

Research Article

## Analyzing the performance of Landsat-8, Sentinel-2 satellite and fusion of their images for detection and evaluation of wheat yellow rust (case study - south-west of Khuzestan)

Sajad Zareie<sup>1\*</sup>, Kazem Rangzan<sup>1</sup>, Danya Karimi<sup>1</sup>, Shiva Moradi<sup>1</sup>

1- Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Earth Sciences, Remote Sensing and GIS department

**Keywords:** *Sentinel-2, Landsat-8, Wheat yellow rust, Khuzestan, Plant indicators, Classification*

### 1-Introduction

It is possible to detect the symptoms of agricultural products diseases before the spread of the disease, by using spectral data, advanced remote sensing methods and satellite images. The spectral indices extracted from the red and near-infrared regions have a high ability to extract and determine the amount of disease in the leaves and canopy of plants (Ashurlo et al., 2014). Zahirnia and Metinfar (2015) studied the identification and classification of the vegetation types in irrigated wheat fields and the prediction of wheat crop yield in southwest Khuzestan. The results showed that almost 40 days before wheat harvest, NDVI and GNDVI indexes had the highest percentage of estimated wheat yield with estimates of 86.73 and 72.83. Skakun et al., (2017) prepared a zoning map and wheat yield assessment for a regional scale in Ukraine using Landsat-8 and Sentinel-2 images.

During this study, it was found that the fusion of Landsat-8 and Sentinel-2 images improves the preparation of zoning maps and crop performance evaluation. Also, the fused use of these two images reduces winter wheat yield estimation errors by 1.8. Based on the ten-year study of wheat yellow rust in Khuzestan province, the outbreak of the disease is usually in the western areas of the province, the vicinity of the Hoor al-Azim wetland, and the appearance of the first spots of yellow rust at the beginning of March, and no signs of the disease are observed in the region before this date. Regarding temperature and humidity, January to February is suitable for the appearance of wheat rust disease and its development in Khuzestan province. Considering the strategic climatic and agricultural condition of Khuzestan province, the objectives of this research are to detect and zoning the wheat yellow rust in the study area using Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images in the desired period, to identify vulnerable areas and to zone vulnerability, comparison of the performance of Landsat-8 and Sentinel-2 sensors in detection and zoning of yellow rust disease.

### 2-Material and methods

Data used in this research include Sentinel-2 and Landsat-8 images, as well as field data related to diseased and healthy areas (received from the agricultural service center of Am altamir village (Safha) through an interview with an agricultural expert in the area of Maksar village and its suburbs. The satellite images used in this research include Landsat-8 and Sentinel-2 images related to the period of planting to harvest. In this research, SNAP, ArcGIS 10.5, Google Earth, ENVI 4.8, Excel 2013, and Office 2013 software were used. Preparation of satellite images was performed in the following steps. Layer stacking, Resize Data, Quick Atmospheric Correction, and Darksubtract were applied and finally, the image normalization, vegetation indexes, and classification were processed. NDVI, GNDVI, and MSI indices were calculated on three dates related to the health, onset, and peak of wheat yellow rust disease, also in the next step, wheat yellow rust classification was performed in three states based on Landsat-8 image, based on Sentinel-2 image and based on Fusion (IHS, GST, and BT) of these sensors images. Finally, the accuracy assessment of the outputs was

\* Corresponding author: s.zareie@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2024.46418.2444

Received: 2024-03-16

Accepted: 2024-05-26

done. The purpose of carrying out the mentioned steps is to detect and zone wheat yellow rust using remote sensing and GIS. Identifying the most effective index for studying this disease, as well as identifying the image of a sensor having the best classification result for this disease, are other goals of this research.

### 3-Results and discussions

In this research, the NDVI, GNDVI, and MSI indices were calculated and interpreted in the three dates of wheat health, onset, and peak of wheat yellow rust disease in the study area, to identify the most effective index to study wheat yellow rust disease in the study area. In the next step, the zoning and classification of this disease at the time of onset and peak of the mentioned disease was done based on Landsat-8 and Sentinel-2 images and also based on these images integration to study the process of spreading this disease and also identifying the image that has the best result for this goal. According to the results, in the disease outbreak area, the extent of healthy vegetation at the time of onset of the disease and also its peak compared to the period without the disease has greatly decreased. These results show a good agreement between disease outbreak points and plant indexes. By analyzing the obtained results, an inverse relationship can be seen between the extent of the class having high values of vegetation indices and the peak time of this disease. According to the visual and statistical interpretation of the results, the total area of the parts with vegetation index values higher than 0.4 has decreased significantly with a peak of this disease compared to the time of wheat health.

The MSI index had the weakest performance in the study of wheat yellow rust in the study area, while the GNDVI index was the most suitable in both the beginning and peak stages of the mentioned disease. Based on the results, the MSI index had the weakest performance in the study of wheat yellow rust in the study area, while the NDVI and GNDVI were the most appropriate indexes. According to the results, the accuracy of wheat yellow rust classification maps is higher than the accuracy of studied vegetation indexes. Comparing the results of using two types of optical images of Landsat-8 and Sentinel-2 sensors, to study wheat yellow rust, shows that the classification map of the disease in the beginning stage using Landsat-8 image and the classification map of the disease in the peak stage using Sentinel-2 image has had the best result.

A comparison of the results based on vegetation indexes also showed that NDVI had the best results in both the onset and peak stages of the wheat yellow rust disease. Zoning of wheat yellow rust disease based on the fusion of Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images with three methods GST, HIS, and BT, and field data was performed. According to the results, the class related to severe disease at the stage of disease onset is wider in both GST and BT methods than the classification based on the IHS fusion method. Along with the disease peak, the extent of this class has also increased. The IHS fusion method has the best classification result of wheat yellow rust in the onset stage of the disease, while the GST method has shown the best result in the peak stage of the disease. A comparison of all the classification scenarios implemented in this research shows that classification results based on the fusion of Landsat-8 and Sentinel-2 images are the best scenario to classify wheat yellow rust in both the onset and peak stages of the disease in the study area.

### 4-Conclusion

This research aimed to detect and zoning wheat yellow rust using Landsat-8, Sentinel-2 satellite images, and these images fusion during the period of vegetation health, the onset, and the peak of wheat yellow rust. In the first stage, the vegetation indexes of MSI, NDVI, and GNDVI were used to investigate wheat yellow rust disease, and finally, this disease in the study area was divided into 5 classes no vegetation cover, water and humidity, severe, moderate and low disease by using Landsat-8 and Sentinel-2 images, and also by fusion of these images with three methods of IHS, GST, and BT at onset and peak of the disease. According to the obtained results, the MSI index had the weakest performance in distinguishing wheat yellow rust in the study area. While GNDVI was the most appropriate index in both the onset and peak stages of the disease. The results showed that the accuracy of the classification maps of wheat yellow rust disease is higher than the accuracy of the maps of studied vegetation indexes. It can be concluded that the classification of wheat yellow rust disease using Landsat-8 images based on the regression relationship calculated in this research has more acceptable results than study of the disease based on the usage of NDVI,

GNDVI, and the MSI vegetation indexes. In addition, the MSI index had the weakest performance in identifying wheat yellow rust in the studied area. While NDVI and GNDVI were the most appropriate indexes.

The accuracy of the classification maps of wheat yellow rust disease is higher than the accuracy of the studied vegetation index maps. Among two output maps, the disease onset map has lower accuracy than the disease peak map. It can be concluded that by using Sentinel-2 images, the classification of wheat yellow rust disease based on the regression relationship calculated in this research had more acceptable results than studying the disease using NDVI, GNDVI, and MSI vegetation indexes.

Comparison of the results of using optical images of two sensors of Landsat-8 and Sentinel-2 for study of wheat yellow rust showed that classification of the disease onset stage using the Landsat-8 image with RMSE equal to 0.845, as well as classification map of the disease in the peak stage Using Sentinel-2 image with RMSE equal to 0.845 had the best results. A comparison of the results based on the vegetation indexes also showed that the NDVI index had the best results for studying wheat yellow rust in both the disease onset and peak stages. It can be concluded that more than one type of satellite image can be used to have more complete results. Due to differences in the characteristics of different sensor images, the use of these sensor images together will provide more accurate results. According to the results of this research, the IHS fusion method had the best classification result of wheat yellow rust in the onset stage of the disease, and GST has shown the best result in the peak stage of this disease. A comparison of all classification techniques implemented in this research showed that classification based on the fusion of Landsat-8 and Sentinel-2 images was the best technique to classify wheat yellow rust in both the onset and peak stages of this disease in the study area, which proves the high capability of satellite images fusion in improving the classification results of wheat yellow rust disease.

## 5-References

- Zahirnia, A., Metinfar, H., 2016. Estimating the yield of irrigated wheat fields based on data obtained from Landsat 8 satellite in southwestern region of Khuzestan province. Proceedings of the first national conference on remote sensing and geographic information system in earth sciences November 18 and 19. Shiraz University.
- Ashourlu, D., 2016. Presenting an algorithm to detect and estimate the amount of wheat rust using ground-based spectroscopy. MSc. Thesis, Khajeh Nasir Toosi University of Technology.
- Skakun, S., Vermote, E., Roger, J. C. Franch, B., 2017. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. AIMS Geosciences 3, 2, 163-186. <https://doi.org/10.3934/geosci.2017.2.163>

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Zareie, S., Rangzan, K., Karimi, D., Moradi, Sh., 2024. Analyzing the performance of Landsat-8, Sentinel-2 satellite and fusion of their images for detection and evaluation of wheat yellow rust (case study - south-west of Khuzestan). 14(2), 426-450.

DOI: 10.22055/AAG.2024.46418.2444

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19176.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19176.html)

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## تحلیل عملکرد ماهواره‌های لندست-۸، سنتینل-۲ و تلفیق تصاویر آنها برای تشخیص و

### ارزیابی زنگ زرد گندم

سجاد زارعی\*

گروه سنجش از دور و GIS دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز

کاظم رنگ زن

گروه سنجش از دور و GIS دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز

دانا کریمی

گروه سنجش از دور و GIS دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز

شیوا مرادی

گروه سنجش از دور و GIS دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز

\* s.zareie@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

### چکیده

ارزیابی بیماری زنگ زرد گندم در بخشی از استان خوزستان در دو مرحله شروع و اوج بیماری با روش‌های مبتنی بر NDVI، GNDVI و MSI، مبتنی بر طبقه‌بندی با تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸، و مبتنی بر تلفیق تصاویر انجام شد. با استفاده از باندهای مرئی و مادون قرمز بیماری شناسایی شد. سپس تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸ طبقه‌بندی شدند و در آنها زنگ زرد شناسایی شد، و نهایتاً با تلفیق تصاویر این دو ماهواره نیز بیماری شناسایی شد. همچنین میزان دقت هر کدام از روش‌های ذکر شده، برای ارائه بهترین تکنیک شناسایی زنگ زرد در مناطق مشابه محاسبه و مقایسه گردید. دو سناریوی اول نشان دادند که طبقه‌بندی تصویر لندست-۸ در شروع بیماری با RMSE برابر با ۰/۸۴۵ و طبقه‌بندی تصویر سنتینل-۲ در اوج بیماری با RMSE برابر با ۰/۸۴۵ بهترین نتایج را داشته‌اند. مقایسه شاخص‌های گیاهی نشان داد که NDVI در شروع بیماری (تصویر سنتینل-۲ با RMSE برابر با ۰/۹۵۹) و اوج بیماری (تصویر لندست-۸ با RMSE برابر با ۰/۹۵۹) بهترین نتیجه را داشته‌اند. مقایسه سناریوهای اجرا شده نشان داد که تلفیق تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ برای طبقه‌بندی در دو مرحله شروع و اوج بیماری بهترین نتایج را داشته است. روش تلفیق IHS بهترین نتیجه طبقه‌بندی بیماری را در مرحله شروع با RMSE برابر با ۰/۸۰۹ داشته است، در حالی که روش تلفیق GST بهترین نتیجه را در مرحله اوج بیماری با RMSE برابر با ۰/۷۹۳ ارائه داد. نتایج این پژوهش موید قابلیت بالای تلفیق تصاویر ماهواره‌ای در بهبود نتایج طبقه‌بندی زنگ زرد می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** سنتینل-۲، لندست-۸، زنگ زرد گندم، شاخص‌های گیاهی، طبقه‌بندی

### ۱- مقدمه

نقطه‌چین در هر دو سطح برگ و به موازات رگبرگ‌ها نمایان می‌شود و گسترش این خطوط نقطه‌چین روی برگ‌ها حالت نواری شکل به موقعیت جوش‌ها می‌دهد و به همین دلیل به زنگ نواری نیز معروف شده است (Zakeri et al., 2016). با استفاده از داده‌های طیفی، روش‌های پیشرفته سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای می‌توان علائم بیماری‌های محصولات کشاورزی را پیش از آنکه بیماری گسترده شود، تشخیص داد. هر نوع بیماری که باعث ایجاد تغییرات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی کافی در گیاهان زراعی شود می‌تواند گزینه مناسبی برای تشخیص با استفاده از علم سنجش‌ازدور باشد

بیماری‌های موجود در محصولات کشاورزی سبب خسارات عمده تولیدی و اقتصادی در صنعت کشاورزی در سراسر جهان می‌شوند (Sankaran et al., 2010). گندم در برابر تعدادی از بیماری و آفات مانند زنگ زرد، بیماری سرفوزاریوم، کپک پودری، شته و... آسیب‌پذیر است که در صورت عدم کنترل صحیح آن‌ها خسارات قابل توجهی به کشاورزان وارد کرده و تهدیدکننده امنیت غذایی است (Su et al., 2019). از علائم بیماری زنگ زرد بر روی برگ‌ها به‌ویژه پرچم به‌صورت جوش‌های ریز زردرنگ تا نارنجی است که به حالت خطوط

