

# بررسی تغییرات پوشش گیاهی ایران با استفاده از سری‌های زمانی NDVI سنجنده NOAA-AVHRR و تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS)

حمیدرضا غفاریان مالمیری<sup>۱</sup>

هادی زارع خورمیزی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۲/۱۵

\*\*\*\*\*

## چکیده

بررسی تغییرات پوشش‌های گیاهی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در مورد گرمایش جهانی، چرخه کربن، چرخه آب و تبادل انرژی به همراه داشته باشد. استفاده از سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های سنجش از دور اطلاعات زیادی را در مورد تغییرات و پویایی‌های پوشش‌های گیاهی به ما عرضه می‌دارند. هدف از پژوهش حاضر، تعیین تغییرات هر کدام از مؤلفه‌های سری‌های فوری پوشش‌های گیاهی ایران در طول سه دهه گذشته می‌باشد. بدین منظور در این مطالعه از محصول NDVI روزانه سنجنده AVHRR با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۵ در ۰/۰۵ درجه با نام AVH13C1 استفاده شد. سپس با استفاده از الگوریتم HANTS اجزای هارمونیک چهار سری زمانی یک‌ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و چهار سری زمانی یک‌ساله در سال‌های اخیر (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) تولید شد. در نهایت تغییرات اجزای هارمونیک یا همان تصاویر دامنه و فاز در سال‌های اخیر نسبت به سال‌های گذشته تعیین شد و اختلاف میانگین ارزش‌های اجزای هارمونیک بین چهار سری زمانی یک‌ساله در گذشته و حال با تجزیه واریانس یک طرفه بررسی شد و نقشه‌های معنی‌داری اختلاف بین میانگین‌ها بدست آمد. با توجه به نتایج، در مناطق مرکزی، شرق و شمال شرق ایران دامنه صفر (میانگین پوشش گیاهی) در سطح احتمال ۹۵ درصد ( $F\text{-value} < 0.05$ ) کاهش یافته و در مناطق شمال و شمال غرب و غرب به ویژه ارتفاعات البرز و زاگرس دامنه صفر به طور معنی‌دار ( $F\text{-value} < 0.05$ ) افزایش یافته است. اختلاف میانگین ارزش فازها در چهار سری زمانی در گذشته و سال‌های اخیر در مناطق غرب و شمال غرب و همچنین شرق و شمال شرق ایران در سطح احتمال ۹۵ درصد ( $F\text{-value} < 0.05$ ) معنی‌دار می‌باشد. فازهای سالانه این مناطق به میزان ۱۴ درجه کاهش یافته است که این موضوع نشان دهنده شروع زودتر فرآیندهای رشد و فنولوژی گیاهان این مناطق نسبت به سه دهه گذشته می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: HANTS، دامنه، سری زمانی، فنولوژی، NDVI.

\*\*\*\*\*

۱- استادیار گروه جغرافیا دانشگاه یزد، یزد، ایران (نویسنده مسئول) hrg hafarian@yazd.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. hadi.zarekh@ut.ac.ir

۱- مقدمه

سری زمانی شاخص NDVI با فاصله نمونه برداری نامنظم و استخراج اطلاعات فنولوژیکی گیاه توسعه داده شده است (Verhoef, 1996; Verhoef et al., 1996; Roerink et al., 2000).

این الگوریتم در طی چند سال اخیر به طور گسترده به منظور حذف داده‌های دور افتاده و یا بازسازی داده‌های از دست رفته توسط پوشش ابر در سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (غفاریان مالامیری و زارع خورمیزی، ۱۳۹۶؛ زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Julien & Sobrino, 2010; Xu & Shen, 2013; Zhou et al., 2015; Wen et al., 2004). تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی، پدیده‌های دوره‌ای را به اجزای آن یا همان سینوس‌ها و کسینوس‌های مختلف با دامنه و فازهای مختلف تجزیه می‌کند (Jakubauskas et al., 2002).

بررسی تغییرات فازها در الگوریتم HANTS به ویژه فاز سالانه می‌تواند در شناسایی تغییرات فرآیندهای رشد و فنولوژی گیاهان در ارتباط با تغییرات اقلیمی مؤثر باشد. فنولوژی به مطالعه زمان وقوع رخداد‌های تکرارپذیر زندگی گیاهان در رابطه با عوامل زنده و غیرزنده می‌پردازد (Lesica & Kittelson, 2010; White et al., 2009; Richardson et al., 2013).

مطالعه فنولوژی گیاهان در سال‌های اخیر با توجه به ارتباط قوی بین وقایع بیولوژیکی و آب و هوایی توجه خاصی به خود جلب کرده است (Dannenberg et al., 2015; Richardson et al., 2013; Liu et al., 2016) و به عنوان یک از حساس‌ترین شاخص‌های بیولوژیکی در پاسخ به گرمایش جهانی و افزایش دمای کره زمین شناخته شده است (Bertin, 2008; Yu et al., 2010). زیرا دما یکی از مهمترین عوامل مؤثر در شروع رشد و فرایندهای فنولوژی گیاهان می‌باشد (Pellerin et al., 2012; Piao et al., 2007).

تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی کمتر برای شناخت تغییرات پوشش گیاهی و فنولوژی بکاربرده شده است. در برخی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه بر اساس اینکه انواع پوشش‌های گیاهی و گونه‌های گیاهی دارای الگوهای متفاوتی در تغییرات اجرای فوریه سری‌های زمانی هستند (Jakubauskas & Legates, 2000; Jakubauskas et al., 2007).

بررسی تغییرات پوشش‌های گیاهی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در مورد گرمایش جهانی (Pettoelli et al., 2005)، چرخه کربن (Wu et al., 2016)، چرخه آب (Zhou et al., 2014) و تبادل انرژی (Fu et al., 2014) به همراه داشته باشد. پویایی‌های گیاهی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند آب و هوا و فعالیت‌های انسانی قرار دارند (Liu et al., 2015). امروزه با توسعه علوم سنجش از دور، استفاده از این علم در بررسی پویایی‌های گیاهی گسترش روزافزونی داشته است. رابطه بین تغییرات آب و هوایی و روند شاخص‌های سنجش از دوری گیاهی از جمله NDVI به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (Chuai et al., 2013; Eastman et al., 2013; Mao et al., 2012; Liu et al., 2015).

مزیت کسب مکرر داده‌ها در طول زمان در سنجش از دور مهمترین ویژگی می‌باشد که می‌تواند در شناخت و بررسی تغییرات پوشش گیاهی مؤثر باشد. سری‌های زمانی سنجش از دور اطلاعات زیادی برای نشان دادن تغییرات و پویایی‌های پوشش گیاهی دارند (Xue et al., 2014). بنابراین تجزیه و تحلیل این سری‌های زمانی می‌تواند در شناخت ویژگی‌های مختلف پوشش‌های گیاهی نظیر تغییرات رشد و فنولوژی آن مؤثر باشند. اما چنین مطالعاتی نیازمند در اختیار داشتن داده‌های زمانی پیوسته، بدون خطا و جافتادگی و کامل در طول زمان است. پیوستگی زمانی داده‌های سنجش از دور به دلیل عواملی از قبیل وجود گردوغبارهای جوئی، ذرات معلق در هوا و گازها به ویژه حضور ابرها می‌تواند به طور قابل توجهی دستخوش تغییر شود (Ghafarian Malamiri et al., 2018). که این خود با تأثیر بر انرژی بازتاب شده از سطح، قرائت سنجنده‌های اپتیکی را با خطا مواجه می‌کند (زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶). الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی<sup>۲</sup> (HANTS) برای حذف داده‌های دور افتاده<sup>۳</sup> و پر کردن فاصله داده‌های جا افتاده<sup>۴</sup> در داده‌های

1- Normalized difference vegetation index

2- Harmonic ANalysis of Time Series

3- Outlier

4- Gap

## ۲- مواد و روش ها

### ۱-۲- تصاویر NDVI سنجنده AVHRR

در پژوهش حاضر از تصاویر NDVI سنجنده NOAA-AVHRR استفاده شد. شاخص NDVI که یکی از شاخص های پرکاربرد در زمینه بررسی پویایی های گیاهی است؛ از رابطه (۱) محاسبه می شود (Rouse et al., 1973).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

که در آن NIR و RED به ترتیب بازتاب طیفی باند مادون قرمز نزدیک (باند ۲ سنجنده AVHRR) و باند قرمز (باند ۱ سنجنده AVHRR) هستند. در این مطالعه از محصول NDVI روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۵ در ۰/۰۵ درجه با نام AVH13C1 استفاده شد (NOAA CDR Program data). الگوریتم محاسبه NDVI توسط برنامه NOAA CDR<sup>۱</sup> توسعه داده شده است (Vermote et al., 2014). در پژوهش حاضر چهار سری زمانی یک ساله در زمان های گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) در نظر گرفته شد. همانطور که گفته شد با توجه به قدرت تفکیک زمانی روزانه، در هر سال ۳۶۵ تصویر NDVI موجود می باشد. هر سال به عنوان مبنایی برای استخراج پارامترهای هارمونیک سری های زمانی در نظر گرفته شد. به دو علت از چهار سری زمانی یک ساله، در زمان های گذشته و حال استفاده شد. اولاً استخراج و مقایسه اجزای هارمونیک تنها یک سری زمانی یک ساله در زمان های قدیم و جدید نمی تواند بیانگر تغییرات واقعی باشد، زیرا این تغییرات ممکن است تحت تأثیر پویایی های گذرای پوشش های گیاهی نظیر دوره های خشکسالی و ترسالی باشد. دوم اینکه با انتخاب چهار سری زمانی یک ساله ۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵ در زمان گذشته و چهار سری زمانی یک ساله ۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ در سال های اخیر، امکان مقایسه آماری اجزای هارمونیک از طریق تجزیه واریانس یک طرفه فراهم می شود. با استخراج اجزای هارمونیک در

2002، از این الگوریتم برای تفکیک و طبقه بندی پوشش های گیاهی مختلف استفاده شده است (Atzberger and Eilers 2011; Yan et al., 2015). در پژوهشی از تجزیه و تحلیل هارمونیک سری های زمانی NDVI ماهواره NOAA برای شناسایی نوع محصول استفاده شد.

