

Original Article



Comparison of Four PLSR, RF, GRNN and SVR Algorithms to Estimate Sugarcane Sheath Moisture During Growing Season Using Sentinel-2 Satellite Imagery

Maryam Soltanikazemi¹, Saeid Minaei^{2*}, Hossein Shafizadeh Moghadam³, Ali Reza Mahdavian⁴

Affiliation

1. PhD Student in Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Professor of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,
3. Assistant Professor, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4. Assistant Professor of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,

Citation: Soltanikazemi, M., Minaei, S., Shafizadeh Moghadam, H., Mahdavian, A.R., Comparison of Four PLSR, RF, GRNN and SVR Algorithms to Estimate Sugarcane Sheath Moisture During Growing Season Using Sentinel-2 Satellite Imagery, Iran J Remote Sens GIS. 16(3):47-68.

ABSTRACT

Introduction: The moisture content of sugarcane sheath is a crucial parameter during the crop's growth period, as it plays a key role in understanding water stress and field irrigation management. Traditional methods of measuring crop moisture levels involve time-consuming and expensive processes like obtaining wet and dry weights, followed by calculating moisture content, which are impractical for large areas. Recent advancements in remote sensing technology have enabled the monitoring of plant tissue moisture content in large fields. Remote sensing data have a high capacity to update crop growth monitoring systems. In this regard, it is possible to use satellite images that provide a wealth of information to users. This research aims to evaluate sugarcane leaf sheath moisture using satellite images and generate moisture maps based on the best model.

Materials and methods: The sugarcane fields, which represent the largest agricultural operations in Khuzestan, have an area of over 84,000 hectares. It covers over 9,670 hectares are cultivated by the Amir Kabir Agriculture and Industry company, the focus of this research. The study area is located at a latitude of 31° 00' 20" N and a longitude of 48° 15' 22" E. A total of 18 farms of the sugarcane variety CP69-1062 were utilized for this research. Five points were selected from each farm, and the coordinates of the points were recorded using a GPS device. The study was carried out between July and September. Ground data were collected nearly simultaneously with the Sentinel-2 satellite imaging of the target area. The moisture content of each collected sample was determined gravimetrically in the laboratory. For each image, indices and spectral bands were calculated using QGIS software and the output was saved as Excel and TIF files. The indices and bands obtained from Sentinel-2 satellite images were used to estimate and monitor the moisture status of sugarcane leaf sheath. In the next step, a variance inflation factor (VIF) analysis was implemented to check the collinearity between indices and bands. Finally, the indices of NDVI, EVI, SRWI, C_{green} and single bands B2, B3, B4, B5, B6, B11 and B12 were entered as input to four GRNN, RF, SVR and PLSR models. The Bayes algorithm was employed to optimize the parameters of the model.

Results and discussion: The results demonstrated that the SVR model exhibited a superior ability to estimate leaf sheath moisture compared to other models. Additionally, the sensitivity analysis revealed that the SRWI, C_{green}, NDVI, B5, B12, B11, B4, B3, EVI and B2 parameters are effective parameters in the moisture content modelling process. In the final stage, the leaf sheath moisture was classified into five stress classes, namely irrigation time, low moisture, medium moisture, and high moisture, in the order from low to high. The results of the moisture maps and the irrigation schedule for each date indicate that the combined output of B2, B3, B4, B5, B6, B11, B12, NDVI, EVI, SRWI and C_{green} indices and bands has a superior performance. These indices were utilized in the preparation of irrigation plans. This method was employed to assess the potential of S2 MSI spectral indices for the estimation of leaf sheath moisture in the sugarcane growth stage.

Conclusion: Based on sensitivity analysis, the SRWI parameter was found to be the most effective index in the modelling process. Consequently, it can be concluded that a combination of indices and bands of NDVI, EVI, SRWI, C_{green}, B2, B3, B5, B4, B11, and B12 provides a more accurate estimate of sugarcane sheath moisture than any single input. Thus, processing and analysis of Sentinel-2 satellite images can be used to enhance the methodologies employed for the monitoring of sugarcane sheath moisture content in expansive fields.

Keywords: Remote sensing, Short wavelength infrared, Moisture spectral index, Crop growth monitoring

* Corresponding Author: minae@modares.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2023.103163>

Received: 2022.05.23
Accepted: 2023.01.21





مقایسه چهار الگوریتم SVR و GRNN، RF، PLSR به منظور برآورد رطوبت غلاف نیشکر در طول دوره رشد با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲

مریم سلطانی کاظمی^۱، سعید مینایی^{۲*}، حسین شفیق زاده مقدم^۳، علیرضا مهدویان^۴

چکیده

سابقه و هدف: رطوبت غلاف پارامتر مهمی در طول دوره رشد نیشکر است که از منظر تنش آبی و مدیریت آبیاری مزرعه اهمیت فراوانی دارد. باین حال اندازه‌گیری میزان رطوبت محصول در گیاهان به‌طور سنتی از طریق به دست آوردن وزن تر و وزن خشک و سپس محاسبه میزان رطوبت محصول تعیین شده است. اما این روش وقت‌گیر، هزینه‌بر و در مناطق وسیع غیرقابل اجراء است. در سال‌های اخیر، توسعه سریع فناوری سنجش‌از‌دور برای نظارت بر میزان آب بافت گیاه در مزارع گسترده به کار برده می‌شود. داده‌های سنجش‌از‌دور ظرفیت بالایی برای به‌روز کردن سیستم‌های پایش رشد محصول دارند. در این راستا، می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای که اطلاعات متنوعی در اختیار کاربران قرار می‌دهند، بهره برد. هدف از این پژوهش ارزیابی رطوبت غلاف برگ نیشکر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌های رطوبت براساس بهترین مدل است.

مواد و روش‌ها: مزارع نیشکر که بزرگ‌ترین مزارع خوزستان هستند، بیش از ۸۴۰۰۰ هکتار مساحت دارند. حدوداً ۹۶۷۰ هکتار از مزارع تحت کشت متعلق به کشت و صنعت امیرکبیر است که این پژوهش در آن اجرا شد. منطقه مورد مطالعه در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۰۰ دقیقه و ۲۰ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه شرقی قرار گرفته است. برای پژوهش حاضر، ۱۸ مزرعه از واریته CP69-1062 نیشکر انتخاب شد که از هر مزرعه ۵ نقطه برگ‌زیده و مختصات نقاط با دستگاه GPS ثبت شد، لذا این پژوهش از تیر تا شهریور ماه اجرا شد. برای این منظور، تلاش شد که داده‌برداری زمینی هم‌زمان با تصویربرداری ماهواره سنتینل-۲ از منطقه مورد نظر صورت گیرد. سپس رطوبت غلاف هر نمونه در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای هر تصویر شاخص‌ها و باندهای طیفی با نرم‌افزار QGIS محاسبه و خروجی به‌صورت فایل اکسل و TIF ذخیره شد. در این پژوهش از شاخص‌های NDWI، NDII، SRWI، SIWSI، Clgreen و GVMI و باندهای حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ برای برآورد و پایش وضعیت رطوبت غلاف برگ نیشکر استفاده شد. در گام بعدی، از تحلیل VIF به‌منظور بررسی هم‌خطی بین شاخص‌ها و باندها استفاده شد. در نهایت شاخص‌های NDVI، EVI، SRWI، Clgreen و شاخص‌های B1، B2، B3، B4، B5، B6، B11 و B12 به‌عنوان ورودی به چهار مدل GRNN، RF، PLSR و SVR وارد شدند. شایان ذکر است که الگوریتم بیز به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که مدل SVR در مقایسه با سایر مدل‌ها توانایی بالاتری در تخمین رطوبت غلاف برگ داشت. همچنین طبق تحلیل حساسیت، پارامترهای SRWI، Clgreen، NDVI، B5، B12، B11، B4، B3، EVI و B2 به‌ترتیب به‌عنوان پارامترهای مؤثر در فرایند مدل‌سازی رطوبت انتخاب شدند. در مرحله نهایی رطوبت غلاف برگ به‌ترتیب مقدار از کم تا زیاد، به ۵ کلاس تنش، زمان آبیاری، رطوبت کم، رطوبت متوسط و رطوبت بالا طبقه‌بندی شد. با توجه به نتایج نقشه‌های رطوبتی و با توجه به برنامه زمان‌بندی آبیاری مربوط به هر تاریخ، می‌توان نتیجه گرفت خروجی حاصل ترکیبی از شاخص‌ها و باندهای B3، B2، B4، B5، B6، B11، B12، NDVI، EVI، SRWI و Clgreen عملکرد بهتری در تهیه نقشه‌های آبیاری داشتند. این روش با هدف ارزیابی پتانسیل شاخص‌های طیفی S2 MSI برای برآورد رطوبت غلاف برگ در مرحله رشد نیشکر به کار گرفته شد.

نتیجه‌گیری: طبق تحلیل حساسیت، پارامتر SRWI به‌عنوان مؤثرترین شاخص در فرایند مدل‌سازی قرار گرفت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در میان ورودی‌های داده‌شده به مدل، ترکیبی از شاخص‌ها و باندهای NDVI، EVI، SRWI، Clgreen، B2، B3، B4، B5، B11 و B12 تخمین بهتری از رطوبت غلاف نیشکر به دست می‌دهند. این پژوهش در پی بهبود روش‌های نظارت بر رطوبت غلاف نیشکر در مزارع وسیع است.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌از‌دور، فروسرخ طول موج کوتاه، شاخص طیفی رطوبت، پایش رشد محصول

سمت

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳. استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴. استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

استاد: سلطانی کاظمی، م. مینایی، س. شفیق زاده مقدم، ح. مهدویان، ع. مقایسه چهار الگوریتم PLSR، RF، GRNN و SVR به‌منظور برآورد رطوبت غلاف نیشکر در طول دوره رشد با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳: ۶۸-۴۷.



۱- مقدمه

نیشکر با نام علمی *Saccharum officinarum* L. از خانواده Poaceae، گیاهی چندساله است که در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری دنیا کشت می شود. منطقه جنوبی ایران، استان خوزستان منطقه ای مناسب برای کشت این گیاه محسوب می شود (Grof and Campbell, 2001). نیشکر به دلیل داشتن دوره رشد طولانی و همچنین چندساله بودن (بین ۶ تا ۷ سال)، نیاز به پایش و کنترل مداوم دارد. یکی از پیامدهای مثبت پایش مزرعه در واقع مدیریت بهتر و کمک به رفع مشکلات پیش از وقوع خسارت است. در این راستا کلمنتس در سال ۱۹۶۰ روشی برای پایش و کنترل محصول در طول دوره رشد ارائه داده است (Clements, 1960). در این روش، رشد و توسعه مزارع تحت کشت با اندازه گیری دستی پارامترهایی از جمله رطوبت غلاف برگ^۱، نیتروژن و ارتفاع تحت کنترل قرار می گیرد. یکی از پارامترهایی که اندازه گیری آن حائز اهمیت است، رطوبت غلاف برگ است، زیرا رابطه مستقیمی با میزان عملکرد گیاه دارد (Gu et al., 2008). کلمنتس عقیده داشت که میزان رطوبت نیشکر به شدت تحت تأثیر عوامل داخلی و شرایط محیطی تغییر می کند (Clements, 1977). این عوامل شامل بادزدگی، میزان تبخیر و تعرق، میزان آب مصرفی گیاه و نوبت های آبیاری است. از عوامل دیگری که میزان رطوبت گیاه را تحت تأثیر قرار می دهد، عناصر غذایی هستند. عناصر غذایی شامل ازت، پتاس فسفر، کلسیم و سایر مواد مغذی به گیاه و همچنین ساختار خاک است (Keshavaiah et al., 2013). شایان ذکر است که میزان رطوبت غلاف در مراحل اولیه رشد بالاتر (۸۴-۸۵ درصد) از مقدار آن در مراحل نهایی رشد محصول است (Keshavaiah et al., 2013). درصد بالای رطوبت باعث طولانی تر شدن میانگرها و همچنین افزایش وزن می شود (Keshavaiah et al., 2013). از دیگر فواید رطوبت بالا، جذب بهتر نیتروژن از خاک است تا شرایط رشد مطلوب و در نتیجه عملکرد بالاتر را فراهم کند.

