

Use spatial- temporal fusion algorithm to extract vegetation indices in rice growth stages

Fatemeh Jafari Sayadi¹, Mohammad Ali Gholami Sefidkouhi^{*2},
Hemmatollah Pirdashti³, Mojtaba Khoshravesh⁴

1. Ph.D. Student of Water Engineering, Irrigation and Drainage, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran. E-mail: fjsayadi1991@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran. E-mail: ma.gholami@sanru.ac.ir
3. Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Crops Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran. E-mail: pirdasht@yahoo.com
4. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran. E-mail: khoshravesh_m24@yahoo.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 02.27.2021

Revised: 07.17.2021

Accepted: 08.22.2021

Keywords:

Landsat 8,
Leaf area index,
MODIS,
Sentinel 2,
Vegetation map

ABSTRACT

Background and Objectives: Earth monitoring satellites and vegetation indices are very useful to study the plant greenness at different stages of growth. But cloudy sky in plant growth periods leads to remote sensing information in humid areas is less welcomed. The existence of spatial-temporal fusion algorithms use to rebuilding satellite images for use remote sensing data in the period of plant growth. In this study, fusion algorithm were used to rebuilding the images of Landsat 8 and Sentinel 2 satellites to estimate the leaf area index at different stages of growth.

Materials and Methods: The present study was conducted in the paddy of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in the period of June to August 2020. Rice leaf area index was calculated using the non-destructive method in the field and used to relationship with remote sensing indices. To achieve the objectives of this study, after radiometric and atmospheric correction images of Landsat 8 and Sentinel 2 were used to extract the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Rice Growth Vegetation Index (RGVI) and Soil Adjustment Vegetation Index (SAVI). In cloudy period, STARFM algorithm and MODIS images used to rebuilt the images of Landsat 8 and Sentinel 2. In order to estimate the leaf area index, using satellite images, a suitable relationship was obtained between vegetation indices and rice leaf area index (*Oryza sativa*) at different stages of growth.

Results: Due to the cloudiness in July and the peak of rice greenery, the use of STARFM algorithm led to rebuilt of images in this period and finally with 15 images in the rice growing stages, four linear relationships between NDVI, RGVI and SAVI indices for four stages of growth was created by leaf area index, the highest and lowest correlation coefficients respectively, 0.96 for NDVI index at transplanting and maturing stage and 0.75 for RGVI index at transplanting stage, respectively. Also, the map of changes in leaf area index for both satellites in the period of crop growth showed well the changes in the greenness of rice cover. In the transplanting stage, leaf area index is in the range of 0.5-1 and as the vegetation canopy

becomes complete, leaf area index increases and in the stages of tillering, heading and maturing the average leaf area index in the maps, respectively, 2.5, 4 and 3.

Conclusion: NDVI index with the highest correlation (0.96) with leaf area index is a good estimator and can be used to obtain maps of leaf area index in large areas. As a result, it seems that by using satellite data and image rebuilding on cloudy days, it is possible to achieve leaf area index with high accuracy and extract various information such as age and growth stage for the rice plant.

Cite this article: Jafari Sayadi, Fatemeh, Gholami Sefidkouhi, Mohammad Ali, Pirdashti, Hemmatollah, Khoshravesh, Mojtaba. 2022. Use spatial- temporal fusion algorithm to extract vegetation indices in rice growth stages. *Journal of Plant Production Research*, 29 (2), 79-99.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2022.18887.2787

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

به کارگیری الگوریتم ادغام مکانی - زمانی در استخراج شاخص‌های طیفی گیاه در مراحل رشد برنج

فاطمه جعفری صیادی^۱، محمدعلی غلامی سفیدکوهی^{۲*}، همت‌اله پیردشتی^۳، مجتبی خوش‌روش^۴

۱. دانشجوی دکتری رشته مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: fjsayadi1991@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: ma.gholami@sanru.ac.ir
۳. استاد گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: pirdasht@yahoo.com
۴. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: khoshravesh_m24@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: هر چند وجود ماهواره‌های پایش سطح زمین این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان در مراحل مختلف رشد وضعیت سبزیگی گیاه را با کمک شاخص‌های گیاهی مختلف مورد بررسی قرار داد اما وجود ابرناکی در دوره‌های رشد گیاه منجر می‌شود تا اطلاعات حاصل از سنجنش از دور در مناطق مرطوب با استقبال کم‌تری روبرو شود. وجود الگوریتم‌های ادغام مکانی-زمانی برای بازسازی تصاویر ماهواره‌ای امکان بهره‌گیری از داده‌های دورسنجی را در دوره رشد گیاهی فراهم نمود. هدف از پژوهش حاضر، استفاده از الگوریتم ادغامی به منظور بازسازی تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ و محاسبه شاخص سطح برگ برنج در مراحل مختلف رشد می‌باشد.
واژه‌های کلیدی: سنتینل ۲، شاخص سطح برگ، لندست ۸، مودیس، نقشه پوشش گیاهی	مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در شالیزارهای دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در بازه زمانی خرداد الی مرداد ماه سال ۱۳۹۹ انجام گرفت. شاخص سطح برگ برنج با استفاده از روش غیرتخریبی در مزرعه محاسبه و برای برقراری رابطه با شاخص‌های سنجنش از دور مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ پس از انجام تصحیح رادیومتریک و اتمسفریک برای استخراج شاخص‌های تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI)، رشد برنج (RGVI) و پوشش گیاهی با اصلاح خاک (SAVI) استفاده شد. در دوره ابرناکی با کمک الگوریتم STARFM و تصاویر سنجنده مودیس، تصاویر دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ بازسازی و مورد استفاده قرار گرفت. به منظور برآورد

شاخص سطح برگ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رابطه‌ای مناسب میان شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ برنج (رقم طارم هاشمی) در مراحل مختلف رشد به دست آمد.

یافته‌ها: با توجه به ابرناکی در تیرماه و اوج سبزی‌نگی گیاه برنج، استفاده از الگوریتم STARFM منجر به بازسازی تصاویر در این دوره شد و در نهایت با کمک ۱۵ تصویر در کل دوره رشد برنج چهار رابطه خطی بین شاخص‌های NDVI، RGVI و SAVI برای چهار مرحله از رشد با شاخص سطح برگ ایجاد شد که بالاترین و پایین‌ترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دوری و شاخص سطح برگ به ترتیب ۰/۹۶ برای شاخص NDVI در مرحله نشا و رسیدن و ۰/۷۵ برای شاخص RGVI در مرحله نشا مشاهده شد. هم‌چنین نقشه تغییرات شاخص سطح برگ برای هر دو ماهواره در دوره رشد زراعی به خوبی تغییرات سبزی‌نگی پوشش برنج را نمایش داد. در مرحله نشا مقدار شاخص سطح برگ در محدوده ۱/۵-۰/۵ قرار دارد و هر چه پوشش گیاهی کامل‌تر می‌شود بر میزان شاخص سطح برگ افزوده و در مرحله‌های پنجه‌زنی، خوشه‌دهی و رسیدن میانگین شاخص سطح برگ در نقشه‌ها به ترتیب ۲/۵، ۴ و ۳ است.

نتیجه‌گیری: شاخص NDVI با داشتن بالاترین همبستگی (۰/۹۶) با شاخص سطح برگ برآوردگر مناسبی بوده و می‌توان با استفاده از آن نقشه‌های شاخص سطح برگ را در مناطق گسترده به دست آورد. در نتیجه با کمک در مجموع به نظر می‌رسد با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازسازی تصاویر در روزهای ابرناکی، می‌توان به شاخص سطح برگ با دقت بالایی دست یافت و اطلاعات مختلف هم‌چون سن و مرحله رشد را برای گیاه برنج استخراج نمود.

استناد: جعفری صیادی، فاطمه، غلامی سفیدکوهی، محمدعلی، پیردشتی، همت‌اله، خوش‌روش، مجتبی (۱۴۰۱). به کارگیری الگوریتم ادغام مکانی-زمانی در استخراج شاخص‌های طیفی گیاه در مراحل رشد برنج. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۹ (۲)، ۹۹-۷۹.

DOI: 10.22069/JOPP.2022.18887.2787



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

استفاده از فناوری دورسنجی و به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای، اغلب موجب کاهش هزینه و افزایش دقت و سرعت شده و روز به روز بر اهمیت این فناوری در راستای توسعه پایدار افزوده می‌شود (۱). پوشش گیاهی و میزان توسعه یافتگی آن یکی از مهم‌ترین اطلاعات مرتبط با مسائل کاربردی کشاورزی است که با برآورد دقیق آن می‌توان گام موثری در راستای کارآمد نمودن تصمیم‌گیری‌ها برداشت (۲) و (۳). گیاهان در طول دوره رشد، دارای مقادیر متفاوت بازتابندگی بوده و در هر مرحله از رشد، مقدار آن در باندهای گوناگون متغیر است (۴ و ۵). شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی^۱ (NDVI) کمیته است که با استفاده از باند قرمز مرئی و فرسرخ نزدیک طیف الکترومغناطیس تعریف می‌شود (۶). با اعمال عامل تصحیح‌کننده خاک (L) در شاخص NDVI، شاخص پوشش گیاهی با اصلاح خاک^۲ (SAVI) به دست می‌آید تا با دقت بیشتری پوشش گیاهی را از پس‌زمینه تفکیک نماید (۷). با توجه به شرایط ویژه شالیزارها (وجود آب در پس‌زمینه) شاخص گیاهی رشد برنج^۳ (RGVI) با افزودن باندهای آبی و فرسرخ میانی سعی در کاهش اثرات آب پس‌زمینه پوشش برنج دارد (۸). این شاخص‌ها برای محاسبه میزان وجود پوشش گیاهی در روش‌های سنجش از دور کاربرد دارد و از آن‌ها در تعیین مواردی چون سطح زیرکشت، تشخیص محدوده‌های گیاهی، تفکیک نوع گیاهان بر اساس میزان بازتابندگی و تعیین مقدار حجم گیاهی استفاده می‌شود (۹، ۳ و ۱۰).