بر اساس نتایج این پژوهش محصولاتی مانند ذرت که دارای یک دوره رشد هستند بیشترین مقدار واریانس تغییرات توسط هارمونیک اول کنترل می شود. در صورتی که گندم زمستانه که دارای دو دوره رشد مختلف می باشد بیشترین مقدار واریانس توسط هارمونیک دوم کنترل می شود (Jakubauskas et al., 2002). در پژوهشی دیگر تغییرات و ویژگی های پوشش گیاهی چین با استفاده از محصول NDVI سنجنده AVHRR طی سال های ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۱ مورد بررسی قرار گرفت (Jiang et al., 2008).

در این مطالعه با محاسبه مؤلفه های سری فوری، معنای فیزیکی این مؤلفه ها با تغییرات پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه، میانگین NDVI یا هارمونیک مرتبه صفر، نشان دهنده سطح کل پوشش گیاهی است.

هارمونیک اول، ارزش دامنه و فاز داده های سالانه NDVI و هارمونیک دوم، ارزش دامنه و فاز داده های NDVI شش ماهه را نشان می دهد. در پژوهشی دیگر الگوریتم HANTS برای تعیین زمان شروع و پایان فصل رشد در پوشش های مختلف مورد استفاده قرار گرفت (De Wit and Su, 2005). بر اساس نتایج، هیستوگرام های شروع فصل رشد برای کلاس های مختلف پوشش زمین با دانش عمومی در مورد زمان فنولوژیکی آن همخوانی دارد.

تاکنون تغییرات مؤلفه های سری های زمانی تولید شده توسط الگوریتم HANTS مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از پژوهش حاضر، تعیین تغییرات هر کدام از مؤلفه های سری های زمانی پوشش های گیاهی ایران در سال های گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و سال های اخیر (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) می باشد.

از حاصل ضرب یک فرکانس پایه (به عنوان مثال  $w_1 = 2\pi$  در  $N$  در اعداد صحیح  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) بدست می‌آیند (رابطه ۳).  

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

در الگوریتم HANTS پس از انتخاب تعداد فرکانس ( $M$ ) و فرکانس ( $w_j$ )، پارامترهای ناشناخته از سری فوریه دامنه ( $a_j$ ) و ارزش فازها ( $\phi_j$ ) هستند که توسط برازش سری زمانی از مشاهدات توسط روش کمترین مربعات<sup>۲</sup> تعیین می‌شود. به منظور ایجاد یک مدل قابل اعتماد از یک سری زمانی با الگوریتم HANTS پارامترهایی وجود دارد که باید توسط کاربر تعریف شود:

۱- محدوده داده‌های معتبر<sup>۳</sup>: محدوده قابل قبول از مقادیر مشاهده شده است. مشاهدات خارج از این محدوده در مرحله اول با اختصاص وزن صفر به آنها حذف می‌شوند.

۲- دوره<sup>۴</sup>: تعداد نمونه‌های زمانی در هر مؤلفه دوره‌ای در سری فوریه می‌باشد.

۳- تعداد فرکانس (NOF)<sup>۵</sup>: میزان جزئیاتی را که می‌تواند در سیگنال بازسازی استفاده شود تعیین می‌کند. تعداد فرکانس پایین، یک سیگنال با جزئیات کمتر از یک تعداد فرکانس بالا ایجاد می‌کند.

۴- جهت نقاط دورافتاده<sup>۶</sup>: جهت نقاط دورافتاده (پرت) با اشاره به مدل فعلی منحنی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال پوشش ابر منجر به کاهش مقادیر NDVI می‌شود بنابراین جهت نقاط دور افتاده در الگوریتم را به صورت کاهشی (Low) انتخاب می‌کنیم.

۵- آستانه میزان خطای قابل قبول (FET)<sup>۷</sup>: انحراف مطلق از رقم کنونی منحنی در جهت انتخاب شده را که هنوز هم قابل قبول است، مشخص می‌کند. پس از هر تکرار، مشاهداتی که انحراف آنها بزرگتر از FET می‌باشد به عنوان

هر سال، میانگین اجزای هارمونیک در چهار سری زمانی یکساله در زمان گذشته و حال بدست آمد و سپس برای مشخص نمودن تغییرات، تصاویر میانگین هر کدام از اجزای هارمونیک در زمان حال از گذشته تفریق شد.

یکی از مشکلات سری‌های زمانی مورد بررسی وجود داده‌های دور افتاده و داده‌های از دست رفته می‌باشد. یکی از مهمترین علل حضور این داده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای حضور ابرها می‌باشد. در این پژوهش به منظور حذف داده‌های از دست رفته و دور افتاده و همچنین تولید اجزای هارمونیک مختلف نظیر تصاویر دامنه و فاز در سری‌های زمانی همان طور که گفته شد، از الگوریتم HANTS استفاده شد.

## ۲-۲- الگوریتم HANTS

الگوریتم HANTS بر اساس مفهوم تبدیل فوریه گسسته<sup>۱</sup> (FFT) است (Menenti et al., 1993; Verhoef, 1996; Verhoef et al., 1996; Roerink et al., 2000) که برای مدل‌سازی سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای بکار می‌رود. در اینجا ابتدا الگوریتم توضیح داده می‌شود و سپس پارامترهای مورد نیاز به منظور بدست آوردن یک مدل قابل اعتماد توسط الگوریتم شرح داده می‌شود (غفاریان مال‌میری و زارع خورمیزی، ۱۳۹۶؛ زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶). 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).

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^M a_j \cos(w_j t_i - \phi_j) \quad (2)$$

که در آن  $w_j$  فرکانس زام دوره هارمونیک در سری فوریه و  $t_i$  زمانی است که نمونه  $i$  ام گرفته شده است.  $M$  تعداد فرکانس سری فوریه ( $M \leq N$ )،  $a_j$  و  $\phi_j$  دامنه و فاز زام دوره هارمونیک هستند. از آنجا که فرکانس صفر فاز ندارد، دامنه مربوط به فرکانس صفر ( $a_0$ )، با میانگین همه  $N$  مشاهده از متغیر  $y$  برابر است. فرکانس‌های هارمونیک ( $w_j$ )

2- Least square method

3- Valid data range

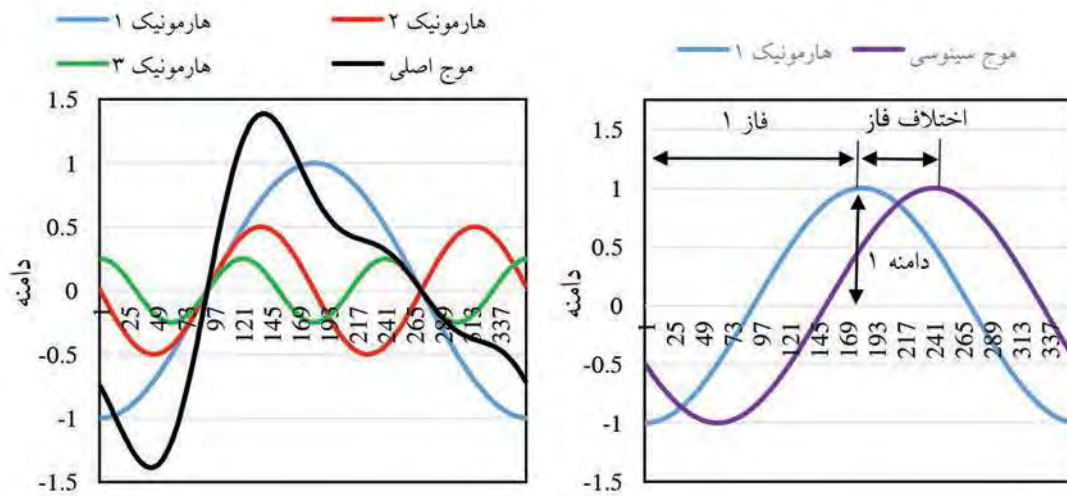
4- Period

5- Number of Frequency

6- Direction of outliers

7- Fit Error Tolerance

1- Fast Fourier Transform



نگاره ۱: یک موج فرضی (موج سیاه رنگ) و اجزای هارمونیک آن (نگاره چپ) و مفاهیم مختلف دامنه، فاز و اختلاف فاز (نگاره راست).

نقاط دورافتاده تنظیم شده و از محاسبات با اختصاص وزن صفر به آنها حذف می‌شوند. نوشته شود: (۴)

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

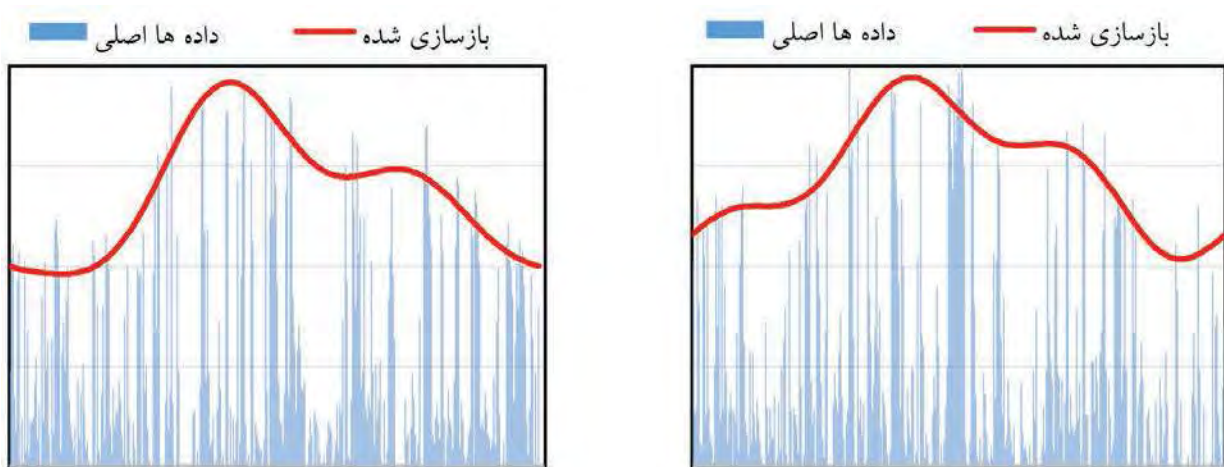
۶- درجه فرا معین بودن (DOD): حداقل تعداد نقاط داده‌های اضافی که باید در برازش منحنی استفاده شود را نشان می‌دهد. تعداد مشاهدات معتبر باید همیشه بیشتر از تعداد پارامترهای مورد نیاز برای توصیف سیگنال باشد (2xNOF-1). از طرفی DOD تنها زمانی مؤثر است که

FET کوچک انتخاب شود. تکرار در الگوریتم HANTS در دو حالت خاتمه می‌یابد. ۱- زمانی که تعداد نقاط باقی مانده کمتر از DOD+2NOF-1 باشد ۲- تمام نقاط قبل رسیدن به مقدار DOD+2NOF-1 از مقدار FET کوچکتر باشند.

