

## A synthesis approach of vegetation indices for monitoring high-risk agricultural regions using UAV and satellite hyperspectral data

Maryam Sadeghi<sup>1</sup> , Hossein Fekrat<sup>2</sup> , Hassan Emami<sup>3\*</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of remote sensing and GIS, Faculty of planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: [sadegi.maryam92@gmail.com](mailto:sadegi.maryam92@gmail.com)

2- Ph.D. Candidate, Department of remote sensing and GIS, Faculty of planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: [hosseinf7181@gmail.com](mailto:hosseinf7181@gmail.com)

3- (\*Corresponding author) Associate professor, Department of Surveying, Faculty of Marand engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: [h\\_emami@tabrizu.ac.ir](mailto:h_emami@tabrizu.ac.ir)

### Article Info

#### Date of receive:

2025/01/09

#### Date of last review:

2025/02/13

#### Date of accept:

2025/07/29

#### Date of online publication:

2025/07/29

#### Keywords:

Stress of crops,  
UAV hyperspectral  
images,  
Hyperion,  
Vegetation indices

### Extended Abstract

#### Introduction

Remote sensing (RS), which is commonly used to monitor crops, is regarded as one of the most important innovations for precision and intelligent agriculture. Numerous characteristics of vegetation and crops could be monitored using RS. Today, the advancement of unmanned aerial vehicle (UAV)-based remote sensing systems has advanced crop monitoring and precision agriculture. When compared to prior methods. Using UAVs to monitor crops provides excellent prospects for obtaining field data in a simple, quick, and cost-effective manner. The ability of UAVs to fly at low altitude provides images of objects with extremely high spatial resolution (i.e., a few millimeters). Because of the widespread application of remote sensing and UAVs in recent years, quantitative and qualitative monitoring of croplands has expanded dramatically. Nowadays, because the global agriculture sector is facing increasing challenges as a result of a variety of stressful factors such as natural resource depletion, environmental pollution, climate change, and crop diseases, crop monitoring is critical to planning and managing sustainable agriculture. Various approaches have been studied to identify crop stress caused by a variety of variables. In the event that each spectral index has distinct properties and cannot consider all plant attributes, all base index approaches in vegetation research and crop monitoring have employed plant indices individually. It is obvious that each spectral index expresses a portion of the characteristics of the vegetation cover and does not express other characteristics, so the combination of different vegetation groups covers the unique characteristics of each index and considers more vegetation cover characteristics. ... Page 76

### How to Cite:

Sadeghi, M. Fekrat, H. Emami, H. (2025). A synthesis approach of vegetation indices for monitoring high-risk agricultural regions using UAV and satellite hyperspectral data. Scientific -Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 34(135), 75-97.

The objective of this research is to employ the combination of indices from various categories, such as greenness indices, growth indices, plant leaf pigments, and leaf surface moisture indices, together with hyperspectral and UAV remote sensing data, to monitor risky areas and crop stress. It attempts to provide answers to the following questions: How do the suggested composite indices perform in images with medium and low spatial resolution (Hyperion) and imagery with extremely high spatial resolution (UAV hyperspectral)? And to what degree do the suggested combined indices increase the accuracy of stress monitoring of crops when compared to individual indices?

### Methodology

Although assessing the health of crops is a challenging task, satellite imagery and data can be quite beneficial in this field. The objective of this research is to use a combination of indices from different groups to monitor risk and stress areas in crops using hyperspectral remote sensing and UAV data. The primary data sets utilized in this study are Hyperion hyperspectral image data with 242 spectral bands and medium spatial resolution (30 meters) and UAV hyperspectral image data with 270 spectral bands and high spatial resolution (0.43 m), which have been analyzed in two independent areas. In this study, sixteen independent indices were employed separately, followed by the suggested composite indices on satellite and UVA imagery. Then, by combining the vegetation indices of the crops of the study area in terms of risk tolerance, they were classified into four different classes: no stress, low stress, medium stress, and high stress, and the results obtained in each stage were combined with equal weights to construct the final map of crop-risky areas. The research validated the results by creating a land use map of the UAV image using ground truth data and using the support vector machine classification algorithm, which was then compared and analyzed with the research results.

### Results and discussion

According to the findings of this study, around 55% and 47% of each analyzed region were at medium to high risk in the Hyperion and UAV hyperspectral images, respectively. The corn crop had the biggest area related to high stress, whereas the soybean crop (thin leaf) had the lowest area related to high stress. The proposed combined indexes'

findings revealed that the combined indexes MRWA2 and MRWC2 had excellent accuracy in detecting risky products. The usage of the greenness index, modified red edge vegetable index of the water band, and anthocyanin index in the composite indices, which are not impacted by the product's features and only recognize regions where the product is stressed, could potentially be the cause of this. Furthermore, the suggested combined indices of SRWR and MRWR yielded nearly identical findings. Additionally, the study found that in the Hyperion hyperspectral image with medium and low spatial resolution (30 meters and less), the combined indices showed higher accuracy than individual indices when compared to the classification map. Overall, in the high-risk class, individual indicators have an error of 18%, and combined indicators have an error of 10%. As a result, the use of combined indices in medium- and low-spatial-resolution imagery reduces crop risk calculation inaccuracy by 42%, enabling more precise monitoring of risk areas.

### Conclusion

The current study's findings revealed that the suggested combined indices can potentially be utilized to monitor the stress of applied products, depending on the kind and aim of research in the study and monitoring of various types of vegetation. Furthermore, the results demonstrate that the spatial resolution of UAV and satellite imaging performs differently in crop stress monitoring. In this approach, using composite indices in images with medium and low spatial resolution decreases the inaccuracy of calculating risky regions of crops by roughly 42% and allows for more accurate monitoring of the risk areas. On the contrary, the accuracy of the combined indices compared to the individual indices is slightly enhanced in the hyperspectral image of a high-resolution UAV, but there is no obvious gain.



## ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک‌پذیر محصولات کشاورزی با استفاده از داده‌های فراطیفی پهپادی و ماهواره‌ای

مریم صادقی<sup>۱</sup>، حسین فکرت<sup>۲</sup>، حسن امامی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران [sadegi.maryam92@gmail.com](mailto:sadegi.maryam92@gmail.com)  
 ۲- دانشجوی دکتری گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران [hosseinf7181@gmail.com](mailto:hosseinf7181@gmail.com)  
 ۳- (\*نویسنده مسئول) دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی مهندسی مرنند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران [h\\_emami@tabrizu.ac.ir](mailto:h_emami@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

این تحقیق یک رویکرد ترکیبی از شاخص‌های پوشش گیاهی را برای پایش استرس محصولات کشاورزی با استفاده از داده‌های فراطیفی پهپادی (۲۷۰ باند) و ماهواره‌ای (هایپرین با ۲۴۲ باند) پیشنهاد کرده است. ابتدا با شانزده شاخص گیاهی منفرد و سپس با پنج شاخص ترکیبی پیشنهادی، محصولات کشاورزی را در چهار کلاس ریسک‌پذیری طبقه‌بندی نموده و سپس نقشه نهایی حاصل شده است. نتایج نشان داد که به ترتیب در تصویر هایپرین و تصویر پهپادی تقریباً ۵۵ و ۴۷ درصد از هر منطقه مورد مطالعه در سطح ریسک‌پذیری متوسط به بالا قرار دارند. همچنین، در مقایسه میانگین شاخص‌های ترکیبی و منفرد با نقشه حاصل از طبقه‌بندی، نتایج نشان داد که در تصویر هایپرین شاخص‌های ترکیبی از دقت بالایی نسبت به شاخص‌های منفرد برخوردارند و تقریباً در کلاس پرریسک، شاخص‌های منفرد خطای ۱۸ درصد و شاخص‌های ترکیبی خطای ۱۰ درصدی را نشان می‌دهند. از این رو به کارگیری شاخص‌های ترکیبی در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین تقریباً ۴۲ درصد خطای تخمین مناطق ریسک‌پذیری محصولات گیاهی را کاهش داده و دقت بهتری را رقم می‌زند. علیرغم اینکه در تصویر هایپرین با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین شاخص‌های ترکیبی از دقت بالایی نسبت به شاخص‌های منفرد برخوردارند، ولی در تصویر پهپادی با قدرت تفکیک بالا (۰/۴۳ متر) نتایج نشان داد که دقت شاخص‌های ترکیبی نسبت به شاخص‌های منفرد افزایش محسوسی در تشخیص استرس محصولات کشاورزی ندارند. بنابراین استفاده از شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین توصیه می‌شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۲۰

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۵/۰۷

### واژه‌های کلیدی:

استرس محصولات  
کشاورزی؛  
تصویر فراطیفی پهپادی؛  
هایپرین؛  
شاخص‌های گیاهی

### استناد به این مقاله:

صادقی، م؛ فکرت، ح؛ امامی، ح (۱۴۰۴) ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک‌پذیر محصولات کشاورزی با استفاده از داده‌های فراطیفی پهپادی و ماهواره‌ای؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۴(۱۳۵)، ۹۷ - ۷۵.

## ۱- مقدمه

با استفاده از سنجش از دور می‌تواند شاخصی برای ارزیابی سطح بیماری یا اثرات خشک‌سالی در محصولات کشاورزی باشد (Moharana & Dutta, 2019). بنابراین، شاخص‌های گیاهی محبوب‌ترین محاسبات بانندی هستند که برای پایش پوشش گیاهی، مطالعه انواع پوشش گیاهی و پوشش گیاهی یک منطقه در زمان‌های مختلف استفاده می‌شوند (Asokan & Anitha, 2018; YOUSEFI et al., 2019). شاخص‌های سنجش از راه دور اپتیکی که بازتاب را در طول موج‌های حساس به ترکیب رنگ‌دانه و تغییرات جذب هدف قرار می‌دهند، ابزار غیر مخرب منحصر به فردی را برای به دست آوردن فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه فراهم می‌کنند (D'Odorico et al., 2021).

تحقیقات مختلفی برای کاربردهای متفاوت از پایش محصولات گیاهی توسط محققین انجام گرفته است. ایتل و همکاران (۱۳۸۵) (Eitel et al., 2006) در تحقیقی به مطالعه ارزیابی مقایسه‌ای شاخص خشک‌سالی گیاهی<sup>۱</sup> و دما برای شناسایی تنش آبی در مناطق نیمه‌خشک ایران پرداختند و با استفاده از دمای هوا و مدل رقومی ارتفاعی شاخص خشک‌سالی را توسعه دادند.

کایت و همکاران (Kayet et al., 2019) در تحقیقی، به ارزیابی سلامت جنگل برای برنامه‌ریزی و مدیریت ژئومحیطی با استفاده از داده‌های هاپیریون پرداختند و با شاخص‌های گیاهی به دقت بهتری برای ارزیابی سلامت جنگل (دقت کلی ۰/۸۱/۵۲٪، آمار کاپا ۰/۷۹) نسبت به روش نگاشت زاویه طیفی<sup>۲</sup> (دقت کلی ۰/۷۹/۹۹٪، کاپا ۰/۷۵) رسیدند.

میس و همکاران (Maes & Steppe, 2019) به مطالعه چشم‌اندازهای سنجش از دور با پهپاد در کشاورزی دقیق پرداختند که با داشتن قدرت تفکیک طیفی، مکانی و زمانی، می‌توانند در تنش خشکی، در تشخیص علف‌های هرز، در ارزیابی وضعیت عناصر غذایی و در پیش‌بینی عملکرد کارایی بالایی داشته باشند.

واسکونسوس و همکاران (Vasconcelos et al., 2023) اعتبارسنجی مدلی را بر اساس شاخص‌های پوشش گیاهی

پایش تغییرات پوشش گیاهی نقش اساسی در برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست دارد. امروزه این پایش اغلب با روش‌های متعددی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام می‌گیرد. از جمله روش‌های بررسی تغییرات و تهیه نقشه‌های موضوعی مرتبط با پایش پوشش مختلف گیاهی، استفاده از شاخص‌های مختلف گیاهی منتج از روش‌های سنجش از دور است. محققان در سراسر جهان مدت‌هاست که نیاز به پایش و نگاشت از پوشش زمینی را برای مدیریت و پایش پایدار منابع طبیعی، نه تنها در مقیاس جهانی بلکه در مقیاس منطقه‌ای و محلی تشخیص داده‌اند (isazade et al., 2022; Masry et al., 2018).