در میان ماهواره‌های محیطی، لندست ۸^۴ با در اختیار داشتن اسکنرهای چندطیفی^۵ و ارائه تصاویر

ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی^۶ ۳۰ متر به‌طور گسترده‌ای به منظور بررسی پارامترهای ریخت‌شناسی (فیزیکی-زیستی) پوشش گیاهی استفاده می‌شود (۱۱). در حال حاضر، ماهواره سنتینل ۲^۷ نیز با ارائه تصاویر با تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر، مورد توجه پژوهشگران در زمینه‌های کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی قرار گرفته است (۱۲). تصاویر این دو ماهواره به دلیل توان تفکیک زمانی^۸ ۱۶ و ۵ روزه در بررسی وضعیت پوشش گیاهی و پایش رشد و نمو گیاهی مناسب است (۱۳) اما در اغلب نواحی به ویژه در مناطق مرطوب و با بارش زیاد، به دلیل وجود ابرها در منطقه، ممکن است فاصله زمانی بین دو تصویر متوالی فاقد ابرناکی اخذ شده، بیش‌تر از ۵ و حتی ۱۶ روز باشد و حتی ممکن است برای چندین دوره تصویربرداری، امکان استفاده از تصاویر این ماهواره‌ها فراهم نشود. از دست دادن اطلاعات حاصل از هر دوره تصویربرداری، روند بررسی و پایش گیاهی را با مشکل روبرو می‌سازد (۱۴). از آنجایی که تصاویر حاصل از ماهواره‌های لندست و سنتینل دارای اطلاعات ارزشمند با تفکیک مکانی مناسب می‌باشد، لازم است تا با به کارگیری روش‌های مطمئن امکان بازسازی تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های ابرناکی فراهم شود (۱۵). بنابراین الگوریتم‌های ادغام مکانی- زمانی^۹ تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند در بازسازی تصاویری ماهواره‌هایی با تفکیک مکانی مناسب، بسیار کارآمد باشند.

سنجنده مودیس^{۱۰} با تهیه دو تصویر در یک روز، به عنوان سنجنده پایه در الگوریتم‌های ادغام مکانی- زمانی شناخته می‌شود (۱۶ و ۱۷). هر چند توان

6- Spatial Resolution
7- Sentinel-2
8- Temporal Resolution
9- Spatial-Temporal Fusion Algorithm
10- Moderate Resolution Imaging Spectrodiameter (MODIS)

1- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
2- Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)
3- Rice Growth Vegetation Index (RGVI)
4- Landsat 8
5- Multi-Spectral

ISTDFM^۱، STARFM و ESTARFM استفاده کردند تا با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در دوره زمانی رشد محصولات زراعی، تصاویر روزانه لندست را ایجاد کنند. مقایسه الگوریتم‌ها نشان داد، دو الگوریتم ISTDFM و ESTARFM که به ترتیب توسعه یافته الگوریتم‌های STDFM و STARFM هستند با داشتن ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۱۹۵ و ۰/۰۲۱۶ بهترین عملکرد را در ادغام زمانی- مکانی تصاویر مودیس و لندست داشته و می‌توان از ترکیبات بانندی حاصل از ادغام در تعیین تغییرات پوشش سطح زمین استفاده نمود (۱۷). در پژوهش مختاری و همکاران (۲۰۱۹) از اطلاعات حاصل از ماهواره لندست ۷ و ۸ و سنجنده مودیس برای برآورد ضریب گیاهی محصولات زراعی پرکاربرد در ایران استفاده شد. برای اصلاح توان تفکیک مکانی تصاویر سنجنده مودیس و تبدیل آن به توان تفکیک مکانی ۳۰ متر، از الگوریتم TsHARP استفاده شد. ذرت علوفه‌ای، چغندر قند، گندم و جو به عنوان محصولات زراعی با بیش‌ترین سطح زیر کشت در ایران انتخاب و داده‌برداری زمینی در دشت قزوین و دشت تهران- کرج انجام شد. برای برآورد ضریب گیاهی، شاخص سطح برگ و پوشش گیاهی محاسبه و سپس دمای سطح برگ از طریق داده‌های باند حرارتی مودیس به دست آمد. با استفاده از دمای سطح برگ و تعیین تغییرات آن در طول فصل زراعی برای محصولات مختلف، نمودار ضریب گیاهی محصولات انتخابی به دست آمد. نتایج نشان داد با استفاده از ضریب گیاهی به دست آمده از روش دورسنجی می‌توان آب مورد نیاز برای محصولات زراعی را با دقت مطلوب محاسبه نمود (۱۸). در پژوهش مورنو و همکاران (۲۰۲۰) به ضرورت توسعه الگوریتم‌های ادغامی مکانی- زمانی اشاره شده است. الگوریتم‌های هم‌چون

تفکیک مکانی پایین این سنجنده امکان کاربرد اطلاعات آن در مناطق با وسعت کم را محدود می‌سازد، اما وجود دو تصویر در هر روز احتمال دستیابی به تصاویر فاقد ابرناکی را در دوره‌های مختلف زمانی بیش‌تر کرده و با پایه قرار دادن این تصویر و بهره‌گیری از الگوریتم‌های ادغام مکانی- زمانی می‌توان تصاویر با توان تفکیک مکانی بالا را در دوره‌های ابرناکی بازسازی و از اطلاعات حاصل از آن‌ها بهره‌مند شد.

ترکیب و ادغام تصاویر سنجنده مودیس و ماهواره لندست ۷ در پژوهش گائو و همکاران (۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. ادغام تصاویر ماهواره‌ای در دوره رشد سریع رویشی محصولات زراعی انجام و سپس شاخص سطح برگ^۱ (LAI) به‌طور جداگانه از داده‌برداری زمینی، تصاویر ماهواره لندست ۷ و سنجنده مودیس برآورد شد. در ادامه تصاویر حاصل از ادغام، برای شاخص سطح برگ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد آماره MAD^۲ در رابطه ایجاد شده بین شاخص سطح برگ حاصل از ماهواره لندست ۷ و داده‌های زمینی ۰/۲۳، برای سنجنده مودیس در دو مرحله کم تا متوسط شاخص سطح برگ رابطه با داده‌های زمینی ۰/۳۲-۰/۱۷ و شاخص سطح برگ پس از ادغام تصاویر ماهواره‌ای و مقایسه آن با داده‌های زمینی در محدوده ۰/۸۳-۰/۰۷ قرار دارد. در پایان نتایج گویای این موضوع بود که ادغام تصاویر ماهواره‌ای علاوه بر بهبود برآورد شاخص سطح برگ باعث افزایش توان تفکیک مکانی و زمانی ماهواره‌ها خواهد شد (۱۰). وو و همکاران (۲۰۱۶) نیز در پژوهش خود که در سه منطقه چین انجام شده است، برای دستیابی به تصاویر روزانه لندست از الگوریتم‌های ادغام^۳ STDFM،

4- Improved Spatial and Temporal Data Fusion Approach

1- Leaf Area Index
2- Mean Absolution Difference
3- Spatial and Temporal Data Fusion Approach

دوره‌های بارندگی در این منطقه طولانی بوده و تعداد تصاویر ماهواره مناسب کاهش پیدا می‌کند بنابراین کومار و راجان با استفاده از ماهواره Sentinel-1 از داده‌های SAR^۳ برای جبران داده‌های سنجنش از دور در دوره‌های ابرناکی استفاده کردند. روابط خطی بین داده‌های SAR و عملکرد، مکمل داده‌های تصاویر مودیس بوده و در نهایت مدل پیش‌بینی عملکرد برنج در منطقه با دقت ۶۸ درصد به دست آمد (۲۱).

