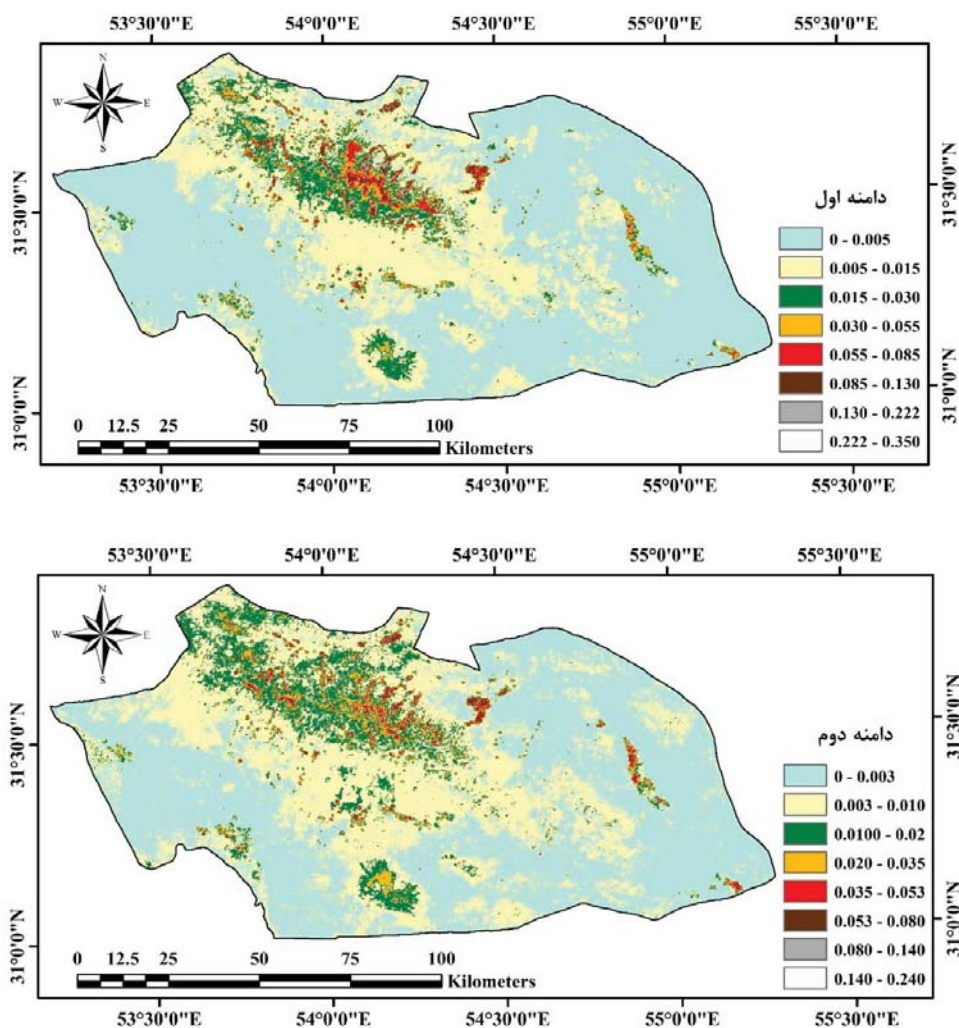
شکل ۵. تغییرات NDVI در طول سال ۲۰۱۳ و هارمونیک‌های آن در دو پیسکل، با کاربری مرتج (ب) و باغ (الف)



شکل ۶. نقشه دامنه صفر یا میانگین سیگنال رشد، در سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳

از دیگر سو، با افزایش پوشش گیاهی، میزان تغییرات آن و دامنه هارمونیک اول افزایش می‌یابد. حداکثر میزان دامنه اول وقتی رخ می‌دهد که حداکثر میزان سبزیگی را در یک پوشش گیاهی برگ‌ریز داشته باشیم. شکل ۷ (پایین) نقشه دامنه دوم هارمونیک سال ۲۰۱۳ را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه نام‌برده، الگوی تغییرات دامنه دوم هارمونیک همانند دامنه اول هارمونیک است؛ به طوری که، با افزایش ارتفاع از سطح دریا، میزان دامنه دوم در سطح چشم‌انداز کلی منطقه افزایش می‌یابد.

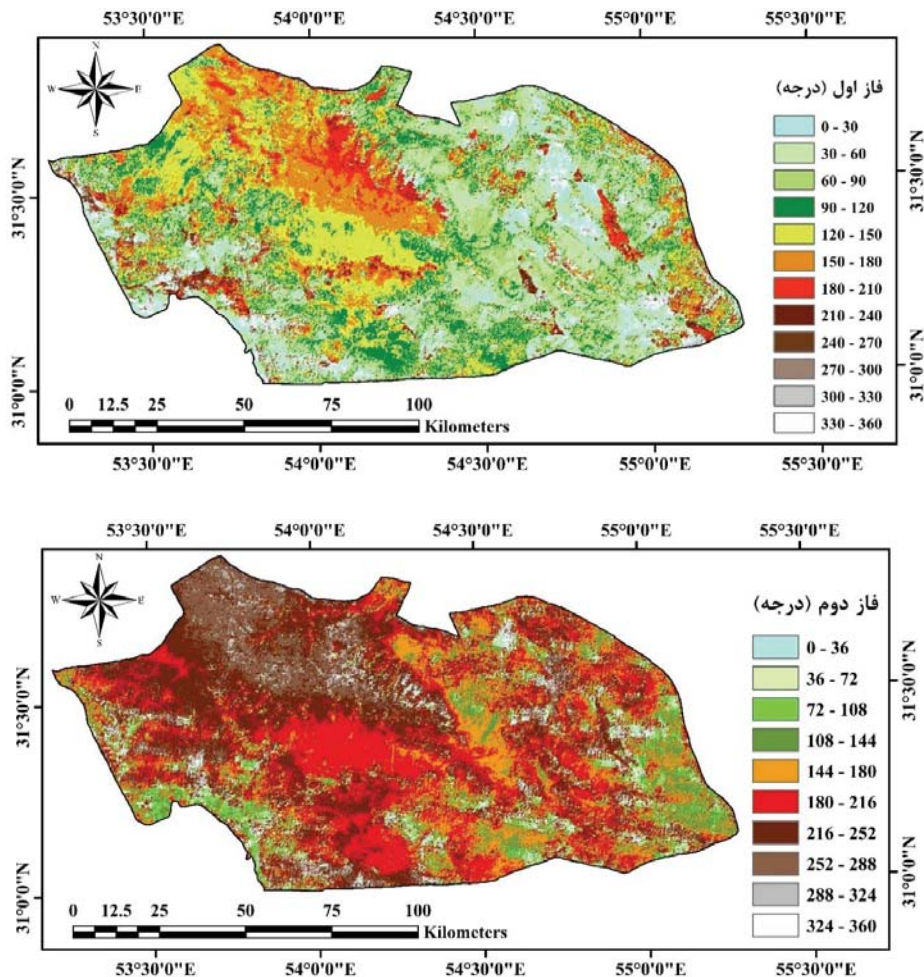
دامنه حاصل از هارمونیک اول سری زمانی NDVI در سال ۲۰۱۳ در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ و نقشه پوشش زمین (شکل ۲)، بالاترین میزان دامنه هارمونیک اول در اراضی زراعی و باغات منطقه مشاهده می‌شود. همچنین، میزان دامنه اول، با حرکت به سمت ارتفاعات شیرکوه، تقریباً افزایش می‌یابد. دامنه هارمونیک اول نشان‌دهنده تغییرات تولیدات گیاهی در طول سال است. به عبارت دیگر، در مناطق فاقد پوشش یا با پوشش گیاهی کم، چون تغییرات سالیانه NDVI در این مناطق اندک است، میزان دامنه سالیانه یا هارمونیک اول نیز پایین است.