شاخص‌های مختلف گیاهی هر یک در زمینه‌ای خاص، همچون سلامت گیاه، انواع تنش‌ها شامل تنش‌های آبی و بیماری‌های گیاهی، بررسی میزان رشد گیاه، مقدار سبزیگی گیاه و نظایر آن، اطلاعات ارزشمندی را به دست می‌دهند. با توجه به اینکه در سنجش از دور فراطیفی، این شناسایی با دقت بیشتری صورت می‌گیرد، از این رو به صورت دقیق‌تر می‌توان تغییرات ایجاد شده در پوشش‌های گیاهی را مدل‌سازی نمود. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل سریع با یکپارچه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر هواپیمای بدون سرنشین در کاربردهای محصولات کشاورزی، می‌تواند تصویر جامع‌تری ارائه داده و از تصمیم‌گیری آگاهانه حمایت کند (Hu et al., 2023). تصویربرداری فراطیفی، سیگنال‌های طیفی را در یک سری باندهایی با پهنای باند طیفی باریک تشخیص می‌دهد؛ بنابراین، می‌تواند ویژگی‌های طیفی در مقیاس ریز اهداف را پایش کند (Weiss et al., 2020). از شاخص‌های پوشش گیاهی برای تجزیه و تحلیل سلامت و استرس محصولات کشاورزی استفاده می‌کنند (Solberg et al., 2004). تجزیه و تحلیل تنش کشاورزی بیشتر بر کارایی رشد متمرکز است. همچنین تنش خشکی یکی از بحرانی‌ترین تنش‌های محیطی است که باعث کاهش بهره‌وری محصول می‌شود (Azmat et al., 2020). اطلاعات و نقشه‌های تولیدشده

1- Vasculitis Damage Index

2- Spectral Angle Mapper

و هایپریون با ۲۴۲ باند طیفی استفاده کرده و در پی این اهداف است که عملکرد شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی نسبت به شاخص‌های منفرد در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین (هایپریون) و تصاویر با قدرت تفکیک مکانی خیلی بالا (فراطیفی پهبادی) چگونه است. همچنین، بهبود دقت پایش استرس محصولات کشاورزی در شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی نسبت به شاخص‌های منفرد به چه میزان خواهد بود.

شاخص‌های طیفی به عنوان پرکاربردترین شاخص‌ها در مطالعات پوشش‌های گیاهی از ترکیب چند باند طیفی اپتیکی تولید می‌شوند و حاوی اطلاعات مفیدی در ارتباط با ویژگی‌های بیوفیزیکی و شیمیایی مرتبط با گیاهان هستند. جدول (۱) پنج گروه شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی از این پنج گروه انتخاب شده‌اند. در تمامی معادلات جدول (۱)، اشاره به ضریب انعکاس در سطح زمین بدون واحد است و اعداد بیانگر طول موج باند طیفی مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های طیفی هستند مثلاً  $P_{531}$  بیانگر انعکاس طیفی در طول موج ۵۳۱ نانومتر است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، دو منطقه مجزا مورد مطالعه قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه اول، از استان خوزستان که بخش اعظم کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان و امیرکبیر در اهواز با مساحت تقریبی ۱۲۵۴۱/۳۲ هکتار را تشکیل می‌دهد که در عرض جغرافیایی ۳۱/۳۰۴۴ درجه و طول جغرافیایی ۴۸/۲۶۹۴ درجه قرار گرفته است. کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان و امیرکبیر در اراضی ساحل رودخانه کارون واقع شده و فاصله آن تا اهواز حدود ۷۵ کیلومتر است. متوسط بارندگی و تبخیر سالانه به ترتیب ۱۶۱ و ۳۲۲۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. به‌طور کلی بافت خاک در منطقه سنگین و میزان رس

برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر بررسی کردند و شاخص پوشش گیاهی مقاوم در برابر جوی<sup>۱</sup> را با داده‌های حاصل از تصاویر پهبادی توسعه دادند.

رادوچای و همکاران (Radočaj et al., 2023) به وضعیت شاخص‌های گیاهی در مطالعات کشاورزی دقیق که مروری بر مطالعات انجام شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ بود، پرداختند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که شاخص‌های اختلاف تفاضل نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل شده<sup>۲</sup> به عنوان شاخص‌های پوشش گیاهی غالب، تعیین می‌شوند.

روش‌های گوناگونی برای تشخیص استرس محصولات کشاورزی در اثر عوامل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همه روش‌های شاخص مبنای مطالعات پوشش گیاهی و پایش محصولات کشاورزی از شاخص‌های گیاهی به صورت انفرادی استفاده کرده‌اند، در صورتی که هر شاخصی خصوصیات منحصری داشته و نمی‌تواند همه خصوصیات گیاهی را مد نظر قرار دهد. بدیهی است هر شاخصی بخشی از خصوصیات پوشش گیاهی را بیان می‌کند و از بیان دیگر خصوصیات نقصان دارد، لذا ترکیب گروه‌های مختلف پوشش گیاهی با حفظ خصوصیات منحصر به فرد هر شاخص همه خصوصیات پوشش گیاهی را مد نظر قرار می‌دهند. هدف از این مطالعه بهره‌گیری از ترکیب شاخص‌ها از گروه‌های مختلف، شاخص‌های سبزینگی، شاخص‌های رشد و رنگدانه‌های برگ گیاهان و شاخص‌های رطوبت سطح برگ با استفاده از داده‌های سنجش از دور فراطیفی و پهبادی در جهت پایش مناطق ریسک‌پذیر و استرس محصولات کشاورزی است. دلیل اصلی استفاده از روش ترکیب شاخص‌ها این هست که در این روش از گروه‌های مختلف شاخص‌ها با خصوصیات متفاوت که هر یک پتانسیل و کارایی خاص خود را دارد، در کنار هم قرار گرفته و یک ترکیب با دقت و کارایی بالا را در پایش محصولات کشاورزی شکل می‌دهند. برای همین منظور، از داده‌های فراطیفی پهبادی با ۲۷۰ باند طیفی

1- Atmospherically Resistant Vegetation Index

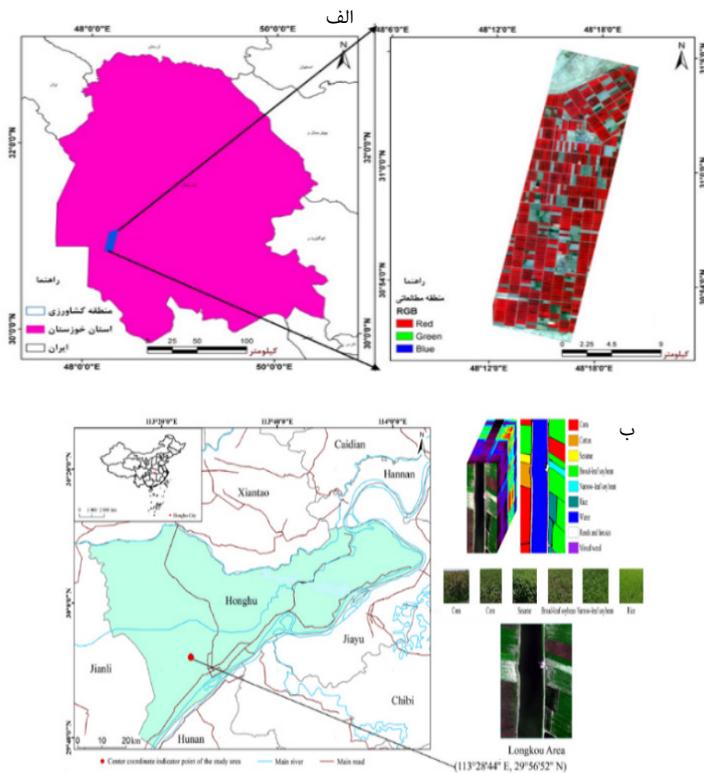
2- A soil-adjusted vegetation index

جدول ۱: پنج گروه شاخص‌های منفرد مورد استفاده در این تحقیق

گروه شاخص‌ها	رابطه	شاخص	الگوریتم	مرجع
Leaf Pigment Indices	(۱)	Atmospherically Resistant Index 1	$ARI1 = \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}}$	(Gitelson et al., 2001)
	(۲)	Atmospherically Resistant Index 2	$ARI2 = \rho_{800} \left[ \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}} \right]$	(Kaufman & Tanre, 1992)
	(۳)	Canopy Chlorophyll Content Index1	$CRI1 = \frac{1}{\rho_{510}} - \frac{1}{\rho_{550}}$	(Gitelson et al., 2001)
	(۴)	Canopy Chlorophyll Content Index2	$CRI2 = \frac{1}{\rho_{510}} - \frac{1}{\rho_{700}}$	(Gitelson et al., 2001)
	(۵)	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	(Radočaj et al., 2023)
Broadband Greenness Indices	(۶)	Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2.5 * \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + 6 * \rho_{RED} - 7.5 * \rho_{Blue} + 1)}$	(Moharana & Dutta, 2019)
	(۷)	Simple Ratio	$\rho_{RED} \rho_{RED} / \rho_{NIR} \rho_{NIR} = SR$	(Omran, 2018)
Narrowband Greenness Indices	(۸)	anthocyanin reflectance index	$ARI = \left( \frac{1}{\rho_{20}} \right) - \left( \frac{1}{\rho_{35}} \right)$	(Moharana & Dutta, 2019)
	(۹)	Red Edge Normalize Difference Vegetation Index	$RENDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red\_edge}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red\_edge}}$	(Kayet et al., 2019)
Canopy Water Content Indices	(۱۰)	Moisture Stress Index	$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}}$	(Omran, 2018)
	(۱۱)	Normalized Difference Infrared Index (NDII)	$NDII = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{819} + \rho_{1649}}$	(Wilson & Norman, 2018)
	(۱۲)	Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1241}}{\rho_{857} + \rho_{1241}}$	(Omran, 2018)
Light Use Efficiency Indices	(۱۳)	Leaf Chlorophyll Index	$LCI = \frac{\rho_{850} - \rho_{710}}{\rho_{850} + \rho_{68}}$	(Hunt Jr et al., 2013)
	(۱۴)	Photochemical Reflectance Index	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	(Thénot et al., 2002)
	(۱۵)	Red Green Ratio Index	$RGRI = \frac{\rho_{RED}}{\rho_{Green}}$	(Wan et al., 2018)
	(۱۶)	Structure Insensitive Pigment Index	$SIPI = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} + \rho_{680}}$	(Tayade et al., 2022)

در شهر جینگژو، استان هوبئی، انتخاب شد که در موقعیت جغرافیایی ۱۱۳ درجه و ۲۸ دقیقه و ۴۴ ثانیه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۵۲ دقیقه و ۵۶ ثانیه شمالی قرار گرفته است.

و سیلت خاک عمدتاً زیاد است (mohammadi et al., 2014). به دلیل عدم وجود تصاویر فرایینی پهپادی در منطقه اول مورد مطالعه، منطقه دوم مورد مطالعه از کشور چین



نگاره ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه الف: تصویر فراتطیفی هایپر یون مزارع نیشکر شهر اهواز،  
ب: تصویر فراتطیفی پهپادی ناحیه کشاورزی در شهر جینگزو چین

به دلیل باندهای غیرکالیبره و نویزی در تصاویر هایپر یون، نهایتاً ۱۴۰ باند طیفی هایپر یون برای تجزیه و تحلیل ریسک محصولات کشاورزی در نظر گرفته شدند. مجموعه داده دوم فراتطیفی پهپادی از کشور چین است: که توسط ژونگ و وانگ و همکارانشان (Wang et al., 2022; Zhong et al., 2020) از مناطق کشاورزی انواع مختلف محصول از طریق سنجنده Headwall Nano-Hyperspec نصب شده بر روی پلت فرم پهپاد با ۲۷۰ باند طیفی بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر به دست آمده است. قدرت تفکیک مکانی تصاویر فراتطیفی پهپاد ۰/۴۳ متر بود که نه نوع محصولات کشاورزی را تشکیل می‌دهند. بدیهی است قبل از محاسبه و استخراج پارامترهای فیزیکی سطح زمین، انجام تصحیح اتمسفری تصاویر ضرورت دارد. برای این منظور از الگوریتم کوئیک<sup>۳</sup> استفاده شد. بعد از

آب و هوای نیمه گرمسیری دارد. مقیاس کاشت محصول کوچک است و تکه تکه شدن زمین در منطقه مورد مطالعه رواج دارد (Lu et al., 2022). مناطق مورد مطالعه در این تحقیق در نگاره‌های (۲ الف و ب) نشان داده شده‌اند.