بنابراین رشد گیاه برنج در طی فصل زراعی نیازمند پایش و بررسی مداوم است تا علاوه بر تضمین عملکرد مطلوب و مناسب، امکان مدیریت نهاده‌های مختلف فراهم آید و ضمن بهبود صرفه اقتصادی اثرات نامطلوب استفاده بیش از حد از نهاده‌ها کنترل شود. هم‌چنین با پایش مزرعه در مراحل حساس رشد گیاه می‌توان از خسارات جبران‌ناپذیر در زمان برداشت جلوگیری نمود. زیرا در مراحل مختلف فنولوژیکی، وجود هرگونه تنش منجر به کاهش عملکرد خواهد شد. بنابراین لازم است تا به صورت مداوم مزرعه و شرایط گیاه مورد ارزیابی قرار گیرد. شاخص سطح برگ با اندازه‌گیری سطح فعال فتوسنتزکننده گیاهی یکی از عوامل ارزشمند و دقیق در تعیین ویژگی‌های فنولوژیکی گیاه است. امروزه از رابطه شاخص سطح برگ با عوامل زیستی و عملکردی گیاه برنج استفاده فراوان شده و پایش دقیق آن در تعیین وضعیت سلامت دوره‌ای گیاه و عملکرد پایان فصل نقش به‌سزایی دارد. با توسعه فناوری سنجنش از دور و جهت‌گیری کشاورزی به سمت کشاورزی هوشمند، این فضا ایجاد شده است تا ماهواره‌های تحقیقاتی مختلف با هدف پایش وضعیت زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند و با تهیه تصاویر گسترده از سطح مزارع امکان دیده‌بانی از وضعیت مزرعه فراهم آید. از آنجایی که هر اندازه

از STARFM^۱، STAARCH^۲ و HISTARFM^۳ از جمله پرکاربردترین الگوریتم‌ها تا به امروز بوده که برای بازسازی تصاویر لندست ۸ و تهیه سری زمانی شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های مذکور در ادغام تک باند و ادغام شاخص گیاهی صورت گرفته است که در نهایت الگوریتم STARFM برای شاخص گیاهی سازگاری بیشتری داشته و نقشه سری زمانی شاخص NDVI را با دقت ۸۳ درصد در دوره رشد زراعی گیاهان تابستانه به‌دست آورده است (۱۹). گووا و همکاران (۲۰۲۰) به منظور تهیه سری زمانی NDVI از تصاویر ماهواره لندست استفاده کرده و در دوره‌های ابرناکی الگوریتم‌های STARFM و ESTARFM^۴ را در بازسازی تصاویر با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد سری زمانی حاصل از الگوریتم‌ها دقتی برابر ۸۸/۱۸ درصد برای پایش وضعیت زراعی گیاهان داشته و هر دو الگوریتم نتایج مناسبی برای تهیه سری زمانی ارائه کرده‌اند اما الگوریتم ESTARFM به دلیل سازگاری بیشتر با تغییرات پوشش سطح زمین ۱/۸۸ درصد خطای کم‌تری نسبت به الگوریتم STARFM در تهیه نقشه سری زمانی شاخص NDVI داشته است (۲۰). کومار و راجان (۲۰۲۱) برای پیش‌بینی مقدار عملکرد برنج در بخش شرقی هندوستان از تصاویر سنجنده مودیس استفاده کردند. در این پژوهش ابتدا شاخص NDVI از تصاویر سنجنده مودیس استخراج و سپس با ایجاد رابطه خطی بین عملکرد و شاخص گیاهی، نقشه عملکرد در منطقه به‌دست آمد. به دلیل موقعیت جغرافیایی هندوستان

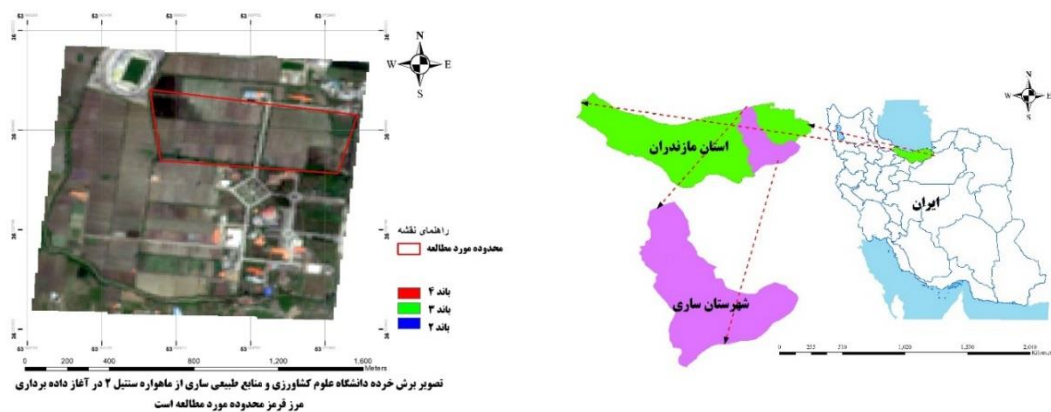
- 1- Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model
- 2- Spatial and Temporal Adaptive Algorithm for Mapping Reflectance Change
- 3- Highly Scalable Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model
- 4- Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model

ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ از طریق ادغام با تصاویر مودیس در تعیین شاخص سطح برگ و مراحل رشد گیاه برنج طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: زمین‌های شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به مساحت ۲۵ هکتار با محدوده جغرافیایی ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ درجه شرقی برای این پژوهش انتخاب شد (شکل ۱). محصول کشت شده در این محدوده برای سال ۱۳۹۹، برنج رقم طارم هاشمی می‌باشد.

بازه‌های زمانی پایش مزارع کشاورزی کوتاه‌تر شود تصمیم‌ها و برنامه‌ریزی‌ها با واقعیت تطابق بیشتری دارند، استفاده از ماهواره‌هایی با توان تفکیک زمانی بالا بیش‌تر مورد استقبال پژوهشگران قرار می‌گیرد. در مقابل، با افزایش توان تفکیک زمانی ماهواره‌ها، از توان تفکیک مکانی آن‌ها کاسته می‌شود. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های مکانی- زمانی مختلف در پایش وضعیت گیاهان بسیار کارآمد است و با کمک تصاویر ماهواره‌ای و تعیین شاخص سطح برگ می‌توان به پایش مرتب و دقیق مزارع کشاورزی به‌ویژه شالیزارها پرداخت. از همین رو، پژوهش حاضر با هدف افزایش توان تفکیک زمانی تصاویر



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه.

Fig. 1. Study area.

دریافت شد. باندهای مرئی، فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ میانی ۱ و ۲ در هر سنجنده مورد نظر بود (جدول ۱) که پس از انجام تصحیحات ژئومتریک، رادیومتریک و اتمسفریک روی هر سنجنده با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.3، اطلاعات باندها برای محاسبه شاخص تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI)، شاخص رشد برنج (RGVI) و شاخص پوشش گیاهی با اصلاح خاک (SAVI) مورد استفاده قرار گرفت (رابطه‌های ۱ تا ۳).

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده: در فصل رشد گیاه برنج مطابق جدول ۱، از باندهای مناسب تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ (سنجنده OLI^۱)، سنتینل ۲ (سنجنده MSI^۲) و ترا ۳ (سنجنده MODIS) استفاده شد. تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ از سایت earthexplorer.usgs.gov و تصاویر سنجنده مودیس (MOD 09 GA) از سایت LAADS DAAC

- 1- Operation Land Imager
- 2- Multi Spectral Imager
- 3- Terra

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

$$RGVI = 1 - \frac{\rho_{BLUE} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2}} \quad (2)$$

$$SAVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) (1 + L) \quad (3)$$

که در آن‌ها، ρ_{RED} طول موج قرمز، ρ_{BLUE} طول موج آبی، ρ_{NIR} طول موج فروسرخ نزدیک، ρ_{SWIR1} ، ρ_{SWIR2} طول موج فروسرخ میانی ۱ و ۲ و L عامل تنظیم‌کننده خاک (۶، ۷ و ۸).

جدول ۱- باندهای سنجنده‌های OLI، MSI، MODIS برای محاسبه شاخص‌های گیاهی (۱۱، ۱۲ و ۲۲).

Table 1. Bands for OLI, MSI and MODIS to computation vegetation indices (11, 12 and 22).

ماهواره ترا (سنجنده MODIS)		ماهواره سنتینل ۲ (سنجنده MSI)		لندست ۸ (سنجنده OLI)		نام باند Band Name
Terra (MODIS)		Sentinel 2 (MSI)		Landsat 8 (OLI)		
طول موج (نانومتر) Wavelength (nm)	شماره باند Band Number	طول موج (نانومتر) Wavelength (nm)	شماره باند Band Number	طول موج (نانومتر) Wavelength (nm)	شماره باند Band Number	
459-497	3	490	2	452-512	2	آبی Blue
620-670	1	650	4	636-673	4	قرمز Red
841-870	2	840	8	851-879	5	فروسرخ نزدیک NIR
1628-1652	6	1610	11	1566-1651	6	فروسرخ میانی ۱ SWIR 1
2105- 2155	7	2190	12	2107-2294	7	فروسرخ میانی ۲ SWIR 2

فرصت به نشای برنج داده شد تا پس از استقرار کامل ضمن اندازه‌گیری میدانی شاخص سطح برگ، از تصاویر ماهواره‌ای همه سنجنده‌ها از ابتدای خرداد ماه ۱۳۹۹ بهره گرفته شد. مطابق جدول ۲، با توجه به توان تفکیک زمانی هر ماهواره، تصاویر تا زمان برداشت محصول (۲۱ مرداد ماه) از پایگاه داده‌های سنجش از دور دریافت و مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور تخمین شاخص سطح برگ از طریق شاخص‌های طیفی گیاهی در هر مرحله از رشد گیاه برنج، با آغاز نشای برنج (۲۰ اردیبهشت) تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر دریافت و مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل عدم پوشش کامل سطح زمین توسط گیاه و همچنین غرقاب بودن آن، میزان بازتاب امواج به سنجنده‌ها ناچیز بوده و این خود عامل خطا در مقادیر دورسنجی می‌باشد. بنابراین مدت ۱۴ روز

جدول ۲- تاریخ دریافت تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های گیاهی.

