

ارزیابی آب مصرفی و تقویم آبیاری گندم با مدل بیلان آب سلول پایه و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی نیشابور و قم)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این مطالعه با هدف توسعه یک مدل بیلان آب سلول پایه و ارزیابی آب مصرفی و تقویم آبیاری مزارع گندم در قم و نیشابور در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد. نقشه‌های روزانه تبخیر-تعرق در مقیاس مزرعه، با استفاده از اجرای الگوریتم <i>GeeSEBAL</i> از تصاویر ماهواره‌ای <i>Landsat8&9</i> و دیتاست هواشناسی مدل <i>ERA5</i> تولید شد. منحنی رشد گیاه و استخراج عمق ریشه و ارتفاع گیاه با استفاده از شاخص گیاهی <i>NDVI</i> حاصل از تصاویر <i>sentinel2</i> تولید گردید. مجموع تبخیر-تعرق مرجع در فصل رشد در سایت‌های نیشابور و قم به ترتیب برابر با ۵۳۸ و ۴۱۵ میلی‌متر بوده و میزان بارش در این دو سایت مشابه و حدوداً برابر با ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، میزان تبخیر-تعرق واقعی در فصل رشد در مزرعه گندم نیشابور در بازه ۵۲۰ تا ۷۳۰ میلی‌متر و در مزرعه گندم قم در بازه ۳۷۷ تا ۵۰۲ میلی‌متر متغیر می‌باشد. حجم آب آبیاری که توسط کشاورز بکار گرفته شده در همه قطعات مقادیر ثابت بوده ولی مقادیر نیاز خالص آبیاری حاصل از اجرای مدل بیلان آب از ۳۵۸۲ تا ۴۵۲۴ متر مکعب در هکتار متغیر می‌باشد. اگرچه مدلی در زمان بندی آبیاری عملکرد خوبی داشته، اما پیش‌بینی حجم آبیاری مدل در مقایسه با حجم آبیاری کشاورز اختلاف دارد. تعداد دفعات آبیاری پیش‌بینی شده در سایت نیشابور در اکثر قطعات با تعداد آبیاری کشاورز تطابق داشت. تعداد آبیاری در قم یکسان ولی از نظر زمان و حجم متفاوت و غالباً بیش از نیاز برآورد شده توسط مدل بود. آبیاری بلافاصله پس از بارندگی در هر دو سایت نیشابور و قم مشاهده شده که نمونه‌های بیش آبیاری هستند. این مطالعه بر لزوم آبیاری منطبق بر احتیاجات آبی گیاه به منظور مدیریت مصرف منابع آب در کشاورزی تأکید می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵

کلیدواژه‌ها:

الگوریتم *GeeSEBAL*

پایش دقیق مزرعه،

تقویم آبیاری،

سنجش از دور.

استناد:


DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.



نیشابور

Assessing Water Consumption and Irrigation Scheduling for Wheat using a Cell-Based Water Balance Model and Satellite Imagery (Case Study: Neyshabur and Qom, Iran)

Article Info	ABSTRACT	
Article type: Research Article	<p>This study was conducted with the aim of developing cell-based water balance model and evaluating the water consumption and irrigation schedule of wheat fields in Qom and Neyshabur during 2022-2023 agricultural year. Daily evapotranspiration maps at the farm scale were generated using the GeeSEBAL algorithm applied to Landsat 8 & 9 satellite imagery and the ERA5 meteorological dataset. The crop growth curve, along with root depth and plant height, were derived from the NDVI vegetation index obtained from Sentinel-2. The reference evapotranspiration during the growing season at the Neyshabur and Qom was 538 and 415 mm, respectively, while precipitation at both was similar, approximately 150 mm. The actual evapotranspiration in Neyshabur ranged 520 to 730, and 377 to 502 mm in Qom. The volume of irrigation water applied by the farmer was constant across all plots; The net irrigation requirement obtained from the water balance model implementation varied 3582 to 4524 m³ha⁻¹. The model performed well in scheduling irrigation timing; its prediction of irrigation depth differed from the depth applied by the farmer. In Neyshabur, number of farmer irrigations mostly coincided with the models suggested. In Qom, the number of irrigations was the same, but the timing and volume differed, and the constant 60-mm irrigation depth was often more than the actual crop requirement. Irrigation immediately after rainfall was observed in both, which are instances of over-irrigation. This study emphasizes the necessity of irrigation aligned with crop water requirements for managing water resource consumption in agriculture.</p>	
Article history: Received 12 October 2025 Received in revised form 12 October 2025 Accepted 16 October 2025 Published online 25 October 2025		
Keywords: GeeSEBAL Algorithm, Precise Farm Monitoring, Irrigation Scheduling, Remote Sensing		
<hr/>		
Cite this article: (2025). Assessing Water Use and Irrigation Practices in Wheat Fields with a Pixel-Based Water Balance Model and Satellite Imagery: A Case Study of Qom and Neyshabur, Iran. Iranian. <i>Journal of Soil and Water Research</i> , 56 (1), 1-20. DOI: http://doi.org/00000000000000000000		
© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.  org/00000000000000000000		