۲-۳ تبدیل فوریه سریع (FFT)

تجزیه توابع متناوب به اجزای آن بینش مفیدی را در فرآیندهای تعیین کردن سیگنال مشاهده شده و وزن نسبی آنها فراهم می‌آورد. تجزیه و تحلیل سری فوریه برای تجزیه یک سیگنال پیچیده به اجزای سینوسی یا اجزای کسینوسی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

رابطه ۲ می‌تواند به صورت یک ماتریس (رابطه ۴)



نگاره ۲- نتایج حاصل از برازش منحنی الگوریتم HANTS بر روی یک نمونه پیکسل در سال ۱۹۸۲ (راست) و ۲۰۱۸ (چپ)

بازسازی هر کدام از سری‌های زمانی یک ساله در زمان قدیم و حال را در HANTS نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، محدوده داده‌های معتبر با توجه به محدوده قابل قبول در واحد NDVI برای پوشش گیاهی، از ۰ تا ۱ و دوره پایه با توجه به تعداد تصاویر روزانه NDVI در هر سال، ۳۶۵ در نظر گرفته شد. تعداد فرکانس (NOF) با توجه به اجزای دوره‌ای در یک سال، ۳ و مقادیر FET، ۰/۱ در نظر گرفته شد و جهت نقاط دور افتاده با توجه به این که پوشش ابر منجر به کاهش مقادیر NDVI می‌شود به صورت کاهشی (Low) در نظر گرفته شد.

اگر این موج‌های سینوسی با هم جمع شوند نگاره موج اصلی حاصل می‌شود. اگر در نگاره ۱ (چپ) فرض کنیم موج اصلی (خط سیاه) یک روند تغییرات شاخص NDVI در طول یک سال باشد. بنابراین این موج در الگوریتم HANTS با دادن تعداد سه فرکانس به سه موج سینوسی با دامنه و فرکانس مختلف تجزیه می‌شود. از میان شکل موج‌های سینوسی، آن موجی که با شکل موج اصلی هم فرکانس است، هامونیک اول، اگر فرکانس آن دو برابر باشد هامونیک دوم. اگر  $n$  برابر باشد هامونیک  $n$  ام است. هر کدام از موج‌های سینوسی یا سینوسی خود دارای دامنه، فاز و فرکانس خاصی می‌باشد. این اطلاعات در شناخت و طبقه‌بندی فنولوژی و تعیین تغییرات و پویایی گیاهان کاملاً مؤثر است. در نگاره ۱ راست مفاهیم دامنه، فاز و اختلاف فاز دو موج نشان داده شده است. دامنه موج به بیشترین میزان جابجایی از میانگین و فاز به کسری از چرخه موج که نسبت به مبدا سپری شده است، گفته می‌شود.

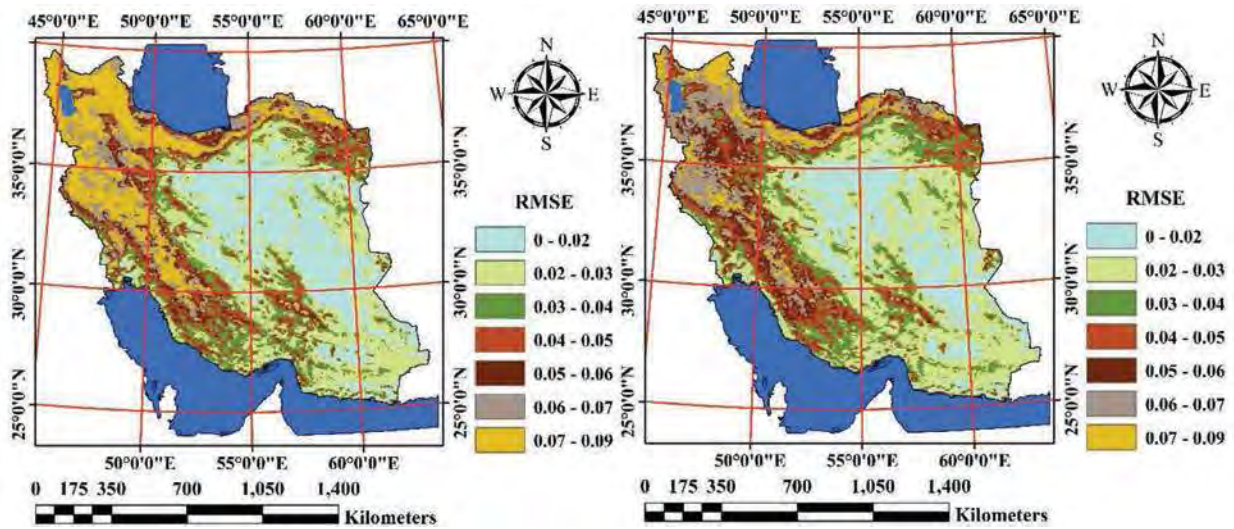
جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده به منظور بازسازی

تصاویر NDVI توسط الگوریتم HANTS

| میزان     | پارامتر                           |
|-----------|-----------------------------------|
| ۰-۱       | محدوده داده معتبر                 |
| ۳۶۵ تصویر | دوره پایه                         |
| ۳         | تعداد فرکانس (NOF)                |
| ۰/۱       | آستانه میزان خطای قابل قبول (FET) |
| LOW       | جهت نقاط دور افتاده               |
| ۱۰        | DOD                               |

## ۲-۴- روش تحقیق

لازمه بدست آوردن اجزای هامونیک (تصاویر دامنه و فاز)، برازش یک منحنی قابل اعتماد بر داده‌های اولیه سری زمانی می‌باشد. جدول ۱ پارامترهای بکار برده شده برای



نگاره ۳: میانگین خطای RMSE بین داده‌های اصلی و داده‌های بازسازی شده در چهار سری‌های زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸).

به منظور ارزیابی نتایج برازش منحنی بر روی داده‌های اولیه از خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد (رابطه ۷). خطای جذر میانگین مربعات با استفاده از رابطه ۷ قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه  $x_i$  و  $y_i$  به ترتیب داده‌های واقعی و داده‌ای مدل شده می‌باشند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

۳- نتایج  
 مؤلفه‌های هارمونیک در الگوریتم HANTS با توجه به منحنی برازش شده بر داده‌های اولیه استخراج می‌شود. نگاره ۲ نتایج برازش منحنی بر روی داده‌های اصلی را در طول یک پیکسل در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. با توجه به نگاره ۲ سری زمانی NDVI مورد استفاده به شدت دارای داده‌های دور افتاده و از دست رفته می‌باشد. یکی از علت‌های اصلی داده‌های دور افتاده، حضور ابرهای کوچک‌تر از اندازه پیکسل تصویر می‌باشد؛ به طوری در الگوریتم تشخیص ابر قابل شناسایی نیست. داده‌های از دست رفته نیز نتیجه پوشش کامل ابر در یک پیکسل است. در نتیجه با تشخیص و حذف ارزش آن پیکسل در الگوریتم تشخیص ابر، یک پیکسل بدون داده (NaN) ایجاد خواهد شد. نگاره ۳ نقشه میانگین خطای RMSE بین داده‌های اصلی و داده‌های بازسازی شده در چهار سری‌های زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) را نشان می‌دهد. با توجه

در مرحله بعد تغییرات اجرای هارمونیک سری‌های زمانی گذشته و حال مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این مرحله شامل دامنه صفر، دامنه سالانه، دامنه ۶ ماهه، فاز سالانه و فاز ۶ ماهه می‌باشد. برای بررسی تغییرات رخ داده در پارامترهای هارمونیک نام برده، میانگین پارامتر هارمونیک مورد نظر در چهار سال در سری‌های زمانی جدید از میانگین پارامتر هارمونیک مورد نظر در چهار سال در سری‌های زمانی گذشته کسر و نقشه تفاضل ایجاد شد. فرکانس‌های بالا یا دوره‌های کوتاه تغییرات پوشش گیاهی (تغییرات فصلی) تحت تأثیر نویز، میزان داده‌های از دست رفته و تغییرات کوتاه مدت پوشش گیاهی است. بنابراین در پژوهش حاضر تغییرات دامنه و فاز فصلی یا