عملکرد محصول گندم در جنوب غربی خوزستان را مطالعه کردند. نتایج حاصل نشان داد که از حدود ۴۰ روز قبل از برداشت گندم شاخص‌های NDVI و GNDVI با تخمین ۸۶/۷۳ و ۷۲/۸۳ بالاترین درصد تخمین عملکرد گندم تولید شده را داشتند. Mobasheri و Ranjbar (۲۰۱۷) در پژوهش خود مزارع آلوده به بیماری زنگ گندم را با استفاده از داده‌های سنجنده ETM+ لندست-۷ در سال زراعی ۹۲ تا ۹۳ و داده‌های آزمایشگاهی طیف برگ و درجه سلامت برگ شناسایی کردند و شاخصی به نام سلامت گندم را ایجاد کردند که نتایج نشان داد این شاخص در مراحل سبزی‌نگی گیاه عملکرد خوبی داشته و می‌تواند مناطق سالم، بیمار و مشکوک به بیماری را تشخیص دهد. Razban و همکاران (۲۰۱۸) با هدف تخمین عملکرد گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ به این نتیجه دست یافتند که سنتینل-۲ به علت دارا بودن رزولوشن مکانی بالاتر امکان نمایش دقیق‌تر شرایط مزرعه را فراهم می‌کند. Mardaneh و همکاران (۲۰۲۰) استرس گندم را با استفاده از تصاویر لندست-۸ بررسی کردند و همچنین تغییرات طیفی گیاه گندم را با هدف بررسی قابلیت سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. از بین شاخص‌های گیاهی اعمال شده شاخص NDVI بهترین شاخص در بررسی وضعیت مناطق بود و شاخص GVI با بیشترین ضریب کاپا و صحت کلی به ترتیب ۹۴ درصد و ۹۵/۳ درصد بهترین شاخص در درجه‌بندی استرس گیاه گندم بود. Moshou و همکاران (۲۰۰۴) تشخیص خودکار زنگ زرد گندم را با استفاده از اندازه‌گیری بازتاب و شبکه عصبی انجام دادند. در این مطالعه، تفاوت در بازتاب طیفی بین گیاه گندم سالم و بیمار از همان مراحل اولیه در توسعه بیماری زنگ زرد بررسی شد و نتایج نشان داد با استفاده شبکه‌های عصبی، عملکرد طبقه‌بندی از ۹۵٪ به بیش از ۹۹٪ افزایش یافت. که این نتایج چشم‌انداز توسعه یک دستگاه نوری مقرون به صرفه برای شناسایی بیماری‌ها در مراحل اولیه را نشان می‌دهد. Yang و همکاران (۲۰۰۱، ۲۰۰۷) به مطالعه بیماری زنگ قهوه‌ای در گیاه برنج با داده‌های طیفی پرداختند. در این مطالعه ابتدا طول موج‌های مختلف بررسی شدند، که طول موج ۴۳۰ نانومتر با دقت بالای ۹۵ درصد بهترین دقت را نشان داد. همچنین از میان شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص NDVI به عنوان بهترین شاخص گیاهی برای شناسایی این بیماری با دقت بالای

(Yang, 2020). نتایج مطالعه Yang (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که گیاهان بیمار و آفت‌زده بازتاب‌های طیفی متفاوتی نسبت به گیاهان سالم دارند و این موضوع از طریق سنجش از دور و بررسی رفتار طیفی گیاهان قابل تشخیص و بررسی است. با توجه به خصوصیات بازتابندگی گیاه در طول موج‌های مختلف، میزان بازتابندگی گیاهان در هر ناحیه از طول موج به شدت متأثر از ساختار درونی و هریک از مواد تشکیل دهنده گیاه می‌باشند. در واقع تأثیر بیماری بر روی بازتابندگی گیاه در طول موج‌های مختلف متفاوت است. به این صورت که در ناحیه مرئی بر اثر کاهش مقدار کلروفیل از بازتابندگی کاسته می‌شود. بیماری گیاه، شیب منحنی بازتابندگی در لبه سرخ طیف را به شدت تحت تأثیر قرار داده و در سایر نواحی طول موج از ۸۰۰ تا ۲۵۰۰ به ساختار و محتوای آب گیاه به شدت وابسته است. از جمله داده‌های مورد استفاده در مطالعه بیماری‌های گیاهان تصاویر ماهواره‌ای پهن باند، داده‌های ابر طیفی و داده‌های طیف‌سنجی می‌باشند. شاخص‌های طیفی استخراج شده از نواحی قرمز و مادون قرمز نزدیک دارای توانایی بالایی در استخراج و تعیین میزان بیماری در مدل برگ و تاج پوشش گیاهان هستند (Ashourlu et al., 2014).

Mirzapour و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه خود میزان خسارت زنگ زرد در مزارع گندم رقم بهار در شهرستان الشتر را ارزیابی و بررسی کردند. در سال زراعی ۹۱-۹۲ این بیماری به علت مساعد بودن شرایط آب و هوایی در شهرستان الشتر به صورت اپیدمی درآمد که نتایج حاصل از ارزیابی خسارت در مزارع مختلف گندم بهاره کاهش ۴۴/۴۰٪ عملکرد را نشان داد. Ashourlu و همکاران (۲۰۱۴) بیماری زنگ زرد گندم را در استان کرمانشاه مطالعه کردند و همچنین مقاومت ژنوتیپ‌های مختلف نسبت به شرایط گلخانه و مزرعه و گسترش بیماری زنگ گندم با استفاده از داده‌های اسپکترومتری را ارزیابی کردند. Ashourlu و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی شاخص‌های طیفی به منظور شناسایی بیماری‌های زنگ زرد و قهوه‌ای تاج پوشش پرداختند. در این تحقیق اثر بیماری‌های زنگ زرد و قهوه‌ای گندم در بازتابندگی برگ با استفاده از شاخص‌های طیفی در مدل تاج پوشش بررسی شد، و نتایج نشان داد، با افزایش نسبت سطح بیمار برگ، مقادیر عددی شاخص‌ها تغییر می‌کند. Mtinfar و Zahirniya (۲۰۱۶) شناسایی و طبقه‌بندی انواع پوشش گیاهی در مزارع تحت کشت آبی گندم و پیش‌بینی

برای پایش بیماری به دست آوردند. شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شده از تصاویر ابرطیفی مبتنی بر پهپاد و ترکیب آنها برای ایجاد مدل‌های پایش بیماری مبتنی بر رگرسیون حداقل مربعات در دوره‌های اوج بیماری استفاده شد که نتایج آنها مرجع خوبی برای پایش دقیق بیماری با استفاده از تصاویر ابرطیفی پهپاد می‌باشد. Jing و همکاران (۲۰۲۲) برای تشخیص زنگ زرد گندم از یک مدل نظارت بر انتخاب ویژگی با ترکیب الگوریتم‌های mRMR و XGBoost استفاده کردند. نتایج نشان داد که XGBoost برای نظارت از راه دور زنگ زرد مناسب‌تر است. نتایج اعتبارسنجی داده‌های میدانی همچنین تأیید می‌کند که الگوریتم mRMR-XGBoost قابلیت نظارت و مقیاس‌پذیری عالی دارد. Singh و همکاران (۲۰۲۳) شناسایی زنگ زرد را در تصاویر سنتینل-۲ با استفاده از مدل طبقه‌بندی شبکه عصبی مبتنی بر یادگیری عمیق انجام دادند. نتایج این مدل برای طبقه‌بندی زنگ زرد گندم به دلیل اختلاف زمانی سنتینل-۲ در دو منطقه متفاوت بود و امکان طبقه‌بندی داده‌های یک منطقه با استفاده از مدل آموزش دیده منطقه دیگر فراهم نبود. Singh و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای دیگر اثر زنگ زرد را بر پارامترهای بیوفیزیکی ۲۴ رقم گندم با توسعه مدل‌های یادگیری ماشین یافته ارزیابی کردند. نتایج عملکرد ادغام شاخص‌های حرارتی و RGB با پارامترهای بیوفیزیکی گیاه نشان داد که با افزایش سطح زنگ، دمای تاج پوشش نیز افزایش می‌یابد و کاهش معنی‌داری در تعرق، شاخص سطح برگ، محتوای آب برگ و تفاوت شاخص گیاهی نرمال شده اتفاق افتاده است.

از نظر درجه حرارت و رطوبت، اواخر دی‌ماه تا بهمن‌ماه برای ظهور بیماری زنگ گندم و توسعه آن مناسب می‌باشد. با توجه موقعیت حساس اقلیمی و کشاورزی استان خوزستان، اهداف این پژوهش، تشخیص و پهنه‌بندی گسترش زنگ زرد گیاه گندم در منطقه مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ در بازه زمانی موردنظر، شناسایی مناطق در معرض آسیب و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در محدوده مورد مطالعه، مقایسه عملکرد سنجنده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ در تشخیص و پهنه‌بندی بیماری زنگ زرد می‌باشند. نوآوری این پژوهش، شناسایی و طبقه‌بندی شدت بیماری زنگ زرد گندم با استفاده از تصاویر اولیه لندست-۸ و سنتینل-۲، شاخص‌های

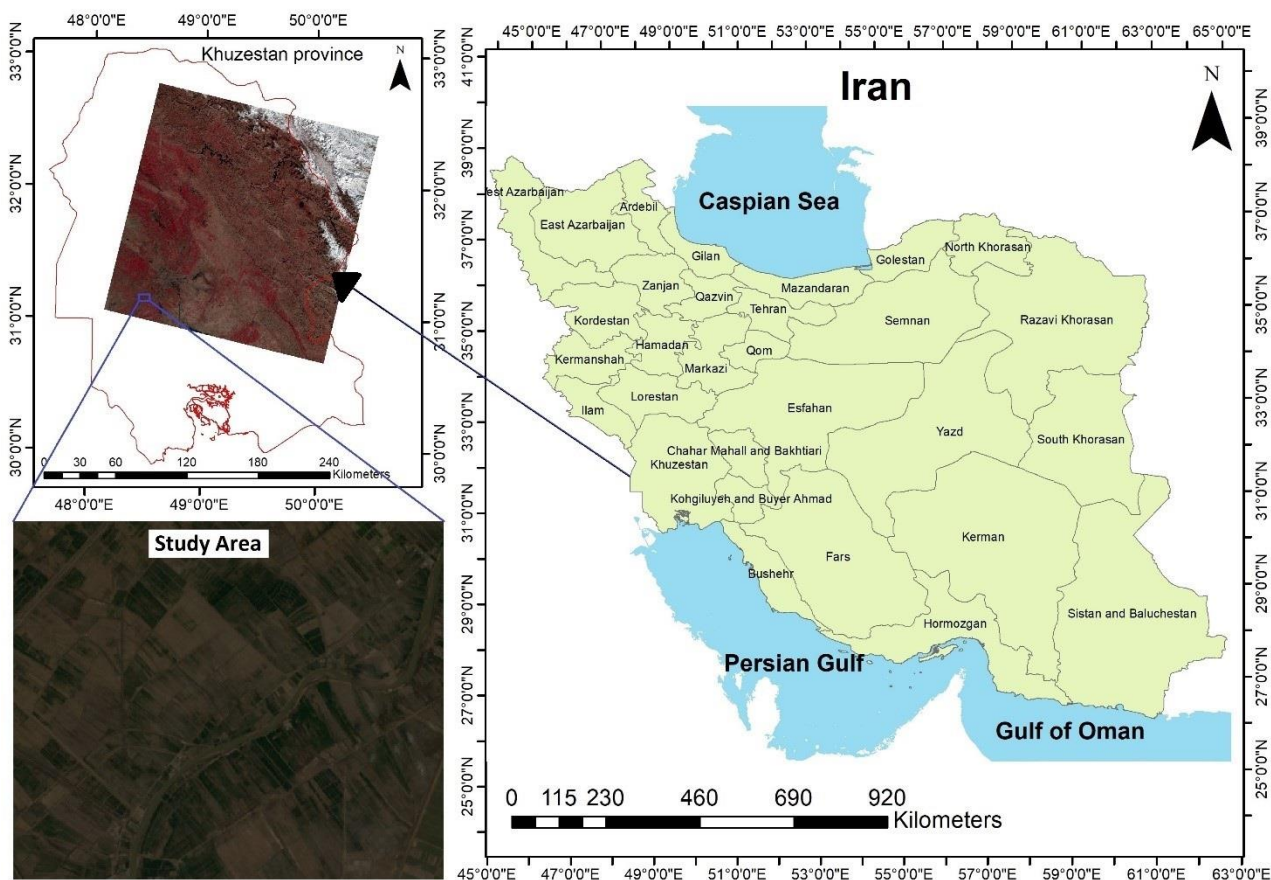
۸۰ درصد معرفی شد. Zhang و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به بررسی بیماری سفیدک گندم با استفاده از داده‌های اسپکترورادیومتری پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که از شاخص‌های مختلف گیاهی و رگرسیون حداقل مربعات برای تخمین بیماری می‌توان استفاده کرد که دقت حاصل از تخمین بیماری در این تحقیق برابر با ۹۰ درصد گزارش شد. Skakun و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ به تهیه نقشه پهنه‌بندی و ارزیابی عملکرد گندم برای مقیاس منطقه‌ای در اوکراین پرداختند. طی این مطالعه مشخص شد که ادغام تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ تهیه نقشه پهنه‌بندی و ارزیابی عملکرد محصولات را بهبود می‌بخشد و همچنین استفاده تلفیقی از دو تصویر خط‌های تخمین عملکرد گندم زمستانه را به میزان ۱/۸ کاهش می‌دهد. Chen و همکاران (۲۰۱۸) نقشه‌برداری زنگ گندم را با تصاویر دارای قدرت تفکیک مکانی بالا انجام دادند. نتایج طبقه‌بندی آنها، دقت کلی بالاتر از ۹۰٪ را نشان داد که استفاده تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی بالا در نقشه‌برداری زنگ گندم را توجیه می‌کند. Su و همکاران (۲۰۱۹) پایش مکانی - زمانی زنگ گندم را با استفاده از تصاویر چند طیفی پهپاد انجام دادند. در این مطالعه گندم زمستانی که دچار بیماری زنگ زرد شده بود را در کل فصل رشد با استفاده از تعدادی از شاخص‌های طیفی حساس و قابلیت تمایز آن‌ها، تقسیم‌بندی پیکسل‌های گندم و شدت زنگ زرد را ارزیابی کردند. سپس تغییرات مکانی - زمانی و بعد شاخص‌های ارزیابی تحلیل شدند و یک آزمایش صحت سنجی در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۸ در این مورد انجام گرفت و از ۵ باند red edge برای گرفتن تصاویر هوایی در ارتفاع حدود ۲۰ متری با وضوح ۱-۱٫۵ سانتی‌متر بر پیکسل از سطح زمین استفاده شد که نشان داد این مطالعه، برای نظارت مکانی - زمانی زنگ زرد در مقیاس‌های مختلف مناسب می‌باشد. Bebronne و همکاران (۲۰۲۰) در حوزه لکه‌های *septoria tritici*، زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای گندم زمستانه را بر اساس بازتاب ویژگی‌های بافتی تصاویر چند طیفی را بررسی و ارزیابی کردند. این پژوهش با هدف ارزیابی شدت زنگ زرد، زنگ قهوه‌ای و لکه *septoria tritici* بر اساس تصاویر به‌دست‌آمده از یک دوربین چند طیفی بر روی یک سکوی زمینی انجام شد. Guo و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه خود از سنجش از دور ابرطیفی مبتنی بر پهپاد نزدیک به سطح در مقیاس برگ استفاده کردند و نتایج خوبی

شهرستان‌های کارون، شادگان و ماهشهر و از سمت شرق به شهرستان‌های رامشیر، رامهرمز و هفتگل محدود می‌شود. زمین‌های کشاورزی روستای مسکر با مساحتی معادل ۱۴۸ کیلومتر مربع که در جنوب غربی شهرستان اهواز قرار دارد به عنوان منطقه مطالعاتی در این پژوهش انتخاب شد (شکل ۱). لازم به ذکر است که این روستا به لحاظ تقسیمات از توابع شهرستان اهواز، بخش مرکزی، دهستان اسماعیلیه به شمار می‌رود که از لحاظ موقعیت نسبی در فاصله ۲۳ کیلومتری از شهر اهواز و در جنوب آن قرار دارد.