غلاف برگ های فعال گیاه دارای سلول های پارانشیمی و محل ذخیره موقت رطوبت هستند. رشد سلولی در گیاه فعالیتی است که نسبت به کمبود رطوبت بسیار حساس است. کمبود رطوبت، نمو رویشی و عملکرد را از طریق کاهش سطح برگ و فتوسنتز برگ کاهش می دهد. از اثرات منفی کمبود رطوبت غلاف برگ در دوره رشد می توان به کاهش قند/ ساکاروز اشاره کرد (Keshavaiah et al., 2013). از طرف دیگر، درجه حرارت بالا در طول تابستان به کاهش میزان رطوبت خاک منجر می شود و کمبود رطوبت خاک معمولاً می تواند به تنش گیاهی ناشی از خشکسالی منجر شود که به تدریج باعث خشک شدن و از بین رفتن گیاهان می شود (Gu et al., 2008).

میزان آب پوشش گیاهی (VWC)^۲ متغیری مهم برای نظارت بر محصول و برای دستیابی سریع و دقیق عملکرد در طول رشد مهم است. با این حال اندازه گیری میزان رطوبت محصول در گیاهان به طور سنتی از طریق به دست آوردن وزن تر و وزن خشک و سپس محاسبه میزان رطوبت محصول تعیین شده است. اما این روش وقت گیر، هزینه بر و در مناطق وسیع غیرقابل اجراء است (Cheng et al., 2013). در سال های اخیر، توسعه سریع فناوری سنجش از دور برای نظارت بر میزان آب بافت گیاه در مزارع گسترده به کار برده می شود (Martin et al., 2018). پوشش های گیاهی در محدوده امواج الکترومغناطیسی رفتار طیفی خاص دارد که از آن برای تهیه شاخص های سنجش از دور پوشش گیاهی استفاده می کنند (Rahdari et al., 2013). شاخص ها، ترکیبی ریاضی حداقل از دو باند تصاویر ماهواره ای هستند که اختلاف معنی دار بازتابش پوشش گیاهی در طول موج های مختلف استفاده می کنند. هدف از ایجاد این شاخص ها، پیش بینی و ارزیابی برخی ویژگی های پوشش گیاهی مانند خصوصیات تاج پوشش

1. Sheath
2. Vegetation Water Content

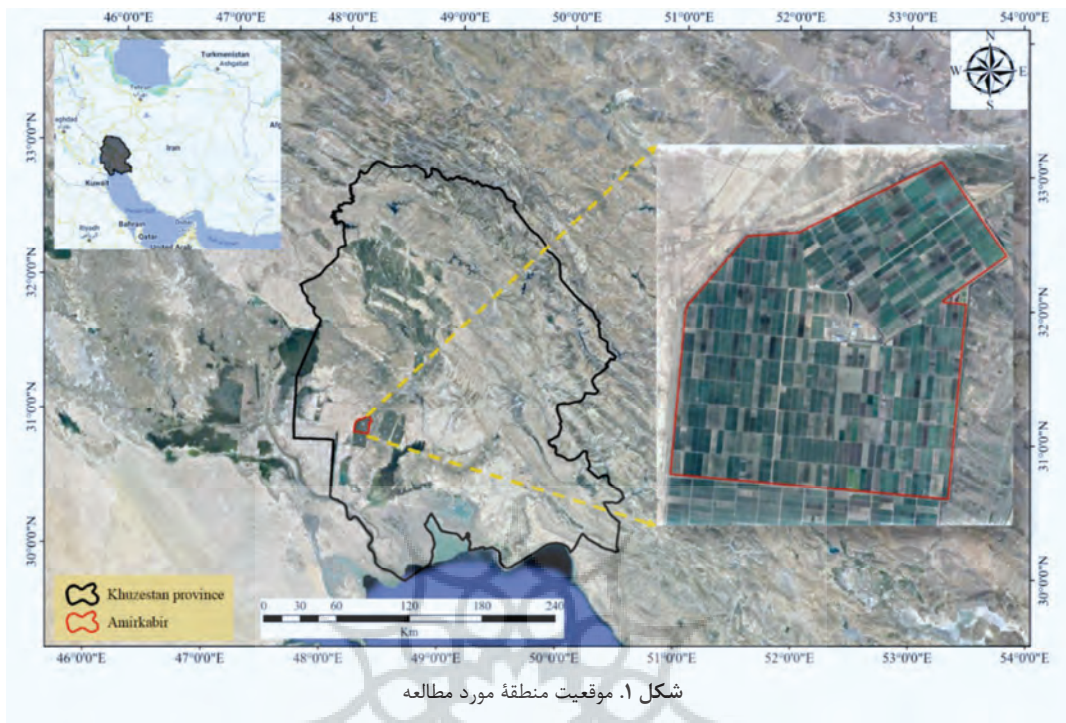
گیاهی، زیست توده، و رطوبت گیاه است (Alavi-Panah, 2013). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داد که استفاده از شاخص‌هایی مانند NDVI، EVI، NDII، WSJ، NDWI، SRWI و GVMI برای شناسایی رطوبت گیاه تا حدودی موفقیت‌آمیز بوده است (Zhang and Zhou, 2015). شاخص‌های طیفی گیاهی مانند شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص ارتقایافته (EVI) و شاخص تفاضلی نرمال شده فرسوخ نزدیک (NDII)، و شاخص‌هایی که برای محاسبه میزان رطوبت و تنش در گیاهان استفاده می‌شوند، مانند NDWI، WSJ، SRWI و GVMI؛ و شاخص‌های فتوسنتزی که میزان کلروفیل را مشخص می‌کنند، مانند CIGreen، به وضعیت آبی گیاه حساس‌اند، زیرا میزان رطوبت و کلروفیل گیاه، میزان فتوسنتز و ساختار تاج برگ گیاه تحت شرایط تنش آبی تغییر می‌کند؛ بنابراین، از شاخص‌های طیفی که در محدوده NIR/SWIR/Red هستند می‌توان برای تشخیص تنش آبی گیاه استفاده کرد (Ceccato et al., 2001؛ Thomas et al., 1971).

شاخص‌های به دست آمده از طریق سنجش از دور، در مقایسه با سنسورها و دوربین‌های حرارتی، از نظر مقیاس پاسخ، سرعت پردازش و هزینه پایین دارای مزایای مهمی هستند (Chakroun et al., 2015). تصاویر ماهواره‌ای با توجه به ویژگی‌های آنها می‌توانند به عنوان جایگزین مناسبی برای این مجموعه از حسگرها و دوربین‌ها باشند. کاربردهای بسیار امیدوارکننده‌ای از این تصاویر گزارش شده که تیم‌های تحقیقاتی متعددی در حال مطالعه و بررسی این موارد هستند. از ماهواره سنتینل-۲ با توجه به خصوصیتی که دارد می‌توان برای تخمین رطوبت غلاف استفاده کرد. این ماهواره نخستین ماهواره توان تفکیک بالاست که در اتحادیه اروپا طراحی و ساخته شده است. هر دو ماهواره سری سنتینل-۲ (Sentinel-2A و Sentinel-2B) می‌توانند تصاویری با خصوصیات، توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر، ۱۳ باند طیفی و رزولوشن زمانی ۵ روزه از

سطح زمین اخذ کنند. با توجه به این ویژگی‌ها، داده‌های MSI S2 می‌تواند کاربردهای کشاورزی دقیق را با الزامات زمان بازنگری چندروزه و حداقل قدرت تفکیک مکانی ۱۰ به میزان زیادی بهبود بخشد. با راه‌اندازی S2، مطالعات متعددی برای بررسی متغیرهای بیوفیزیکی محصول پیشنهاد شده است (Vincini and Calegari, 2016). علاوه بر این، مطالعات کمی بر آورد CWC با استفاده از داده‌های MSI S2 متمرکز شده است (Pan et al., 2018). هدف از این مطالعه تهیه نقشه‌های مربوط به رطوبت غلاف نیشکر توسط ماهواره سنتینل-۲ است. در این راستا ورودی‌ها به سه بخش تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) شاخص‌های NDVI، NDWI، NDII، SRWI، SIWSI، CIGreen، GVMI، (۲) باندهای B2، B3، B4، B5، B6، B7، B8، B8A، B9، B11 و B12، (۳) ترکیبی از شاخص‌ها و باندها که به عنوان ورودی در چهار مدل PLSR، RF، GRNN و SVR به منظور تخمین رطوبت غلاف برگ قرار گرفتند. از آنالیز حساسیت برای یافتن تأثیرگذارترین شاخص‌ها و باندها در مدل استفاده شد. در نهایت نقشه‌های رطوبت غلاف نیشکر براساس نوع ورودی و بهترین مدل (از نظر کمترین میانگین مربعات خطا) تهیه شدند.

۲- مواد و روش‌ها

مزارع نیشکر که بزرگ‌ترین مزارع خوزستان هستند، بیش از ۸۴۰۰۰ هکتار مساحت دارند. حدوداً ۹۶۷۰ هکتار از مزارع تحت کشت متعلق به کشت و صنعت امیرکبیر است که این پژوهش در آن اجرا شد. منطقه مورد مطالعه در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۰۰ دقیقه و ۲۰ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). برای پژوهش حاضر، ۱۸ مزرعه (معادل ۴۵۰ هکتار) از واریته CP69-1062 نیشکر انتخاب شد که از هر مزرعه ۵ نقطه برگزیده و مختصات نقاط با دستگاه GPS برداشت شد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- اندازه‌گیری رطوبت غلاف برگ‌های سوم تا ششم اندازه‌گیری میزان رطوبت غلاف برگ در هر مزرعه از ساعت ۷:۳۰ تا ۹:۳۰ صبح در ۵ نقطه انجام و نمونه‌ها درون یک کیسه پلاستیکی قرار داده شد. بعد از رساندن نمونه‌ها به آزمایشگاه، برگ‌های شماره سوم تا ششم جدا شده و وزن تر غلاف برگ نمونه (WW) اندازه‌گیری شد. زمان بین جدا کردن برگ‌های غلاف تا وزن کردن غلاف‌ها باید حتی‌الامکان کوتاه باشد. سپس نمونه‌های توزین شده برای خشک کردن به آزمایشگاه منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در آن تهویه‌دار با دمای ۸۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از خشک شدن غلاف‌ها، نمونه‌ها توزین و وزن خشک آنها (DW) ثبت می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۱)، درصد رطوبت غلاف برگ بر پایه تر (SWC) به دست آمد (Anonymous, 2013).

