



Application of Crop Water Stress Index in Sugarcane Irrigation Scheduling Using Landsat Thermal Data and AquaCrop Model

J. Mohammadi-Moalezadeh, A. R. Hooshmand* 

PhD student in Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz and Head of Remote Sensing and GIS Department, Sugarcane Research and Development Training Institute, Ahvaz, Iran. Jamalmohammadi611@gmail.com

Professor, Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Hooshmand_a@scu.ac.ir

Article Info

Research Article

Received: January 21, 2026

Accepted: March 16, 2026

Keywords: Remote Sensing, Soil moisture

Corresponding author's email: Hooshmand_a@scu.ac.ir

Abstract

In this study, to overcome some limitations, the AquaCrop model was used together with field measurements of Leaf Sheath Volumetric Water Content (VWC) and Landsat 8 and 9 images to determine the upper and lower bounds of Crop Water Stress Index (CWSI) more accurately. This research was conducted at Debal Khuzaei Sugarcane Cultivation and Industry Company from March 2022 to October 2022. The results showed a significant negative relationship between CWSI and VWC; that is, as the plant water content decreased, CWSI increased ($R^2=0.71$). The effect of field age during the mid-growth stage on this relationship was not significant. Based on the linear regression between CWSI and VWC, the plant water status was classified into five classes: water stress, irrigation time, moderate, moist, and very moist. Spatial analyses also showed that the spatial distribution of CWSI extracted from satellite imagery was consistent with actual variations in plant moisture, enabling dynamic monitoring of water stress and precise irrigation timing. Overall, the integration of the AquaCrop simulation model, ground-based data, and the thermal CWSI offers a more accurate and innovative approach than the methods based on hot and cold pixels, and it can be used for smart irrigation management of sugarcane in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Mohammadi-Moalezadeh, J. and Hooshmand, A. R., 2026. Application of Crop Water Stress Index in Sugarcane Irrigation Scheduling Using Landsat Thermal Data and AquaCrop Model. *Journal of Water Research in Agriculture*, 39 (4), pp.373-390.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372059.1105>



کاربرد شاخص تنش آبی گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری نیشکر با استفاده از داده‌های حرارتی

لندست و مدل AquaCrop

جمال محمدی معله‌زاده و عبدالرحیم هوشمند* 

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز و رئیس اداره سنجش از دور و GIS، مؤسسه تحقیقات و آموزش

توسعه نیشکر، اهواز، ایران. Jamalmohammadi611@gmail.com

استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. Hooshmand_a@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی	در این مطالعه، از مدل AquaCrop به همراه داده‌های میدانی رطوبت غلاف برگ (VWC) و تصاویر لندست ۸ و ۹ استفاده شد تا حدود بالا و پایین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) دقیق‌تر تعیین شود. این پژوهش در شرکت کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی و طی اسفند ۱۴۰۰ تا مهر ۱۴۰۱ انجام شد. نتایج نشان داد که بین مقدار CWSI و رطوبت غلاف برگ (VWC) رابطه‌ای منفی و معنی‌دار وجود دارد؛ به طوری که با کاهش محتوای آب گیاه، CWSI افزایش می‌یابد ($R^2=0.71$). اثر سن مزرعه در مرحله میانی رشد بر این رابطه معنی‌دار نبود. بر اساس رگرسیون خطی بین CWSI و VWC، وضعیت آبی گیاه به پنج کلاس شامل تنش آبی، زمان آبیاری، متوسط، مرطوب و بسیار مرطوب طبقه‌بندی شد. تحلیل‌های مکانی نیز نشان داد که توزیع فضایی CWSI استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای با تغییرات واقعی رطوبت گیاه هم‌راستا است و امکان پایش پویای تنش آبی و تعیین زمان دقیق آبیاری را فراهم می‌سازد. در مجموع، تلفیق مدل شبیه‌سازی AquaCrop، داده‌های زمینی و شاخص حرارتی CWSI رویکردی دقیق‌تر و نوآورانه‌تر نسبت به روش‌های مبتنی بر بیکسل سرد و گرم است و می‌تواند برای مدیریت هوشمند آبیاری نیشکر در مناطق خشک و نیمه‌خشک به کار رود.
دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵	
واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، رطوبت خاک	
آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Hooshmand_a@scu.ac.ir	

استاد: محمدی معله‌زاده، جمال و هوشمند، عبدالرحیم، ۱۴۰۴. کاربرد شاخص تنش آبی گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری نیشکر با استفاده از داده‌های حرارتی لندست و مدل AquaCrop

نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۹ (۴)، صص. ۳۷۳-۳۹۰.



مقدمه

برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه شناخته می‌شود. بر این اساس این مدل با استفاده از داده‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، اطلاعات اقلیمی، پارامترهای رشد گیاه و داده‌های مدیریتی، امکان ارزیابی سناریوهای مختلف آبیاری و پیش‌بینی نیاز آبی محصول را فراهم می‌سازد پتل و همکاران، (۲۰۰۸)؛ گارسیا ویلا و همکاران، (۲۰۰۹)؛ فراهانی و همکاران، (۲۰۰۹). در مطالعات مختلف، مدل AquaCrop به‌ویژه در شرایط کم‌آب‌باری یا تنش آب، توانسته است عملکرد محصول و میزان مصرف آب را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی کند تودرویک و همکاران، (۲۰۰۹)؛ گلابی و ناصری، (۱۳۹۴).

در سال‌های اخیر، فناوری‌های سنجش‌ازدور نقش مهمی در پایش رطوبت خاک، شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص‌های تنش آبی گیاه ایفا کرده‌اند. روش‌های مختلف شامل سنجش نوری، مادون‌قرمز حرارتی و راداری فعال و غیرفعال، امکان برآورد دقیق رطوبت خاک در پهناهای وسیع را فراهم می‌آورند، الکساندراتوس و همکاران، (۲۰۱۲)؛ بغدادی و همکاران، (۲۰۱۶)؛ رنجبر و همکاران، ۲۰۲۱؛ انگمن، (۱۹۹۵). مدل‌های دوزنقه‌ای حرارتی - نوری مانند $TOTRAM^1$ ، $OPTRAM^2$ و شاخص خشکی دما و پوشش گیاهی (TVDI) با بهره‌گیری از ترکیب دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و STR، قابلیت برآورد رطوبت خاک و شاخص تنش آبی را با دقت قابل توجهی دارند صادقی و همکاران، (۲۰۱۷)؛ بابائیان و همکاران، (۲۰۱۸). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های LST و NDVI می‌تواند رطوبت خاک را با ضریب تعیین بالایی برآورد کند، گیلیاس و همکاران، (۱۹۹۷)؛ وانگ و همکاران، (۲۰۰۹).

روش‌های نوری بر اساس ارتباط بین بازتاب سطح خاک و مقدار رطوبت خاک عمل می‌کنند، هرچند تأثیر عوامل محیطی و پوشش گیاهی ممکن است موجب خطا در برآورد رطوبت شود، وانگ و همکاران، (۲۰۱۱).

برنامه‌ریزی آبیاری در کشاورزی، به‌ویژه در محصولاتی که به کم‌آبی و پرآبی مانند نیشکر حساس هستند، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بهره‌وری منابع آب و عملکرد محصول محسوب می‌شود. تعیین میزان آب مورد نیاز گیاه، زمان و تعداد آبیاری، با هدف حصول حداکثر رشد و عملکرد، نیازمند شناخت دقیق روابط آب، خاک، گیاه و شرایط محیطی است، راسو و باکر، (۱۹۸۶). آزمایش‌های میدانی برای تعیین این پارامترها با صرف وقت، هزینه و انرژی بالا همراه هستند و محدودیت‌هایی مانند کوتاه بودن دوره آزمایش و تعداد سناریوهای قابل بررسی دارند.

به‌منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، مدل‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی و پایش آبیاری توسعه یافته‌اند که به‌طور کلی می‌توان آن‌ها را به سه دسته اصلی شامل: مدل‌های تجربی مبتنی بر داده‌های آماری، مدل‌های فرآیندمحور (مکانیکی) مبتنی بر شبیه‌سازی روابط فیزیکی و فیزیولوژیکی و روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور و شاخص‌های گیاهی تقسیم‌بندی کرد. مدل‌های تجربی معمولاً بر پایه روابط آماری ساده توسعه می‌یابند و قابلیت تعمیم محدودی دارند، درحالی‌که مدل‌های فرآیندمحور با شبیه‌سازی دینامیک رشد گیاه و بیلان آب خاک، امکان بررسی سناریوهای مدیریتی مختلف را فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، روش‌های سنجش‌ازدور با بهره‌گیری از داده‌های حرارتی و طیفی، امکان پایش مکانی-زمانی وضعیت آبی گیاه را در مقیاس مزرعه و منطقه فراهم می‌سازند.

در میان مدل‌های فرآیندمحور، مدل AquaCrop به‌دلیل ساختار نسبتاً ساده و تمرکز ویژه بر پاسخ محصول به تنش آبی، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در حوزه سنجش‌ازدور، شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) به‌عنوان یکی از شاخص‌های حرارتی پرکاربرد

بهینه آبیاری در انواع محصول در شرایط اقلیمی مختلف است پالتینواتو و همکاران، (۲۰۱۳)؛ طاهری قناد، (۱۳۸۱). با توجه به قرار گرفتن کشت نیشکر در گستره مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، این محصول به هر دو حالت کم‌آبی و پرآبی حساس است و نوسانات منابع آب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد و بهره‌وری آن را تحت تأثیر قرار دهد، راسو و باکر، (۱۹۸۶). اهمیت مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی به‌حدی است که بخش قابل‌توجهی از منابع آب کشور به این بخش اختصاص یافته و به‌صورت مکرر گزارش شده است که بیش از ۷۰٪ منابع آب شیرین در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (وزارت نیرو، ۱۴۰۰). چنین شرایطی نشان می‌دهد که ابزارها و روش‌های دقیق برای پایش وضعیت آبی گیاه و بهینه‌سازی آبیاری در محصولات حساس مانند نیشکر از الزامات مدیریت آب در کشور است.