Table 2. Date of satellite image to computation vegetation indices.

ماهواره ترا Terra		ماهواره سنتینل ۲ Sentinel 2		ماهواره لندست ۸ Landsat 8	
درصد ابرناکی* Cloudy Cover (%)	تاریخ تصاویر Date	درصد ابرناکی Cloudy Cover (%)	تاریخ تصاویر Date	درصد ابرناکی Cloudy Cover (%)	تاریخ تصاویر Date
6	2020/06/08	0.16	2020/05/29	8.33	2020/05/23
19	2020/06/25	43.84	2020/06/06	0.29	2020/06/08
34	2020/06/30	20.97	2020/06/13	0.02	2020/06/24
21	2020/07/04	6.77	2020/06/18	12.61	2020/07/10
8	2020/07/09	0.024	2020/06/21	46.05	2020/07/26
52	2020/07/17	21.43	2020/06/26	4.3	2020/08/11
34	2020/07/28	10.63	2020/07/01		
		20.63	2020/07/06		
		26.09	2020/07/13		

* برای کل گستره تصویر می باشد.

را یافت که تمامی ویژگی‌های مورد نیاز را دارا باشد. در نتیجه با توجه به کاربردهای مختلف، در بسیاری از اوقات لازم است که تصاویر سنجنده‌های مختلف با استفاده از الگوریتم‌های مناسب با یکدیگر ادغام شوند (۱۰). الگوریتم‌های ادغام مکانی- زمانی از جمله الگوریتم‌های پرکاربرد بوده که در نتیجه آن‌ها یک تصویر مجازی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا تولید می‌شود (۱۵). از این فرآیند معمولاً برای پیش پدیده‌های کوچک مقیاس در بازه‌های زمانی کوتاه استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ادغام مکانی- زمانی تصاویر به طور کل بر مبنای تئوری اختلاط طیفی عمل می‌کنند (۲۴).

بنابراین برای ادغام مکانی- زمانی تصاویر سه سنجنده مورد استفاده در این پژوهش و بازسازی تصاویر در روزهای ابرناکی از الگوریتم STARFM استفاده شد. الگوریتم STARFM یک مدل تلفیقی- تطبیقی مکانی و زمانی مطلوب را برای پیش‌بینی بازتابندگی در تفکیک مکانی لندست یا سنتینل و

به دلیل ابرناکی تصاویر در زمان اوج سبزی‌نگی گیاه برنج در مرحله رویشی (تیر ماه)، بهره‌مندی مستقیم از داده‌های دورسنجی دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ وجود نداشت. بنابراین استفاده از الگوریتم مکانی- زمانی به منظور بازسازی تصویر در تاریخ‌های ابرناکی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس ضروری می‌نماید. برای این منظور تاریخ اخذ تصاویر مودیس نزدیک به تاریخ تصاویر با ابرناکی بیش‌تر از ۱۰ درصد لندست ۸ و سنتینل ۲ انتخاب شد تا بتوان با بازسازی تصاویر اخیر، دقت برآورد شاخص سطح برگ را افزایش داد.

الگوریتم ادغام مکانی-زمانی: ادغام تصاویر ماهواره‌ای به مفهوم ترکیب مشخصات و ویژگی‌های معین از دو تصویر مختلف به منظور دستیابی به تصویر با ویژگی‌های دو تصویر اولیه است (۲۳). ادغام تصاویر ماهواره‌ای از آن جهت دارای اهمیت است که سنجنده‌های مختلف هر یک دارای ویژگی‌های متفاوتی بوده و نمی‌توان سنجنده واحدی

هم‌اندازه‌سازی پیکسل‌های سنجنده‌های مختلف انجام شود. به عنوان مثال اگر هدف از کاربرد الگوریتم STARFM بازسازی تصویر لندست ۸ در یک روز ابرناک باشد، لازم است اندازه پیکسل‌های مودیس به ابعاد ۳۰ در ۳۰ متر تبدیل شود تا امکان اعمال روابط الگوریتم روی تصاویر وجود داشته باشد. بعد از آماده‌سازی تصاویر ورودی، روابط مربوط به الگوریتم STARFM بر تصاویر اعمال شده و در نهایت تصویر هدف بازسازی خواهد شد. در ادامه به مفاهیم و روابط مربوط به الگوریتم STARFM برای بازسازی تصویر لندست با استفاده از جفت تصویر مودیس و لندست اشاره شده است. در یک پیکسل ناهمسان مودیس رابطه ۴ را به صورت زیر می‌توان نوشت (۱۰):

$$C_t = \sum(F_{it}^t \times A_{it}^t) \quad (4)$$

مشاهده شده توسط لندست از رابطه ۵ به دست می‌آید. با توجه به آن که پیکسل مودیس همگن می‌باشد (یعنی تعداد پیکسل‌های لندستی که در آن قرار می‌گیرند، همگی دارای بازتابندگی یکسانی هستند)، در نتیجه میانگین پیکسل‌های لندستی که به‌عنوان بازتابندگی در پیکسل مودیس قرار می‌گیرند، یکسان در نظر گرفته خواهد شد.

$$L(x_i, y_j, t_k) = M(x_i, y_j, t_k) + \varepsilon_k \quad (5)$$

بنابراین با فرض ثابت بودن ε_k در طول دوره پیش‌بینی و هم‌چنین این موضوع که در تاریخ پیش‌بینی بین t_0 و t_k تغییری در خطاهای سیستمی در پیکسل (x_i, y_j) اتفاق نیافتد، معادله $\varepsilon_k=0$ برقرار خواهد بود. در نتیجه، با رابطه ۶ بازتابندگی لندست به صورت زیر پیش‌بینی خواهد شد.

تفکیک زمانی مودیس ارائه می‌دهد (۱۴). بازتابندگی روزانه (با ملحوظ نمودن توان تفکیک مکانی لندست)، با استفاده از یک یا چند جفت تصویر لندست و تصاویر مودیس اکتسابی (در همان روز به همراه یک یا چند ماه مشاهده مودیس در تاریخ پیش‌بینی)، پیش‌بینی می‌شود. در بازسازی تصاویر لازم است ابتدا بر تصاویر انتخابی برای ورود به الگوریتم (یک تصویر از لندست یا سنتینل و دو تصویر از مودیس) تصحیحات ژئومتریکی، رادیومتریک و اتمسفریک انجام شده تا علاوه بر هم‌مرجع شدن تصاویر سنجنده‌های مختلف، بازتاب خالص سطح زمین برای هر پیکسل محاسبه شود. هم‌چنین با توجه به اختلاف در اندازه پیکسل بین سنجنده‌های مختلف لازم است بعد از اعمال انواع تصحیحات عملیات

که در آن، (C_t) بازتابندگی در مودیس، F_{it} بازتابندگی در لندست و A_{it} درصد تشکیل‌دهنده F_{it} در پیکسل C_t می‌باشد. به عبارتی F_{it} را می‌توان بر اساس بازتابندگی پیکسل‌های همسایه در تصویر مودیس به‌دست آورد تا نتایج بهبود یابد. از این رو گام اصلی پیدا کردن پیکسل‌های همسایه همگن و یکسان طیفی است. برای یک پیکسل همگن مودیس، بازتابندگی

که در آن، L و M به ترتیب معرف پیکسل لندست و مودیس، (x_i, y_j) موقعیت پیکسل داده شده برای تصاویر لندست و مودیس و t_k تاریخ اکتساب دو تصویر مودیس و لندست در نظر گرفته می‌شوند. هم‌چنین، ε_k نشان‌دهنده تفاوت بین بازتاب سطحی مشاهده شده مودیس و لندست (ناشی از پهنای باند مختلف و هندسه خورشیدی متفاوت) می‌باشد.

$$L(x_i, y_j, t_0) = M(x_i, y_j, t_0) + (L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \quad (۶)$$

سبزی‌نگی گیاه (تیرماه) فراهم شد که در نتیجه آن روابط مناسبی در تعیین شاخص سطح برگ و مراحل رشد گیاه برنج به دست آمد.

از آنجایی که پس از اعمال الگوریتم ادغام مکانی-زمانی در طول فصل رشد برنج، ۱۵ تصویر ماهواره‌ای از لندست و سنتینل در دسترس قرار گرفته است به‌طور میانگین برای هر مرحله رشد (نشا، پنجه‌زنی، خوشه‌دهی و رسیدن) سه تصویر وجود دارد. به منظور ایجاد پایگاه داده‌ای گسترده و تعیین روابط دقیق، با کمک جدول ۳ تاریخ تصویر در هر مرحله از رشد تعیین و با داده‌های زمینی متناظر با همان تاریخ برای ایجاد رابطه بین شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ مورد استفاده قرار گرفت. در نتیجه در هر مرحله از رشد تمامی داده‌ها مشخص شده و برای استخراج روابط بین شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ ۸۰ درصد داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و ۲۰ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی روابط مورد استفاده قرار گرفت.

