

بازسازی سری‌های زمانی NDVI سنجنده MODIS با استفاده از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS) (مطالعه موردی: استان یزد)

هادی زارع خورمیزی^۱، سید زین‌العابدین حسینی^{۲*}، محمدحسین مختاری^۳،
حمیدرضا غفاریان مالمیری^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مرتع‌داری، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، ایران
۲. استادیار دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، ایران
۳. استادیار دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، ایران
۴. استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: ۹۵/۰۹/۰۷ پذیرش: ۹۶/۰۶/۲۰

چکیده

شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، یکی از شاخص‌های گیاهی است که در زمینه مطالعه پایش تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان، کاربردهای فراوانی دارد. باید توجه داشت که این شاخص، نیازمند داده‌های زمانی پیوسته و کامل در یک بازه زمانی مورد نظر می‌باشد. با این حال در مواردی گردوغبارهای جوی، ذرات معلق در هوا، عدم کارایی سنجنده، گازها به‌ویژه حضور ابرها، به‌طور قابل توجهی بر انرژی بازتابنده از سطح به‌ویژه در محدوده‌ی طول‌موج‌های کوتاه و مادون قرمز اثر می‌گذارد و منجر به ایجاد تصاویری با داده‌های از دست‌رفته و یا مقادیر غیرقابل قبول می‌شود. در این مطالعه، به‌منظور رفع مشکل داده‌های جاافتاده و دورافتاده، در سری‌های زمانی شاخص NDVI سنجنده MODIS طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵، از الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS) استفاده می‌شود. این الگوریتم برای اجرای دو کار طراحی شده است: ۱- شناسایی و از بین بردن نقاط دورافتاده و مشاهدات ابری، ۲- پر کردن فاصله باقی‌مانده بین مشاهدات معتبر توسط درون‌یابی زمانی. ارزیابی نتایج الگوریتم HANTS نشان می‌دهد که خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، بین داده‌های اصلی و بازسازی‌شده در سری‌های زمانی یک‌ساله و پنج‌ساله، به

ترتیب کمتر از ۰/۰۲ و ۰/۰۳ واحد NDVI می‌باشند. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم HANTS، در رفع مشکل داده‌های از دست‌رفته و داده‌های دورافتاده در سری‌های زمانی NDVI، می‌تواند مؤثر واقع شود.

واژگان کلیدی: تجزیه و تحلیل هارمونیک، تبدیل فوریه سریع، سری‌های زمانی، NDVI، سنجنده مودیس

۱- مقدمه

بررسی تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا در بسیاری از زمینه‌های مطالعاتی، از جمله در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی منابع طبیعی، منابع آب و کشاورزی، کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی، خشکسالی و ... کاربرد فراوان دارد. در طی سال‌های اخیر، سنجش‌ازدور به دلیل مزایایی از قبیل پوشش وسیع منطقه مورد مطالعه، امکان برداشت داده با توالی منظم، فرمت رقومی مناسب برای پردازش کامپیوتری و ارزان‌تر بودن نسبت به روش‌های برداشت زمینی، همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع جمع‌آوری اطلاعات مکانی بوده که در راستای پایش منابع طبیعی توجه بسیاری از کارشناسان و متخصصان علوم مختلف را به خود جلب کرده است (لو^۱ و همکاران، ۲۰۰۴: ۲۳۶). پایش تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان، به‌عنوان یکی از کاربردهای سنجش‌ازدور، با استفاده از نسبت‌های طیفی و شاخص‌های گیاهی قابل اجراست. شاخص‌های پوشش گیاهی نوع ویژه‌ای از شاخص‌های طیفی هستند که برای شرح اطلاعات از داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و معمولاً اطلاعات را از باندهای طیفی قرمز و مادون قرمز نزدیک استخراج می‌کنند (ثنایی نژاد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۳).

با این وجود بسیاری از این مطالعات نیازمند در اختیار داشتن داده‌های زمانی پیوسته، بدون خطا و جافتادگی هستند. از طرفی پیوستگی زمانی و مکانی داده‌های سنجش از راه دور (به‌عنوان مثال سری زمانی NDVI)، به دلیل عواملی از قبیل وجود گردوغبارهای جوی، ذرات معلق در هوا و گازها به‌ویژه حضور ابرها، می‌تواند به‌طور قابل توجهی دستخوش تغییر شود؛ این عوامل با تأثیر بر انرژی بازتاب شده از سطح، قرائت سنجنده‌های اپتیکی را با خطا مواجه می‌کنند؛ بنابراین علاوه بر کاربرد

1. Lu

فراوان داده‌های ماهواره‌ای در پایش تغییرات پوشش گیاهی، سودمندی و اعتبار این داده‌ها به‌طور قابل توجهی به شرایط جوی بستگی دارد (جولین و سوبرینو^۱، ۲۰۱۰: ۶۱۸). به‌عنوان مثال، پوشش ابر با تأثیر زیادی که بر رادیانس اندازه‌گیری شده در محدوده طول‌موج‌های کوتاه و مادون‌قرمز دارد، یک مانع اساسی برای رؤیت و پایش تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شود. (مکنالی و واتس^۲، ۲۰۰۳: ۳۴۱۱). ابرها در تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت پدیده‌هایی که در باندهای مرئی طیف الکترومغناطیسی، نسبت به سایر پدیده‌های زمینی بازتابندگی بالاتری شناسایی می‌شوند که در باندهای حرارتی هم دمای پایین‌تری دارند (آکرمن^۳ و همکاران، ۱۹۹۸: ۳۲۱۴۲).

به‌منظور شناسایی و حذف داده‌های ابری در تصاویر ماهواره‌ای، تلاش‌های زیادی صورت گرفته (استو^۴ و همکاران، ۱۹۹۱؛ سیمپسون و گوبات^۵، ۱۹۹۶؛ هندرسون سلس^۶، ۱۹۸۲؛ سودرس و کریبل^۷، ۱۹۸۸) اما نتیجه نهایی این روش‌ها ایجاد تصاویری با داده‌های دورافتاده^۸ و داده‌های از دست‌رفته^۹ بوده است. داده‌های از دست‌رفته، با توجه به‌اندازه، توزیع و تداوم خود می‌توانند بسیار کوتاه و به‌صورت پراکنده، یا به‌صورت فاصله طولانی مداوم در یک سری زمانی باشند؛ از طرفی داده‌های دورافتاده (پرت) مقادیری غیرطبیعی دارند که انحراف آن‌ها از تغییرات طبیعی، در مجموعه داده‌ها بیشتر است (غفاریان‌المیری، ۲۰۱۵: ۴).

سری‌های زمانی می‌توانند به‌صورت دوره‌ای (دارای دوره‌های تناوب مشخص) یا غیر دوره‌ای باشند. تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی، بسته به نوع آن‌ها متفاوت است از این‌رو آنالیز فوریه برای داده‌های دوره‌ای (فوریه^{۱۰}، ۱۸۱۸) و تئوری موجک^{۱۱} برای داده‌های غیر دوره‌ای (ریچر^{۱۲}، ۱۹۵۳) بکار می‌رود

1. Julien & Sobrino
2. McNally & Watts
3. Ackerman
4. Stowe
5. Simpson & Gobat
6. Henderson-Sellers
7. Saunders & Kriebel
8. Outlier
9. Gaps
10. Fourier
11. Wavelet
12. Ricker

(ورهوف^۱، ۱۹۹۶). الگوریتم HANTS^۲ برای بازسازی داده‌های ازدست‌رفته، در سری‌های زمانی با رفتار دوره‌ای، توسط وروهوف در سال ۱۹۹۶ پیشنهاد شد؛ این الگوریتم برای اجرای دو کار طراحی شد (رورینگ و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۹۱۱): ۱- شناسایی و از بین بردن نقاط دورافتاده و مشاهدات ابری؛ ۲- پر کردن فاصله باقی‌مانده بین مشاهدات معتبر توسط درون‌یابی زمانی.

تغییرات فصلی و سالانه‌ی خورشید و همچنین تغییرات آب و هوایی، منجر به تغییرات دوره‌ای در برخی از سری‌های زمانی مانند شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)^۳ می‌شود. از سویی مشخص کردن این اجزای دوره‌ای برای بازسازی یک سری زمانی متناوب با داده‌های جافتاده و داده‌های دورافتاده حیاتی است. برای بازسازی داده‌ها جافتاده و حذف نقاط دورافتاده، تعدادی از روش‌ها توسعه‌یافته و درنهایت به‌صورت موفقیت‌آمیزی در متون استفاده شده است. برای مثال، الگوریتم تبدیل فوریه سریع (FFT)^۴ برای بازسازی سری زمانی شاخص NDVI بکار گرفته شد (ورهوف، ۱۹۹۶؛ سلرس^۵ و همکاران، ۱۹۹۴؛ مننتی^۶ و همکاران، ۱۹۹۳).

الگوریتم FFT به داده پیوسته (بدون داده جافتاده) با فاصله نمونه‌برداری مساوی در زمان نیاز دارد؛ ولی الگوریتم تجزیه و تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS)، برای حذف داده‌های دورافتاده و پر کردن فاصله‌ی داده‌های جافتاده توسعه داده شده که در داده‌های سری زمانی شاخص NDVI با فاصله نمونه‌برداری نامنظم و استخراج اطلاعات فنولوژیکی گیاه استفاده می‌شود (ورهوف و همکاران، ۱۹۹۶؛ رورینگ و همکاران، ۲۰۰۰). این الگوریتم در طی چند سال اخیر، به‌منظور حذف داده‌های پرت و یا بازسازی داده‌های از بین رفته در اثر ابر در تصاویر سری زمانی استفاده می‌شود.

ژو^۷ و همکاران (۲۰۱۵) عملکرد HANTS را در بازسازی سری زمانی جهانی NDVI، سنجنده MODIS بررسی کرده‌اند و ون^۸ و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهشی دیگر، توانایی HANTS برای بازسازی اثر پوشش ابر در تصاویر NDVI سنجنده AVHRR، برای تمام مناطق کوهستانی فلات

1. Verhoef
2. Harmonic Analysis of Time Series algorithm (HANTS)
3. Normalized Difference Vegetation Index
4. Fast Fourier Transform
5. Sellers
6. Menenti
7. Zhou
8. Wen

تبت موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها، سودمندی الگوریتم HANTS را در حذف مشاهدات آلوده به ابر و ایجاد تصاویر قابل‌اعتمادتر به اثبات رساند.

جیانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تجزیه تحلیل هارمونیک سری‌های زمانی (HANTS)، اثر پوشش ابر بر روی داده‌های سری زمانی NDVI سنجنده AVHRR را در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۱ بررسی کردند. در پژوهشی دیگر ویت و سو^۲ (۲۰۰۵) قابلیت HANTS در استخراج شاخص‌های فنولوژیکی و تخمین شروع و پایان فصل رشد، با استفاده از سری زمانی NDVI تصاویر SPOT موردبررسی قرار دادند. غفاریان مالمیری (۲۰۱۵) نیز قابلیت HANTS در بازسازی داده جافتاده و داده‌های دورافتاده را در سری زمانی LST^۳ ساعتی، با استفاده از هر دو نسخه نرم‌افزار HANTS موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داد هنگامی که تعداد داده‌های جافتاده از نصف کل مشاهدات کمتر باشد نتایج الگوریتم HANTS قابل‌قبول است. جیا و همکاران (۲۰۰۹) الگوریتم HANTS را برای ایجاد سری‌های زمانی بدون داده جافتاده، به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق (ET)^۴ با استفاده از داده MODIS بکار بردند.