استان خوزستان به‌عنوان قطب اصلی تولید نیشکر در ایران، با بیش از ۱۰۰ هزار هکتار سطح زیر کشت در شمال و جنوب استان، سهم عمده‌ای در تأمین شکر کشور دارد. این محصول اگرچه از نظر اقتصادی و اشتغال‌زایی اهمیت ویژه‌ای دارد، در تابستان، هم‌زمان با دوره پیک رشد نیشکر، دمای هوا و تبخیر به بیشترین مقدار خود می‌رسد و کوچک‌ترین خطا در مدیریت آبیاری می‌تواند منجر به کاهش عملکرد، افت بهره‌وری آب و بروز تنش آبی شدید در گیاه شود. از این‌رو، ارتقای بهره‌وری مصرف آب و طراحی سامانه‌های هوشمند آبیاری برای حفظ پایداری تولید این محصول، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

در این راستا، پژوهش حاضر با هدف توسعه‌ی یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر روابط آب-خاک-گیاه و با بهره‌گیری از مدل شبیه‌سازی AquaCrop و داده‌های حرارتی ماهواره‌های Landsat-8 و Landsat-9 طراحی شده است. هدف از این رویکرد، پایش دقیق تنش آبی، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین حدود واقعی شاخص تنش حرارتی گیاه (CWSI) در مزارع نیشکر است. نتایج حاصل می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب علمی

در روش‌های حرارتی، تغییرات دمای سطح زمین به‌عنوان شاخصی برای برآورد رطوبت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و در روش‌های راداری، کاهش بازپراکنش امواج رادار در اثر افزایش رطوبت خاک تحلیل می‌شود کارلسون، (۱۹۹۴). مدل دوزنقه نوری (Optical TOTRAM) نیازی به داده‌های حرارتی ندارد و به این ترتیب محدودیت‌های مدل دوزنقه حرارتی را برطرف می‌کند؛ همچنین این مدل به دلیل جایگزینی LST با بازتاب SWIR، تحت تأثیر شرایط جوی محیطی قرار نمی‌گیرد و امکان پارامتربندی جهانی را فراهم می‌کند، بابائیان و همکاران، (۲۰۱۸).

در مطالعاتی که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و Sentinel-2 و شاخص‌های NDVI، SAVI، NDMI و SMSWIR انجام شده، مشخص شد که شاخص LST و شاخص‌های پوشش گیاهی رابطه مستقیم و معکوس با رطوبت خاک داشته و برآورد دقیق رطوبت سطحی خاک را ممکن می‌سازند عیبات و همکاران، (۲۰۲۲). علاوه بر این، شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) که از ترکیب داده‌های دمای سطح گیاه، هواشناسی و شاخص‌های پوشش برای برآورد تنش آبی به‌دست می‌آید، در مطالعات متعددی برای ارزیابی وضعیت آبی و برنامه‌ریزی آبیاری در محصولات مختلف کاربرد داشته است. به‌عنوان نمونه، ایدسو و همکاران، (۱۹۸۶) برای گندم نشان دادند که CWSI می‌تواند تنش آبی را با دقت قابل‌قبول در مزرعه مشخص کند؛ جکسون و همکاران، (۱۹۸۸) از آن برای پایش آبیاری در باغ‌های مرکبات بهره بردند؛ جان، (۱۹۹۹) کاربرد CWSI را برای ذرت و پنبه مستند ساخت؛ و در پسته گلی و همکاران، (۲۰۱۱) توانایی این شاخص را در تفکیک سطوح تنش آبی گزارش کردند. همچنین، CWSI در چندین محصول دیگر مانند برنج، سویا، چای و انگور برای بهبود زمان‌بندی آبیاری و کاهش مصرف آب با نتایج رضایت‌بخش مورد استفاده قرار گرفته است، کیم و همکاران، (۲۰۰۸) و سنیدر و همکاران، (۲۰۰۵) این مطالعات نشان می‌دهند که CWSI ابزاری قابل‌اعتماد برای پایش تنش آبی و مدیریت

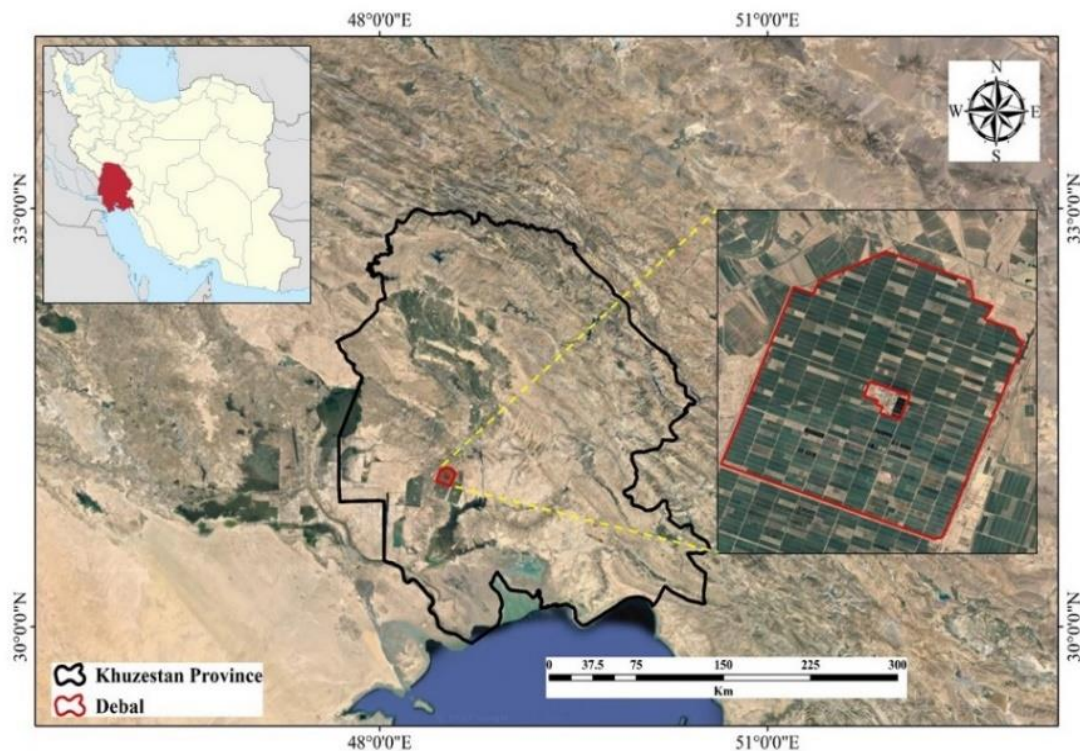
"۴۶/۶۴' ۰۱" ۳۱° و "۶/۱۸' ۳۵" ۴۸° تا "۴۲/۰۷' ۲۸" ۴۸° واقع شده است (شکل ۱). این کشت و صنعت یکی از کشت و صنعت‌های هشت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی است. اساس طراحی مزارع نیشکر به صورت ۲۵ هکتاری با طول مزرعه ۱۰۰۰ متر و فاصله فاروها ۱/۸۳ متر است.

و ابزاری عملیاتی برای مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی در ناحیه عرض شمالی از "۱۴/۳۸' ۰۸" ۳۱° تا



شکل ۱- موقعیت کشت و صنعت دعبل خزاعی در جنوب خوزستان
Figure 1 - Location of Deybel Khuzai Agro-Industry in Southern Khuzestan

سانتی متری در سه ایستگاه (نیمه اول، وسط و نیمه آخر) در دو مزرعه ۲۵ هکتاری با نام‌های L6-15 و L6-13 برای اطلاعات اولیه مدل AquaCrop اندازه‌گیری و در آزمایشگاه آب‌و‌خاک مؤسسه تحقیقات توسعه نیشکر خوزستان آزمایش شدند، جزئیات اندازه‌گیری در جدول (۱) آمده است. اطلاعات هواشناسی روزانه مورد نیاز شامل حداقل و حداکثر دما و درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد از ایستگاه هواشناسی مستقر در شرکت دعبل خزاعی برای یک دوره آماری سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) به روش پنمن -

داده‌های مورد استفاده

داده‌های میدانی

مدل AquaCrop یک ابزار مؤثر برای تعیین نیاز آبی گیاه است. برای برنامه‌ریزی آبیاری در مزارع نیشکر، اطلاعات ورودی مدل AquaCrop شامل اطلاعات گیاهی، اطلاعات هواشناسی، خصوصیات خاک (فیزیکی، شیمیایی و عمق آب زیرزمینی) و مدیریت زراعی (روش آبیاری و مدیریت مزرعه) وارد مدل شد.

در این راستا، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عصاره اشباع خاک در عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰

مطالعه (با توجه به ماهیت میانرس آن)، معمولاً از اوایل آذرماه به بعد به‌عنوان تاریخ برداشت پیش‌فرض در مدل تنظیم شد.