شاخص سطح برگ: شاخص سطح برگ یک متغیر مهم در مدل‌سازی و برآورد میزان رشد و توسعه پوشش گیاه و تعیین عملکرد پایان فصل است. با توجه به وابستگی بالای شاخص سطح برگ با مرحله رشد گیاهی و تعیین میزان شادابی گیاهی و به منظور ارزیابی شاخص سطح برگ حاصل از داده‌های دورسنجی و الگوریتم‌های ادغام، لازم بود تا داده‌برداری زمینی برای شاخص سطح برگ نیز انجام شود. شاخص سطح برگ در شالیزارهای انتخاب شده بر مبنای روش غیرتخریبی (رابطه ۷) اندازه‌گیری شد (۲۵).

رابطه مذکور برای پیکسل‌های همگن در تصویر مودیس کاملاً منطقی خواهد بود (بدین مفهوم که در پیکسل‌های همگن دارای اعتبار می‌باشد).

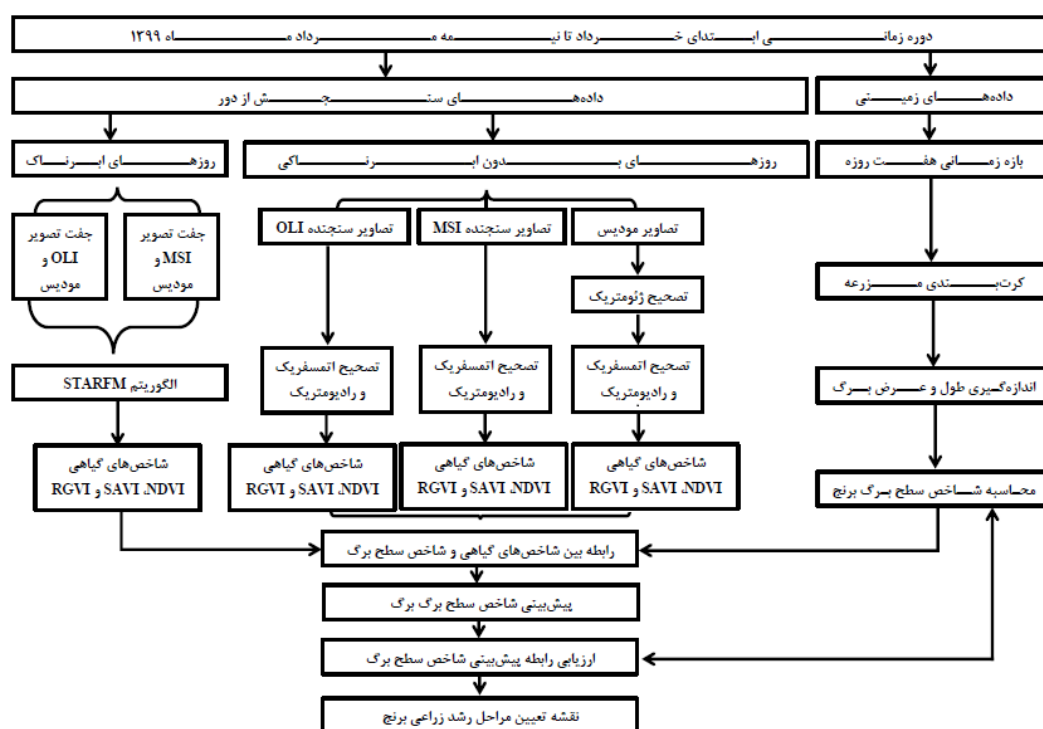
برای به دست آوردن بازتابندگی لندست در مناطقی که همگن نیستند، از همسایه‌های همگن آن منطقه می‌توان استفاده نمود زیرا در همسایه همگن، مقدار بازتابندگی مودیس و لندست یکسان می‌باشند (۱۴). بنابراین با توجه به معلوم بودن بازتابندگی مودیس، بازتابندگی همسایه‌های همگن پیکسل مرکزی پنجره را نیز همان بازتابندگی مودیس می‌توان در نظر گرفت (۱۷). همچنین با وزن‌دهی به همسایه همگن، میزان بازتابندگی برای یک پیکسل مشخص از تصویر لندست قابل پیش‌بینی است. در نتیجه، اساس فرآیند مذکور، پیدا کردن پیکسل‌های همگن موجود در اطراف پیکسل مرکزی در تصویر لندست اولیه خواهد بود (۱۰).

به منظور اجرای الگوریتم STARFM و بازسازی تصاویر لندست و سنتینل در روزهای ابرناک، روابط مربوط به این الگوریتم به زبان پایتون کدنویسی شد. با هدف افزایش دقت الگوریتم در یافتن پیکسل‌های همگن منطقه داده‌برداری به صورت مربع در آمد و مساحت شالیزارهایی که رقم برنج مشابه داشتند به تصویر افزوده و عرض پنجره جستجو برای تصاویر لندست و سنتینل به ترتیب ۳۰ و ۹۰ در نظر گرفته شد. برای هر نوبت بازسازی تصویر، ابتدا جفت تصاویر مودیس و لندست در روز فاقد ابرناکی (برای مثال ۴ تیرماه) و تصویر مودیس در روز بازسازی (برای مثال ۲۰ تیرماه) به الگوریتم معرفی و سپس الگوریتم اجرا شد. با اجرای این الگوریتم امکان بازسازی ۷ تصویر لندست و سنتینل در زمان اوج

$$LAI = K \times LeafLength \times LeafWidth \quad (7)$$

گام‌های زمانی هفت روزه بوته‌های انتخابی از ابتدای دوره داده‌برداری (ابتدای خردادماه ۱۳۹۹) مورد ارزیابی قرار گرفته و طول و عرض برگ در این بوته‌ها اندازه‌گیری شد. در هر کرت ۱۰ الی ۱۵ بوته به صورت تصادفی انتخاب و تا پایان داده‌برداری اندازه طول و عرض برگ این بوته به صورت دوره‌ای در طی فصل زراعی از شالیزار برداشت و شاخص سطح برگ در هر مرحله از رشد برنج تعیین شد. نمودار جریانی مراحل کار در شکل ۲ نشان داده شده است.

مطابق رابطه ۷، مقدار طول و عرض برگ با اندازه‌گیری در مزرعه محاسبه و با ضرب در ضریب متناسب برای هر رقم برنج (K)، شاخص سطح برگ به دست می‌آید. از آنجایی که رقم برنج در محدوده مورد مطالعه رقم طارم هاشمی بوده است، مقدار K برای این رقم عدد ۰/۷۴ در نظر گرفته شده است (۲۶). با توجه به گستردگی محدوده مورد مطالعه و به منظور نظم‌دهی به داده‌برداری زمینی، منطقه مورد مطالعه به ۲۶ کرت (بر معیار تعداد پیسکل‌های ماهواره لندست ۸ در هر کرت) تقسیم‌بندی و در



شکل ۲- نمودار جریانی از مراحل کار پژوهش.

Fig. 2. Flowchart of study stages.

از داده‌های سنجنش از دور و داده‌های زمینی مطابق رابطه‌های زیر مورد استفاده قرار گرفت.

معیارهای ارزیابی: نمایه‌های آماره شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای نرمال شده (NRMSE) به منظور ارزیابی نتایج حاصل

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

$$NRMSE = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \right) \times \frac{100}{\bar{M}} \quad (9)$$

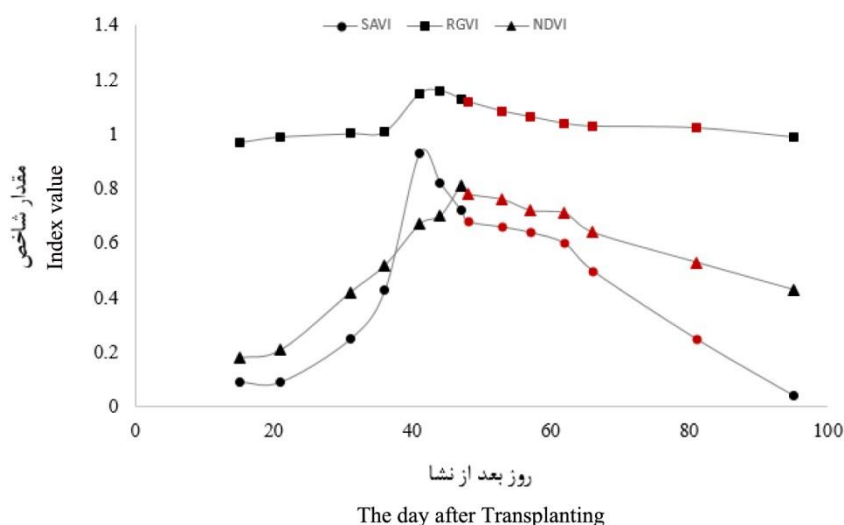
روند شاخص‌های گیاهی را در دوره پنجه‌زنی و خوشه‌دهی (۵ تیرماه تا ۲ مرداد ماه) نشان دهد. مطابق شکل ۲، هر سه شاخص گیاهی در ابتدای فصل رشد به دلیل کوتاه بودن نشاها و بازتاب آب، کم‌ترین مقدار را دارند که با رشد و توسعه پوشش گیاهی به تدریج بر مقدار هر یک شاخص‌های افزوده می‌شود و در مرحله پنجه‌زنی به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. شاخص‌های تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI)، رشد برنج (RGVI) و پوشش گیاهی با اصلاح خاک (SAVI) به ترتیب در روزهای ۴۷، ۴۴ و ۴۱ بعد از نشا به بیشینه مقدار رسیده‌اند. با توجه به ماهیت شاخص رشد برنج و حذف اثر آب پس زمینه شالیزار، این شاخص در طی دوره رشد گیاه مقدار عددی بیش‌تری نسبت به دو شاخص دیگر دارد.