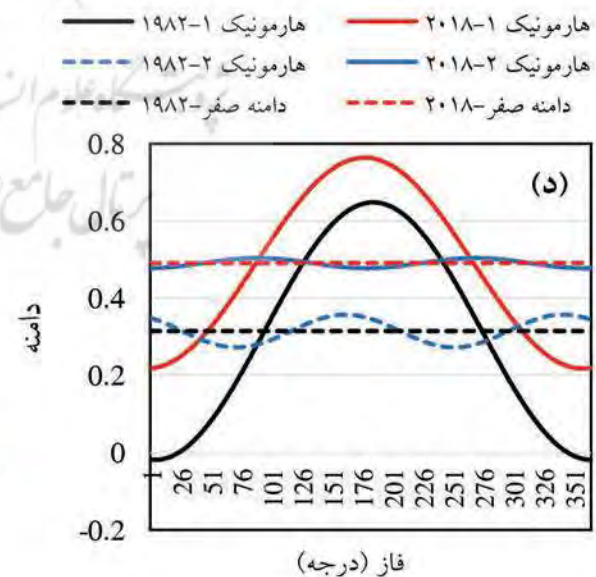
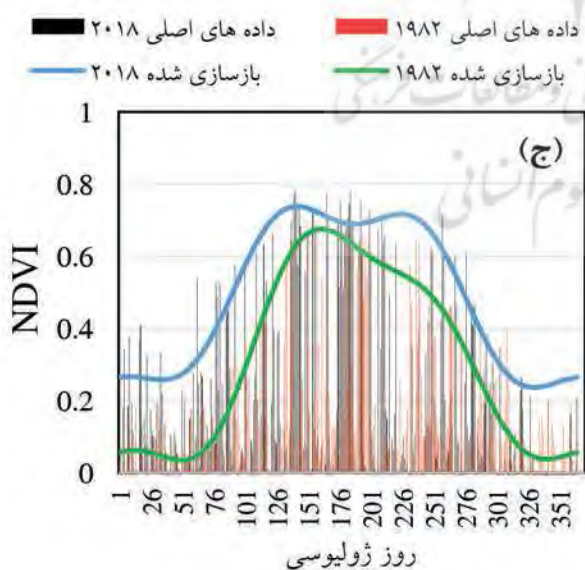
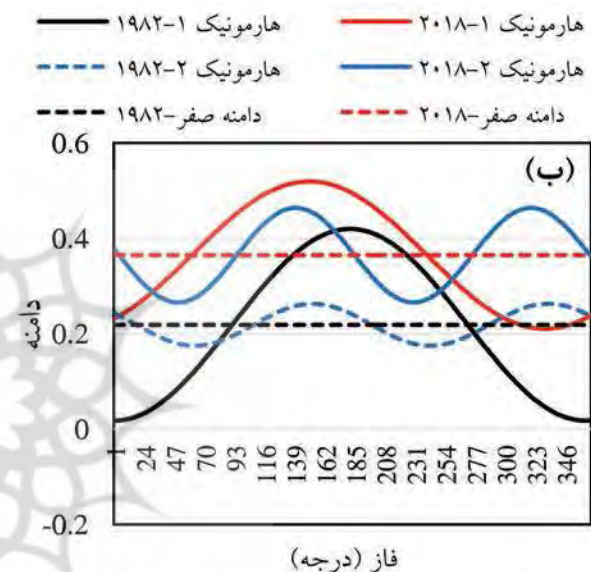
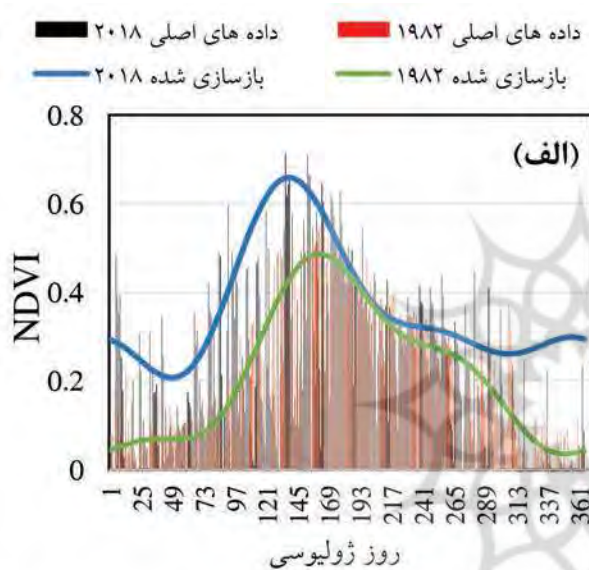
1- Cloud Mask Algorithm

2- NaN (Not a Number)

حال در سطح ایران به ترتیب ۰/۰۳۷ و ۰/۰۳۹ می‌باشد. در نتیجه اجزای هارمونیک استخراج شده از منحنی‌های برآزش داده شده قابل اعتماد می‌باشند و همچنین این نتایج نشان دهنده کارایی بسیار خوب الگوریتم HANTS در رفع خطای داده‌های از دست رفته و دور افتاده در سری زمانی NDVI روزانه NOAA-AVHRR می‌باشد.

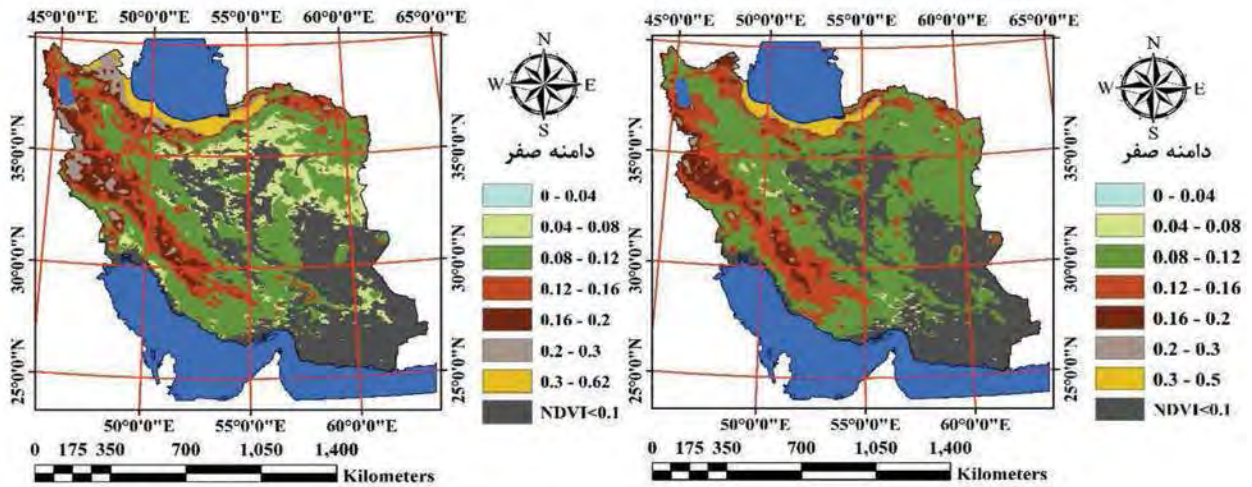
نگاره ۴ (الف) نتایج بازسازی یک سری زمانی یک ساله

به نگاره ۳ کمترین میزان خطای بازسازی در مناطق مرکزی ایران و مناطق با پوشش گیاهی بدست آمد. ارتفاعات البرز و زاگرس در شمال و غرب ایران با توجه به پوشش گیاهی بالاتر و تغییرات بیشتر منحنی رشد، دارای خطای RMSE بیشتری بودند. با این حال در هر دو نقشه، خطای RMSE همواره کمتر از یک دهم در واحد NDVI است. میانگین خطای RMSE بازسازی، در چهار سری زمانی در گذشته و

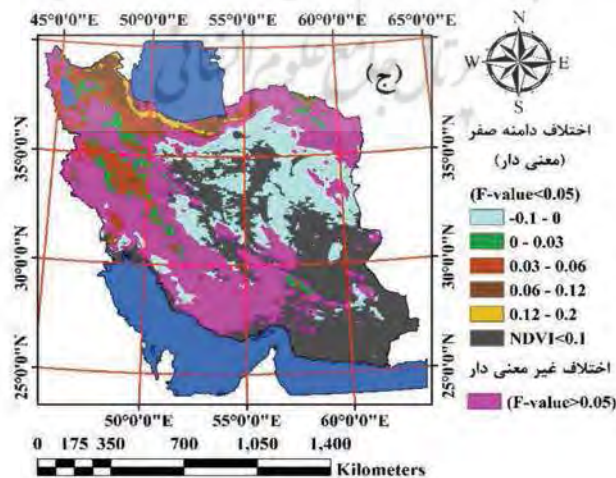
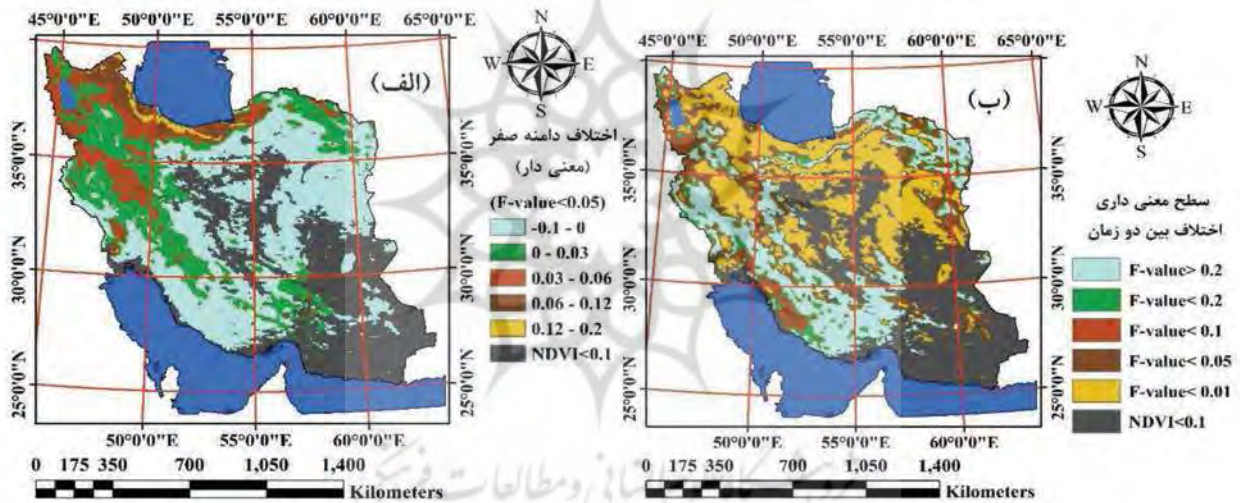


نگاره ۴: نتایج بازسازی سری‌های زمانی یک ساله NDVI در سال ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ بر روی دو پیکسل مختلف (نگاره‌های راست) و نتایج تجزیه اجزای هارمونیک هر کدام از سری‌های زمانی یک ساله ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ در دو پیکسل مختلف (نگاره‌های چپ)





نگاره ۵: نقشه دامنه صفر به صورت میانگین در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (راست) و حال (چپ)