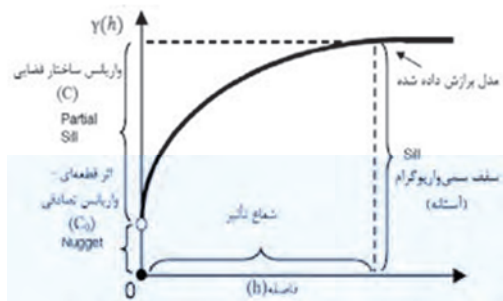
$$SWC (\%) = \frac{WW - DW}{WW} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

۲-۱- زمان بندی اندازه‌گیری‌های زمینی و گذر ماهواره‌ای با توجه به تقویم آبیاری کشت و صنعت امیرکبیر در سال‌های گذشته، بیشترین میزان آب مصرفی و ازسویی خسارت‌های ناشی از تنش در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور رخ داده است. لذا این پژوهش از تیر تا شهریور در تاریخ‌های مشخص به شرح جدول ۱ اجرا شد. برای این منظور، تلاش شد که داده‌برداری زمینی هم‌زمان با تصویربرداری ماهواره سنتینل-۲ از منطقه مورد نظر صورت گیرد (جدول ۱).

جدول ۱. تاریخ‌های تصویربرداری در طول دوره رشد نیشکر

| ماه | تصویربرداری سنتینل-۲ | داده‌برداری زمینی |
|--------|----------------------|-------------------|
| تیر | ۱۳۹۹/۰۴/۱۴ | ۱۳۹۹/۰۴/۱۴ |
| | ۱۳۹۹/۰۴/۲۹ | ۱۳۹۹/۰۴/۲۹ |
| مرداد | ۱۳۹۹/۰۵/۱۸ | ۱۳۹۹/۰۵/۱۸ |
| | ۱۳۹۹/۰۶/۲ | ۱۳۹۹/۰۶/۲ |
| شهریور | ۱۳۹۹/۰۶/۲۲ | ۱۳۹۹/۰۶/۲۲ |

۲-۳- درون‌یابی



شکل ۲. مشخصات و اجزای نمودار واریوگرام

۲-۴- تصاویر ماهواره سنتینل-۲

ماهواره سنتینل-۲ از ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی تا فرورسرخ طول موج کوتاه (SWIR) تشکیل شده که در آن ۴ باند از توان تفکیک ۱۰ متر، ۶ باند از توان تفکیک ۲۰ متر و ۳ باند نیز توان تفکیک ۶۰ متر برخوردار است.

۲-۵- نمودار طیفی گیاه

شکل ۳، نمودار طیفی پوشش گیاه در تاریخ مورد نظر را نشان می‌دهد. در واقع بازتاب گیاه در طول موج‌های محدوده ۴۹۲/۴-۲۲۰۲/۴ نانومتر است. طبق نمودار هر یک از محدوده‌های طیفی، جذب و بازتاب مختلفی براساس ماهیت گیاه از خود نشان می‌دهند. در بازتاب طیفی گیاهان عوامل مختلف از جمله کلروفیل، رنگدانه‌ها، رطوبت موجود در گیاه و ساختار فیزیکی آن تأثیر دارند. اما طرح کلی انعکاس گیاهان یکسان، و جذب آن متفاوت است. در بخش مرئی که شامل باند آبی (B2=492.4 nm)، سبز (B3=559.8 nm) و قرمز (B4=664.6 nm) هستند میزان جذب بالاست. انعکاس در این بخش تحت کنترل کلروفیل و مواد رنگی برگ مانند گزانتوفیل، کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها قرار می‌گیرد. ساختمان برگ، فضای بین‌سلولی و آب

درون‌یابی‌های زمین‌آمار بر مبنای نظریه تغییرات ناحیه‌ای پایه‌گذاری شده است و به توابع ریاضی و آمار متکی است. برای مدل‌سازی همبستگی مکانی متغیرهای مورد بررسی از واریوگرام کروی^۱ استفاده می‌شود. بدین منظور، مدل واریوگرام برای توصیف پیوستگی فضایی داده‌های ورودی و تخمین مقدار مکان‌های اندازه‌گیری نشده استفاده شد (Ashiq et al., 2010). نقاط این نمودار براساس زوج نقاطی است که به فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند و از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شوند (Bachmaier and Backes, 2008):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (2)$$

که در آن $\gamma(h)$ مقدار تغییر در فاصله h یا واریانس جفت نقاطی است که در فاصله h از هم قرار گرفته‌اند. h فاصله بین نقاط نمونه‌برداری شده، n تعداد جفت نقاطی که در یک راستا به فاصله h از هم قرار دارند. $z(x_i)$ مقدار متغیر در نقطه x_i و $z(x_i+h)$ مقدار متغیر در نقطه x_i+h است. سمی‌واریوگرام^۲ رابطه بین فاصله و واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد و با سه پارامتر استخراج شده از آن می‌توان تغییرات مکانی متغیر را بررسی کرد. سه پارامتر این مدل‌ها عبارت‌اند از: شعاع تأثیر^۳، آستانه^۴ و اثر قطعه‌ای^۵. فاصله‌ای که طی آن مقدار سمی‌واریوگرام به حد ثابتی می‌رسد و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود، شعاع تأثیر یا دامنه واریوگرامی خوانده می‌شود. این امر به معنی آن است که خارج از شعاع تأثیر، نمونه‌ها دیگر به یکدیگر وابسته نیستند و مستقل از هم‌اند. مقدار سمی‌واریوگرام پس از آنکه به حد ثابتی رسید، آستانه خوانده می‌شود. مقدار آستانه در عین حال برابر با واریانس کلی تمامی نمونه‌هایی است که در محاسبه تغییرنگار به کار بسته شده‌اند. مقدار تغییرنگار در مبدأ مختصات، یعنی به ازای $h=0$ اثر قطعه‌ای نامیده می‌شود. در حالت کلی، اگر مشکلات مربوط به نمونه‌گیری وجود نداشته باشد، اثر قطعه‌ای باید کوچک باشد (شکل ۲).

1. variogram-spherical
2. semi-variogram
3. Range
4. Sill
5. Nugget

(۳) نرمال کردن تصاویر و (۴) محاسبه شاخص‌ها و باندها، و (۵) در نهایت ذخیره این اطلاعات به صورت فایل .tif.

۱-۶-۲-NDWI

شاخص تفاضلی نرمال شده (رابطه ۳) را اولین بار مک‌فیتز در سال ۱۹۹۶ معرفی کرد که انعکاس‌دهنده مقدار رطوبت در گیاه است (McFeeters, 1996). این شاخص برای رطوبت موجود در گیاه با استفاده از انعکاس فرسرخ نزدیک (NIR) و فرسرخ موج کوتاه (SWIR) محاسبه می‌شود، که آن را در برابر تغییرات میزان آب مایع و مزوفیل اسفنجی تاج پوشش گیاهی حساس می‌کند (Gao, 1996).

$$NDWI_{10m} = \frac{B8 - B12}{B8 + B12} \quad \text{رابطه (۳)}$$

۲-۶-۲-NDII

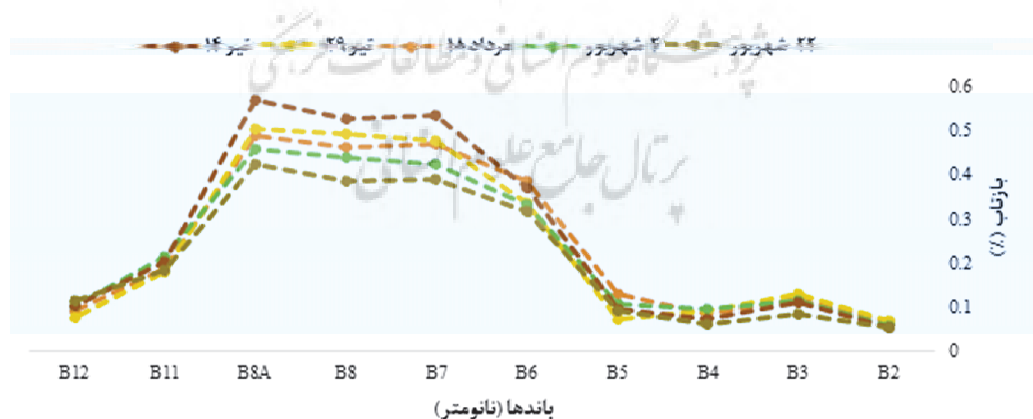
NDII ترکیبی از نسبت‌های فرسرخ نزدیک (NIR) و فرسرخ طول موج کوتاه (SWIR) است که به ترتیب در ۰/۸۴۰ و ۱/۶۷۶ میکرومتر قرار گرفته‌اند و میزان رطوبت پوشش گیاهی را نشان می‌دهد (Hardisky et al. 1984).

$$NDII = \frac{B8 - B11}{B8 + B11} \quad \text{رابطه (۴)}$$

درون سلولی در ساختار اسفنجی مزوفیل برگ، انعکاس‌های این محدوده را کنترل می‌کند. باند فرسرخ نزدیک (B8=832.8 nm و B8A=864.7 nm) با طول موج‌های ۸۳۲/۸ و ۸۶۴/۷ نانومتر به تاج پوشش و بیوماس گیاهان خیلی حساس است و بیشترین بازتاب و کمترین جذب در گیاهان را دارد. بخش فرسرخ طول موج کوتاه، حساسیت بالایی به رطوبت دارد. رطوبت به شدت جذب‌کننده امواج فرسرخ طول موج کوتاه (B11=63.7 nm و B12=2202.4 nm) است. در نتیجه رطوبت موجود در گیاه باعث جذب امواج الکترومغناطیسی بخش فرسرخ طول موج کوتاه می‌شود.