پس از ورود داده‌های دقیق میدانی، فرآیند واسنجی مدل AquaCrop اجرا شد و مدل برای شبیه‌سازی نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری در مزارع آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. برنامه‌ریزی آبیاری حاصل از مدل، بر پایه‌ی شرایط اقلیمی منطقه، میزان تخلیه مجاز رطوبتی خاک (Readily Available Water)، ظرفیت زراعی خاک (Field Capacity) و کیفیت آب آبیاری تنظیم گردید. نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل در جدول (۳) ارائه شده است.

مانتیت فائو مورد استفاده قرار گرفت. همچنین طول دوره‌ی رشد نیشکر در منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس میانگین چندساله تعیین گردید، به‌طوری‌که گیاه معمولاً در تیرماه به مرحله‌ی حداکثر پوشش گیاهی (حداکثر سطح کانوپی) می‌رسد. این زمان در مدل به‌عنوان نقطه‌ی مرجع پیک رشد در نظر گرفته شد و سایر مراحل رشد به‌صورت خودکار توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی گردید. تاریخ کاشت بر اساس داده‌های واقعی مزرعه و ثبت زمان دقیق کشت در سال مورد بررسی به مدل وارد شد. همچنین، تعداد قلمه‌های برداشت‌شده در هکتار با استفاده از میانگین داده‌های سال پیشین از مزارع دارای رقم مشابه و بافت خاک یکسان تعیین و در مدل لحاظ گردید (جدول ۲).

تاریخ برداشت محصول نیز با توجه به برنامه‌ریزی سالانه کشت و صنعت‌ها، برای رقم مورد

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع L6-15 و L6-13

Table 1 - Physical and Chemical Properties of Soil from Farms L6-13 and L6-15

بافت خاک Soil texture	Clay رس	Silt لای	Sand شن	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی	ESP درصد سدیم تبادلی	EC هدایت الکتریکی	pH اسیدیته	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)	مزرعه Farm	ایستگاه Station
Loam	24.5	47.5	28	5.10	6.16	5.69	7.95	0-30	L6-13	1
Loam	18.5	45.5	36	4.29	5.79	5.90	7.96	30-60		
Loam	26.5	41.5	32	4.57	6.88	3.10	8.07	0-30		2
SiltyClayLoam	34.5	45.5	20	5.46	4.43	2.45	8.10	30-60		
Loam	24.5	35.5	40	4.83	5.75	2.66	8.12	0-30		3
Loam	20.5	37.5	42	3.92	3.87	2.08	8.13	30-60		
Clay Loam	28.5	47.5	24	5.10	6.01	3.61	8.0	0-30	L6-15	1
Loam	24.5	45.5	30	4.62	4.64	5.39	7.89	30-60		
Loam	24.5	39.5	36	4.79	6.38	4.41	8.05	0-30		2
Loam	26.5	43.5	30	4.46	7.50	4.32	8.12	30-60		
Clay Loam	32.5	43.5	24	5.01	6.89	2.61	8.29	0-30		3
Clay Loam	28.5	41.5	30	4.77	7.34	3.01	8.10	30-60		

جدول ۲- اطلاعات گیاهی واسنجی شده در مدل AquaCrop
Table 2 - Calibrated Crop Information in the AquaCrop Model

واحد Unit	مقدار Value	اطلاعات گیاهی Plant Information
Plant/ha	130000	مقدار قلمه آسیاب شده در هکتار Number of tillers per hectare
سانتی‌متر (cm)	100	عمق ریشه Root depth
°C	10	دمای پایه T base T base
°C	51	دمای بالا T upper Base temperature (T base) T upper
cm ²	6.5	پوشش کانوپی اولیه در زمان تکمیل ۹۰ درصد سبز شدن CC0 Initial canopy cover at 90% green-up completion (CC0)
%/day	2.5	ضریب رشد کانوپی CGC Canopy growth coefficient (CGC)
%	100	حداکثر کانوپی گیاه CCx Maximum plant canopy (CCx)
%/day	9.5	ضریب کاهش کانوپی CDC Canopy reduction coefficient (CDC)
%	80	شاخص برداشت HI Harvest index (HI)
g/m ²	33	بهره‌وری آب نرمال شده WP Normalized water productivity (WP)
-	1.08	ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل KcTr,x Crop coefficient for full cover (Kc, Tr, x)
-	0.22	آستانه بالای تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی P upper Upper soil moisture depletion threshold for canopy expansion (P upper)
-	0.52	آستانه پایین تخلیه رطوبتی خاک برای گسترش کانوپی P lower Lower soil moisture depletion threshold for canopy expansion (P lower)
-	5	فاکتور شکل ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی Shape factor for soil water stress coefficient for canopy expansion
-	0.45	آستانه بالای ضریب تخلیه رطوبتی خاک برای کنترل روزه‌ها Upper threshold of soil moisture depletion for stomatal control
-	5	فاکتور شکل ضریب تنش آبی خاک برای کنترل روزه‌ها Shape factor for soil water stress coefficient for stomatal control

جدول ۳- برنامه‌ریزی آبیاری مزارع L6-15 و L6-13 با استفاده از مدل AquaCrop
Table 3 - Irrigation Scheduling for Farms L6-13 and L6-15 Using the AquaCrop Model

مزرعه L6-15		مزرعه L6-13		ماه Month
تعداد دفعات آبیاری Number of Irrigations	تاریخ آبیاری Irrigation Date	تعداد دفعات آبیاری Number of Irrigations	تاریخ آبیاری Irrigation Date	
2	25-7	2	25-11	اسفند February / March
2	30-20	3	30-18-8	فروردین March / April
2	24-16	2	25-15	اردیبهشت April / May
4	24-16-8-1	4	31-23-14-4	خرداد May / June
4	25-16-9-1	3	26-18-8	تیر June / July
3	21-12-4	3	24-14-4	مرداد July / August
3	23-10-1	3	29-14-4	شهریور August / September
2	24-6	2	27-11	مهر September / October

ارزیابی تنش آبی گیاه با تلفیق شاخص‌های فیزیولوژیکی و داده‌های سنجش‌ازدور

رطوبت غلاف برگ نیشکر یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فیزیولوژیکی برای سنجش وضعیت تنش آبی گیاه محسوب می‌شود، زیرا مستقیماً بازتاب‌دهنده‌ی توان جذب آب توسط ریشه‌ها و میزان دسترسی گیاه به رطوبت خاک است. در گیاه نیشکر، اندازه‌گیری این پارامتر معمولاً از برگ‌های توسعه‌یافته‌ی ناحیه‌ی فوقانی ساقه (برگ‌های شماره سه تا شش از بالای نی) انجام می‌شود. غلاف این برگ‌ها از گیاه جدا شده، با یکدیگر ترکیب و وزن تر آن ثبت می‌شود؛ پس از خشک کردن نمونه‌ها در دمای ثابت، درصد آب موجود در غلاف برگ (VWC) محاسبه می‌گردد.

در این پژوهش، با توجه به اینکه مدل AquaCrop زمان‌های بهینه‌ی آبیاری را برای هر مزرعه شبیه‌سازی کرده بود، لازم بود اطمینان حاصل شود که این زمان‌ها منجر به بروز تنش آبی در گیاه شده یا خیر؛ چراکه تعیین دقیق حد بالایی و پایینی شاخص تنش حرارتی گیاه (CWSI) به مشاهده و اندازه‌گیری مستقیم تنش در شرایط واقعی نیاز دارد.

از این رو، در طول دوره‌ی رشد، ۲۲ نوبت اندازه‌گیری رطوبت غلاف برگ انجام شد؛ به طوری که هر اندازه‌گیری در فاصله‌ی ۲۴ تا ۴۸ ساعت پیش از زمان آبیاری پیشنهادی مدل AquaCrop صورت گرفت تا وضعیت تنش آبی قبل از آبیاری به درستی ارزیابی شود.

نتایج این اندازه‌گیری‌ها نشان داد که کاهش معنی‌دار رطوبت غلاف برگ، به‌ویژه در ساعات اولیه‌ی صبح، نشانه‌ای از آغاز تنش آبی گیاه و عدم کفایت رطوبت خاک در ناحیه‌ی ریشه است. بر این اساس، داده‌های حاصل از رطوبت غلاف برگ به‌عنوان معیار مرجع زمینی (Ground truth) برای اعتبارسنجی شاخص‌های سنجش‌ازدور و محاسبه‌ی دقیق‌تر CWSI به کار رفت. چنین روشی با رویکردهای کلاسیک معرفی‌شده توسط ساندر و کلمنتس (۱۹۷۴) سازگار بوده و موجب افزایش دقت روابط بین داده‌های زمینی و حرارتی ماهواره‌ای گردید.

$$(1) \quad (VWC) = \frac{(DW) \text{ وزن خشک} - (FW) \text{ وزن تر}}{(FW) \text{ وزن تر}}$$

دمای سطح برگ نیز شاخصی کلیدی در تشخیص تنش آبی محسوب می‌شود که مستقیماً تحت تأثیر کاهش تعرق و فعالیت روزنه‌ای قرار دارد. در شرایط کمبود آب، افزایش دمای سطح برگ بیانگر اختلال در تعادل انرژی گیاه و تشدید تنش آبی است. تغییرات مکانی و زمانی این شاخص، ارتباط مستقیمی با الگوهای تنش آبی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای دارد.

در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ به‌منظور پایش مکانی-زمانی تنش آبی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۴). ترکیب تصاویر این دو ماهواره با افزایش توان تفکیک زمانی به هشت روز، امکان بررسی دقیق‌تر روند تغییرات شاخص‌های حرارتی و پوشش گیاهی را فراهم کرد.

