



Comparison Sentinel-2 with Landsat 8/9 to Detect Water Stress in Sugarcane Fields

Elahe Zoratipour¹, Amir Soltani Mohammadi², Shadman Veysi³, Saeed Boroomand Nasab⁴, Abd Ali Naseri⁵

1. Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: e.zoratipour@yahoo.com
2. Corresponding Author, Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: a.soltani@scu.ac.ir
3. Soil and Water Research Institute (SWRI), Alborz, Iran. E-mail: sh.veysi@areeo.ac.ir
4. Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: boroomand@scu.ac.ir
5. Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: abdalinaseri@scu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: Jan. 26, 2025 Revised: March. 18, 2025 Accepted: Apr. 19, 2025 Published online: July. 2025 Keywords: Precision Instrumentation, Remote Sensing, Moisture Stress Index, Surface Temperature Index, Crop Monitoring.	Water stress is one of the most important factors affecting the evaluation of water content and the monitoring of plants. If water stress is properly recognised, yield can be improved and waste of water resources prevented in the short term. The aim of this study is to compare the capability of the infrared bands of the Sentinel 2 satellite and the thermal bands of the Landsat 8-9 satellite to determine water stress in the Amir Kabir Sugarcane Agro-Industry Unit in Khuzestan province. Actual calculated stress data based on the empirical Idso equation were used for the evaluation. The land surface temperature index (LST) based on Landsat 8-9 thermal bands and the moisture stress index (MSI) based on Sentinel 2 infrared bands were used to estimate water stress. The results show that the Landsat 8-9 satellite thermal bands with an average, R² of 0.78-0.92, RMSE of 0.08-0.11, rMBE of 14.54-14.20, and r of 0.88-0.96, showed a slightly better estimate of the actual stress data than the infrared bands of Sentinel 2 with an average R² of 0.74-0.89, RMSE of 0.14-0.15, rMBE of 28.5-38.6, and r of 0.86-0.94. However, the trend of stress changes for the two satellites is similar to the actual values. Based on the spatial distribution map, the estimated water stress was determined using thermal and infrared bands with the highest stress of 0.65 and 0.69, on July 24, respectively. Therefore, both satellites performed acceptably to estimate the water stress of sugarcane, and when Landsat 8-9 imagery is unavailable, the use of Sentinel-2 imagery is recommended for crop water stress estimation.
Cite this article: Zoratipour, E., Soltani Mohammadi, A., Veysi, Sh., Boroomand Nasab, S., & Naseri, A.A., (2025) Comparison Sentinel-2 with Landsat 8/9 to Detect Water Stress in Sugarcane Fields, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 56 (5), 1219-1238. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389356.669872 © The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press. DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389356.669872	



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Increasing the water productivity of crops to meet growing demand and global food production is one of the greatest challenges facing global agriculture (Das et al., 2024). Accurate and timely determination of water stress in agricultural systems can help optimize crop water productivity (King et al., 2020). Water stress is one of the most critical abiotic stressors limiting plant growth, crop yield and quality of food production (Gerhards et al., 2016; Hsiao et al., 1976). The Idso method was developed in the past to normalize and quantitatively assess leaf temperature. Remote sensing (RS) is a powerful and reliable tool that has facilitated the study of canopy water status (Solgi et al., 2023). The main remote sensing techniques for detecting crop stress (water stress and other types of stress) are infrared thermal imaging infrared and short-wave infrared reflectance.

Due to the climatic conditions of the study area, which faces water scarcity, accurate estimation of crop water stress is essential to improve irrigation management. So, the aim of this study was to use the thermal bands from the Landsat 8-9 satellites and the infrared bands from the Sentinel 2 satellite for CWSI prediction and to compare them with the CWSI data calculated from sensor data and the Idso method.

Material and method

Meteorological data were collected from the meteorological station of Amir Kabir Agro Industry, including air temperature (T_a), dew point temperature (T_{dew}) and relative humidity (RH) during the water critical seasons (July, August, September). Four fields were selected for daily measurements. The measurements, including T_c , T_a and RH, were taken automatically and simultaneously on the days and at the times of the satellite overflight at 10:30 am. In this study, four cloudless Landsat 8-9 satellite images and four sentinel2 were used on four day, Simultaneously. In order to evaluate, actual stress calculated were used, (empirical Idso method). To estimate the water stress, the land surface temperature index (LST) based on the Landsat 8-9 thermal bands and the moisture stress index (MSI) based on the Sentinel-2 infrared bands were used. Subsequently, the dimensionless moisture stress index (MSI) was determined. Also, in order to focus on agricultural lands and water stress changes at fields, outliers and areas without vegetation should be removed from the images. To assess the accuracy of the estimated CWSI from thermal bands of Landsat 8-9 and infrared bands Sentinel2 with CWSI calculated from the Idso method statistical metrics were used.

Result and Discussion

The results of predicted CWSI of Landsat 8-9 thermal bands compared to actual (calculated) CWSI values on July 7 were R^2 of 0.89, RMSE of 0.09, rMBE of 19.12, and r of 0.94. Also, the results of evaluating the Sentinel 2 infrared bands were R^2 of 0.74, RMSE of 0.15, rMBE of 1.34, and r of 0.86. Also, on July 24, the results for the thermal and infrared bands were obtained with R^2 equal to 0.92 and 0.89, RMSE equal to 0.08 and 0.14, rMBE equal to 14.20 and 6.38, and r equal to 0.96 and 0.94 for the thermal and infrared bands, respectively. In the middle of the studied interval, on August 18, the following results were obtained with increasing temperatures: R^2 of 0.82 and 0.84, RMSE of 0.11 and 0.15, rMBE of 19.5 and 28.5 for the thermal and infrared bands, respectively. Also, at the end of the interval, on September 2, results were obtained with R^2 equal to 0.78, RMSE equal to 0.08, rMBE equal to 14.54, and r equal to 0.88 for the thermal bands of the Landsat 8-9 satellite, and R^2 equal to 0.77, RMSE equal to 0.14, rMBE equal to 30.8, and r equal to 0.88 for the infrared bands of Sentinel2. Based on the spatial distribution map, the estimated water stress was obtained using the thermal and infrared bands with the highest stress of 0.65 and 0.69 on July 24, respectively. Therefore, both satellites performed acceptably in estimating the water stress of sugarcane, and in the unavailability of Landsat 8-9 images, the use of Sentinel 2 images is recommended for estimating crop water stress.

Author Contributions

The authors contributed to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to grateful the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support (GN: SCU.WI1401.273). Also, thanks to the CEO and staff of Amir Kabir Sugarcane Agro-Industry who cooperated in the preparation of this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مقایسه توانایی تشخیص تنش آبی با استفاده از ماهواره‌های سنتینل ۲ و لندست ۸/۹ در مزارع نیشکر

الهه ذرتی پور^۱ | امیر سلطانی محمدی^۲ | شادمان ویسی^۳ | سعید برومندنسب^۴ | عبدعلی ناصری^۵۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: e.zoratipour@yahoo.com۲. نویسنده مسئول، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: a.soltani@scu.ac.ir۳. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، رایانامه: sh.veysi@areeo.ac.ir۴. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: boroomand@scu.ac.ir۵. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: abdalinaseri@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تنش آبی گیاه از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر مدیریت آب و نظارت بر وضعیت دسترسی گیاه به آب بوده، که در صورت تشخیص دقیق در کوتاه‌مدت سبب بهبود عملکرد و جلوگیری از هدررفت منابع آب می‌گردد. هدف از پژوهش حاضر، مقایسه قابلیت باندهای فروسرخ ماهواره سنتینل ۲ و باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹ در تعیین تنش آبی گیاه در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر، واقع در استان خوزستان بود. به‌منظور ارزیابی برآوردها از داده‌های واقعی محاسبه شده تنش براساس حسگرهای دما و رطوبت نسبی نصب شده در نقاط مختلف مزارع و معادله تجربی ایدسو استفاده گردید. برای برآورد تنش آبی براساس باندهای حرارتی لندست ۸-۹ از شاخص دمای سطح زمین (LST) و براساس باندهای فروسرخ سنتینل ۲ از شاخص تنش رطوبتی (MSI) استفاده گردید. طبق یافته‌ها، باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹، به‌طور میانگین با R^2 معادل ۰/۷۸-۰/۹۲، RMSE معادل ۰/۰۸-۰/۱۱، rMBE معادل ۰/۱۴-۰/۲۰ و ۱۴/۵۴ و r معادل ۰/۸۸-۰/۹۶ نسبت به باندهای فروسرخ سنتینل ۲ به‌طور میانگین با R^2 معادل ۰/۷۴-۰/۸۹، RMSE معادل ۰/۱۴-۰/۱۵، rMBE معادل ۰/۲۸/۵۳-۰/۳۸/۶۲ و r معادل ۰/۸۶-۰/۹۴ اندکی برآورد بهتری در مقایسه با داده‌های واقعی تنش نشان داد. اما روند تغییرات تنش در هر دو ماهواره تفاوت معنی داری را نشان نمی‌دهد. همچنین، براساس نقشه پراکنش مکانی تنش آبی برآورد شده با استفاده از باندهای حرارتی و فروسرخ به‌ترتیب، بیشترین میزان تنش معادل با ۰/۶۵ و ۰/۶۹ و مربوط به تاریخ ۲ مرداد حاصل گردید. لذا، هر دو ماهواره در برآورد تنش آبی نیشکر عملکرد قابل قبولی داشته و در صورت عدم دسترسی به تصاویر لندست ۸-۹، استفاده از تصاویر سنتینل ۲ نیز در برآورد تنش آبی گیاه پیشنهاد می‌گردد.
واژه‌های کلیدی: ابزار دقیق، سنجش از دور، شاخص تنش رطوبتی، شاخص دمای سطح، نظارت محصول.	
استناد: ذرتی پور؛ الهه، سلطانی محمدی؛ امیر، ویسی؛ شادمان، برومندنسب؛ سعید، ناصری؛ عبدعلی (۱۴۰۴) مقایسه توانایی تشخیص تنش آبی با استفاده از ماهواره‌های سنتینل ۲ و لندست ۸/۹ در مزارع نیشکر، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۵)، ۱۲۱۹-۱۲۳۸.	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389356.669872	https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389356.669872