۲-۶-۲- شاخص‌های گیاهی

شاخص طیفی حاصل محاسبه ریاضیاتی بین دو یا چند باند طیفی است که به واسطه آن یک پدیده شناسایی و بررسی می‌شود. در این پژوهش شاخص‌های گیاهی شامل NDVI، NDWI، NDII، SRWI، SIWSI، Cgreen و GVMI و تک‌باندها (B2، B3، B4، B5، B6، B7، B8، B8A و B11 و B12) از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ توسط نرم‌افزار QGIS محاسبه شدند. مراحل محاسبه بدین صورت بود: (۱) فراخوانی باندهای مربوطه، (۲) یکسان‌سازی باندها^۱ به رزولوشن مکانی ۱۰ متر،



شکل ۳. نمودار طیفی مربوط به نقاط نمونه برداری

1. Resampling
2. Normalized difference water index
3. Normalized difference infrared index

۲-۶-۳-SRWI^۱

شاخص SRWI مبتنی بر باندهای طیفی فرورسرخ نزدیک و قرمز هستند. شاخص SRWI تنش آبی گیاه تحت تأثیر کاهش محتوی رطوبتی کلروفیل را نشان می‌دهد (Dangwal et al., 2015; Ballester et al., 2019).

$$\text{SRWI} = \frac{B8}{B4} \quad \text{رابطه (۵)}$$

۲-۶-۴-SIWSI^۲

فرورسرخ طول موج کوتاه نیز براساس ترکیب باند طیفی فرورسرخ طول موج کوتاه و باندهای فرورسرخ نزدیک سنجنده سنتینل ۲ تولید می‌شود. شاخص تنش آبی فرورسرخ طول موج کوتاه با فرمول زیر محاسبه می‌شود (Ceccato et al., 2001):

$$\text{SIWSI} = \frac{B8a - B11}{B8a + B12} \quad \text{رابطه (۶)}$$

۲-۶-۵-GVMI^۳

رویکرد نظری (Ceccato et al., 2002)، شاخص جدیدی به نام GVMI برای ارائه اطلاعات مستقیم در مورد میزان رطوبت گیاه را توسعه داد.

$$\text{GVMI} = \frac{(B8+0.1) - (B11+0.02)}{(B8+0.1) + (B11+0.02)} \quad \text{رابطه (۷)}$$

۲-۶-۶-CIgreen^۴

میزان کلروفیل نشان دهنده وضعیت فیزیولوژیکی پوشش گیاهی است که در گیاهان تنش‌دار کاهش می‌یابد و بنابراین می‌تواند به‌عنوان شاخص برای اندازه‌گیری سلامت گیاه استفاده شود (Gitelson et al., 2005).

$$\text{CI}_{\text{green}} = \frac{B7}{B3} - 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

۲-۷-مدل‌سازی

در این بخش از چهار الگوریتم رگرسیون شبکه عصبی عمومی (GRNN)^۵، رگرسیون بردار پشتیبانی (SVR)^۶، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)^۷ و الگوریتم جنگل تصادفی (RF)^۸ به‌منظور مدل‌سازی رطوبت

غلاف برگ استفاده شد. شایان ذکر است که از الگوریتم بهینه‌ساز بیز، به‌منظور بهینه کردن پارامترهای هر مدل استفاده شد. قبل از انجام مدل‌سازی، لازم است همبستگی بین متغیرهای مستقل بررسی شود تا از این طریق بتوان در صورت وجود هم‌خطی بین متغیرها آن را برطرف کرد. بدین‌منظور از روش آنالیز VIF^۹ استفاده شد. شدت هم‌خطی چندگانه را با بررسی بزرگی مقدار VIF می‌توان تحلیل کرد.

۱-۷-۲- شبکه رگرسیون عصبی عمومی

یک شبکه عصبی رگرسیون عمومی (GRNN) اغلب به‌عنوان توابع تخمین استفاده می‌شوند که شامل یک لایه پایه شعاعی^{۱۰} و یک لایه خطی ویژه است. شبکه عصبی GRNN شبیه به شبکه‌های پایه شعاعی است که دارای تفاوت‌هایی در لایه است (Specht, 1991).

لایه پایه شعاعی این لایه شبیه به شبکه‌های پایه شعاعی است. دارای تعدادی نورون است که با بردارهای ورودی هدف (مثلاً، بردار P مقداردهی می‌شود. پارامتر تنظیمی مدل به نام spread وجود دارد که می‌توان آن را با استفاده از روش بهینه‌سازی بیز تنظیم کرد. وزن هر نورون در این لایه براساس فاصله بردار وزن با بردار ورودی با استفاده از تابع $\|dist\|$ محاسبه می‌شود.

مقدار این پارامتر را با روش بهینه‌سازی بیز^{۱۱} می‌توان تنظیم کرد. در لایه اول وزن هر نورون فاصله برداری بین بردار وزن با بردار ورودی است که توسط تابع $\|dist\|$ محاسبه می‌شود.

1. Simple ratio water index
2. Shortwave infrared water stress index
3. Global vegetation moisture
4. Green chlorophyll index
5. General Regression Neural Network
6. Support Vector Regression
7. Partial Linear Square Regression
8. Random Forest
9. Variance Inflation Factor
10. Radial Basis
11. Bayesian optimization

متغیرهای پیش‌بین، ابعاد بیشتری نسبت به مشاهدات داشته باشند و هنگامی استفاده می‌شود که یا مشاهدات اندک باشند یا مشکل هم‌خطی چندگانه^۳ بین مقادیر X وجود داشته باشد. در مقابل، رگرسیون استاندارد در این موارد شکست خواهد خورد و به نتایج مناسبی نخواهد رسید (Haenlein and Kaplan, 2004).

۲-۷-۴- الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

الگوریتم جنگل تصادفی (RF) یک الگوریتم گروهی با مجموعه‌ای از درختان تصمیم است که برای پیش‌بینی پیشنهاد کرده است (Breiman, 2001). همچنین یکی از روش‌های تجمیعی به شمار می‌رود که هم برای طبقه‌بندی^۴ و هم رگرسیون^۵ استفاده می‌شود. یک پارامتر قابل تنظیم در این الگوریتم تعداد درختان است، که توسط الگوریتم بیز انتخاب شد. همچنین از روش الگوی ساخت Bagging استفاده شد.

۲-۷-۵- الگوریتم بهینه‌سازی بیز

در مطالعه حاضر، برای مدل SVR که شامل پارامترهای C ، γ و ϵ ؛ و برای مدل RF پارامتر تعداد درختان ($ntree$) و برای مدل رگرسیون شبکه عصبی عمومی پارامتر Spread نیاز به تنظیم^۶ پارامترها است. از آنجاکه مقادیر این پارامترها دقت مدل‌های پیش‌بینی را تعیین می‌کند، مهم است که این مقادیر به‌طور دقیق انتخاب شوند (Cornejo-Bueno et al., 2018). در این زمینه، بهینه‌سازی بیزی به‌عنوان یک ابزار جست‌وجوی پارامترهای کارآمد در بهینه‌سازی پارامترهای مدل است (Cornejo-Bueno et al., 2018; Law and Shawe-Taylor, 2017). روش‌های بیزی به‌دنبال یافتن مینیمم کلی یک تابع مجهول $f(x)$ هستند که به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

1. Linear
2. polynomial
3. Multicollinearity
4. Classification
5. Regression
6. Tuning

لایه خطی ویژه، شامل ورودی‌های شبکه است که از طریق بردارهای ورودی‌های وزن‌دار و بایاس به آن منتقل می‌شوند. نورون‌های خروجی همان ورودی‌های شبکه هستند که توسط تابع radbas انتقال داده شده‌اند.

۲-۷-۲- رگرسیون بردار پشتیبان

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که براساس نظریه آموزش آماری استوار است. در واقع SVR مدلی است که منحنی با فاصله ϵ را به داده‌ها برازش می‌دهد، به‌نحوی که کمترین خطا در داده‌های آزمون صورت گیرد. برای کمینه کردن خطای آزمون باید عبارت پیچیدگی حداقل شود که مستلزم کمینه‌سازی نرم بردار وزن است. این شرایط می‌تواند به راحتی برای SVR با حاشیه نرم گسترش داده شود (Drucker et al., 1997). توابع هسته‌ای در این مدل شامل خطی^۱، چندجمله‌ای^۲ و پایه شعاعی است. در ساخت یک مدل کارآمد ماشین بردار پشتیبانی، پارامترهای مدل باید با استفاده از یک روش بهینه‌سازی به‌طور دقیق محاسبه شوند. این پارامترها عبارتند از: نوع کرنل، پارامتر تابع کرنل σ^2 ، تنظیم‌کننده C ، پارامتر دقیق اپسیلون (ϵ) مربوط به حداکثر خطا در ناحیه ϵ -Insensitive یا حداکثر شعاع لوله واقع در اطراف تابع رگرسیون، و پارامتر گاما (γ).

۲-۷-۳- رگرسیون حداقل مربعات جزئی

معادلات ساختاری PLS برای یافتن روابط اساسی و پایه، بین دو ماتریس (Y و X) استفاده شده و به‌منظور مطالعه رابطه خطی بین آنها به کار می‌رود. به این ترتیب PLS می‌تواند یک رویکرد برای مدل‌سازی ساختارهای کوواریانس در این فضا توسط معادلات ساختاری موجود و ایجاد متغیرهای پنهان در نظر گرفت. یک مدل PLS سعی می‌کند جهتی چندبعدی را در فضای X پیدا کند که حداکثر مقدار واریانس مشترک متغیرها را در فضای Y توضیح دهد. رگرسیون PLS به‌ویژه هنگامی مناسب است که ماتریس

که n تعداد نمونه، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، P_i مقدار پیش‌بینی شده، P_m مقدار متوسط پیش‌بینی شده، O_m مقدار متوسط برای مشاهدات است. نکته شایان توجه اینکه، برای یافتن بهترین برازش مدل‌ها از داده‌های زمینی، پارامترها به روش کمترین خطا محاسبه می‌شوند.

۸-۷-۲- آنالیز حساسیت با روش رگرسیون گام‌به‌گام

بهبود یافته^۴

در واقع در رگرسیون گام‌به‌گام تمامی متغیرهای مستقل وارد مدل می‌شوند و آن متغیر مستقلی که تأثیر چندانی بر متغیر وابسته نداشته باشد از مدل حذف می‌شود، با این تفاوت که در این پژوهش متغیری حذف نمی‌شود، فقط براساس میزان MSE رتبه‌بندی می‌شود. در واقع براساس تغییرات MSE، متغیرهای ورودی را می‌توان براساس کمترین و بیشترین مقدار MSE به ترتیب به درجه اهمیت بالا و پایین رتبه‌بندی کرد. در رویکرد دیگری، بیشترین کاهش MSE می‌تواند مهم‌ترین متغیرها را مشخص کند (Sung, 1998). روش گام‌به‌گام بهبود یافته شامل حذف یک متغیر و وزن‌های مربوط به آن است. برای روش گام‌به‌گام بهبود یافته تمام مقادیر یک ورودی به یک مقدار، یعنی میانگین آن تبدیل می‌شوند (Gevrey et al., 2003).

۳- نتایج و بحث

۱-۳- مقایسه میانگین پارامترهای مستقل مربوط به

رطوبت غلاف

شکل ۴ مقایسه میانگین‌های رطوبت غلاف برگ به روش LSD در سطح خطای ۵ درصد بین شاخص‌های NDWI، NDII، SIWSI، SRWI، Clgreen و GVMI و NDVI در تاریخ‌های ۱۴ تیر، ۲۹ تیر، ۱۸ مرداد، ۲ شهریور و ۲۲ شهریور را نشان می‌دهد. در این بخش

$$\text{رابطه (۹)} \quad X^* = \operatorname{argmin} f(x), x \in \chi$$

که در آن χ به‌عنوان یک زیرمجموعه فشرده از R^d تعریف می‌شود که شامل فضای ابرپارامترهای SVR^۱ است، در حالی که $f(x)$ یک تابع هدف است که باید بهینه شود.