جدول ۴- اطلاعات باندهای طیفی در ماهواره لندست ۸ و ۹

Table 4 - Spectral Band Information in Landsat 8 and 9 Satellites

قدرت تفکیک (متر) Resolution (m)	طول موج (میکرومتر) Wavelength (μm)	باند طیفی Spectral Band
30	0.433 - 0.453	باند ۱- باند Coastal-Aerosol Band 1 - Coastal-Aerosol Band
30	0.450 - 0.515	باند ۲- آبی Band 2 - Blue
30	0.55 - 0.600	باند ۳- سبز Band 3 - Green
30	0.630 - 0.680	باند ۴- قرمز Band 4 - Red
30	0.845 - 0.885	باند ۵- مادون قرمز نزدیک Band 5 - Near Infrared
30	1.56 - 1.66	باند ۶- مادون قرمز طول موج کوتاه Band 6 - Shortwave Infrared
30	2.10 - 2.30	باند ۷- مادون قرمز طول موج کوتاه Band 7 - Shortwave Infrared
15	0.50 - 0.680	باند ۸- Panchromatic Band 8 - Panchromatic
30	1.36 - 1.39	باند ۹- Cirrus Band 9 - Cirrus
100	10.30 - 11.30	باند ۱۰- مادون قرمز طول موج بلند Band 10 - Longwave Infrared
100	11.50 - 12.50	باند ۱۱- مادون قرمز طول موج بلند Band 11 - Longwave Infrared

شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) با استفاده از سنجش از دور

حرارتی و روش ایدسو

یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت بهینه منابع آب کشاورزی، ارزیابی دقیق و به موقع وضعیت تنش آبی گیاهان است. شاخص تنش آبی گیاه CWSI یک پارامتر کارا برای پایش این وضعیت است که با مقایسه‌ی دمای سطح گیاه در شرایط تنش با دمای آن در شرایط آبیاری ایده‌آل، میزان تنش آبی را نشان می‌دهد. این پژوهش با هدف توسعه‌ی یک روش کارآمد برای محاسبه‌ی CWSI با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای حرارتی و روش پیشنهادی ایدسو و همکاران (۱۹۸۱) انجام شده است.

روش شناسی

در این مطالعه، دو سناریوی اصلی برای واسنجی و اجرای مدل CWSI در نظر گرفته شد:

واسنجی مزرعه‌ای روش ایدسو

ابتدا، روش ایدسو و همکاران (۱۹۸۱) به صورت میدانی و در مقیاس مزرعه واسنجی شد تا حدود بالا و پایین (پیک‌های تنش و عدم تنش) برای محاسبه‌ی CWSI تعیین گردد. در این مرحله، دما با استفاده از دماسنج مادون قرمز مدل UNI-T 305A در طول دوره‌ی رشد گیاه نیشکر اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها امکان استخراج معادلات مربوط به حد بالایی و پایینی CWSI را تحت شرایط مزرعه‌ای فراهم آورد.

۱۰:۳۰، ۱۱:۳۰ و ۱۲:۳۰) دو روز پس از تاریخ آبیاری شبیه‌سازی شده که در جدول (۳) آمده است انجام شد. این روش اندازه‌گیری اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه با هوا به‌عنوان شاخصی معتبر برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاهان مورد استفاده قرار گرفته و در تحقیقات قبلی نیز به کار رفته است.

همچنین، در این متن، حد بالایی به‌عنوان حد بالای اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوا تعریف شده است. این حد بالایی به‌صورت یک خط مستقیم موازی با محور (VPD) ترسیم می‌شود و به‌عنوان حدی برای تنش آبی گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$ea = RH \times es \quad (5)$$

$$VPDm = es - ea \quad (6)$$

$$es = 33.8636 [(0.00738T + 0.8072)8 - 0.000019(1.8T + 48) + 0.001316] \quad (7)$$

es: فشار بخار اشباع هوا بر حسب میلی‌بار

ea: فشار بخار واقعی هوا بر حسب میلی‌بار

RH: درصد رطوبت نسبی هوا

T: دمای هوا قبل از آبیاری بر حسب درجه سانتی‌گراد

جایگزینی دمای زمینی با دمای سطح (LST¹) ماهواره‌ای

در مرحله‌ی بعد، به‌منظور تعمیم‌پذیری و دسترسی به داده‌ها در مقیاس وسیع‌تر، دمای سطح (LST) استخراج شده از باندهای حرارتی ماهواره‌های Landsat 8 و 9 جایگزین اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای دماسنج مادون قرمز شد. سایر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه‌ی CWSI (مانند دمای هوای خشک و پارامترهای مربوط به حد بالا و پایین) بدون تغییر باقی ماندند.

ارزیابی خطای بین دماسنج مادون قرمز و LST ماهواره‌ای

در این پژوهش، برای محاسبه دمای سطح زمین (LST) از روش پنجره مجزا استفاده شده است که به‌ویژه در سنجش‌ازدور و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای برای تعیین دماهای سطحی گیاهان، از جمله نیشکر، بسیار مؤثر است.

ایدسو و همکاران (۱۹۷۷)، اظهار داشتند که شاخص تنش - درجه - روز (S.D.D) که بر اساس تفاوت دمای پوشش گیاهی و هوا (Tc-Ta) در زمان حداکثر تنش روزانه محاسبه می‌شود، می‌تواند معیار مناسبی جهت تعیین زمان آبیاری باشد. آن‌ها شاخص تنش آبی را به‌صورت زیر ارائه کردند:

$$CWSI = \frac{(Tc-Ta)_m - \{a - bVPDm\}}{(Tc-Ta)_{ul} - \{a - bVPDm\}} \quad (2)$$

که در آن: CWSI، شاخص تنش آبی، VPDm، کمبود فشار اشباع در شرایط حداکثر تنش روزانه قبل از آبیاری (میلی‌بار)، (Tc-Ta)m، اختلاف درجه حرارت پوشش گیاهی و هوا قبل از آبیاری (سانتی‌گراد) و (Tc-Ta)ul، حداکثر اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا در شرایط بدون تعرق گیاه (سانتی‌گراد) است. در شرایطی که گیاه فاقد تعرق باشد حداکثر اختلاف دمای پوشش گیاهی با هوا از رابطه (۳) حاصل می‌گردد.

$$(Tc-Ta)_{ul} = a + b |VPG| \quad (3)$$

که در آن: VPG شیب فشار بخار واقعی (میلی‌بار) و، a و b ضرایب تجربی هستند که با استفاده از رابطه کمبود فشار بخار اشباع و تفاوت دمای پوشش گیاهی با هوا به‌دست می‌آید. رابطه (۴)، برای تبخیر و تعرق پتانسیل به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$(Tc-Ta)_{ll} = a - bVPDm \quad (4)$$

اندیس‌های ll و ul به‌ترتیب بیانگر خط مبنای پایین و خط مبنای بالا می‌باشند.

در این روش، از مدل AquaCrop استفاده شده است تا معادلات مرتبط با شاخص تنش آبی گیاه با توجه به دور آبیاری واسنجی شود. برای این منظور، اندازه‌گیری دمای گیاه با استفاده از دماسنج مادون قرمز مدل UNI-T 305A، رطوبت خاک و پارامترهای هواشناسی در طول دوره زمانی از اسفند ۱۴۰۰ تا مهرماه ۱۴۰۱ انجام شده است، اندازه‌گیری‌ها در ساعات مختلف روز (۸:۳۰، ۹:۳۰،

باندهای اصلی مورد استفاده در این تحقیق شامل باندهای حرارتی در ناحیه مادون قرمز (معمولاً باندهای ۱۰ و ۱۱ در ماهواره لندست) هستند. این باندها به دلیل توانایی بالای خود در جذب و انتشار حرارت از سطح زمین، برای محاسبه LST انتخاب شده‌اند. به منظور اطمینان از صحت و دقت جایگزینی داده‌های دماسنج مادون قرمز با LST ماهواره‌ای، اقدام به انجام اندازه‌گیری‌های مقایسه‌ای گردید. این ارزیابی با نمونه‌برداری از یک موقعیت مشخص در مزرعه نیشکر انجام شد تا میزان همبستگی و خطای احتمالی بین دو منبع داده‌ی دمایی ارزیابی گردد، ریچی، جی. سی؛ و مک‌کارتی، جی (۲۰۰۳). این گام حیاتی، اعتبار نتایج حاصل از CWSI محاسبه‌شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای را تضمین می‌کند، وانگ و همکاران، (۲۰۱۱).

در این پژوهش، از هر مزرعه ۱۲ پشته نمونه‌برداری شد تا هم‌دمای هر پشته و هم میانگین دما برای آن مزرعه محاسبه گردد. این نمونه‌برداری به صورت مجزا برای هر مزرعه انجام شد و در نقاط مختلف سطح مزرعه ۱۲ پشته انتخاب گردید تا دمای این نقاط با پیکسل‌های مربوط به داده‌های ماهواره‌ای تقریباً هم‌خوانی داشته باشد. فرآیند اعتبارسنجی با اندازه‌گیری دمای واقعی گیاه در محل و بر روی سطوح مختلف پوشش گیاهی در مزرعه انجام شده است.

انتخاب پنجره مجزا به دلیل توانایی آن در کاهش اثرات آلودگی‌های جوی و بهبود دقت اندازه‌گیری دماهای سطحی، به ویژه در نواحی با پوشش گیاهی متراکم، صورت گرفته است. این روش به ما این امکان را می‌دهد که دماهای سطحی را با دقت بیشتری محاسبه کنیم و اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت بهینه منابع آب و ارزیابی تنش‌های آبی در نیشکر به دست آوریم.