## ۲-۲- داده های تحقیق و پیش پردازش آنها

مجموعه داده‌های اصلی مورد استفاده در این مطالعه، مجموعه داده تصویر هایپر یون و تصویر فراتطیفی پهپادی<sup>۱</sup> هستند. تصویر فراتطیفی هایپر یون در ۲۳ دسامبر ۲۰۱۳ ماهواره EO-1 از سایت ناسا برای منطقه کشاورزی در خوزستان و از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا اخذ شده است.<sup>۲</sup> این سنجنده دارای ۲۲۴ باند طیفی در ناحیه مادون قرمز نزدیک مرئی تا ناحیه مادون قرمز موج کوتاه هست که

1- WHUH Dataset

2- <https://earthexplorer.usgs.gov/>

3- QUick Atmospheric Correction (QUAC)

جدول ۲: مشخصات کلی از تصاویر فراطیفی پهپادی و ماهواره‌ای

تاریخ	قدرت تفکیک طیفی (نانومتر)	قدرت تفکیک مکانی (متر)	ماهواره / سنجنده	داده
۲۰۱۳,۰۸,۲۳	۱۰ نانومتر (۴۰۰-۱۲۰۰)	۳۰	EO-1- Hyperion	هایپریون
۲۰۱۸,۰۷,۱۸	(۴۰۰-۱۰۰۰)	۰/۴۶	(UAV) Headwall Nano-Hyperspec	پهپادی
داده زمینی			لایه کاربری محصولات کشاورزی منطقه دوم مورد مطالعه	

هستند که به اثرات ترکیبی غلظت کلروفیل شاخ و برگ، سطح برگ تاج پوشش، جمع شدن شاخ و برگ و ساختار تاج پوشش گیاهی حساس هستند. این گروه شاخص‌ها برای ارائه معیاری از مقدار کلی و کیفیت مواد فتوسنتزی در پوشش گیاهی طراحی شده‌اند که برای درک وضعیت پوشش گیاهی در هر منظوری ضروری است و به خوبی با جذب کسری تابش فعال فتوسنتزی (fAPAR) در تاج‌های گیاهی و پیکسل‌های گیاهی همبستگی دارد. افزایش غلظت کلروفیل برگ یا سطح برگ، کاهش تجمع شاخ و برگ، و تغییر در ساختار تاج پوشش هر کدام می‌تواند به کاهش اوج بازتاب پوشش گیاهی در محدوده مادون قرمز نزدیک و افزایش بازتاب در محدوده قرمز کمک کند، در نتیجه باعث افزایش مقادیر سبزی پهنای باند می‌شود. گروه چهارم شاخص‌های محتوای آب تاج پوشش گیاهی هستند. این شاخص‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که اندازه‌گیری مقدار آب موجود در سایبان شاخ و برگ را ارائه می‌دهند. محتوای آب کمیت مهمی از پوشش گیاهی است زیرا محتوای آب بیشتر نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم‌تری است که احتمالاً سریع‌تر رشد می‌کند و در برابر آتش مقاوم‌تر است. محتوای آب سایبان از اندازه‌گیری بازتاب در مناطق مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه مادون قرمز استفاده می‌کند تا از ویژگی‌های شناخته شده جذب آب و عمق نفوذ نور در ناحیه مادون قرمز نزدیک برای اندازه‌گیری یکپارچه محتوای کل آب ستون استفاده کند. گروه پنجم شاخص‌های بهره‌وری استفاده از نور و رشد گیاهان را ارائه می‌کنند. این شاخص‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که معیاری از کارایی را ارائه می‌کنند که پوشش گیاهی می‌تواند

تصحیح اتمسفری تصاویر، مقادیر انعکاس در سطح زمین به دست می‌آید و تمامی محاسبات لازم بر روی این انعکاس انجام می‌گیرد. مشخصات کلی از تصاویر فراطیفی پهپادی و ماهواره‌ای در جدول (۲) نشان داده شده است.

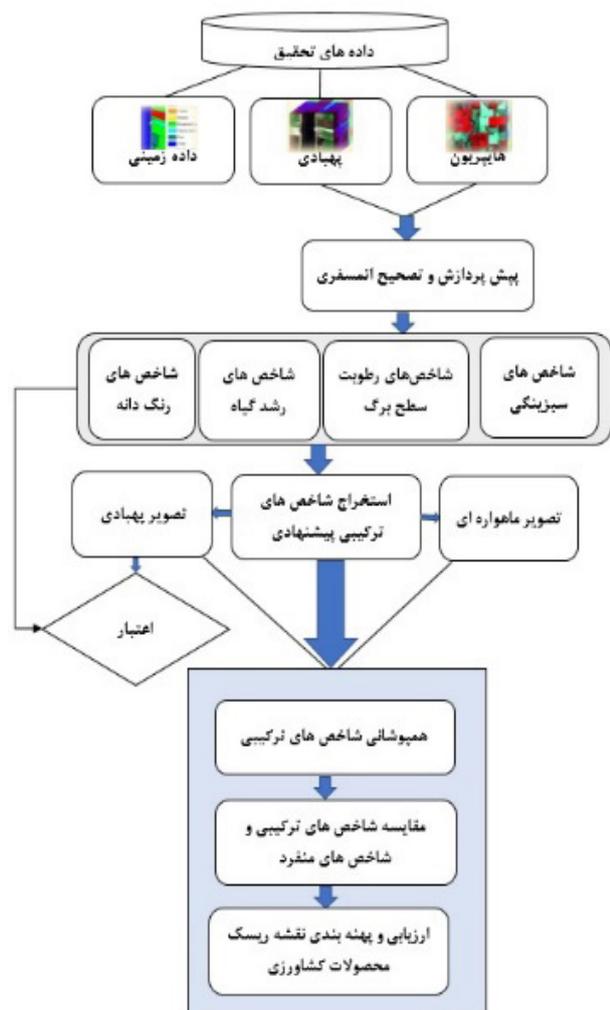
### ۲-۳- روش تحقیق

در این پژوهش، ابتدا شاخص‌های منفرد به صورت مجزا و سپس شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی، روی هر دو تصویر ماهواره‌ای و پهپادی به کار گرفته شدند. جدول (۱) پنج گروه شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی از این پنج گروه انتخاب شده‌اند. در گروه اول، شاخص‌های رنگدانه‌های برگ هستند که برای اندازه‌گیری رنگدانه‌های مربوط به استرس موجود در پوشش گیاهی طراحی شده‌اند. رنگدانه‌های مرتبط با استرس شامل کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها هستند که در غلظت‌های بالاتر در پوشش گیاهی ضعیف وجود دارند. کاروتنوئیدها در فرآیندهای جذب نور در گیاهان و همچنین در محافظت از گیاهان در برابر اثرات مضر شرایط نور بالا عمل می‌کنند. آنتوسیانین‌ها رنگدانه‌های محلول در آب هستند که در برگ‌ها و برگ‌های تازه تشکیل شده به وفور یافت می‌شوند. کاربردهای رنگدانه برگ شامل نظارت بر محصول، مطالعات اکوسیستم، تجزیه و تحلیل تنش تاج پوشش و کشاورزی دقیق هستند. رنگدانه‌های استرس می‌توانند وجود تنش گیاهی را نشان دهند، اغلب قبل از اینکه با چشم غیرمسلح قابل مشاهده باشند. گروه دوم و سوم شاخص‌های سبزی‌نگی باندهای باریک و پهنای باند هستند، این شاخص‌ها ترکیبی از اندازه‌گیری‌های بازتابی

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( ۳۳ )

ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک‌پذیر ... / ۸۳

کشاورزی پایدار، و پایش تغییرات اقلیمی حیاتی هستند. سپس، با ترکیب شاخص‌های گیاهی محصولات کشاورزی، منطقه مورد مطالعه را از لحاظ ریسک‌پذیری در چهار کلاس مختلف؛ بدون استرس، استرس کم، استرس متوسط و استرس بالا تقسیم‌بندی کرده و سپس نتایج حاصل در هر مرحله با وزن‌های مساوی ترکیب شده و نقشه نهایی مناطق ریسک‌پذیر محصولات کشاورزی حاصل شده است. مراحل مختلف روش تحقیق در نگاره (۲) نشان داده شده است.



نگاره ۲: فرآیند اجرای تحقیق

از نور فرودی برای فتوسنتز استفاده کند. راندمان استفاده از نور به شدت با راندمان جذب کربن و نرخ رشد رویشی مرتبط است و تا حدودی با جذب کسری پرتوهای فعال فتوسنتزی (fAPAR) مرتبط است. این شاخص‌ها به تخمین نرخ رشد و تولید کمک می‌کنند که در کشاورزی دقیق مفید است و از اندازه‌گیری بازتاب در طیف مرئی استفاده می‌کنند تا از روابط بین انواع رنگدانه‌های مختلف برای ارزیابی کارایی کلی استفاده از نور در پوشش گیاهی استفاده کنند.

در تحقیق حاضر، ترکیبی از این پنج گروه شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب شاخص‌ها به دلیل جبران محدودیت‌های هر شاخص توسط دیگر شاخص‌ها، باعث کاهش خطا و افزایش دقت در تولید نقشه‌های موضوعی پوشش گیاهی شده است. شاخص‌های ترکیبی قادرند پارامترهای متنوعی مانند سلامت گیاه، تنش آبی، محتوای کلروفیل، و رطوبت سطح برگ را همزمان ارزیابی کنند. در حالی که بیشتر شاخص‌های منفرد تنها حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی را شناسایی می‌کنند و قادر به تشخیص تنش‌ها به تنهایی نیستند. همچنین در مناطق با پوشش گیاهی تنک، روش‌های ترکیبی معمولاً عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های منفرد دارند. این انعطاف‌پذیری باعث می‌شود ترکیب شاخص‌ها برای پهنه‌های متنوع جغرافیایی مناسب باشد. علاوه بر آن انتظار می‌رود ترکیب شاخص‌ها در پایش تغییرات پوشش گیاهی نتایج قابل اعتمادتری ارائه دهد و این نتایج برای برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت منابع طبیعی حیاتی است. همچنین در پژوهش‌هایی که از داده‌های پهبادها با قدرت تفکیک مکانی سانتی‌متری استفاده شده، حتی تغییرات جزئی در سلامت گیاهان (مانند زردی برگ‌ها) قابل شناسایی هستند، که برای مدیریت سریع استرس‌های تغذیه‌ای گیاهان مفیدند. لذا در این تحقیق انتظار می‌رود شاخص‌های ترکیبی با ادغام داده‌های چندمنظوره، نه تنها دقت و قابلیت اطمینان را افزایش دهند، بلکه امکان تحلیل جامع‌تری از اکوسیستم‌های پیچیده پوشش گیاهی را فراهم کنند. این مزیت‌ها به ویژه در مدیریت جنگل‌ها،

### ۳- نتایج و بحث

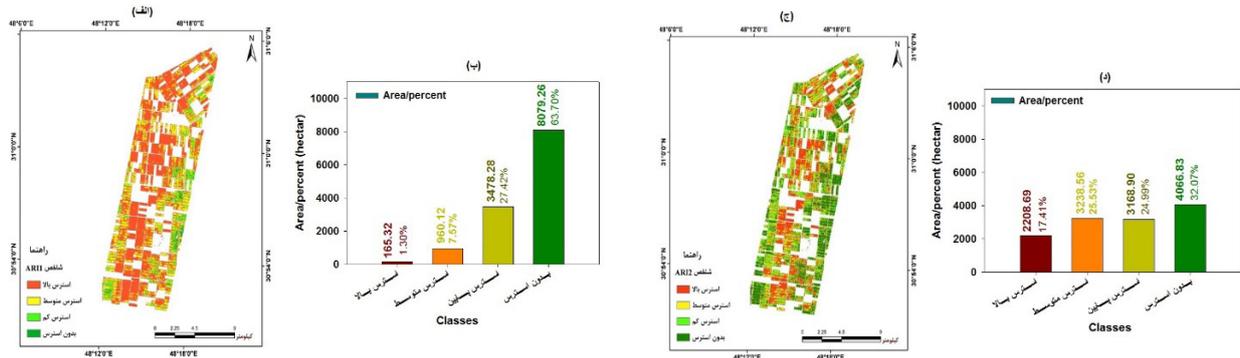
#### ۳-۱- پهنه‌بندی استرس رنگ‌دانه سطح برگ با شاخص‌های منفرد

شاخص‌های رنگ‌دانه‌های برگ معیاری از رنگ‌دانه‌های مرتبط با تنش را ارائه می‌دهند که در غلظت‌های بالاتر در پوشش گیاهی ضعیف وجود دارند. این شاخص‌ها کلروفیل را که با استفاده از شاخص‌های سبزی‌نگی اندازه‌گیری می‌شود، اندازه‌گیری نمی‌کنند.