شکل ۷. نقشه‌های دامنه اول هارمونیک (بالا) و دامنه دوم هارمونیک (پایین) سری زمانی NDVI در سال ۲۰۱۳

تغییر گویای به تعویق افتادن آغاز رشد و فرایندهای فنولوژی گیاهان دارای چرخه‌های رشد سالیانه یا پوشش‌های باثبات، همانند درختان، است که امکان دارد به دلیل کاهش دمای بر اثر افزایش ارتفاع باشد. ارزش فاز حاصل از هارمونیک دوم سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳ در شکل ۸ (پایین) نشان داده شده است. طبق شکل، با افزایش ارتفاع، ارزش فاز حاصل از هارمونیک دوم نیز افزایش می‌یابد؛ یعنی شروع چرخه‌های شش‌ماهه در سری‌های زمانی تغییرات پوشش گیاهی با تأخیر همراه می‌شود.

ارزش فاز حاصل از هارمونیک اول سری زمانی NDVI در سال ۲۰۱۳ در شکل ۸ (بالا) نشان داده شده است. با توجه به شکل، در مناطق باغی، ارزش فاز اول تقریباً در محدوده ۱۸۰ درجه قرار گرفته است. در اراضی مرتعی منطقه مورد مطالعه، ارزش فاز حاصل از هارمونیک اول کمتر از ۱۸۰ درجه است؛ بنابراین، در این پوشش‌ها، حداکثر میزان NDVI در شش‌ماهه اول سری زمانی رخ داده است. از سویی، با توجه به شکل ۸ (بالا)، با حرکت به سمت ارتفاعات شیرکوه، ارزش فاز اول افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، شروع چرخه‌های سالیانه تغییرات NDVI با تأخیر مواجه می‌شود. این



شکل ۸. نقشه‌های فاز اول هارمونیک (بالا) و فاز دوم هارمونیک (پایین) سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳

درجه اختلاف فاز دارند (جدول ۴). به دیگر سخن، چرخه‌های سالیانه در سری‌های زمانی مراتع متراکم، به نسبت مراتع کم تراکم و نیمه متراکم، به ترتیب، ۵۲ و ۳۵ روز با تأخیر مواجه می‌شود. چرخه‌های شش ماهه نیز، در سری‌های زمانی مراتع متراکم، $248 - 221 = 27$ درجه با مراتع نیمه متراکم و $192 - 248 = 56$ درجه با مراتع کم تراکم اختلاف فاز دارد.

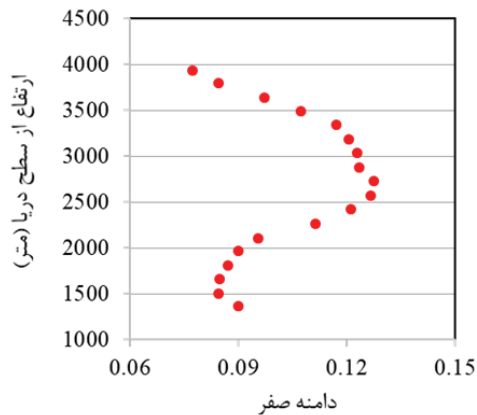
در مجموع و بر اساس نتایج، هارمونیک صفر نشان دهنده سطح کلی پوشش گیاهی است و فاز اول هارمونیک، در یک سری زمانی یک ساله، زمان شروع رشد گیاهان چندساله را مشخص می‌کند؛ در صورتی که فاز دوم در یک سری زمانی یک ساله، زمان بندی شروع رشد گیاهان دارای دوره رشد شش ماهه یا دوره‌های رشد کوتاه و فصلی است زیرا بیشترین میزان واریانس، در گیاهان چندساله دارای یک دوره رشد، با استفاده از هارمونیک اول و در گیاهان فصلی با دو دوره رشد یا یک دوره رشد کوتاه در ابتدای فصل، از طریق هارمونیک دوم کنترل می‌شود (Jakubauskas et al., 2002). فاز سالیانه موقعیت زاویه‌ای شروع سیگنال سالیانه و فاز شش ماهه، به طور ذاتی، نشان دهنده میزان نوسان و موقعیت زاویه‌ای یک منحنی نیمه ساله یا شش ماهه است (Eastman et al., 2013). با این حال، باید توجه داشت که تفسیر دامنه و فازهای شش ماهه مشکل است (Eastman et al., 2013). بر اساس نتایج، می‌توان از مؤلفه‌های هارمونیک سری‌های زمانی برای شناخت ویژگی‌های شروع رشد و فنولوژی گیاهان استفاده کرد. این نتایج را سایر مطالعات در این زمینه تأیید می‌کنند.