ارزیابی آب مصرفی و تقویم آبیاری گندم با مدل بیلان آب سلول-پایه و تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی نیشابور و قم)

چکیده

این مطالعه با هدف توسعه یک مدل بیلان آب سلول-پایه و ارزیابی آب مصرفی و تقویم آبیاری مزارع گندم در قم و نیشابور در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد. نقشه‌های روزانه تبخیر-تعرق در مقیاس مزرعه، با استفاده از اجرای الگوریتم *GeeseBAL* و به کمک تصاویر ماهواره‌ای (*Landsat8&9*) و داده‌های هواشناسی خروجی مدل *ERA5* تولید شد. منحنی رشد گیاه و استخراج عمق ریشه و ارتفاع گیاه با استفاده از شاخص گیاهی *NDVI* حاصل از تصاویر *sentinel2* تولید گردید. مجموع تبخیر-تعرق مرجع در فصل رشد در سایت‌های نیشابور و قم به ترتیب برابر با ۵۳۸ و ۴۱۵ میلی‌متر بوده و میزان بارش در این دو سایت مشابه و حدوداً برابر با ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، میزان تبخیر-تعرق واقعی در فصل رشد در مزرعه گندم نیشابور در بازه ۵۲۰ تا ۷۳۰ میلی‌متر و در مزرعه گندم قم در بازه ۳۷۷ تا ۵۰۲ میلی‌متر متغیر می‌باشد. حجم آب آبیاری که توسط کشاورز بکار گرفته شده در همه قطعات مقادیر ثابت بوده ولی مقادیر نیاز خالص آبیاری حاصل از اجرای مدل بیلان آب از ۳۵۸۲ تا ۴۵۲۴ متر مکعب در هکتار متغیر می‌باشد. اگرچه مدل در زمان‌بندی آبیاری عملکرد خوبی داشته، اما در پیش‌بینی حجم آبیاری در مقایسه با حجم آبیاری کشاورز اختلاف دارد. تعداد دفعات آبیاری کشاورز در سایت نیشابور در اکثر قطعات با تعداد آبیاری کشاورز تطابق داشت. تعداد آبیاری در قم یکسان ولی از نظر زمان و حجم متفاوت و غالباً بیش از پیش‌بینی مدل بود. آبیاری بلافاصله پس از بارندگی در هر دو سایت نیشابور و قم مشاهده شده که نمونه‌های بیش آبیاری هستند. این مطالعه بر لزوم آبیاری منطبق بر احتیاجات آبی گیاه به منظور مدیریت مصرف منابع آب در کشاورزی تأکید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم *GeeseBAL*، پایش دقیق مزرعه، تقویم آبیاری، سنجش از دور

۱. مقدمه

با توجه به بحران شدید منابع آب در ایران و وجود بیش از هشت میلیون هکتار اراضی آبی در کشور و مصرف حدود ۷۰ تا ۹۰ میلیارد مترمکعب آب در بخش کشاورزی (نیازی شهرکی، ۱۴۰۳)، مدیریت آب آبیاری و استفاده بهینه آب در زمین‌های کشاورزی یکی از راهکارهای سازگاری با شرایط آبی کشور می‌باشد. گزارش‌ها حاکی از آن است که بیش از ۷۰ درصد آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (دهقانی‌سانبج و همکاران، ۱۴۰۰ و صبحی و زارع، ۱۳۹۲) از راهکارهای کلیدی در مدیریت مصرف بهینه آب، پیش‌بینی دقیق زمان و حجم آبیاری در سطح مزارع است که می‌توان با استفاده از آن، علاوه بر افزایش بهره‌وری آب نسبت به مدیریت منابع آب کشاورزی اقدام نمود (توکلی و همکاران، ۱۳۹۹). علیرغم اینکه بیش از سه میلیون هکتار از اراضی تحت کشت آبی به سیستم‌های نوین آبیاری مجهز می‌باشند، اما کماکان به دلیل عدم توسعه و بکارگیری ابزار پیش‌بینی تقویم آبیاری در مقیاس مزرعه، میزان مصرف آب در مزارع آبی کشور منطبق بر نیاز آبی محصول نبوده و بیش آبیاری در بیشتر مزارع مشاهده می‌شود (خسروی‌پور و لوبمی، ۱۴۰۳). با چالش‌های فزاینده تغییرات اقلیمی و کمبود آب، برآورد نیاز آبی و پیش‌بینی زمان و مقدار آبیاری، برای مدیریت کارآمد آب کشاورزی ضروری است (گودرزی و عابدی کوهپایه، ۱۳۹۹). هدف اصلی آبیاری رسیدن به یک عملکرد مطلوب و بالاترین کیفیت در تولید محصول می‌باشد. زمان و مقدار آب مورد نیاز آبیاری به عواملی از قبیل شرایط اقلیمی، گیاه و مرحله رشد آن، خصوصیات خاک (ظرفیت نگهداری آب خاک) و گستره توسعه ریشه وابسته است (حاجی‌حسینی و همکاران، ۱۳۹۰). آب ذخیره شده منبع تأمین آب مورد نیاز برای انجام فرایند تبخیر-تعرق گیاه است. بنابراین، بیلان مزرعه‌ای آب به منظور تعیین نیاز آب آبیاری ضروری است. نگهداری آب خاک در دامنه قابل قبول نیازمند داشتن اطلاعاتی در خصوص موازنه آب در منطقه توسعه ریشه‌ها می‌باشد.