هدف از پژوهش حاضر، معرفی و همچنین ارزیابی عملکرد الگوریتم HANTS، به‌منظور حذف مشاهدات ابری و داده‌های دورافتاده در سری‌های زمانی کوتاه و بلندمدت NDVI می‌باشد. بدین منظور ابتدا داده‌های سری زمانی NDVI برای تعیین مؤثرترین و معتبرترین دوره‌های تناوب، با استفاده از سری فوریه (FFT) مورد آزمایش قرار گرفت؛ سپس ترکیبات مختلف پارامتری برای کسب نتیجه بهینه توسط الگوریتم HANTS در بازسازی سری‌های زمانی NDVI، بر اساس کمترین میزان خطا بکار رفت.

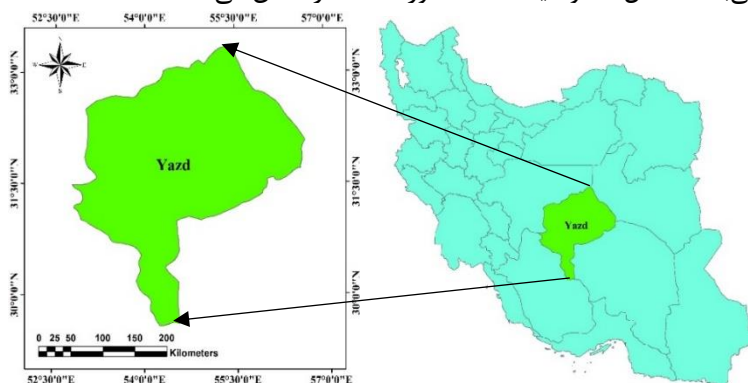
نتایج این پژوهش می‌تواند در مطالعات سری‌های زمانی داده‌های سنجنش‌ازدور، به‌ویژه در بررسی تغییرات پوشش گیاهی با توجه به داده‌های خالص تولیدشده توسط الگوریتم HANTS مفید باشد.

-
1. Jiang
 2. Wit & Su
 3. Land Surface Temperature
 4. Evapotranspiration

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی، استان یزد در مرکز ایران، با وسعت استان یزد حدود ۷۴۰۰۰ کیلومترمربع می‌باشد که بین عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۹ دقیقه و ۵۶ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی از نصف‌النهار مبدأ قرار گرفته است. قله شیرکوه با ارتفاع ۴۰۳۶ متر، بلندترین ارتفاع آن و کویر سیاه کوه، با ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر پست‌ترین نقطه این استان می‌باشد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران

۲-۲- تصویر ماهواره‌ای MODIS

سنجنده MODIS یکی از پنج سنجنده مستقر بر روی ماهواره «ترا»^۱ است که در اواسط سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب گردید. در سال ۲۰۰۲ ماهواره Aqua با سنجنده مادیس نیز پرتاب شد. سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند، در محدوده ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر طیف الکترومغناطیس می‌باشد که ۲۰ باند آن در محدوده مرئی و ۱۶ باند آن در ناحیه حرارتی است (ریچارد^۲ و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۰۵۷). توان تفکیک مکانی برای باندهای ۱ و ۲، ۲۵۰ متر، برای باندهای ۳ تا ۷، ۵۰۰ متر و برای باندهای ۸ تا ۳۶، یک کیلومتر می‌باشد. این سنجنده هر یک یا دو روز، کل کره زمین را تحت پوشش خود دارد؛ بنابراین دارای قدرت تفکیک زمانی بالایی است.

1. Terra
2. Richard

شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)^۱ یکی از شاخص‌هایی است که در زمینه پایش تغییرات پوشش گیاهی کاربردهای فراوانی دارد. این شاخص با توجه به رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (ثنایی نژاد و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۳).

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

در رابطه (۱) *NIR* و *RED* به ترتیب بازتاب طیفی باند مادون قرمز 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. دامنه‌ی به‌دست‌آمده از این شاخص، از -۱ تا +۱ متغیر است. در این مطالعه از محصول ۱۶ روزه شاخص NDVI سنجنده MODIS از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ تحت عنوان MOD13Q1، با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر استفاده گردید. تصویر شماره یک مربوط به اول ژانویه، تصویر دوم مربوط به روز ۱۷ ژانویه و تصویر شماره آخر در هر سال به اواخر دسامبر اختصاص دارد؛ بنابراین هر سال شامل ۲۳ تصویر ۱۶ روزه می‌باشد. در نتیجه سری زمانی یک‌ساله NDVI، شامل ۲۳ تصویر و سری زمانی پنج‌ساله NDVI در این پژوهش ۱۱۵ تصویر را شامل می‌شود. تصاویر NDVI این محصولات به‌عنوان سطح ۳ با پروجکشن Sinusoidal ارائه شده که در نهایت به پروجکشن UTM تغییر داده شدند. با توجه به اینکه در این مطالعه از محصولات سطح ۳ استفاده شده مشکل اصلی تصاویر NDVI این سطح، وجود داده‌های دورافتاده و داده‌های از دست‌رفته، با فواصل بسیار کوتاه و با توزیع پراکنده در سری‌های زمانی می‌باشد.

۲-۳- مبانی نظری

۲-۳-۱- الگوریتم HANTS (Harmonic Analysis of Time Series)

الگوریتم HANTS براساس مفهوم تبدیل فوریه گسسته (FFT) بنیان نهاده شده (ورهوف، ۱۹۹۶؛ مننتی و همکاران، ۱۹۹۳؛ رورینگ و همکاران، ۲۰۰۰) که برای مدل‌سازی سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای بکار می‌رود. پس از توضیح این الگوریتم، به‌منظور به دست آوردن یک مدل قابل‌اعتماد توسط الگوریتم، پارامترهای مورد نیاز نیز شرح داده می‌شود.

اگر y_i یک سری زمانی با N مشاهده باشد، (از ۱ تا N) این سری زمانی را می‌توان با یک سری فوریه توصیف کرد (رابطه ۲).

1. Normalized Difference Vegetation Index

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

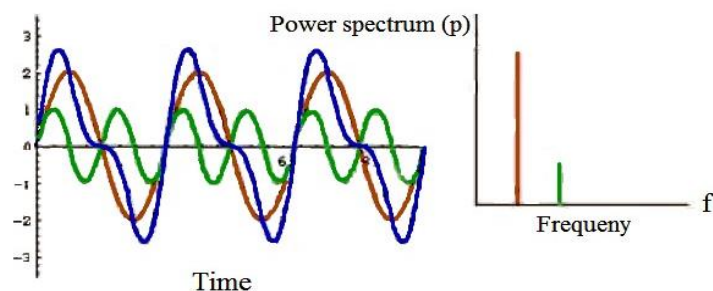
که در آن w_j فرکانس j ام دوره هارمونیک در سری فوریه و زمانی که نمونه i ام گرفته شده با t_i نشان داده می‌شود. در این رابطه M تعداد فرکانس سری فوریه ($M \leq N$)، a_j و φ_j دامنه و فاز j امین دوره هارمونیک هستند. از آنجاکه فرکانس صفر فاز ندارد، دامنه مربوط به فرکانس صفر (a_0) با میانگین همه N مشاهده از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

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

در الگوریتم HANTS پس از انتخاب تعداد فرکانس (M) و فرکانس (w_j)، پارامترهای ناشناخته سری فوریه، یعنی دامنه (a_j) و ارزش فازها (φ_j) توسط برازش سری زمانی، از مشاهدات توسط روش کمترین مربعات^۱ تعیین می‌شوند. به‌منظور ایجاد یک مدل قابل‌اعتماد از یک سری زمانی با الگوریتم HANTS پارامترهایی وجود دارد که باید توسط کاربر تعریف شود:

- ۱- **محدوده داده‌های معتبر**^۲: منظور محدوده‌ای قابل‌قبول از مقادیر مشاهده می‌باشد که مشاهدات خارج از این محدوده در مرحله اول با اختصاص وزن صفر به آن‌ها حذف می‌شوند.
- ۲- **دوره**^۳: تعداد نمونه‌های زمانی، در هر مؤلفه دوره‌ای در سری فوریه می‌باشد.
- ۳- **تعداد فرکانس (NOF)**^۴: NOF میزان جزئیاتی را تعیین می‌کند که می‌تواند در سیگنال بازسازی استفاده شود. تعداد فرکانس پایین، یک سیگنال با جزئیات کمتر از یک تعداد فرکانس بالا ایجاد می‌کند. به‌عنوان مثال شکل ۲ یک سیگنال هارمونیک (سیگنال آبی) را نشان می‌دهد که از تلفیق دو سیگنال با فرکانس‌های مختلف تشکیل شده است (فرکانس‌های سبز و قهوه‌ای)؛ بنابراین همواره با افزایش تعداد فرکانس، میزان جزئیات بازسازی‌شده در فرکانس هارمونیک افزایش می‌یابد.

1. Least square method
 2. Valid data range
 3. Period
 4. Number of Frequency



شکل ۲ یک سری زمانی (آبی) که از ترکیب دو سری زمانی (سبز و قهوه‌ای) تشکیل شده (سمت چپ) و توان طیف مربوط به آن (سمت راست)

۴- جهت نقاط دورافتاده^۱: جهت نقاط دورافتاده (پرت) با اشاره به مدل فعلی منحنی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال پوشش ابر به کاهش مقادیر NDVI می‌انجامد؛ بنابراین جهت نقاط دورافتاده، در الگوریتم به‌صورت کاهش (Low) انتخاب می‌شود.

۵- آستانه میزان خطای قابل قبول (FET)^۲: انحراف مطلق را مشخص می‌کند که در صورت انحراف از رقم کنونی منحنی، در جهت انتخاب‌شده، هنوز هم قابل قبول است. پس از هر تکرار، مشاهداتی که انحراف آن‌ها بزرگ‌تر از FET باشند به‌عنوان نقاط دورافتاده تنظیم‌شده و از محاسبات با اختصاص وزن صفر به آن‌ها، حذف می‌شوند.

۶- درجه فرامعین بودن (DOD)^۳: حداقل تعداد نقاط داده‌های اضافی را نشان می‌دهد که باید در برازش منحنی استفاده شود. تعداد مشاهدات معتبر، همیشه باید بیشتر از تعداد پارامترهای مورد نیاز برای توصیف سیگنال باشند ($2 \times \text{NOF} - 1$). 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 باقی‌مانده کمتر از $\text{DOD} + 2\text{NOF} - 1$ باشد؛

۲- تمام نقاط قبل رسیدن به مقدار $\text{DOD} + 2\text{NOF} - 1$ از مقدار FET کوچک‌تر باشند.

تعیین پارامترهای فوق می‌تواند با توجه به هدف کاربر متفاوت باشد؛ همچنین تعیین این پارامترها در ابتدا مستلزم شناخت کارکرد هر کدام از پارامترها در ایجاد یک سیگنال می‌باشد. پس تعیین مقادیر پارامترها، به‌منظور دستیابی به بالاترین دقت، انجام چند آزمون و خطا لازم است.