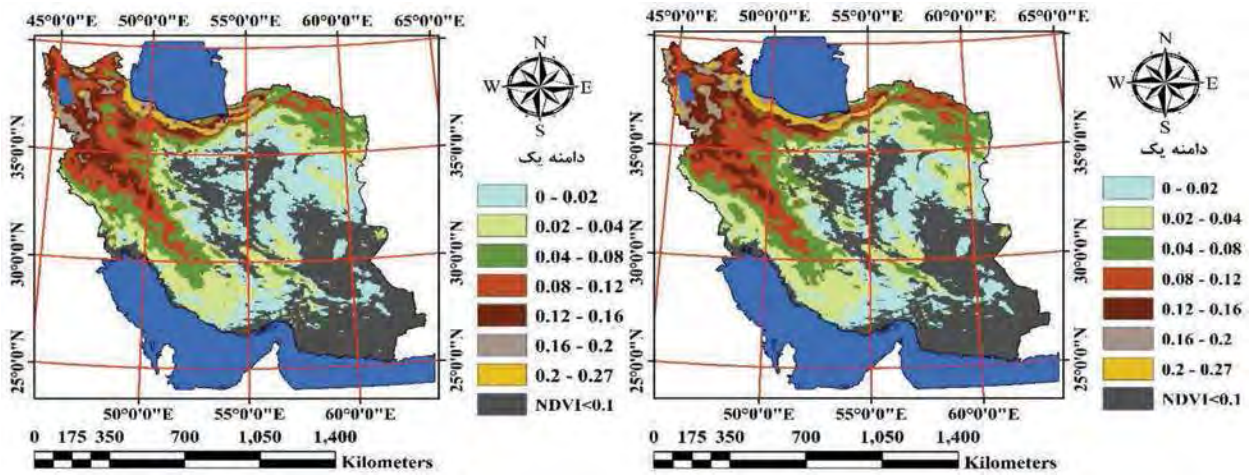
نگاره ۶: نقشه اختلاف دامنه صفر بین زمان گذشته و حال (الف)، نقشه معنی داری اختلاف بین دو زمان (ب) و تلفیق نقشه معنی داری و اختلاف دامنه صفر (ج)

نقشه میانگین دامنه صفر (میانگین دامنه صفر در چهار سال) در چهار سری‌های زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) در نگاره ۵ نشان داده شده است. مقایسه نقشه میانگین دامنه صفر در زمان قدیم و حال نشان می‌دهد که در مناطق مرکزی ایران دامنه صفر در زمان حال کاهش یافته است. این کاهش نشان دهنده این موضوع می‌باشد که در زمان گذشته این مناطق دارای پوشش گیاهی بالاتری بودند. نگاره ۶ اختلاف دامنه صفر بین دو زمان مختلف و نقشه معنی‌داری تفاوت بین دو زمان و نتیجه تلفیق این دو نقشه را نشان می‌دهد.

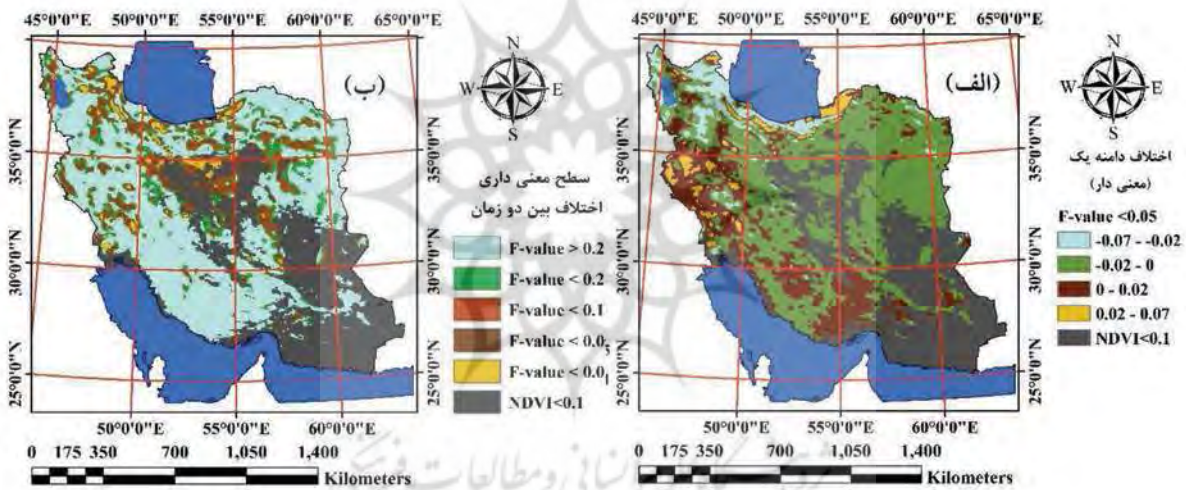
با توجه به نگاره ۶ (الف)، به طور کلی در مناطق پست و دشتی (مناطق مرکزی و شرق و شمال شرق ایران) دامنه صفر کاهش یافته است و بر عکس در مناطق مرتع یا همان ارتفاعات البرز و زاگرس دامنه صفر افزایش یافته است. نگاره ۶ (ب) نقشه معنی‌داری اختلاف‌ها را در سطوح مختلف احتمالات نشان می‌دهد و نگاره ۶ (ج)، تلفیق نقشه اختلاف و سطوح معنی‌داری را نشان می‌دهد. با توجه به نگاره ۶ (ج) در مناطق مرکزی، شرق و شمال شرق ایران دامنه صفر در سطح احتمال ۹۵ درصد ( $F\text{-value} < 0.05$ ) کاهش یافته و در مناطق شمال و شمال غرب و غرب ایران (عموماً در مناطق مرتفع البرز و زاگرس) دامنه صفر به طور معنی‌دار ( $F\text{-value} < 0.05$ ) افزایش یافته است.

نقشه میانگین دامنه یک در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) در نگاره ۷ نشان داده شده است. با توجه به نگاره ۷ مشاهده می‌شود که در مناطق پست و دشتی در مرکز ایران با توجه پوشش گیاهی ضعیف، دامنه یک، کوچک است و در ارتفاعات البرز و زاگرس و جنگل‌های شمال ایران با توجه به افزایش پوشش گیاهی و تغییرات آن دامنه یک نیز افزایش یافته است. نگاره ۸ اختلاف دامنه یک بین دو زمان گذشته و حال و نقشه معنی‌داری تفاوت بین دو زمان و نتیجه تلفیق این دو نقشه

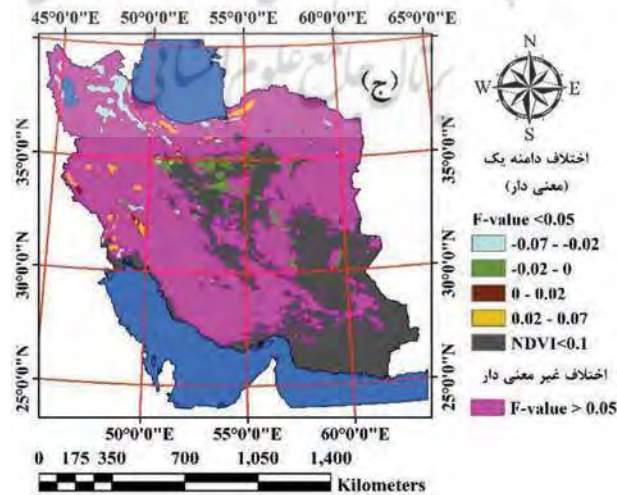
در طول یک پیکسل در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد و نگاره ۴ (ب) نتیجه تجزیه این دو منحنی رشد یا همان اجزای هارمونیک این دو سری زمانی را در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. با توجه به نگاره ۴ (ب) دامنه صفر (میانگین سیگنال) در سال ۲۰۱۸ از سال ۱۹۸۲ بالاتر می‌باشد که نشان دهنده افزایش سطح کلی پوشش گیاهی است و همچنین فاز هارمونیک اول (خطوط پیوسته قرمز و سیاه) در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۲ کاهش یافته است که نشان دهنده تسریع در شروع رشد و فرآیندهای فنولوژی گیاه در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۲ می‌باشد. همچنین دامنه دوم هارمونیک (فاصله میانگین یا دامنه صفر سال ۲۰۱۸ نسبت به خط آبی پررنگ) در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۲ (فاصله میانگین یا دامنه صفر سال ۱۹۸۲ نسبت به خط آبی نقطه چین) افزایش یافته است. این تغییر نشان دهنده افزایش تغییرات فصلی و ۶ ماهه در پوشش گیاهی در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۲ می‌باشد. همانند نگاره ۴ (الف و ب)، نگاره ۴ (ج و د) نیز نتایج بازسازی سری زمانی یک ساله در طول یک پیکسل در سال‌های ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ و اجزای هارمونیک این دو سری زمانی را نشان می‌دهد. با توجه به نگاره ۴ (ج و د) دامنه صفر در سال ۲۰۱۸ بالاتر از دامنه صفر در سال ۱۹۸۲ می‌باشد. فاز هارمونیک اول در سال ۱۹۸۲ و ۲۰۱۸ اندکی با هم اختلاف دارند که این اختلاف اندک نشان دهنده این است که شروع فصل رشد و فنولوژی در این پیکسل تغییرات چندانی نداشته است. مقایسه این دو پیکسل نیز نشان می‌دهد بیشترین میزان تغییرات پوشش‌های گیاهی با ثبات در طول یک سال توسط هارمونیک اول کنترل می‌شود. بنابراین دامنه اول و فاز اول هارمونیک دارای اطلاعات مهم و کاربردی به منظور تفسیر دوره‌های سالانه می‌باشد. در پوشش‌های گیاهی با ثبات کمتر در طول سال همانند پوشش گیاهی مراتع و جنگل‌های نیمه انبوه علاوه بر فاز و دامنه اول، فاز و دامنه دوم نیز بخشی از تغییرات را کنترل می‌کند. زیرا در این پوشش‌های گیاهی تغییرات فصلی و ۶ ماهه نیز در سیگنال‌های رشد وجود دارد.