مقدمه

کمبود آب به عنوان یک نگرانی مبرم جهانی، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصولات داشته و کاهش روزافزون منابع آب در دسترس، همراه با رقابت فزاینده، احتمال دسترسی به منابع آب آبیاری را کاهش می دهد (Kumari et al., 2024). همچنین، امنیت غذایی جهانی یکی از مهم ترین چالش های قرن اخیر با توجه به روند افزایش جمعیت می باشد (Kang et al., 2009). در این میان، تنش آبی به عنوان مهم ترین عامل غیرزیستی بوده، که رشد گیاه، عملکرد و کیفیت محصول را در تولید محصولات غذایی محدود می کند (Gerhards et al., 1976; Hsiao et al., 2016; al., 2016; بنابرین، راهبرد پیشرفته برنامه ریزی آبیاری به ویژه برای افزایش استفاده کارآمد از آب و حفظ عملکرد و کیفیت محصول مورد نیاز است (Zhou et al., 2021; King et al., 2020). تنش ناشی از کمبود آب که معمولاً به تنش آبی یا خشکی کوتاه مدت اطلاق می شود، یک ویژگی فنوتیپی است که به دلیل کمبود آب در دسترس و عدم وجود رطوبت قابل قبول یا کاهش پتانسیل آب خاک، کم آبی را در گیاه نشان می دهد (Gerhards et al., 2016; Hopkins and Huner., 2009). شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) به طور گسترده برای ارزیابی وضعیت آب گیاه مورد استفاده قرار می گیرد (Zhao et al., 2021). ارزیابی شاخص CWSI و وضعیت آب تاج پوشش از طریق دماسنج فروسرخ حرارتی برای اولین بار توسط (Jackson et al., 1977) پیشنهاد شد. رویکرد نظری جکسون، به دلیل پیچیدگی معادله و پارامترهای مورد نیاز مورد استقبال قرار نگرفت. بنابراین، این رویکرد به دنبال توسعه CWSI در اوایل دهه ۱۹۸۰ توسط ایدسو گسترش یافت (Idso et al., 1981). روش ایدسو قابلیت عمومی بیشتری دارد و در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است (Berni et al., 2009; Taghvaeian et al., 2014; Veysi et al., 2017; Katimbo et al., 2022; Das et al., 2024). بیان است، روش ایدسو نیز با محدودیت هایی روبرو بوده، بدین جهت که، تنها در مقیاس مزرعه به خوبی عمل نموده و در وسعت کلان جوابگو نمی باشد. سنجش از دور، ابزاری قدرتمندی برای نظارت بر مسائل مربوط به تنش های وارده بر محصولات کشاورزی و ارزیابی وضعیت آب گیاه می باشد (Besten et al., 2021). سنجش از دور، امکان نظارت سریع و غیرمخرب مکانی-زمانی بسیاری از ویژگی های فیزیولوژیکی و ساختاری محصول را فراهم می کند. از سنجش از دور به منظور تشخیص تنش گیاه (تنش آبی و سایر انواع تنش) از طریق تصویربرداری با باندهای حرارتی، مرئی، فروسرخ نزدیک و طول موج کوتاه استفاده می شود (Jones et al., 1999; Tanner et al., 1963). ماهواره های سری لندست به دلیل دارا بودن باند حرارتی، قادرند تنش را برآورد کنند. با قرارگیری ماهواره لندست ۹ در مدار، در کنار ماهواره لندست ۸، دوره تصویربرداری سری لندست، ۸ روزه شده و خلاء زمانی ۱۶ روزه را کاهش می دهد. با این وجود، هنوز هم ملاک قابل قبولی در برآورد تنش آبی در مقیاس زمانی کوتاه نمی تواند باشد. براین اساس، با کاربرد ترکیبی باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹ در کنار باندهای فروسرخ ماهواره سنتینل ۲ می توان خلاء زمانی را تا حد زیادی کاهش داد. مطابق تحقیقات اخیر، کاربرد داده های ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ در مدیریت و برنامه ریزی آبیاری و برقراری ارتباط میان تنش آبی گیاه و رطوبت سطحی خاک صورت گرفته است (مزیدی و همکاران، ۱، ۱۴۰۳؛ مزیدی و همکاران، ۲، ۱۴۰۳؛ Makaya et al., 2019; Vanino et al., 2018). همچنین، سنجش از دور فروسرخ حرارتی^۲ (TIR) به دلیل ارتباط مستقیم بین شاخص دمای سطح^۳ (LST) و تابش حرارتی سطحی، به عنوان عاملی مؤثر برای کمی سازی درجه تنش آبی گیاهان در نظر گرفته شده و برآورد دمای تاج پوشش، محتوای رطوبتی گیاه و تنش آبی گیاه براساس شاخص های طیفی نوری و حرارتی برای برنامه ریزی آبیاری گیاهان صورت می گیرد (Wang et al., 2022; Veysi et al., 2020; Veysi et al., 2017). ماهواره سنتینل ۲ با قابلیت دسترسی تصاویر ۴ روزه در هر ماه و دارا بودن باندهای مرئی و فروسرخ (فاقد باند حرارتی) در کنار تصاویر ماهواره سری لندست ۸-۹، اگرچه سبب برآورد تنش روزانه نمی شود، اما تا حد زیادی به کاهش مقیاس زمانی در برآورد تنش آبی منجر می گردد. براساس مطالعات انجام شده، به منظور استخراج بهتر اطلاعات ویژگی های طیفی در ارتباط با محتوای آب خاک و گیاه، محققین چندین شاخص طیفی، از جمله شاخص تنش رطوبتی^۴ (MSI) را پیشنهاد کرده و معتقدند در بازایی تغییرات رطوبتی حساس می باشند. براین اساس، شاخص های طیفی نوری نیز در تشخیص تغییرات رطوبتی و تنش آبی وارده به گیاه در زیست بوم های مختلف استفاده می شوند (Ren et al., 2022; Chai and Chen., 2017; Lees et al., 2019; Liu et al., 2016). در این زمینه پژوهش های فراوانی انجام گرفته است، مزیدی و همکاران (۱۴۰۳)، به منظور ارزیابی و برآورد تنش آبی گیاه پنبه مبتنی بر تغییرات رطوبتی خاک، از

1 Crop water stress index

2 Thermal

3 Land Surface Temperature

4 Moisture Stress Index

داده‌های ماهواره لندست ۸-۹ و سنتینل ۲ و ارتباط بین محتوای رطوبتی خاک و شاخص‌های گیاهی در مناطق روستایی شهرستان گرگان استفاده نمودند. نتایج نشان داد، ماهواره لندست ۸-۹ نسبت به ماهواره سنتینل ۲ از دقت بالاتری برخوردار بود و حداکثر ضریب تعیین و خطا برای ماهواره سنتینل ۲ به ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۴/۹ درصد به دست آمد. در دیگر پژوهش مزیدی و همکاران (۱۴۰۳)، تنش آبی پنبه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-۹ و سنتینل ۲، مبتنی بر درخت M5 (Quinlan, 1992) برآورد گردیده و رطوبت خاک را به عنوان نماینده تنش آبی گیاه به طور مستمر مورد پایش قرار دادند. نتایج نشان داد، ماهواره لندست با ضریب تعیین ۰/۷ و سنتینل با ضریب تعیین ۰/۶۷ رابطه بهینه را نشان دادند. در پژوهش (Karlqvist et al. (2024، بازیابی رطوبت گونه‌های خره‌های اسفاگونوم^۱ با استفاده از داده‌های فراطیفی و چندطیفی در دو زیستگاه شمالی در فنلاند انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های چندطیفی به جای داده‌های فراطیفی، نتایج قابل توجه‌ای را در تخمین رطوبت براساس شاخص تنش رطوبتی (MSI) ارائه می‌دهد. در تحقیق دیگری، (Solgi et al. (2023، وضعیت محتوای آب تاج‌پوشش مزارع گندم زمستانه را با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی طیفی در شیراز بررسی کردند. براین اساس، از شاخص‌های پایش رشد گیاه (شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده، $NDVI^2$)، وضعیت آب گیاهی (شاخص بازتاب گیاه طول موج کوتاه، $SCRI^3$) و تنش خشکی گیاهی (شاخص تنش رطوبتی، MSI) به منظور ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری بر آب تاج‌پوشش استفاده نمودند. نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از شاخص‌های گیاهی^۴ (VIS) در تشخیص سطوح تنش خشکی گیاه مؤثر واقع شده و شاخص MSI در کنار دیگر شاخص‌ها، در تشخیص وضعیت عملکرد گیاه نقش بسزایی داشت. در ادامه نیز پژوهش (Ren et al. (2022، از شاخص‌های طیفی برای بازیابی دقیق رطوبت خاک تحت تنش آبی گیاه گندم زمستانه در منطقه جیاوژو^۵ استفاده کردند. به منظور تعیین قابلیت شاخص‌ها برای تشخیص رطوبت، آزمایش‌های تنش آب در مقیاس مزرعه بر روی گندم زمستانه در طول فصل رشد انجام شد. یافته‌ها بیانگر عملکرد بسیار خوب تمامی شاخص‌ها به خصوص شاخص MSI در بازیابی رطوبت خاک در عمق ۴۰-۰ سانتی متر می‌باشد. در مطالعه دیگری، (Jamshidi et al. (2020، به ارزیابی شاخص تنش آبی گیاه مرکبات با استفاده از اندازه‌گیری‌های در محل و داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل ۲ پرداختند. علاوه بر این، CWSI براساس باندهای حرارتی ماهواره لندست و استفاده از پیکسل‌های سرد-گرم (رویکرد ۱) و یک روش جدید همراه با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل ۲ (رویکرد ۲) برآورد شد. در نهایت رویکرد ۲ و استفاده از تصاویر سنتینل ۲ با ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۳ و میانگین خطای بایاس ۰/۰۲- منجر به دقت بالاتری در تخمین CWSI شد. همچنین، استفاده از تصاویر با وضوح بالا سنتینل ۲ برای کاهش تأثیر پس‌زمینه خاک بر دمای تاج‌پوشش نسبت داده شد. در پژوهش (Veysi et al. (2017، به برآورد شاخص CWSI، براساس باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸، جهت پایش تنش آبی گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری در مزارع نیشکر پرداختند. نتایج نشان داد که، CWSI براساس رویکرد جدید نقاط گرم-سرد می‌تواند به طور مؤثر در برآورد تنش آبی نیشکر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

بنابر تحقیقات انجام شده و با توجه به نوع اقلیم منطقه مورد مطالعه (استان خوزستان) که با محدودیت آب مواجه بوده، به منظور ایجاد برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، تعیین CWSI روزانه ضروری است. همچنین، نیشکر به عنوان گیاهی با نیاز آبی قابل توجه و به عنوان یک محصول راهبردی برای تضمین امنیت غذایی در منطقه محسوب می‌شود. لیکن، وسعت و تراکم بالای مزارع کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر واقع در استان خوزستان و اغلب عدم وجود حسگر و ابزار دقیق برای اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر بر CWSI در نقاط مختلف مزارع نیشکر، مسئله‌ای غیر قابل انکار است. همچنین، نظر به عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای روزانه برای پایش تنش آبی گیاه، می‌بایست تا جای امکان خلاء زمانی ایجاد شده در زمان تصویربرداری کاهش داده شود. براین اساس به مقایسه تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-۹ و سنتینل ۲ به منظور پایش تنش آبی گیاه براساس شاخص CWSI پرداخته می‌شود، که تاکنون در هیچ مطالعه‌ای مورد ارزیابی قرار نگرفته و لذا به عنوان نوآوری تحقیق حاضر معرفی می‌گردد. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی قابلیت باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹ و باندهای فروسرخ ماهواره سنتینل ۲ نسبت به تنش آبی محاسبه شده از طریق ابزار دقیق نصب شده در مزارع منتخب و معادله ایدسو می‌باشد.

1 Sphagnum

2 Normalized Difference Vegetation Index

3 Shortwave Crop Reflectance Index

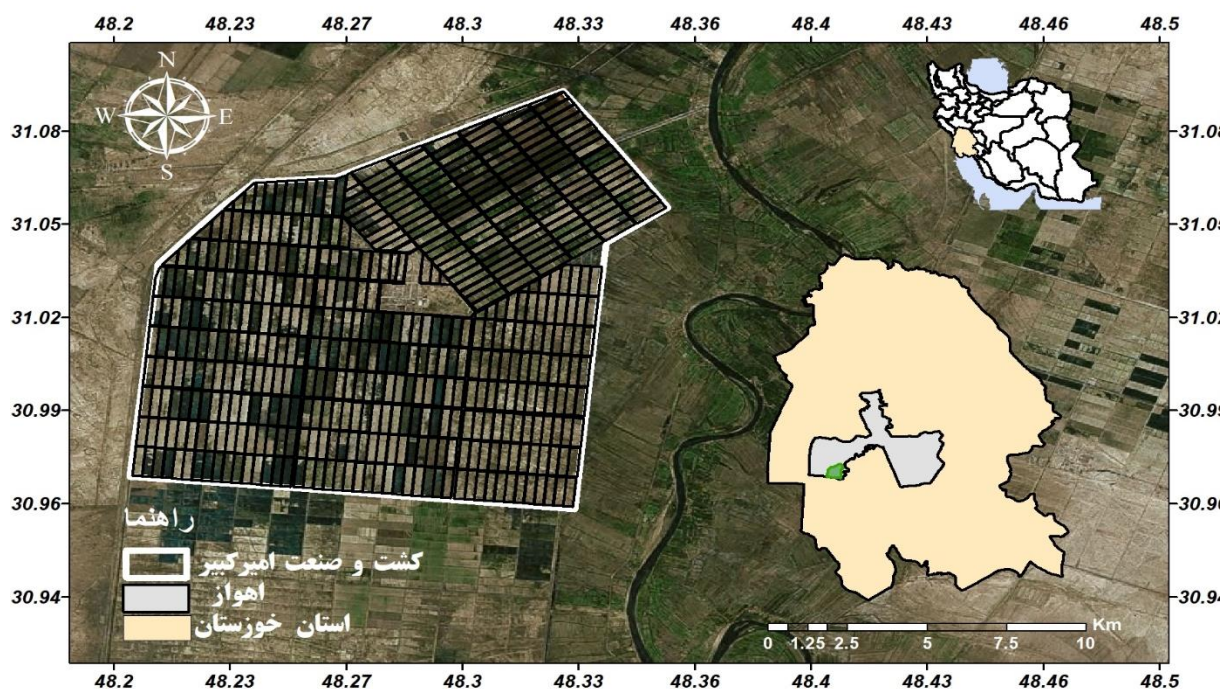
4 Vegetation Indices

5 Jiaozhou

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

کشت‌و صنعت امیرکبیر یکی از مراکز مهم و تخصصی در زمینه کشت و تولید نیشکر در استان خوزستان می‌باشد. منطقه مطالعاتی دارای عرض جغرافیایی از ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۰ دقیقه و طول جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه با ارتفاع ۷ متر از سطح دریا است. مساحت این کشت‌و صنعت ۱۴۰۰۰ هکتار است و تمامی مزارع نیشکر دارای وسعت یکنواخت هستند. هر مزرعه به وسعت ۲۵ هکتار که طول نهر آبیاری مزارع ۱۰۰۰ متر و طول شیار ۲۵۰ متر است. براساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی، منطقه‌ای نیمه‌خشک است و براساس داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک در منطقه مورد مطالعه، میانگین سالانه دمای هوا ۲۷ درجه سانتی‌گراد و بارندگی انباشته ۱۹۸ میلی‌متر است. زهکشی زیرسطحی در عمق ۱/۸ متری برای تمامی مزارع نصب شده است. بافت خاک منطقه مورد مطالعه، لوم رسی و رس سیلتی است. این منطقه بارندگی تابستانی ندارد و ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور بیشترین مصرف آب را دارند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.