پوشش گیاهی و تصاویر حاصل از تلفیق تصاویر دو ماهواره مذکور، و مقایسه نتایج و میزان کارایی این سه سناریو می‌باشد.

## ۲- منطقه مطالعاتی

شهرستان اهواز در استان خوزستان با مساحتی معادل ۸۲۱۲ کیلومتر مربع با طول و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲ دقیقه طول شرقی قرار دارد. شهرستان اهواز از شمال به شهرستان‌های شوش و شوشتر و باوی، از غرب به شهرستان دشت آزادگان، از سمت جنوب به



شکل ۱- منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر.  
Fig. 1. Study area of the present research.

نمونه‌برداری (سالم و بیمار) با مراجعه به مرکز خدمات کشاورزی روستای ام الطمیر (سفحه) از طریق مصاحبه با کارشناس کشاورزی محدوده روستای مکرر و توابع، گردآوری شدند. لازم به ذکر است که طبق تحقیقات حاصل و جمع‌آوری اطلاعات از جهاد کشاورزی شهرستان اهواز و مرکز خدمات روستای

## ۳- مواد و روش‌ها

### ۳-۱- داده‌های مورد استفاده

داده‌هایی که در پژوهش حاضر استفاده شدند عبارتند از تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸ با گذر و ردیف ۱۶۵ و ۳۸، همچنین داده‌های میدانی مربوط به مناطق بیمار و سالم. داده‌های میدانی مورد استفاده در این پژوهش برای دستیابی دقیق نقاط

تصاویر تهیه شده در این پژوهش مربوط به زمان کاشت تا برداشت می‌باشند. نکته مهم این بود که جهت تشخیص و بررسی مزارع آلوده به بیماری می‌بایست از تصاویری که دارای پوشش گیاهی هستند و به مرحله خشکی نرسیده‌اند استفاده کرد. در پژوهش حاضر برای بازه زمانی رخداد بیماری زنگ زرد گندم در منطقه مطالعاتی، ابتدا تصاویر متعدد در تاریخ‌های مختلف از سایت <http://earthexplorer.usgs.gov> دانلود شد و طی بررسی‌های بصری تصاویر، نهایتاً ۳ تصویر نهایی از ماهواره لندست-۸ با تاریخ و مشخصات زیر برای این پژوهش انتخاب شدند (جدول ۳).

ام‌الطیر (صفحه) تاریخ بروز اولین علائم اپیدمی زنگ زرد گندم این منطقه تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۲۴ است.

تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش شامل تصاویر لندست-۸ (جدول ۱) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و سنتینل-۲ (جدول ۲) شامل ۴ باند طیفی (۲،۳،۴،۸) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر است. لازم به ذکر است که در طی مراحل آماده‌سازی و تجزیه تحلیل داده‌های پژوهش حاضر از نرم افزارهای Google Earth، ARC GIS 10.5، SNAP، ENVI 4.8، Office 2013 و Excel 2013 استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره لندست-۸ (Omari et al., 2019).

Table 1. Properties of Landsat-8 satellite images (Omari et. al., 2019).

Spatial resolution	Wavelength	Spectral band
30 m	0.43-0.45	Band 1 - Coastal aerosol
30 m	0.45-0.51	Band 2 - Blue
30 m	0.53-0.59	Band 3 - Green
30 m	0.64-0.67	Band 4 - Red
30 m	0.85-0.88	Band 5 - Near Infrared (NIR)
30 m	1.57-1.65	Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1
30 m	2.11-2.29	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2
15 m	0.50-0.68	Band 8 - Panchromatic
30 m	1.36-1.38	Band 9 - Cirrus
100 m	10.60-11.19	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1
100 m	11.50-12.51	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2

جدول ۲- مشخصات تصاویر ماهواره سنتینل-۲ (Polat et al., 2022).

Table 2. Properties of Sentinel-2 satellite images (Polat et al., 2022).

Band	Central Wavelength (nm)	Spatial resolution	Description of goal
1	443	60	Ultra Blue (Coastal and Aerosol)
2	490	10	Blue
3	560	10	Green
4	665	10	Red
5	705	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
6	740	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
7	783	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
8	842	10	Visible and Near Infrared (VNIR)
8a	865	20	Visible and Near Infrared (VNIR)
9	945	60	Short Wave Infrared (SWIR)
10	1375	60	Short Wave Infrared (SWIR)
11	160	20	Short Wave Infrared (SWIR)
12	2190	20	Short Wave Infrared (SWIR)



جدول ۳- تاریخ تصاویر ماهواره لندست-۸ مورد استفاده.

Table 3. Date of the used Landsat-8 satellite images.

Wheat status	Image date
Health period	06/02/2020
The onset of the disease	09/03/2020
The peak of the disease outbreak	25/03/2020

می‌شوند. بر روی تصاویر آماده شده، طبقه‌بندی جهت تفکیک زنگ زرد گندم انجام می‌شود.

شناسایی زنگ زرد گندم با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری نیز انجام شد. شاخص‌های سنجش از دوری معرفی شده در سه تاریخ مربوط به سلامت، شروع و اوج بیماری زنگ زرد گندم محاسبه شدند و در مرحله بعد، طبقه‌بندی زنگ زرد گندم در سه حالت مبتنی بر تصویر لندست-۸، مبتنی بر تصویر سنتینل-۲ و مبتنی بر تلفیق این دو تصویر انجام شد. در نهایت ارزیابی دقت خروجی‌ها و صحت سنجی انجام گردید. هدف از انجام مراحل مذکور تشخیص و پهنه‌بندی بیماری زنگ زرد گیاه گندم با استفاده از علم سنجش از راه دور و GIS است. شناسایی مؤثرترین شاخص در زمینه مطالعه این بیماری و همچنین شناسایی تصویر دارای بهترین نتیجه طبقه‌بندی این بیماری، نیز از دیگر اهداف این تحقیق می‌باشند.

### ۳-۲- شاخص‌های گیاهی

شاخص‌های گیاهی برای ارزیابی و بررسی پوشش گیاهی در مشاهدات ماهواره‌ای چند طیفی طراحی شده‌اند (Taghizadeh, 2017). در این پژوهش از سه شاخص NDVI، GNDVI و MSI با فرمول‌های زیر استفاده شد (جدول ۵).

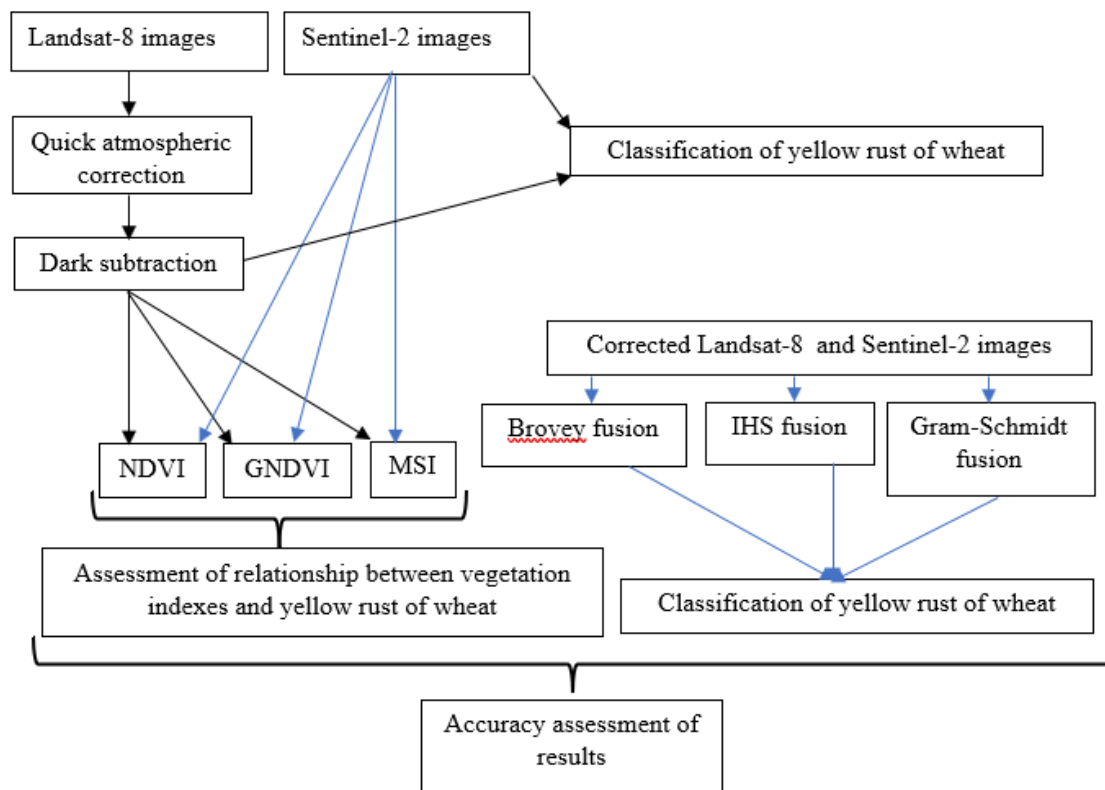
مراحل انجام این پژوهش طبق فلوچارت ارائه شده در شکل ۲ می‌باشد.

همچنین برای ماهواره سنتینل A۲ هم مانند لندست-۸ تعدادی تصویر در بازه زمانی مدنظر از سایت <http://scihub.copernicus.eu> دانلود و نهایتاً ۳ تصویر با مشخصات زیر مورد بررسی نهایی قرار گرفتند (جدول ۴). برای پیاده‌سازی روش این تحقیق، ابتدا آماده‌سازی تصاویر لندست-۸ انجام گرفت. Layer stacking زمانی که چند باند تکی با ابعاد پیکسل یکسان از یک منطقه وجود داشته باشد برای سهولت در اعمال بقیه مراحل پردازش‌ها و تحلیل‌های مدنظر یک تصویر چند بانده از تمامی باندهای مدنظر ایجاد می‌شود. Resize Data با استفاده از محدوده مدنظر نسبت به کل تصویر Resize مکانی و طیفی گرفته شد. Quick Atmospheric Correction برای تصحیح اتمسفری تصاویر استفاده شد. همچنین برای رفع نویزهای تیره در تصاویر الگوریتم Darksubtract استفاده می‌شود. بعد از انجام تمامی موارد ذکر شده، روی خروجی‌های موردنظر شاخص‌های گیاهی و طبقه‌بندی انجام شد. برای اعمال بهتر و دقیق‌تر پیش‌پردازش‌های ماهواره سنتینل-۲ ابتدا تصاویر دانلود شده را در نرم‌افزار SNAP را باید بررسی کرد و خروجی هر باند به صورت مستقل گرفته شود. برای پژوهش حاضر از چهار باند (۲،۳،۴،۸) سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری استفاده شد. از آنجایی که تصاویر سنتینل نیازی به تصحیحات اتمسفری و هندسی نداشته نهایتاً نرمال‌سازی روی آن‌ها صورت می‌گیرد و خروجی‌ها برای پیاده‌سازی شاخص‌های گیاهی و طبقه‌بندی آماده

جدول ۴- تاریخ تصاویر سنتینل-۲ مورد استفاده.

Table 4. Date of the used Sentinel-2 satellite images.

Wheat status	Image date
Health period	31/01/2020
The onset of the disease	01/03/2020
The peak of the disease outbreak	31/03/2020



شکل ۲- فلوچارت متدولوژی پژوهش حاضر.

Fig. 2. Methodology flowchart of the present research.

جدول ۵- شاخص های گیاهی مورد استفاده در این پژوهش.

Table 5. The vegetation indexes used in present study.

Formula	The used vegetation indexes
$NDVI = NIR - RED / NIR + RED$	NDVI
$GNDVI = NIR - GREEN / NIR + GREEN$	GNDVI
$MSI = MIR / NIR$	MSI

بیشتری به غلظت های پایین کلروفیل دارد ( Razban, 2018).

شاخص استرس رطوبت (MSI) به افزایش میزان آب برگ حساس است. هنگامی که آب برگ ها افزایش می یابد، توالی جذب در حوالی ۱۵۹۹ نانومتر نیز افزایش پیدا می کند. جذب در ۸۱۹ نانومتر به تغییرات میزان آب حساس نبوده و بنابراین به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود. کاربردهای این شاخص در مطالعه تنش گیاهی، پیش بینی تولید محصول، تحلیل خطرات آتش سوزی و مطالعات اکوسیستم خلاصه می شود. مقادیر بالای MSI نشان دهنده تنش بیشتر آبی (میزان آب کمتر) هست. مقدار این شاخص از ۰ تا بیشتر از ۳ هست. بازهی معمولی

مهمترین مزیت شاخص NDVI نمایش تغییرات فصلی و میان سالی در رشد پوشش گیاهی می باشد. همچنین استفاده از رابطه نسبت گیری در آن باعث می شود تا بسیاری از نویزها از جمله اختلاف در تابش خورشیدی، سایه ابرها، اثرات توپوگرافی و اتمسفر در تصاویر کاسته شود. شاخص GNDVI نسخه اصلاح شده NDVI است که باند سبز را در معادله NDVI جایگزین باند قرمز می کند. این شاخص هنگامی که شاخص سطح برگ به طور میانگین بالاست به غلظت کلروفیل در پوشش گیاهی حساس است. بنابراین GNDVI بر مشکلات ناشی از اشباع غلبه می کند که NDVI برای برخی انواع پوشش گیاهی در مراحل رشد دیرتر نشان می دهد، زیرا حساسیت

تبدیل معکوس برای تولید تصویر نهایی تلفیق شده بر اساس مراحل زیر اعمال خواهد شد (رابطه ۵، ۶، ۷ و ۸) (Pohl and Van Genderen, 2016).

$$a_1 = b_1 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$a_2 = b_2 - \text{Proj}_{a_1}(b_2) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$a_3 = b_3 - \text{Proj}_{a_1}(b_3) - \text{Proj}_{a_2}(b_3) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$a_m = b_m - \sum_{j=1}^{m-1} \text{Proj}_{a_j}(b_m) \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن  $a$  و  $b$  بردارهای متعامد و  $m$  تعداد باندهای چند طیفی است. سرانجام، این بردارها بر اساس  $c_m = \frac{a_m}{\|a_m\|}$  نرمال می‌شوند.