از جمله این شاخص‌ها، شاخص بازتاب آنتوسیانین (ARI1)، شاخص بازتاب کاروتنوئیدی (CRI1) و شاخص انعکاس کاروتنوئیدی (CRI2) هستند. آنتوسیانین‌ها رنگ‌دانه‌های تازه‌ای دارند که به‌صورت لایه بر روی برگ‌های درحال

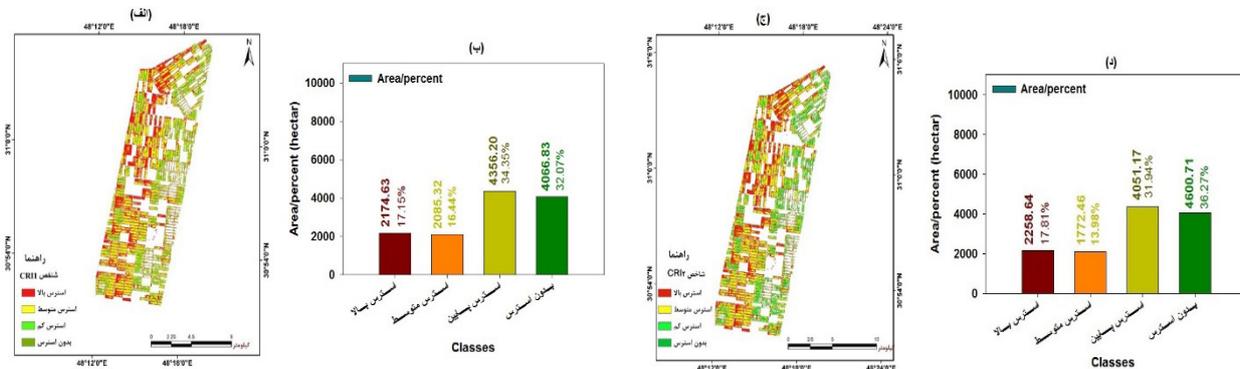
مرگ یا پیری آنتوسیان تشکیل می‌شوند. پوشش گیاهی دارای استرس و مرگ، حاوی غلظت بیشتری از آنتوسیانین است، به همین دلیل، این شاخص یکی از معیارهای پوشش گیاهی تحت تنش است (Gitelson et al., 2001). نگاره‌های (۳) و (۴) پهنه‌بندی استرس رنگ‌دانه سطح برگ با شاخص‌های منفرد را نشان می‌دهند. برای افزایش دقت شاخص‌ها مناطق آب و بایر ماسک شده و سپس شاخص‌ها محاسبه شدند.

با توجه به نتایج حاصل از شاخص‌های منفرد استرس رنگ‌دانه سطح برگ در تصویر هایپریون، که عمدتاً محصول ذرت بوده، بیانگر این است که قسمت‌های غربی این دو کشت و صنعت دارای استرس بیشتری هستند. این شاخص‌های منفرد مذکور، بر روی تصویر فراطیفی پهنه‌بندی هم محاسبه شدند.



نگاره ۳: نقشه شاخص‌های منفرد استرس رنگ‌دانه برگ در تصویر هایپریون، الف و ب) شاخص ARI1،

#### ج و د) شاخص ARI2

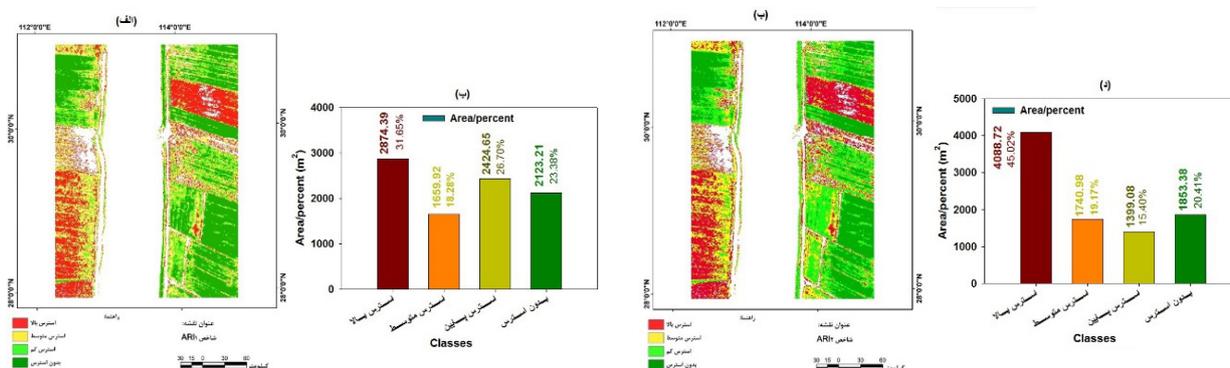


نگاره ۴: نقشه شاخص‌های منفرد استرس رنگ‌دانه برگ در تصویر هایپریون، الف و ب) شاخص CRI1،

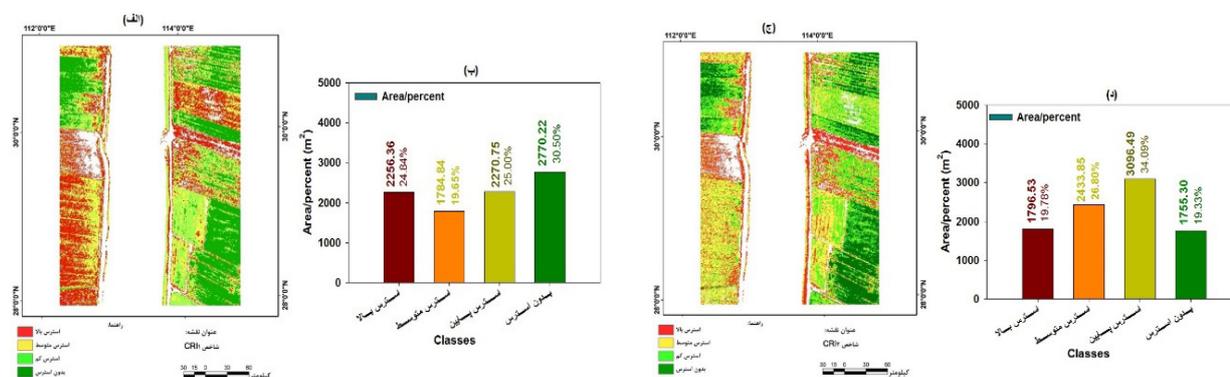
#### ج و د) شاخص CRI2

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)

ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک پذیر ... / ۸۵



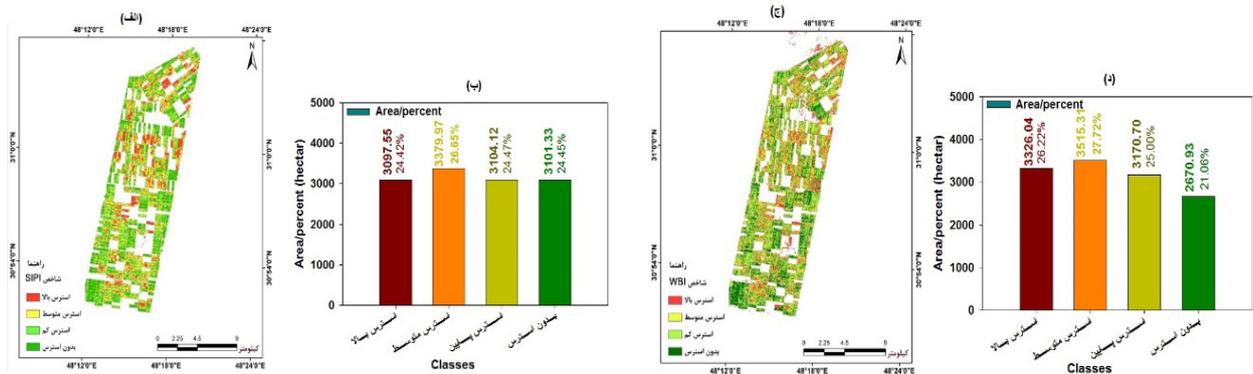
نگاره ۵: نقشه استرس شاخص‌های منفرد رنگ‌دانه برگ در تصویر پهپادی، الف و ب) شاخص ARI، ج و د) شاخص ARI2



نگاره ۶: نقشه استرس شاخص‌های منفرد رنگ‌دانه برگ در تصویر پهپادی، الف و ب) شاخص CRI1، ج و د) شاخص CRI2

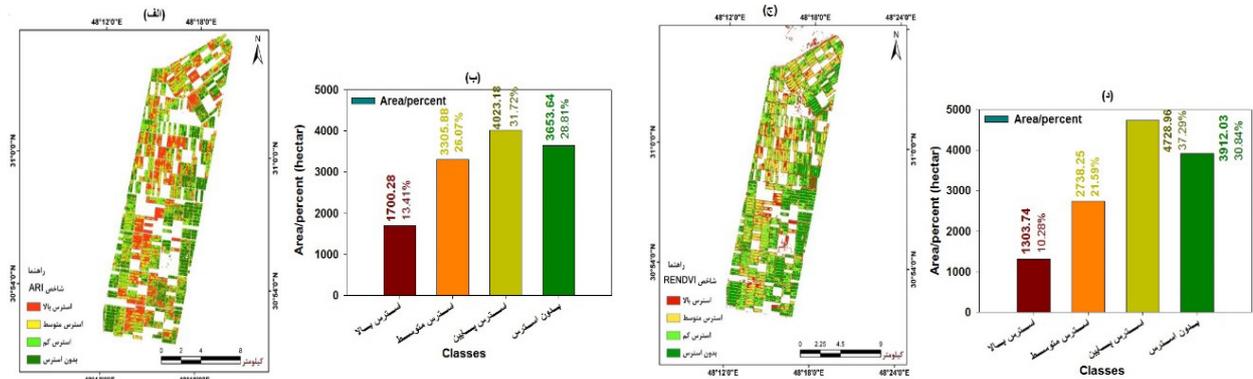
۳-۱-۱- استرس آبی - خشکی با شاخص‌های منفرد این شاخص‌های پوشش گیاهی اندازه‌گیری مقدار آب موجود در شاخ و برگ را ارائه می‌دهند. محتوای آب برگ با اندازه‌گیری بازتاب در مناطق مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه مادون قرمز تعیین می‌شود؛ که از ویژگی‌های جذب آب و عمق نفوذ نور در ناحیه مادون قرمز نزدیک برای اندازه‌گیری یکپارچه محتوای کل آب استفاده می‌کند. برای تهیه نقشه پهنه‌بندی مناطق استرس آبی در منطقه مورد مطالعه از پنج شاخص منفرد مختلف استفاده شده است (Moharana & Dutta, 2019).

تصویر فراطیفی پهپادی از یک منطقه کشاورزی دارای انواع مختلف محصولات پنبه، سویا (پهن برگ و نازک برگ) برنج، جاده‌ها و خانه‌ها و علف هرز مخلوط است و همچنین مناطق مرکزی تصویر در طرف راست و چپ رودخانه در واقعیت زمینی نیز مناطق کم تراکم است. در شاخص آنتوسیانین و کارتونید نوع یک، نسبت به دو مساحت بیشتری از تصویر را با منطقه دارای استرس مشخص می‌کند. مناطق بارنگ قرمز مناطق دارای استرس بالا و سبز تیره مناطق سالم و بدون استرس هستند. نگاره‌های (۵ و ۶) نقشه شاخص‌های مستخرج در تصویر فراطیفی پهپادی را نشان می‌دهند.



نگاره ۷: نقشه شاخص‌های منفرد استرس آبی در تصویر هایپریون، الف و ب) شاخص SIPI،

ج و د) شاخص WBI



نگاره ۸: نقشه شاخص‌های منفرد استرس آبی در تصویر هایپریون، الف و ب) شاخص ARI،

ج و د) شاخص RENDVI

دارای استرس بالایی هستند که اکثراً در مناطق با استرس متوسط و بالا قرار گرفته‌اند. همچنین این شاخص‌های منفرد استرس آبی در تصویر فرایفی پهبادی انجام گرفت که نتایج حاصل و متوسط شاخص‌ها در نگاره‌های (۱۰ تا ۱۳) نشان داده شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند که مناطق دارای استرس بالا بیشتر منطبق بر محصول ذرت (سمت راست بالا) و سویا (ریز برگ) و محصول پنبه در بخش سمت چپ مرکز تصویر که منطبق با نواحی دارای استرس است. آخرین شاخص منفرد مورد استفاده، شاخص کلروفیل (LCI) از سه محدوده بانندی در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده می‌کند که باعث می‌شود در تعیین محتوای کلروفیل و سلامت گیاه دقیق‌تر عمل کند.