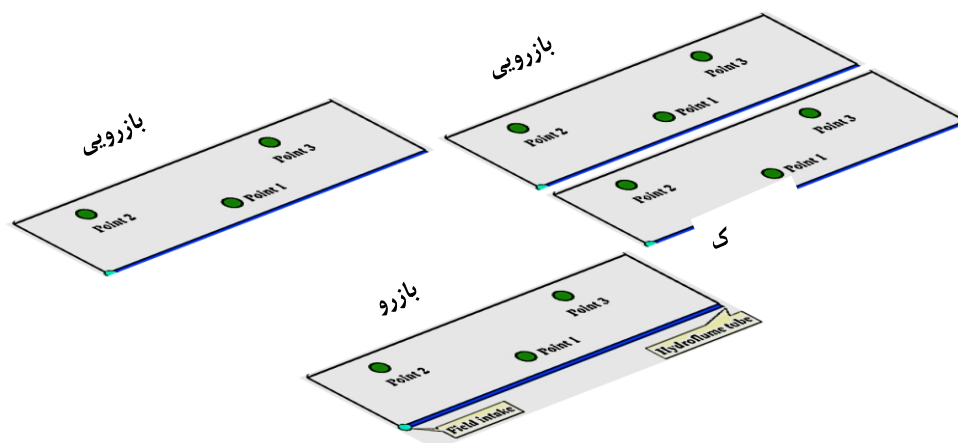
شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر، چهار مزرعه با سن‌های مختلف کشت، بازرویی اول، بازرویی دوم و بازرویی سوم برای اندازه‌گیری تنش آبی نیشکر انتخاب گردید. مطابق شکل ۲، در هر یک از مزارع، شبکه‌ای از ابزار سنجش پروگزیمال^۱ در هریک از نقاط تحت پایش نصب شده است. دمای تاج‌پوشش (Tc)، دمای هوا (Ta) و رطوبت نسبی (RH) به طور مداوم با استفاده از ابزار دقیق اندازه‌گیری و مقادیر آن‌ها به‌طور میانگین هر ۳۰ دقیقه، از ساعت ۶ صبح تا ۶ عصر، در داده‌بردار^۲ ثبت شدند. حسگرهای ثبت‌کننده دما، ثابت و بدون حرکت با زاویه اوج ۴۵ درجه به سمت سایبان و در فاصله حدود ۳۰-۱۰ سانتی‌متری از محل تاج‌پوشش، بر روی یک پایه فلزی ۳ متری، نصب گردید. همچنین، با توجه به سرعت رشد و افزایش ارتفاع نیشکر، فاصله حسگر و سایبان به صورت هفتگی تنظیم گردید.

1 Proximal Sensing

2 Data-logger



شکل ۲. موقعیت مکانی نصب حسگرها در مزارع

از آنجایی که دماسنج‌های فروسرخ استاندارد و مورد تأیید (دماسنج فروسرخ Kane-may، مدل KM823، دارای محدوده طیفی از ۸ تا ۱۴ نانومتر هستند، حسگرهای تعبیه شده در مزارع نیز متقارن با همین محدوده طیفی بوده و براین اساس با استفاده از روش رایج مخلوط آب و یخ در دمای صفر درجه واسنجی شدند (ویسی، ۱۳۹۶). اطلاعات ذخیره شده در دستگاه ثبت کننده داده از طریق تلفن همراه در اختیار قرار گرفته و در نهایت، با استفاده از نرم افزار Serial Port Monitor به رایانه منتقل شدند. به منظور حفاظت و امنیت بیشتر از دستگاه ثبت کننده داده در برابر شرایط دمایی و حمله جانوران، دستگاه‌ها درون یک محفظه چوبی به همراه جاذب‌های رطوبتی درون محفظه تعبیه و بر پایه آهنی نصب گردیدند. قابل بیان است، مختصات جغرافیایی دقیق هر مکان اندازه گیری نیز با استفاده از فناوری موقعیت یاب جهانی^۱ (GPS) به دقت ثبت شد. به طور یکنواخت، تمام اندازه گیری‌های حسگر پروگزیمال به طور مداوم در فاصله ثابت ۶۰ متر از لبه میدان در سه نقطه از نقاط شاهد (نقاط کراپ لاگ) انجام شد. بنابراین، میانگین ۳۰ دقیقه‌ای دمای تاج پوشش، دمای هوا و رطوبت نسبی هوا، با استفاده از ابزار دقیق در محاسبات شاخص CWSI استفاده شد. همچنین، کلیه اندازه گیری‌ها در گرم‌ترین ماه‌های سال شامل تیر، مرداد و شهریور سال ۱۴۰۲ و از رقم‌های CP69 جمع آوری و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، ارقام نیشکر مورد استفاده، رقم‌های تجاری متداول بوده و بیشترین سطح زیرکشت در اراضی نیشکر را به خود اختصاص داده‌اند (عباسی و شینی‌دشتگل، ۱۳۹۵). شکل ۳ نیز، نمایی از ابزار دقیق نصب شده در هر یک از مزارع تحت پایش را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمایی از ابزار دقیق نصب شده در مزارع

محاسبه شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)

ایدسو (Idso., 1982)، CWSI را به عنوان اختلاف دمای تاج پوشش گیاهی به دمای هوا ($T_c - T_a$) و کمبود فشار بخار هوا (VPD^1) در گیاهی با آبیاری کافی، در یک روز روشن آفتابی، تحت شرایط محیطی استاندارد تخمین زد. برای تخمین CWSI، دو خط مرجع (خط مبنای پایین و خط مبنای بالا)، مختص گیاه باید مشخص شوند. خط مبنای پایین نشان دهنده سطح بدون تنش آبی است که به کمبود فشار بخار (VPD) وابسته است. درحالی که خط مرجع بالایی سطح تحت تنش آبی را نشان می دهد و در این حالت تعرق تاج پوشش گیاه ($T_c - T_a$) صفر بوده و بستگی به کمبود فشار بخار (VPD) ندارد. (Idso., 1982; Nielsen., 1990; Gardner et al., 1992). بنابراین، CWSI براساس معادله ارائه شده توسط Idso et al. (1981) به صورت ذیل محاسبه می شود:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{UL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

T_c نشان دهنده دمای پوشش سبز گیاه ($^{\circ}C$)، T_a نشان دهنده دمای هوای محیط ($^{\circ}C$) و LL نشان دهنده خط مبنای پایینی است که در این سطح، گیاهان دارای مقدار آب کافی هستند و UL نشان دهنده خط مبنای بالایی است که در آن گیاه تحت تنش آبی می باشد. خط مبنای پایین با توجه به اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا ($T_c - T_a$) در برابر مقدار کمبود فشار بخار (VPD) از اطلاعات جمع آوری شده در مراحل مختلف رشد برآورد می شود. به منظور تعیین خط مبنای بالا نیز، دمای تاج پوشش گیاه تحت تنش، در طول مراحل رشد، ارزیابی می گردد. شاخص CWSI وضعیت آب گیاه را در مقیاسی از صفر تا یک تعریف می کند به گونه ای که، صفر نشان دهنده عدم وجود تنش یا تنش آبی بسیار کم و یک نشان دهنده تنش آبی زیاد است (Edom et al., 2021).

تصاویر ماهواره ای مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از تصاویر ماهواره ای لندست ۸، لندست ۹ و سنتینل ۲ استفاده شد، به طوری که برداشت های میدانی از واحد کشت و صنعت امیرکبیر منطبق بر روز گذر ماهواره باشد. تصاویر لندست ۸ هر ۱۶ روز در دسترس قرار گرفته و از یازده باند طیفی با تفکیک مکانی ۳۰ متر برای باندهای طول موج کوتاه (باندهای ۱ تا ۹، بجز باند ۸، پانکروماتیک^۲ که ۱۵ متر می باشد) و باندهای حرارتی (۱۰ و ۱۱) با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر تشکیل شده اند. لندست ۹ از نظر ویژگی و شرایط باندی مشابه لندست ۸ است. اما از مزیت های این سری ماهواره می توان به در نظر گرفتن جزئیات بیشتر پدیده ها و توان رادیومتریکی بالاتر اشاره نمود. همچنین، با کاربرد مشترک تصاویر ماهواره ای، لندست ۹ و لندست ۸ خلأ زمانی جبران گردیده و تقریباً هر ۸ روز یک بار امکان تصویربرداری و جمع آوری داده وجود دارد، لذا داده های ارزشمندتری در اختیار کاربران می گذارد. تصاویر سنتینل ۲ نیز معمولاً در یک چرخه بازدید ۵-۴ روزه در دسترس قرار می گیرند که، شامل باندهای طیفی RGB (قرمز، سبز و آبی)، NIR (فروسرخ نزدیک)، و SWIR (فروسرخ طول موج کوتاه) و Vegetation Red Edge (لبه قرمز) می باشند. توان تفکیک مکانی این سنجنده ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر بوده و دارای وضوح بالا در نقشه برداری زمین های زراعی بوده و در موضوعات کشاورزی پایدار نقش مهمی ایفا می کند (Virnodkar et al., 2021). تصاویر لندست ۸ و ۹ از پایگاه داده سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS^۳) و تصاویر سنتینل ۲ از پایگاه ESA^۴ با لحاظ تصاویری بدون پوشش ابر در منطقه مورد مطالعه به صورت رایگان قابل دریافت می باشند. در ادامه، به منظور آماده سازی تصاویر و تجزیه و تحلیل نتایج از نرم افزارهای ArcGIS ۱۰/۳ و سامانه گوگل ارث انجین^۵ استفاده گردید. از آنجایی که دریافت داده ها در فواصل زمانی کم حجم زیادی در برداشته و پس از دریافت لازم به انجام تصحیحات و پیش پردازش های ماهواره ای برای افزایش وضوح تصاویر می باشد، لذا، استفاده از سامانه گوگل ارث انجین ضمن برطرف نمودن این مسائل، سرعت پردازش و آماده سازی تصاویر را با دقت بالایی رقم می زند. در مطالعه حاضر به دلیل ارزیابی قابلیت باندهای فرسرخ سنتینل ۲ و باندهای حرارتی لندست ۸-۹ در برآورد تنش، روزهایی در نظر گرفته شده که به طور مشترک تصاویر از هر دو دسته ماهواره موجود باشد، لذا در کل دوره مطالعه، تنها ۴ تاریخ موجود می باشد که با استفاده از هر دو نوع ماهواره لندست و سنتینل تصویربرداری صورت گرفته باشد، براین اساس تاریخ تصاویر بدون ابر مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه زمان تصویربرداری ماهواره های لندست ۸-۹ و سنتینل ۲ با زمان تقاطع استوایی حدوداً ۱۰:۳۰ صبح در مدار قرار گرفته و مقارن می باشند (Pahlevan et al., 2019)، این امر امکان جمع آوری تقریباً همزمان اطلاعات مورد نیاز برای پایش تنش آبی را فراهم می کند. براین اساس، تنش محاسباتی نیز با استفاده

1 Vapor Pressure Deficit

2 Panchromatic

3 www.earthexplorer.usgs.gov

4 European Space Agency (<https://dataspace.copernicus.eu/>)

5 Google Earth Engine

از حسگر و معادله تجربی ایدسو در ساعت ۱۰:۳۰ صبح ملاک ارزیابی قرار داده شد.