نگاره ۷: نقشه دامنه یک به صورت میانگین در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (راست) و حال (چپ)



نگاره ۸: نقشه اختلاف دامنه یک بین زمان گذشته و حال (الف)، نقشه معنی داری اختلاف بین دو زمان (ب) و تلفیق نقشه معنی داری و اختلاف دامنه یک (ج)



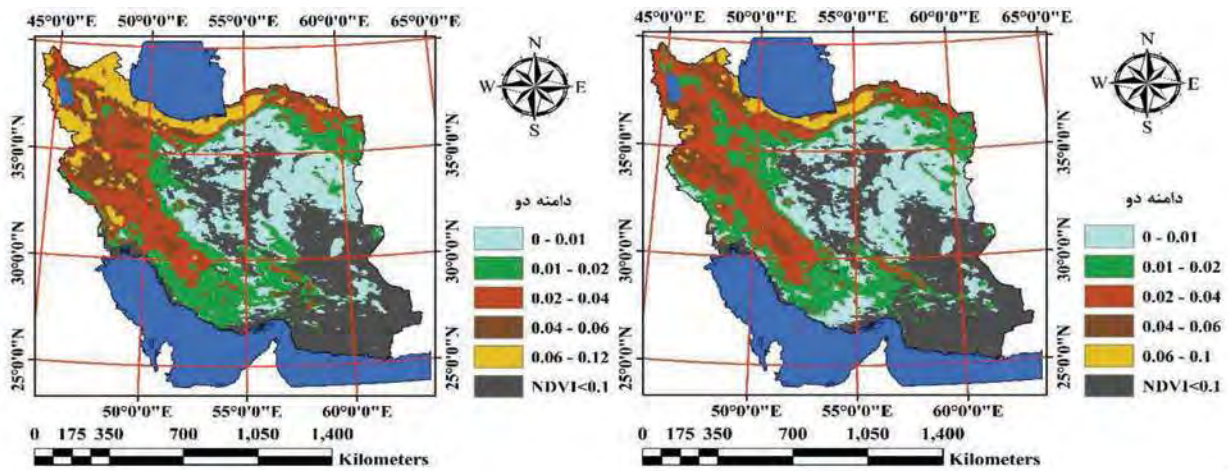
فاز هارمونیک اول در چهار سری زمانی گذشته، ۱۷۵ درجه و در چهار سری زمانی یک ساله اخیر ۱۶۱ درجه می‌باشد. کاهش ۱۴ درجه فاز اول هارمونیک نشان دهنده وقوع زودتر چرخه‌های سالانه به میزان ۱۴ روز نسبت به سری‌های زمانی سه دهه گذشته می‌باشد. با توجه به نگاره ۱۲(الف) در مناطق جنوب کشور اختلاف فازها در سال‌های اخیر نسبت به گذشته مثبت و در مناطق دیگر عموماً اختلاف فازها منفی می‌باشد. این موضوع نشان دهنده این است که در مناطق گرمسیر جنوب کشور شروع رشد گیاهان نسبت به گذشته دیرتر وقوع می‌یابد که نشان دهنده گرم‌تر شدن این مناطق است. در صورتی که سایر مناطق کشور سیگنال‌های سالانه رشد زودتر وقوع می‌یابد. با این حال با توجه به نگاره ۱۲(ب) تغییرات اختلاف فازها در زمان گذشته نسبت به حال در مناطق غرب و شمال غرب و همچنین شرق و شمال شرق ایران معنی‌دار می‌باشد. این تغییرات در سطح احتمال ۹۵ درصد ( $F\text{-value} < 0.05$ ) در نگاره ۱۲ (ج) نشان داده شده است.

نقشه میانگین فاز دو در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵)، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) در نگاره ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به نگاره ۱۳ همانند فاز یکم هارمونیک هرچه از مناطق پست و دشتی در مرکز ایران به سمت ارتفاعات البرز و زاگرس پیش رویم فاز دو نیز افزایش می‌یابد. میانگین میزان فاز هارمونیک دوم در سطح کل ایران در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته، ۲۲۰ درجه و در چهار سری‌های زمانی اخیر ۱۸۲ درجه می‌باشد. به عبارت دیگر شروع فازهای هارمونیک دوم به میزان ۱۹ روز نسبت به سه دهه قبل زودتر وقوع می‌یابد. زیرا فاز دوم شامل دو چرخه ۶ ماهه در یکسال می‌باشد ( $۱۹ = ۳۸ / ۲$ ). بنابراین هر درجه اختلاف در فاز دوم معادل نصف روز در یک سال می‌باشد. با توجه به نگاره ۱۴(الف) در اکثر مناطق کشور میزان فاز دو هارمونیک کاهش یافته است. همانطور که گفته شد این کاهش نشان دهنده تسریع در

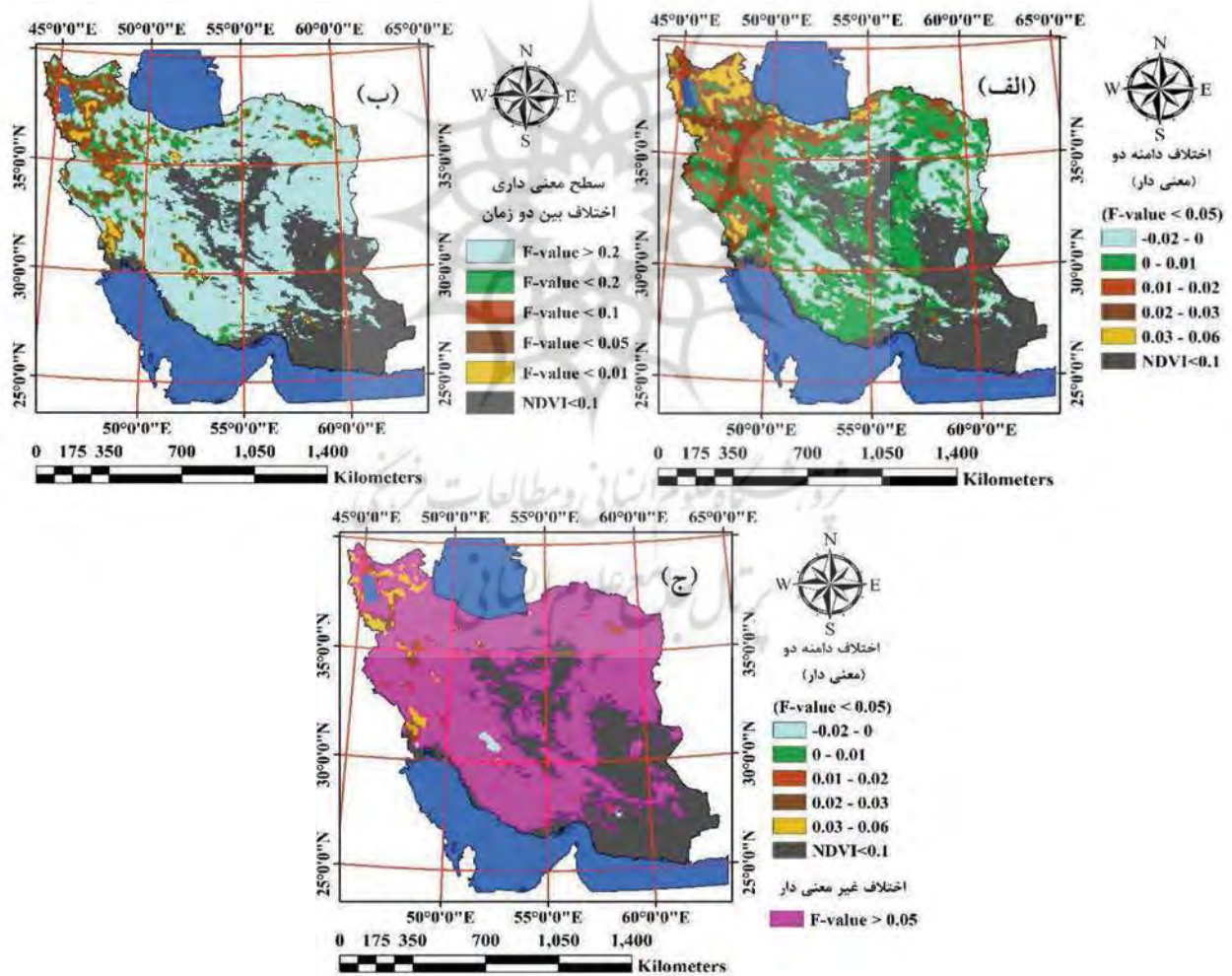
را نشان می‌دهد. با توجه به نگاره ۸(الف)، به طور کلی در مناطق مرکزی ایران و همچنین در شمال و شمال غرب به طور پراکنده در برخی نقاط دامنه یک کاهش یافته و در مناطق غرب و جنوب کشور نیز دامنه اول به طور پراکنده در برخی نقاط افزایش یافته است. با این حال با توجه به نگاره ۸(ب و ج) تنها در بخشی از مناطق مرکزی ایران، شمال، شمال غرب و غرب این تغییرات در سطح ۰/۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

نقشه میانگین دامنه دو در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) در نگاره ۹ نشان داده شده است. با توجه به نگاره ۹ همانند دامنه یک مشاهده می‌شود که در مناطق پست و دشتی ایران مرکزی با توجه پوشش گیاهی ضعیف، دامنه دو کوچک است و در ارتفاعات البرز و زاگرس و جنگل‌های شمال ایران با دامنه دو نسبت به مناطق پست افزایش یافته است. نگاره ۱۰ اختلاف دامنه دو بین دو زمان گذشته و حال و همچنین نقشه معنی‌داری تفاوت بین دو زمان و نقشه تلفیق این دو نقشه را نشان می‌دهد. با توجه به نگاره ۱۰(الف)، تغییراتی در افزایش و کاهش دامنه دو در سطح ایران قابل مشاهده است. با این حال با توجه به نقشه ۱۰(ب و ج) این تغییرات در برخی از مناطق شمال غرب و غرب و به صورت پراکنده در مناطقی از ایران تفاوت معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد ( $F\text{-value} < 0.05$ ) بین میانگین دامنه دو در زمان‌های گذشته و حال مشاهده شد.