1. Direction of outliers
2. Fit Error Tolerance
3. Degree of OverDeterminedness

در الگوریتم HANTS، برای هر مشاهده در سری زمانی یک وزن از یک یا صفر، به ترتیب برای داده خوب و بد (داده دورافتاده) تخصیص داده می‌شود. به‌منظور یافتن نقاط دورافتاده و مشاهدات آلوده به ابر، الگوریتم HANTS برازش منحنی تکرارشونده انجام می‌دهد. در مرحله اول، با استفاده از روش حداقل مربعات، برازش منحنی با استفاده از تمام داده‌ها در سری انجام می‌شود. در مرحله دوم مشاهدات با منحنی تعیین شده در تکرار ۱ مقایسه می‌شوند؛ مشاهداتی که انحراف آن‌ها از یک آستانه از پیش تعریف شده (FFT) بیشتر باشند با اختصاص وزن صفر، حذف می‌شوند. داده‌های باقی‌مانده برای محاسبه حداقل مربعات منحنی برازش، دوباره استفاده شده و داده‌های دورافتاده شناسایی می‌شوند سپس با استفاده از آستانه، همانند مرحله اول حذف می‌شوند. این تکرار تا زمانی که تمام مشاهدات باقی‌مانده، درون آستانه‌ی از پیش تعریف شده وجود داشته باشند یا تعداد داده‌های باقی‌مانده، از تعداد پارامترهای توصیف منحنی کمتر باشد ادامه می‌یابد.

۲-۳-۲- تبدیل فوریه سریع (FFT) و تجزیه و تحلیل توان طیف (Power Spectrum)

تجزیه توابع متناوب به اجزای آن، بینش مفیدی در فرآیند تعیین 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 به صورت رابطه ۴ بازنویسی شود (غفاریان مالمیری، ۲۰۱۵: ۳۱).

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(t_1) & \cdots & f_M(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(t_N) & \cdots & f_M(t_N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$y = Fa \quad (5)$$

اگر دو طرف رابطه را در ترانپوز ماتریس F ضرب کنیم، خواهیم داشت (رابطه ۶):

$$a = (F^T F)^{(-1)} F^T y \text{ or } F^T y = F^T F a \quad (6)$$

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

نتایج حاصل از FFT در یک سری زمانی با تعداد N داده، دامنه‌ها و فازهای تمام فرکانس‌ها (N فاز و N فرکانس) را شامل می‌شود. با داشتن تمام دامنه‌ها از یک سری فوریه، می‌توان بیشتر اجزای دوره‌ای معنی‌دار را با استفاده از تجزیه و تحلیل توان طیف^۱ شناسایی کرد (بلومفیلد^۲، ۲۰۰۰؛ غفاریان مالمیری، ۲۰۱۵: ۳۲). منحنی توان طیف در واقع منحنی تغییرات توان در برابر فرکانس است که توان خود، توان دوم دامنه‌ی هر فرکانس می‌باشد (غفاریان مالمیری، ۲۰۱۵: ۳۲). مقادیر بزرگ‌تر در یک منحنی توان طیف، فرکانس غالب در سری زمانی را نشان می‌دهد؛ بنابراین از طریق تجزیه تحلیل FFT و محاسبه توان طیف، می‌توان اجزای دوره‌ای مهم را تعیین نمود. به‌عنوان مثال، شکل ۲ (چپ) یک ورودی سری زمانی (خط آبی) را نشان می‌دهد که از دو سری زمانی سینوسی (خطوط سبز و قهوه‌ای) تشکیل شده و در سمت راست، توان طیف مرتبط با دامنه این دو مؤلفه نشان داده می‌شود.

۲-۴- معرفی نرم‌افزار HANTS

نرم‌افزار HANTS برای سری‌های زمانی با داده‌های جاافتاده توسط NLR^۳ طراحی شده است. دو ورژن مختلف از نرم‌افزار HANTS وجود دارد که در این پژوهش با نام نسخه قدیم و جدید معرفی می‌شود. تفاوت اصلی بین نسخه‌ی جدید و قدیم نرم‌افزار HANTS این است که امکان انتخاب مهم‌ترین دوره‌ها به‌طور مستقل از یکدیگر در نسخه‌ی قدیمی فراهم می‌باشد. جهت به دست آوردن اطلاعات کامل‌تر در مورد نرم‌افزار HANTS به پژوهش غفاریان مالمیری (۲۰۱۵) مراجعه شود.

۲-۵- روش تحقیق

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روش معینی برای انتخاب پارامترهای مناسب در HANTS وجود ندارد؛ اما با انجام تعدادی آزمون و خطا (مانند آزمون FFT) می‌توان برای نتایج قابل قبول این پارامترها را تعیین کرد. به‌منظور مقایسه و بررسی قابلیت الگوریتم HANTS برای شناسایی و حذف نقاط دورافتاده، ابتدا یک سری زمانی NDVI یک‌ساله با استفاده از نسخه قدیم و جدید HANTS بکار گرفته شد. سپس توانایی نسخه قدیم و جدید HANTS در بازسازی سری زمانی ۵ ساله NDVI مورد بررسی قرار گرفت تا قابلیت‌های هر نسخه در برخورد با سری‌های زمانی با دوره‌های طولانی‌تر

-
1. Power Spectrum
 2. Bloomfield
 3. Netherlands Aerospace Laboratory

مشخص شود. همچنین در سری‌های زمانی ۵ ساله به منظور تعیین اجزای دوره‌ای غالب و معنی‌دار، تجزیه و تحلیل FFT و توان طیف بر روی چهار سری زمانی مربوط به چهار تیپ مختلف پوشش گیاهی انجام شد؛ هدف این است که سیگنال تولیدشده توسط الگوریتم HANTS در نقاط و پوشش‌های گیاهی مختلف قابل اعتماد باشد. از طرفی مفاهیم دوره و فرکانس در تیپ‌های گیاهی مختلف تشریح شود.

در روش‌های مدل‌سازی، انتخاب معیاری برای برازش مناسب بین داده‌های واقعی و آن دسته داده‌هایی که مدل شده‌اند، اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه، به منظور برآورد دقت بازسازی و همچنین مقایسه آزمون‌های مختلف برازش منحنی، از خطای میانگین مطلق (MAE)^۱ و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)^۲ به عنوان معیارهایی برای اعتبارسنجی بکار گرفته شدند. خطای میانگین مطلق و خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند (غفاریان مالگیری، ۲۰۱۵: ۳۴).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (8)$$

که در این روابط x_i و y_i به ترتیب، داده‌های واقعی و داده‌های مدل شده می‌باشند. به منظور اعتبارسنجی نتایج در هر کدام از دوره‌های یک‌ساله و ۵ ساله، چهار پیکسل (نقاط کنترل) که بدون داده‌ی دورافتاده و داده جافتاده در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی بودند انتخاب شد و نتایج هر دو نسخه HANTS از نظر بازسازی داده‌های جافتاده و از بین بردن داده‌های دورافتاده، با استفاده از پارامترهای آماری نامبرده، مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات و نام تیپ‌های مرتعی انتخاب شده و گونه‌های همراه آن‌ها را نشان می‌دهد. این تیپ‌های گیاهی با توجه به دارا بودن دوره رشد و فنولوژی مختلف انتخاب شدند. به عنوان مثال تیپ گیاهی قیچ (با غالبیت گونه گیاهی قیچ) شامل درختچه‌هایی به ارتفاع یک تا ۱/۵ و حتی دو متر می‌باشد که در فصل تابستان برگ‌های خود را به دلیل خشکی محیط از دست می‌دهند؛ تیپ گیاهی کاهوی وحشی - ریواس (غالبیت دو

1. Mean Absolute Error
2. Root Mean Squared Error

گونه گیاهی کاهوی وحشی و ریواس) شامل بوته‌های ریواس است که تقریباً در ماه‌های اردیبهشت و خرداد پوشش گیاهی منطقه را تا ده درصد افزایش می‌دهند و سپس در اواخر خرداد این بوته‌ها از بین می‌روند.

لازم به ذکر است که در این پژوهش به منظور تهیه خروجی از نتایج پردازش الگوریتم HANTS از ENVI 4.8 و برای تهیه نقشه از GIS 10.1 استفاده شد. تجزیه و تحلیل FFT بر روی چهار پیکسل در MATLAB و رسم نمودارها در EXCEL صورت گرفت.

جدول ۱ مشخصات تیپ‌های مرتعی مورد استفاده به منظور بررسی اعتبارسنجی HANTS

نام تیپ مرتعی	<i>Artemisia sieberi</i>	<i>Scariola orientalis - Artemisia sieberi</i>	<i>Zygophyllum eurypterum</i>	<i>Scariola orientalis - Rheum ribes</i>	<i>Ephedra strobilacea - Zygophyllum eurypterum</i>
مخفف نام تیپ	<i>Ar. sieberi</i>	<i>Sc. orientalis - Ar. sieberi</i>	<i>Zy. eurypterum</i>	<i>Sc. orientalis - Rh. ribes</i>	<i>Eph. strobilacea - Zy. eurypterum</i>
نام فارسی	درمنه دشتی	کاهوی وحشی - درمنه دشتی	قیچ	کاهوی وحشی - ریواس	ریش‌بز - قیچ
سایر گونه‌های همراه	<i>Acantholimon spp.</i>	<i>Astragalus spp.</i>	<i>Salsola arbuscula</i>	<i>Zygophyllum eurypterum</i>	<i>Artemisia sieberi</i>
	<i>Astragalus spp</i>	<i>Aellenia subaphylla</i>	<i>Haloxylon aphyllum</i>	<i>Pteropyrum aucheri</i>	<i>Rheum ribes</i>
	<i>Cornulaca monacantha</i>	<i>Peganum harmala</i>	<i>Hammada salicornica</i>	<i>Astragalus spp.</i>	<i>Scariola orientalis</i>
	<i>Fortuynia bungei</i>	<i>Acantholimon spp.</i>	<i>Salsola yazdiana</i>	<i>Noaea mucronata</i>	<i>Salsola arbuscula</i>

۳- نتایج

۳-۱- نتایج HANTS بر روی سری زمانی یک‌ساله NDVI

الگوریتم HANTS (جدید و قدیم) بر روی یک سری زمانی NDVI یک‌ساله (سال ۲۰۰۱) بر اساس پارامترهای انتخاب‌شده در جدول ۲ به کار گرفته شد. محدوده داده‌های معتبر با توجه به محدوده قابل قبول NDVI از ۰ تا ۱ و دوره پایه ۲۳ تصویر ۱۶ روزه و همچنین تعداد فرکانس (NOF) با توجه



به اجزای دوره‌ای در یک سال ۱، ۲ و ۳ (دوره‌های سالانه، شش ماه و فصلی) به‌منظور آزمون وخطا انتخاب گردید (جدول ۲) که تغییرات پوشش گیاهی در طی سال‌های مختلف شامل افزایش و کاهش - های دوره‌ای NDVI می‌باشد. اولین فرکانس همان تغییرات سالیانه پوشش گیاهی است (یعنی شروع رشد گیاهی و سپس حداکثر سبزی‌نگی و بعد در آخر کاهش میزان سبزی‌نگی همراه با پایان فصل رشد که هر سال تکرار می‌شود)؛ اما تغییرات رشد گیاه همواره سالیانه نیست. به‌عنوان مثال ممکن یک پوشش گیاهی خاص در شش ماه دارای یک چرخه رشد باشد؛ بنابراین با انتخاب تعداد دو فرکانس (سالانه و شش‌ماهه)، دوره رشد گیاه قابل‌بازسازی است. به‌عبارت‌دیگر اگر ۲۳ تصویر ۱۶ روزه وقتی تقسیم‌بر ۲ شود، دوره‌ای شامل ۱۱/۵ تصویر ۱۶ روزه (۱۸۴ روز؛ تقریباً ۶ ماه) را شامل می‌شود. البته ممکن است در پوشش‌های گیاهی رشد مجدد پاییزه یعنی دوره‌های رشد فصلی وجود داشته باشد؛ بنابراین برای داشتن این دوره‌ها باید تعداد ۳ فرکانس در نظر بگیریم. یعنی ۲۳ تقسیم‌بر ۳ مساوی ۷/۶ تصویر ۱۶ روزه (۱۲۲ روز یا ۴ ماه).