جدول ۴ میانگین میزان دامنه صفر، اول، دوم و سوم و فازهای اول، دوم و سوم سری زمانی NDVI سال ۲۰۱۳ را در مراتع متراکم، نیمه متراکم، کم تراکم و اراضی زراعی و باغی نشان می‌دهد. طبق جدول ۴، میزان دامنه صفر، اول، دوم و سوم در اراضی زراعی و باغی بیشتر از سایر پوشش‌های گیاهی است زیرا این اراضی درصد پوشش گیاهی بالاتری دارند. مراتع متراکم نیز، به علت داشتن درصد پوشش گیاهی بالاتر از مراتع کم تراکم و نیمه متراکم، دارای مقادیر دامنه صفر، اول، دوم و سوم بالاتری‌اند. میزان فاز اول هارمونیک در پوشش‌های باغی، با توجه به ثبات بیشتر پوشش گیاهی در طول فصل‌های سال، تقریباً در محدوده ۱۸۰ درجه قرار می‌گیرد؛ در صورتی که در مراتع کم تراکم تا متراکم، میزان ارزش فاز سالیانه کمتر از ۱۸۰ درجه است که نشان می‌دهد حداکثر پوشش گیاهی در نیمه اول سری زمانی رخ می‌دهد زیرا، با توجه به اقلیم خشک منطقه مورد مطالعه، فقط در ابتدای فصل بهار شرایط برای حضور گیاهان فراهم است. به علاوه، از آنجاکه مراتع کم تراکم در مناطق پست و مراتع نیمه متراکم در مناطق دامنه‌ای کوهستان و مراتع متراکم در ارتفاعات بالای کوهستان قرار گرفته‌اند، این تغییرات ارتفاع از سطح دریا منجر به افزایش میزان فاز اول و دوم هارمونیک شده است. به عبارت دیگر، فصل رشد در مراتع متراکم، که در ارتفاعات قرار گرفته‌اند، دیرتر از مراتع نیمه متراکم و کم تراکم آغاز می‌شود. مراتع متراکم، در مقایسه با مراتع کم تراکم و نیمه متراکم، به ترتیب، به میزان $113 - 165 = 52$ و $130 - 165 = 35$

جدول ۴. میانگین میزان مؤلفه‌های سری‌های فوری در چند پوشش متفاوت زمین، در سال ۲۰۱۳

نوع پوشش	دامنه صفر	دامنه اول	دامنه دوم	دامنه سوم	فاز اول (درجه)	فاز دوم (درجه)	فاز سوم (درجه)
مراتع متراکم	۰.۱۲۶	۰.۰۲۶	۰.۰۱۶	۰.۰۰۹	۱۶۵	۲۴۸	۱۹۶
مراتع نیمه متراکم	۰.۱۰۶	۰.۰۱۰	۰.۰۰۷	۰.۰۰۵	۱۳۰	۲۲۱	۲۳۹
مراتع کم تراکم	۰.۰۸۷	۰.۰۰۵	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۱۱۳	۱۹۲	۲۶۴
اراضی باغی و زراعی	۰.۱۹۴	۰.۰۴۳	۰.۰۲۳	۰.۰۱۶	۱۷۶	۲۲۱	۲۰۳

شرایط رطوبت و دما در آنها، در مدت زمان کوتاهی، برای رشد پوشش گیاهی مهیاست.



شکل ۹. رابطه بین ارتفاع از سطح دریا و دامنه صفر یا میانگین شاخص NDVI سری زمانی، براساس سری‌های زمانی ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵

روابط بین ارتفاع از سطح دریا و تغییرات میانگین دامنه اول و فاز اول هارمونیک سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ (الف)، با افزایش ارتفاع از سطح دریا، میزان دامنه اول هارمونیک افزایش می‌یابد. این افزایش به دو دلیل رخ داده است؛ اول اینکه، با افزایش ارتفاع از سطح دریا، میانگین پوشش گیاهی افزایش می‌یابد و دوم اینکه تغییرات ناگهانی در ظهور پوشش گیاهی، به دلیل ذوب برف، افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ (ب) رابطه بین افزایش ارتفاع از سطح دریا و تغییرات میانگین فاز سالیانه یا میانگین فاز اول سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. رابطه به دست آمده مشخص می‌کند تقریباً، فاز هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع در منطقه مورد بررسی، فاز سالیانه ۵.۵ درجه افزایش می‌یابد یا، به عبارت دیگر، ۵.۵ درجه اختلاف فاز ایجاد می‌شود. از آنجا که تقریباً هر درجه فاز اول در یک سری زمانی یک‌ساله معادل یک روز است؛ نتیجه‌گیری نهایی چنین می‌شود که، طبق

1. strength

طبق نتایج مطالعه‌ای، میانگین NDVI یا هارمونیک مرتبه صفر نشان‌دهنده سطح کل پوشش گیاهی بوده است (Jiang et al., 2008). دامنه هارمونیک اول بیانگر تغییرات تولیدات گیاهی در طول سال است. میزان فاز هارمونیک اول زمان سبز شدن گیاهان محسوب می‌شود؛ در حالی که هارمونیک دوم نشان‌دهنده قدرت^۱ و زمان بندی پوشش گیاهی شش‌ماهه است (Jiang et al., 2008). در پژوهشی دیگر نیز، نشان داده شد هیستوگرام‌های آغاز فصل رشد برای کلاس‌های متفاوت پوشش زمین، با استفاده از الگوریتم HANTS، با دانش عمومی در مورد زمان فنولوژیکی گیاهان هم‌خوانی دارد (De Wit and Su, 2005).