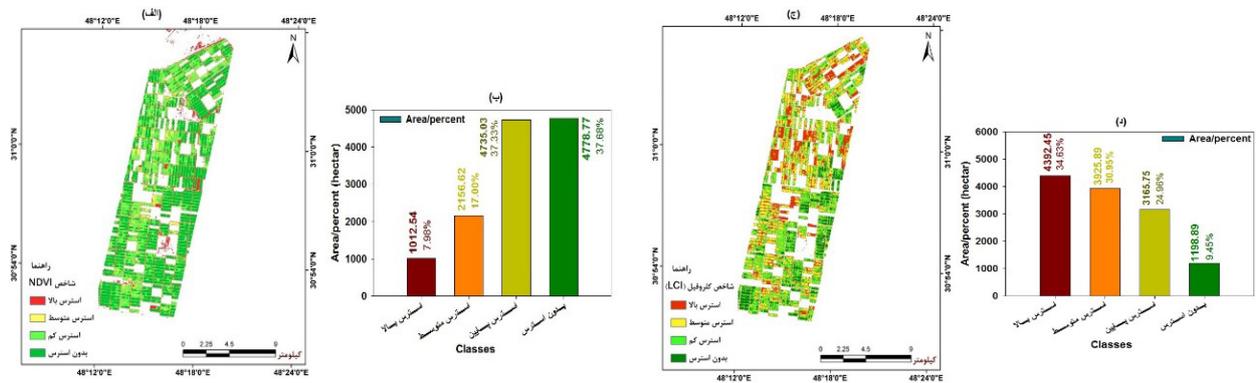
شاخص‌های رنگ‌دانه غیرحساس به ساختار گیاه<sup>۱</sup> که با این شاخص‌ها یک اندازه‌گیری بازتابی انجام می‌شود و برای به حداکثر رساندن حساسیت به نسبت کاروتنوئیدهای حجیم به کلروفیل طراحی شده‌اند و درعین حال حساسیت به تغییر در ساختار تاج پوشش را کاهش می‌دهند. افزایش مقدار بازتاب این شاخص‌ها نشان‌دهنده افزایش تنش تاج پوشش (رنگ‌دانه کاروتنوئید) است (Gerhards et al., 2019). نتایج این شاخص‌های منفرد، مناطق دارای استرس آبی و خشکی در تصویر هایپریون در نگاره‌های (۷ تا ۹) نشان داده شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند که مناطق مرکزی کشت و صنعت به صورت شمالی جنوبی نسبت به بخش‌های دیگر منطقه

1- Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)

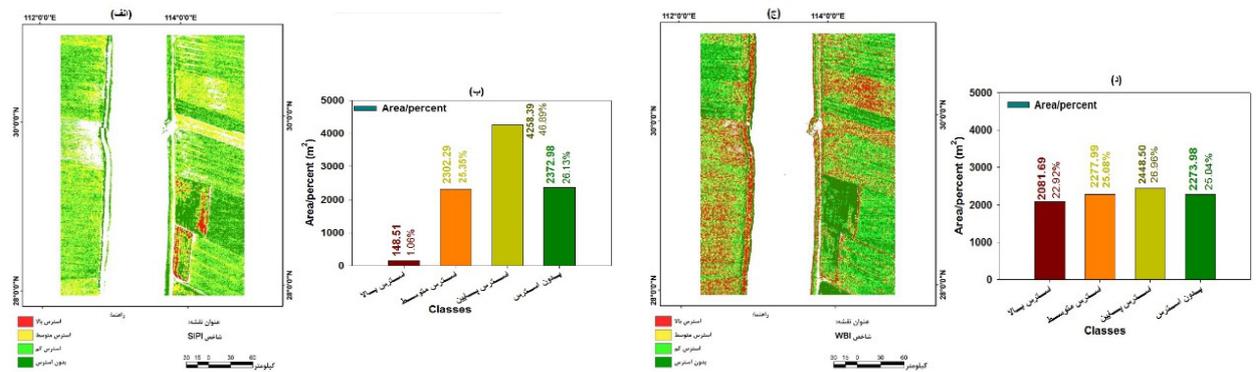
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک پذیر ... / ۸۷



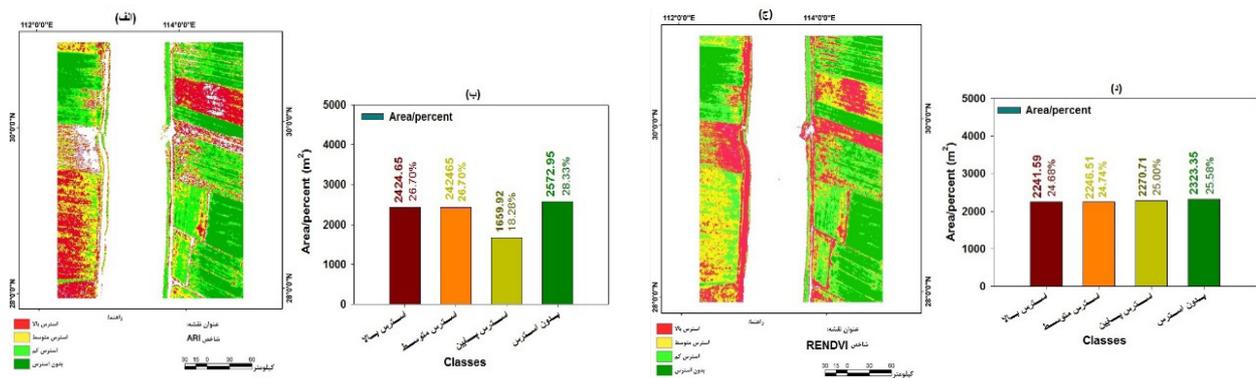
نگاره ۹: نقشه شاخص‌های منفرد استرس آبی در تصویر هایپریون، الف و ب) شاخص NDVI،

ج و د) شاخص LCI



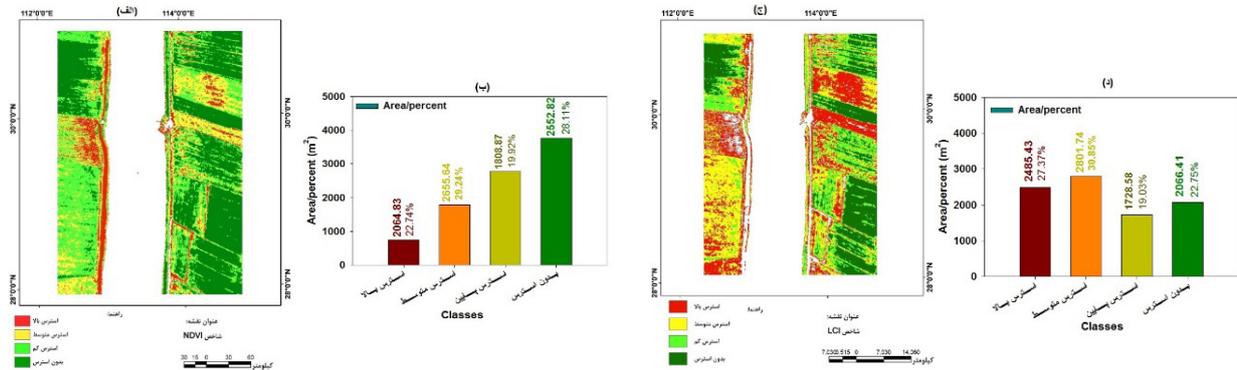
نگاره ۱۰: نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های منفرد استرس آبی و خشکی در تصویر فراطیفی پهبادی، الف و ب) شاخص SPII،

ج و د) شاخص WBI



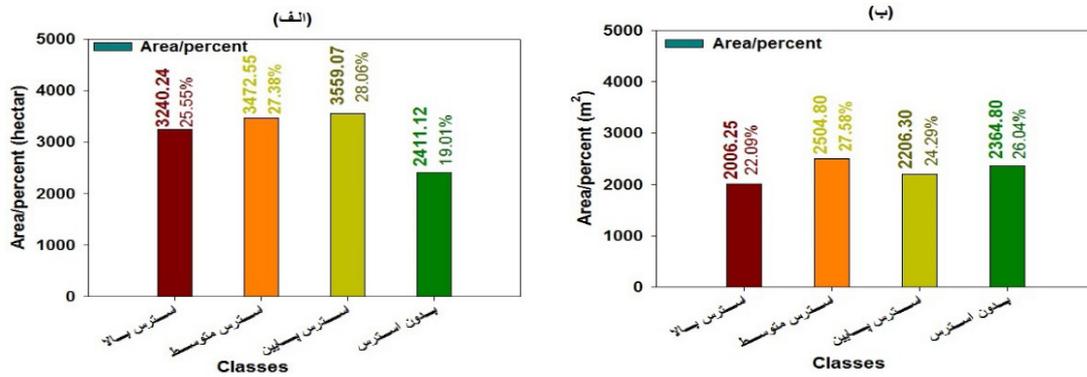
نگاره ۱۱: نقشه شاخص‌های منفرد استرس آبی در تصویر پهبادی، الف و ب) شاخص ARI،

ج و د) شاخص RENDVI



نگاره ۱۲: نقشه شاخص منفرد استرس آبی در تصویر فراطیفی پهبادی، (الف و ب) شاخص NDVI،

ج و د) شاخص LCI



نگاره ۱۳: متوسط آماری شش شاخص منفرد، (الف) در تصویر فراطیفی هایپریون، (ب) در تصویر پهبادی

### ۲-۳- پهنه‌بندی استرس محصولات کشاورزی با شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی

در این بخش از شاخص‌های ترکیبی مختلف با ویژگی‌های متفاوت برای استخراج استرس محصولات کشاورزی استفاده شده است. شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی از پنج گروه جدول (۱) انتخاب و برای هر دو تصویر هایپریون و پهبادی ارائه شده است. شاخص ترکیبی پیشنهادی با علامت اختصاری MNWA2 از ترکیب سه شاخص (MRENDVI، WBI، ARIC2) و شاخص ترکیبی MNWC2 از ترکیب سه شاخص (MRENDVI، WBI، ARIC2) تشکیل شده است. در شاخص‌های ترکیبی؛ شاخص اولی سبزینگی گیاه، شاخص دومی محتوای آب برگ و سومی رنگ‌دانه سطح

همچنین شاخص تفاوت عادی شده لبه قرمز نسبت به شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده مساحت بیشتری را با استرس بالا نشان می‌دهد و این به این دلیل است که از طول موج نزدیک به نور مرئی استفاده می‌کند که این تغییر در بازتاب در بخش مرئی طول موج زودتر از بخش مادون قرمز مشخص می‌شود. درحالی‌که شاخص رنگ‌دانه غیرحساس به ساختار که مناطق با استرس بالا را فقط در محصول برنج تشخیص داده است و مناطق با استرس بالا در شاخص‌های دیگر منطبق بر مناطق با استرس متوسط قرار گرفتند. به‌طور کلی هر چه به طرف طول موج‌هایی کوتاه‌تر برویم میزان مناطق با استرس بالا در تصویر بیشتر مشخص می‌شود.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( )

ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک پذیر ... / ۸۹

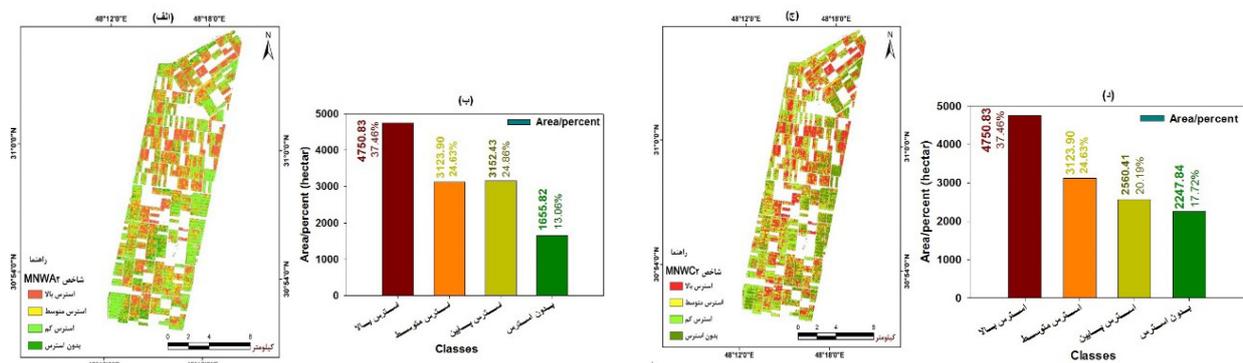
سلامت گیاه و بررسی رشد گیاه بسیار مهم هست. شاخص MRWS (MRNDVI, WBI, SIPI) که از ترکیب اولی شاخص سبزی‌نگی، شاخص باند آب محتوای برگ و شاخص بازتاب بهره‌وری گیاه استفاده شده است.

همچنین این شاخص‌های ترکیبی بر روی تصویر فراطیفی پهپادی به کار گرفته شد.