در این تحقیق مقادیر FET با توجه به آزمون‌وخطاهای اولیه ۰/۰۵ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شد و جهت نقاط دورافتاده با توجه به این‌که پوشش ابر منجر به کاهش مقادیر NDVI می‌شود به‌صورت کاهشی (Low) لحاظ شد. باین‌حال به‌منظور نمایش عملکرد HANTS در آزمون ۷ جهت نقاط دورافتاده به‌صورت افزایشی (High) نیز انتخاب شد. ارزیابی نتایج حاصل از آزمون‌های ۱ تا ۷ با استفاده از RMSE و MAE بر روی چهار پیکسل مختلف (به‌صورت میانگین) در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌طور میانگین کمترین مقادیر RMSE و MAE در آزمون‌های ۴ و ۶ با تعداد ۳ فرکانس به دست آمد و بالاترین مقادیر RMSE و MAE مربوط به آزمون ۵ با تعداد یک فرکانس می‌باشد.

جدول ۲ پارامترهای اختصاص داده‌شده به الگوریتم HANTS جدید و قدیم برای یک سری زمانی NDVI یک‌ساله و

مقادیر MAE و RMSE

آزمون	ورژن	محدوده داده معتبر	دوره پایه	NOF	دوره‌ها	FET	جهت نقاط دورافتاده	DOD	RMSE	MAE
Test 1	new	۱-۰	۲۳	۲	-	۰/۰۰۵	low	۳	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱۷۸
Test 2	new	۱-۰	۲۳	۳	-	۰/۰۰۵	low	۳	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۲۸
Test 3	new	۱-۰	۲۳	۲	-	۰/۰۱	low	۳	۰/۰۲۲۸	۰/۰۱۶۱
Test 4	new	۱-۰	۲۳	۳	-	۰/۰۱	low	۳	۰/۰۱۷۳	۰/۰۱۲۱
Test 5	new	۱-۰	۲۳	۱	-	۰/۰۱	low	۳	۰/۰۴۴۲	۰/۰۳۰۷
Test 6	old	۱-۰	۲۳	۳	۲۳، ۱۲، ۸	۰/۰۱	low	۳	۰/۰۱۵۷	۰/۰۱۰۸
Test 7	old	۱-۰	۲۳	۳	۲۳، ۱۲، ۸	۰/۰۰۵	high	۳	۰/۰۳۰۴	۰/۰۲۲۲

شکل ۳ نتایج حاصل از برازش منحنی‌ها با توجه به پارامترهای انتخاب‌شده در جدول ۲ را بر روی چهار پیسکل با تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی نشان داده و شکل ۳ (الف) مقایسه اثر برازش منحنی آزمون‌های مختلف بر روی یک پیسکل با کاربری باغ را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، آزمون‌های ۵ و ۷ دارای بالاترین میزان RMSE و MAE و بهترین برازش منحنی مربوط به آزمون‌های شماره ۴ و ۶ می‌باشد (در شکل ۳ الف با توجه به مشابه بودن نتایج برخی از آزمون‌ها، سیگنال بازسازی‌شده روی هم قرار گرفته است).

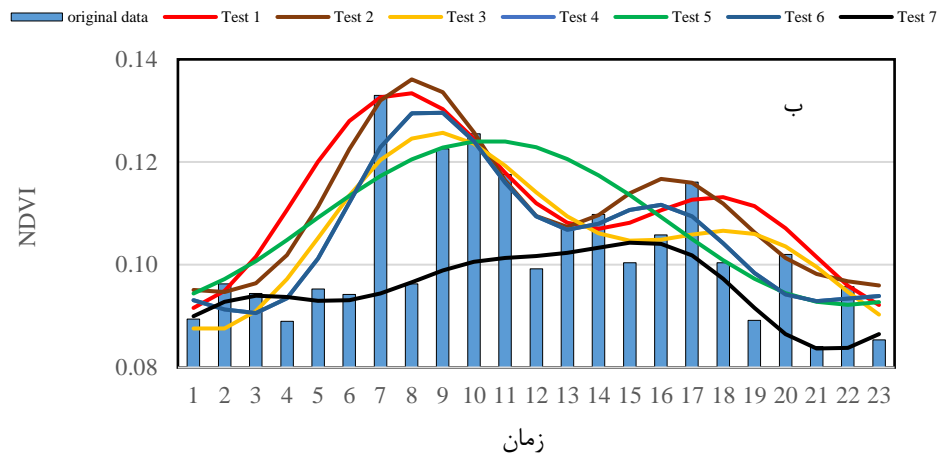
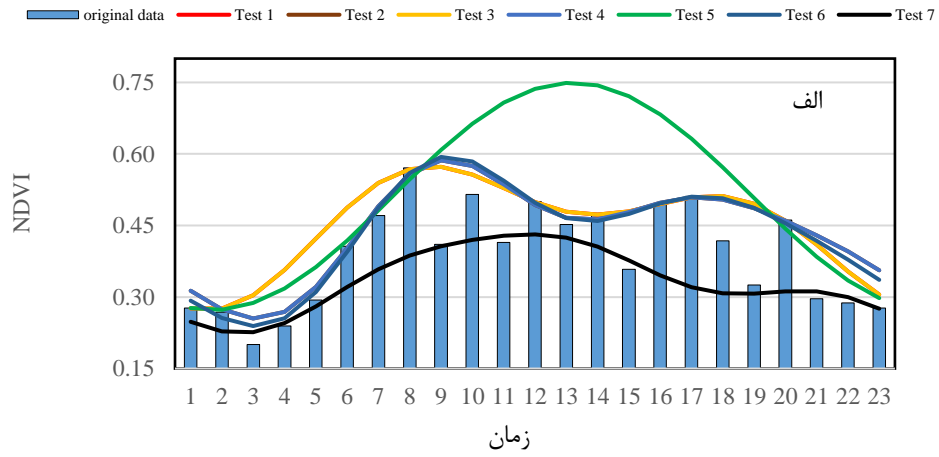
شکل ۳ (ب) نتایج حاصل از آزمون‌های ۱ تا ۷ را بر روی یک پیسکل مرتعی با تیپ *Sc. orientalis - Ar. Sieberi* نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمون ۱ و ۲ با مقادیر $FET = 0/005$ در این تیپ مرتعی نشان می‌دهد که مقادیر کوچک FET منجر به حذف تعدادی زیادی از نقاط مشاهدات می‌شود که ممکن است تعدادی از مشاهدات معتبر نیز حذف شود و از طرفی مقادیر کوچک FET منجر به افزایش احتمال حضور داده‌های دورافتاده به سمت بالا (پرت مثبت) خواهد شد. این نتایج در شکل ۳ (د) نیز قابل مشاهده است؛ بنابراین مقادیر $FET = 0/01$ نتایج مطلوب‌تری دارند (جدول ۲).

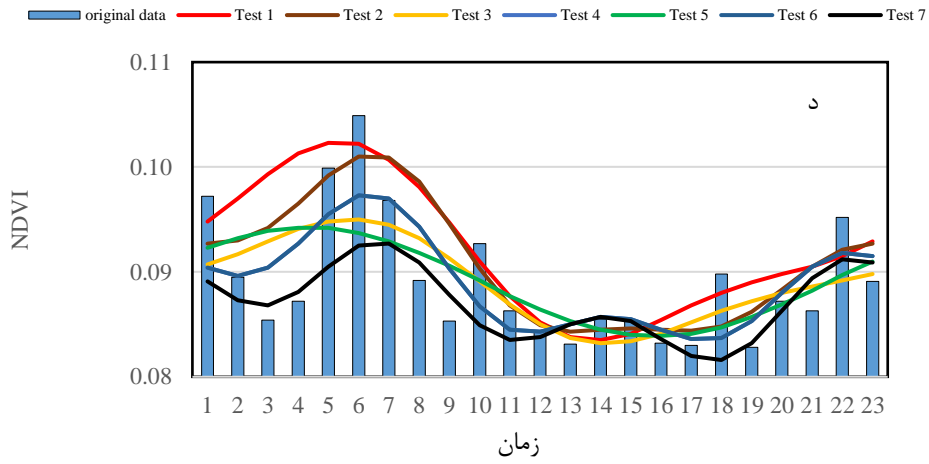
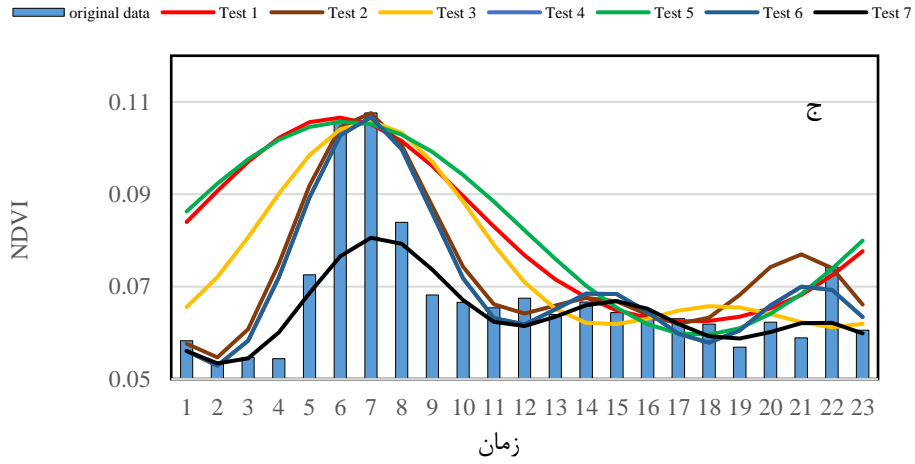
شکل ۳ (ج) نتایج برازش منحنی پارامترهای مختلف الگوریتم HANTS بر روی یک پیسکل مرتعی با تیپ *Sc. orientalis - Rh. Ribes* را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، برازش منحنی ناشی از آزمون‌های انجام‌شده با تعداد ۳ فرکانس نتایج مطلوب‌تری داشت (آزمون ۲، ۴ و ۶). علت این امر را می‌توان وجود اجزای دوره‌ای ۶ ماهه و فصلی در تیپ‌های پوشش گیاهی دانست. به‌طور کلی بالاترین مقادیر MAE و RMSE مربوط به آزمون ۶ با تعداد یک فرکانس بود. از طرفی با توجه به جدول ۲

و همچنین شکل ۳ با انتخاب جهت نقاط دورافتاده به سمت بالا مقادیر خطا افزایش یافت و نتایج برازش منحنی ناشی از آزمون ۷ نامطلوب به دست آمد.

بهترین نتایج برازش منحنی در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی مربوط به آزمون‌های ۴ و ۶ با تعداد ۳ فرکانس و $FET = 0.1$ می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه در آزمون ۶ اجزای دوره‌ای در نسخه قدیم HANTS همانند نسخه جدید انتخاب شد؛ نتایج این دو آزمون مشابه بود؛ زیرا فرکانس‌های مورد استفاده در نسخه جدید HANTS از تقسیم دوره پایه بر اجزای هارمونیک به دست می‌آید. به‌عنوان مثال در این پژوهش فرکانس‌های آزمون ۴ از تقسیم ۲۳ بر اعداد صحیح ۱، ۲ و ۳ به دست می‌آید که این فرکانس‌ها با فرکانس‌های انتخاب‌شده در آزمون ۶ با استفاده از نسخه قدیم HANTS یکسان است. در مجموع این نتایج نشان می‌دهد به‌منظور حذف داده‌های دورافتاده و مشاهدات آلوده به ابر در کل منطقه مورد مطالعه با انتخاب تعداد ۳ فرکانس و $FET = 0.1$ می‌توان به نتایج مطلوب دست‌یافت (واحد زمان در شکل ۳ با توجه به تعداد ۲۳ تصویر ۱۶ روزه در هر سال به‌صورت تعداد تصاویر ۱۶ روزه می‌باشد).