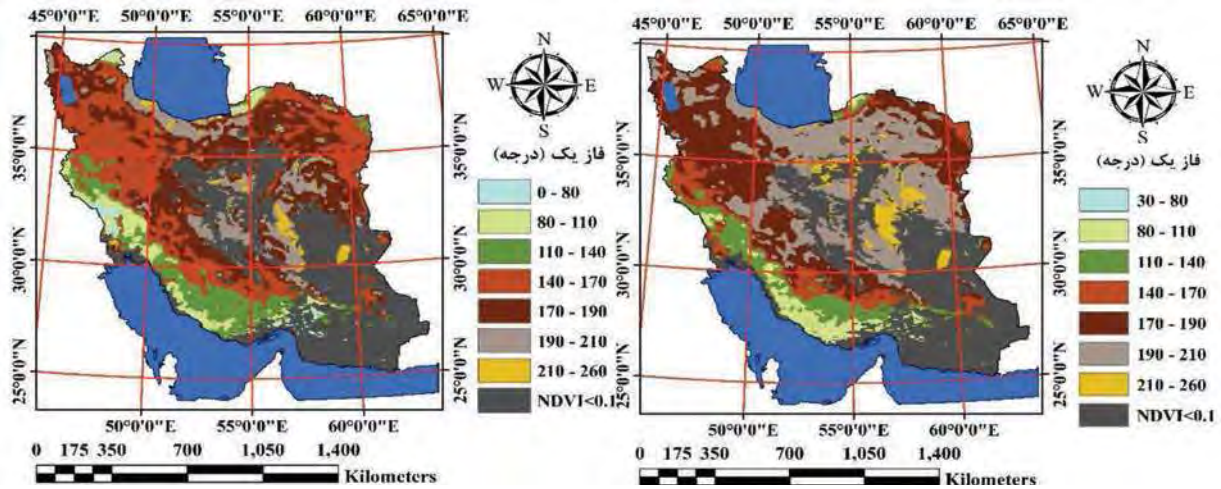
نقشه میانگین فاز یک در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (۱۹۸۲، ۱۹۸۳، ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵) و حال (۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) در نگاره ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نگاره ۱۱ هرچه از مناطق جنوب ایران به سمت شمال حرکت کنیم فاز یک افزایش می‌یابد به عبارت دیگر شروع سیگنال‌های سالانه در چرخه‌های رشد گیاهان با تأخیر مواجه می‌شود. همچنین هرچه از مناطق پست دشتی در مرکز ایران به سمت ارتفاعات پیش رویم فاز یک نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی در سطح ایران میانگین میزان



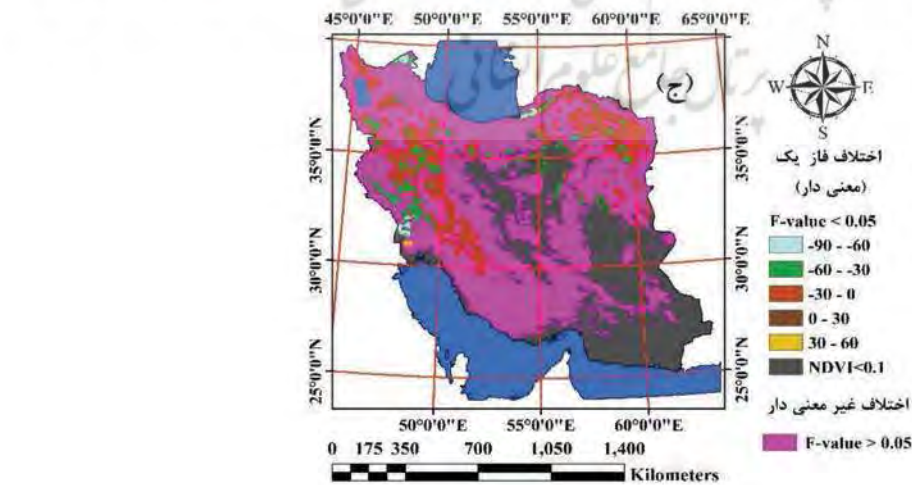
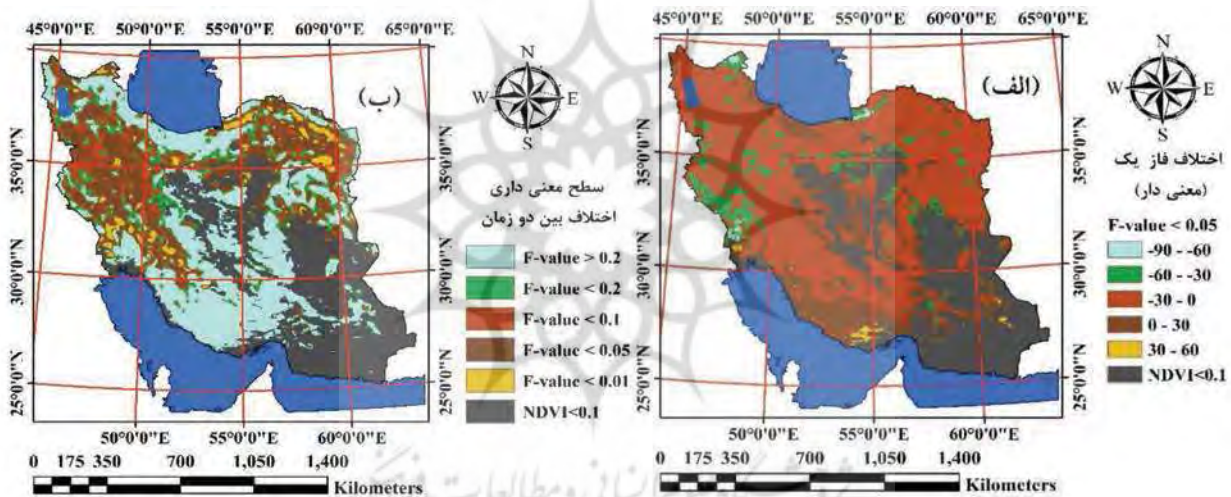
نگاره ۹: نقشه دامنه دو به صورت میانگین در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (راست) و حال (چپ)



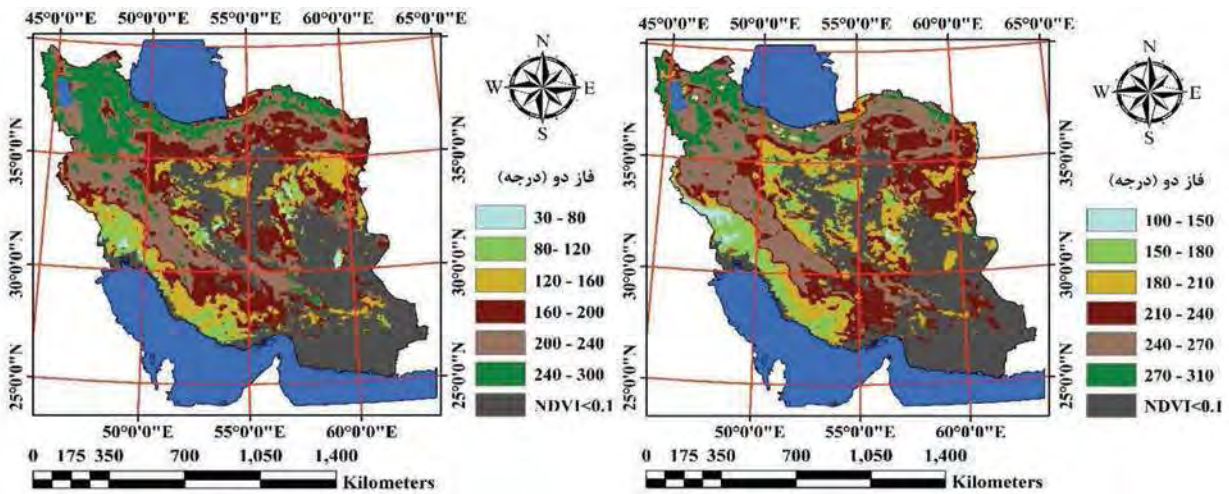
نگاره ۱۰: نقشه اختلاف دامنه دو بین زمان گذشته و حال (الف)، نقشه معنی داری اختلاف بین دو زمان (ب) و تلفیق نقشه معنی داری و اختلاف دامنه دو (ج)



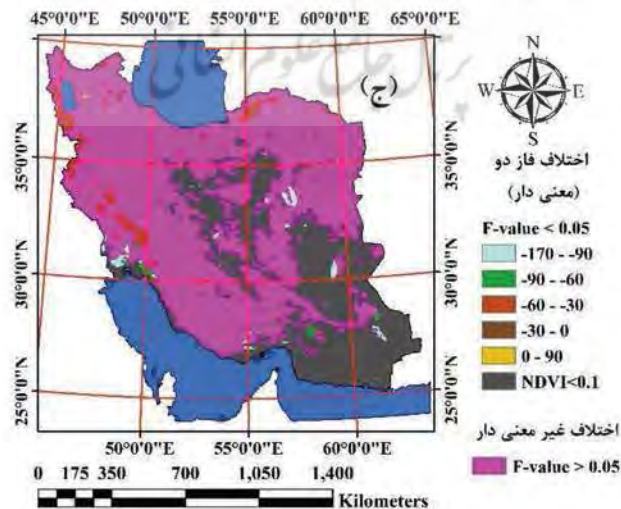
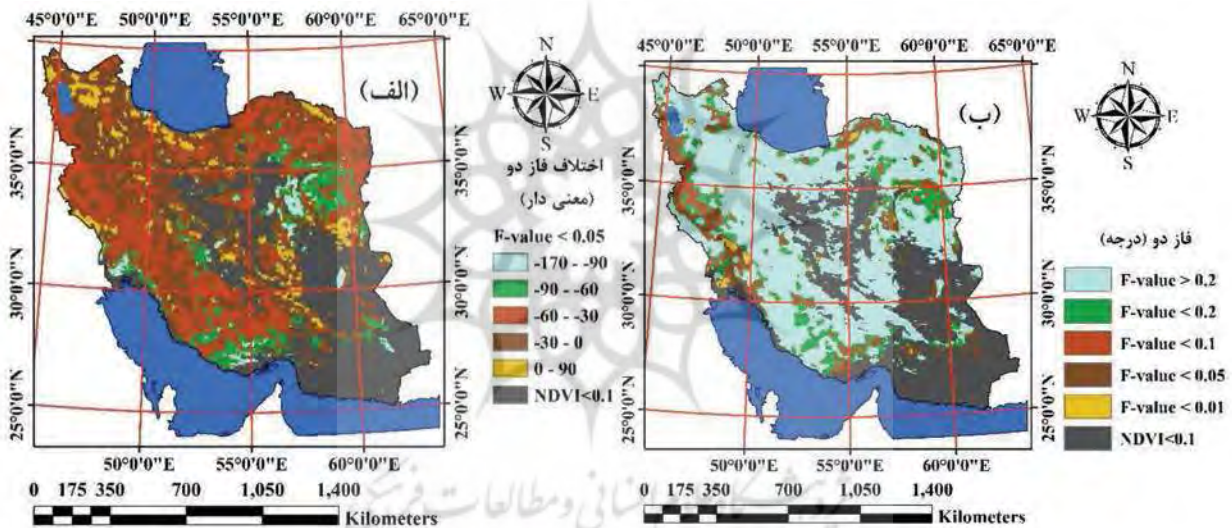
نگاره ۱۱: نقشه فاز یک به صورت میانگین در چهار سری‌های زمانی یک ساله در زمان گذشته (راست) و حال (چپ)



نگاره ۱۲: نقشه اختلاف فاز یک بین زمان گذشته و حال (الف)، نقشه معنی‌داری اختلاف بین دو زمان (ب) و تلفیق نقشه معنی‌داری و اختلاف فاز یک (ج)



نگاره ۱۳: نقشه فاز دو به صورت میانگین در چهار سری زمانی یک ساله در زمان گذشته (راست) و حال (چپ)



نگاره ۱۴: نقشه اختلاف فاز دو بین زمان گذشته و حال (الف)، نقشه معنی داری اختلاف بین دو زمان (ب) و تلفیق نقشه معنی داری و اختلاف فاز دو (ج)

داشت تفسیر دامنه و فازهای ۶ ماهه مشکل است. با توجه به نتایج، دامنه صفر یا میانگین سطح NDVI در مناطق پست و دشتی کاهش یافته است، اما در مناطق مرتفع کوهستانی نظیر ارتفاعات البرز و زاگرس دامنه صفر افزایش یافته است.