جدول ۱. تاریخ گذر ماهواره همزمان با داده برداری زمینی

تاریخ شمسی	تاریخ میلادی	ماهواره	درصد ابرناکی
۱۴۰۲/۰۴/۱۸	۲۰۲۳/۰۷/۰۹	سنتینل ۲ - لندست ۹	۰/۰۶
۱۴۰۲/۰۵/۰۲	۲۰۲۳/۰۷/۲۴	سنتینل ۲-لندست ۸	۰/۰۱
۱۴۰۲/۰۵/۲۷	۲۰۲۳/۰۸/۱۸	سنتینل ۲-لندست ۸	۳/۲۵
۱۴۰۲/۰۶/۱۱	۲۰۲۳/۰۹/۰۲	سنتینل ۲-لندست ۹	۰

شاخص‌های طیفی و حرارتی

باتوجه به وجود مشکلات و عدم قطعیت در ارتقاء داده‌های تجربی در گستره فضایی وسیع، قابلیت برآورد شاخص CWSI با شاخص‌های طیفی و حرارتی وجود دارد. لذا، براساس روش ایدسو (Idso et al., 1981)، با بهره‌گیری از داده‌های وضوح بالا ماهواره سنتینل و داده‌های لندست به این مهم پرداخته می‌شود. براین اساس، به منظور سهولت در ارزیابی‌ها و طبق پژوهش‌های صورت گرفته اخیر، شاخص حرارتی LST با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-۹ و شاخص طیفی MSI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، در ارتباط با پایش تنش آبی گیاه بکار برده شده است. شایان توجه است که استفاده از شاخص‌های گوناگون (LST, NDVI, NDMI^۱, MSI, SIWSI^۲, WI^۳) در تعیین میزان تنش آبی گیاه نقش مهمی ایفا کرده و درنهایت در برنامه‌ریزی آبیاری گیاه نقش اساسی دارد.

شاخص دمای سطح زمین (LST)

دمای سطح زمین (LST) با استفاده از الگوریتم کانال تکی (SC^۴) معرفی شده توسط Sobrino et al. (2004) محاسبه شد. این روش بر داده‌های فروسرخ حرارتی (TIR) از باند ۱۰ ماهواره لندست ۸-۹ متکی می‌باشد. محاسبه LST نیاز به دو پارامتر ورودی، مقدار بخار آب جو و میزان گسیلمندی سطح زمین (LSE^۵) دارد. مقادیر رقومی داده‌های TIR ماهواره لندست ۸-۹ با استفاده از معادله (۳) و (۴) به تابش طیفی گرمایی، معادله (۵) و سپس به دمای روشنایی، معادله (۷)، از طریق تابع پلانک، معادله (۶) تبدیل شدند.

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad \text{رابطه ۲}$$

$$L_{sen} = (M_l \times Q_{cal}) + A_L \quad \text{رابطه ۳}$$

$$T_{sen} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\gamma \approx \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma L_{sen}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$b_\gamma = \frac{c^2}{\lambda} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma} \quad \text{رابطه ۷}$$

به‌طوری‌که، T_s دمای سطح زمین (LST)، معادله (۲) ضریب تابش (LSE)، L_{sen} تابش طیفی در بالای اتمسفر^۱ (mm.sr.m2)، T_{sen} دمای روشنایی حسگر و L طول موج مؤثر در mm است. پارامترهای ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 رابطه مستقیمی با میزان فشار بخار آب در اتمسفر دارند. سپس، به منظور تخمین شاخص تنش آبی (CWSI)، با استفاده از باند حرارتی تصاویر ماهواره لندست ۸-۹، از شاخص LST استفاده شد. براین اساس، مطابق با معادله ۸، CWSI با استفاده از نقاط سرد^۶ و نقاط گرم^۷ (مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای) محاسبه شدند. نقاط سرد به‌عنوان نماینده سطحی از گیاه مرطوب و به خوبی آبیاری شده با پوشش کامل زمین توسط گیاه انتخاب می‌شود. دمای سطح و دمای

1 normalized difference moisture index

2 Shortwave Infrared Water Stress Index

3 water index

4 Single Channel

5 Land Surface Emissivity

6 Bright pixel

7 Hot pixel

هوای نزدیک به سطح در این پیکسل مشابه فرض می‌شود. نقاط گرم به‌عنوان نماینده زمین کشاورزی خشک و بدون پوشش گیاهی بوده و در تصویر نیز از این قسمت انتخاب می‌شود، که در آن تبخیر-تعرق صفر در نظر گرفته می‌شود (Waters et al., 2002). همچنین، نقاط سرد و گرم به‌ترتیب با دمای خط مبنای بدون تنش آبی و دمای گیاه بدون تعرق متناظر در معادله ایدسو جایگزین شدند (Veysi et al., 2020; Veysi et al., 2017).

$$CWSI = \frac{(T_s - T_{Cold})}{(T_{Hot} - T_{Cold})} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

به‌طوری‌که، T_s معادل با LST، دمای تاج پوشش در زمین‌های زراعی، T_{Cold} دمای پیکسلی از تصویر که به خوبی آبیاری شده و تقریباً به طور کامل پوشیده از پوشش گیاهی است (نقاط سرد)، و T_{Hot} دمای پیکسلی از تصویر پوشش گیاهی که دارای حداکثر میزان تنش آبی است (نقاط گرم).

شاخص تنش رطوبتی (MSI)

MSI شاخصی برای اندازه‌گیری میزان بازتاب بوده که به افزایش محتوای آب برگ حساس است. با افزایش محتوای آب در برگ‌های تاج پوشش گیاه، جذب در طول موج‌های حدود ۱۶۰۰ نانومتر (R_{1600}) یا باند ۱۱ ماهواره سنتینل ۲ نیز افزایش می‌یابد. جذب در طول موج‌های ۸۲۰ نانومتر (R_{820}) یا باند ۸ ماهواره سنتینل ۲ نیز به‌عنوان یک مرجع استفاده می‌شود، زیرا تقریباً این طول موج تحت تأثیر تغییرات محتوای آب قرار نمی‌گیرد. کاربردهای MSI شامل تجزیه و تحلیل تنش تاج پوشش، پیش‌بینی بهره‌وری و مدل‌سازی، تجزیه و تحلیل خطر آتش سوزی، و مطالعات فیزیولوژی زیست‌بوم است. مقادیر بالاتر شاخص MSI نشان‌دهنده تنش آبی بیشتر و محتوای آب کمتر بوده و مقادیر کم آن نشان‌دهنده وضعیت مطلوب محتوای آب گیاه می‌باشد. قابل ذکر است، مقادیر این شاخص از ۰ تا بیش از ۳ متغیر بوده و محدوده رایج برای پوشش گیاهی سبز در محدوده ۰/۴ تا ۲ است (Hunt and Rock., 1989; Datt et al., 1999; Xiao et al., 2014). لذا، به‌منظور پایش تنش آبی نیشکر با استفاده از باندهای فروسرخ (NIR و SWIR) سنتینل ۲ از شاخص تنش رطوبتی (MSI) مطابق با معادله ۹ استفاده گردید. در رابطه ۹، R_{1600} معادل باند ۱۱ و R_{820} معادل باند ۸ ماهواره سنتینل ۲ می‌باشد.

$$MSI = \frac{R_{1600}}{R_{820}} = \frac{B_{11}}{B_8} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

بی بعد نمودن شاخص تنش رطوبتی (MSI)

با توجه به اختلاف حدود تغییرات شاخص MSI (۰-۳) نسبت به شاخص CWSI (۰-۱)، به‌منظور امکان مقایسه شاخص‌ها، لازم است فرآیند نرمال‌سازی^۱ شاخص MSI صورت گیرد. لذا به‌منظور اطمینان از مقایسه معتبر بین شاخص‌های MSI و CWSI، مقایسه پیکسل‌های تصاویر در نقاط سرد و نقاط گرم ضروری است. در تعیین نقاط سرد و گرم، مقدار آستانه برای تعریف عملکرد بهتر مختلف بوده و مطالعات گوناگون مقادیر صدک متفاوتی را ارائه داده‌اند. لذا، این رویکرد محدوده شاخص را بین ۰ و ۱ نرمال‌سازی نموده تا امکان مقایسه با شاخص CWSI فراهم گردد. فرآیند نرمال‌سازی (بدون بعد کردن) شاخص MSI براساس معادله ۱۰ نشان داده شده است (Veysi et al., 2024; Safi et al., 2022; Filippi et al., 2022; Alauddin et al., 2010).

$$DMSI^2 = \frac{MSI - MSI_{Hot\ pixel}}{MSI_{Bright\ pixel} - MSI_{Hot\ pixel}} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

به‌گونه‌ای‌که، MSI نشان‌دهنده شاخص تنش رطوبتی در هر پیکسل از تصویر، $MSI_{Hot\ pixel}$ نماینده نقاط گرم و $MSI_{Bright\ pixel}$ نماینده نقاط سرد که به‌ترتیب نماینده مقادیر حداقل و حداکثر شاخص MSI در هر تصویر می‌باشند. قابل توجه است که، نرمال‌سازی یک رویکرد رایج است که برای استانداردسازی عوامل مختلف استفاده شده و آن‌ها را بی‌بعد و قابل مقایسه می‌کند (Moesinger et al., 2022; van Genuchten et al., 1980).

پس از اعمال فرآیند نرمال‌سازی تصاویر حذف نقاط پرت و اضافی، مربوط به شاخص‌های DMSI و CWSI صورت می‌گیرد. بدین صورت که، تعدادی از نقاط گرم تصویر (حدود ۱۵-۱۰ نقطه) که نماینده قسمت‌های ساختمان اداری یا زمین‌های آیش و بدون پوشش گیاهی بوده، انتخاب و حذف می‌گردند. مطابق با دستورالعمل الگوریتم بیلان انرژی سطحی برای زمین (Waters et al., 2002)، به‌منظور حذف نقاط پرت تصاویر، نماینده‌ای از نقاط گرم تصویر انتخاب می‌گردند. همان‌گونه که در قسمت قبل نیز اشاره شد، در نقاط گرم، به‌دلیل نبود پوشش گیاهی، هیچ‌گونه تبخیر-تعرقی صورت نگرفته و میزان تبخیر-تعرق صفر می‌باشد، بنابراین، در صورت عدم وقوع فرآیند تبخیر-تعرق، میزان دما و تنش آبی به بالاترین میزان خود و معادل ۱ و یا نزدیک به آن می‌باشد. لذا، در این نقاط مقادیر شاخص‌های

1 Normalization

2 Dimensionless Moisture Stress Index

DMSI و CWSI به بالاترین حد خود و معادل با ۱ می‌باشند (Waters et al., 2002).

ارزیابی مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری

به منظور ارزیابی دقت و قابلیت باندهای فروسرخ سنتینل ۲ و باندهای حرارتی لندست ۸-۹ در برآورد میزان تنش آبی نیشکر از مشخصه‌های آماری استفاده شد. براین اساس، شاخص‌های طیفی استخراج شده، براساس تنش آبی محاسبه شده از روش ایدسو و با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین R^2 ، ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE^*)$ ، میانگین نسبی خطا $(rMBE^*)$ و ضریب همبستگی پیرسون (r^*) مورد بررسی قرار گرفتند.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$rMBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\bar{O}_i} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$r = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در این معادلات، n تعداد نمونه‌ها، i شاخص هر مدل، مقادیر P_i و O_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، و $\bar{O}_i$ و $\bar{P}_i$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است.