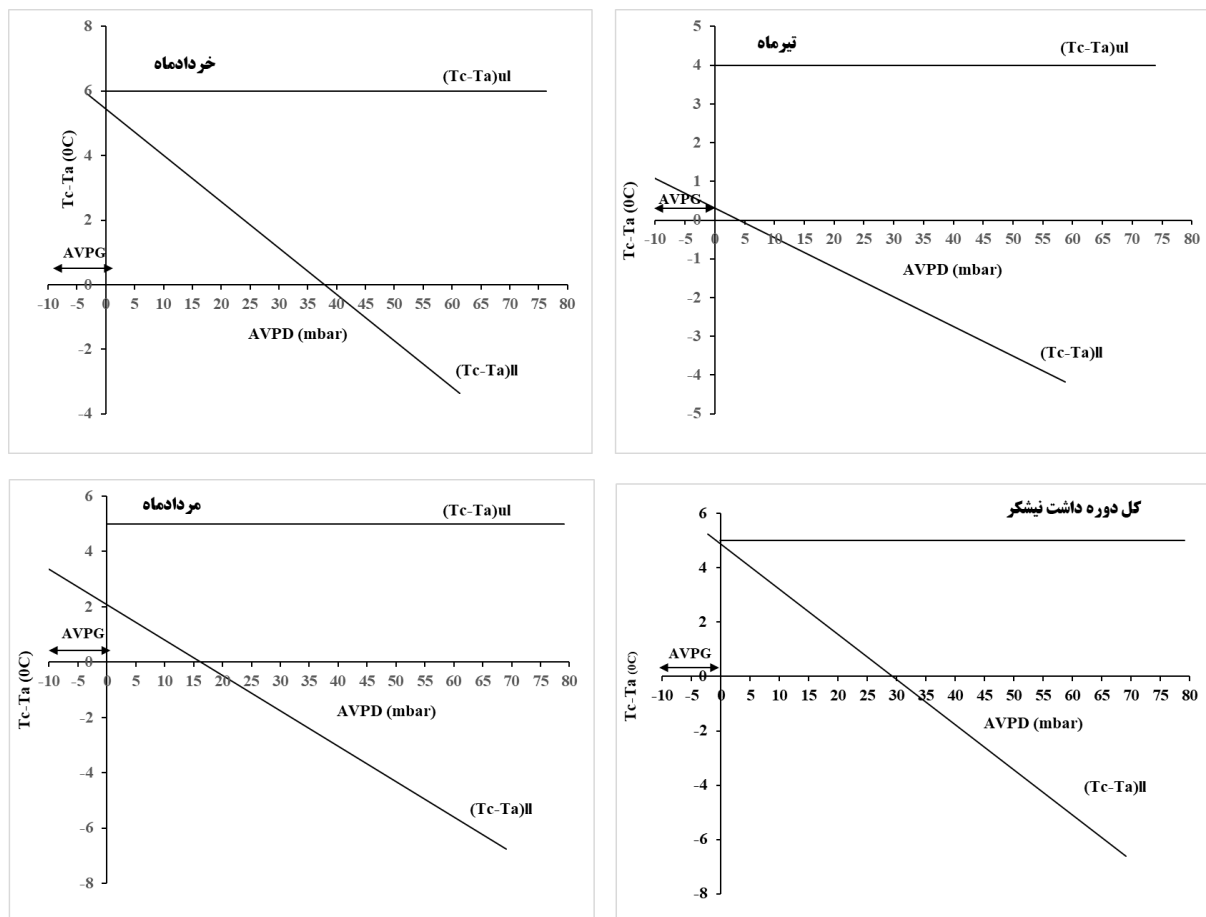
استفاده از پنجره مجزا در این تحقیق، به ویژه در شرایط خاص نیشکر، به ما کمک می‌کند تا تغییرات دما را با دقت بیشتری شناسایی کنیم و در نتیجه، تحلیل‌های بهتری در زمینه سلامت گیاه و نیازهای آبی آن ارائه دهیم.

نتایج و بحث

شاخص تنش آبی گیاه بر اساس اطلاعات زمینی و دماسنج

فروسرخ

معادله خط مبنای پایینی برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور برای محصول نیشکر ایدسو و همکاران (۱۹۷۷) در مراحل مختلف رشد نیشکر تعیین شد (معادلات ۸ تا ۱۰). مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در دو مزرعه با نام‌های L6-13 و L6-15 نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری شده در دو مزرعه یکسان است و بین دو سن و با بافت خاک یکسان اختلافی وجود ندارد.



شکل ۲- خط مبنای بالا و پایین شاخص تنش آبی گیاه نیشکر در دوره‌های مختلف رشد

Figure 2 - Upper and lower baseline of the crop water stress index for sugarcane during different growth stages

دوره داشت نیشکر معادله نهایی خط مبنای پایینی برای نیشکر به صورت زیر ارائه شده است.

$$(Tc-Ta)_m = 4.88 - 0.166VPD_m \quad (11)$$

برای تصمیم‌گیری در خصوص زمان آبیاری مزارع می‌توان با اندازه‌گیری دمای خشک و تر هوا و دمای پوشش گیاهی مقدار کمبود فشار بخار اشباع و $(Tc-Ta)_m$ را محاسبه نمود. هر زمان مقدار اندازه‌گیری شده $Tc-Ta$ بیشتر یا مساوی $(Tc-Ta)_m$ محاسبه شده از معادله (۱۱) باشد می‌بایست مزرعه را آبیاری نمود.

در این پژوهش، خطوط مبنای پایینی و بالایی که کمبود فشار بخار اشباع را به تفاوت دمای پوشش گیاهی و دمای هوا مرتبط می‌کنند به صورت معادله‌ای برای گیاه نیشکر در ماه‌های خرداد تا شهریور مبتنی بر مدل AquaCrop استخراج گردید. از طرف دیگر، با اندازه‌گیری

$$CWSI = \frac{(Tc-Ta)_m - 0.545 + 0.144(VPD)}{5.455 + 0.144(VPD)} \quad (8)$$

$$CWSI = \frac{(Tc-Ta)_m - 0.315 + 0.076(VPD)}{3.685 + 0.076(VPD)} \quad (9)$$

$$CWSI = \frac{(Tc-Ta)_m - 2.083 + 0.128(VPD)}{2.92 + 0.128(VPD)} \quad (10)$$

مقدار شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در طول ماه‌های خرداد تا شهریور، با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده پیش از اجرای برنامه آبیاری و با فرض میانگین CWSI برابر با ۰/۴ برای نیشکر با رقم CP69-1062 (مطابق با شکل ۲)، محاسبه گردید. سپس، رابطه‌ی بین کمبود فشار بخار (VPD) و اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا در زمان پیش از آبیاری، با استفاده از معادله (۱۱) ارائه می‌شود. با اعمال تمام داده‌های جمع‌آوری شده در طول

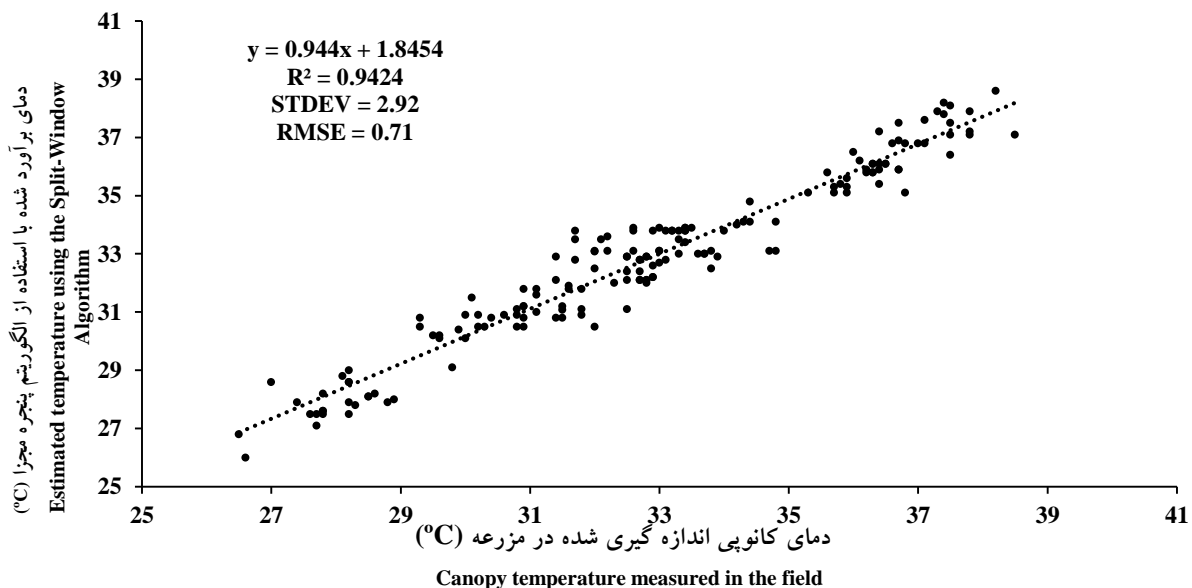
شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در زمان آبیاری، معادله‌ای برای تصمیم‌گیری آبیاری مزارع نیشکر ارائه شد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای گیاه با دستگاه مدل LST و UNI-T 305A ماهواره لندست ۸ و ۹

نتایج نشان می‌دهند که دماهای سطحی از تصاویر ماهواره تطابق خوبی با دمای اندازه‌گیری شده در مزرعه دارند. میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE) برای برآورد LST با پنجره مجزا و دمای اندازه‌گیری شده در مزرعه برابر ۰/۷۱، ضریب تعیین برابر ۰/۹۴ و انحراف معیار ۲/۹۲ به دست آمد. در پژوهش ویسی و همکاران (۲۰۱۷) مقدار دما در ایستگاه هواشناسی و مقدار دمای اندازه‌گیری شده، RMSE برابر ۰/۸۱ و ضریب تعیین ۰/۹۶ را به دست آوردند.