۲-۳- رابطه بین ارتفاع و تغییرات دامنه و فاز در پوشش‌های مرتعی

شکل ۹ روند تغییرات میانگین دامنه صفر سری‌های زمانی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ را، با تغییرات ارتفاع از سطح دریا، نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، مشخص می‌شود دامنه صفر سری زمانی NDVI تا ارتفاع ۲۵۰۰ متری از سطح دریا روند افزایشی دارد و سپس، با افزایش ارتفاع از ۲۵۰۰ متر، روند کاهشی می‌شود. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در منطقه‌ای خشک واقع شده است؛ با افزایش ارتفاع از سطح دریا، میزان بارش‌های کوهستانی افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان پوشش گیاهی، با افزایش ارتفاع از سطح دریا، افزایش می‌یابد اما این افزایش تا ارتفاع ۲۵۰۰ متر روند مثبت دارد. از ارتفاع ۲۵۰۰ متر به بالا، به علت حضور پیوسته برف در این ارتفاعات و داده‌های از دست‌رفته در طول فصل زمستان، حضور پوشش گیاهی با ذوب برف رخ داده است. در نتیجه، حضور داده‌های با NDVI صفر در ارتفاعات (که مربوط به پوشش ابر و برف است) باعث کاهش هارمونیک صفر از ارتفاع ۲۵۰۰ متر شده است. از طرفی، باید توجه داشت که ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر بیشتر شامل مناطق صخره‌ای و سنگی دارای خاک کم‌عمق می‌شود که

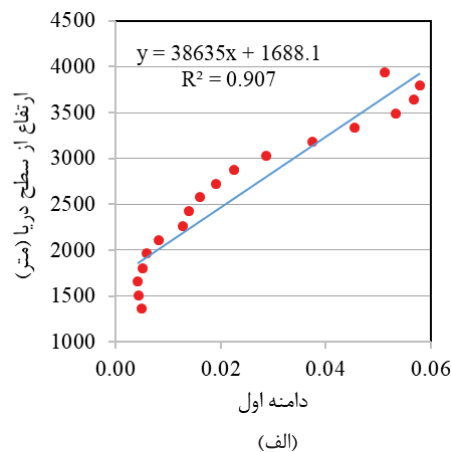
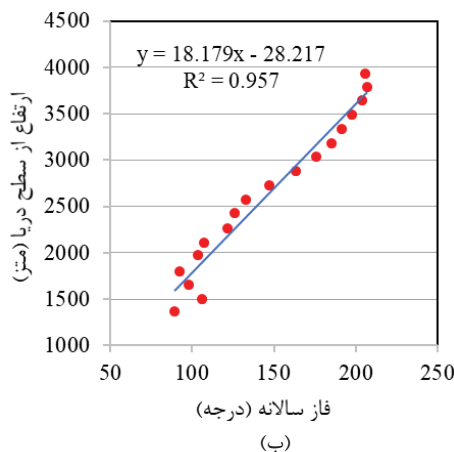
دریا، چرخه‌های سالیانه در سری‌های زمانی NDVI تقریباً با ۵ تا ۶ (۵.۵) روز تأخیر مواجه می‌شود. رابطه (۷) ارتباط بین ارتفاع از سطح دریا و فاز دوم را نشان می‌دهد. این رابطه خطی، تا ارتفاع ۳۰۰۰ متر از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه، صادق است. رابطه (۷) با ضریب تبیین ۰.۹۷۸ نشان می‌دهد، با افزایش هر ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا در فاز شش‌ماهه، ۸ درجه اختلاف فاز و به عبارتی، ۴ روز تأخیر در چرخه‌های شش‌ماهه ایجاد می‌شود زیرا هر درجه فاز شش‌ماهه در یک سری زمانی یک‌ساله معادل نصف روز است.

$$y = 12.167x - 519.05 \quad (7)$$

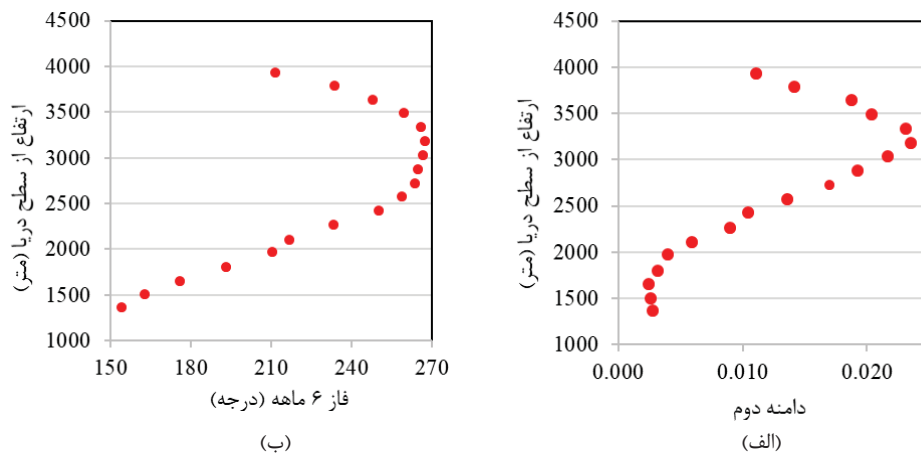
در این رابطه، x میزان فاز شش‌ماهه و y ارتفاع از سطح دریاست. از ارتفاع ۳۰۰۰ متر به بالا، میزان فاز شش‌ماهه کاهش می‌یابد. علت این کاهش ممکن است کم‌شدن پوشش گیاهی این مناطق و بازتاب عناصر غیر از پوشش گیاهی باشد. از سویی، وجود برف و ابر بیشتر در ارتفاعات سبب می‌شود، با حرکت از فرکانس‌های اول هارمونیک به سمت فرکانس‌های بالاتر، میزان خطا افزایش یابد زیرا فرکانس‌های بالا شامل دوره‌های کوتاه زمانی‌اند که این دوره‌های کوتاه تحت تأثیر داده‌های از دست‌رفته بر اثر پوشش برف و ابر پیوسته در زمان، به‌ویژه در ارتفاعات بالا، قرار می‌گیرند.