روش تلفیق تبدیل براووی (BT) تصاویر چند طیفی را نرمال می‌کند و آن‌ها را در باند پانکروماتیک ضرب می‌کند. این روش سهم طیفی نسبی هر پیکسل را حفظ کرده و روشنایی کلی تصویر پانکروماتیک مورد استفاده در فرایند تلفیق را جایگزین می‌کند. در این روش، بهبود کنتراست به‌ویژه در دو لبه هیستوگرام انجام می‌شود (Rangzan et al., 2019). روش BT بر اساس معادله زیر اعمال می‌شود (رابطه ۹).

$$BT_i = \frac{MS_i - PAN}{\sum_i MS_i} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که PAN یک تصویر پانکروماتیک است و  $MS_i$  یک تصویر چند طیفی است. معادله زیر مدل اصلاح شده BT را نشان می‌دهد (رابطه ۱۰) (Pohl and Van Genderen, 2016).

(رابطه ۱۰)

$$BT_{iNIR} = \frac{PAN - \omega_{NIR} * NIR}{\omega_{b_1} MS_1 + \omega_{b_2} MS_2 + \omega_{b_3} MS_3}$$

۳-۴- روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)

زنگ زرد گندم در تصاویر اولیه لندست-۸ و سنتیل-۲، شاخص های گیاهی NDVI، GNDVI، و MSI و

برای پوشش گیاهی از ۰/۴ تا ۲ هست (Mardaneh et al., 2020).

### ۳-۳- تلفیق تصاویر ماهواره‌ای

بیماری زنگ زرد گندم با استفاده از روش‌های تلفیق تصاویر نیز شناسایی و تفکیک شد. هدف از تلفیق داده‌های سنجنده‌های مختلف، ترکیب اطلاعات آنها برای به دست آوردن تصویر یا داده‌ای است که نسبت به تصاویر اولیه دارای اطلاعات مفید بیشتری باشد (Karimi, 2016). در این پژوهش از روش‌های مبتنی بر پیکسل برای تلفیق استفاده شد.

روش تلفیق مبتنی بر پیکسل شدت رنگ اشباع (IHS) که HSV (رنگ- اشباع- مقدار) نیز نامیده می‌شود (رابطه ۱)، می‌تواند به‌طور مؤثر اطلاعات مکانی (I) (رابطه ۲) و طیفی (S، H) (رابطه ۳ و ۴) یک تصویر RGB را با استفاده از مدل ریاضی به شرح زیر تفکیک کند (Pohl and Van Genderen, 2016).

$$\begin{pmatrix} I \\ V1 \\ V2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$I = \frac{(R+G+B)}{3} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{V2}{V1}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که I شدت، V1 و V2 متغیرهای واسطه‌ای هستند که در فرآیند تبدیل مورد نیاز هستند و H و S به ترتیب رنگ و اشباع را نشان می‌دهند.

اما تبدیل گرام- اشمیدت (GST) یک روش بارزسازی و تلفیق برای تصاویر چند طیفی است. این الگوریتم به دلیل توانایی در مقایسه باندهای ورودی بر اساس مقادیر کوواریانس، می‌تواند به عنوان یک روش آماری در نظر گرفته شود. این روش تلفیق تبدیل تصویر چند طیفی و باند پانکروماتیک مدل‌سازی شده را از طریق الگوریتم GST اعمال می‌نماید. باند پانکروماتیک با هیستوگرام تنظیم شده، جایگزین اولین مؤلفه GST می‌شود. سپس،

بیماری داشته‌اند. به عنوان مثال Ashourlu و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهش خود شاخص‌های طیفی را برای شناسایی بیماری‌های زنگ زرد و قهوه‌ای بررسی کردند و نتایج ارتباط خوبی بین نسبت سطح بیمار برگ و مقادیر عددی این شاخص‌ها نشان داد. لذا ابتدا محاسبه و تفسیر شاخص‌های فوق در سه تاریخ سلامت گندم، شروع و اوج بیماری در منطقه مطالعاتی صورت گرفت تا مؤثرترین شاخص در زمینه مطالعه بیماری زنگ زرد گندم در منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر شناسایی شود. در مرحله بعد پهنه‌بندی و طبقه‌بندی این بیماری در زمان شروع و اوج بیماری بر پایه تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ و همچنین بر اساس تلفیق این تصاویر انجام شد تا فرآیند گسترش بیماری مطالعه شود و همچنین تصویری که بهترین نتیجه را در این خصوص دارد نیز شناسایی گردد. ابتدا محاسبه شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه و تولید رستر این شاخص‌ها صورت گرفت و سپس تفسیر بصری و آماری نقشه‌های حاصله انجام شد. در مرحله بعد طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم در دو دوره شروع و اوج بیماری صورت گرفت و در نهایت تفسیر بصری و آماری این نقشه‌ها انجام شد.

ابتدا محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI برای تصاویر لندست-۸ در سه تاریخ ۲۰۲۰/۰۲/۰۶، ۲۰۲۰/۰۳/۰۹ و ۲۰۲۰/۰۳/۲۵ که مربوط به سه دوره سلامت، ابتدای دوره بیماری زنگ گندم و اوج بیماری می‌باشند انجام گرفت (شکل ۳).

طبق نتایج شکل ۳، در منطقه محل شیوع بیماری (که طبق نظر کارشناسان، دایره‌های زردرنگ در شکل ۳ می‌باشد)، وسعت پوشش گیاهی سالم که دارای بیشترین مقدار شاخص NDVI است، با شروع بیماری و به‌ویژه اوج گرفتن بیماری، کاهش زیادی در مقایسه با دوره بدون بیماری داشته است. این نتایج تطابق خوب نقاط شیوع بیماری را با مقادیر شاخص NDVI نشان می‌دهد. با آنالیز نتایج این شکل، رابطه معکوسی بین وسعت کلاس دارای مقادیر بالای شاخص NDVI و زمان اوج گرفتن بیماری دیده می‌شود.

همچنین در تصاویر حاصل از تلفیق تصاویر این دو ماهواره با روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) طبقه‌بندی شدند. SVM با توجه به اینکه پایه ریاضی محض دارد به نظر می‌رسد در کاربردهای مختلف دنیای واقعی با دقت بسیار خوبی در داده‌کاوی و طبقه‌بندی تصویر عمل می‌کند. این الگوریتم یک رویکرد یادگیری نظارت شده است که در زمینه رگرسیون و طبقه‌بندی استفاده می‌شود (Chandra and Bedi, 2021). SVM طبقه‌بندی‌کننده خطی است که به یک نمونه آزمایشی یک کلاس از برجسب‌های ممکن را اختصاص می‌دهند. نمونه‌ای از داده‌ای که باید در طبقه‌بندی برجسب‌گذاری شود، معمولاً پیکسل منفرد حاصل از تصویر چند طیفی یا ابرطیفی است. چنین پیکسلی به عنوان یک بردار الگو نشان داده می‌شود. SVM فرض می‌کند که داده‌های ویژگی چند طیفی به صورت خطی در فضای ورودی قابل تفکیک هستند. تنظیماتی در طبقه‌بندی‌کننده SVM انجام می‌شود تا به عنوان یک طبقه‌بندی‌کننده چند کلاسه، عمل کند (Giorgos et al., 2011).

### ۳-۵- ارزیابی آماری و صحت سنجی نتایج

به منظور تفسیر دقیق‌تر و صحت سنجی نقشه‌های NDVI، GNDVI، MSI و صحت سنجی نقشه‌های طبقه‌بندی شروع و اوج بیماری زنگ زرد گندم در حالت استفاده دو نوع تصویر اپتیکی ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲، از دو پارامتر آماری RMSE (رابطه ۱۱) و MAE (رابطه ۱۲) استفاده شد (معادلات ۱۱ و ۱۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(X_p - X_o)^2}{N}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$MAE = \frac{\sum |X_o - X_p|}{N} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

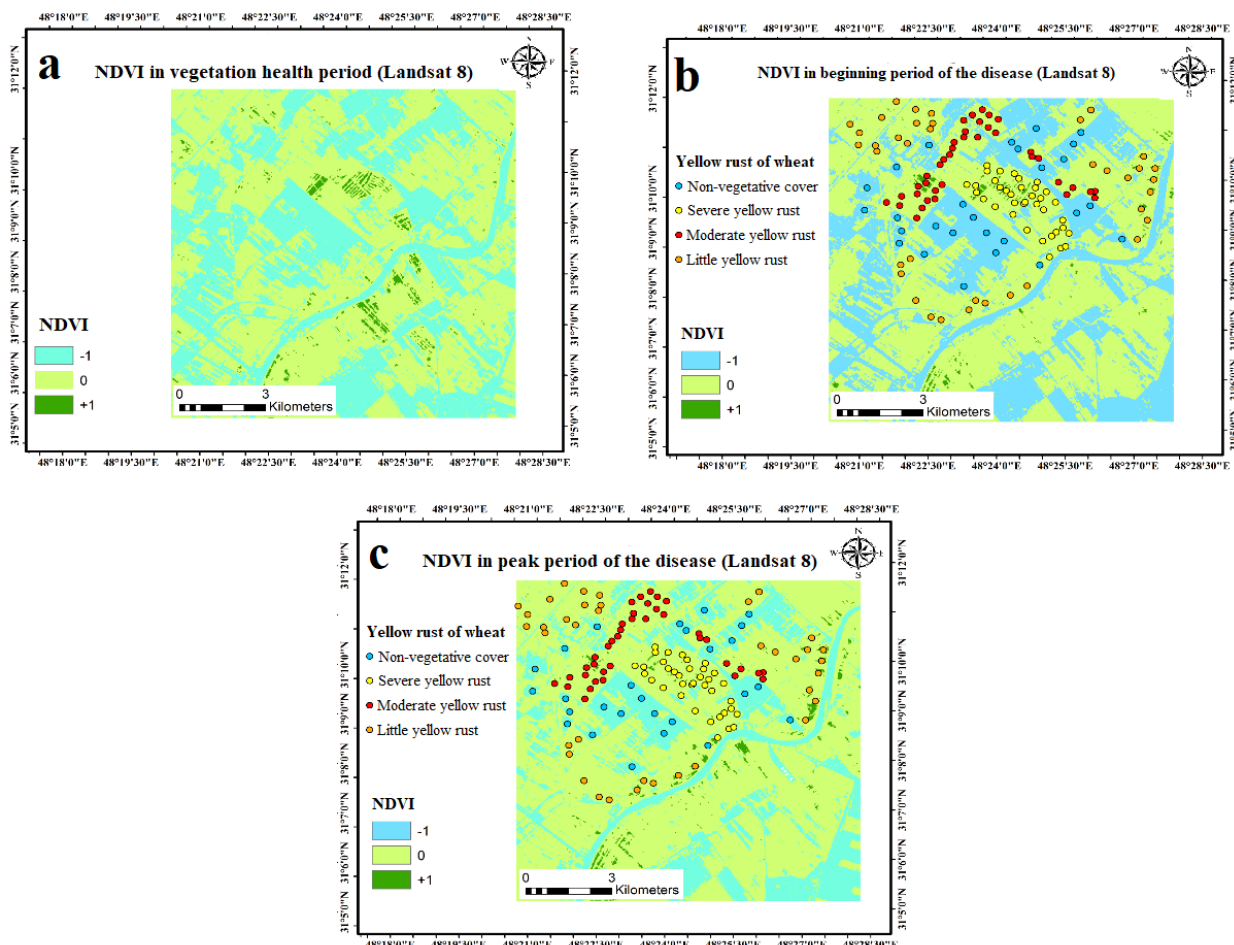
### ۴- بحث و نتایج

در این پژوهش از دو حالت کلی مبتنی بر شاخص‌های گیاهی و مبتنی بر طبقه‌بندی تصویر به منظور پهنه‌بندی و مطالعه بیماری زنگ زرد گندم استفاده شد. طبق تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان سه شاخص NDVI، GNDVI و MSI نتایج خوبی را در مطالعه این

دوره بدون بیماری داشته است. همانند شاخص NDVI، تطابق خوب نقاط تمرکز بیماری با نقشه‌های شاخص GNDVI قابل مشاهده است. در این شاخص نیز رابطه معکوسی بین وسعت کلاس دارای مقادیر بالای شاخص GNDVI با اوج گرفتن بیماری دیده می‌شود. در ادامه نیز شاخص پوشش گیاهی MSI برای سه دوره سلامت، ابتدای دوره بیماری زنگ گندم و اوج بیماری محاسبه شد (شکل ۵).

همچنین محاسبه شاخص پوشش گیاهی GNDVI برای سه دوره سلامت، ابتدای دوره بیماری زنگ گندم و اوج بیماری انجام گرفت (شکل ۴).