نتایج و بحث

در شکل ۴ نمودار پراکندگی میزان تنش برآورد شده حاصل از باندهای حرارتی براساس شاخص LST و باندهای فروسرخ براساس شاخص MSI، نسبت به تنش محاسباتی در هر روز گذر مشترک ماهواره‌های لندست و سنتینل نشان داده شده است. باتوجه به نتایج حاصل از شکل ۴، نقاط مربوط به هر دو شاخص از پراکندگی قابل قبولی برخوردار بوده، به گونه‌ای که نتایج حاصل از ارزیابی باندهای حرارتی لندست ۸-۹ با مقادیر واقعی (محاسباتی) تنش مزارع در تاریخ ۱۸ تیر، برابر با R^2 معادل ۰/۸۹، $RMSE$ معادل ۰/۰۹، $rMBE$ معادل ۱۹/۱۲ و r معادل ۰/۹۴ و نتایج حاصل از ارزیابی باندهای فروسرخ سنتینل ۲ برابر با R^2 معادل ۰/۷۴، $RMSE$ معادل ۰/۱۵، $rMBE$ معادل ۳۴/۱ و r معادل ۰/۸۶ می‌باشد. همچنین، در تاریخ ۲ مرداد، نتایج برای باندهای حرارتی و فروسرخ به ترتیب برابر با R^2 معادل ۰/۹۲ و ۰/۸۹، $RMSE$ معادل ۰/۰۸ و ۰/۱۴، $rMBE$ معادل ۲۰/۱۴ و ۳۸/۶ و r معادل ۰/۹۶ و ۰/۹۴ به دست آمد. در اواسط دوره تحت بررسی، ۲۷ مرداد، که با افزایش دما و به تبع آن نیاز آبی گیاه افزایش دارد، نتایج دریافتی برابر با R^2 معادل ۰/۸۲ و ۰/۸۴، $RMSE$ معادل ۰/۱۱ و ۰/۱۵، $rMBE$ معادل ۱۹/۵ و ۲۸/۵ به ترتیب برای باندهای حرارتی و فروسرخ می‌باشد. در انتهای دوره، ۱۱ شهریور، نتایج برابر با R^2 معادل ۰/۷۸، $RMSE$ معادل ۰/۰۸، $rMBE$ معادل ۱۴/۵۴ و r معادل ۰/۸۸ برای باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹ و R^2 معادل ۰/۷۷، $RMSE$ معادل ۰/۱۴، $rMBE$ معادل ۳۰/۸ و r معادل ۰/۸۸ برای باندهای فروسرخ سنتینل ۲ حاصل شد.

مطابق یافته‌ها، مقادیر کمتر در شاخص آماری $RMSE$ ، می‌تواند به ویژگی‌های مزارع نیشکر، مانند تاج پوشش متراکم و سطح یکنواخت آنها، شامل پوشش گیاهی بیشتر نسبت داده شود. همچنین، شاخص $rMBE$ برای هر دو ماهواره با بیش‌برآوردی میزان تنش همراه بوده و در انتهای دوره، ۱۱ شهریور، این مقدار کاسته شده است. از دلایل این امر می‌توان به اثر میزان بازتاب ناشی از باندهای حرارتی و فروسرخ بر پوشش گیاهی مزارع اشاره نمود. همچنین با توجه به سیستم آبیاری سطحی حاکم بر مزارع نیشکر، ممکن است، کسری از یک پیکسل آبیاری گردیده و این امر، بر بازتاب طیفی اثرگذار می‌باشد. هنگامی که بخش زیادی از یک پیکسل آبیاری می‌شود، ماهواره بازتاب طیفی قوی‌تر را تشخیص داده، درحالی که ممکن است، پیکسل‌های همسایه تحت تأثیر قرار نگرفته باشند.

همچنین، LST مبتنی بر ماهواره تمایل به بیش‌برآوردی اندازه‌گیری‌های میدانی دارد، که ممکن است تحت تأثیر محدوده طیفی محدود (۱۲/۵-۱۰/۶ میکرومتر) تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با دماسنج فروسرخ (۸-۱۴ میکرومتر) باشد (Sobrinho et al., 2004). در

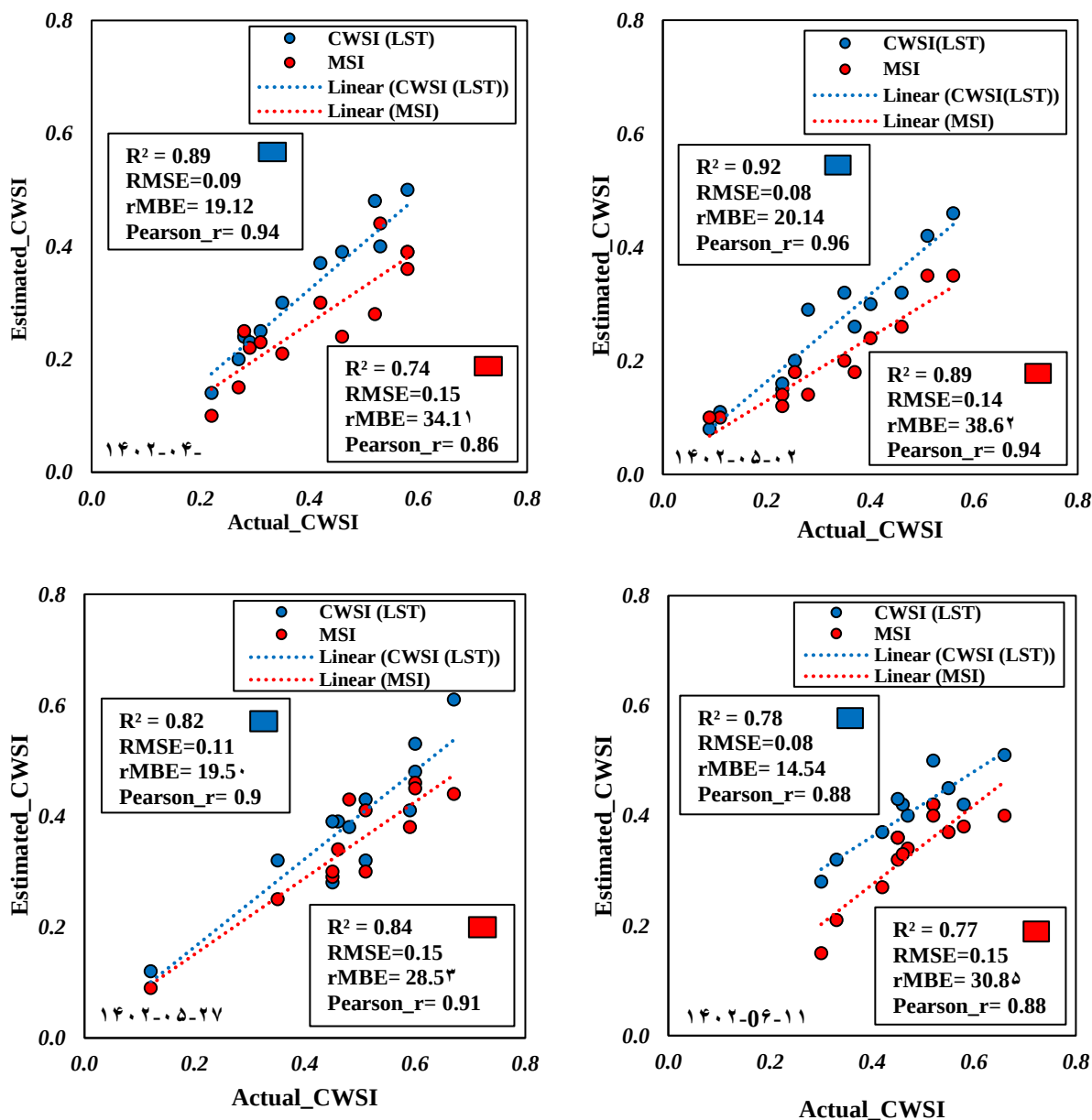
1 Coefficient of Determination

2 Root Mean Square Error

3 Relative Mean Bias Error

4 Pearson's correlation

حالی که، (Jimenez-Munoz, 2014) دریافتند، الگوریتم‌های بازتابش دما در خاک‌های با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش همواره با بیش‌برآوردی همراه می‌باشند. لذا همان‌گونه که از یافته‌ها مشخص است، هر دو سری باندهای حرارتی ماهواره لندست و باندهای فروسرخ ماهواره سنتینل همبستگی خوبی با داده‌های واقعی تنش آبی اندازه‌گیری شده در مزارع داشتند. ضمن اینکه، مطابق با یافته‌های حاصل، باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹، برآورد بهتری نشان دادند، این امر، گویای تأثیر قابل توجه باندهای حرارتی نسبت به باندهای فروسرخ نزدیک و طول موج کوتاه، شاخص LST و نهایتاً میزان بخار آب جو و میزان گسیلمندی سطح زمین در تشخیص میزان تنش آبی گیاه دارد.



شکل ۴. نمودار پراکندگی تنش برآورد شده از باندهای حرارتی لندست ۸-۹ (نقاط آبی رنگ) و باندهای فروسرخ سنتینل ۲ (نقاط قرمز رنگ) با تنش محاسباتی

به‌منظور مقایسه بیشتر باندهای حرارتی و فروسرخ با داده‌های محاسباتی تنش، روند تغییرات تنش برآورد شده از باندهای حرارتی (براساس CWSI (LST)) و باندهای فروسرخ (براساس MSI) نسبت به تنش محاسبه شده (CWSI (Actual)) در هریک از روزهای گذر مشترک ماهواره و براساس سن‌های مختلف مزارع (سه نقطه آزمایشی از هریک از سن‌های کشت، بازرویی اول، بازرویی دوم و بازرویی سوم)، در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، روند تغییرات تنش آبی حاصل از هر دو باندهای حرارتی و فروسرخ در هر روز گذر مشترک، مشابه با مقادیر تنش محاسبه شده در مزارع نیشکر بوده و هر دو سری ماهواره، میزان تنش را نسبت به مقادیر واقعی اندکی

کمتر برآورده نموده‌اند. بیشترین میزان تنش محاسباتی در تاریخ ۱۸ تیر، برابر با ۰/۵۸ و بیشترین تنش برآورد شده از باندهای حرارتی و فروسرخ به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۴۴ در مزارع مربوط به سن کشت حاصل گشت. همچنین، در سایر روزهای تحت مطالعه، در ۲ مرداد، ۲۷ مرداد و ۱۱ شهریور مقادیر محاسباتی به ترتیب برابر با ۰/۵۶، ۰/۶۷ و ۰/۶۶ به دست آمد، در حالی که، تنش برآورد شده از باندهای حرارتی و فروسرخ به ترتیب، برابر با ۰/۴۶ و ۰/۳۵ در ۲ مرداد، ۰/۵۴ و ۰/۴۶ در ۲۷ مرداد و ۰/۴۸ و ۰/۴۲ در ۱۱ شهریور حاصل گردید. همان گونه که از یافته‌ها، قابل مشاهده است، در اوج تابستان و در سه تاریخ ۱۸ تیر، ۲ مرداد و ۲۷ مرداد، بیشترین میزان تنش محاسباتی و برآورد شده حاصل از هر دو ماهواره لندست و سنتینل مربوط به مزرعه با سن کشت بوده و تنها در تاریخ ۱۱ شهریور، بیشترین میزان تنش محاسباتی در مزرعه با سن بازروی سوم و تنش برآورد شده نیز با اختلاف کم از سایر سن‌ها، مربوط به همین سن بوده است، از دلایل افزایش میزان تنش در سن پلنت و بازروی سوم، می‌توان به عدم تعادل سیستم ریشه‌ای در ابتدای دوره رشد مزارع نیشکر در سن کشت، همچنین، ایجاد اختلال و کاهش هدایت روزنه‌ای مزارع در سن بازروی سوم، اشاره نمود (Gabriel et al., 2021). ضمن اینکه، قابلیت دو ماهواره لندست و سنتینل را در برآورد میزان تنش آبی نشان می‌دهد.

قابل بیان است، از دلایل احتمالی نوسانات در تنش آبی برآورد شده حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، نسبت به تنش برآورد شده از ماهواره لندست ۸-۹ و تنش آبی محاسباتی، اختلاف محدوده طیفی باندهای فروسرخ طول موج کوتاه ماهواره سنتینل ۲ (۱/۷-۱/۵ میکرومتر)، در مقایسه با محدوده طیفی باندهای فروسرخ حرارتی ماهواره لندست ۸-۹ و دماسنج نصب شده در محل می‌باشد. دلیل قابل توجه دیگر نیز، عدم برابری و توازن، از نظر مقیاس پیکسل‌های ماهواره سنتینل ۲ (۱۰×۱۰ مترمربع) و پیکسل‌های ماهواره لندست (۳۰×۳۰ مترمربع)، نسبت به اندازه‌گیری میدانی معادل با، کمتر از یک متر مربع می‌باشد. همچنین زاویه تابش دماسنج مستقر در مزارع، ۴۵ درجه و به‌طور ثابت در محل بوده، در حالی که بازتاب‌های برگشتی به سطح ماهواره لندست و سنتینل با زاوایای متفاوتی ثبت شده که این عوامل همگی باعث اختلاف تنش برآورد شده می‌گردد.