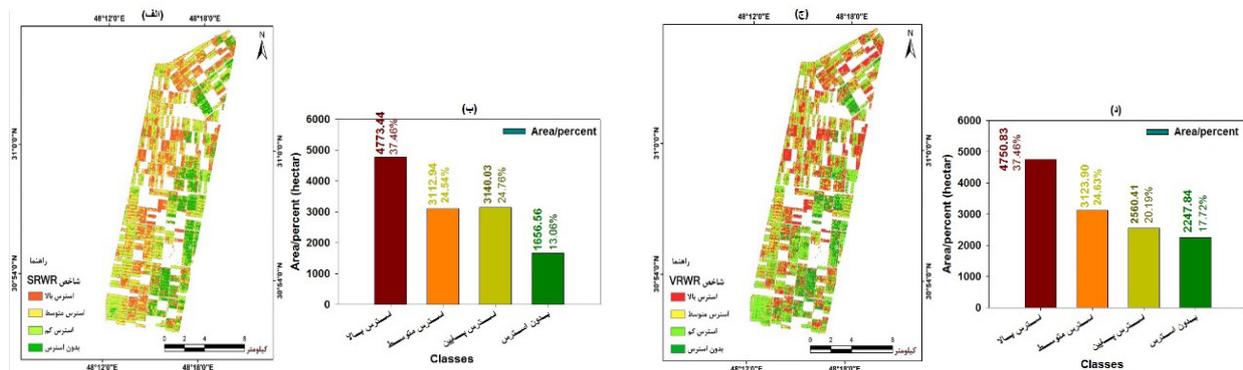
ترکیب این سه شاخص همان‌طور که در بخش تصویر هاپیریون نیز بیان شد، هم گیاه را از جهات مختلف استرس و طول‌موج‌های مختلف بررسی می‌نماید و هم هرگونه استرسی در گیاه ایجاد شده باشد، مشخص می‌شود. نتایج این شاخص‌های ترکیبی و متوسط آن‌ها در نگاره‌های (۱۶ تا ۱۹) منعکس شده است.

برگ را نشان می‌دهد. ترکیب این سه شاخص هم گیاه را از جهات مختلف استرس و طول موج‌های مختلف بررسی می‌نماید و هم هرگونه استرسی در گیاه مشخص می‌شود (نگاره‌های ۱۴ و ۱۵) نتایج شاخص‌های ترکیبی را در تصویر هاپیریون نشان می‌دهند. همچنین نگاره (۱۵) شاخص ترکیبی (VRWR, VREI, WBI, RGRI) و شاخص ترکیبی (SRWR, SR, WBI, RGRI) که اولی شاخص سبزی‌نگی، شاخص باند آب محتوای آب برگ و شاخص بهره‌وری استفاده از نور است که برای نشان دادن سرعت رشد پوشش گیاهی استفاده می‌شود.

ترکیب این شاخص‌ها می‌تواند مناطق متفاوت از نظر مقدار یا غلظت کلروفیل را تشخیص دهد که در پایش

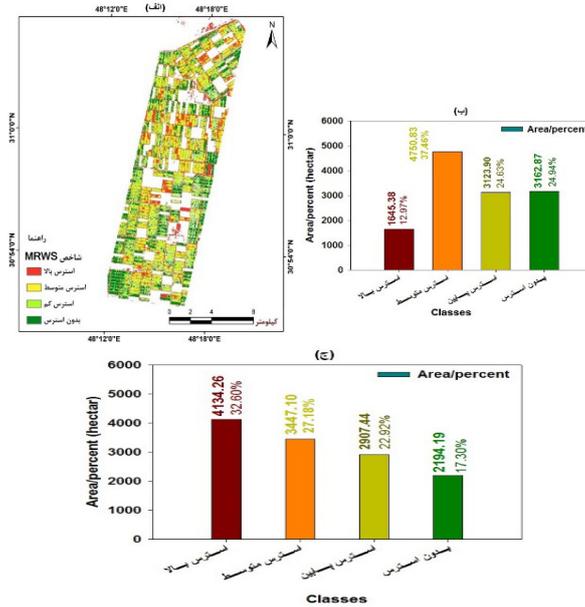


نگاره ۱۴: نقشه شاخص‌های ترکیبی الف و ب) شاخص MNWA2، ج و د) شاخص MNWC2 در تصویر هاپیریون

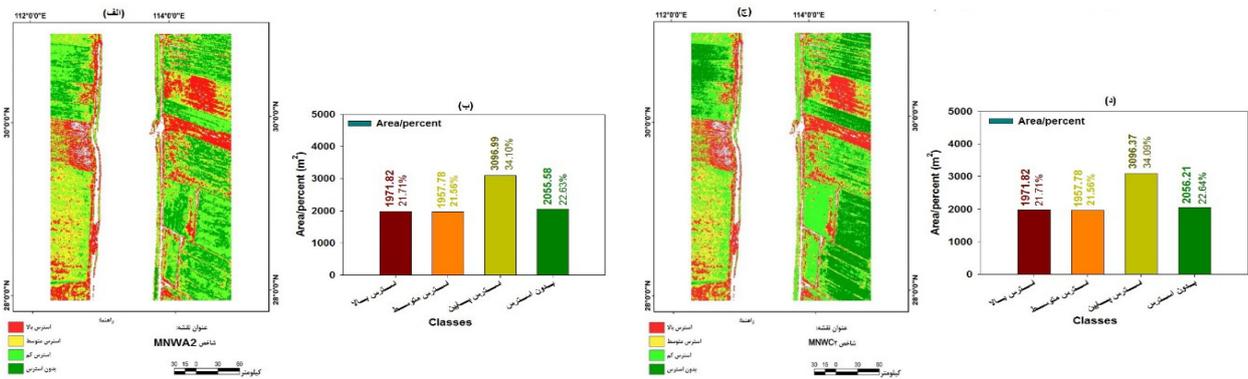


نگاره ۱۵: نقشه شاخص‌های ترکیبی الف و ب) شاخص ترکیبی SRWR،

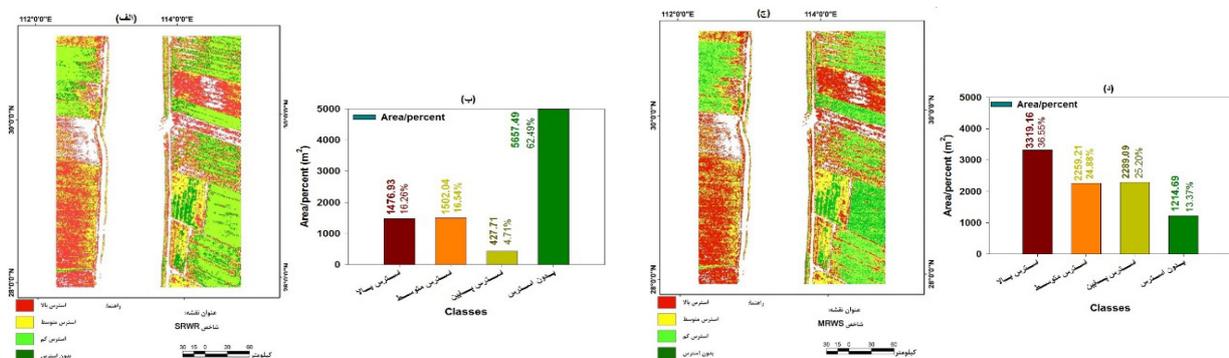
ج و د) شاخص ترکیبی VRWR در تصویر هاپیریون



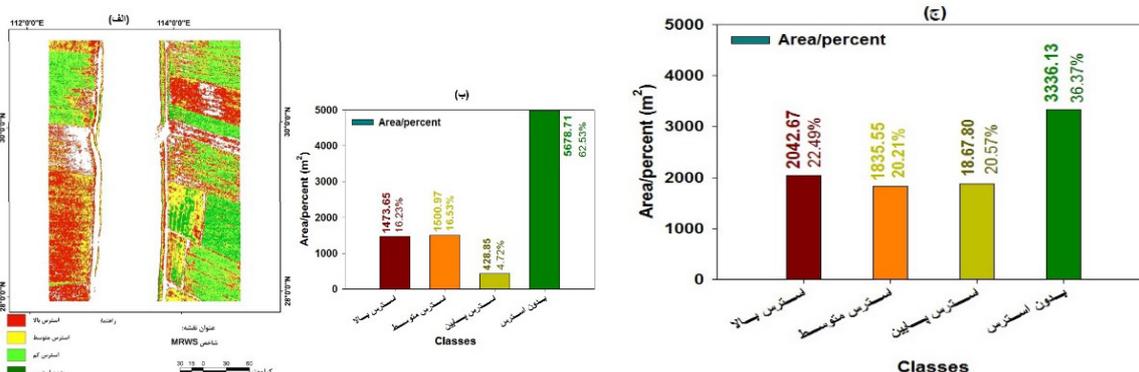
نگاره ۱۶: نقشه شاخص‌های ترکیبی الف و ب) شاخص MRWS، ج) میانگین آماری شاخص‌های ترکیبی در تصویر هایپرین



نگاره ۱۷: نقشه شاخص‌های ترکیبی الف و ب) شاخص MNWA2، ج و د) شاخص MNWC2 در تصویر فرایندی پهبادی



نگاره ۱۸: نقشه شاخص‌های ترکیبی الف و ب) شاخص SRWR، ج و د) شاخص ترکیبی VRWR در تصویر فرایندی پهبادی



نگاره ۱۹: نقشه شاخص‌های ترکیبی الف و ب) شاخص MRWS، ج) میانگین آماری شاخص‌های ترکیبی در تصویر پهپادی

که در آن،  $RAM$  مربوط به مقدار هر پیکسل از پتانسیل در نقشه نهایی مناطق ریسک‌پذیر محصولات کشاورزی در منطقه مورد مطالعه است.  $W_i$  برابر با وزن هر نقشه است که به‌طور مساوری در نظر گرفته شد و  $X_i$  مقدار هر پیکسل در نقشه داده را بر اساس رتبه بندی آن نشان می‌دهد.

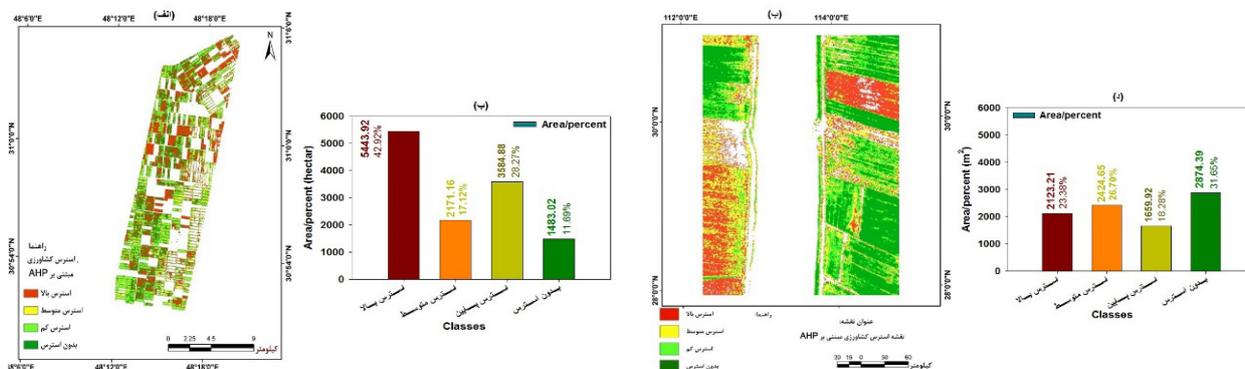
نگاره (۲۰) نقشه پهنه‌بندی میانگین ریسک‌پذیری محصولات کشاورزی از کلیه شاخص‌های ترکیبی را در تصویر هایپریون و تصویر فراطیفی پهپادی نشان می‌دهد.