طبق نتایج بدست آمده، در این شاخص نیز در منطقه‌ای که محل شیوع بیماری است، وسعت پوشش گیاهی سالم (بیشترین مقادیر شاخص GNDVI)، با شروع و اوج گرفتن بیماری کاهش زیادی در مقایسه با

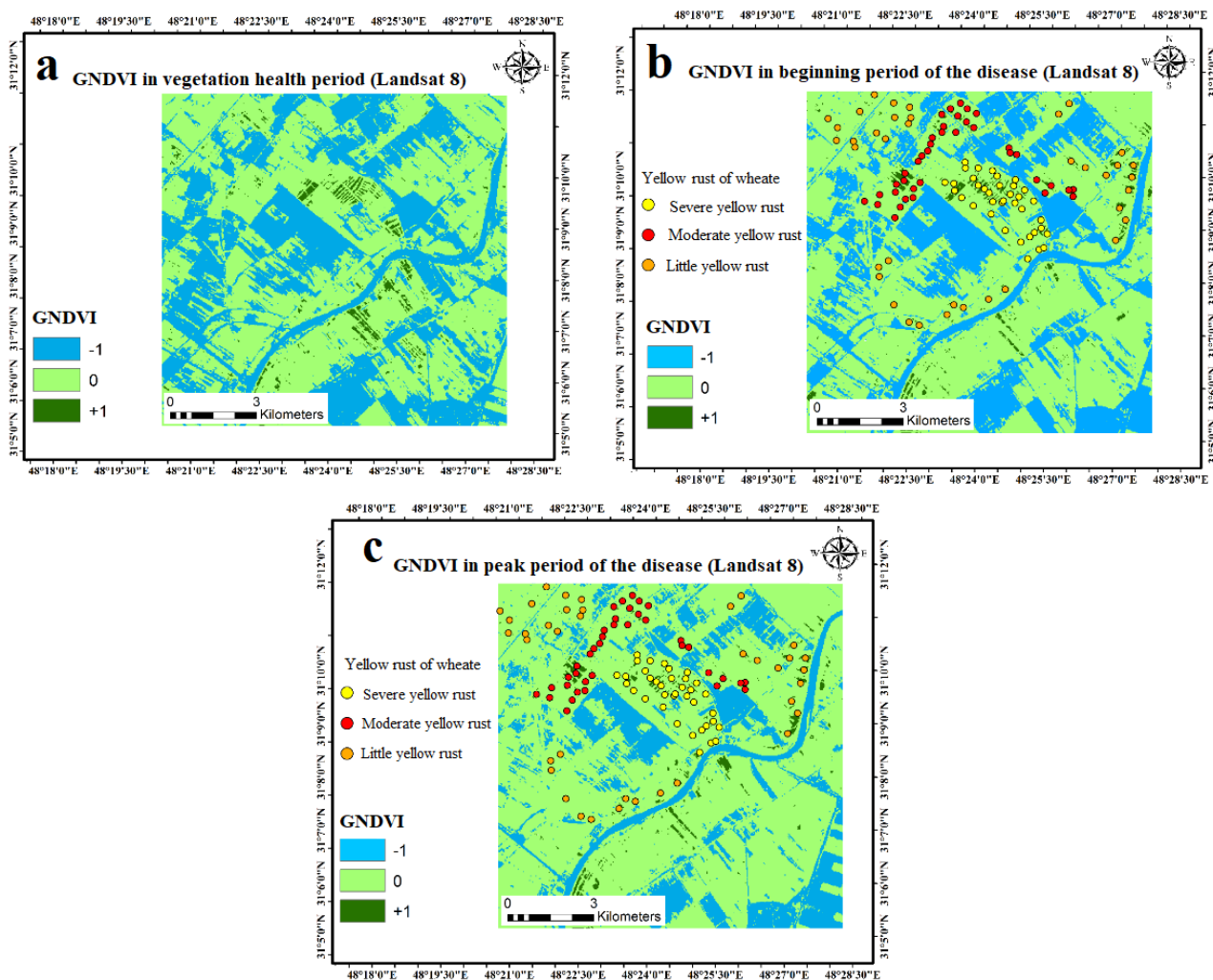


شکل ۳- NDVI دوره‌های (a) سلامت گیاه (۱۷ بهمن ۱۳۹۸)، (b) شروع (۱۹ اسفند ۱۳۹۸) و (c) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۶ فروردین ۱۳۹۹) (تصاویر لندست-۸).

Fig. 3. NDVI index for a) vegetation health period (06/02/2020), b) onset (09/03/2020) and c) peak of wheat yellow rust disease (25/03/2020) (Landsat-8 images).

NDVI، GNDVI و MSI به منظور تفسیر دقیق‌تر و صحت سنجی نقشه‌های فوق بر اساس دو پارامتر آماری RMSE و MAE انجام گرفت (جدول ۶).

با توجه به تفسیر بصری و آماری شکل فوق، مساحت کلی قسمت‌های دارای مقادیر بالاتر از ۰/۴ با اوج گرفتن بیماری در مقایسه با زمان سلامت گندم کاهش قابل توجهی یافته است. اما صحت سنجی و تفسیر آماری شاخص‌های پوشش گیاهی



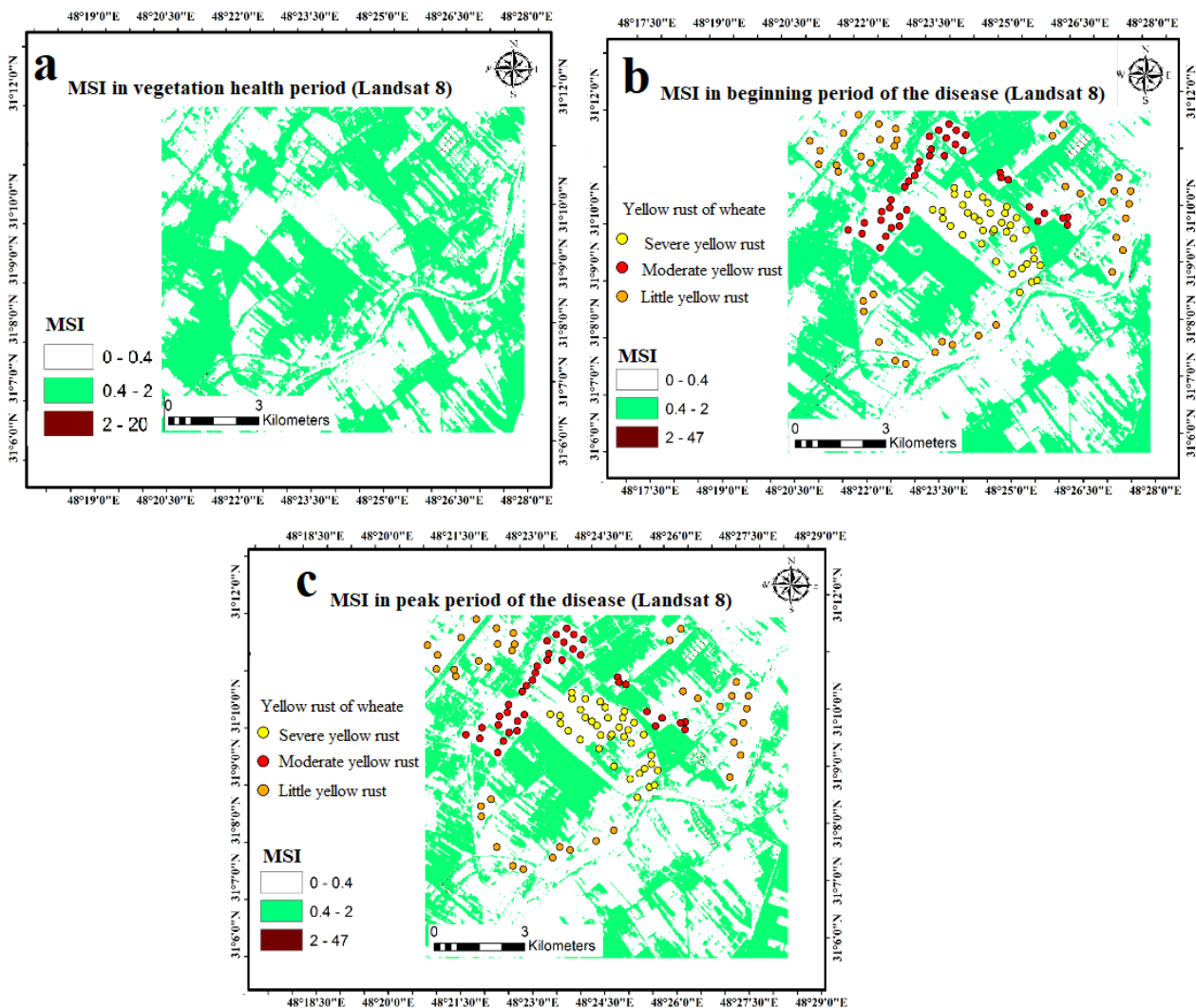
شکل ۴- شاخص GNDVI دوره‌های (a) سلامت گیاه (۱۷ بهمن ۱۳۹۸)، (b) شروع (۱۹ اسفند ۱۳۹۸) و (c) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۶ فروردین ۱۳۹۹) (تصاویر لندست-۸).

Fig. 4. GNDVI index for a) vegetation health period (06/02/2020), b) onset (09/03/2020) and c) peak of wheat yellow rust disease (25/03/2020) (Landsat-8 images).

جدول ۶- صحت سنجی آماری شاخص‌های گیاهی بدست آمده از تصاویر لندست-۸.

Table 6. Statistical accuracy assessment of vegetation indexes achieved from Landsat-8 images.

MSI		GNDVI		NDVI		
Peak of the disease	Onset of the disease	Peak of the disease	Onset of the disease	Peak of the disease	Onset of the disease	
0.986	1	0.944	0.943	0.959	0.958	RMSE
0.973	1	0.892	0.890	0.919	0.918	MAE



شکل ۵- شاخص MSI دوره‌های (a) سلامت گیاه (۱۷ بهمن ۱۳۹۸)، (b) شروع (۱۹ اسفند ۱۳۹۸) و (c) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۶ فروردین ۱۳۹۹) (تصاویر لندست-۸).

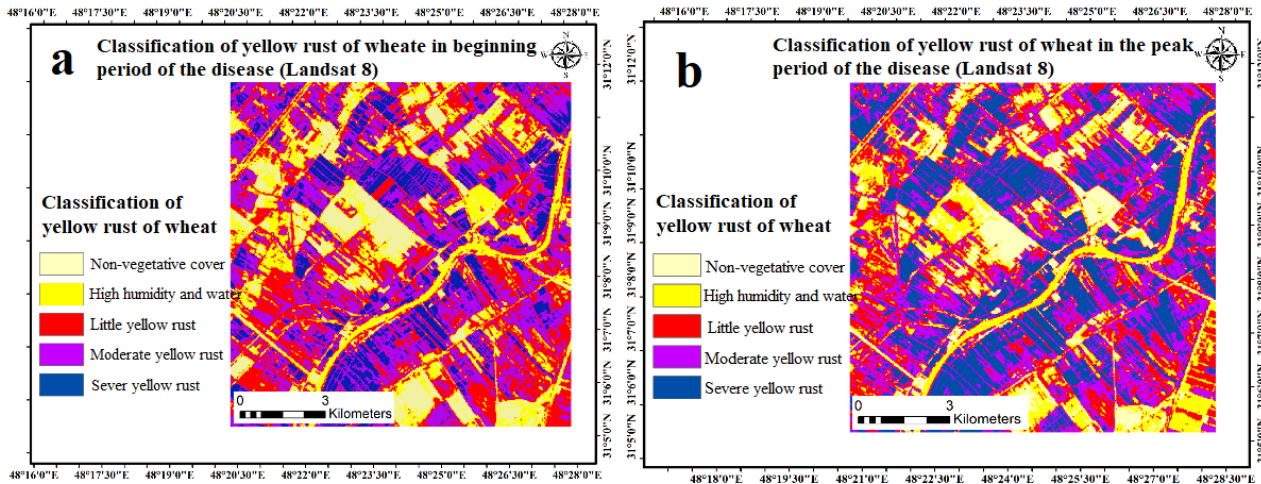
Fig. 5. MSI index for a) vegetation health period (06/02/2020), b) onset (09/03/2020) and c) peak of wheat yellow rust disease (25/03/2020) (Landsat-8 images).

لندست-۷ مطالعه کردند، که نتایج نشان داد اینگونه شاخص‌ها در مراحل سبزی‌نگی گیاه عملکرد خوبی داشته و می‌توانند مناطق سالم، بیمار و مشکوک به بیماری را تشخیص دهند. همچنین مطالعه Mardaneh و همکاران (۲۰۲۰) که با هدف بررسی استرس گندم با استفاده از تصاویر لندست-۸ انجام شد، و مطالعه Yang و همکاران (۲۰۰۱، ۲۰۰۷) که به بررسی بیماری زنگ قهوه‌ای در گیاه برنج پرداخت، شاخص NDVI را از میان شاخص‌های پوشش گیاهی به عنوان بهترین شاخص در بررسی وضعیت سلامت گندم و برنج معرفی کردند.

همان‌گونه که در جدول فوق دیده می‌شود، شاخص MSI ضعیف‌ترین عملکرد را در مطالعه زنگ زرد گندم در منطقه مورد مطالعه داشته است (RMSE در شروع بیماری برابر با ۱ و در اوج بیماری برابر با ۰/۹۸۶)، در حالی که شاخص GNDVI (در هر دو مرحله شروع (RMSE = ۰/۹۴۳) و اوج بیماری (RMSE = ۰/۹۴۴)) مناسب‌ترین شاخص بوده است. نتایج پژوهش‌های دیگر متخصصان نیز تاثیر شاخص‌های سلامت گیاهی را در مطالعه بیماری زنگ زرد گندم را تایید می‌کند، از جمله Mobasheri و Ranjbar (۲۰۱۷) که مزارع آلوده به بیماری زنگ گندم و درجه سلامت برگ را با استفاده از داده‌های

رگرسیون بین داده‌های میدانی (مطابق با تاریخ اخذ تصاویر ماهواره‌ای) با تصویر دوره‌های مختلف شیوع بیماری محاسبه و در نهایت با استفاده از این رابطه نقشه طبقه‌بندی بیماری در منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۶).