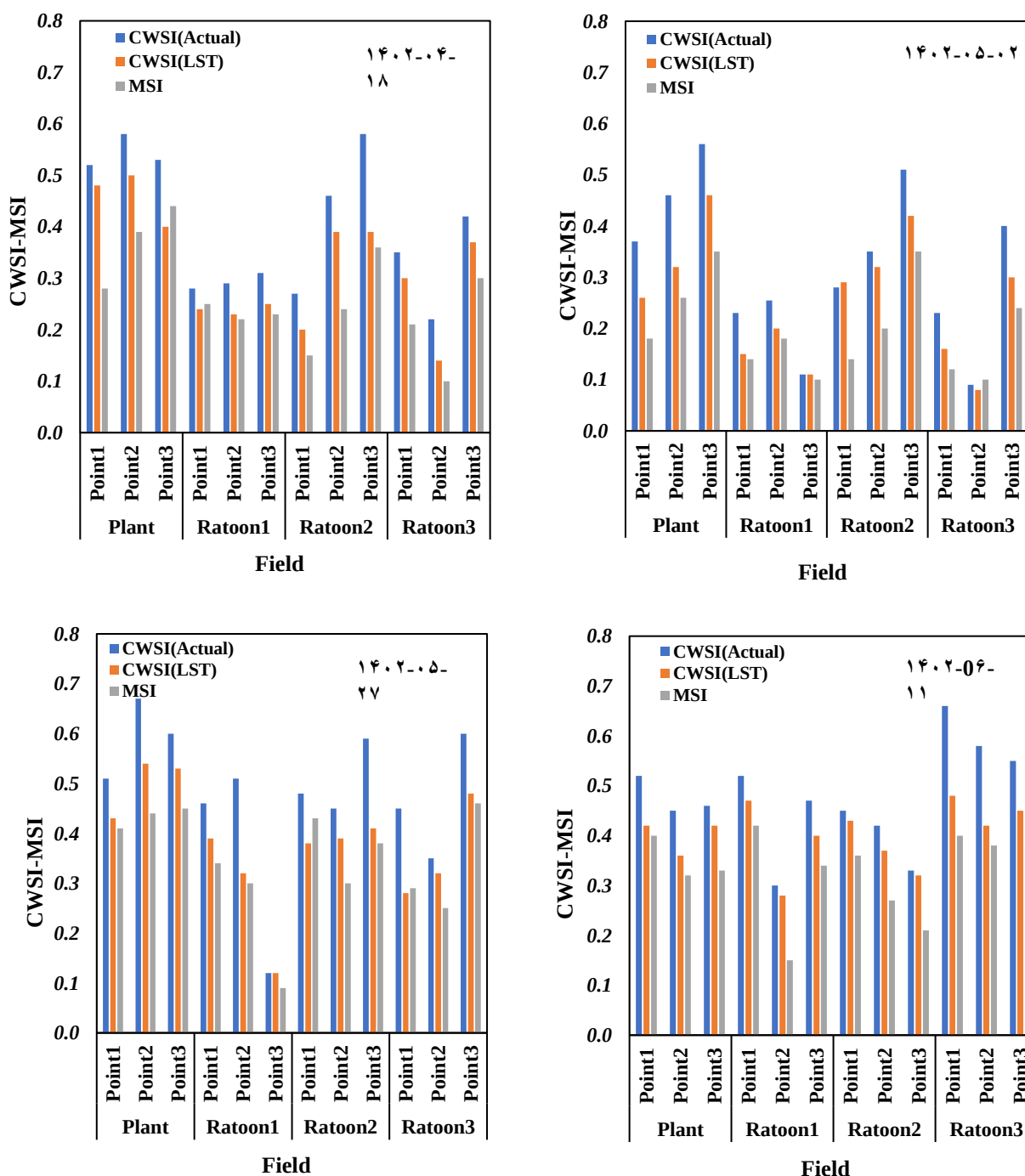
در نتیجه، میزان تنش آبی برآورده شده از باندهای فروسرخ سنتینل ۲ اندکی کمتر از مقادیر تنش برآورده شده از باندهای حرارتی لندست ۸-۹ می‌باشد، اما مقادیر تنش برآورده شده حاصل از باندهای حرارتی و فروسرخ با داده‌های واقعی تنش مطابقت داشت. قابل بیان است، از بین شاخص‌های طیفی مرتبط با آب و تاج‌پوشش گیاه، شاخص تنش رطوبتی (MSI) به‌عنوان شاخصی اساسی در تشخیص وضعیت رطوبتی یا تنش آبی گیاهان استفاده شده است (Karlqvist et al., 2024; Ren et al., 2022; Xiao et al., 2014).

به‌منظور افزایش درک بصری تغییرات تنش در کل مزارع کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر، نقشه پراکنش مکانی شاخص تنش آبی برآورد شده با استفاده از باندهای حرارتی لندست ۸-۹ در هر روز گذر مشترک ماهواره در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، میزان تنش در اوایل و اواسط ماه‌های تابستان بیشتر بوده است، به‌طوری‌که بیشینه تنش آبی مزارع نیشکر، در ۱۸ تیر (۹ جولای)، برابر با ۰/۵۸، در ۲ مرداد (۲۴ جولای)، برابر با ۰/۶۵، در ۲۷ مرداد (۱۸ آگوست)، برابر با ۰/۵۶ و در ۱۱ شهریور (۲ سپتامبر)، برابر با ۰/۴۹ بوده است. در اواسط فصل تابستان در دوره تحت مطالعه، ۲ مرداد، با توجه به افزایش دما و به تبع آن افزایش نیاز آبی گیاه، میزان بیشینه تنش آبی به بیشترین حد خود برابر با ۰/۶۵ رسیده و سپس در ۲۷ مرداد (۱۸ آگوست)، با نزدیک شدن به انتهای فصل تابستان میزان بیشینه تنش کاهش چشمگیری داشته است و همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشتر مزارع کشت و صنعت با آب کافی مواجه بوده و در این روز میزان تنش آبی کم بوده است. بنظر می‌رسد با شروع فرآیند آبیاری و توجه به فواصل آبیاری از میزان تنش آبی کاسته می‌شود. همچنین، در انتهای دوره با کاهش نسبی دما، میزان بیشینه تنش آبی نیز کاهش یافته است. به نظر می‌رسد که نوسانات توزیع مکانی تنش در زمان‌های مختلف می‌تواند به دلیل سنین مختلف مزارع، مراحل رشد گیاه، برنامه‌ریزی آبیاری، تنوع در ارقام گیاهی، تراکم پوشش گیاهی و محتوای آب خاک، بافت خاک، تغییرات اقلیمی و تراکم زهکشی منطقه باشد.

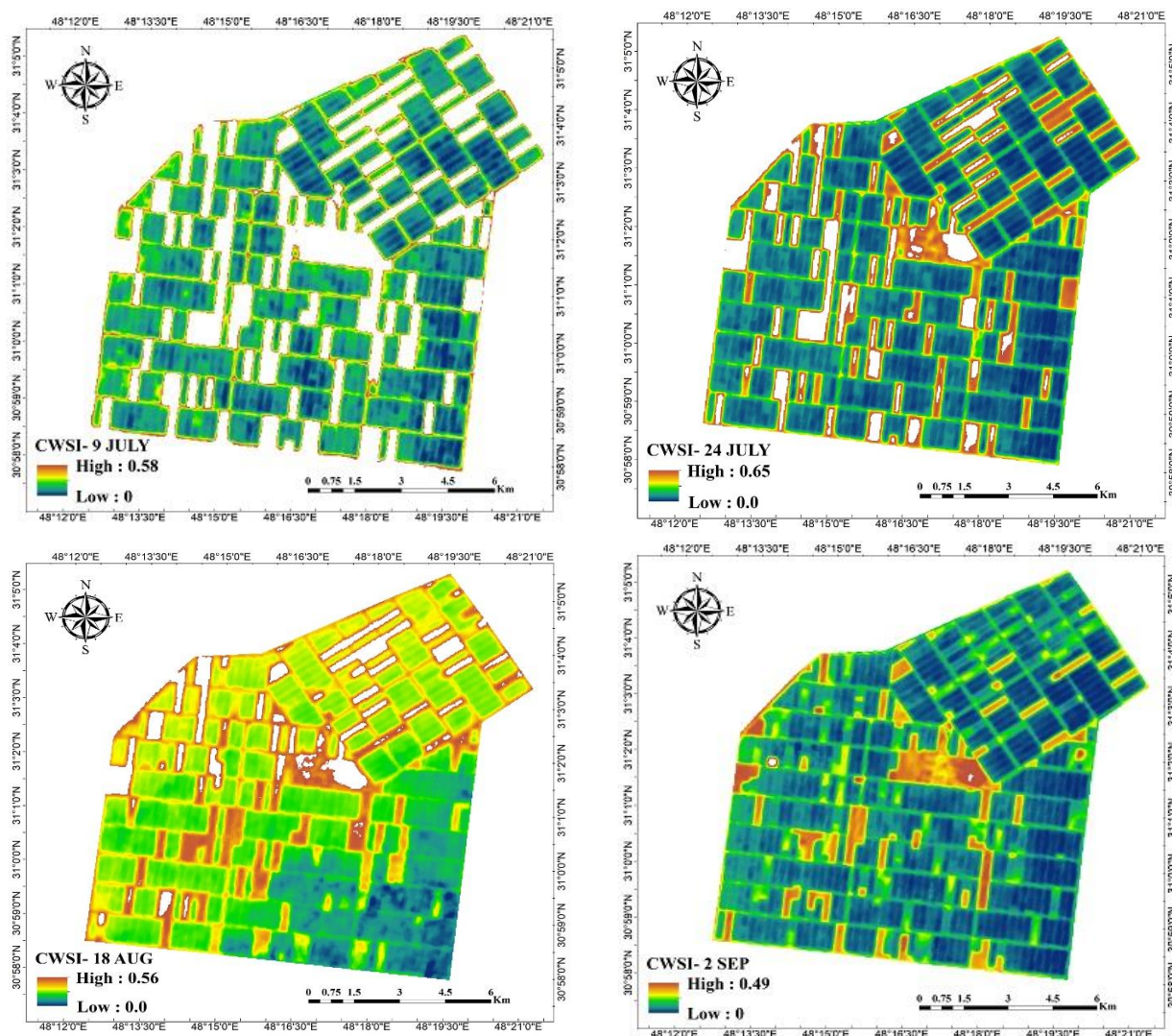
همان گونه، که از شکل ۶ قابل مشاهده است، در پیکسل‌های مرزهای مزارع، میزان تنش آبی بیشتر بوده و قسمت‌های مرکزی دارای تنش آبی کمتری می‌باشند. این امر می‌تواند به دلیل اثرگذاری پیکسل‌های همسایه بر پیکسل‌های مجاور مزرعه رخ دهد (Jalilvand et al., 2019). همچنین با توجه به نوع آبیاری سطحی حاکم بر مزارع، میزان آب در اختیار گیاه، در ابتدای مزارع بیشتر از انتهای آن بوده، لذا در انتهای مزارع میزان تنش آبی احتمالی بیشتر می‌باشد. ضمن اینکه، قسمت‌های سفید رنگ موجود در شکل، مربوط به ساختمان اداری، زمین‌های آیش و کاملاً عاری از پوشش گیاهی بوده، لذا حذف گردیده، تا صرفاً وضعیت محتوای آبی پوشش گیاهی پایش شود. همچنین، قسمت‌هایی از نقشه، با پوشش گیاهی اندک یا بدون پوشش گیاهی، نشان‌دهنده میزان تنش بالاتری بوده است. لذا تغییر در نوع سیستم آبیاری و کاربرد روش‌های نوین، حذف زمین‌های آیش و کشت گیاه در همه قطعات زراعی و استفاده از ارقام نیشکر مقاوم به تنش آبی



می‌تواند سبب کمک به بهبود نتایج شود. در این باره، Pei et al., (2024)، معتقدند که ارائه نقشه مکانی تنش در مدیریت آبیاری مزارع و توجه به دلایل ناهمگونی مزارع مهم است. در مطالعه Vieira et al., (2012)، از تصاویر سری زمانی ۸ دست ۸ به‌منظور نقشه‌برداری خودکار نیشکر در مناطق بزرگ براساس تجزیه و تحلیل تصویر مبتنی بر شیء استفاده شد.