رابطه مورد نظر، با هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع از سطح دریا، تقریباً ۵ تا ۶ (۵.۵) روز تأخیر در رشد و فرایندهای فنولوژی گیاهان، به‌ویژه گیاهان چندساله دارای یک دوره رشد سالیانه، رخ می‌دهد. این رابطه کاملاً کاربردی به‌شمار می‌رود و در مدیریت اراضی باغی، زراعی و مراتع سودمند است.

روند تغییرات میانگین دامنه دوم و فاز دوم هارمونیک سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵، با تغییرات ارتفاع از سطح دریا، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تقریباً تا ارتفاع ۳۰۰۰ متر از سطح دریا، دامنه دوم افزایش می‌یابد و سپس، با افزایش بیشتر ارتفاع، روندی کاهش را نشان می‌دهد (شکل ۱۱-راست). علت افزایش دامنه دوم افزایش پوشش گیاهی و همچنین، حضور بیشتر پوشش‌های گیاهی فصلی با دامنه تغییرات شش‌ماهه زیاد است. اما در ارتفاعات بالا، به‌ویژه بیشتر از ۳۰۰۰ متر، میزان پوشش گیاهی کاهش می‌یابد و در نتیجه، تغییرات پوشش گیاهی در بازه زمانی شش‌ماهه کمتر می‌شود و دامنه دوم هم کاهش می‌یابد. شکل ۱۱-چپ تغییرات میانگین فاز دوم سری زمانی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ را، در طبقات ارتفاعی متفاوت، نشان می‌دهد. فاز دوم تا ارتفاع ۳۰۰۰ متر افزایش می‌یابد و سپس، روندی کاهش نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً مشخص شد، با افزایش هر ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح



شکل ۱۰. رابطه بین ارتفاع از سطح دریا و دامنه اول هارمونیک (الف) و ارتباط میان ارتفاع از سطح دریا و فاز اول هارمونیک (ب)، براساس سری‌های زمانی ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵



شکل ۱۱. رابطه بین ارتفاع از سطح دریا و دامنه دوم هارمونیک (الف) و نیز ارتفاع از سطح دریا و فاز دوم هارمونیک (ب) براساس سری‌های زمانی ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶

۵.۵ (۵ تا ۶ روز) و چهارروزه مواجه می‌شوند. این بدین معنی است که زمان شروع رشد گیاهان، به‌ویژه گیاهان چندساله دارای یک دوره رشد سالانه، ۵ تا ۶ روز با تأخیر مواجه می‌شود زیرا، همان‌طور که گفته شد، بیشترین میزان تغییرات در گیاهان چندساله دارای یک دوره رشد از طریق هارمونیک اول کنترل می‌شود (Jakubauskas et al., 2002). بررسی رابطه فاز دوم با تغییرات ارتفاع از سطح دریا نشان داد که، با افزایش هر ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا، چرخه‌های شش‌ماهه در سری‌های زمانی NDVI دچار تأخیر ۸ درجه‌ای یا چهارروزه می‌شوند. به عبارت دیگر، با افزایش هر ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا، فرایند رشد و فنولوژی گیاهان فصلی دارای دوره رشد کوتاه با تأخیری چهارروزه مواجه می‌شود زیرا بیشترین میزان تغییرات گیاهان فصلی دارای دو دوره رشد یا یک دوره رشد کوتاه در ابتدای فصل از طریق هارمونیک دوم کنترل می‌شود (Jakubauskas et al., 2002). علت تأخیر در آغاز رشد و فرایندهای فنولوژی گیاهان، در ارتفاعات و مناطق کوهستانی، کاهش دماست که با افزایش ارتفاع از سطح دریا رخ می‌دهد. به‌طور کلی، با توجه به تغییرات فاز سالانه و شش‌ماهه گیاهان با افزایش ارتفاع و همچنین تغییرات دمای محیط با افزایش ارتفاع مشخص می‌شود

۳-۳- رابطه بین ارتفاع و تغییرات دمای هوا و اثر آن در فنولوژی و آغاز رشد گیاهان

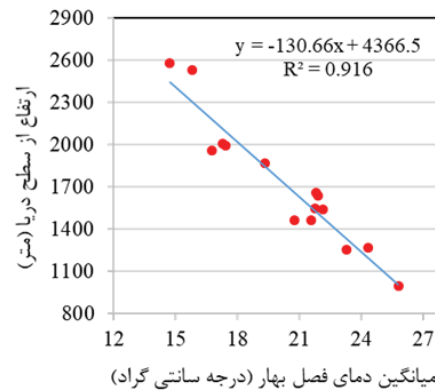
در مناطق کوهستانی، فرایندهای فنولوژیکی و شروع رشد گیاهان به‌شدت به تغییرات آب‌وهوایی ناشی از ارتفاعات وابسته است (Pellerin et al., 2012). دمای فصل بهار یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رشد و فرایندهای فنولوژی محسوب می‌شود (Wu et al., 2016). شکل ۱۲ رابطه بین ارتفاع و تغییرات میانگین دمای هوا در فصل بهار را، در پانزده ایستگاه هواشناسی از منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۲، با افزایش تقریباً هر ۱۲۵ متر ارتفاع از سطح دریا، دمای هوا یک درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. این رابطه با توجه به موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی از ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا صادق است. کاهش دما با افزایش ارتفاع از سطح دریا منجر به تأخیر در فرایندهای آغاز رشد و فنولوژی گیاهان می‌شود. با توجه به نتایج مرحله قبل، با افزایش هر ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا تا ارتفاع ۳۰۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه، فاز سالانه ۵.۵ (۵ تا ۶ روز) درجه و همچنین، فاز شش‌ماهه ۸ درجه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، چرخه‌های سالانه و شش‌ماهه در سری زمانی NDVI، با افزایش ۱۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا، با تأخیر