در مرحله بعد طبقه بندی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر تصاویر لندست-۸ انجام گرفت. به منظور پهنه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم از طبقه‌بندی نظارت‌شده مبتنی بر داده‌های میدانی منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. بدین منظور رابطه



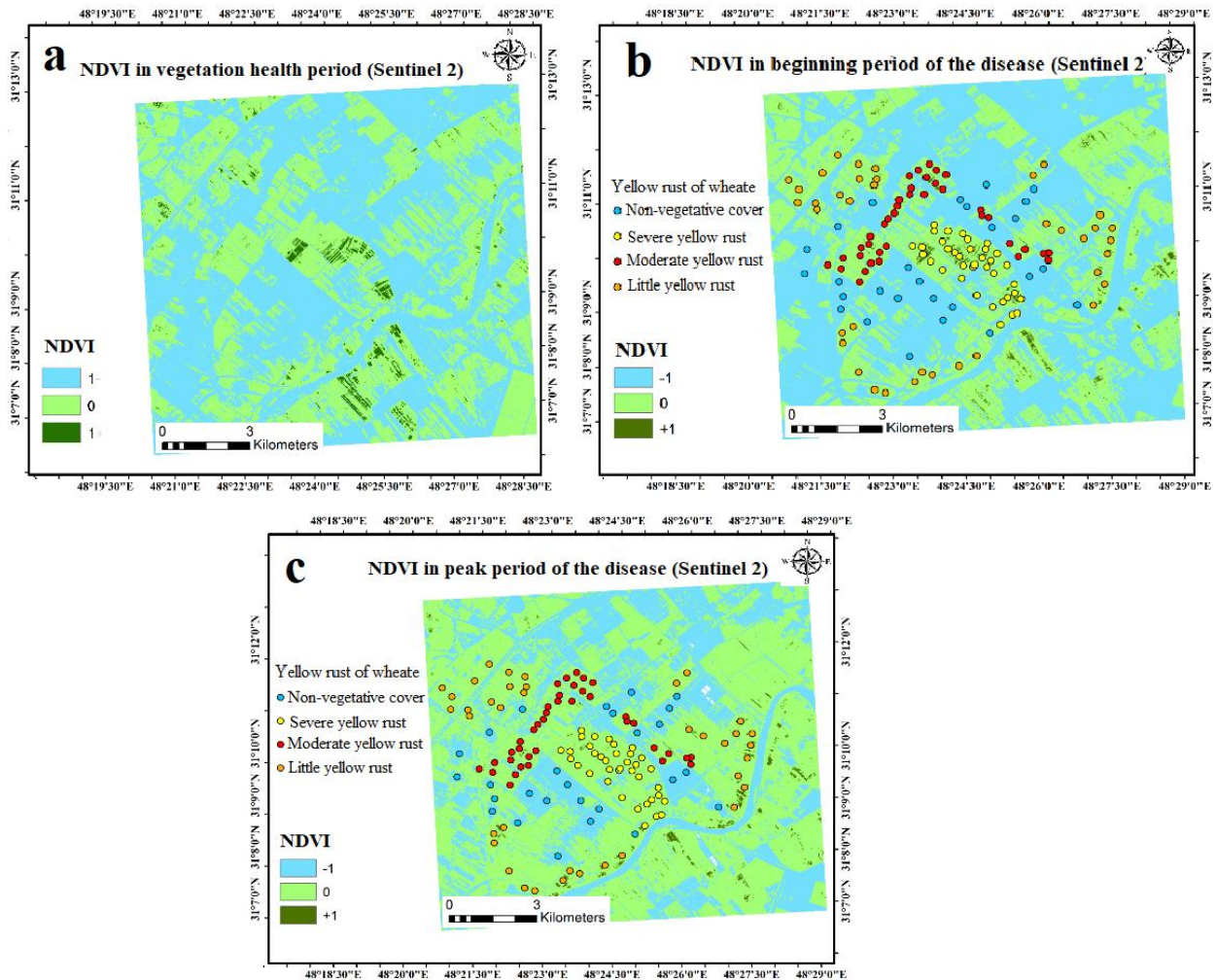
شکل ۶- پهنه‌بندی زنگ زرد گندم با استفاده از تصاویر لندست-۸ برای (a) شروع (۱۹ اسفند ۱۳۹۸) و (b) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۶ فروردین ۱۳۹۹).

Fig. 6. Zoning of wheat yellow rust using Landsat-8 images for a) onset (09/03/2020) and b) peak of wheat yellow rust disease (25/03/2020).

مطالعه و طبقه بندی سطوح زیر کشت را تایید کرد، و نتایج آنها نشان داد که شاخص‌های NDVI و GNDVI بالاترین درصد تخمین عملکرد گندم تولید شده را داشتند. همچنین طبق نتایج مطالعه Guo و همکاران (۲۰۲۱)، استفاده شاخص‌های پوشش گیاهی برای پایش بیماری گندم مناسب می‌باشد و با توجه به نتایج آنها می‌توان تصمیمات مدیریتی خوبی اتخاذ کرد. اما بررسی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر تصاویر سنتینل-۲ نیز انجام گرفت. ابتدا شاخص‌های گیاهی محاسبه شدند و سپس تفسیر بصری و آماری نقشه‌های حاصله انجام شد. سپس طبقه‌بندی زنگ زرد گندم در دو دوره شروع و اوج بیماری صورت گرفت و در نهایت نیز تفسیر بصری و آماری این نقشه‌ها انجام شد. در این مرحله ابتدا محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI در سه تاریخ ۲۰۲۰/۰۲/۰۶، ۲۰۲۰/۰۳/۰۹ و ۲۰۲۰/۰۳/۲۵ که به ترتیب مربوط به سه دوره سلامت، ابتدای دوره بیماری زنگ گندم و اوج بیماری می‌باشند انجام شد (شکل ۷).

همان‌طور که در شکل قابل‌مشاهده است، با گذر زمان، بیماری در منطقه مورد مطالعه شدت پیدا کرده است. RMSE نقشه طبقه بندی شروع و اوج بیماری به ترتیب ۰/۸۴۵ و ۰/۸۴۸ می‌باشد. همچنین، MAE نقشه طبقه بندی شروع و اوج بیماری به ترتیب ۰/۷۱۷ و ۰/۷۲۵ می‌باشد. در میان دو نقشه فوق، نقشه شروع بیماری بالاتر از نقشه اوج بیماری دارد. همچنین طبق نتایج بدست آمده، با بکارگیری تصاویر لندست-۸، طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر رابطه رگرسیون محاسبه شده در این تحقیق نتایج بهتری از مطالعه بیماری مبتنی بر بکارگیری شاخص‌های گیاهی NDVI، GNDVI و MSI دارد. طبق نتایج، صحت نقشه‌های طبقه‌بندی زنگ زرد گندم بالاتر از صحت شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه است. در مقایسه با نتایج مطالعه حاضر، مطالعه Matinfar و Zahirniya (۱۳۹۵) که با هدف شناسایی و طبقه‌بندی مزارع تحت گندم و پیش‌بینی عملکرد آنها در جنوب غربی خوزستان انجام شد تاثیر شاخص‌های پوشش گیاهی را در





شکل ۷- شاخص NDVI دوره (a) سلامت گیاه (۱۱ بهمن ۱۳۹۸)، (b) شروع (۱۱ اسفند ۱۳۹۸) و (c) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) (تصاویر سنتینل-۲).

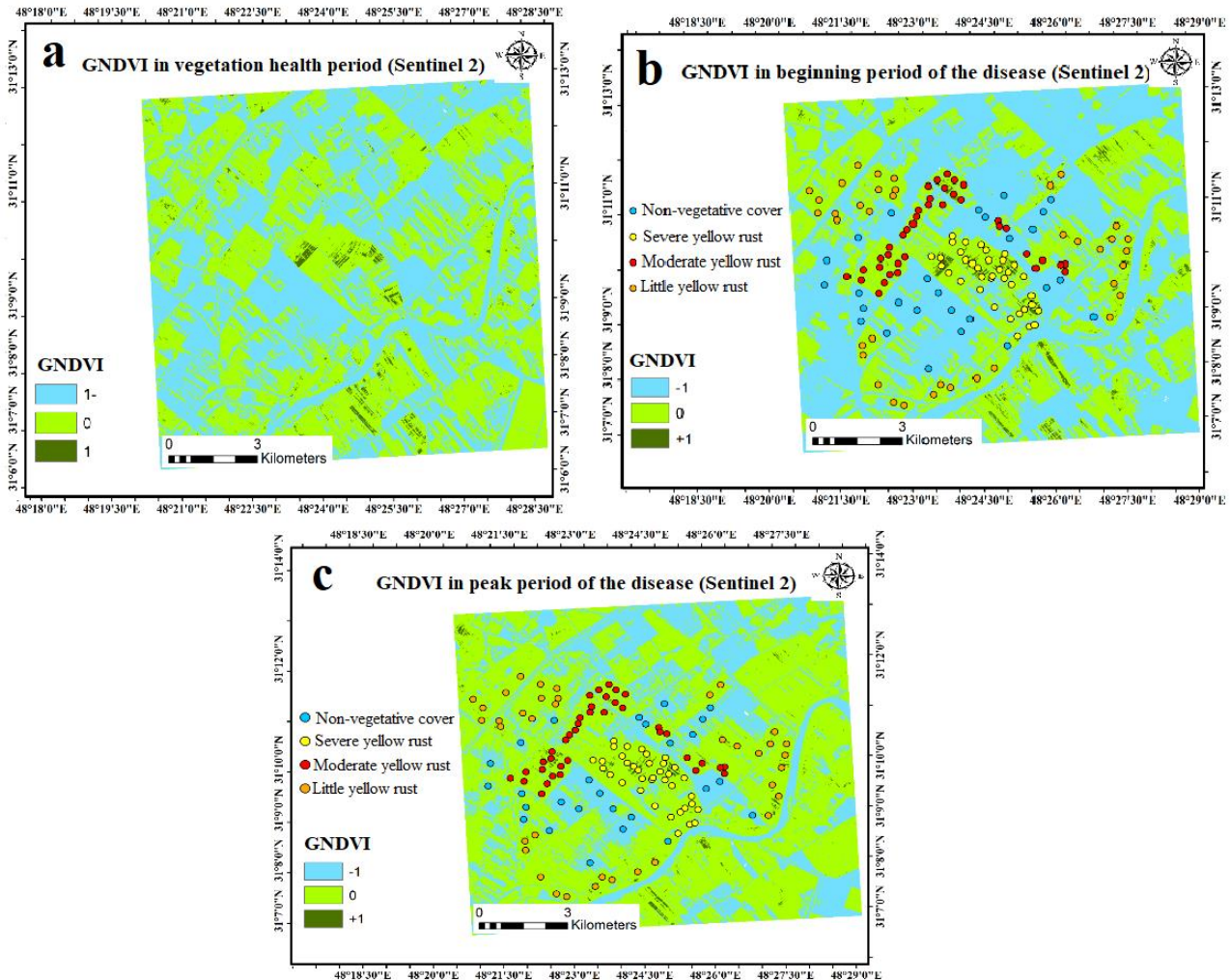
Fig. 7. NDVI index for a) vegetation health period (31/01/2020), b) onset (01/03/2020) and c) peak of wheat yellow rust disease (31/03/2020) (Sentinel-2 images).

طبق نتایج شکل ۸ که مربوط به شاخص GNDVI می‌باشد، همانند شاخص NDVI در منطقه‌ای که محل شیوع بیماری است، وسعت منطقه پوشش گیاهی سالم که دارای بیشترین مقادیر شاخص است، با شروع و اوج گرفتن بیماری کاهش زیادی در مقایسه با دوره بدون بیماری داشته است. تطابق خوب نقاط تمرکز بیماری با نقشه‌های شاخص GNDVI نیز قابل مشاهده است. در این شاخص نیز رابطه معکوسی بین وسعت کلاس دارای مقادیر بالای GNDVI با اوج گرفتن بیماری دیده می‌شود.

شاخص پوشش گیاهی MSI نیز برای سه دوره سلامت، ابتدای دوره بیماری زنگ زرد گندم و همچنین اوج بیماری

طبق نتایج شکل بالا، در منطقه‌ای که محل شیوع بیماری است، وسعت پوشش گیاهی سالم که دارای بیشترین مقادیر NDVI است، با شروع بیماری و اوج گرفتن بیماری کاهش زیادی در مقایسه با دوره بدون بیماری داشته است. این نتیجه تطابق خوب نقاط تمرکز بیماری را با نقشه‌های NDVI نشان می‌دهد، به طوری که رابطه معکوسی بین وسعت کلاس دارای مقادیر بالای شاخص NDVI با اوج گرفتن بیماری دیده می‌شود. شاخص پوشش گیاهی GNDVI نیز برای سه دوره سلامت، ابتدای دوره بیماری زنگ گندم و اوج بیماری محاسبه شد (شکل ۸).

محاسبه گردید (شکل ۹).

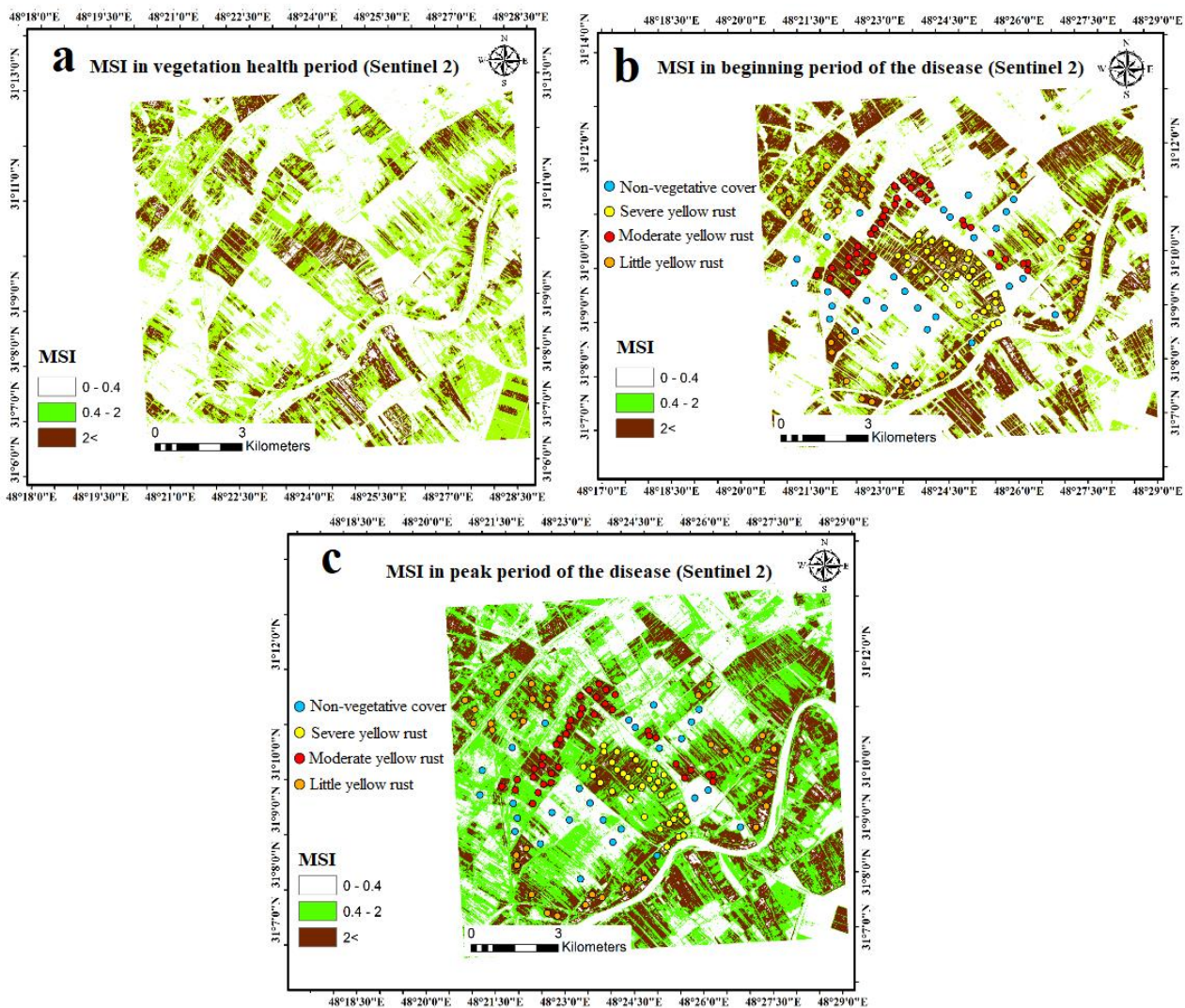


شکل ۸- شاخص GNDVI دوره (a) سلامت گیاه (۱۱ بهمن ۱۳۹۸)، (b) شروع (۱۱ اسفند ۱۳۹۸) و (c) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) (تصاویر سنتینل-۲).