همچنین نتایج فیضی زاده و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا، نشان داد که میزان اختلاف بین دمای ثبت‌شده در ایستگاه و دمای حاصل از نقشه دمای سطح زمین کمتر از دو درجه است که این اختلاف زیادی به حساب نمی‌آید.

اودان و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از همین الگوریتم مقدار دما را با انحراف معیار ۲/۴ و ۲/۷ به دست آوردند که در این تحقیق اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده و اندازه‌گیری در این تحقیق بین ۰/۷۵ تا ۲/۸۰ بوده که در مقایسه با تحقیق اودان و همکاران (۰/۲-۷/۸) در محدوده قابل قبولی قرار دارد. به‌طور متوسط، اختلاف دمای اندازه‌گیری و محاسباتی بین ۲/۱- تا ۱/۷ است که در مقایسه با تحقیقات انجام‌شده اختلاف کم و قابل قبولی است و نشان‌دهنده دقت بالای برآورد دما است، سبزی‌پرور و همکاران، (۱۳۹۵)؛ جهانبخش و همکاران، (۱۳۸۸).



شکل ۳- رابطه بین دمای پوشش سبز در مزرعه و ماهواره لندست ۸ و ۹

Figure 3 - Relationship between Canopy Temperature in the Field and Landsat 8 and 9 Satellites

در مزرعه و مقادیر استخراج‌شده CWSI از تصاویر Landsat 8&9 با استفاده از LST را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که ارتباط بین CWSI به دست آمده از داده‌های ماهواره (CWSI اصلاح‌شده) و

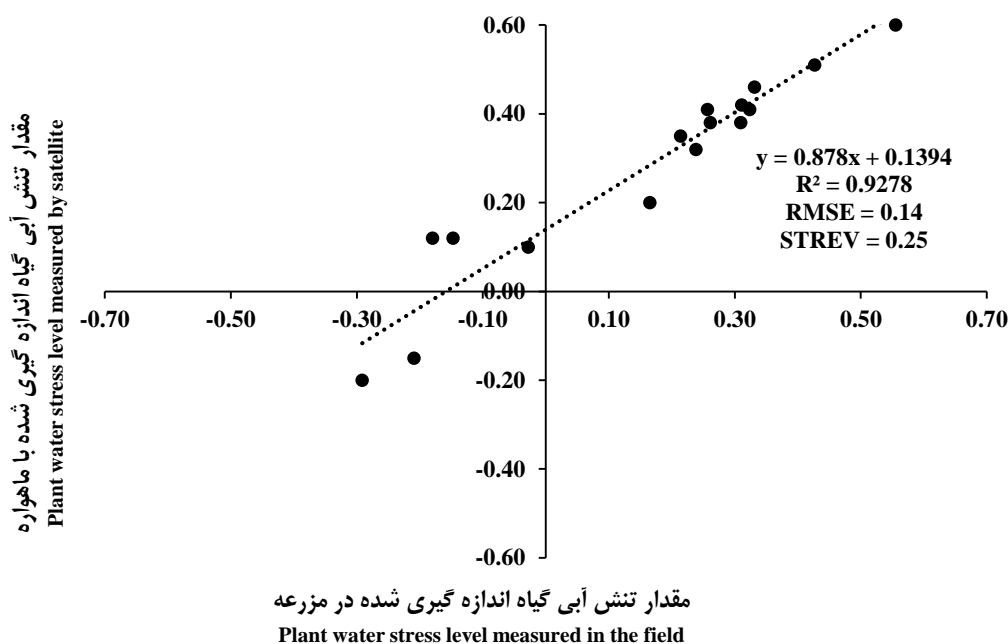
نتایج شاخص تنش آبی گیاه مبتنی بر داده‌های ماهواره لندست ۸ و ۹

شکل ۴ ارتباط بین مقادیر محاسبه‌شده CWSI واسنجی شده بر اساس روش ایدسو و همکاران (۱۹۷۷)

این امر به دلیل تغییرات در ویژگی‌های مادون‌قرمز نزدیک به سطح (مانند خاک یا گیاه) که به‌عنوان شیء مورد بررسی قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد. افزایش دما ممکن است باعث کاهش قدرت انتشار گرما از سطح شود و این باعث کاهش ضریب انتشار می‌شود.

تغییرات در میزان LST نیشکر تحت تأثیر عواملی از جمله دمای محیط، آبیاری، نوع رقم و ویژگی گیاه نیشکر قرار می‌گیرد. این تغییرات ممکن است باعث تغییر در ضریب انتشار شوند.

CWSI محاسبه‌شده بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی خوب است به طوری که ضریب تعیین R^2 برابر ۰/۸۵، RMSE برابر ۰/۴۱ و انحراف معیار برابر ۰/۲۲ در این مطالعه به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر CWSI به دست آمده از تصاویر Landsat بالاتر از CWSI بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی است، زیرا برای برآورد دمای سطحی زمین، محاسبه ضریب انتشار کاملاً ضروری است. تغییرات در مقدار ضریب انتشار بر اساس توزیع مکانی باندهای طیفی NIR و قرمز است. با افزایش دما، ضریب انتشار عموماً کاهش می‌یابد.



شکل ۴- ارتباط بین CWSI اندازه‌گیری شده در مزرعه و CWSI برآورد شده با لندست حرارتی
Figure 4 - Correlation between Field-Measured CWSI and Estimated Thermal Landsat CWSI

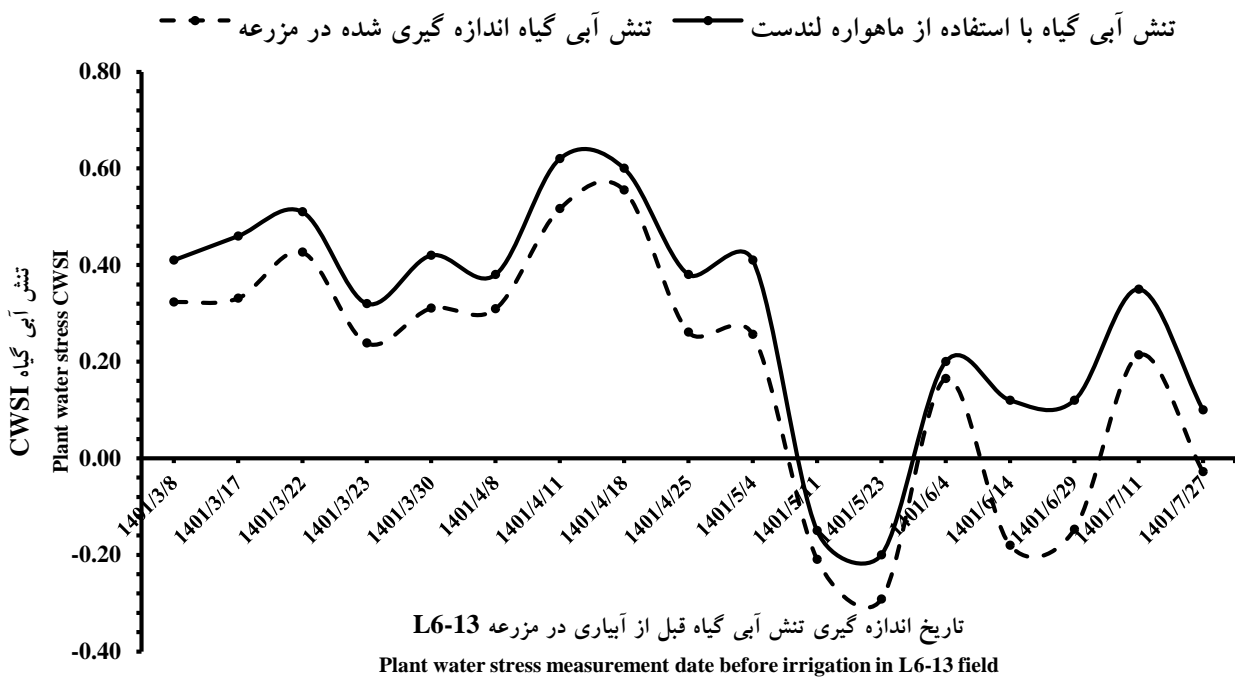
مقادیر دارند. باین‌حال، روند تغییرات مشاهده‌شده در تصاویر ماهواره‌ای، سازگاری بالایی با روند تغییرات در داده‌های میدانی نشان می‌دهد. این سازگاری حاکی از آن است که با تغییر شرایط تنش آبی در مزرعه، تغییرات مشابهی در شاخص‌های حرارتی ماهواره‌ای نیز منعکس می‌شود.

این تطابق در روند تغییرات، نشان‌دهنده دقت بالای واسنجی انجام‌شده بر اساس شرایط مزرعه و

شکل شماره ۵، نتایج مقایسه‌ی اندازه‌گیری تنش آبی گیاه در مزرعه‌ی L6-13 را با شاخص‌های استخراج‌شده از تصاویر حرارتی ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ نشان می‌دهد. این اندازه‌گیری‌ها پیش از اجرای هر نوبت آبیاری صورت گرفته است.