که در آن‌ها، S_i مقدار برآورد شده، M_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{M} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها می‌باشد (۲۷).

نتایج و بحث

شاخص‌های گیاهی: تغییرات میانگین مقادیر سه شاخص گیاهی NDVI، RGVI و SAVI در شکل ۳ برای بازه ابتدای خرداد تا نیمه مرداد ۱۳۹۹، نشان داده شده است.

نتایج نشان داد که هر سه شاخص طیفی گیاهی به خوبی تغییرات پوشش گیاهی را در تمامی مراحل رشد گیاه (نشاء، پنجه‌زنی، خوشه‌دهی و رسیدن) نشان می‌دهند. استفاده از الگوریتم ادغام مکانی-زمانی منجر شد تا نمودار تغییرات با دقت بیش‌تری



شکل ۳- میانگین شاخص‌های گیاهی در بازه زمانی کشت برنج (نقاط قرمز رنگ، تصاویر بازسازی شده).

Fig. 3. Average of vegetation indices (VI) in Rice cultivation period (Red point for rebuilding images).

تعیین نمود. محدوده‌های ذکر شده در جدول ۳ برای شاخص‌های مورد نظر در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت و از داده‌های تصاویر در هر مرحله از رشد برای استخراج روابط بین شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ استفاده شد.

با توجه به کاربرد شاخص‌های گیاهی در تعیین سن فنولوژیک گیاهان از جمله برنج (۲۸ و ۲۹) می‌توان با استفاده از محدوده‌های مشخص برای شاخص‌های گیاهی، مرحله رشد گیاه را با کمک داده‌های دورسنجی به دست آورد و تصاویر مربوط به هر مرحله از رشد را

جدول ۳- محدوده شاخص‌های گیاهی در هر مرحله از رشد (۲۸ و ۲۹).

Table 3. Vegetation indices range in growth stage (28 and 29).

محدوده شاخص‌های گیاهی Vegetation indices range				شاخص گیاهی Vegetation Index
مرحله رسیدن Mature Stage	مرحله خوشه‌دهی Heading Stage	مرحله پنجه‌زنی Tillering Stage	مرحله نشا Transplantation Stage	
0.65-0.85	0.8-1	0.4-0.8	0.2-0.4	NDVI
1-1.1	1-1.15	0.98-1.04	0.9-1.05	RGVI
0.35-0.65	0.4-0.7	0.2-0.45	0.1-0.25	SAVI

با نزدیک شدن به زمان برداشت گیاه (۲۱ مرداد ۱۳۹۹) شاخص سطح برگ به طور تقریبی ثابت است. تعیین شاخص سطح برگ به روش غیر تخریبی در پژوهش‌های پیشین (بخشنده و همکاران، ۲۰۱۶) و (کاپوس-تانبیر و همکاران، ۲۰۱۸) نیز مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر عددی این شاخص در پژوهش‌های مذکور در محدوده ۱ تا ۴/۵ قرار دارد (۳۰ و ۳۱).

شاخص سطح برگ: به منظور برآورد دقیق شاخص سطح برگ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مقدار این شاخص با استفاده از روش غیرتخریبی در دوره رشد برنج اندازه‌گیری شد (جدول ۴). این شاخص با رشد و نمو بوته برنج در طی مراحل مختلف رشد تا زمانی که پنجه‌دهی و توسعه شاخساره متوقف شده و گیاه به مرحله‌ی خوشه‌دهی وارد می‌شود. بعد از مرحله خوشه‌دهی از میزان شاخص سطح برگ کاسته شده و

جدول ۴- شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده در مراحل مختلف رشد گیاه برنج (cm^2/cm^2).

Table 4. Measured leaf area index (LAI) in Rice growth stage (cm^2/cm^2).

تعداد داده Number of Data	بیشینه Maximum	میانگین Average	کمینه Minimum	مرحله رشد Growth Stage	تاریخ Date
49	0.84	0.41	0.21	نشا Transplantation	2020/05/21
47	1.56	0.62	0.22		2020/05/28
45	2.56	1.75	0.74		2020/06/04
45	3.27	2.33	1.40	پنجه‌دهی Tillering	2020/06/11
43	4.49	3.17	1.93		2020/06/17
21	4.58	3.59	2.24		2020/06/23
43	4.86	3.74	2.87	خوشه‌دهی Heading	2020/07/02
42	5.39	3.49	2.24		2020/07/09
42	4.39	3.06	1.99		2020/07/16
34	3.75	2.91	1.78	رسیدن Mature	2020/07/28

در جدول ۵ رابطه بین شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ در مراحل مختلف رشد، ارائه شده است.

جدول ۵- رابطه میان شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ برنج.

Table 5. Relationship between vegetation indices (VI) and leaf area index (LAI).

مرحله رشد Growth Stage	رابطه LAI و NDVI NDVI and LAI Relationship	رابطه LAI و SAVI SAVI and LAI Relationship	رابطه LAI و RGVI RGVI and LAI Relationship
نشا Transplantation	$LAI = 4.1(NDVI) - 0.31$	$LAI = 9.99(SAVI) - 0.49$	$LAI = 13.73(RGVI) - 12.94$
پنجه‌زنی Tillering	$LAI = 4.7(NDVI) - 0.38$	$LAI = 7.54(SAVI) + 0.12$	$LAI = 45.18(RGVI) - 42.84$
خوشه‌دهی Heading	$LAI = 7.19(NDVI) - 2.4$	$LAI = 4.35(SAVI) + 1.97$	$LAI = 14.29(RGVI) - 10.85$
رسیدن Mature	$LAI = 8.47(NDVI) - 3.15$	$LAI = 6.96(SAVI) - 0.59$	$LAI = 23.66(RGVI) - 21.92$

شاخص سطح برگ داشت و در مرحله خوشه‌دهی شاخص RGVI به دلیل کامل شدن پوشش گیاهی بالاترین ضریب همبستگی را با شاخص سطح برگ برقرار نمود. از آنجایی که شاخص RGVI تعداد باندهای بیش‌تری در رابطه خود داشته که منجر به حذف اثرات آب پس‌زمینه شالیزار می‌شود در مراحل ابتدایی رشد این شاخص با بیش‌برآورد شاخص سطح برگ باعث کاهش همبستگی ($r=0.75$) رابطه پیش‌بینی شاخص سطح برگ شد. با رشد برنج و تکامل سطح سایه‌انداز گیاه، مقدار RGVI به عدد مناسب برای پوشش گیاهی کامل نزدیک می‌شود و رابطه‌ای با همبستگی بالاتر نسبت به دیگر مراحل با شاخص سطح برگ برقرار می‌کند. در پژوهش رز و همکاران (۲۰۲۰) نیز شاخص‌های گیاهی مختلف در تعیین شاخص سطح برگ مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به نتایج این پژوهش شاخص‌هایی گیاهی که در آن‌ها باند قرمز و فرورسرخ نزدیک به تنهایی کاربرد دارند (همچون شاخص NDVI) نسبت به

با توجه به روابط ارائه شده در جدول ۵، بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دور و شاخص سطح برگ به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۷۵ شاخص NDVI در مرحله نشا و رسیدن و ۰/۷۵ شاخص RGVI در مرحله نشا به دست آمد. در تمام مراحل رشد گیاه، رابطه‌ای خطی و مثبتی بین شاخص‌های دورسنجی با شاخص سطح برگ مشاهده شد؛ در نتیجه با افزایش شاخص‌های گیاهی، شاخص سطح برگ نیز افزایش می‌یابد. وو و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود به این موضوع اشاره کرده است که شاخص‌های گیاهی بر مبنای بازتابش از سطح فعال فتوسنتزکننده به دست می‌آیند و هر اندازه سطح فعال فتوسنتزکننده افزایش یابد، شاخص‌های گیاهی نیز افزایش می‌یابند (۳۲). در نتیجه، رابطه بین شاخص‌های گیاهی و شاخص سطح برگ در بیش‌تر محصولات کشاورزی رابطه‌ای مستقیم و خطی است. در همه مراحل زراعی به جز مرحله خوشه‌دهی شاخص NDVI بیش‌ترین ضریب همبستگی را با

سطح برگ برقرار کرده است به‌ویژه بهبود طول موج باند فرورسرخ نزدیک در ماهواره سنتینل ۲ باعث عملکرد مطلوب‌تر شاخص NDVI در تصاویر این ماهواره شد (۳۲).

به‌منظور صحت‌سنجی، ۲۰ درصد داده‌های دورسنجی در رابطه‌های پیش‌بینی شاخص سطح برگ (جدول ۵) قرار گرفت و با مقایسه شاخص سطح برگ برآورد شده و شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده، مقادیر پارامترهای ارزیابی مطابق جدول ۶ به‌دست آمد.