Fig. 8. GNDVI index for a) vegetation health period (31/01/2020), b) onset (01/03/2020) and c) peak of wheat yellow rust disease (31/03/2020) (Sentinel-2 images).

طبق نتایج جدول، شاخص MSI ضعیف‌ترین عملکرد را در مطالعه زنگ زرد گندم در منطقه مطالعاتی داشته است (RMSE در شروع بیماری برابر با ۱۰/۱۱۴ و در اوج بیماری برابر با ۲۹/۳۹۷) در حالی که شاخص NDVI (در مرحله شروع بیماری با RMSE برابر با ۰/۸۹۱) و GNDVI (در مرحله اوج بیماری با RMSE برابر با ۰/۹۵۹) مناسب‌ترین شاخص‌ها بودند.

با توجه به تفسیر شکل فوق، به نظر می‌رسد که با شروع بیماری مساحت کلی بخش‌های با مقادیر بالاتر از ۲ با اوج گرفتن بیماری در مقایسه با زمان سلامت گندم افزایش یافته است. سپس با اوج گرفتن بیماری مساحت مقادیر بالاتر از ۰/۴ افزایش و مقادیر بالاتر از ۲ کاهش یافته است. تفسیر آماری نقشه‌های بدست آمده از تصاویر سنتینل-۲ بر اساس دو پارامتر آماری RMSE و MAE نیز انجام گرفت (جدول ۷).



شکل ۹- شاخص MSI دوره‌های (a) سلامت گیاه (۱۱ بهمن ۱۳۹۸)، (b) شروع (۱۱ اسفند ۱۳۹۸) و (c) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) (تصاویر سنتینل-۲).

Fig. 9. MSI index for a) vegetation health period (31/01/2020), b) onset (01/03/2020) and c) peak of wheat yellow rust disease (31/03/2020) (Sentinel-2 images).

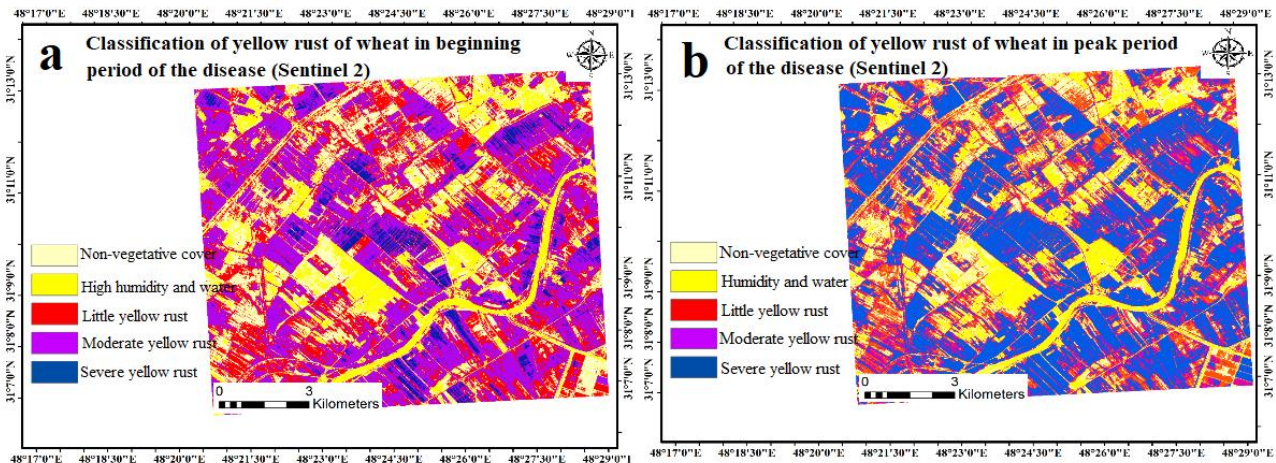
با اهداف مشابه را مناسب دانستند. طبقه بندی بیماری زنگ زرد گندم با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و داده‌های میدانی منطقه مورد مطالعه نیز انجام گرفت. بدین منظور رابطه رگرسیونی بین داده‌های میدانی با تصاویر دوره‌های مختلف شیوع بیماری محاسبه و در نهایت با استفاده از این رابطه نقشه طبقه‌بندی بیماری در منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۱۰).

اما طبقه بندی بیماری زنگ زرد با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ که در چندین مطالعه انجام شده است، نتایج بسیار خوبی داشته است. به عنوان مثال Singh و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود شناسایی زنگ زرد را با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ با استفاده از روش طبقه‌بندی انجام دادند و با توجه به نتایج خوبی که در این مورد در مطالعه آنها بدست آمد، استفاده از طبقه بندی در اینگونه مطالعات

جدول ۷- صحت سنجی آماری نقشه‌های شاخص‌های گیاهی بدست آمده از تصاویر سنتینل-۲.

Table 7. Statistical accuracy assessment of vegetation indexes achieved from Sentinel-2 images.

MSI		GNDVI		NDVI		
Peak of the disease	Onset of the disease	Peak of the disease	Onset of the disease	Peak of the disease	Onset of the disease	
29.397	0.114	0.959	0.924	1	0.891	RMSE
7.368	7.258	0.919	0.853	1	0.794	MAE



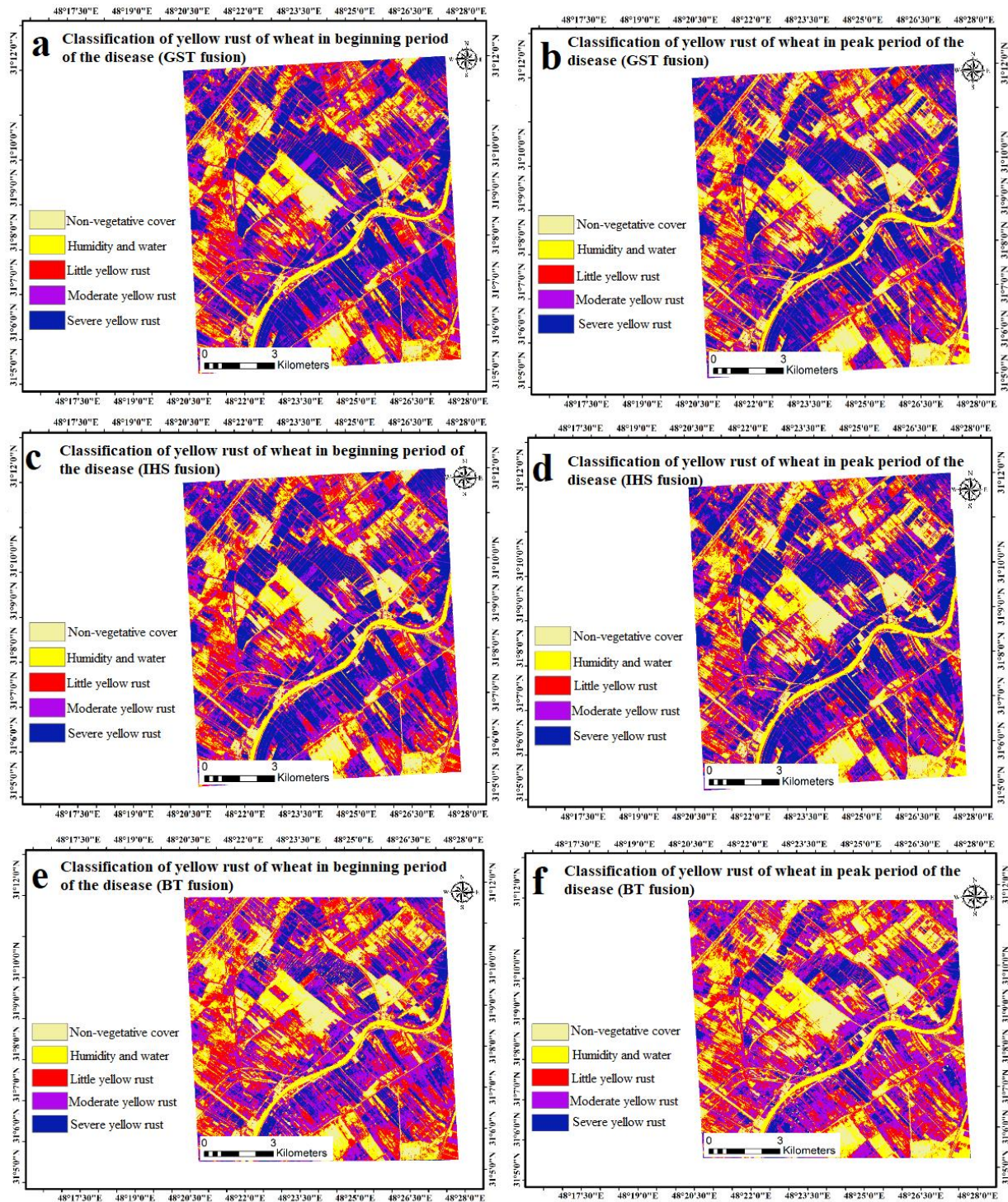
شکل ۱۰- پهنه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ برای (a) شروع (۱۱ اسفند ۱۳۹۸) و (b) اوج بیماری زنگ زرد گندم (۱۲ فروردین ۱۳۹۸).

Fig. 10. Zoning of wheat yellow rust using Sentinel-2 images for a) onset (01/03/2020) and b) peak of wheat yellow rust disease (31/03/2020).

تصدیق می‌کند، از جمله مطالعه Razban و همکاران (۲۰۱۸) که عملکرد گندم را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ را تخمین زدند و مشاهده کردند که رزولوشن مکانی بالاتر تصاویر سنتینل-۲ باعث نمایش دقیق‌تر شرایط مزارع و عارضه‌های منطقه مطالعاتی می‌شود. لازم به ذکر است که مقایسه نتایج بکارگیری دو نوع تصویر اپتیکی لندست-۸ و سنتینل-۲ در مطالعه حاضر به منظور مطالعه زنگ زرد گندم نشان می‌دهد که نقشه طبقه‌بندی بیماری در مرحله شروع بیماری با استفاده تصویر لندست-۸ ( $RMSE = 0/845$ ) و نقشه طبقه‌بندی بیماری در مرحله اوج بیماری در حالت بکارگیری تصویر سنتینل-۲ ( $RMSE = 0/845$ ) بهترین نتیجه را داشته است. مقایسه نتایج مبتنی بر شاخص‌های گیاهی نیز نشان داد که شاخص NDVI در هر دو مرحله شروع بیماری (تصویر سنتینل-۲ با  $RMSE = 0/891$ ) و اوج بیماری (تصویر لندست-۸ با  $RMSE = 0/959$ ) بهترین نتیجه را در خصوص مطالعه زنگ زرد گندم داشته‌اند. می‌توان نتیجه گرفت که برای داشتن نتایج بهتر و کامل‌تر بهتر است از بیش از یک نوع

همان‌طور که در شکل فوق قابل مشاهده است، بیماری با گذر زمان شدت قابل توجهی پیدا کرده است. تحلیل آماری این نقشه‌ها نشان دهنده مقادیر  $RMSE$ ،  $0/889$  و  $0/845$  به ترتیب برای شروع و اوج بیماری، و همچنین  $MAE$ ،  $0/791$  و  $0/714$  برای شروع و اوج بیماری می‌باشد. در میان دو نقشه فوق، نقشه شروع بیماری ( $RMSE = 0/889$ ) صحتی کمتر از نقشه اوج بیماری ( $RMSE = 0/845$ ) دارد. طبق نتایج، صحت نقشه‌های طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم بهتر از صحت نقشه‌های شاخص‌های گیاهی است. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده تصاویر سنتینل-۲، طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر رابطه رگرسیون محاسبه‌شده در این تحقیق نتایجی قابل قبول‌تر از مطالعه بیماری مبتنی بر بکارگیری شاخص‌های گیاهی مورد استفاده دارد.

بطور کلی تصاویر سنتینل-۲ با توجه به داشتن رزولوشن مکانی بالاتر امکان بررسی و نمایش دقیق‌تر شرایط و عملکرد مزارع و بیماری‌های آنها را نسبت به تصاویر لندست-۸ فراهم می‌کند. ضمناً مطالعات دیگر متخصصان نیز این ویژگی را



شکل ۱۱- پهنه‌بندی زنگ زرد گندم با استفاده تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲، مبتنی بر روش تلفیقی GST (برای (a) شروع و (b) اوج بیماری)، مبتنی بر روش تلفیقی IHS (برای (c) شروع و (d) اوج بیماری) و مبتنی بر روش تلفیقی BT (برای (e) شروع و (f) اوج بیماری).

Fig. 11. Zoning of wheat yellow rust using Landsat-8 and Sentinel-2 images based on the GST (for a) onset and b) peak of disease), HIS (for c) onset and d) peak of disease) and BT (for e) onset and f) peak of disease) fusion methods for onset and peak of disease.

ارزیابی دقیق تر این نقشه‌ها از تحلیل آماری مبتنی بر دو شاخص RMSE و MAE استفاده شده است (جدول ۸).  
 طبق نتایج جدول، روش تلفیق IHS بهترین نتیجه طبقه‌بندی زنگ زرد گندم را در مرحله شروع بیماری (= RMSE ۰/۸۰۹) داشته است، درحالی‌که روش تلفیق GST بهترین نتیجه را در مرحله اوج بیماری (RMSE = ۰/۷۹۳) از خود نشان داده است. مقایسه تمامی سناریوهای طبقه‌بندی اجرا شده در این پژوهش نشان می‌دهد که نتایج طبقه‌بندی مبتنی بر تلفیق تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ بهترین سناریو به منظور طبقه‌بندی زنگ زرد گندم در هر دو مرحله شروع و اوج بیماری در منطقه مورد مطالعه است. این موضوع اثبات‌کننده قابلیت بالای تلفیق تصاویر ماهواره‌ای در بهبود نتایج طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم است. نتایج دیگر مطالعات قابلیت بالای تلفیق تصاویر ماهواره‌ای را در مطالعه عملکرد گندم نشان داده است، از جمله نتایج مطالعه Skakun و همکاران (۲۰۱۷) که نشان داد تلفیق تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ تهیه نقشه پهنه‌بندی و ارزیابی عملکرد محصولات را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد و خطاهای تخمین عملکرد گندم را کاهش می‌دهد.