مشاهده می‌شود که در مقایسه با اندازه‌گیری نقطه‌ای با دماسنج مادون‌قرمز در مزرعه، تصاویر ماهواره‌ای به دلیل تفاوت در اندازه پیکسل، تمایل به بیش‌برآورد

تأییدکننده‌ی توانایی ماهواره‌ها در پایش روند تغییرات تنش آبی گیاه است.

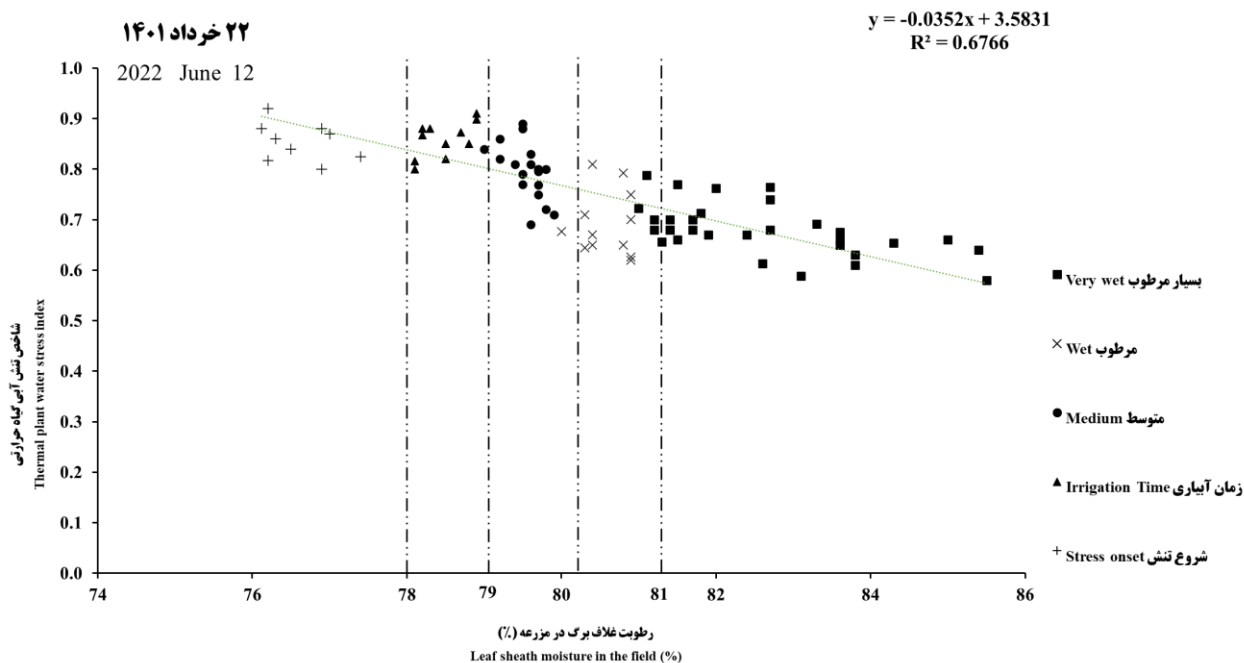


شکل ۵- CWSI اندازه‌گیری شده و CWSI برآورد شده لندست حرارتی
Figure 5 - Measured CWSI and Estimated Thermal Landsat CWSI

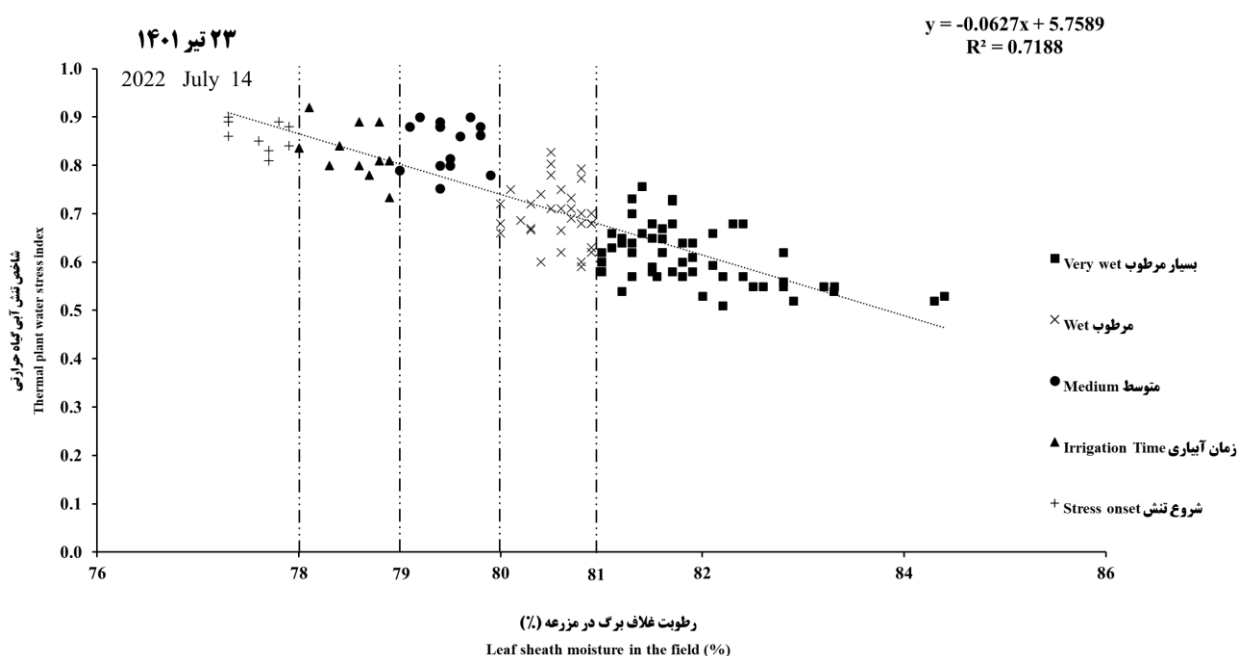
درصد رطوبت غلاف برگ (VWC) اندازه‌گیری شده در روزهای مختلف در مزارع منتخب و مقادیر CWSI حرارتی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. تحلیل نتایج در این دو شکل به خوبی نشان‌دهنده‌ی تفکیک‌پذیری تغییرات و همبستگی مثبت بین این دو پارامتر است. این مقایسه، دقت مدل CWSI را در مقیاس بزرگ و با تعمیم به مزارع مختلف شرکت تأیید می‌کند. همچنین ارتباط بین CWSI حرارتی و رطوبت غلاف برگ، میزان محتوای آب گیاهی VWC به پنج سطح تنش آبی با میزان‌های زیر دسته‌بندی شد: تنش آبی (76.0 < VWC ≤ 78.0)، زمان آبیاری (78.0 < VWC ≤ 79.0)، متوسط (79.0 < VWC ≤ 80.0)، مرطوب (80.0 < VWC ≤ 81.0) و بسیار مرطوب (81.0 < VWC ≤ 85.0) به دست آمد.

ارتباط بین رطوبت غلاف برگ (VWC) و شاخص تنش آبی گیاه حرارتی (CWSI)

به منظور صحت‌سنجی مدل CWSI توسعه‌یافته و ارزیابی قابلیت تعمیم آن به کل مزارع شرکت، مقایسه‌ای با داده‌های میدانی رطوبت غلاف برگ (VWC) در دو تاریخ کلیدی برای نیشکر که مصادف با پیک آبیاری هستند، انجام شد. این صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ۲۲ خرداد ۱۴۰۴ (برای ۸۲ مزرعه ۲۵ هکتاری) و ۲۳ تیرماه (برای ۱۲۴ مزرعه ۲۵ هکتاری) صورت گرفت. یکی از اهداف اصلی این مطالعه، ارزیابی قابلیت استفاده از مقادیر برآورد شده شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین میزان کارایی این شاخص در تعیین وضعیت آبی مزارع نیشکر یا مناطق آبیاری پیش تعیین شده بود. بدین منظور، ارتباط بین مقادیر



شکل ۶- ارتباط بین درصد رطوبت غلاف (VWC) و شاخص تنش آبی گیاه حرارتی (CWSI)، ۲۲ خرداد ۱۴۰۱
 Figure 6 - Relationship between Volumetric Water Content (VWC) and Thermal Crop Water Stress Index (CWSI), June 12, 2022



شکل ۷- ارتباط بین درصد رطوبت غلاف (VWC) و شاخص تنش آبی گیاه حرارتی (CWSI)، ۲۳ تیر ۱۴۰۱
 Figure 7 - Relationship between Volumetric Water Content (VWC) and Thermal Crop Water Stress Index (CWSI), July 14, 2022

تنش آبی گیاه در سطح کلیه‌ی مزارع شرکت تهیه شد. این نقشه نمایانگر یک دید جامع از وضعیت آبی نیشکر در هر مزرعه است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و ارتباط معنی‌دار بین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) با دمای سطح زمین استخراج‌شده از تصاویر حرارتی و همچنین مقادیر رطوبت غلاف برگ (VWC)، در شکل ۸ نقشه‌ای از توزیع فضایی