۶-۷-۲- اعتبارسنجی متقابل با روش k-fold

در این مطالعه، مجموعه داده‌ها با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع (fold-k (10=k) به صورت تصادفی برای آموزش و تست تقسیم شده است. در مجموع ۲۲۵ داده به صورت تصادفی به‌عنوان بخش آموزشی انتخاب و مابقی داده‌ها برای تست استفاده شدند. بخش آموزش نیز به دو مجموعه زیرداده تقسیم می‌شود. مجموعه آموزش در درجه اول برای متناسب سازی مدل استفاده می‌شود. مجموعه اعتبارسنجی برای اعتبارسنجی عملکرد آموزش قبلی و تنظیم دقیق مدل آموزش دیده استفاده می‌شود. در این مطالعه، از ۸۰٪ داده‌ها به‌عنوان نسبت زیرمجموعه آموزش و ۲۰٪ برای زیرمجموعه اعتبارسنجی استفاده شده است. با استفاده از رویکرد اعتبارسنجی متقابل، داده‌های آموزش به صورت تصادفی به ۱۰ زیرمجموعه متقابل منحصربه‌فرد گروه بندی شدند. در هر تکرار، یک زیرمجموعه برای فرایند اعتبارسنجی استفاده شد، در حالی که ۹ زیرمجموعه دیگر نیز برای فرایند آموزش استفاده شدند. به این ترتیب، این مطالعه اطمینان حاصل می‌کند که هر مجموعه داده حداقل یک بار در هر دو مرحله آموزش و تست استفاده می‌شود.

۷-۷-۲- ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی مدل‌ها به‌منظور برآورد رطوبت غلاف برگ نیشکر از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ و ضریب تعیین (R^2)^۳ استفاده می‌شود.

$$\text{رابطه (۱۰)} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

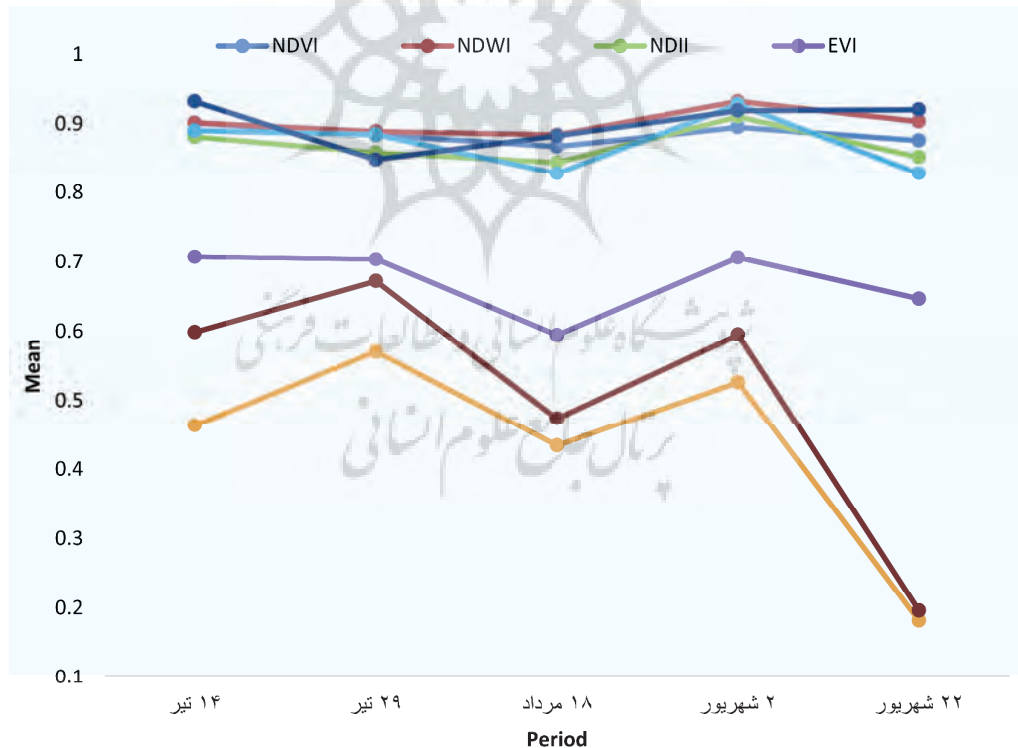
$$\text{رابطه (۱۱)} \quad R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)(O_i - O_m)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2)(\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2)}}$$

1. Hyperparameters
2. Mean Square Error
3. Coefficient Correlation
4. Improved Stepwise

می‌شود (Anonymous, 2013). برای شاخص‌های SRWI و Clgreen در دوره پایان (۲۲ شهریور) افت شدیدی نسبت به دوره‌های پیشین وجود داشته است که می‌تواند ناشی از کم شدن میزان کلروفیل و سبزینگی گیاه نیشکر باشد (Gitelson et al., 2005; Dangwal et al., 2015; Ballester et al., 2019). پژوهش نشان دادند که در طول مراحل رشد رویشی شاخص‌های NDII، GVMI، Clgreen، قوی‌تر از شاخص‌های NDVI، NDWI، SIWSI، SRWI برای برآورد رطوبت محصول بودند. شاخص‌های میزان رطوبت تاج گیاه و شاخص‌های فعالیت فتوسنتزی که میزان کلروفیل را مشخص می‌کنند، به وضعیت تنش آبی حساس هستند، زیرا میزان رطوبت و کلروفیل گیاه، نرخ فتوسنتز و ساختار تاج یا برگ گیاه تحت شرایط تنش آبی تغییر می‌کند (Tabib Mahmoudi, 2019).

به بررسی روند تغییرات شاخص‌ها در طول دوره رشد پرداخته می‌شود. نتایج مربوط به مقایسه میانگین هر شاخص نشان داد که تفاوت معناداری بین شاخص‌ها در هر ۵ دوره وجود دارد.

روند تغییرات شاخص‌های SRWI، GVMI، NDII، NDVI، EVI، Clgreen در طول ۵ دوره به صورت نزولی است. هر کدام از شاخص‌هایی که در دوره رشد روند نزولی داشتند مربوط به عواملی از جمله کلروفیل برگ، سبزینگی و رطوبت گیاه هستند. طبق استنادهای موجود از روند رشد نیشکر، با کاهش رشد و شروع عملیات رسیدگی گیاه شروع به زرد شدن می‌کند که اثرات آن می‌تواند به کم شدن سبزینگی و کلروفیل اشاره کرد (Anonymous, 2013; Khajapour, 2013). همچنین نیاز مزارع به آب در این دوران کاهش می‌یابد و در بعضی مواقع با توجه به شرایط و وارسته آبیاری قطع



شکل ۴. نمودار مقایسه میانگین LSD بین ۵ دوره رشد

۲-۳- بررسی همبستگی مکانی

برای سنجش وضعیت ساختار مکانی نمونه‌های اندازه‌گیری شده از مدل سمی واریانس استفاده شده است. به منظور درک الگوی تغییرات مکانی متغیر مورد بررسی، سمی‌واریوگرام متغیر نیتروژن در فواصل نمونه‌گیری ۱۰۰۰ متر محاسبه شد. این مدل نشان می‌دهد که سمی‌واریانس با افزایش فاصله بین نقاط اندازه‌گیری ابتدا به سرعت افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌شود. به عبارت دیگر، همبستگی مکانی نقاط اندازه‌گیری کاهش یافته است (شکل ۵).

این معیار نسبت واریانس فضایی (C) بر سقف سمی واریانس $(C+C_0)$ است. این آماره مقدار نسبت واریانس نمونه‌ای $(C+C_0)$ را بیان می‌کند که توسط واریانس ساختار فضایی (C) تشریح می‌شود. در واقع بالا بودن نسبت $C/(C+C_0)$ نشان‌دهنده بالا بودن ساختار مکانی نسبت به ساختار تصادفی است. اگر در نمودار سمی‌واریوگرامی مقدار واریانس تصادفی (بدون ساختار C_0) صفر باشد، مقدار این نسبت یک خواهد بود. در نتیجه هرگاه مقدار این نسبت صفر بود نشان‌دهنده آن است که هیچ وابستگی فضایی بین نمونه‌های اندازه‌گیری شده وجود ندارد. اگر این نسبت کمتر از $0/5$ باشد ساختار مکانی است. مطابق با توضیحات و با توجه به نمودار، مقدار C برابر با ۳ و $C+C_0$ برابر $4/2$ خواهد بود که $C/(C+C_0) = 1/4$ حاصل می‌شود. بنابراین عدد به دست آمده بیشتر از $0/5$ است و می‌توان نتیجه گرفت که وابستگی مکانی میان نمونه‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد. برای جلوگیری از بیش‌برازش فضایی، ارزیابی دقت با استفاده از اعتبارسنجی متقابل در نظر گرفته شد.

۳-۳- تخمین رطوبت غلاف برگ

جدول ۴ نتایج پیش‌بینی رطوبت غلاف برگ نیشکر توسط چهار مدل SVR، RF، GRNN و PLSR را نشان می‌دهد. برای حالت اول، وقتی شاخص‌های NDVI، SRWI، EVI و Clgreen به عنوان ورودی به مدل‌ها داده شدند نتایج نشان داد که میزان RMSE توسط

در جدول‌های ۲ و ۳، آنالیز VIF به منظور بررسی همبستگی بین پارامترهای ورودی استفاده شد. مطابق با آنالیز VIF، شاخص‌های NDVI، EVI، SRWI و Clgreen دارای VIF کمتر یا مساوی ۱۰ و مابقی شاخص‌ها دارای VIF بیشتر از ۱۰ هستند.

جدول ۲. آنالیز VIF مربوط به شاخص‌ها

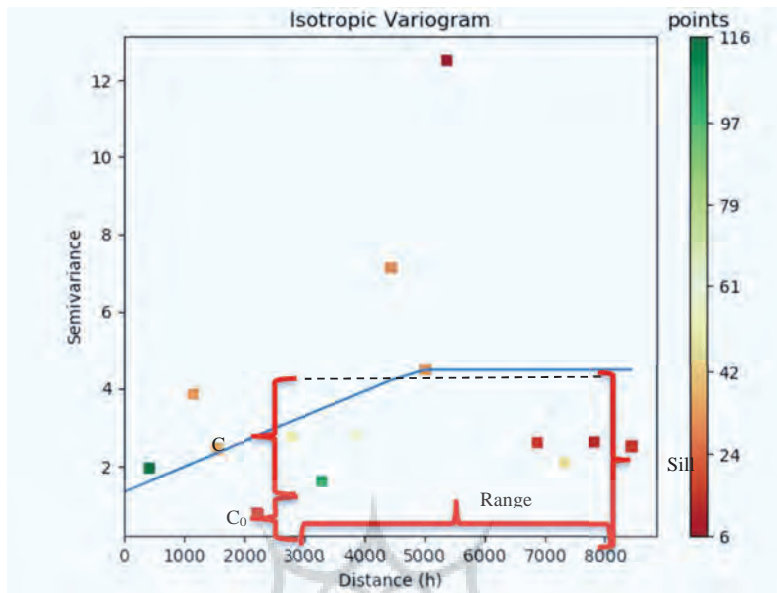
| شاخص‌ها | VIF |
|---------|--------|
| NDVI | 6.451 |
| NDWI | 19.584 |
| NDII | 14.505 |
| EVI | 8.260 |
| GVMi | 15.650 |
| SRWI | 10.182 |
| SIWSI | 20.069 |
| Clgreen | 4.339 |

همچنین بین تمام باندها، باندهای B2، B3، B4، B5، B6، B11 و B12 دارای VIF کمتر یا مساوی ۱۰ هستند.