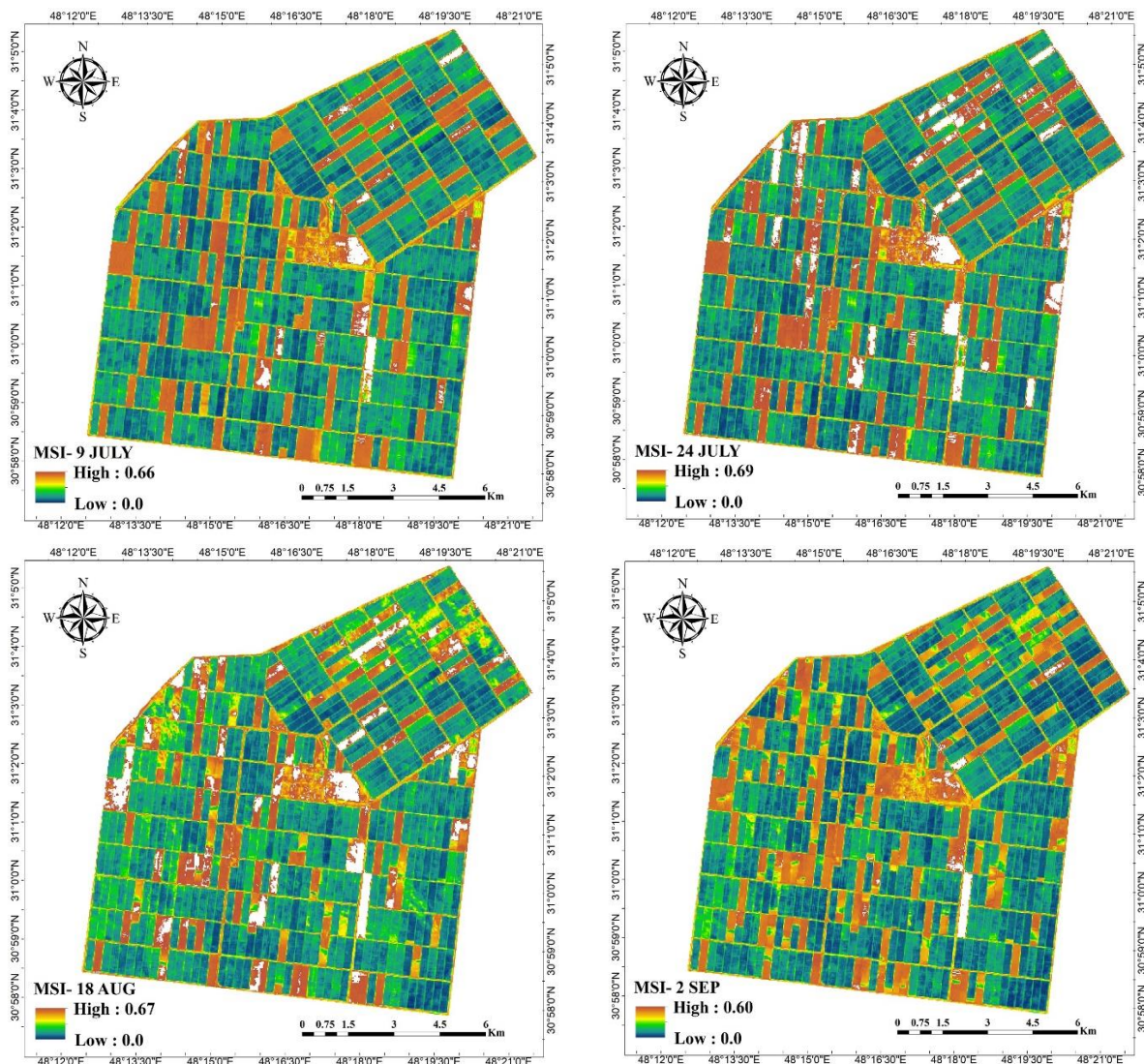
شکل ۵. روند تغییرات تنش برآورد شده از باندهای حرارتی لندست ۸-۹ و باندهای فروسرخ سنتینل ۲ نسبت به تنش محاسباتی در هریک از روزهای گذر مشترک (CWSI (Actual): تنش محاسباتی براساس داده‌های میدانی، CWSI (LST): تنش برآورد شده براساس ماهواره لندست ۸-۹، MSI: تنش برآورد شده براساس ماهواره سنتینل ۲، Plant: سن کشت، Ratoon1: سن بازروی اول، Ratoon2: سن بازروی دوم، Ratoon3: سن بازروی سوم)



شکل ۶. نقشه پراکنش مکانی شاخص تنش آبی برآورد شده در مزارع نیشکر با استفاده از باندهای حرارتی لندست ۸-۹

شکل ۷ نیز نقشه پراکنش مکانی شاخص تنش آبی برآورد شده در کل مزارع کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر را با استفاده از باندهای فروسخ سنتینل ۲ در هر روز گذر مشترک نشان می‌دهد. براساس تنش برآورد شده حاصل از ماهواره سنتینل ۲ نیز، میزان تنش در اواسط ماه‌های تابستان، ۲ مرداد و ۲۷ مرداد (۲۴ جولای و ۱۸ آگوست) بیشتر می‌باشد. بیشینه تنش آبی مزارع نیشکر، در ۱۸ تیر (۹ جولای)، برابر با ۰/۶۶، در ۲ مرداد (۲۴ جولای)، برابر با ۰/۶۹، در ۲۷ مرداد (۱۸ آگوست)، برابر با ۰/۶۷ و در ۱۱ شهریور (۲ سپتامبر)، برابر با ۰/۶ بوده است. لذا، روند نوسانات تنش توسط باندهای فروسخ سنتینل ۲ مشابه روند تغییرات نشان داده شده تنش توسط باندهای حرارتی لندست ۸-۹ می‌باشد، این امر نشان از قابلیت شاخص تنش رطوبتی و کاربرد ماهواره سنتینل ۲ در پر کردن خلاء زمانی تصاویر لندست ۸-۹ براساس باندهای حرارتی در تعیین تنش آبی مزارع نیشکر می‌باشد. شاخص‌های طیفی می‌توانند به‌طور مؤثر نوبه‌های پس زمینه و سیگنال‌های مختلط را حذف کنند و همچنین، اهمیت قابل توجه بیشتری نسبت به یک باند خاص دارند. این شاخص‌ها برای بازیابی رطوبت و تشخیص تنش آبی گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ren et al., 2022; Oltra-Carrio et al., 2015). در این زمینه، Ren et al. (2022) دریافتند، شاخص MSI به‌طور قابل توجهی با رطوبت در تمام اعماق خاک همبستگی منفی داشته و از بهترین شاخص‌ها در کاهش اثر پس زمینه خاک می‌باشد. پژوهش‌های Karlqvist et al. (2024) و Meingast et al. (2014)، از MSI به‌عنوان شاخصی قابل اعتماد در تشخیص وضعیت رطوبتی گیاه نام بردند. قابل ذکر است، شاخص‌های طیفی مرتبط با گیاه و آب از جمله شاخص MSI، در تشخیص تغییرات رطوبت حساس بوده و اغلب برای بازیابی تغییرات رطوبتی خاک و گیاه در زیست‌بوم‌های مختلف، استفاده می‌شوند (Ren et al., 2022; Yi et al., 2014; Peng et al., 2013). Zhou et al. (2021) و Sayago et al. (2017)، پژوهش‌های نیز ارزیابی تنش آبی گیاه با استفاده از تصاویر حرارتی فروسخ و کاربرد آن را برای کشاورزی دقیق تأیید نمودند.

بنابراین، استفاده از باندهای حرارتی و باندهای فروسرخ، در تشخیص میزان رطوبت و تنش آبی گیاه مؤثر می‌باشند. همچنین، گرچه نتایج باندهای حرارتی ماهواره لندست همخوانی بیشتری با داده‌های واقعی داشتند، اما در صورت عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-۹، باندهای فروسرخ ماهواره سنتینل ۲ و استفاده از شاخص تنش رطوبتی نیز قادر به برآورد میزان تنش آبی وارده بر گیاه می‌باشد.



شکل ۷. نقشه پراکنش مکانی شاخص تنش رطوبتی برآورد شده در مزارع نیشکر با استفاده از باندهای فروسرخ سنتینل ۲

نتیجه‌گیری

تشخیص تنش آبی گیاه در فواصل زمانی کوتاه، در ارتقاء کیفی مدیریت آبیاری و نظارت بر عملکرد محصول نقش بسزایی دارد. در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت کاربرد سنجش از دور در ارزیابی محتوای رطوبتی گیاه، به تخمین شاخص تنش آبی گیاه نیشکر (CWSI) با استفاده از باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸-۹ و باندهای فروسرخ ماهواره سنتینل ۲ در کشت‌و صنعت نیشکر امیرکبیر، واقع در استان خوزستان پرداخته شد. کاربرد تصاویر ماهواره سنتینل ۲ در ارزیابی میزان تنش آبی گیاه، به‌دلیل کاهش خلاء زمانی تصاویر ماهواره لندست ۸-۹ وجه تمایز مطالعه حاضر نسبت به سایر مطالعات اخیر می‌باشد. به‌منظور ارزیابی قابلیت هر دو ماهواره، نتایج با مقادیر محاسبه شده شاخص تنش آبی نیشکر در ساعت گذر ماهواره مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج ارزیابی در روزهای گذر مشترک ماهواره لندست و سنتینل نزدیک به هم بوده اما باندهای حرارتی اندکی برآورد بهتر و همبستگی بالاتری با داده‌های واقعی تنش آبی اندازه‌گیری شده در مزارع نسبت به باندهای فروسرخ نشان دادند. همچنین، میزان تنش آبی برآورده شده از باندهای فروسرخ سنتینل ۲ اندکی کمتر از مقادیر تنش برآورده شده از باندهای حرارتی لندست ۸-۹ و هر دو ماهواره کمتر از تنش آبی محاسبه شده بودند، اگرچه روند تغییرات تنش برآورده شده حاصل از

باند‌های حرارتی و فروسرخ با داده‌های واقعی تنش مطابقت داشت. قابل بیان است، با توجه به نقشه‌های پراکنش مکانی براساس باند‌های حرارتی ((CWSI (LST) و باند‌های فروسرخ (MSI)، بیشینه تنش آبی مزارع نیشکر، در اواسط تابستان به دست آمد. لذا، روند نوسانات تنش توسط ماهواره لندست و سنتینل مشابه می‌باشد. بنابراین، اگرچه ماهواره لندست ۸-۹ میزان تنش آبی نیشکر را نسبت به ماهواره سنتینل ۲ با دقت بالاتری برآورد نمود، اما به منظور کاهش خلاء زمانی تصویربرداری ماهواره لندست ۸-۹، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، براساس شاخص MSI تا حد زیادی خلاء زمانی بین تصاویر را برطرف نموده و کاربرد این شاخص و باند‌های فروسرخ ماهواره سنتینل ۲ نیز به منظور پایش تنش آبی گیاهان جایگزین مناسبی در صورت عدم دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای لندست می‌باشند. در انتها نیز پیشنهاد می‌گردد، به منظور پایش بهتر تنش آبی گیاهان براساس باند‌های فروسرخ ماهواره سنتینل ۲، دو شاخص MSI و NDMI در برآورد تنش مورد مقایسه قرار گیرند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز (GN: SCU.WI1401.273) قدردانی می‌کنند. همچنین، با تشکر از مدیر عامل و کارکنان کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر که در تهیه پژوهش حاضر مستخرج از رساله دکتری همکاری کردند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

عباسی، فریبرز و شینی‌دشتگل، علی (۱۳۹۵). توصیه‌هایی برای مصرف بهینه کود در مزارع نیشکر. چاپ اول. نشر آموزش کشاورزی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

مزیدی، مریم، حسام، موسی، قربانی، خلیل. و بایرام‌کمکی، چوقی. (۱۴۰۳-۱). امکان‌سنجی تخمین تنش آبی پنبه بر اساس شاخص‌های طیفی تصاویر ماهواره لندست و سنتینل ۲. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱(۲)، ۹۹-۱۱۷.