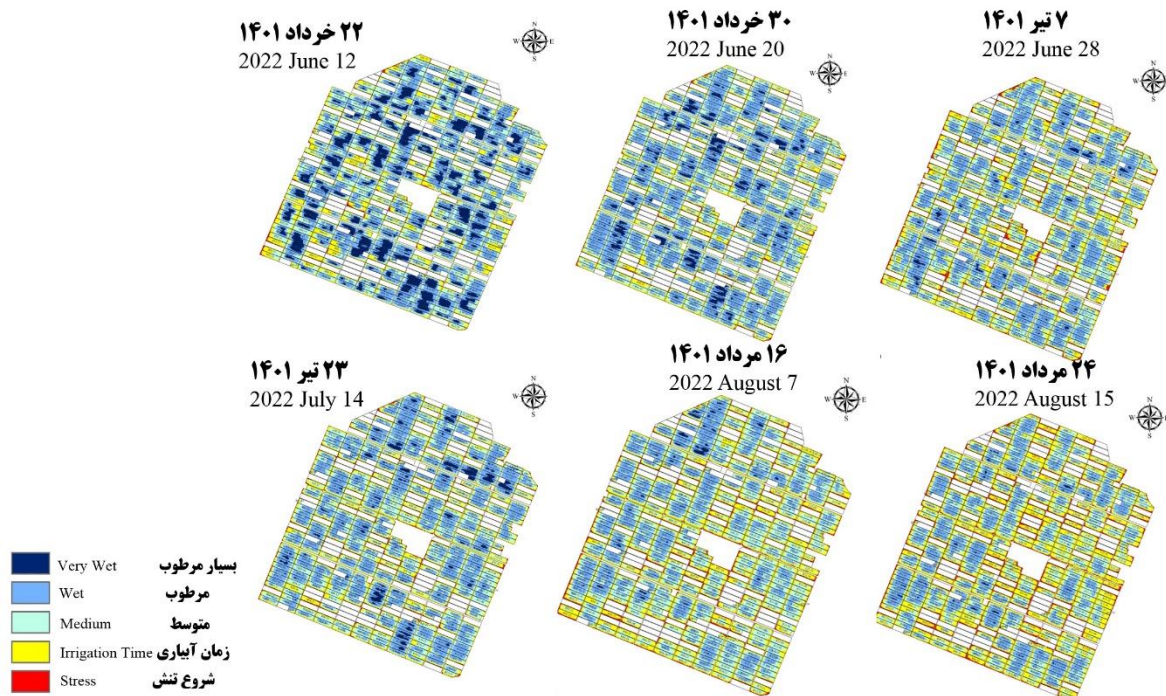
به‌خوبی مدیریت می‌شود. در واقع به‌کارگیری تحلیل پیکسلی در تصاویر حرارتی با واسنجی محلی، موجب کاهش خطای ناشی از پیکسل‌های مجاور شده و نقشه‌ی حاصل دارای پیوستگی مکانی منطقی و دقت قابل قبول در ارزیابی وضعیت تنش آبی گیاه است.

به‌طورکلی، استفاده از این رویکرد مبتنی بر داده‌های حرارتی ماهواره‌ای و شاخص CWSI، ابزاری سنجش‌ازدور محور و کم‌هزینه برای پایش مستمر وضعیت آبی مزارع فراهم می‌کند. این نقشه‌ها می‌توانند به‌عنوان یک سامانه‌ی پشتیبان تصمیم در مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرند و با به‌روزرسانی‌های دوره‌ای، امکان کاهش تلفات آب، افزایش کارایی مصرف و حفظ پایداری عملکرد محصول نیشکر را فراهم آورند.

هدفمند آبیاری در سطح مزرعه و شرکت مورد استفاده قرار گیرد.

در این نقشه، هر مزرعه بر اساس میزان تنش آبی به‌صورت مکانی تفکیک‌شده و نواحی دارای تنش بالا (CWSI بالا) و نواحی با وضعیت مطلوب آبی (CWSI پایین) قابل شناسایی هستند. چنین تفکیکی به مدیران و کارشناسان زراعی این امکان را می‌دهد که برنامه‌ریزی آبیاری را به‌صورت مزرعه محور و ناحیه‌ای انجام دهند؛ به‌گونه‌ای که میزان و زمان آبیاری متناسب با نیاز واقعی گیاه تنظیم گردد.

یکی از مزایای این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم مبتنی بر اندازه‌گیری نقطه‌ای، آن است که اثر پراکنش مکانی دما و شرایط خرد اقلیمی (از جمله تفاوت در بافت خاک، تبخیر موضعی و سایه‌انداز گیاه) در سطح تصویر



شکل ۸- شاخص تنش آبی گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و ۹
Figure 8 - Crop Water Stress Index Using Landsat 8 and 9 Satellite Imagery

برنامه‌ریزی آبیاری استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) استخراج‌شده از دمای سطح زمین، توانایی بالایی در شناسایی وضعیت واقعی تنش آبی مزارع دارد و با رطوبت غلاف برگ (VWC) اندازه‌گیری‌شده در

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، از ترکیب داده‌های حرارتی ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ با مدل فرایندی AquaCrop به‌منظور پایش مکانی-زمانی تنش آبی نیشکر و بهینه‌سازی

چارچوبی نوین برای تولید نقشه‌های دقیق تنش آبی گیاه فراهم کرده است که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مؤثر در مدیریت ناحیه‌ای آبیاری و کنترل مصرف بهینه آب مورد استفاده قرار گیرد.

به‌طورکلی، این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام داده‌های حرارتی سنجش‌ازدور با مدل‌های فیزیولوژیکی گیاه، روشی نوآورانه، دقیق و کم‌هزینه برای پایش هوشمند تنش آبی در محصولات زراعی است؛ روشی که ضمن عبور از محدودیت‌های روش‌های کلاسیک انتخاب پیکسل مرجع، امکان مدیریت داده‌محور و پایدار منابع آب را در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌آورد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

مزرعه همبستگی معنی‌دار ($R^2 = 0.71$) نشان می‌دهد. این همبستگی تأیید می‌کند که ترکیب داده‌های حرارتی و مدل‌سازی فیزیولوژیکی می‌تواند تغییرات مکانی و زمانی تنش را با دقت بالا در سطح مزارع بزرگ ردیابی کند. رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق، برخلاف روش‌های متداول بر پایه انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم مرجع، از یک فرآیند واسنجی پیوسته مبتنی بر داده‌های میدانی و شرایط واقعی هر مزرعه بهره می‌گیرد. این ویژگی موجب شده است تا خطاهای ناشی از تفاوت‌های دمایی پیکسل‌های هم‌جوار - به‌ویژه در مزارعی که هم‌زمان در حال آبیاری یا خشک شدن هستند - به حداقل برسد. در نتیجه، نقشه‌های حاصل از CWSI دارای همگنی و پایداری مکانی بالایی بوده و به‌صورت قابل اعتمادتر وضعیت تنش آبی گیاه را نمایش می‌دهند.

ویژگی مهم دیگر این رویکرد، قابلیت استفاده‌ی آن در مقیاس عملیاتی است. به‌کارگیری تصاویر حرارتی با تفکیک مکانی مناسب لندست، در کنار مدل AquaCrop،

فهرست منابع

- فیضی زاده بختیار، دیده بان خلیل و غلام نیا خلیل، ۱۳۹۵. برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، (۹۸) ۲۵، صص. ۱۷۱-۱۸۱. DOI: 10.22034/SEPEHR.2016.27017
- محمدی معله زاده، جمال، ناصری، عبدعلی و هوشمند، عبدالرحیم، ۲۰۱۹. بررسی کارایی مدل AquaCrop در تعیین زمان آبیاری گیاه نیشکر و پایش آن با شاخص تنش آبی گیاه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران ۱۳(۵)، صص. ۱۴۳۹-۱۴۵۰. DOI: 10.22059/IJWRED.2019.270058.1140
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage* pp. 33, Rome. DOI: 10.1017/S002185960007204X
- Idso, S. B., Jackson, R. D., & Reginato, R. J., 1977. Remote-Sensing of Crop Yields: Canopy temperature and albedo measurements have been quantitatively correlated with final harvests of wheat. *Science*, 196(4285), pp. 19-25. DOI: 10.1126/science.196.4285.19
- Movahedi, A., Karimi, S., & Jafari, R., 2021. Assessment of Plant Water Stress Based on Remote Sensing Techniques: A Review. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, 10(1), pp. 1-15. DOI: 10.1126/science.196.4285.19
- Najafi, E., Zand-Parsa, S., Kamkar, B., & AghaAlikhani, M., 2019. Mapping drought stress using vegetation indices and meteorological data in wheat fields. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(3), pp. 655-669. DOI: 10.22091/AEST.2019.4714.1348
- Ramanian, H., Darvishzadeh, R., Homayouni, S., & Gholizadeh, H., 2021. Assessment of vegetation water stress using multi-temporal Sentinel-2 data and machine learning techniques. *Geocarto International*, 36(6), pp. 634-648. DOI: 10.1080/10106049.2019.1654678

8. Russo D and Bakker D. 1986. Crop water production function for sweet corn and cotton irrigated and saline water. *Soil science society and American journal*. 51, pp. 1554-1562. **DOI: 10.2136/sssaj1987.03615995005100060024x**
9. Ritchie, J. C., & McCarty, G. W., 2003. Remote Sensing of Surface Temperature. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), pp. 313-324. **DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00057-0**
10. Sund, J.M., & Clements, R.O., 1974. A method for determining the moisture content of leaf sheaths in plants. *Plant and Soil*, 41(2), pp. 335-345. **DOI: 10.1007/BF00015064**
11. Turner, N.C., 1996. Adaptation to Water Deficits: A Changing Perspective. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23, pp. 213-226. **DOI: 10.1071/PP9960213**
12. Veysi, S., A. A. Naseri, S. Hamzeh and H. Bartholomeus 2017. A satellite-based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. *Agricultural water management* 189: pp. 70-86. **DOI: 10.1016/j.agwat.2017.04.004**
13. Wang, W., Huang, D., Wang, X. G., Liu, Y. R., & Zhou, F. 2011. Estimation of soil moisture using trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), pp. 1699-1712. **DOI: 10.5194/hess-15-1699-2011**