تصویر ماهواره‌ای استفاده کرد زیرا با توجه به تفاوت ویژگی‌های تصاویر سنجنده‌های مختلف، اطلاعات این سنجنده‌ها مکمل یکدیگر می‌باشند.

با توجه به اینکه طبقه‌بندی زنگ زرد گندم در مقایسه با شاخص‌های گیاهی نتایج بهتری داشت، لذا در این قسمت تنها به مطالعه طبقه‌بندی زنگ زرد با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شده است. بدین منظور پهنه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ با سه روش GST، IHS و BT و داده‌های میدانی انجام شد. بدین منظور رابطه رگرسیون بین داده‌های میدانی با تصویر تلفیق‌شده دوره‌های مختلف شیوع بیماری محاسبه و در نهایت با استفاده از این رابطه نقشه طبقه‌بندی بیماری در منطقه مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۱۱).

همان‌طور که در شکل مشخص است، کلاس مربوط به بیماری شدید که به رنگ آبی پررنگ در نقشه‌ها دیده می‌شود در مرحله شروع بیماری در دو روش GST و BT وسیع‌تر از طبقه‌بندی مبتنی بر روش تلفیق BT است. با اوج گرفتن بیماری نیز وسعت این کلاس افزایش یافته است. به‌منظور

جدول ۸- صحت سنجی نقشه‌های طبقه‌بندی مبتنی بر تلفیق تصاویر با استفاده پارامترهای آماری RMSE و MAE.

Table 8. Accuracy assessment of classification maps based on fusion of the Sentinel-2 and Landsat-8 images by using RMSE and MAE statistical parameters.

IHS		BT		GST		
Peak of the disease	Onset of the disease	Peak of the disease	Onset of the disease	Peak of the disease	Onset of the disease	
0.794	0.809	0.870	0.898	0.792	0.828	RMSE
0.631	0.654	0.757	0.807	0.628	0.686	MAE

GST و BT در دو زمان ابتدای بیماری و اوج بیماری طبقه‌بندی شد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده شاخص MSI ضعیف‌ترین عملکرد (RMSE) در شروع بیماری برابر با ۱ و در اوج بیماری برابر با ۰/۹۸۶ را در تفکیک زنگ زرد گندم در منطقه مورد مطالعه داشت. درحالی‌که شاخص GNDVI در هر دو مرحله شروع (RMSE برابر با ۰/۹۴۳) و اوج بیماری (RMSE برابر با ۰/۹۴۴) مناسب‌ترین شاخص بوده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، صحت نقشه‌های طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم بهتر از صحت نقشه‌های شاخص‌های

## ۵- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش تشخیص و پهنه‌بندی بیماری زنگ زرد گیاه گندم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸، سنتینل-۲ و تلفیق این تصاویر طی دوره سلامت گیاه، شروع و اوج بیماری زنگ زرد گندم بود. در مرحله اول از ۳ شاخص پوشش گیاهی MSI، GNDVI، NDVI جهت بررسی بیماری زنگ گندم استفاده شد و در نهایت بیماری زنگ زرد گندم در محدوده مورد مطالعه در ۵ کلاس (بدون پوشش گیاهی، آب و رطوبت بالا، بیماری شدید، متوسط و کم) با استفاده تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ و همچنین با تلفیق این تصاویر به سه روش IHS،

برابر با ۰/۸۴۵ بهترین نتایج را داشته‌اند. مقایسه نتایج مبتنی بر شاخص‌های گیاهی نیز نشان داد که شاخص NDVI در هر دو مرحله شروع بیماری (RMSE با استفاده تصویر سنتینل-۲ ۰/۸۹۱ بوده است) و اوج بیماری (با استفاده از تصویر لندست-۸، RMSE برابر با ۰/۹۵۹ بوده است) بهترین نتایج را جهت مطالعه زنگ زرد گندم داشته است. می‌توان نتیجه گرفت که به منظور داشتن نتایج بهتر و کامل‌تر می‌توان از بیش از یک نوع تصویر ماهواره‌ای استفاده نمود زیرا با توجه به تفاوت ویژگی‌های تصاویر سنجنده‌های مختلف، استفاده اطلاعات این سنجنده‌ها در کنار هم قطعاً نتایج بهتری را ارائه خواهند داد.

با توجه به نتایج این پژوهش، روش تلفیق IHS بهترین نتیجه طبقه‌بندی زنگ زرد گندم را در مرحله شروع بیماری داشته است (با  $RMSE = 0/809$ )، و همچنین روش تلفیق GST بهترین نتیجه را در مرحله اوج بیماری (با  $RMSE = 0/793$ ) از خود نشان داده است. مقایسه تمامی تکنیک‌های طبقه‌بندی اجرا شده در این پژوهش نشان می‌دهد که طبقه‌بندی مبتنی بر تلفیق تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ بهترین تکنیک به منظور طبقه‌بندی زنگ زرد گندم در هر دو مرحله شروع و اوج بیماری در منطقه مورد مطالعه بوده است. این موضوع اثبات‌کننده قابلیت بالای تلفیق تصاویر ماهواره‌ای در بهبود نتایج طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم می‌باشد.

#### سپاسگزاری

تمامی مولفین این پژوهش از سازمان زمین شناسی آمریکا جهت فراهم نمودن داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده برای رسیدن به اهداف تحقیق، تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌دارند.

گیاهی مورد مطالعه است. در میان دو نقشه خروجی، نقشه شروع بیماری صحتی بالاتر (RMSE برابر با ۰/۸۴۵) از نقشه اوج بیماری (RMSE برابر با ۰/۸۴۸) دارد. می‌توان نتیجه گرفت که در حالت استفاده از تصاویر لندست-۸، طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر رابطه رگرسیون محاسبه شده در این تحقیق نتایج قابل قبول‌تر از مطالعه بیماری مبتنی بر به‌کارگیری شاخص‌های گیاهی NDVI، GNDVI و MSI دارد. ضمناً شاخص MSI ضعیف‌ترین عملکرد را در شناسایی زنگ زرد گندم در منطقه مورد مطالعه داشته است (RMSE در شروع بیماری برابر با ۱۰/۱۱۴ و در اوج بیماری برابر با ۲۹/۳۹۷). در حالی که شاخص NDVI (در مرحله شروع بیماری با RMSE برابر با ۰/۸۹۱) و GNDVI (در مرحله اوج بیماری با RMSE برابر با ۰/۹۵۹) مناسب‌ترین شاخص‌ها بودند.

صحت نقشه‌های طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم از صحت نقشه‌های شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه بالاتر است. در میان دو نقشه خروجی، نقشه شروع بیماری (RMSE برابر با ۰/۸۹۸) صحتی کمتر از نقشه اوج بیماری (RMSE برابر با ۰/۸۴۵) دارد. می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده تصاویر سنتینل-۲، طبقه‌بندی بیماری زنگ زرد گندم مبتنی بر رابطه رگرسیون محاسبه شده در این تحقیق نتایج قابل قبول‌تر از مطالعه بیماری با استفاده شاخص‌های گیاهی NDVI، GNDVI و MSI دارد.

با مقایسه نتایج استفاده دو نوع تصویر اپتیکی لندست-۸ و سنتینل-۲ برای مطالعه زنگ زرد گندم نشان داد که طبقه‌بندی بیماری در مرحله شروع بیماری با استفاده از تصویر لندست-۸ با RMSE برابر با ۰/۸۴۵ و همچنین نقشه طبقه‌بندی بیماری در مرحله اوج بیماری با استفاده تصویر سنتینل-۲ با RMSE

#### مراجع

- Ashourlu, D., 2016. Presenting an algorithm to detect and estimate the amount of wheat rust using ground-based spectroscopy. Master's thesis. Khajeh Nasir Toosi University of Technology 175.
- Ashourlu, D., Aghighi, H., Matkan, A.A., Nematollahi, H., 2017. Evaluation of Vegetation Indices to Recognizing Wheat Leaf and Yellow Rust at Canopy Scale. Iranian Journal of Remote Sensing and GIS 9, 111-128.
- Bebronne, R., Carlier, A., Meurs, R., Leemans, V., Vermeulen, P., Dumont B., et al. 2020. In-Field proximal sensing of septoria tritici blight, stripe rust and brown rust in winter wheat by means of reflectance and textural features from multispectral imagery. Biosystems Engineering 197, 257-269. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.011>
- Chandra, M.A., Bedi, S.S., 2021. Survey on SVM and their application in image classification. International Journal of Information Technology 13, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s41870-017-0080-1>

- Chen, D., Shi, Y., Huang, W., Zhang J., Wu, K., 2018. Mapping wheat rust based on high spatial resolution satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 152, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.002>
- Giorgos, M., Jungho, I., Caesar, O., 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (3), 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Guo, A., Huang, W., Dong, Y., Ye, H., Ma, H., Liu, B., et al. 2021. Wheat Yellow Rust Detection Using UAV-Based Hyperspectral Technology. *Remote Sensing* 13, 123. <https://doi.org/10.3390/rs13010123>
- Jing, X., Zou, Q., Yan, J., Dong, Y., Li, B., 2022. Remote Sensing Monitoring of Winter Wheat Stripe Rust Based on mRMR-XGBoost Algorithm. *Remote Sensing* 14, 756. <https://doi.org/10.3390/rs14030756>
- Karimi, D., 2016. Cumulative classification of targets using SAR and optics images fusion. MSc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Karimi, D., 2021. Study of water bodies using remote sensing based on modern algorithms with emphasis on Khuzestan province. PhD thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Lotfali Ayeneh, G., Tabatabaei, S., Dad Rezaei, S., Ghaffari, S., Farzadi, H., 2013. Wheat yellow rust challenges and control solutions in Khuzestan province. Autumn gathering of researchers and promoters of Khuzestan province. <https://sid.ir/paper/873889/fa>
- Mardaneh, A., Amiraslani, F., Alavi Panah, S.K., 2020. Detection and study of wheat stress using satellite images (Case study: Dasht-e Moghan). *Journal of GIS & RS Application in Planning* 11, 2, 7-26.
- Mirzapour, S., Mirzaniya, M., Mirzaei, H., 2013. Assessment of yellow rust damage in spring wheat fields in Aleshtar city. The first national conference on agricultural pollutants and food health, Challenges and solutions.
- Moshou, D., Bravo, C., West, J., Wahlen, S., McCartney A., Ramon, H., 2004. Automatic detection of yellow rust in wheat using reflectance measurements and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 44, 173-188. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.04.003>
- Mubasheri, M., Ranjbar, S., 2017. Detection of fields infected with wheat rust disease using Landsat images. *Applied Researches in Geographical Sciences* 17, 7-24. <https://doi.org/20.1001.1.22287736.1396.17.44.1.7>
- Omari, K., Abuelgasim, A., Alhebsi, K. 2019. Aerosol optical depth retrieval over the city of Abu Dhabi, United Arab Emirates (UAE) using Landsat-8 OLI images. *Atmospheric Pollution Research* 10(4), 1075-1083. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.015>
- Pohl, C., Van Genderen, J. L., 1998. Review article Multisensor image fusion in remote sensing. Concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing* 19(5), 823-854. <https://doi.org/10.1080/014311698215748>
- Pohl, C., Van Genderen, J. L., 2016. Remote sensing image fusion: a practical guide. Crc. Press. P. 288. <https://doi.org/10.1201/9781315370101>
- Polat, A., Balik S.F., Akcay, O., 2022. The relationship between mucilage covered areas and chlorophyll-a concentration, the sea of Marmara case. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences* 40(3), 673-684. <https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00079>
- Rangzan K., Kabolizadeh M., Karimi D., Zareie S., 2019. Supervised cross-fusion method: a new triplet approach to fuse thermal, radar, and optical satellite data for land use classification. *Environmental and Monitoring Assessment* 191, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7621-y>
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi D., 2020. Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite Images Capability and Evaluation of Image Fusion Capability in Seasonal Zoning of NSFQI and IRWQIsc Qualitative Indices in Surface Water (Case Study: Karoun River). *Geography and environmental planning* 31, 73-102. <https://doi.org/10.22108/GEP.2020.123228.1309>
- Razban, A., 2017. Estimation of wheat yield using Landsat 8 and Sentinel satellite images. MSc. thesis. Ferdowsi University of Mashhad.
- Sankaran, S., Mishra, A., Ehsani, R., Davis, C., 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture* 72, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.007>



- Singh, H., Roy, A., Setia, R. Brijendra P., 2023. Classification of yellow rust of wheat from Sentinel-2 satellite imagery using deep learning artificial neural network. *Arabian Journal of Geosciences* 16, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11750-1>
- Skakun, S., Vermote, E., Roger, J.C., Franch, B., 2017. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. *AIMS Geosciences* 3(2), 163-186. <https://doi.org/10.3934/geosci.2017.2.163>
- Su, J., Liu, C., Hu, X., Xu, X., Guo, L., Chen, W., 2019. Spatio-temporal monitoring of wheat yellow rust using UAV monitoring imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 167, 105035. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105035>
- Taghizadeh, S., 2016. Estimating the date optimal of wheat harvest using satellite images. MSc. thesis. University of Tabriz.
- Yang, CH., 2020. Remote sensing and precision agriculture technologies for crop disease detection and management with a practical application example. *Engineering* 6, 528-532. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.015>
- Yang, CH., Ching-Huan, CH., Chen, R., 2007. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper. *Crop Ecology, Management & Quality* 47, 329-335. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.05.0335>
- Yang, C.M., Cheng, Ch., 2001. Spectral characteristics of rice plants infested by brown planthoppers. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B, Life Sciences* 25, 180-186.
- Zahirnia, A., Metinfar, H., 2016. Estimating the yield of irrigated wheat fields based on data obtained from Landsat 8 satellite in southwestern region of Khuzestan province. *Proceedings of the first national conference on remote sensing and geographic information system in earth sciences* November 18 and 19. Shiraz University.
- Zakeri, A., Yasaei, M., Rajaei, S., 2016. Wheat yellow rust disease and its management. Fars Agricultural Jihad Organization and Fars Agriculture and Natural Resources Research and Training Center 2. An official report.
- Zhang, J., Pu, R., Wang, J., Huang, W., Yuan, L., Luo, J., 2012. Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements. *Computers and Electronics in Agriculture* 85, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.006>