جدول ۳. آنالیز VIF مربوط به باندها

| باندها | VIF |
|--------|--------|
| B2 | 3.652 |
| B3 | 5.217 |
| B4 | 8.215 |
| B5 | 8.421 |
| B6 | 10.548 |
| B7 | 26.280 |
| B8 | 12.785 |
| B8A | 15.874 |
| B11 | 5.429 |
| B12 | 8.162 |

با توجه به نتایج آنالیز VIF برای هر دو شاخص‌ها و باندها می‌توان نتیجه گرفت که برای پارامترهایی که VIF آنها بالاتر از ۱۰ است، همبستگی بالایی وجود دارد و از مدل حذف می‌شوند.



شکل ۵. نمودار سمی واریوگرام

توسط مدل‌های GRNN، RF، SVR و PLSR به ترتیب ۱/۵۸ و ۱/۵۰، ۱/۶۳، ۱/۶۸ ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۴۴ و ۰/۶۰ و ۰/۵۴ محاسبه شد. پارامترهای هر سه مدل GRNN، RF و SVR توسط الگوریتم بهینه‌سازی بیز تنظیم شدند. برای مدل GRNN، پارامتر Spread ۰/۲۱ شود. تعداد درختان در مدل RF، ۱۷۵ تنظیم شد. همچنین برای مدل SVR، نوع تابع کرنل چندجمله‌ای و پارامترهای C و E به ترتیب ۵/۵۷ و ۰/۰۳۵ شد. مطابق با نتایج مدل SVR با تابع کرنل چندجمله‌ای عملکرد بهتری در تخمین رطوبت از خود نشان داد. به طور کلی با مقایسه نتایج مدل‌سازی مربوط هر سه حالت، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت سوم وقتی شاخص‌ها و باندها هر دو به صورت هم‌زمان به عنوان ورودی به مدل‌های GRNN، RF، SVR و PLSR داده شوند، رطوبت غلاف با RMSE کمتر و ضریب همبستگی بالاتری قابل پیش‌بینی خواهد بود. علاوه بر این از میان چهار مدل بررسی شده، مدل SVR میزان رطوبت غلاف برگ را با کمترین RMSE ۱/۵۰ پیش‌بینی کرد.

مدل‌های GRNN، RF، SVR و PLSR به ترتیب برابر ۱/۸۸، ۱/۷۰، ۱/۸۲ و ۱/۶۸ شد. براساس الگوریتم بیز، برای مدل GRNN، پارامتر Spread ۰/۴۶ و تعداد درختان در مدل RF، ۱۹۰ تنظیم شد. همچنین برای مدل SVR، نوع تابع کرنل پایه شعاعی و پارامترهای C، E و γ به ترتیب ۹۲۸/۹۷، ۰/۰۰۵۸ و ۱۳/۳۰۹ شدند. در حالت دوم، هنگامی که تک‌باندهای B2، B3، B4، B5، B6، B11 و B12 به عنوان ورودی در مدل‌ها قرار گرفتند، میزان RMSE توسط مدل‌های GRNN، RF، SVR و PLSR به ترتیب ۱/۸۷، ۱/۷۰، ۱/۸۵ و ۱/۶۷ به دست آمد. الگوریتم بیز پارامتر Spread از مدل GRNN، را معادل ۰/۵۷ تنظیم کرد و همچنین تعداد درختان برای مدل RF، ۸۴ تنظیم شد. در مدل SVR، نوع تابع کرنل خطی و پارامترهای C و E به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۰۱۵ شد. حالت سوم، زمانی که شاخص‌های NDVI، EVI، SRWI، C_{green} و تک‌باندها B2، B3، B4، B5، B6، B11 و B12 هر دو به طور هم‌زمان وارد مدل شوند، نتایج بدین صورت است که میزان RMSE

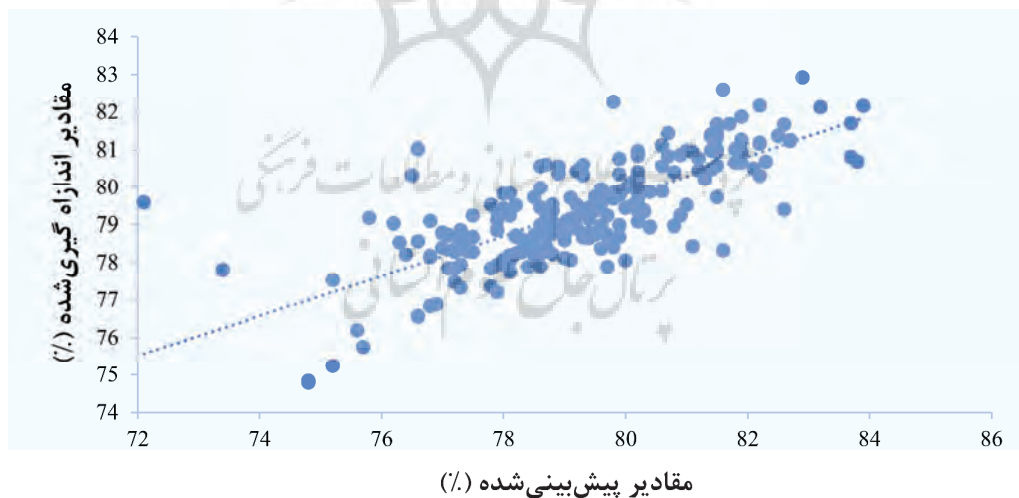
۱۴ تیر، ۲۹ تیر، ۱۸ مرداد، ۲ شهریور و ۲۲ شهریور نشان می‌دهد. مقدار رطوبت غلاف نیشکر برای تاریخ‌های نمونه‌برداری به ۵ کلاس تقسیم‌بندی شد که هر کلاس براساس مقادیر آن جزء دسته‌بندی‌های (۱) شروع مرحله تنش، (۲) زمان آبیاری، (۳) رطوبت کم، (۴) بدون تنش و (۵) رطوبت بالا (تحت آبیاری) قرار گرفت. شروع تنش، زمان آبیاری، رطوبت کم، بدون تنش و رطوبت بالا به ترتیب با رنگ‌های قرمز، زرد، آبی کم‌رنگ، آبی فیروزه‌ای و آبی تیره مشاهده می‌شود.

شکل ۶ نمودار پراکندگی مقادیر مشاهده‌شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل SVR آورده شده است. با توجه به نمودار می‌توان پی برد که مقادیر پیش‌بینی‌شده رطوبت توسط مدل به‌خوبی با مقادیر واقعی رطوبت برازش شدند.

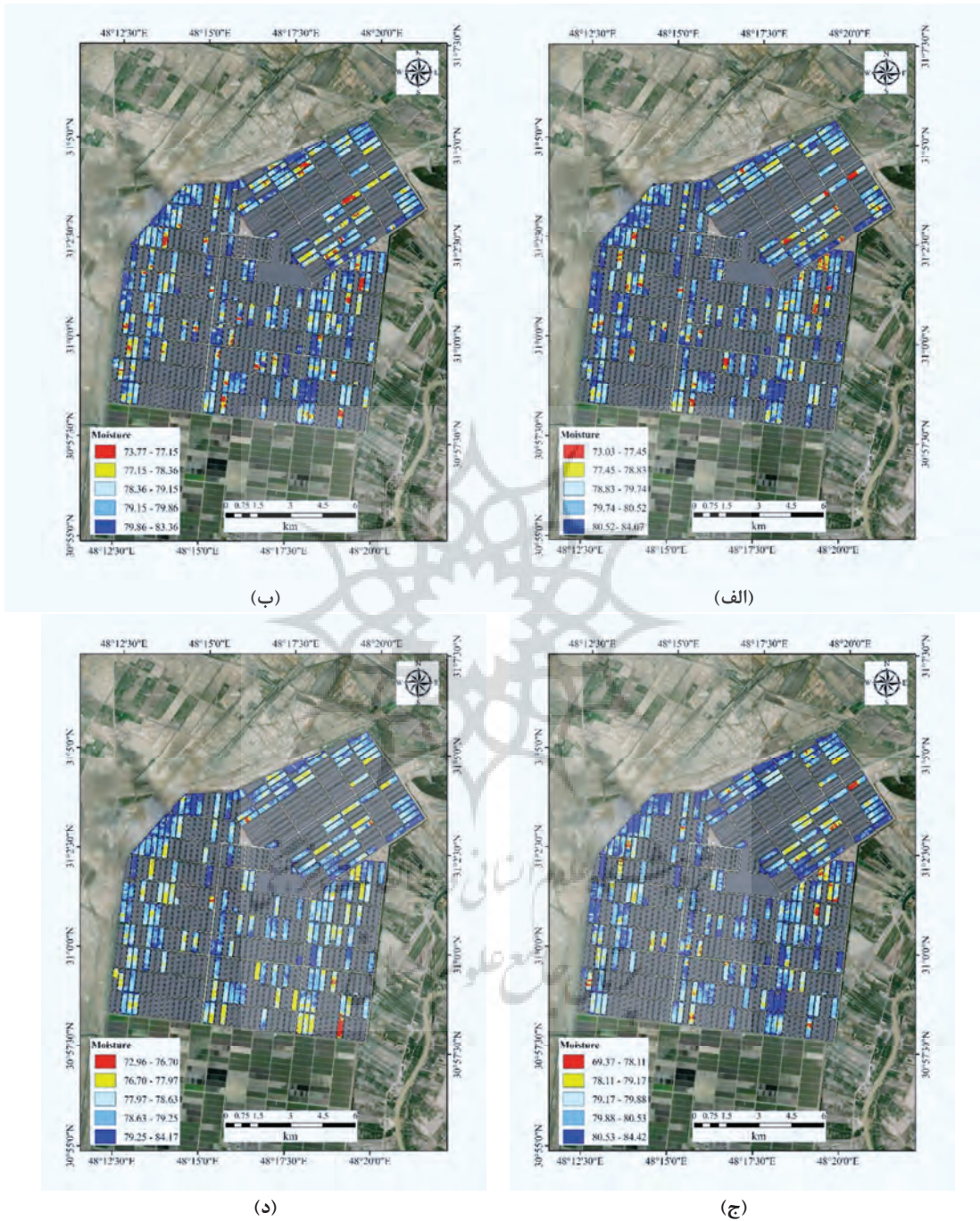
۳-۴- تهیه نقشه رطوبت غلاف در طول دوره رشد نیشکر شکل ۷ (الف، ب، ج، د و ه) نقشه‌های توزیع رطوبت غلاف برگ واریته CP69 را به ترتیب برای تاریخ‌های

جدول ۴. نتایج مربوط به RMSE برای چهار مدل GRNN، RF، PLSR و SVR برای پیش‌بینی رطوبت غلاف

| | شاخص‌ها و باندها | | باندها | | شاخص‌ها | |
|------|------------------|----------------|--------|----------------|---------|----------------|
| | RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² |
| PLSR | 1.58 | 0.54 | 1.67 | 0.45 | 1.6843 | 0.4474 |
| GRNN | 1.68 | 0.44 | 1.87 | 0.034 | 1.8858 | -0.0953 |
| SVR | 1.50 | 0.60 | 1.85 | 0.31 | 1.8232 | 0.26221 |
| RF | 1.63 | 0.49 | 1.70 | 0.42 | 1.7016 | 0.42624 |