از آنجایی که منطقه دارای پوشش بسیار ضعیف و شکننده است، قسمت اعظم، به دلیل بارش‌های اندک زمستانه، منطقه دارای پوشش کمتر از ۱۵ درصد است (شکل ۳). از طرفی در اوایل فصل بهار هر سال تغییرات پوشش گیاهی بسیار اندک است (افزایش چند درصدی پوشش و سبزیگی با توجه رشد گیاهان یک‌ساله و چندساله در ماه‌های فروردین و اردیبهشت)؛ بنابراین افزایش‌های جزئی در حد صدم NDVI در این شکل ۳ را نمی‌توان جز خطای رادیومتریک به حساب آورد. باین‌وجود الگوریتم HANTS به‌خوبی توانسته سیگنال سری زمانی NDVI را در تیپ‌های مختلف بازسازی کند.





شکل ۳ نتایج حاصل از الگوریتم HANTS بر روی باغات (الف)، تیپ مرتعی *Sc. orientalis* - *Ar. sieberi* (ب)، تیپ مرتعی *Sc. orientalis* - *Rh. ribes* (ج)، تیپ مرتعی *Zy. euryptherum* (د).

۲-۳- نتایج HANTS بر روی سری زمانی ۵ ساله NDVI

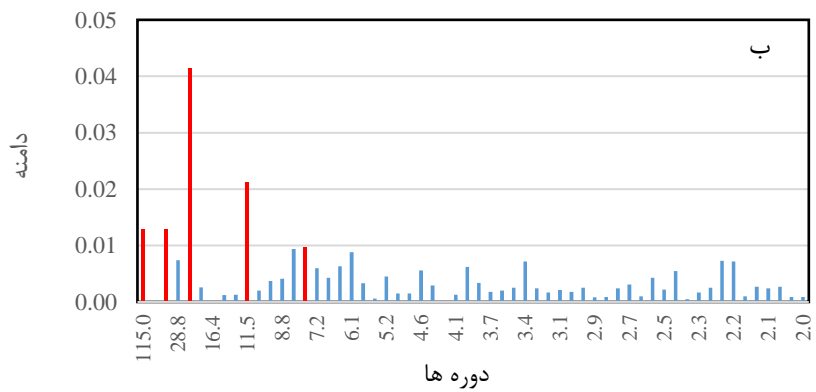
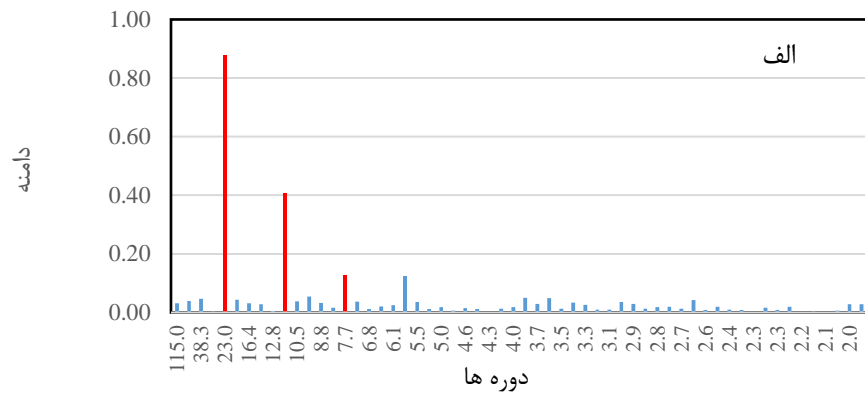
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، استفاده از نسخه‌ی قدیمی HANTS به دلیل آزادی در انتخاب مهم‌ترین فرکانس‌ها برای برازش منحنی، نسبت به نسخه جدید انعطاف‌پذیرتر است. با توجه به این موضوع، الگوریتم FFT برای شناسایی مهم‌ترین اجزای دوره‌ای در یک سری زمانی NDVI ۵ ساله (۲۰۰۵-۲۰۰۱) استفاده شد؛ سپس به منظور مقایسه نتایج، نسخه جدید و قدیمی HANTS برای از بین بردن داده دورافتاده و داده‌های جافتاده در یک سری زمانی ۵ ساله NDVI بکار برده شدند. بدین منظور در مرحله اول با توجه به پیچیدگی و تنوعی که در پوشش‌های مختلف زمین وجود دارد، تجزیه و تحلیل FFT و توان طیف بر روی چهار پیکسل با تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی انجام شد. جدول ۳ بخش کوچکی از خروجی FFT بر روی چهار تیپ مختلف پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. اگر دوره پایه N باشد (۱۱۵ تصویر در این بخش) اجزای هارمونیک در یک سری فوریه از شماره ۱ تا N را شامل می‌شود و دوره‌ها از تقسیم دوره پایه بر اجزای هارمونیک دست می‌آید.

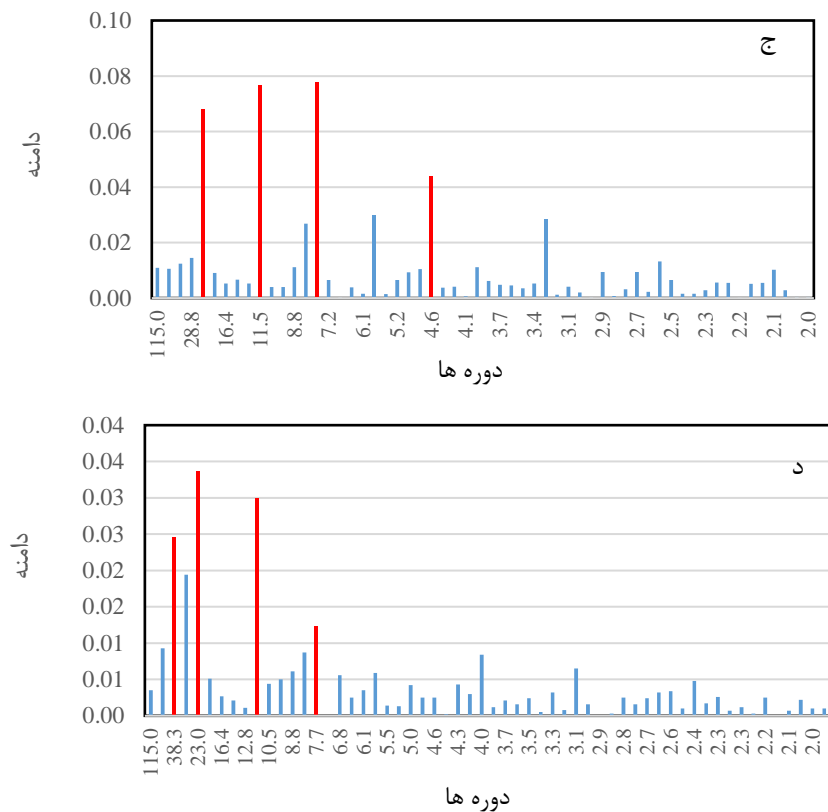
جدول ۳ دامنه، ارزش توان و فرکانس وابسته از آزمون FFT برای چهار پیکسل

Garden	<i>Ar. sieberi</i>		<i>Sc. orientalis - Rh. ribes</i>		<i>Eph. strobilacea - Zy. eurypterum</i>		اجزای هارمونیک	دوره‌ها	
	ارزش توان	دامنه	ارزش توان	دامنه	ارزش توان	دامنه			
دامنه									
۰/۰۳۱۳	۰/۰۰۰۹۸۰	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۰۱۶۴	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۰۱۱۹	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۱۲	۱	۱۱۵
۰/۰۳۹۳	۰/۰۰۱۵۴۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۰۱۱۲	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۸۶	۲	۵۷/۵
۰/۰۴۷۱	۰/۰۰۲۲۱۸	۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۰۱۶۶	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۲۴۶	۰/۰۰۰۶۰۵	۳	۳۸/۳
۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۰۰۵۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۰۲۱۰	۰/۰۱۹۴	۰/۰۰۰۳۷۶	۴	۲۸/۸
۰/۸۷۸۴	۰/۷۷۱۵۸۷	۰/۰۴۱۴	۰/۰۰۱۷۱۴	۰/۰۶۷۸	۰/۰۰۴۵۹۷	۰/۰۲۳۶	۰/۰۰۱۱۲۹	۵	۲۳
۰/۰۴۳۷	۰/۰۰۱۹۱۰	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۰۰۲۶	۶	۱۹/۲
...

شکل ۴ فرکانس‌های غالب بر روی چهار تیپ مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل به منظور نمایش واضح‌تر، بجای رسم ارزش توان در مقابل دوره‌ها، دامنه در مقابل دوره رسم شده است (بخش ۳-۲). با توجه به شکل ۴، سه دوره غالب در هر تیپ مختلف پوشش گیاهی قابل شناسایی می‌باشد (۲۳، ۱۲ و ۸ تصویر ۱۶ روزه). به دلیل اینکه دامنه و ارزش توان آن‌ها از اجزای باقی‌مانده و اجزای نزدیک‌تر خود نسبتاً بالاتر هستند (ستون‌های قرمز). این دوره‌های غالب نیز با آزمون‌های انجام‌شده در بخش ۳-۱ نیز مطابقت دارد؛ بنابراین این موضوع قابلیت تجزیه و تحلیل FFT به منظور تعیین دوره‌های مهم

را نشان می‌دهد ولی باین حال با توجه به شکل ۴ دوره‌های مهم در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی متفاوت است. نتایج تجزیه و تحلیل توان طیف بر روی یک پیسکل با کاربری باغ (شکل ۴ الف) نشان می‌دهد که اجزای دوره‌ای در یک پوشش باغی همان اجزای فصلی، نیم سالانه و سالانه (۲۳، ۱۲ و ۸ تصویر ۱۶ روزه) می‌باشد در نتیجه این دوره‌ها در سال‌های مختلف تکرار می‌شوند. با توجه به دخالت انسان و آبیاری و همچنین ثبات بیشتر پوشش‌های درختی دوره‌های بزرگ‌تر از سالانه نظیر دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی در این تیپ پوشش گیاهی کمتر نمایان می‌شود. در صورتی که پوشش‌های مرتعی شکل ۴ (ب، ج، د) علاوه بر دوره‌های فصلی، نیم سالانه و سالانه، دوره‌های فراتر از سالانه نظیر دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی و همچنین دوره‌های نظیر سیر قهقرایی و تخریب پوشش گیاهی یا افزایش پوشش گیاهی قابل‌شناسایی هستند. شناسایی این اجزای دوره‌ای معنی‌دار، کلید مرحله نخست برای ساخت یک نماینده از یک سری زمانی بدون ابر و داده دورافتاده می‌باشد. به‌طور کلی نتایج تجزیه تحلیل FFT و توان طیف نشان می‌دهد دوره‌های ۸، ۱۲، ۲۳، ۳۸ و ۱۱۵ تصویر از مهم‌ترین اجزای دوره در یک سری زمانی ۵ ساله NDVI در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.





شکل ۴ دامنه و دوره سری زمانی ۵ ساله NDVI از چهار پیکسل مختلف با کاربری باغ (الف)، تیپ مرتعی *Ar. sieberi* (ب)، تیپ مرتعی *Sc. orientalis - Rh. ribes* (ج)، تیپ مرتعی *Eph. strobilacea- Zy. eurypterum* (د).