مزیدی، مریم، حسام، موسی، قربانی، خلیل. و کمکی، و بایرام‌کمکی، چوقی. (۱۴۰۳-۲). ارزیابی تخمین تنش آبی پنبه با استفاده از تصاویر چند طیفی ماهواره‌ای، مبتنی بر مدل درخت M5. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۷(۴)، ۳۸۵-۴۰۰.

ویسی، شادمان (۱۳۹۶). تشخیص تنش آبی گیاه نیشکر با استفاده از اطلاعات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای بمنظور برنامه‌ریزی آبیاری. پایان‌نامه دکتری. به‌راهنمایی عبدعلی ناصری. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.

REFERENCES

- Abbasi, F., & Shinidashtgol, A. (2016). *Recommendations for optimal fertilizer utilize in sugarcane fields*. First edition. Agricultural Education Publishing. Agricultural Engineering and Technical Research Institute. (In Persian)
- Alauddin, M., Amarasinghe, U. A., & Sharma, B. R. (2010). Are there any 'bright' spots and 'hot' spots of rice water productivity in Bangladesh? A spatio-temporal analysis of district-level data.
- Berni, J. A. J., Zarco-Tejada, P. J., Suárez, L., González-Dugo, V., & Fereres, E. (2009). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci*, 38(6), 6.
- Besten, N., Steele-Dunne, S., de Jeu, R., & van der Zaag, P. (2021). Towards monitoring waterlogging with remote sensing for sustainable irrigated agriculture. *Remote Sensing*, 13(15), 2929.
- Chai, L., & Chen, Z. (2017, April). A Sensitivity Analysis of NDWI and SRWI to Different types of Vegetation Moisture. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 12217).
- Das, S., Kaur, S., & Sharma, V. (2024). Determination of threshold crop water stress index for sub-surface drip irrigated maize-wheat cropping sequence in semi-arid region of Punjab. *Agricultural Water Management*, 301, 108957.
- Datt, B. (1999). Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. *Australian Journal of botany*, 47(6), 909-923.
- Alordzinu, K. E., Li, J., Lan, Y., Appiah, S. A., Al Aasmi, A., & Wang, H. (2021). Rapid estimation of crop water stress index on tomato growth. *Sensors*, 21(15), 5142.
- Filippi, P., Whelan, B. M., Vervoort, R. W., & Bishop, T. F. (2022). Identifying crop yield gaps with site-and season-specific data-driven models of yield potential. *Precision Agriculture*, 1-24.



- Gabriel, J. L., García-González, I., Quemada, M., Martin-Lammerding, D., Alonso-Ayuso, M., Hontoria, C. (2021). Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. *Geoderma*, 386, 114911.
- Gardner, B. R., Nielsen, D. C., & Shock, C. C. (1992). Infrared thermometry and the crop water stress index. II. Sampling procedures and interpretation. *Journal of production agriculture*, 5(4), 466-475.
- Gerhards, M., Rock, G., Schlerf, M., & Udelhoven, T. (2016). Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. *International journal of applied Earth observation and geoinformation*, 53, 27-39.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. (1995). Introduction to plant physiology.
- Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo, E., & Henderson, D. W. (1976). Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. In *Water and Plant life: Problems and modern approaches* (pp. 281-305). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hunt Jr, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*, 30(1), 43-54.
- Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27(1-2), 59-70.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter Jr, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural meteorology*, 24, 45-55.
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., & Idso, S. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water resources research*, 13(3), 651-656.
- Jalilvand, E., Tajrishy, M., Hashemi, S. A. G. Z., & Brocca, L. (2019). Quantification of irrigation water using remote sensing of soil moisture in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111226.
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, S., & Niyogi, D. (2021). Assessing crop water stress index of citrus using in-situ measurements, Landsat, and Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 42(5), 1893-1916.
- Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomata conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and forest meteorology*, 95(3), 139-149.
- Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843.
- Kang, Y., Khan, S., & Ma, X. (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review. *Progress in natural Science*, 19(12), 1665-1674.
- Karlqvist, S., Burdun, I., Salko, S. S., Juola, J., & Rautiainen, M. (2024). Retrieval of moisture content of common Sphagnum peat moss species from hyperspectral and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 315, 114415.
- Katimbo, A., Rudnick, D. R., DeJonge, K. C., Lo, T. H., Qiao, X., Franz, T. E., ... & Duan, J. (2022). Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. *Agricultural Water Management*, 266, 107575.
- King, B. A., & Shellie, K. C. (2023). A crop water stress index based internet of things decision support system for precision irrigation of wine grape. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100202.
- King, B. A., Shellie, K. C., Tarkalson, D. D., Levin, A. D., Sharma, V., & Bjorneberg, D. L. (2020). Data-driven models for canopy temperature-based irrigation scheduling. *Transactions of the ASABE*, 63(5), 1579-1592.
- Kumari, A., Singh, D. K., Sarangi, A., Hasan, M., & Sehgal, V. K. (2024). Optimizing wheat supplementary irrigation: Integrating soil stress and crop water stress index for smart scheduling. *Agricultural Water Management*, 305, 109104.
- Lees, K. J., Quaipe, T., Artz, R. R. E., Khomik, M., Sottocornola, M., Kiely, G., ... & Clark, J. M. (2019). A model of gross primary productivity based on satellite data suggests formerly afforested peatlands undergoing restoration regain full photosynthesis capacity after five to ten years. *Journal of environmental management*, 246, 594-604.
- Liu, L., Zhang, S., & Zhang, B. (2016). Evaluation of hyperspectral indices for retrieval of canopy equivalent water thickness and gravimetric water content. *International Journal of Remote Sensing*, 37(14), 3384-3399.
- Makaya, N. P., Mutanga, O., Kiala, Z., Dube, T., & Seutloali, K. E. (2019). Assessing the potential of Sentinel-2 MSI sensor in detecting and mapping the spatial distribution of gullies in a communal grazing landscape. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 112, 66-74.
- Mazidi, M., Hesam, M., Ghorbani, K., & Komaki, C. B. (2024). Feasibility of estimating cotton water stress

- based on spectral indices of Landsat and Sentinel 2 satellite images. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(2), 99-117. (In Persian)
- Mazidi, M., Hesam, M., Ghorbani, K., & Komaki, C. B. (2024). Evaluation of Cotton Water Stress Estimation Using Multispectral Satellite Images Based on M5 Tree Model. *Journal of Water Research in Agriculture*, 37(4), 385-400. (In Persian)
- Meingast, K. M., Falkowski, M. J., Kane, E. S., Potvin, L. R., Benscoter, B. W., Smith, A. M., ... & Miller, M. E. (2014). Spectral detection of near-surface moisture content and water-table position in northern peatland ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 152, 536-546.
- Moesinger, L., Zotta, R. M., van Der Schalie, R., Scanlon, T., de Jeu, R., & Dorigo, W. (2022). Monitoring vegetation condition using microwave remote sensing: the standardized vegetation optical depth index (SVODI). *Biogeosciences*, 19(21), 5107-5123.
- Nielsen, D. C. (1990). Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). *Field Crops Research*, 23(2), 103-116.
- Oltra-Carrió, R., Baup, F., Fabre, S., Fieuzal, R., & Briottet, X. (2015). Improvement of soil moisture retrieval from hyperspectral VNIR-SWIR data using clay content information: From laboratory to field experiments. *Remote Sensing*, 7(3), 3184-3205.
- Pahlevan, N., Chittimalli, S. K., Balasubramanian, S. V., & Vellucci, V. (2019). Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems. *Remote sensing of Environment*, 220, 19-29.
- Pei, S., Dai, Y., Bai, Z., Li, Z., Zhang, F., Yin, F., & Fan, J. (2024). Improved estimation of canopy water status in cotton using vegetation indices along with textural information from UAV-based multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109176.
- Peng, J., Shen, H., He, S. W., & Wu, J. S. (2013). Soil moisture retrieving using hyperspectral data with the application of wavelet analysis. *Environmental Earth Sciences*, 69, 279-288.
- Quinlan, J.R., 1992. Learning with continuous classes. In 5th Australian joint conference on artificial intelligence. 343-348
- Ren, S., Guo, B., Wang, Z., Wang, J., Fang, Q., & Wang, J. (2022). Optimized spectral index models for accurately retrieving soil moisture (SM) of winter wheat under water stress. *Agricultural Water Management*, 261, 107333.
- Safi, A. R., Karimi, P., Mul, M., Chukalla, A., & de Fraiture, C. (2022). Translating open-source remote sensing data to crop water productivity improvement actions. *Agricultural Water Management*, 261, 107373.
- Sayago, S., Ovando, G., Bocco, M., 2017. Landsat images and crop model for evaluating water stress of rainfed soybean. *Remote Sensing of Environment*, 198, 30-39.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., El-Kharraz, J., Gómez, M., Romaguera, M., & Soria, G. (2004). Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 215-230.
- Solgi, S., Ahmadi, S. H., & Seidel, S. J. (2023). Remote sensing of canopy water status of the irrigated winter wheat fields and the paired anomaly analyses on the spectral vegetation indices and grain yields. *Agricultural Water Management*, 280, 108226.
- Taghvaeian, S., Comas, L., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2014). Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. *Agricultural water management*, 144, 69-80.
- Tanner, C. B. (1963). Plant temperatures.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F., D'Urso, G., Di Bene, C., ... & Napoli, R. (2018). Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. *Remote Sensing of Environment*, 215, 452-470.
- Veysi, S., Naseri, A. A., & Hamzeh, S. (2020). Relationship between field measurement of soil moisture in the effective depth of sugarcane root zone and extracted indices from spectral reflectance of optical/thermal bands of multispectral satellite images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(7), 1035-1044.
- Veysi, S., Naseri, A. A., Hamzeh, S., & Bartholomeus, H. (2017). A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. *Agricultural water management*, 189, 70-86.
- Veysi, S., Galehban, E., Nouri, M., Mallah, S., & Nouri, H. (2024). Comprehensive framework for interpretation of WaPOR water productivity. *Heliyon*, 10(16).



- Veysi, S. (2017). Detection Sugarcane Water Stress Using Field Data and Satellite Images For Irrigation Scheduling. PhD thesis. Supervised by Abdali Naseri. Ahvaz: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water Sciences Engineering.
- Virnodkar, S., Pachghare, V. K., Patil, V. C., & Jha, S. K. (2021). Performance evaluation of RF and SVM for sugarcane classification using sentinel-2 NDVI time-series. In *Progress in Advanced Computing and Intelligent Engineering: Proceedings of ICACIE 2019, Volume 2* (pp. 163-174). Springer Singapore.
- Vieira, M. A., Formaggio, A. R., Rennó, C. D., Atzberger, C., Aguiar, D. A., & Mello, M. P. (2012). Object based image analysis and data mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. *Remote Sensing of Environment*, 123, 553-562.
- Wang, M., Li, M., Zhang, Z., Hu, T., He, G., Zhang, Z., ... & Liu, X. (2022). Land surface temperature retrieval from Landsat 9 TIRS-2 data using radiance-based split-window algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 1100-1112.
- Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., & Trezza, R. (2002). Sebal. Surface energy balance algorithms for land. Idaho implementation. Advanced Training and Users Manual, Idaho, USA.
- Xiao, Y., Zhao, W., Zhou, D., & Gong, H. (2013). Sensitivity analysis of vegetation reflectance to biochemical and biophysical variables at leaf, canopy, and regional scales. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(7), 4014-4024.
- Yi, Q., Wang, F., Bao, A., & Jiapaer, G. (2014). Leaf and canopy water content estimation in cotton using hyperspectral indices and radiative transfer models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 67-75.
- Zhao, B., Adama, T., Ata-Ul-Karim, S. T., Guo, Y., Liu, Z., Xiao, J., ... & Duan, A. (2021). Recalibrating plant water status of winter wheat based on nitrogen nutrition index using thermal images. *Precision Agriculture*, 1-20.
- Zhou, Z., Majeed, Y., Naranjo, G. D., & Gambacorta, E. M. (2021). Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106019.