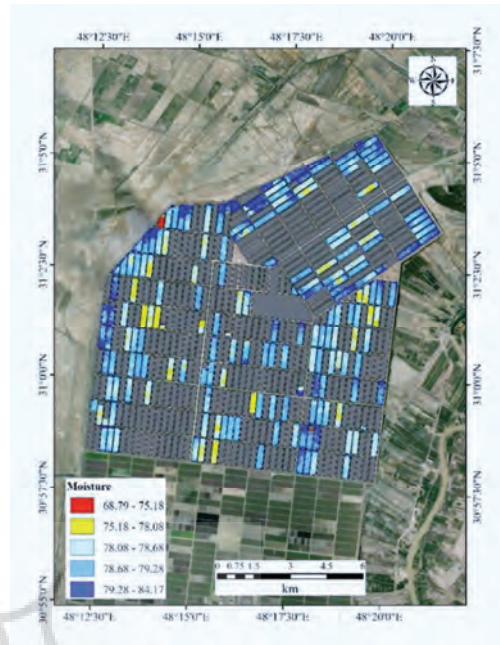


شکل ۶. نمودار پراکندگی بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده رطوبت غلاف برگ نیشکر با کمک مدل SVR



شکل ۷. نقشه‌های مربوط به رطوبت غلاف برگ نیشکر برای (الف) ۱۴ تیر، (ب) ۲۹ تیر، (ج) ۱۸ مرداد، (د) ۲ شهریور و (ه) ۲۲ شهریور

به منظور اطمینان از صحت این دسته‌بندی‌ها از برنامه زمان‌بندی آبیاری هر کدام از مزارع استفاده شد. برنامه زمان‌بندی برای مزارع آرک ۱۱ در جدول ۵ نشان داده شده است. طبق این زمان‌بندی می‌توان کلاس‌بندی هریک از مزارع مربوط به آرک ۱۱ (شکل ۸) را بررسی و تحلیل کرد. با توجه به اینکه هر مزرعه ۲۵ هکتار است، طی چندین نوبت و در تاریخ‌های متوالی آبیاری صورت می‌گیرد. برای نمونه در مزرعه ARC 11-03، آخرین آبیاری از تاریخ ۹ تیر آغاز شده و تا ۱۲ تیر ادامه یافته است. بعد از گذشت چند روز، ابتدای مزرعه که ۹ تیر آبیاری شده رطوبت در حال کاهش بوده و رنگ آن قسمت از مزرعه ارغوانی شده است، اگرچه در نقاطی هم به رنگ زرد دیده می‌شود. انتهای مزرعه در تاریخ ۱۲ تیر آبیاری شده، رطوبت همچنان بالا بوده و به رنگ آبی پررنگ قابل رؤیت است. داده‌های گزارش شده با این پدیده که رطوبت پس از ۲۴ ساعت جذب گیاه می‌شود مطابقت دارد (Alizadeh, 2017).



(هـ)

ادامه شکل ۷



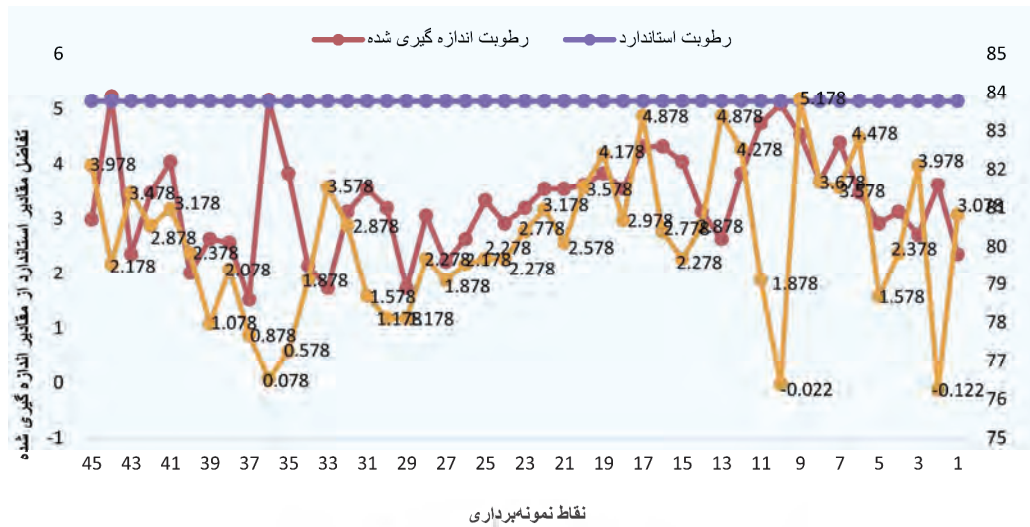
شکل ۸. مزارع آرک ۱۱ از وارینته CP69

جدول ۵. تاریخ‌های آبیاری مربوط به بخشی از مزارع در ۱۴ تیر

| شماره مزرعه | نوبت‌های آبیاری | |
|-------------|--|---|
| | آبیاری بعدی | آخرین آبیاری |
| ARC 11-03 | ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ تیر- ۵، ۶، ۷ و ۵ هکتار | ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تیر- ۴، ۵، ۶ و ۷ هکتار |
| ARC 11-04 | ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ تیر- ۵، ۳/۵، ۶ و ۶/۵ هکتار | ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ تیر- ۵، ۴/۵، ۶، ۵ و ۵ هکتار |
| ARC 11-10 | ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ تیر- ۵، ۴/۵، ۶ و ۷/۳ هکتار | ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ تیر- ۳، ۴/۵، ۶ و ۶/۶ هکتار |
| ARC 11-14-1 | ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ تیر- ۵، ۴، ۳، ۲/۵، ۴/۳ و ۴/۳ هکتار | ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تیر- ۵، ۴، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵/۵ هکتار |
| ARC 11-20 | ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ تیر- ۵، ۳/۵، ۴، ۳/۴ و ۶/۴ هکتار | ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تیر- ۴، ۳/۵، ۶ و ۶/۶ هکتار |
| ARC 11-21 | ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ تیر- ۴، ۳/۴، ۴، ۵/۶ و ۵/۶ هکتار | ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تیر- ۴، ۳/۴، ۵ و ۶/۷ هکتار |
| ARC 11-22 | ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ تیر- ۳، ۳/۵، ۴، ۳ و ۶/۳ هکتار | ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ تیر- ۳، ۳، ۳/۵، ۴، ۳ و ۵/۵ هکتار |
| ARC 11-26 | ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ تیر- ۵، ۴، ۳/۵، ۴، ۵/۴ و ۵/۴ هکتار | ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ تیر- ۲، ۳/۵، ۴، ۳ و ۴/۵ هکتار |
| ARC 11-29 | ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ تیر- ۳، ۳/۵، ۴، ۴ و ۴/۴ هکتار | ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴- ۳، ۴، ۳، ۴، ۳/۵ و ۴/۴ هکتار |

۵-۳- آنالیز حساسیت مربوط به شاخص‌های رطوبت این مطالعه نشان می‌دهد که نظارت دقیق بر رطوبت محصول بسیار محدود خواهد بود، مگر اینکه شاخص‌های رطوبت محصول نه تنها شامل اطلاعات آب، بلکه حاوی زیست‌توده نیز باشند. نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های پژوهش پن و همکاران همسو است (Pan et al., 2018). آنالیز حساسیت به منظور مشخص شدن اهمیت هر پارامتر در برآورد رطوبت غلاف برگ برای دوره‌های مختلف انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است پارامترهای SRWI، Clgreen، NDVI، B5، B12، B11، B4، B3، EVI و B2 به ترتیب با درجه اهمیت نسبی ۱۳/۵۳، ۱۱/۷۰، ۱۱/۳۳، ۹/۴۷، ۹/۴۴، ۹/۹۹، ۸/۹۴، ۸/۹۳، ۸/۸۲ و ۸/۸۰ به عنوان پارامترهای مؤثر در فرایند مدل‌سازی رطوبت انتخاب شدند. شاخص SRWI بیشترین اثر را در فرایند تخمین رطوبت داشته است. این شاخص ترکیبی از باندهای فرسرخ نزدیک و قرمز هست که از شاخص‌هایی است که حساسیت بالایی به رطوبت گیاه نشان می‌دهد (Zhang and Zhou, 2019). همچنین این شاخص موقعی که گیاه تحت تنش آبی قرار می‌گیرد کارایی بالایی از خود نشان می‌دهد و اثرات آن در کلروفیل گیاه مشهود است (Dangwal et al., 2015; Ballester et al., 2019).

شکل ۹ نمودار مقادیر رطوبت غلاف برگ استاندارد، اندازه‌گیری شده و تفاضل آن دو در تاریخ ۱۴ تیر را نشان می‌دهد. با توجه به استاندارد رطوبت در این تاریخ که مقدار آن ۸۳/۷۷۸ درصد است، رطوبت‌های اندازه‌گیری شده قابل ارزیابی‌اند. در واقع از طریق تفاضل میان مقادیر استاندارد و مقادیر اندازه‌گیری شده ارزیابی را می‌توان انجام داد. چنانچه عدد تفاضل به دست آمده منفی، صفر، و یا مثبت باشد، به ترتیب رطوبت بالا، متوسط و پایین است. چنانچه عدد رطوبت به دست آمده پایین باشد نشان‌دهنده آن است که مزرعه نیاز به آبیاری دارد و یا مرحله تنش شروع شده است. به‌طور کلی، وقتی رطوبت کمتر از حد استاندارد باشد یا گیاه در مرحله رطوبت متوسط یا رطوبت کم قرار می‌گیرد و از همه مهم‌تر وقتی رطوبت به کمترین مقدار برسد، یعنی گیاه دچار تنش می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که شاخص تنش آبی برای گیاه نیشکر در محدوده ۲٪ تا ۷٪ در روزهای مختلف آبیاری نوسان می‌کند (Veisi et al., 2016). همچنین رطوبت غلاف برگ استاندارد برای تاریخ‌های ۲۹ تیر (هفته ۱۱)، ۱۸ مرداد (هفته ۱۵)، ۲ شهریور (هفته ۱۸) و ۲۲ شهریور (هفته ۲۲) به ترتیب برابر با ۸۳/۶۰، ۸۲/۳۸، ۸۱/۹۰۴ و ۸۰/۱۷۸ هستند (Anonymous, 2013).