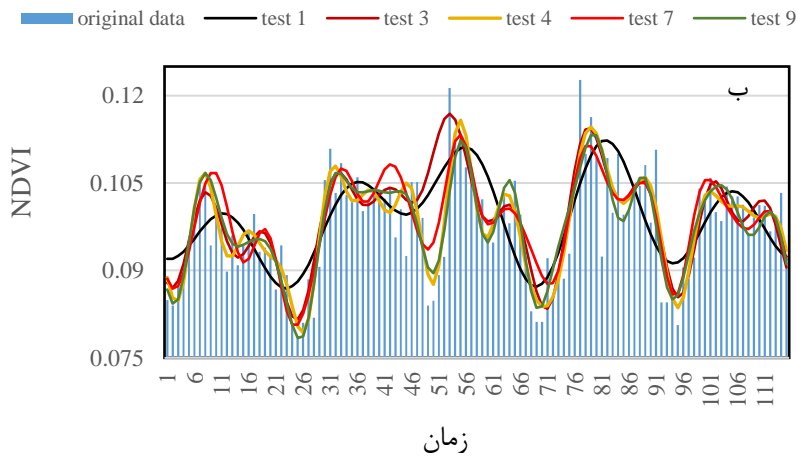
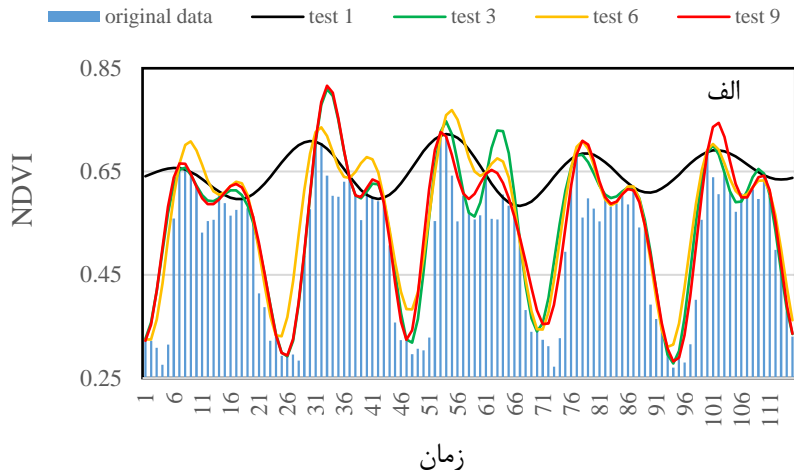
جدول ۴ پارامترهای اختصاص داده شده به الگوریتم HANTS جدید و قدیم و مقادیر RMSE و MAE حاصل از برازش منحنی این پارامترها را بر روی چهار پیکسل (به صورت میانگین) با تیپ مختلف پوشش گیاهی برای یک سری زمانی NDVI ۵ ساله را نشان می دهد. بر اساس نتایج جدول ۴ به طور میانگین آزمون ۴ با استفاده از نسخه جدید HANTS با ۱۵ فرکانس و آزمون شماره ۹ با استفاده از نسخه قدیم HANTS با ۱۲ فرکانس دارای پایین ترین مقادیر RMSE و MAE بودند.

جدول ۴ پارامترهای اختصاص داده شده به الگوریتم HANTS جدید و قدیم برای یک سری زمانی NDVI پنج‌ساله و

مقادیر RMSE و MAE

آزمون	ورژن	محدوده داده معتبر	دوره پایه	NOF	دوره‌ها	FET	جهت نقاط دورافتاده	DOD	RMSE	MAE
Test 1	new	۱-۰	۱۱۵	۵	-	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۶۱۲	۰/۰۴۴۷
Test 2	new	۱-۰	۱۱۵	۱۰	-	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۲۸۶	۰/۰۲۰۰
Test 3	new	۱-۰	۱۱۵	۱۲	-	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۲۸۴	۰/۰۱۸۳
Test 4	new	۱-۰	۱۱۵	۱۵	-	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۲۱۲	۰/۰۱۴۰
Test 5	old	۱-۰	۱۱۵	۴	۱۱۵، ۲۳، ۱۲، ۸	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۳۳۰	۰/۰۲۴۸
Test 6	old	۱-۰	۱۱۵	۵	۵۷، ۲۳، ۱۲، ۹، ۸ ۱۱۵	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۳۰۷	۰/۰۲۲۸
Test 7	old	۱-۰	۱۱۵	۷	۳۸، ۲۳، ۱۲، ۹، ۷ ۱۱۵، ۵۷	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۲۹۶	۰/۰۲۱۷
Test 8	old	۱-۰	۱۱۵	۹	۱۶، ۱۴، ۱۲، ۹، ۷ ۱۱۵، ۵۷، ۲۳، ۱۹	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۳۰۸	۰/۰۲۲۲
Test 9	old	۱-۰	۱۱۵	۱۲	۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸ ۲۳، ۱۹، ۱۶، ۱۴ ۱۱۵، ۵۷، ۳۸	۰/۰۱	low	۵	۰/۰۲۶۲	۰/۰۱۷۶

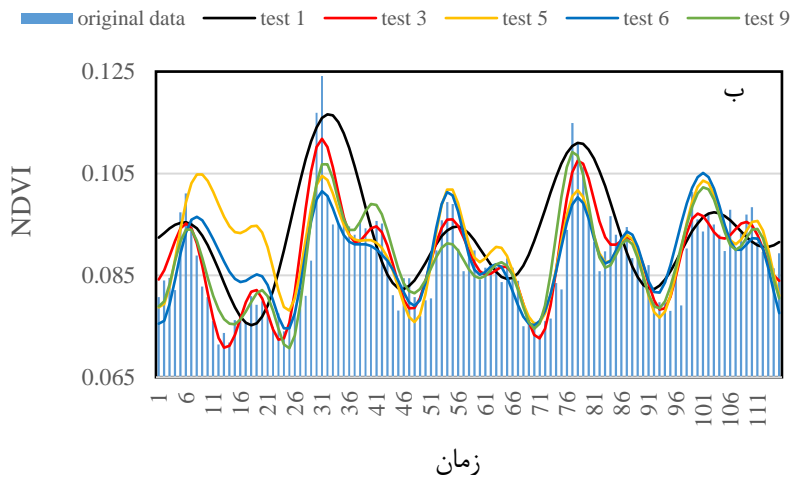
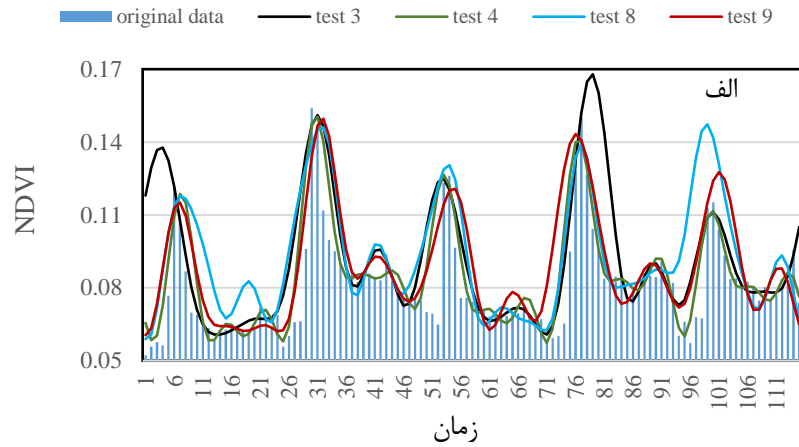
شکل ۵ نتایج آزمون‌های جدول ۴ را بر روی دو پیسکل با تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی نشان می‌دهد (به‌منظور نمایش واضح نمودار و جلوگیری از تداخل نمودارهای مختلف نتایج برخی از آزمون‌ها نشان داده شد). شکل ۵ (الف) نتایج آزمون‌های ۱، ۳، ۶ و ۹ بر روی یک پیسکل با کاربری باغ را به نمایش می‌گذارد. آزمون ۱ با تعداد ۵ فرکانس با استفاده از نسخه جدید HANTS بالاترین مقادیر RMSE و MAE را نشان می‌دهد (جدول ۴). در صورتی که انتخاب ۵ فرکانس غالب و معنی‌دار با استفاده از نسخه قدیم HANTS (آزمون ۶) دارای نتایج مطلوب‌تری بود (شکل ۵ الف). شکل ۵ (ب) نتایج از حاصل ۵ آزمون مختلف با استفاده از نسخه جدید و قدیم HANTS را بر روی یک تیپ مرتعی *Ar. sieberi* نشان می‌دهد. نکته مهم در این نمودار نتایج حاصل از برازش منحنی آزمون‌های ۳ و ۴ با استفاده از نسخه جدید HANTS و نتایج آزمون‌های ۷ و ۹ با استفاده از نسخه قدیم HANTS در فاصله بین تصاویر ۴۵ تا ۵۳ می‌باشد. آزمون شماره ۳ با تعداد ۱۲ فرکانس با استفاده از نسخه جدید HANTS نتوانست در این فاصله برازش مناسب انجام دهد در صورتی که آزمون شماره ۷ با تعداد ۷ فرکانس با استفاده از نسخه قدیم نتایج مطلوب‌تری داشت.



شکل ۵ نتایج حاصل از الگوریتم HANTS بر روی باغات (الف)، تیپ مرتعی *Ar. sieberi* (ب)

شکل ۶ (الف) نتایج چند آزمون (جدول ۴) با استفاده از نسخه‌های جدید و قدیم HANTS بر روی یک تیپ مرتعی *Sc. orientalis - Rh. ribes* را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۶ الف نتایج حاصل از آزمون ۳ با تعداد ۱۲ فرکانس با استفاده از نسخه جدید و آزمون ۸ با تعداد ۹ فرکانس با

استفاده از نسخه قدیم HANTS نتایج مطلوبی را در پی نداشت. در صورتی که استفاده از ۱۵ فرکانس (نسخه جدید-آزمون ۴) و ۱۲ فرکانس غالب (نسخه قدیم-آزمون ۹) نتایج مطلوبی به همراه داشت. شکل ۶ (ب) نتایج حاصل از برازش منحنی چند آزمون مختلف بر اساس جدول ۴ را بر روی یک تیپ مرتعی *Eph. strobilacea - Zy. eurypterum* را نشان می‌دهد. عدم انطباق برازش منحنی حاصل از آزمون ۱ با تعداد ۱۰ فرکانس را می‌توان ناشی از عدم استفاده از اجزای دوره‌ای فصلی در این آزمون نام برد. باین حال استفاده‌ی تنها از اجزای دوره‌ای سالانه و فصلی در آزمون ۵ با استفاده از نسخه قدیم HANTS (۴ فرکانس) نیز نتایج مطلوبی نداشت که علت آن عدم استفاده از دوره‌های بزرگ‌تر از دوره‌های سالانه (یا دوره خشک‌سالی و ترسالی) می‌باشد. در صورتی که در آزمون ۶ با تعداد ۵ فرکانس غالب، نتایج بازسازی انطباق بیشتری با داده‌های NDVI پیدا کرد. بهترین نتایج بازسازی با استفاده از آزمون ۹ در نسخه قدیم و آزمون ۳ در نسخه جدید با تعداد ۱۲ فرکانس به دست آمد.