شاخص‌هایی که با استفاده از ضرایب اصلاحی و یا باندهای دیگر تعدیل شده باشند (شاخص SAVI و RGVI) توانایی بیش‌تری در تعیین دقیق‌تر شاخص سطح برگ دارند (۳۳). در مجموع با توجه به جدول ۵ همه شاخص‌های گیاهی در تمامی مراحل رشد همبستگی بالای ۷۰ درصد با شاخص سطح برگ داشتند که در پژوهش جعفری صیادی و همکاران (۲۰۱۸) نیز به این موضوع اشاره شده است (۹). در تمام مراحل رشد گیاه برنج شاخص NDVI رابطه‌ای با همبستگی بالا (بیش‌تر از ۸۵ درصد) با شاخص

جدول ۶- شاخص‌های ارزیابی روابط شاخص سطح برگ.

Table 6. Assessment parameters for leaf area index (LAI) relationship.

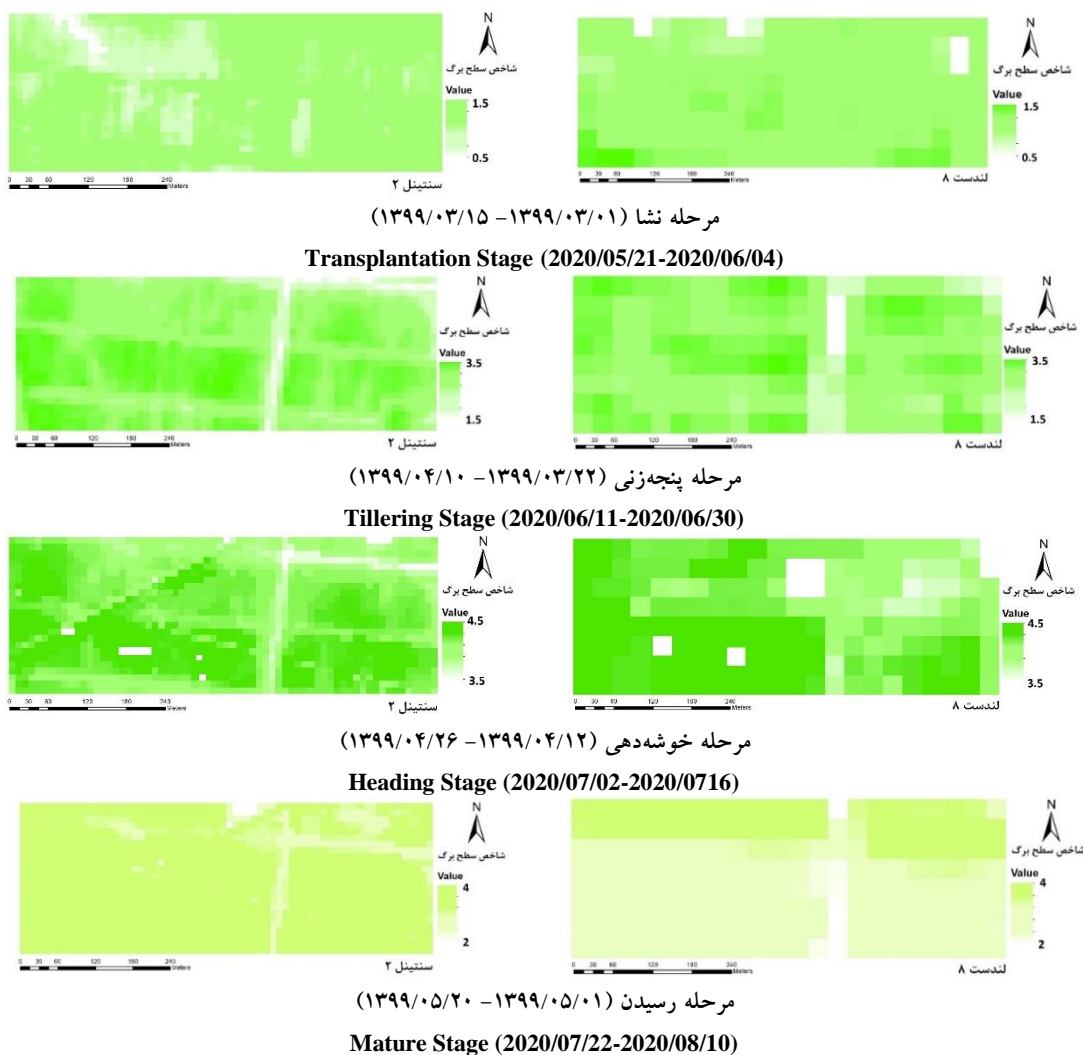
رابطه SAVI و LAI		رابطه LAI و RGVI		رابطه LAI و NDVI		مرحله رشد Growth Stage
SAVI and LAI Relationship	RMSE	RGVI and LAI Relationship	RMSE	NDVI and LAI Relationship	RMSE	
4.98	0.43	6.06	0.52	0.9	0.07	نشا Transplantation
3.51	0.55	3.08	0.48	1.14	0.17	پنجه‌زنی Tillering
3.79	0.19	0.71	0.13	1.27	0.24	خوشه‌دهی Heading
1.63	0.28	0.97	0.16	0.84	0.14	رسیدن Mature

شده در جدول ۵ است. در پژوهش زی و همکاران (۲۰۱۶) اشاره شده است که برآورد شاخص سطح برگ از طریق داده‌های دورسنجی همیشه با مقداری خطا مواجه است زیرا در یک تصویر ماهواره‌ای گستردگی کامل روی مزارع وجود دارد و شاخص سطح برگ برآورد شده، میانگین شاخص سطح برگ کل مزرعه است در حالی‌که در روش داده‌برداری زمینی، شاخص سطح برگ به کم‌تر از ۵ بوته در هر مترمربع محدود می‌شود و تعمیم اعداد زمینی به کل سطح مزرعه با خطا همراه خواهد بود (۳۴).

با مقایسه جدول‌های ۵ و ۶ مشخص می‌شود که هر شاخصی گیاهی که ضریب همبستگی بالاتری با شاخص سطح برگ داشت، مقادیر خطای کم‌تری برای پیش‌بینی شاخص سطح برگ با استفاده از داده‌های دورسنجی از خود نشان داد. به عنوان مثال در تمامی مراحل زراعی، شاخص NDVI با داشتن همبستگی مناسب با شاخص سطح برگ، کم‌ترین مقادیر RMSE و NRMSE را نسبت به دو شاخص دیگر دارد. مقادیر کم‌تر از ۰/۵ برای RMSE در تمامی شاخص‌های گیاهی برای محاسبه شاخص سطح برگ نشان‌دهنده دقت بالا و مطلوب روابط ارائه

خوشه‌دهی به دلیل ابرناکی طولانی مدت آسمان، تصاویر این دو ماهواره از طریق الگوریتم ادغامی، بازسازی شده‌اند.

نقشه شاخص سطح برگ و تعیین مراحل رشد زراعی: نقشه شاخص سطح برگ منطقه مورد پژوهش در هر مرحله از رشد توسط تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ در شکل ۴ ارائه شده است. در مرحله



شکل ۴- نقشه تغییرات شاخص سطح برگ برای دو ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ در چهار مرحله زراعی.

Fig. 4. Map of leaf area index changes for Landsat 8 and Sentinel 2 satellites in four crop stages.

شاخص سطح برگ، به دلیل نشان دادن سطح فعال فتوسنتزکننده، به عنوان ابزاری مناسب برای برآورد مرحله رشد و تخمین سن دقیق گیاه اشاره شد (۱۰ و ۳۵).

با توجه به شکل ۴ نقشه شاخص سطح برگ به‌دست آمده از هر دو ماهواره به خوبی تغییرات سبزیگی گیاه برنج را در تاریخ‌های مختلف رشد نشان می‌دهد. در پژوهش‌های گائو و همکاران (۲۰۱۲) و مختاری و همکاران (۱۳۹۱) نیز از

نتیجه‌گیری

تصاویر ماهواره‌ای شاخص سطح برگ را در مرحله‌های مختلف رشد، برآورد نمود. در مرحله ارزیابی رابطه‌های پیش‌بینی شاخص سطح برگ نیز شاخص گیاهی NDVI با داشتن همبستگی مناسب با شاخص سطح برگ، کم‌ترین مقادیر RMSE و NRMSE را نسبت به دو شاخص دیگر (RGVI و SAVI) دارد. مقادیر کم‌تر از ۰/۵ برای RMSE در تمامی شاخص‌های گیاهی برای محاسبه شاخص سطح برگ نشان‌دهنده دقت بالا و مطلوب رابطه‌های پیش‌بینی شاخص سطح برگ است. در نتیجه با کمک روابط ایجاد شده، نقشه شاخص سطح برگ در مرحله نشا تا رسیدن به دست آمد و با کمک آن به خوبی تغییرات شاخص سطح برگ قابل تشخیص است.