شکل ۹. نمودار مربوط به مقادیر استاندارد و اندازه گیری شده رطوبت غلاف برای تاریخ ۱۴ تیر



شکل ۱۰. آنالیز حساسیت برای دوره های (الف) ۱۴ تیر، (ب) ۲۹ تیر، (ج) ۱۸ مرداد، (د) ۲ شهریور و (ه) ۲۲ شهریور

۴- نتیجه گیری

می تواند نقش بسزایی در حل این مشکل داشته باشد. در این پژوهش از شاخص های NDVI، NDII، SRWI، Clgreen، SIWSI و GVMI و باندهای حاصل از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ برای برآورد و پایش وضعیت رطوبت غلاف برگ نیشکر استفاده شد. بدین منظور، تصاویر ۱۴ تیر، ۲۹ تیر، ۱۸ مرداد، ۲ شهریور و ۲۲ شهریور از منطقه مطالعاتی اخذ شد و پس از تولید نقشه رطوبت گیاه مبتنی بر شاخص های

برآورد رطوبت غلاف برای تنظیم برنامه زمان بندی آبیاری در مزارع نیشکر حائز اهمیت است. با این حال رطوبت غلاف در تمامی شرکت های طرح توسعه نیشکر و صنایع جانبی با روش سنتی از طریق اندازه گیری وزن تر و وزن خشک گیاه قابل محاسبه است. این روش علاوه بر صرف زمان زیاد، هزینه بر است و در سطح وسیع قابل اجرا نیست. بنابراین فناوری سنجش از دور

- Alizadeh, A. 2017. **The Relationship Between Water, Soil and Plants**. This is the 14th edition. Published by Imam Reza University. Please refer to page 616 (In Farsi).
- Anonymous. 2013. **Sugarcane production technology in Iran - first volume: set of guidelines for crop production operations**. Rasvaje Publishing House, Khuzestan (In Farsi).
- Ashiq, M.W.; Zhao, C.; Ni, J.; Akhtar, M. 2010. **GIS-based high-resolution spatial interpolation of precipitation in mountain-plain areas of Upper Pakistan for regional climate change impact studies**. Theoretical and Applied Climatology, 99(3), pp.239-253 (doi. 10.1007/s00704-009-0140-y).
- Bachmaier, M.; Backes, M. 2008. **Variogram or semivariogram? Understanding the variances in a variogram**. Precision Agriculture, 9(3), pp.173-175 (doi. 10.1007/s11119-008-9056-2).
- Ballester, C.; Brinkhoff, J.; Quayle, W.C.; Hornbuckle, J. 2019. **Monitoring the Effects of Water Stress in Cotton Using the Green Red Vegetation Index and Red Edge Ratio**. Remote Sensing. 11: 7. 873: 1-21 (doi.org/10.3390/rs11070873).
- Breiman, L. 2001. **Random Forests**. Machine Learning. 45(1): 5-32.
- Ceccato, P.; Flasse, S.; Tarantola, S.; Jacquemoud, S.; Grégoire J. 2001. **Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain**. Remote Sensing of Environment. 77:22-33 (doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00191-2).
- Ceccato, P.; Gobron, N.; Flasse, S.; Pinty, B.; Tarantola, S. 2002. **Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach**. Remote Sensing of Environment, (doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00037-8).
- Chakroun, H.; Mouillot, F.; Hamdi, A. 2015. **Regional equivalent water thickness modeling from remote sensing across a tree cover/LAI gradient in Mediterranean forests of Northern Tunisia**. Remote Sensing, 7, 1937-1961 (doi.org/10.3390/rs70201937).
- رطوبتی حساس به رطوبت گیاه، وضعیت آبی گیاه نیشکر رصد گردید. از آنالیز VIF به منظور بررسی هم خطی بین شاخص‌ها و باندها استفاده شد. شاخص‌های Clgreen, SRWI, EVI, NDVI, B12 و B11, B6, B5, B4, B3, B2 تک باندهای به عنوان ورودی به چهار مدل SVR, RF, GRNN و PLSR داده شد. نتایج نشان داد که مدل SVR توانایی بالاتری را نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین رطوبت غلاف برگ داشت. همچنین طبق آنالیز حساسیت، پارامترهای Clgreen, SRWI, NDVI, B11, B12, B5, B4, B3, B2 به ترتیب به عنوان پارامترهای مؤثر در فرایند مدل سازی رطوبت انتخاب شدند. در مرحله نهایی رطوبت غلاف برگ به ترتیب مقدار از کم تا زیاد، به ۵ کلاس تنش، زمان آبیاری، رطوبت کم، رطوبت متوسط و رطوبت بالا طبقه بندی شد. با توجه به نتایج نقشه های رطوبتی و با توجه به برنامه زمان بندی آبیاری مربوط به هر تاریخ، می توان نتیجه گرفت خروجی حاصل ترکیبی از شاخص‌ها و باندهای B4, B3, B2, B12, B11, B6, B5, Clgreen و SRWI, EVI, NDVI عملکرد بهتری در تهیه نقشه های آبیاری داشتند. این روش با هدف ارزیابی پتانسیل شاخص های طیفی S2 MSI برای برآورد رطوبت غلاف برگ در مرحله رشد نیشکر به کار گرفته شد.

قدردانی

مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر و صنایع جانبی خوزستان و دانشگاه تربیت مدرس از این پژوهش حمایت کرده اند. پژوهشگران از هر دو مؤسسه تشکر و قدردانی می کنند.

منابع

Alavi-Panah, K. 2013. **Principles of Modern Remote Sensing and Interpretation of Satellite Images and Aerial Photographs**. Tehran University Printing and Publishing Institute. Please refer to page 784 (In Farsi).

- Cheng, T.; Riano, D.; Koltunov, A.; Whiting, M.L.; Ustin, S.L. 2013. **Rodriguez, J. Detection of diurnal variation in orchard canopy water content using MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) data.** Remote Sensing Environment, 132, 1–12 (doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.024).
- Clements, H.F., 1960. **Recent developments in crop logging of sugarcane.** In *Proceedings of the International Society of Sugarcane Technologists*. 10th Congress, Hawaii, 1959. 1960 (doi/full/10.5555/19610305460).
- Clements, H.F., 1977. **Potassium and sugarcane.** Agricultural Extension Education, Hawaii, 10811.
- Cornejo-Bueno, L.; Garrido-Merchán, E.C.; Hernández-Lobato, D.; Salcedo-Sanz, S. 2018. **Bayesian optimization of a hybrid system for robust ocean wave features prediction.** Neurocomputing, 275, pp.818–828 (doi.org/10.1016/j.neucom.2017.09.025).
- Dangwal, N.; Patel, N.R.; Kumari, M.; Saha, S.K. 2015. **Monitoring of water stress in wheat using multispectral indices derived from Landsat-TM.** Geocarto International, 31: 6. 682–693 (doi.org/10.1080/10106049.2015.1073369).
- Drucker, H.; Burges, C.J.; Kaufman, L.; Smola, A.; Vapnik, V. 1997. **Support vector regression machines.** Advances in neural information processing systems, 9, pp.155–161.
- Gao, B.C. 1996. **A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space.** Remote sensing of environment, 58(3): 257–266 (https://doi.org/10.1117/12.210877).
- Gevrey, M.; Dimopoulos, I.; Lek, S. 2003. **Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models.** Ecological modelling, 160(3), pp.249–264 (doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00257-0).
- Gitelson, A. A.; Andrés, V.; Verónica, C.; Donald, C. R.; Timothy, J. A. 2005. **Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops.** Geophysical Research Letters 32 (8): L08403 (doi:10.1029/2005GL02268).
- Grof, C. P.; Campbell, J. A. 2001. **Sugarcane sucrose metabolism: scope for molecular manipulation.** Functional Plant Biology, 28(1), 1–12 (https://doi.org/10.1071/PP00039).
- Gu, Y.; Hunt, E.; Wardlow, B.; Basara, J.B.; Brown, J.F.; Verdin, J.P. 2008. **Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data.** Geophysical Research Letters, 35, L22401 (https://doi.org/10.1029/2008GL035772).
- Haenlein, M.; Kaplan, A.M. 2004. **A beginner's guide to partial least squares analysis.** Understanding statistics, 3(4), pp.283–297 (https://doi.org/10.1207/s15328031us0304_4).
- Hardisky, M. A.; Daiber, F. C.; Roman, C. T.; V. Klemas. 1984. **Remote Sensing of Biomass and Annual Net Aerial Primary Productivity of a Salt Marsh.** Remote Sensing of Environment 16 (2): 91–106. doi:10.1016/0034-4257(84)90055-5 (https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90055-5).
- Keshavaiah, K.V.; Palled, Y.B.; Shankaraiah, C.; Nandihalli, B.S. 2013. **Effect of sheath moisture and relation of SPAD on yield of sugarcane.** Advance Research Journal of Crop Improvement, 4(2), pp.98–102 (doi/full/10.5555/20143261002).
- Khajapour, M. 2013. **Industrial Plants.** Academic Jihad (Isfahan University of Technology). 582 pages Khuzestan (In Farsi).
- Law, T.; Shawe-Taylor, J. 2017. **Practical Bayesian support vector regression for financial time series prediction and market condition change detection.** Quantitative Finance, 17(9), pp.1403–1416 (https://doi.org/10.1080/14697688.2016.1267868).
- Martin, R.E.; Asner, G.P.; Francis, E.; Ambrose, A.; Baxter, W.; Das, A.J.; Vaughn, N.R.; Paz-Kagan, T.; Dawson, T.; Nydick, K., et al. 2018. **Remote measurement of canopy water content in giant sequoias (Sequoiadendron giganteum) during drought.** Forest Ecology and Management. 2018, 419, 279–290 (https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.002).

- McFeeters, S.K. 1996. **The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features.** International Journal of Remote Sensing, 17, 1425–1432 (<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>).
- Pan, H.; Chen, Z.; Ren, J.; Li, H.; Wu, S. 2018. **Modeling winter wheat leaf area index and canopy water content with three different approaches using Sentinel-2 multispectral instrument data.** IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(2), pp.482-492 (DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2855564).
- Rahdari, V.; Sufianian, A.; Khajehuddin, S. J.A.; Maleki Najafabadi, S. 2013. **Investigating the ability of satellite data in preparing a map of vegetation canopy percentage in arid and semi-arid areas (case study of Mote Wildlife Sanctuary).** Environmental Science and Technology Quarterly. Volume 15, Number 4 - Issue 4, Page 43-54 (In Farsi).
- Specht, D.F. 1991. **A general regression neural network.** IEEE transactions on neural networks, 2(6), pp.568-576.
- Sung, A.H. 1998. **Ranking importance of input parameters of neural networks.** Expert Systems with Applications 15, 405/411 ([https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00041-4)).
- Tabib Mahmoudi, F. 2019. **Investigating the water stress status of plants in northern Iran under the influence of quarantine measures during the covid-19 virus pandemic.** Journal of water and soil protection research, Volume 27; Number 6 (In Farsi).
- Thomas, J.R.; Namken, L.N.; Oerther, G.F. 1971. **Estimating Leaf Water Content by Reflectance Measurement.** Agronomy Journal. 63, 845–847 (<https://doi.org/10.2134/agronj1971.00021962006300060007x>).
- Veisi, S.; Nasri, A.; Hamzah, S. 2016. **The relationship between sugarcane leaf sheath moisture and water stress index using an infrared thermometer.** Irrigation Science and Engineering (Scientific-Research Magazine), Volume 91, Number 9, Winter 4 (In Farsi).
- Vincini, M.; Calegari, F.; Casa, R. 2016. **Sensitivity of leaf chlorophyll empirical estimators obtained at Sentinel-2 spectral resolution for different canopy structures.** Precision Agriculture, 17(3), pp.313-331 (Doi. 10.1007/s11119-015-9424-7).
- Zhang, F. & Zhou, G., 2019. **Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: A comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize.** BMC ecology, 19(1), pp.1-12 (doi. 10.1186/s12898-019-0233-0).
- Zhang, F.; Zhou G., 2015. **Estimation of canopy water content by means of hyperspectral indices based on drought stress gradient experiments of maize in the North Plain China.** Remote Sensing, 7:15203–23 (<https://doi.org/10.3390/rs71115203>).