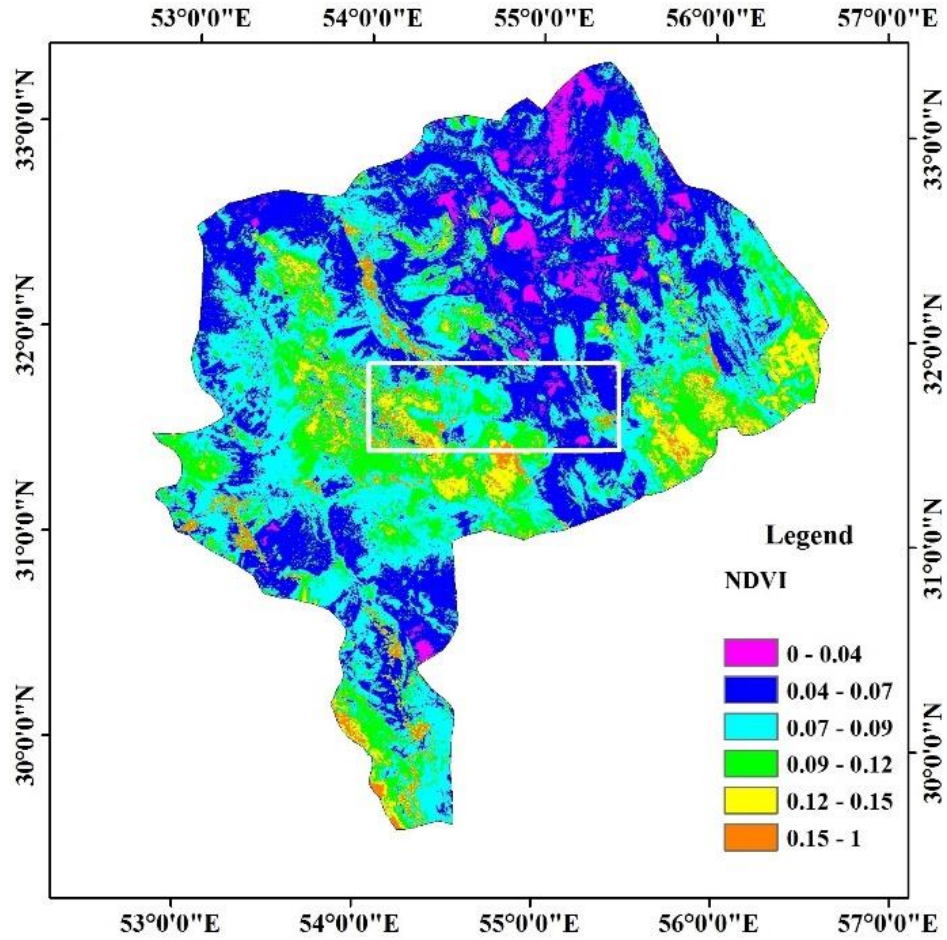


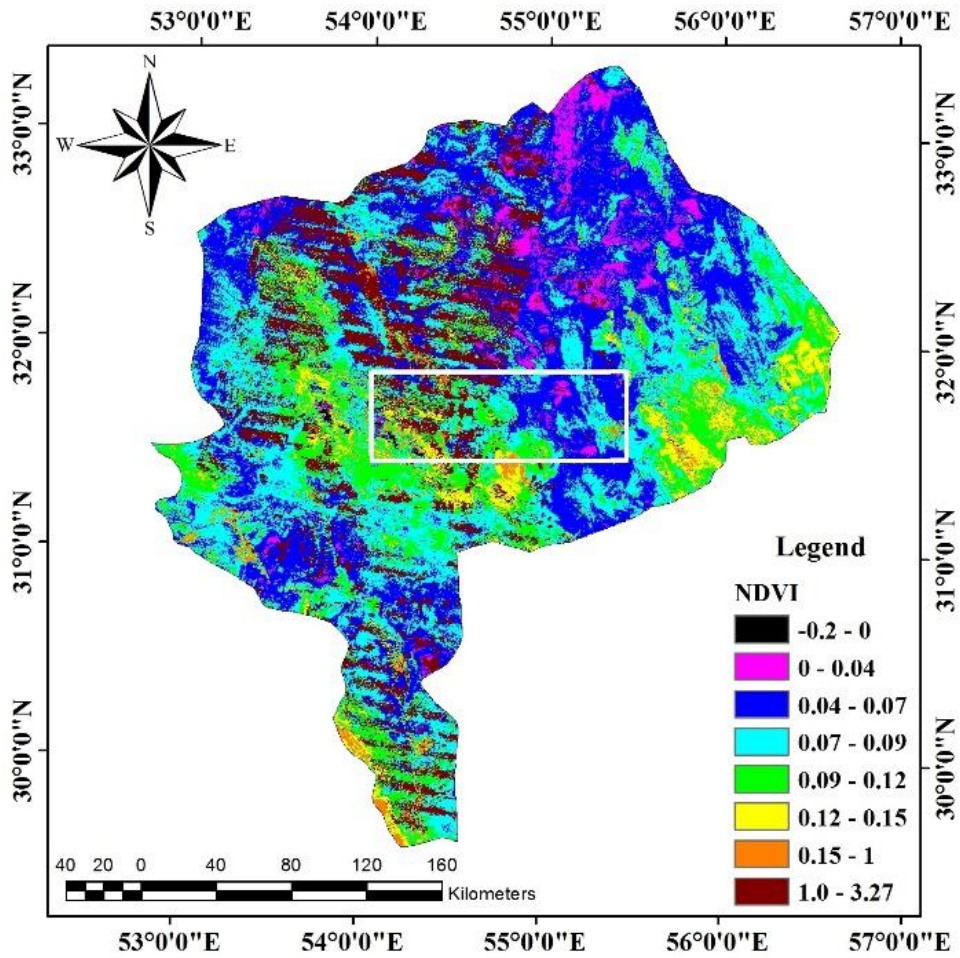
شکل ۶ نتایج حاصل از الگوریتم HANTS بر روی تیپ مرتعی *Sc. orientalis - Rh. ribes* (الف)، تیپ مرتعی *Eph. strobilacea - Zy. eurypterum* (ب).

شکل ۷ یک نمونه تصویر NDVI (تصویر ۲۰ دسامبر ۲۰۰۵ یا شروع از روز ژوئیه‌سی ۳۵۳) قبل و بعد از بازسازی در یک سری زمانی پنج‌ساله با استفاده از پارامترهای آزمون ۲ جدول ۴ را نشان می‌دهد. به‌منظور نمایش واضح‌تر کادر مستطیل بر روی تصویر کل منطقه با بزرگنمایی در شکل ۸

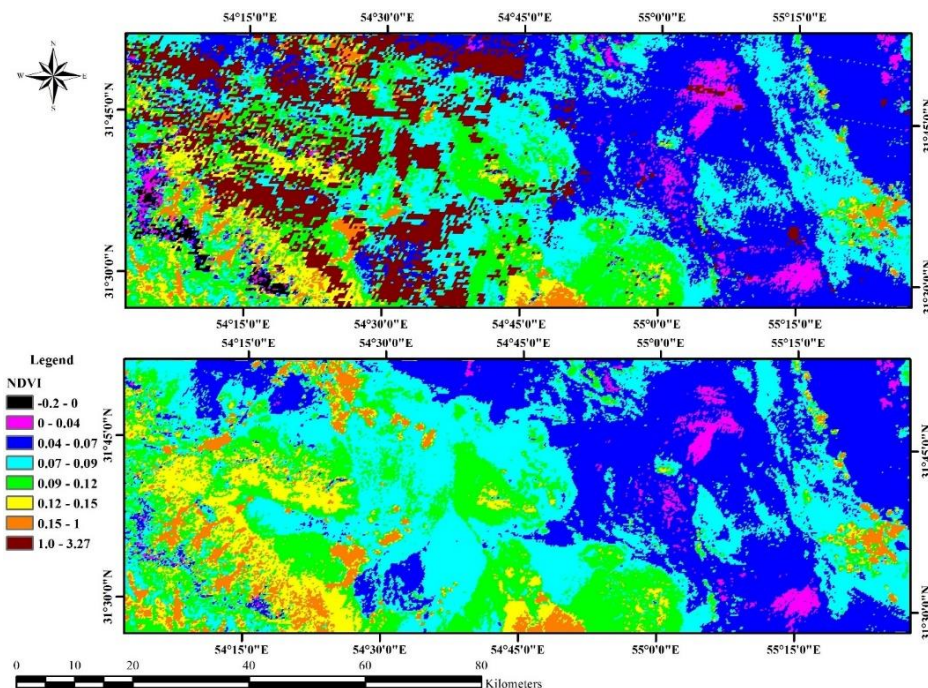
آمده است. با توجه به شکل ۸ (بالا) سه نوع خطای عمده در شکل قابل مشاهده می‌باشد. خطای اول به ارزش‌های کمتر از صفر در تصویر NDVI مربوط می‌شود (سمت چپ تصویر، نواحی سیاه). دومین خطا مربوط به ارزش‌های بالاتر از ۱ در تصویر NDVI نمایان است (نواحی قهوه‌ای). سومین خطا، خطای نواری شدن، در سمت راست تصویر قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به شکل ۸ (پایین) الگوریتم HANTS با استفاده از درون‌یابی زمانی^۱ خطاهای ذکر شده در تصویر NDVI را حذف نموده است. نقشه NDVI بازسازی شده نشان می‌دهد که داده‌های جاافتاده‌ی تصویر که توسط HANTS پر شده‌اند، با الگوی تصویر اصلی یکسان می‌باشد؛ یعنی الگوی مکانی تقسیمات NDVI با الگوی تصویر اصلی یکسان است. با توجه به شکل ۸ (پایین) ارزش‌های کوچک‌تر از صفر (رنگ سیاه) و بزرگ‌تر از ۱ (رنگ قهوه‌ای) در تصویر بازسازی شده توسط الگوریتم حذف شد؛ زیرا این مقادیر وقتی در سری زمانی نسبت به داده‌های قبل و بعداز آن قرار گرفتند با توجه به محدوده میزان خطای قابل قبول (FET) به صورت داده‌های دورافتاده تشخیص داده شدند و الگوریتم با توجه به دوره سیگنال این داده‌ها را بازسازی نمود. از طرفی برخی از داده‌های دورافتاده در این تصویر قابل مشاهده نیست؛ به طوری که وقتی این داده‌ها در یک سری زمانی واقع شوند با توجه به داده‌های قبل و بعد، همچنین رفتار دوره‌ای سیگنال و میزان FET در الگوریتم HANTS شناسایی و بازسازی می‌شوند. در نهایت تصویر بازسازی شده دارای کمترین میزان داده‌های دورافتاده می‌باشد به همین علت شفافیت و دقت در تصویر بازسازی شده افزایش یافته است.





شکل ۷ تصویر NDVI تاریخ ۲۰ دسامبر سال ۲۰۰۵ قبل از بازسازی (چپ) و بعد از بازسازی با الگوریتم HANTS (راست).



شکل ۸ قسمتی از نقشه NDVI محدوده مورد مطالعه در تاریخ ۲۰ دسامبر سال ۲۰۰۵ قبل از بازسازی (بالا) و بعد از بازسازی با الگوریتم HANTS (پایین).

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر الگوریتم HANTS برای بازسازی داده‌های جاافتاده و از بین بردن داده‌های دورافتاده در سری‌های زمانی یک‌ساله و پنج‌ساله NDVI سنجنده MODIS استفاده شد. در این مطالعه، از هر دو نسخه قدیمی و جدید HANTS در سری‌های زمانی یک‌ساله و پنج‌ساله NDVI مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج دقت بازسازی نسخه جدید HANTS در بازسازی سری‌های زمانی NDVI بهتر از نسخه قدیم می‌باشد. باین حال نسخه‌ی قدیمی HANTS با توانایی انتخاب اجزای دوره مهم و معنی‌دار به‌طور مستقل از یکدیگر برای بازسازی سری‌های زمانی بلندمدت، از نسخه جدید از HANTS بهتر است. قابلیت انتخاب اجزای دوره‌ای مهم در نسخه قدیم HANTS

منجر به کاهش تعداد فرکانس‌های غیرضروری شده که در مجموع باعث کاهش زمان پردازش به‌ویژه در سری‌های زمانی طولانی می‌شود.