به عبارت دیگر سطح کلی پوشش گیاهی این مناطق افزایش یافته است. اختلاف میانگین دامنه‌های اول و دوم هارمونیک در زمان‌های گذشته و حال در برخی از مناطق بویژه مناطق نیمه شمالی و شمال غرب ایران معنی‌دار می‌باشد. با توجه به این موضوع که بیشترین میزان تغییرات توسط هارمونیک اول کنترل می‌شود، فاز هارمونیک اول در یک سری زمانی یک ساله حاوی اطلاعات مهمی از شروع رشد و فرآیندهای فنولوژیکی گیاهان می‌باشد. بر اساس نتایج میانگین فاز اول هارمونیک در سطح کل ایران در سری‌های زمانی جدید نسبت به سری‌های زمانی گذشته تقریباً به میزان ۱۴ درجه کاهش یافته است. با این حال این تغییر بیشتر در مناطق غرب و شمال شرق ایران در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار بود. این کاهش ارزش فازهای سالانه و ۶ ماهه، نشان دهنده تسریع در شروع رشد و فرآیندهای فنولوژی گیاهان نسبت به زمان‌های گذشته می‌باشد. به طور کلی می‌توان با استفاده از مؤلفه‌های هارمونیک سری‌های زمانی برای شناسایی و تعیین تغییرات پوشش‌های گیاهی استفاده نمود. با این حال در راستای پژوهش حاضر پیشنهادات زیر مطرح می‌شود.

۱- در پژوهش حاضر هرچند قدرت تفکیک زمانی تصاویر مورد استفاده به صورت روزانه بود، اما این تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی پایین (۰/۰۵ درجه) بودند. بنابراین پیشنهاد می‌شود از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر به منظور افزایش دقت استفاده شود.

۲- در پژوهش حاضر به منظور تعیین تغییرات پوشش گیاهی از چهار سری زمانی یک ساله در گذشته و چهار سری زمانی یک ساله در زمان حال استفاده شد. پیشنهاد می‌شود در راستای این پژوهش از همه تصاویر سری زمانی در طول دوره مورد نظر استفاده شود و با پردازش هر سری زمانی یک ساله، روند تغییرات اجزای هارمونیک سری‌های

شروع سیگنال‌های ۶ ماهه می‌باشد. با این حال با توجه به نگاره ۱۴ (ب و ج) تغییرات اختلاف فازها در زمان گذشته نسبت به حال در برخی از مناطق غرب و شمال کشور معنی‌دار ( $F\text{-value} < 0.05$ ) بود.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد الگوریتم HANTS به طور جدی می‌تواند در رفع داده‌های از دست رفته و دور افتاده در سری‌های زمانی NDVI مؤثر باشد. به طور کلی میانگین خطای RMSE بازسازی در چهار سری زمانی یک ساله در سال‌های گذشته و اخیر در پژوهش حاضر همواره کوچکتر از ۰/۱ واحد NDVI بود. همچنین میانگین این خطا در سطح ایران در چهار سری زمانی یک ساله در گذشته و حال به ترتیب ۰/۰۳۷ و ۰/۰۳۹ می‌باشد. این نتایج نشان دهنده کارایی بسیار خوب الگوریتم HANTS در رفع خطای داده‌های از دست رفته و دور افتاده در سری زمانی NDVI روزانه NOAA-AVHRR می‌باشد. همچنین در پژوهش حاضر از اجزای هارمونیک سری‌های زمانی NDVI سنجنده NOAA-AVHRR به منظور شناسایی تغییرات پوشش‌های گیاهی ایران استفاده شد. تغییرات اجزای هارمونیک سری‌های زمانی شامل تغییرات فازها و دامنه‌ها می‌باشد. هارمونیک صفر نشان دهنده سطح کلی پوشش گیاهی است و فاز اول هارمونیک در یک سری زمانی یک ساله مشخص کننده زمان شروع رشد گیاهان چند ساله است در صورتی که فاز دوم در یک سری زمانی یک ساله زمان‌بندی شروع رشد گیاهان با دوره رشد ۶ ماهه یا دوره‌های رشد کوتاه و فصلی است. زیرا بیشترین میزان واریانس در گیاهان چند ساله با یک دوره رشد توسط هارمونیک اول و گیاهان فصلی با دو دوره رشد یا یک دوره رشد کوتاه در ابتدای فصل توسط هارمونیک دوم کنترل می‌شود. به طور کلی فاز سالانه موقعیت زاویه‌ای شروع سیگنال سالانه و فاز ۶ ماهه به طور ذاتی نشان دهنده میزان نوسان و موقعیت زاویه‌ای یک منحنی نیمه ساله یا ۶ ماهه هستند. با این حال باید توجه



VEGETATION user conference (pp. 195-201). Antwerp Belgium.

8. 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), 4799-4818.
9. Ghafarian Malamiri, H. R., Rousta, I., Olafsson, H., Zare, H. and Zhang, H. (2018). Gap-Filling of MODIS Time Series Land Surface Temperature (LST) Products Using Singular Spectrum Analysis (SSA). *Atmosphere*, 9 (9) 334.
10. Jakubauskas, M. E., D. R. Legates, & J. H. Kastens, (2002). Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data, *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1–3), 127-139.
11. Jakubauskas, M., & 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), 384-389.
12. Jiang, X., D. Wang, L. Tang, J. Hu, & X. Xi, (2008). Analysing the vegetation cover variation of China from AVHRR NDVI data”, *International Journal of Remote Sensing*, 29 (17-18), 5301–5311.
13. Julien, Y., & J. A. Sobrino, (2010). Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data”, *Remote Sensing of Environment*, 114 (30), 618-625.
14. Lesica, P. & Kittelson, P.M. (2010). Precipitation and temperature are associated with advanced flowering phenology in semi-arid grassland. *Journal of Arid Environments*, 74, 1013-1017.
15. Liu, Q., Fu, Y. H., Zhu, Z., Liu, Y., Liu, Z., Huang, M.,...& 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), 3702-3711.
16. Liu, Y., Li, Y., Li, S., & Motesharrei, S. (2015). Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors. *Remote Sensing*, 7(10), 13233-13250.
17. Mao, D., Wang, Z., Luo, L., & Ren, C. (2012). Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 528-536.

زمانی بررسی تعیین شود. به عنوان مثال فازها با چه نرخ در حال تغییر می‌باشند.

۳- پیشنهاد می‌شود تغییرات اجزای هارمونیک تولید شده نسبت به تغییرات دما و بارندگی و سال‌های خشکسالی و ترسالی مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع و مأخذ

۱. زارع خورمیزی، حسینی، مختاری، غفاریان مالامیری؛ هادی، سید زین‌العابدین، محمدحسین، حمیدرضا (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، ۲۱ (۳): ۲۲۱–۲۲۵.
۲. غفاریان مالامیری، زارع خورمیزی؛ حمیدرضا، هادی. (۱۳۹۶). بازسازی سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS). *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۸ (۳): ۳۷–۵۵.
3. 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), 365-386.
4. Bertin, R. I. (2008). Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 135(1), 126-146.
5. Chuai, X. W., Huang, X. J., Wang, W. J., & Bao, G. (2013). NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1696-1706.
6. 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, 167-180.
7. De Wit, A. J. W., & Su, B. (2005). Deriving phenological indicators from SPOT-VGT data using the HANTS algorithm. In 2nd international SPOT-

- Climate Data Record (CDR) of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Version 4 [1982–2014]. NOAA National Climatic Data Center.
28. Wen, J., Z. Su, & Y. M. Ma, (2004). Reconstruction of a cloud-free vegetation index time series for the Tibetan Plateau, *Mountain Research and Development*, 24 (4), 348-353.
29. 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), 2335-2359.
30. 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, 177-187.
31. Xu, Y., & Shen, Y. (2013). Reconstruction of the land surface temperature time series using harmonic analysis. *Computers & Geosciences*, 61, 126–132.
32. 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), 1142-1156.
33. 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), 489-512.
34. 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), 22151-22156.
35. 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), 217-228.
36. Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R. B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y. Y., ... & Hwang, T. (2014). Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 509 (7498), 86.
18. Menenti, M., S. Azzali, W. Verhoef, & R. van Swol, (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), 233-237.
19. 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), 1957-1965.
20. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.
21. 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(3).
22. 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, 156-173.
23. Roerink, G.J., M. Menenti, & W. Verhoef, (2000). Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), 1911-1917.
24. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309–317.
25. Verhoef, W. 1996. Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series (HANTS). In S. Azzali & M. Menenti (Eds.), In: Fourier analysis of temporal NDVI in southern Africa and America continent. The Netherlands, DLO Winand Staring Centre, Report 108, 19–24.
26. Verhoef, W., M. Menenti, & S. Azzali, (1996). Cover A colour composite of NOAAAVHRR- NDVI based on time series analysis (1981-1992). *International Journal of Remote Sensing*, 17(2), 231- 235.
27. Vermote, E., Justice, C., Csiszar, I., Eidenshink, J., Myneni, R., & Baret, F. Masuoka, Robert Wolfe, Martin Claverie and NOAA CDR Program (2014): NOAA