نتیجه نهایی حاصل از مطالعه مورد نظر در زمینه بررسی ریسک محصولات کشاورزی در نگاره (۲۰) نشان داده شده است. خروجی‌های به دست آمده نشان دهنده این هستند که روش ترکیب شاخص‌ها نتایج بهتری را ارائه کرده و از پتانسیل و کارایی بیشتری نسبت به روش شاخص‌های مفرد در زمینه بررسی ریسک‌پذیری محصولات کشاورزی

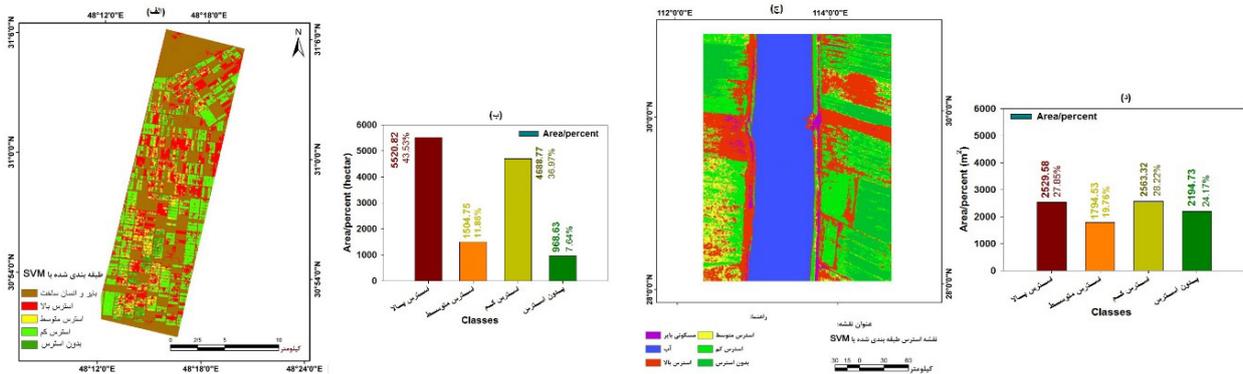
شاخص ترکیبی MRWS (MRNDVI, WBI, SIPI) نیز برای استخراج مناطق دارای استرس کارایی خوبی دارد این ترکیب گسترش بیشتری از استرس محصولات کشاورزی را نشان می‌دهد که در تصویر پهپاد مناطق کشت ذرت نسبت به شاخص‌های دیگر و همچنین در محصول ذرت در هایپریون گسترش بیشتری دارند. به‌منظور دستیابی به یک نقشه نهایی از مناطق ریسک‌پذیر منطقه مورد مطالعه، شاخص‌های ترکیبی استخراج شده با نقشه زمینی تصویر پهپادی مورد مقایسه قرار گرفتند. نهایت نقشه نهایی به‌صورت میانگین وزن دار با وزن‌های مساوی با استفاده از رابطه (۱۷) ایجاد شد.

$$Risky Agricultural Map (RAM) = \sum_{i=1}^n \frac{(W_i \times X_i)}{W_i}$$

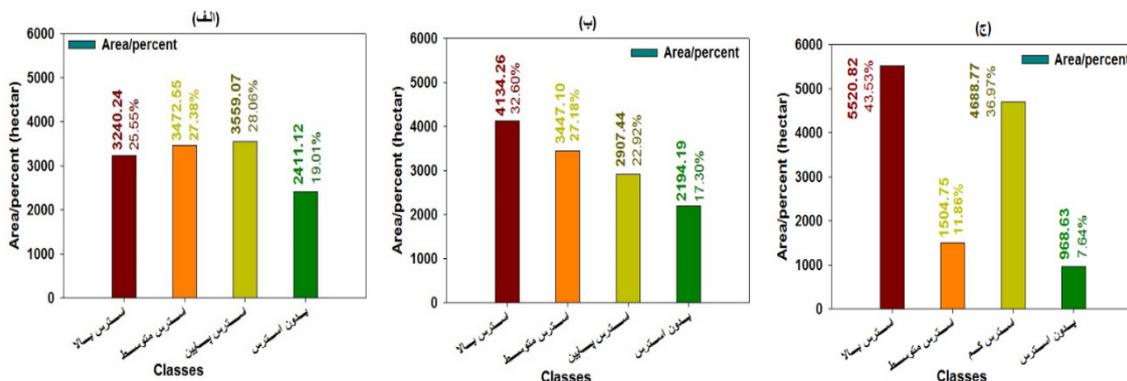
رابطه (۱۷)



نگاره ۲۰: نقشه نهایی ریسک‌پذیری محصولات کشاورزی از شاخص‌های ترکیبی، الف) تصویر هایپریون، ب) تصویر پهپادی



نگاره ۲۱: نقشه حاصل از طبقه‌بندی با الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان، الف و ب) تصویر هایپریون، ج و د) تصویر پهپادی



نگاره ۲۲: متوسط نتایج استرس محصولات کشاورزی در تصویر هایپریون، الف) شاخص‌های منفرد،

ب) شاخص‌های ترکیبی، ج) نتایج طبقه‌بندی

برخوردار هستند. در مقایسه با نقشه کاربری زمینی تصاویر پهپاد، نتایج بیانگر آن است که محصول ذرت با (۲۰۸۳۵/۸۴ مترمربع) بالاترین مساحت را در طبقه با استرس بالا و محصول کنجد با مساحت (۴۳/۵۲ مترمربع) کمترین مساحت را در طبقه با استرس بالا دارد، درحالی‌که محصولات دیگر درصد پایین در طبقه با استرس بالا قرار دارند.

برای تصویر هایپریون نیز داده‌های تعلیمی با استفاده از ترکیب‌های رنگی کاذب مختلف تصویر و تصاویر گوگل ارث در تاریخ تصویر هایپریون جمع‌آوری و با الگوریتم طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبانی حاصل شد. نگاره (۲۱) الف و ب) نقشه حاصل از طبقه‌بندی با الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان، مساحت و درصد کلاس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همانطور که در نقشه حاصل از طبقه‌بندی نگاره (۲۱) مشاهده می‌شود، تقریباً ۵۵ درصد و ۴۷ درصد به ترتیب در تصویر هایپریون و تصویر فراطیفی پهپادی از هر منطقه مورد مطالعه در سطح ریسک پذیری متوسط به بالا قرار دارند. در ادامه، نتایج حاصل از شاخص‌های منفرد و شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی با نقشه حاصل از طبقه‌بندی نظارت شده مقایسه و اعتبارسنجی شد (نگاره ۲۲).

#### ۴- اعتبارسنجی و مقایسه نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج، به دلیل عدم وجود نقشه تنش محصولات کشاورزی، نقشه کاربری تصویر پهپادی با استفاده از داده تعلیمی اخذ شده نقشه زمینی اخذ شد و با الگوریتم طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبانی<sup>۱</sup> نقشه مورد نیاز حاصل شده و در چهار کلاس مختلف طبقه‌بندی شد.

1- Support vector machines (SVMs) classification

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۹۳)

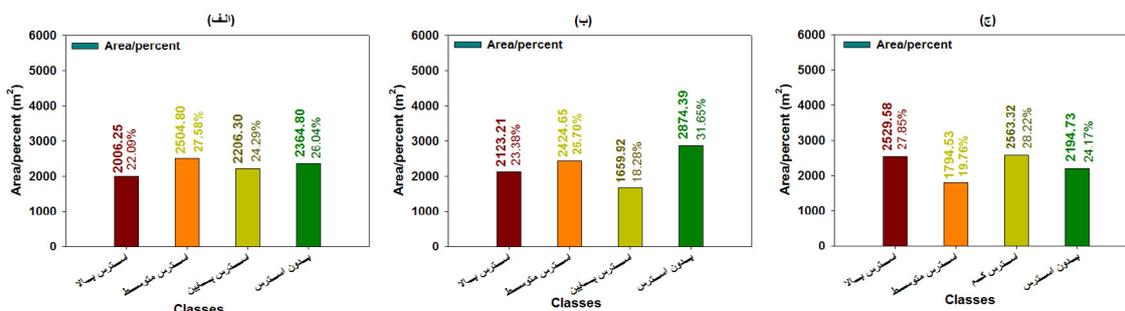
ارائه روش ترکیبی از شاخص‌های گیاهی برای پایش مناطق ریسک پذیر ... / ۹۳

مقایسه نتایج میانگین شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های منفرد در نگاره (۲۲ الف و ب)، با نقشه حاصل از طبقه‌بندی (نگاره ۲۲ ج) نشان می‌دهد که شاخص‌های ترکیبی از دقت بالایی نسبت به شاخص‌های منفرد برخوردارند. مقایسه نتایج روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در تصویر هایپریون در جدول ۳ نیز نشان داده شده است. همچنین، شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های منفرد در تصویر فرایطیفی پهپادی در نگاره (۲۳ الف و ب)، با نقشه حاصل از طبقه‌بندی (نگاره ۲۳ ج) نشان می‌دهند که دقت شاخص‌های ترکیبی نسبت به شاخص‌های منفرد افزایش

محسوسی ندارند. چون قدرت تفکیک مکانی تصویر فرایطیفی پهپادی ۴۳ سانتی‌متر بود، لذا در تشخیص استرس محصولات کشاورزی شاخص‌های منفرد نیز بهتر می‌توانند استرس محصولات کشاورزی را تخمین بزنند. در حالی‌که وقتی قدرت تفکیک مکانی افزایش پیدا می‌کند (در تصویر فرایطیفی هایپریون به ۳۰ متر می‌رسد) شاخص‌های ترکیبی از دقت بالایی نسبت به شاخص‌های منفرد برخوردارند. لذا به‌کارگیری شاخص‌های ترکیبی در تصاویر با قدرت تفکیکی متوسط و پایین (نظیر سنجنده‌های هایپریون، لندست و سنتینل) تا ۴۲ درصد خطای تخمین

جدول ۳: نتایج روش‌ها در تصویر هایپریون

مقایسه نتایج شاخص‌ها	کلاس‌های استرس گیاهی	مساحت (هکتار)	درصد
شاخص‌های منفرد	بالا	۳۲۴۰/۲۴	۲۵/۵۵
	متوسط	۳۴۷۲/۵۵	۲۷/۳۸
	پایین	۳۵۵۹/۰۷	۲۸/۰۶
	بدون استرس	۲۴۱۱/۱۲	۱۹/۰۱
شاخص‌های ترکیبی	بالا	۴۱۳۴/۲۶	۳۲/۶۰
	متوسط	۳۴۴۷/۰۱	۲۷/۱۸
	پایین	۲۹۰۷/۴۴	۲۲/۹۲
	بدون استرس	۲۱۹۴/۱۹	۱۷/۳۰
نتایج نقشه مرجع طبقه‌بندی	بالا	۵۵۲۰/۸۲	۴۳/۵۳
	متوسط	۱۵۰۴/۷۵	۱۱/۸۶
	پایین	۴۶۸۸/۷۷	۳۹/۹۷
	بدون استرس	۹۶۸/۶۳	۷/۶۴



نگاره ۲۳: متوسط نتایج استرس محصولات کشاورزی در تصویر پهپادی، الف) شاخص‌های منفرد، ب) شاخص‌های ترکیبی، ج) نتایج طبقه‌بندی

جدول ۴: مقایسه نتایج روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در تصویر پهپادی

مقایسه نتایج شاخص‌ها	کلاس های استرس گیاهی	مساحت (هکتار)	درصد
شاخص‌های منفرد	بالا	۲۰۰۶/۲۵	۲۲/۰۹
	متوسط	۲۵۰۴/۸۰	۲۷/۵۸
	پایین	۲۲۰۶/۳۰	۲۴/۲۹
	بدون استرس	۲۳۶۴/۸۰	۲۶/۰۴
شاخص‌های ترکیبی	بالا	۲۱۲۳/۲۱	۲۳/۳۸
	متوسط	۲۴۲۴/۶۵	۲۶/۷۰
	پایین	۱۶۵۹/۹۲	۱۸/۲۸
	بدون استرس	۲۸۷۴/۳۹	۳۱/۶۵
نتایج نقشه مرجع طبقه بندی	بالا	۲۵۲۹/۵۸	۲۷/۸۵
	متوسط	۱۷۹۴/۵۳	۱۹/۷۶
	پایین	۲۵۶۳/۳۲	۲۸/۲۲
	بدون استرس	۲۱۹۴/۷۳	۲۴/۱۷

بیماری‌های گیاهی و میزان سبزی‌نگی با استفاده از داده‌های تصاویر فراطیفی پهپادی با ۲۷۰ باند و هایپریون با ۲۴۲ باند طیفی، با بهره‌گیری از روش پیشنهادی ترکیب شاخص‌های گیاهی مورد پایش و بررسی قرار گیرند. محدوده‌های مورد مطالعه در این پژوهش مناطقی از کشور ایران و چین هستند که از تنوع گیاهی بالایی برخوردار بودند. در این تحقیق، از ترکیب ۱۶ شاخص مختلف سنجنش‌ازدوری با رویکردهای مختلف مورداستفاده قرار گرفته و دو نقشه ریسک‌پذیری محصولات کشاورزی در چهار کلاس با پتانسیل ریسک‌پذیری مختلف استخراج شد. برای اعتبارسنجی نتایج، به دلیل عدم وجود نقشه تنش محصولات کشاورزی، نقشه کاربری تصویر پهپادی با استفاده از داده تعلیمی اخذ شده با الگوریتم طبقه‌بندی ماشین‌های بردار پشتیبان حاصل شد. برای تصویر هایپریون نیز داده‌های تعلیمی با استفاده از ترکیب‌های رنگی کاذب مختلف تصویر و تصاویر گوگل ارث در تاریخ تصویر هایپریون جمع‌آوری شد. مطالعه تحقیقات مختلف روش شاخص‌های منفرد نشانگر این است که شاخص‌های منفرد به ویژگی‌های محیطی حساسیت دارند. از این‌رو شاخص‌های گیاهی منفرد به پارامترهایی مانند رطوبت خاک، تراکم پوشش گیاهی، نوع

مناطق ریسک‌پذیری محصولات گیاهی را کاهش داده و با دقت بهتری پایش مناطق ریسک‌پذیر را رقم می‌زنند. همچنین، مقایسه نتایج روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در تصویر پهپادی در جدول ۴ نیز نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهند در کلاس پریسک، شاخص‌های منفرد تقریباً خطای ۱۸ درصد و شاخص‌های ترکیبی خطای ۱۰ درصدی دارند. لذا به‌کارگیری شاخص‌های ترکیبی تقریباً ۴۲ درصد خطای تخمین مناطق ریسک‌پذیری محصولات گیاهی را کاهش داده و با دقت بهتری پایش مناطق ریسک‌پذیر را رقم می‌زنند. برای مقایسه همین نتایج در تصویر فراطیفی پهپادی که دارای نقشه کاربری زمینی نیز بود نتایج مطابق نگاره (۲۳ الف، ب، ج) حاصل شد.