در نسخه جدید HANTS برای رسیدن به دوره ۸ تصویر (دوره‌های فصلی) در بازسازی یک سری زمانی ۵ ساله به ۱۵ فرکانس نیاز است. در صورتی که در نسخه قدیم HANTS می‌توان دوره‌های کوچک را به‌طور مستقل از دوره پایه انتخاب کرد. غفاریان مالمیری (۲۰۱۵) در بررسی قابلیت HANTS در رفع مشکل داده‌های جاافتاده با توزیع و پراکنش مختلف و داده‌های دورافتاده LST ساعتی با استفاده از هر دو نسخه نرم‌افزار HANTS نشان داد که نسخه قدیم HANTS نسبت به نسخه جدید نتایج قابل‌اعتمادتری ایجاد می‌کند. در صورتی که در پژوهش حاضر نتایج هر دو نسخه نرم‌افزار HANTS تقریباً مشابه بود. علت این امر وجود داده‌های دورافتاده با شکاف بسیار کوتاه در سری‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر می‌باشد. در صورتی که اگر میزان داده‌های جاافتاده و داده‌های دورافتاده در یک سری زمانی بیش از حد باشد استفاده از نسخه قدیم HANTS نسبت به نسخه جدید برتری دارد. به این دلیل که در نسخه جدید HANTS فرکانس‌ها از تقسیم دوره پایه بر اجرای هارمونیک به دست می‌آیند؛ بنابراین حضور فرکانس‌های غیر معنی‌دار در مواردی که میزان داده‌های جاافتاده طولانی باشد منجر به ایجاد سیگنال غیرقابل‌اعتماد می‌شود. یکی از معایب الگوریتم HANTS این است که خطای بازسازی سیگنال در ابتدا و انتهای یک سری زمانی، به‌ویژه در یک روند افزایشی یا کاهشی مداوم در یک سری زمانی طولانی‌مدت، بالا می‌باشد (غفاریان مالمیری، ۲۰۱۵: ۴۸). با این حال نتایج نسخه قدیمی HANTS با توانایی در نظر گرفتن این روندها و دوره‌های غالب می‌تواند از نسخه جدید HANTS مطلوب‌تر واقع شود.

یکی از مشکلات استفاده از الگوریتم HANTS این است که هیچ روش معینی برای انتخاب پارامترهای مناسب وجود ندارد (غفاریان مالمیری، ۲۰۱۵: ۴۷؛ رورینگ و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۹۱۷). پیدا کردن تنظیمات پارامتر مناسب برای یک مجموعه داده‌ی خاص، به برخی از آزمون‌ها نیاز دارد. استفاده از الگوریتم FFT یکی از راه‌ها برای پیدا کردن اجزای دوره‌ای غالب در سری‌های زمانی است. با این حال با توجه به پیچیدگی و تنوعی که در پوشش‌های گیاهی وجود دارد، تجزیه و تحلیل FFT تنها در شناسایی دوره‌های مهم و معنی‌دار کمک می‌کند. به طوری که برای به دست آوردن نتایج دقیق، باید ترکیب مختلفی از پارامترها آزمایش شود.

بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل FFT و توان طیف حداکثر، سه دوره غالب در یک سری زمانی NDVI یک‌ساله در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی می‌توان تفکیک نمود (دوره‌های ۳-۴ ماه، شش



ماه و یک‌ساله) که شناسایی این اجزای دوره‌ای به‌منظور بازسازی سری‌های زمانی NDVI ضروری می‌باشد. علاوه بر دوره‌های سالانه، نیم سالانه و فصلی، در پوشش‌های مرتعی دوره خشک‌سالی و ترسالی و همچنین دوره‌هایی نظیر سیر قهقرایی پوشش گیاهی ناشی تخریب مرتع یا سیر افزایشی نیز قابل شناسایی می‌باشد.

بر اساس نتایج این تحقیق، تعداد ۳ فرکانس و $FET = 0.1$ برای بازسازی یک سری زمانی NDVI یک‌ساله و حذف نقاط دورافتاده در منطقه مورد مطالعه مناسب است. تعداد فرکانس و FET ، از پارامترهای مهم برای بازسازی و برازش منحنی می‌باشند که بر اساس هر منطقه و تیپ پوشش گیاهی متفاوت‌اند. ورهکن^۱ و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که تغییرات کوتاه‌مدت NDVI در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمتر از 0.05 واحد NDVI می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد انتخاب FET و تعداد فرکانس با توجه به هدف و منطقه مورد مطالعه متفاوت است. ژو و همکاران (۲۰۱۵) در بازسازی سری زمانی یک‌ساله NDVI جهانی با استفاده از الگوریتم HANTS از تعداد ۴ فرکانس و 0.05 $FET =$ استفاده نمودند. در صورتی که جولین و سوپرینو (۲۰۱۰) به‌منظور بازسازی سری‌های زمانی NDVI سنجنده AVHRR از تعداد ۳ فرکانس و $FET = 0.02$ استفاده کردند. یک FET کوچک منجر به حذف تعداد زیادی از مشاهدات می‌شود که در این صورت ممکن است مشاهدات معتبر نیز حذف و نتایج بازسازی HANTS غیرقابل اعتماد شوند. در این صورت می‌توان به‌منظور جلوگیری از حذف بیش‌از حد تعداد نقاط پارامتر DOD را بزرگ انتخاب کرد.

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم HANTS به‌طور مؤثری می‌تواند در رفع مشکل داده‌های جاافتاده و داده‌های دورافتاده در سری‌های زمانی NDVI مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی نتایج نشان می‌دهد استفاده از نسخه جدید HANTS در مواردی که تنها مشکل داده‌های دورافتاده با شکاف بسیار کوتاه در سری زمانی مطرح باشد مناسب است.

منابع

- ثنایی نژاد، سید حسین، امیررضا شاه‌طهماسبی، رضا صدرآبادی حقیقی و کیومرث کلارستانی، (۱۳۸۷) «مطالعه تغییرات طیف بازتابی مزارع گندم در مشهد با استفاده از تصاویر MODIS»، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، ۴۵، صص ۱۱-۱۹.
- Ackerman, S. A., K. Strabala, W. P. Menzel, R. A. Frey, C. C. Moeller, & L. E. Gumley, (1998) "Discriminating clear sky from clouds with MODIS", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. D24, pp. 32141-32157, doi:10.1029/1998JD200032.
- Bloomfield, P (2000) *Fourier Analysis of Time Series An Introduction*. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina: John Wiley & Sons, IN.
- Fourier., J (1818) *Note relative aux vibrations des surfaces elastiques et au mouvement des ondes*. Bulletin des Sciences par Societe Philomatique, 1, 126- 136.
- Ghafarian Malamiri, H, R (2015) *Reconstruction of gap-free time series satellite observations of land surface temperature to model spectral soil thermal admittance* (Doctoral dissertation), Technische Universiteit Delft, The Netherlands.
- Henderson-Sellers, A (1982) "Defogging cloud determination algorithms". *Nature*, Vol. 298, Issue. 5873, pp. 419-420, doi: 10.1038/298419a0.
- 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*, Vol. 37, Issues. 1-3, pp. 127-139, doi: 10.1016/S0168-1699(02)00116-3.
- Jia, L., G. Xi, S. Liu, C. Huang, Y. Yan, & G. Liu (2009) "Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 13, Issue. 10, pp. 1775-1787 doi:10.5194/hess-13-1775-2009.
- 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*, Vol. 29, Issue. 17-18, pp. 5301-5311, doi: 10.1080/01431160802036466.
- Julien, Y., & J. A. Sobrino (2010) "Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, Issue. 3, pp. 618-625, doi: 10.1016/j.rse.2009.11.001.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio, & E. Moran (2004) "Change detection techniques". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, Issue. 12, pp. 2365-2407, doi: 10.1080/0143116031000139863.
- McNally A. & P. Watts (2003) "A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 129, Issue. 595, pp. 3411-3423, doi: 10.1256/qj.02.208.
- 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*, Vol. 13, Issue. 5, pp. 233-237, doi:10.1016/0273-1177(93)90550-U.
- Richard A. F., S. A. Ackerman, Y. Liu, K. I. Strabala, H. Zhang, J. R. Key, & X. Wang (2008) “Cloud Detection with MODIS. Part I:Improvements in the MODIS Cloud Mask for Collection 5”, *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Vol. 25, pp. 1057-1072, doi: 10.1175/2008JTECHA1052.1
- Ricker, N (1953) “Wavelet Contraction, Wavelet Expansion, and the Control of Seismic Resolution”. *Geophysics*, Vol. 18, Issue. 4, pp. 769-792, doi: 10.1190/1.1437927.
- Roerink, G.J., M. Menenti, & W. Verhoef (2000) “Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, Issue.9, pp. 1911-1917, doi: 10.1080/014311600209814
- Sanaienejad, S. H., Shah Tahmasbi, A. R., Sadr Abadi Haghighi, R. & Kelarestani, K, (2008) “A Study of Spectral Reflection on Wheat Fields in Mashhad Using MODIS Data”. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, Vol. 12, No. 45, pp. 11-19 [in persian].
- Saunders, R.W., & K. T. Kriebel (1988) “An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, Issue.1, pp. 123 – 150, 10.1080/01431168808954841.
- Sellers, P.J., C. J. Tucker, G. J. Collatz, S. O. Los, C. O. Justice, D. A. Dazlich, & D. A. Randall (1994) “A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, Issue.17, pp. 3519-3545, doi: 10.1080/01431169408954343.
- Simpson, J. J., & J. I. Gobat (1996) “Improved cloud detection for daytime AVHRR scenes over land”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 55, Issue. 1, pp. 21-49, doi: 10.1016/0034-4257(95)00188-3.
- Stowe, L.L., E. P. McClain, R. Carey, P. Pellegrino, G. G. Gutman, P. Davis, C. Long, & S. Hart (1991) “Global distribution of cloud cover derived from NOAA/AVHRR operational satellite data”, *Advances in Space Research*, Vol. 11, Issue.3, pp. 51-54, doi:10.1016/0273-1177(91)90402-6.
- Verhegghen, A., S. Bontemps, & P. Defourny (2014) “A global NDVI and EVI reference data set for land-surface phenology using 13 years of daily SPOT-VEGETATION observations”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.35, No.7, pp. 2440-2471, doi: 10.1080/01431161.2014.883105.
- 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, pp. 19–24.
- 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*, Vol. 17, Issue.2, pp. 231 - 235, doi: 10.1080/01431169608949001.
- 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*, Vol. 24, No. 4, pp. 348-353, doi: 10.1659/0276-4741(2004)024[0348:ROACVI]2.0.CO;2.
- Wit, A. J. W., & B. S (2005) "Deriving phenological indicators from SPOT-VGT data using the HANTS algorithm", *Proceedings of the 2nd International Vegetation User Conference*; 1998–2004: 6 years of operational activities. Luxembourg, EC - ISBN 9289490047, pp. 195- 201.
- Zhou, J., L. Jia, & M. Menenti (2015) "Reconstruction of global MODIS NDVI time series: Performance of Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS)", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 163, No. 15, pp. 217-228, doi: 10.1016/j.rse.2015.03.018.