فنولوژی و آغاز رشد گیاهان این ناحیه در دسترس نبود؛ نتایج پژوهش‌های ذکر شده نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از اجزای هارمونیک سری‌های زمانی NDVI سنجنده MODIS به منظور شناخت اثر عوامل محیطی، به‌ویژه دما و ارتفاع، در تغییرات فنولوژی گیاهان استفاده شد. در ابتدا، معنای فیزیکی مؤلفه‌های سری‌های فوریه بررسی شد و سپس، تغییرات مؤلفه‌های سری‌های فوریه به نسبت تغییرات ارتفاع از سطح دریا و دما مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با استفاده از مؤلفه‌های فیزیکی سری‌های فوریه، اثبات شد کاهش ۱ درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای فصل بهار، که با افزایش ارتفاع از سطح دریا از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر رخ می‌دهد، به تأخیر هفت‌روزه در آغاز رشد گیاهان چندساله و تأخیر پنج‌روزه در گیاهان فصلی منجر می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت بسیار بالای الگوریتم HANTS و سری‌های فوریه در شناخت تأثیرات عوامل اقلیمی در فنولوژی گیاهان است. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در زمان‌بندی فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری از مراتع مفید واقع شود. در واقع، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق بیان این نکته است که وجود ارتفاعات در منطقه می‌تواند، در صورت وجود شرایط لازم، امکان کاشت و برداشت محصولی را در بیشتر فصل‌های سال، فقط به دنبال فراهم‌بودن شرایط دمایی (به دلیل وجود ارتفاع)، مهیا کند. این موضوع، به خصوص در کشور ایران که دارای توپوگرافی غیرهم‌سطح (مثلاً برخلاف بسیاری از مناطق اروپا) است، اهمیت فراوانی دارد. همچنین، مدیریت تاریخ کشت و امکان کاشت یک محصول در زمان‌های متفاوت، اما در ارتفاعات متفاوت، با استفاده از الگوریتم HANTS امکان‌پذیر خواهد بود.

که با هر یک درجه سانتیگراد کاهش دما به علت افزایش ارتفاع از سطح دریا، شروع رشد و فرایندهای فنولوژی گیاهان چندساله و فصلی به ترتیب ۷ و ۵ روز با تأخیر مواجه می‌شود.



شکل ۱۲. رابطه بین ارتفاع از سطح دریا و تغییرات میانگین دمای فصل بهار، در پانزده ایستگاه هواشناسی از منطقه مورد مطالعه

تأثیرات دما در فرایندهای شروع رشد و فنولوژی گیاهان در مناطق متفاوت ممکن است، با توجه به میزان رطوبت هوا و نوع گونه و سایر عوامل، متفاوت باشد. نتایج بررسی اثر کاهش دما با افزایش ارتفاع در گراسلندهای فلات تبت نیز نشان داد که، در فصل بهار، فنولوژی گیاهان در ارتفاعات بالا، به نسبت ارتفاعات پایین‌تر، پاسخی قوی‌تر به دما می‌دهد؛ به طوری که فرایندهای فنولوژی گیاهان، به‌ازای ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دمای ماه مه در ارتفاع ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر، ۱ تا ۲ روز و در ارتفاع ۵۰۰۰ تا ۵۵۰۰ متر، ۷ تا ۹ روز زودتر رخ می‌دهد (Liu et al., 2016). در سایر پژوهش‌ها، تسریع شروع رشد و فنولوژی گیاهان به میزان ۴.۱ روز (Piao et al., 2011)، ۷ روز (Busetto et al., 2010)، ۵ تا ۶ روز (Karlsen et al., 2007)، ۴.۲ روز (Liu et al., 2014)، با افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای فصل بهار، گزارش شده است. از آنجاکه، در پژوهش حاضر، مطالعات میدانی و نیز، داده‌های میدانی در زمینه

- ۵- منابع
- اخوان، ح.، عموشاهی، س.، ستوده، ا.، ۱۳۹۷، بررسی تغییرات NDVI حاصل از تیپ پوشش گیاهی یکسان در طبقات مختلف دمایی کوهستان (مطالعه موردی: کوهستان شیرکوه استان یزد)، انسان و محیطزیست، دوره ۱۶، شماره ۱، صص. ۳۷-۵۰.
- رشوند، س.، یگانه، ح.، سنایی، ا.، ۱۳۹۳، بررسی روند مراحل فنولوژی دو گونه *tomentellus Bromus* و *Festuca ovina* در ایستگاه الموت قزوین، مجله پژوهش‌های گیاهی، دوره ۲۷، شماره ۴، صص. ۶۴۶-۶۳۵.
- زارع خورمیزی، ه.، حسینی، س.ز.، مختاری، م.ح.، غفاریان مالمیری، ح.، ۱۳۹۶، بازسازی سری‌های زمانی NDVI سنجنده MODIS با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS) (مطالعه موردی: استان یزد)، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره ۲۱، شماره ۳، صص. ۲۲۵-۲۲۱.
- زارع خورمیزی، ه.، غفاریان مالمیری، ح.، ۱۳۹۶، پیش خشکسالی و تأثیر آن بر پوشش گیاهی با استفاده از فناوری‌های سنجنش از دور (بررسی موردی: استان یزد، سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۴)، مدیریت بیابان، دوره ۵، شماره ۱۰، صص. ۸۶-۶۸.
- غفاریان مالمیری، ح.، زارع خورمیزی، ه.، ۱۳۹۶، بازسازی سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS)، سنجنش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۸، شماره ۳، صص. ۳۷-۵۵.
- Atzberger, C. & Eilers, P.H., 2011, **A Time Series for Monitoring Vegetation**
- Activity and Phenology at 10-Daily Time Steps Covering Large Parts of South America**, International Journal of Digital Earth, 4(5). PP. 365-386.
- Bertin, R.I., 2008, **Plant Phenology and Distribution in Relation to Recent Climate Change**, The Journal of the Torrey Botanical Society, 135(1), PP. 126-146.
- Busetto, L., Colombo, R., Migliavacca, M., Cremonese, E., Meroni, M., Galvagno, M., Rossini, M., Siniscalco, C., Morra di cella, U. & Pari, E., 2010, **Remote Sensing of Larch Phenological Cycle and Analysis of Relationships with Climate in the Alpine Region**, Global change biology, 16(9), PP. 2504-2517.
- Dannenberg, M.P., Song, C., Hwang, T. & Wise, E.K., 2015, **Empirical Evidence of El Niño-Southern Oscillation Influence on Land Surface Phenology and Productivity in the Western United States**, Remote Sensing of Environment, 159, PP. 167-180.
- De Wit, A.J.W. & Su, B., 2005, **Deriving Phenological Indicators from SPOT-VGT Data Using the HANTS Algorithm**, In 2nd international SPOT-VEGETATION User Conference (PP. 195-201), Antwerp Belgium.
- Eastman, J.R., Sangermano, F., Machado, E.A., Rogan, J. & Anyamba, A., 2013, **Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011**, Remote Sensing, 5(10), PP. 4799-4818.
- Frey, R.A., Ackerman, S.A., Liu, Y., Strabala, K.I., Zhang, H., Key, J.R. & Wang, X., 2008, **Cloud Detection with MODIS, Part I: Improvements in the MODIS Cloud Mask for Collection 5**, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 25, PP. 1057-1072.