#### ۵- نتیجه گیری

اگرچه برآورد سلامت محصولات کشاورزی ماهیت بسیار پیچیده‌ای دارد، اما تکنیک‌ها و داده‌های سنجنش از دور می‌توانند در این زمینه بسیار سودمند باشند. در تحقیق حاضر، سعی شده است تا مناطق ریسک‌پذیر محصولات کشاورزی از لحاظ تنش‌های آبی، عدم رشد کافی، آفات و

خطای تخمین مناطق ریسک‌پذیری محصولات گیاهی را کاهش داده و با دقت بهتری پایش مناطق ریسک‌پذیر را رقم می‌زند. در مقابل، تصویر فراطیفی پهبادی با قدرت تفکیک بالا نشان داد که دقت شاخص‌های ترکیبی نسبت به شاخص‌های منفرد افزایش محسوسی ندارند. چون قدرت تفکیک مکانی تصویر فراطیفی پهبادی ۴۳ سانتی‌متر بود، به همین دلیل، در تشخیص استرس محصولات کشاورزی شاخص‌های منفرد نیز بهتر می‌تواند استرس محصولات کشاورزی را تخمین بزند. در حالی که وقتی قدرت تفکیک مکانی افزایش پیدا می‌کند شاخص‌های ترکیبی از دقت بالایی نسبت به شاخص‌های منفرد برخوردارند. بنابراین به‌کارگیری شاخص‌های ترکیبی در تصاویر با قدرت تفکیکی متوسط و پایین تخمین مناطق ریسک‌پذیری محصولات گیاهی را کاهش داده و با دقت بهتری پایش مناطق ریسک‌پذیر را رقم می‌زند.

### تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

### References

- 1- Asokan, A. and Anitha, J., (2019). Change detection techniques for remote sensing applications: A survey. *Earth Science Informatics*, 12: 143-160. doi: 10.1007/s12145-019-00380-5.
- 2- Azmat, A., Yasmin, H., Hassan, M.N., Nosheen, A., Naz, R., Sajjad, M., Ilyas, N. and Akhtar, M.N., (2020). Co-application of bio-fertilizer and salicylic acid improves growth, photosynthetic pigments and stress tolerance in wheat under drought stress. *PeerJ*, 8: e9960. doi: 10.7717/peerj.9960.
- 3- Bhattacharya, S., Halder, S., Nag, S., Roy, P.K. and Roy, M.B., (2021). Assessment of drought using multi-parameter indices. *Advances in water resources management for sustainable use*: 243-255. doi: 10.1007/978-981-33-6412-7\_18.
- 4- D'Odorico, P., Schönbeck, L., Vitali, V., Meusburger, K., Schaub, M., Ginzler, C., Zweifel, R., Velasco,

گونه‌های گیاهی، و اثرات خاک حساس هستند. بنابراین شاخص‌های ترکیبی در این تحقیق با هدف بهبود این کاستی‌های پیشنهاد شده است. در این تحقیق به دلیل عدم وجود داده‌های پهبادی فراطیفی از سایر مناطق، امکان انجام تحقیق در چندین منطقه میسر نشد. بنابراین، برای دستیابی به نتایج دقیق، نیاز به تحقیقات آتی بیشتر در مطالعات ترکیب شاخص‌ها بر اساس مطالعات پیشین در منطقه هدف و آزمایش‌های میدانی بهینه‌سازی شده، وجود دارد.

نتایج نشان داد که به ترتیب در تصویر هایپریون و تصویر فراطیفی پهبادی تقریباً ۵۵ و ۴۷ درصد از هر منطقه مورد مطالعه در سطح ریسک‌پذیری متوسط به بالا قرار داشتند. بیشترین مساحت منطبق با استرس بالا در محصول ذرت و کمترین مناطق با استرس بالا استرس منطبق بر محصول سویا (نازک برگ) بود. نتایج شاخص‌های ترکیبی پیشنهادی نشان داد که شاخص ترکیبی MRWA2 ، MRWC2 دقت خوبی در تشخیص محصولات ریسک‌پذیر داشتند. دلیل این امر می‌تواند استفاده از شاخص سبزی‌نگی، شاخص گیاهی لبه قرمز اصلاح‌شده باند آب و شاخص آنتوسیانین در شاخص‌های ترکیبی باشد که تحت تأثیر ویژگی محصول قرار نمی‌گیرند، فقط مناطقی که محصول دارای استرس است را تشخیص می‌دهند. همچنین، شاخص‌های ترکیبی SRWR و MRWR تقریباً نتایج مشابهی داشتند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های ترکیبی می‌توانند در پایش استرس محصولات کاربرد بسته به نوع و هدف تحقیق به کار گیرند. همچنین، مقایسه نتایج میانگین شاخص‌های ترکیبی و منفرد، با نقشه حاصل از طبقه‌بندی نشان داد که در تصویر فراطیفی هایپریون با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین (۳۰ متر و کمتر) شاخص‌های ترکیبی از دقت بالایی نسبت به شاخص‌های منفرد برخوردارند و تقریباً در کلاس پرریسک، شاخص‌های منفرد دارای خطای ۱۸ درصد و شاخص‌های ترکیبی دارای خطای ۱۰ درصدی هستند. از این رو به‌کارگیری شاخص‌های ترکیبی در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی متوسط و پایین تقریباً ۴۲ درصد

- resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(2): 261-270. doi: 10.1109/36.134076.
- 13- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A., Singh, C., Chowdary, V., Kumar, S. and Sahoo, S., (2019). Forest health assessment for geo-environmental planning and management in hilltop mining areas using Hyperion and Landsat data. Ecological Indicators, 106: 105471. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105471.
- 14- Lu, H., Chen, Y., Huan, H. and Duan, N., (2022). Analyzing cultivated land protection behavior from the perspective of land fragmentation and farmland transfer: Evidence from farmers in rural China. Frontiers in Environmental Science, 10: 901097. doi: 10.3389/fenvs.2022.901097.
- 15- Maes, W.H. and Steppe, K., 2019. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. Trends in plant science, 24(2): 152-164. doi: /10.1016/j.tplants.2018.11.007.
- 16- Masry, A., Furlong, M.J., Clarke, A.R. and Cunningham, J.P., (2018). An improved culturing method for opine fruit fly parasitoids and its application to parasitoid monitoring in the field. Insect science, 25(1): 99-108. doi: 10.1111/1744-7917.12403.
- 17- Mohammadi, S., mirlotfi, M. and akbari, M., (2014). Sugarcane Irrigation Scheduling by Combining Remote Sensing Data and SWAP Model in Mirza-Kuchak-Khan Sugarcane Agro-Industry, Ahwaz, Iran. Journal of Water Research in Agriculture, 28(1): 39-50. doi: 10.22092/jwra.2015.101063. [in Persian].
- 18- Moharana, S. and Dutta, S., (2019). Estimation of water stress variability for a rice agriculture system from space-borne hyperion imagery. Agricultural Water Management, 213: 260-269. doi: 10.1016/j.agwat.2018.10.001.
- 19- Omran, E.-S.E., (2018). Remote estimation of vegetation parameters using narrowband sensor for precision agriculture in arid environment. Egyptian Journal of Soil Science, 58(1): 73-92. doi: 10.21608/EJSS.2018.5614.
- 20- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R. and Jurišić, M., (2023). State of major vegetation indices in V.M.E., Gisler, J. and Gessler, A., (2021). Drone-based physiological index reveals long-term acclimation and drought stress responses in trees. Plant, Cell & Environment, 44(11): 3552-3570. doi: 10.1111/pce.14177.
- 5- Datt, B., (1999). A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves. Journal of plant physiology, 154(1): 30-36. doi: 10.1016/S0176-1617(99)80314-9.
- 6- Eitel, J.U., Gessler, P.E., Smith, A.M. and Robberecht, R., (2006). Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in Populus spp. Forest Ecology and Management, 229(1-3): 170-182. doi: 10.1016/j.foreco.2006.03.027.
- 7- Gerhards, M., Schlerf, M., Mallick, K. and Udelhoven, T., (2019). Challenges and future perspectives of multi-/Hyperspectral thermal infrared remote sensing for crop water-stress detection: A review. Remote Sensing, 11(10): 1240. doi: 10.3390/rs11101240.
- 8- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N. and Chivkunova, O.B., (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. Photochemistry and photobiology, 74(1): 38-45 doi: 10.1562/0031-8655(2001)0740038OPANEO2.0.CO2.
- 9- Hu, L., Zhang, C., Zhang, M., Shi, Y., Lu, J. and Fang, Z., (2023). Enhancing FAIR data services in agricultural disaster: A review. Remote Sensing, 15(8): 2024. doi: 10.3390/rs15082024.
- 10- Hunt Jr, E.R., Doraiswamy, P.C., McMurtrey, J.E., Daughtry, C.S., Perry, E.M. and Akhmedov, B., (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. International journal of applied earth observation and Geoinformation, 21, 103-112. doi: 10.1016/j.jag.2012.07.020.
- 11- Isazade, v., ghanbari, A. and Kamran, K.V., (2022). Evaluation of spectral indices and extraction of constructed and non-constructed urban features and its comparison with ground surface temperature using Landsat 7 and 8 satellite images (Study area, Tehran). Geographical Planning of Space, 11(42): 23-39. doi: 10.30488/GPS.2021.243118.3283. [in Persian].
- 12- Kaufman, Y.J. and Tanre, D., (1992). Atmospherically

Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote sensing of environment*, 236: 111402. doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.

28- Wilson, N.R. and Norman, L.M., (2018). Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI). *International Journal of Remote Sensing*, 39(10): 3243-3274. doi: 10.1080/01431161.2018.1437297.

29- Yousefi, M., Mikaniki, J., Ashrafi, A. and Neysani Samani, N., (2018). Land use Change Detection and Modeling, Using Remote Sensing data, Markov Chains and Cellular Automata (Case Study: City of Bojnord). *Geographical Planning of Space*, 7(26): 1-16. [in Persian].

30- Zhong, Y., Hu, X., Luo, C., Wang, X., Zhao, J. and Zhang, L., (2020). WHU-Hi: UAV-borne hyperspectral with high spatial resolution (H2) benchmark datasets and classifier for precise crop identification based on deep convolutional neural network with CRF. *Remote Sensing of Environment*, 250: 112012. doi: 10.1016/j.rse.2020.112012

precision agriculture studies indexed in web of science: A review. *Agriculture*, 13(3): 707. doi:10.3390/agriculture13030707.

21- Solberg, E.G., Diener, E. and Robinson, M.D., (2004). Why are materialists less satisfied? *Psychology and consumer culture: The struggle for a good life in a materialistic world* (pp. 29-48). American Psychological Association. doi: 10.1037/10658-003.

22- Tayade, R., Yoon, J., Lay, L., Khan, A.L., Yoon, Y. and Kim, Y., (2022). Utilization of spectral indices for high-throughput phenotyping. *Plants*, 11(13): 1712. doi: 10.3390/plants11131712.

23- Thénot, F., Méthy, M. and Winkel, T., (2002). The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23): 5135-5139. doi: 10.1080/01431160210163100.

24- Vasconcelos, J.C.S., Speranza, E.A., Antunes, J.F.G., Barbosa, L.A.F., Christofolletti, D., Severino, F.J. and de Almeida Caçado, G.M., (2023). Development and Validation of a Model Based on Vegetation Indices for the Prediction of Sugarcane Yield. *AgriEngineering*, 5(2): 698-719. doi: 10.3390/agriengineering5020044.

25- Wan, L., Li, Y., Cen, H., Zhu, J., Yin, W., Wu, W., Zhu, H., Sun, D., Zhou, W. and He, Y., (2018). Combining UAV-based vegetation indices and image classification to estimate flower number in oilseed rape. *Remote Sensing*, 10(9): 1484. doi: 10.3390/rs10091484.

26- Wang, Z., Zhao, Z. and Yin, C., (2022). Fine crop classification based on UAV hyperspectral images and random forest. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(4): 252. doi: 10.3390/ijgi11040252.

27- Weiss, M., Jacob, F. and Duveiller, G., (2020).

---

## COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)