پژوهش حاضر که در دوره کشت گیاه برنج در سال ۱۳۹۹ انجام گرفت، هدف ایجاد رابطه مناسب بین شاخص‌های گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ با شاخص سطح برگ برنج بود. استفاده از الگوریتم STARFM و بازسازی تصاویر در دوره ابرناکی (تیرماه)، داده دورسنجی کافی برای دستیابی به رابطه‌هایی با همبستگی بالا را فراهم کرد. با توجه به نتایج پژوهش، بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دور و شاخص سطح برگ به ترتیب ۰/۹۶ برای شاخص NDVI در مرحله نشا و رسیدن و ۰/۷۵ برای شاخص RGVI در مرحله نشا به دست آمد. در تمام مراحل رشد گیاه، رابطه‌ای خطی و مثبتی بین شاخص‌های دورسنجی با شاخص سطح برگ وجود داشت و می‌توان با کمک

منابع

1. Jafari Sayadi, F. 2016. Application of remote sensing for estimating rice cultivation and water consumption. M.Sc. Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU). (In Persian)
2. Ahmadi, K., Abaszadeh, H., Hatami, F., Abdshah, H. and Kazemian, A. 2019. Agricultural statistics report, 2017-2018 for crop yields. Crops. Ministry of Jihad Agriculture, Deputy of Planning and Economy. Information and Communication Technology Center. 163p. (In Persian)
3. Behrang Manesh, M., Khosravi, H., Azarnivand, H. and Senatore, A. 2019. Quantifying the trend of vegetation changes using remote sensing (Case study: Fars Province). J. Plant Ecosyst. Conservation. 7: 15. 295-318. (In Persian)
4. Pordel, F., Ebrahimi, A.A. and Azizi, Z. 2017. Evaluating spatio-temporal phytomass changes using vegetation index derived from Landsat 8 (Case study: Mrajan rangeland, Boroujen). J. Rangeland. 2: 166-178. (In Persian)
5. Sanaeinejad, H., Nassiri Mahallati, M., Zare, H., Salehnia, N. and Ghaemi, M. 2014. Wheat yield estimation using Landsat images and field observation: A case study in Mashhad. J. Plant Prod. 20: 4. 45-63. (In Persian)
6. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. P 309-317, In: S. C. Freden (eds), 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS), Symposium. Washington. D.C. USA.
7. Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. of Environ. J. 25: 295-309.
8. Nuarsa, I.W., Nishio, F. and Hongo, C. 2011. Spectral characteristics and mapping of rice plants using multi-temporal Landsat data. Agric. Sci. J. 3: 54-67.
9. Jafari Sayadi, F., Gholami Sefidkholi, M.A. and Ziyaeetabar Ahmadi, M.K. 2018. Leaf area index and crop coefficient estimation from operational land imager (OLI) sensor data. J. Water Res. Agric. 32: 395-404. (In Persian)

10. Geo, F., Anderson, M.C., Kustas, W.P. and Wang, Y. 2012. Simple method for retrieving leaf area index from Landsat using MODIS leaf area index products as reference. *App. Remote Sens. J.* 6: 1-15.
11. Ihlen, V. and Zanter, K. 2019. Landsat 8 (L8) data handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS). South Dakota, USA. 96p.
12. Hoersch, B. 2015. SENTINEL-2 user handbook. European Space Agency (ESA). Europe. 64p.
13. Attarchi, S. and Poorakbar, N. 2020. Preliminary comparative assessment of Sentinel 2 and Landsat 8 (MSI and OLI sensors) images. *Sepehr J.* 29: 114. 67-78. (In Persian)
14. Rakhsh Mahpour, A. 2016. Evaluating Spatial-Temporal image fusion algorithms for MODIS and Landsat data in the land cover application. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
15. Fu, D., Chen, B., Wang, J., Zhu, X. and Hilker, T. 2013. An improved image fusion approach based on enhanced spatial and temporal the adaptive reflectance fusion model. *Remote Sens. J.* 5: 6346-6360.
16. Walker, J.J., De Beurs, K.M., Wynne, R.H. and Gao, F. 2012. Evaluation of Landsat and MODIS data fusion products for analysis of dry land forest phenology. *Rem. Sens. Environ.* 117: 381-393.
17. Wu, M., Wu, C., Huang, W., Niu, Z., Wang, C., Li, W. and Hao, P. 2016. An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery. *Info Fusion, J.* 31: 14-25.
18. Mokhtari, A., Noory, H., Vazifedoust, M., Palouj, M., Bakhtiari, A., Barikani, E., Zabihi Afrooz, R.A., Fereydooni, F., Sadeghi Naeni, A., Pourshakouri, F. Badiheshin, A.R. and Afrasiabian, Y. 2019. Evaluation of single crop coefficient curves derived from Landsat satellite image for major crops in Iran. *Agric. Water Manag. J.* 218: 234-249.
19. Moreno-Martínez, Á., Izquierdo-Verdiguier, E., Maneta, M.P., Camps-Valls, G., Rpbinson, N., Muñoz-Marí, J., Sedano, F., Clinton, N. and Running, S. W. 2020. Multispectral high resolution sensor fusion for smoothing and gap-filling in the cloud. *Remote Sens. Environ. J.* 247: 1-19.
20. Guo, Y., Wang, C., Lei, S., Yang, J. and Zhao, Y. 2020. A framework of spatio-temporal fusion algorithm selection for Landsat NDVI time series construction. *Geo-Inf, J.* 665: 1-21.
21. Kumar Ranjan, A. and Ranjan Parida, B. 2021. Predicting paddy yield at spatial scale using optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) based satellite data in conjunction with field-based crop cutting experiment (CCE) data. *Remote Sens.* 42: 2046-2071.
22. Vermote, E.F., Roger, J.C. and Ray, J.P. (2015). MODIS surface reflectance user's guide (MOD 09). MODIS land surface reflectance science computing facility. 35p.
23. Samadzadegan, F., Tabib Mahmoudi, F. and Bigdeli, B. 2014. Data fusion in remote sensing concepts and techniques. Tehran Univ. Press. 2th Edition. 275p. (In Persian)
24. Bazrgar Bojestani, A. and Akhoondzadeh Hanzaii, M. 2018. ESTARFM model for fusion of LST products of MODIS and ASTER sensors to retrieve the high resolution land surface temperature map. *J. Geo_Sci & Tec (jgst).* 7: 4. 147-161. (In Persian)
25. Palaniswany, K.M. and Gomez, K.A. 1974. Length-width method for estimating leaf area of rice. *Agron. J.* 66: 430-433.
26. Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. The international rice research institute (IRRI). Philippines. 269p.
27. Wang, X., Mosley, C.T., Frankenberger, J.R. and Kladivko, E.J. 2006. Subsurface drain flow and crop yield predictions for different drain spacings using DRAINMOD. *Agric. Water. Manag. J.* 79: 113-136.

28. Castro, A.I., Six, J., Plant, R.E. and Peña, J.M. 2018. Mapping crop calendar events and phenology-related metrics at the parcel level by object-based image analysis OBIA of MODIS-NDVI time-series (A case study in central California). *Remote Sens. J.* 10: 1-21.
29. Wang, J. Huang, J.F., Wang, X.Z., Jin, M.T., Zhou, Z., Guo, Q.Y., Zhao, Z.W., Huang, W.J., Zhang, Y. and Song, X.D. 2015. Estimation of rice phenology date using interated HJ-1 CCD and Landsat-8 OLI vegetation indices time-series images. *Zhejiang Univ. J. Biomed. Biotechnol.* 16: 832-844.
30. Bakhshandeh, A., Hoseyni, M., Farzin, N. and Pirdashti, H. 2016. Introducing a simple and fast method for estimating rice leaf area. P 1-4, In: H, Pirdashti (eds), 17th National Rice Conference, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari. (In Persian)
31. Campos-Taberner, M., Garcia-Haro, F.J., Busetto, L., Ranghetti, L., Martinez, B., Amoaro Gilabert, M., Camps-Valls, G., Camacho, F. and Boschetti, M. 2018. A critical comparison of remote sensing leaf area index estimates over rice-cultivated areas: from Sentinel-2 and Landsat-7/8 to MODIS, GEOV1 and EUMETSAT polar system. *Remote Sens. J.* 10: 1-23.
32. Wei, C., Chen, J., Chen, J. M., Yu, J.C., Cheng, C., Lai, Y.J., Chiang, P. N., Hong, C.Y., Tsai, M.J. and Wang, N. 2020. Evaluating relationships of standing stock, LAI and NDVI at a subtropical reforestation site in southern Taiwan using field and satellite data. *Forest Res. J.* 31: 1-10.
33. Rees, W.G., Golubeva, E.I., Tutubalina, O.V., Zimin, M.V. and Derkacheva, A.A. 2020. Relationship between leaf area index and NDVI for subarctic deciduous vegetation. *Int. Remote Sens. J.* pp. 22-41.
34. Xie, D., Zhang, J., Zhu, X., Pan, Y., Liu, H., Yuan, Z. and Yun, Y. 2016. An improved STARFM with help an unmixing-based method to generate high spatial and temporal resolution remote sensing data in complex heterogeneous regions. *Sensors, J.* 16: 1-19.
35. Mokhtari, S., Pirmoradian, N., Vazifehdoost, M. and Davatgar, N. 2013. Increasing accuracy of regional rice yield estimation by improvement of spatial resolution of leaf area index maps in VSM vegetative model. *Guilan, J. Cereal Res.* 2: 209-221. (In Persian)