- Fu, Y.H., Piao, S., Op de Beeck, M., Cong, N., Zhao, H., Zhang, Y., Menzel, A. & Janssens, I.A., 2014, **Recent Spring Phenology Shifts in Western Central Europe Based on Multiscale Observations**, *Global Ecology and Biogeography*, 23(11), PP. 1255-1263.
- Fu, Y.H., Piao, S., Zhao, H., Jeong, S.J., Wang, X., Vitasse, Y., ... & Janssens, I.A., 2014, **Unexpected Role of Winter Precipitation in Determining Heat Requirement for Spring Vegetation Green-Up at Northern Middle and High Latitudes**, *Global Change Biology*, 20(12), PP. 3743-3755.
- Fu, Y.H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., ... & Janssens, I.A., 2015, **Declining Global Warming Effects on the Phenology of Spring Leaf Unfolding**, *Nature*, 526(7571), PP. 104-107.
- Ge, Q., Wang, H. & Dai, J., 2015, **Phenological Response to Climate Change in China: A Meta-Analysis**, *Global Change Biology*, 21(1), PP. 265-274.
- Ghafarian Malamiri, H.R., Roustaei, I., Olafsson, H., Zare, H. & Zhang, H., 2018, **Gap-Filling of MODIS Time Series Land Surface Temperature (LST) Products Using Singular Spectrum Analysis (SSA)**, *Atmosphere*, 9(9), P. 334.
- Jakubauskas, M.E. & Legates, D.R., 2000, **Harmonic Analysis of Time-Series AVHRR NDVI Data for Characterizing US Great Plains Land Use/Land Cover**, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B4/1; PART 4), PP. 384-389.
- Jakubauskas, M.E., Legates, D.R. & J.H., 2002, **Crop Identification Using Harmonic Analysis of Time-Series AVHRR NDVI Data**, *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), PP. 127-139.
- Jiang, X., Wang, D., Tang, L., Hu, J. & Xi, X., 2008, **Analysing the Vegetation Cover Variation of China from AVHRR-NDVI Data**, *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18), PP. 5301-5311.
- Julien, Y. & Sobrino, J.A., 2010, **Comparison of Cloud-Reconstruction Methods for Time Series of Composite NDVI Data**, *Remote Sensing of Environment*, 114(3), PP. 618-625.
- Julien, Y., Sobrino, J.A. & Verhoef, W., 2006, **Changes in Land Surface Temperatures and NDVI Values over Europe between 1982 and 1999**, *Remote Sensing of Environment*, 103(1), PP. 43-55.
- Karlsen, S.R., Solheim, I., Beck, P.S., Hogda, K.A., Wielgolaski, F.E. & Tommervik, H., 2007, **Variability of the Start of the Growing Season in Fennoscandia, 1982–2002**, *International Journal of Biometeorology*, 51(6), PP. 513-524.
- Klosterman, S., Hufkens, K., Gray, J.M., Melaas, E., Sonnentag, O., Lavine, I., Mitchell, L., Norman, R., Friedl, M.A. & Richardson, A., 2014, **Evaluating remote Sensing of Deciduous Forest Phenology at Multiple Spatial Scales Using PhenoCam Imagery**, *Biogeosciences*, 11, PP. 4305-4320.
- Kobayashi, H., Nagai, S., Kim, Y., Yang, W., Ikeda, K., Ikawa, H., Nagano, H. & Suzuki, R., 2018, **In Situ Observations Reveal How Spectral Reflectance Responds to Growing Season Phenology of an Open Evergreen Forest in Alaska**, *Remote Sensing*, 10(7), P. 1071.
- Lesica, P. & Kittelson, P.M., 2010, **Precipitation and Temperature Are**

- Associated with Advanced Flowering Phenology in Semi-Arid Grassland**, Journal of Arid Environments, 74, PP.1013-1017.
- Liu, L., Liu, L., Liang, L., Donnelly, A., Park, I. & Schwartz, M.D., 2014, **Effects of Elevation on Spring Phenological Sensitivity to Temperature in Tibetan Plateau Grasslands**, Chinese science bulletin, 59(34), PP. 4856-4863.
- Liu, Q., Fu, Y.H., Zhu, Z., Liu, Y., Liu, Z., Huang, M., Janssens, I.A. & Piao, S., 2016, **Delayed Autumn Phenology in the Northern Hemisphere is Related to Change in Both Climate and Spring Phenology**, Global Change Biology, 22(11), PP. 3702-3711.
- Liu, X., Zhu, X., Zhu, W., Pan, Y., Zhang, C. & Zhang, D., 2014, **Changes in Spring Phenology in the Three-Rivers Headwater Region from 1999 to 2013**, Remote Sensing, 6(9), PP. 9130-9144.
- Menenti, M., Azzali, S., Verhoef, W. & van Swol, R., 1993, **Mapping Agroecological Zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI Images**, Advances in Space Research, 13(5), PP. 233-237.
- Menzel, A., Estrella, N. & Schleip, C., 2008, **Impacts of Climate Variability, Trends and NAO on 20th Century European Plant Phenology**, Climate Variability and Extremes During the Past 100 Years (PP. 221-233), Springer, Dordrecht.
- Nordli, O., Wielgolaski, F.E., Bakken, A.K., Hjeltnes, S.H., Mage, F., Sivle, A. & Skre, O., 2008, **Regional trends for Bud Burst and Flowering of Woody Plants in Norway as Related to Climate Change**, International Journal of Biometeorology, 52(7), PP. 625-639.
- Pastor-Guzman, J., Dash, J. & Atkinson, P.M., 2018, **Remote Sensing of Mangrove Forest Phenology and Its Environmental Drivers**, Remote Sensing of Environment, 205, PP. 71-84.
- Pellerin, M., Delestrade, A., Mathieu, G., Rigault, O. & Yoccoz, N.G., 2012, **Spring Tree Phenology in the Alps: Effects of Air Temperature, Altitude and Local Topography**, European Journal of Forest Research, 131(6), PP. 1957-1965.
- Peng, D., Wu, C., Zhang, X., Yu, L., Huete, A.R., Wang, F., Luo, Sh., Liu, X. & Zhang, H., 2018, **Scaling up Spring Phenology Derived from Remote Sensing Images**, Agricultural and Forest Meteorology, 256, PP. 207-219.
- Piao, S., Cui, M., Chen, A., Wang, X., Ciais, P., Liu, J. & Tang, Y., 2011, **Altitude and Temperature Dependence of Change in the Spring Vegetation Green-Up Date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau**, Agricultural and Forest Meteorology, 151(12), PP. 1599-1608.
- Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Viovy, N. & Demarty, J., 2007, **Growing Season Extension and Its Impact on Terrestrial Carbon Cycle in the Northern Hemisphere over the Past 2 Decades**, Global Biogeochemical Cycles, 21, GB3018.
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O. & Toomey, M., 2013, **Climate Change, Phenology, and Phenological Control of Vegetation Feedbacks to the Climate System**, Agricultural and Forest Meteorology, 169, PP. 156-173.
- Roerink, G.J., Menenti, M. & Verhoef, W., 2000, **Reconstructing Cloudfree NDVI Composites Using Fourier Analysis of Time Series**, International Journal of Remote Sensing, 21(9), PP. 1911-1917.

- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973, **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS**, In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, PP. 309-317.
- Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, C. & Ahas, R., 2002, **Atmospheric Mechanisms Governing the Spatial and Temporal Variability of Phenological Phases in Central Europe**, International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 22(14), PP. 1739-1755.
- Shang, R., Liu, R., Xu, M., Liu, Y., Dash, J. & Ge, Q., 2018, **Determining the Start of the Growing Season from MODIS Data in the Indian Monsoon Region: Identifying Available Data in the Rainy Season and Modeling the Varied Vegetation Growth Trajectories**, Remote Sensing, 10(1), P. 122.
- Verhoef, W., 1996, **Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series (HANTS)**, In S. Azzali and M. Menenti (Eds.), In Fourier Analysis of Temporal NDVI in Southern Africa and America Continent, The Netherlands, DLO Winand Staring Centre, Report 108, PP. 19-24.
- Verhoef, W., Menenti, M. & Azzali, S., 1996, **Cover A Colour Composite of NOAAVHRR- NDVI Based on Time Series Analysis (1981-1992)**, International Journal of Remote Sensing, 17(2), PP. 231-235.
- Wang, X., Piao, S., Xu, X., Ciais, P., MacBean, N., Myneni, R.B. & Li, L., 2015, **Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-Up Slowed Down or Changed Abruptly over the Last Three Decades?**, Global Ecology and Biogeography, 24(6), PP. 621-631.
- Wen, J., Su, Z. & Ma, Y.M., 2004, **Reconstruction of a Cloud-Free Vegetation Index Time Series for the Tibetan Plateau**, Mountain Research and Development, 24(4), PP. 348-353.
- White, M.A., de Beurs, K.M., Didan, K., Inouye, D.W., Richardson, A.D., Jensen, O.P., ... & Brown, J.F., 2009, **Intercomparison, Interpretation, and Assessment of Spring Phenology in North America Estimated from Remote Sensing for 1982–2006**, Global Change Biology, 15(10), PP. 2335-2359.
- Wu, C., Hou, X., Peng, D., Gonsamo, A. & Xu, S., 2016, **Land Surface Phenology of China's Temperate Ecosystems over 1999–2013: Spatial–Temporal Patterns, Interaction Effects, Covariation with Climate and Implications for Productivity**, Agricultural and forest meteorology, 216, PP.177-187.
- Wu, J., Albert, L.P., Lopes, A.P., Restrepo-Coupe, N., Hayek, M., Wiedemann, K.T., ... & Tavares, J.V., 2016, **Leaf Development and Demography Explain Photosynthetic Seasonality in Amazon Evergreen Forests**, Science, 351(6276), PP. 972-976.
- Xu, Y. & Shen, Y., 2013, **Reconstruction of the Land Surface Temperature Time Series Using Harmonic Analysis**, Computers and Geosciences, 61, PP. 126-132.
- Xue, Z., Du, P. & Feng, L., 2014, **Phenology-Driven Land Cover Classification and Trend Analysis Based on Long-Term Remote Sensing Image Series**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(4), PP. 1142-1156.
- Yan, E., Wang, G., Lin, H., Xia, C. & Sun, H., 2015, **Phenology-Based Classification of Vegetation Cover Types in Northeast**

- China Using MODIS NDVI and EVI Time Series**, International Journal of Remote Sensing, 36(2), PP. 489-512.
- Yu, H., Luedeling, E. & Xu, J., 2010, **Winter and Spring Warming Result in Delayed Spring Phenology on the Tibetan Plateau**, Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(51), PP. 22151-22156.
- Zhou, J., Jia, L. & Menenti, M., 2015, **Reconstruction of Global MODIS NDVI Time Series: Performance of Harmonic Analysis of Time Series (HANTS)**, Remote Sensing of Environment, 163(15), PP. 217-228.
- Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R.B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y.Y., Piao, Sh., Chen, H., Vermote, E.F., Song, C. & Hwang, T., 2014, **Widespread Decline of Congo Rainforest Greenness in the Past Decade**, Nature, 509(7498), PP. 86-90.