با توجه به اهمیت بیلان آب خاک در منطقه توسعه ریشه‌ها در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در اراضی کشاورزی مطالعات زیادی در این خصوص در دو دهه گذشته صورت پذیرفته است و مدل‌های هیدرولوژیکی و آگروهیدرولوژیکی ساده تا پیچیده متعددی توسعه یافته است که می‌توان به مدل‌های هیدرولوژیکی Beach (شیخ و موشخیان، ۱۳۸۸)، WEAP^۱ (نیرو، ۱۳۹۳) و SWAT^۲ (Arnold, et al., 1991) و همچنین به مدل‌های آگروهیدرولوژیکی (Kroes, et al., 2003) SWAP^۳، AquaCrop (امیری و همکاران، ۱۳۹۴) و مدل دو جزئی FAO56 (Allen, et al., 1998) اشاره نمود. مدل‌های هیدرولوژیکی در برآورد اجزای بیلان آب و تغییرات رطوبت در لایه‌های سطحی و زیر سطحی قابل استفاده می‌باشند، اما به دلیل ضعف در مدل‌سازی روابط آب-خاک-گیاه، در برآورد آب مصرفی گیاه کاربردی ندارند. در مقابل، مدل‌های آگروهیدرولوژی ساده تا پیشرفته با توجه به لحاظ کردن روابط آب-خاک-گیاه، شبیه‌سازی همزمان رطوبت خاک و اثر آن بر رشد و نمو محصول کاربرد بیشتری در برآورد آب مصرفی گیاه داشته و می‌توان از آن‌ها در مدیریت آب آبیاری و بررسی ساریوها بهره جست (عابدین‌پور و رزاقی، ۱۳۹۹). مدل آگروهیدرولوژی پیچیده (Kroes, SWAP, et al., 2003) نسخه توسعه یافته مدل SWATRE است. این مدل با گرفتن اطلاعات ورودی چون پارامترهای هواشناسی، پارامترهای گیاهی و اطلاعات لایه‌بندی خاک و همچنین اطلاعات شرایط اولیه رطوبتی و مرزی در بالادست و پایین‌دست منطقه ریشه‌ها، تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک را شبیه‌سازی کرده و اجزای بیلان آب را برای زمان‌های مورد نظر محاسبه می‌کند. مزیت مدل‌های ساده نسبت به مدل‌های پیچیده در حجم محاسبات کمتر و قابلیت اجرای آن‌ها با داده‌های ماهواره‌ای است که عمده‌تاً در دسترس می‌باشند و به امکانات کمتری برای اجرای عملیات ریاضی و محاسباتی نیاز دارد. به همین دلیل با استفاده از یک مدل ساده که خاک را در دو لایه سطحی و زیر سطحی بررسی می‌کند و با محاسبات محدود می‌توان اجزای بیلان آب را در سطح وسیع‌تری محاسبه و پیش نمود، به طوری که برآورد زمان و مقدار آب آبیاری مورد نیاز در مقیاس منطقه‌ای از قابلیت اجرای بالاتری برخوردار باشد. مدل بیلان آب فائو ۵۶ یک مدل ساده است که عموماً بر اساس روابط ساده بیلان آب ارائه شده توسط آلن و همکاران (Allen, et al., 1998) می‌باشد. این مدل با هدف محاسبه تخلیه رطوبتی در منطقه توسعه ریشه‌ها و محاسبه تبخیر-تعرق در شرایط استاندارد و غیراستاندارد بر اساس بیلان روزانه آب خاک توسعه داده شده است (Paredes, et al., 2018). از مهم‌ترین اجزای بیلان آب، میزان آب مصرفی در اثر فرآیند تبخیر-تعرق است که از مدل‌های بیلان انرژی و با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای به طور گسترده استخراج می‌گردد. عمده روش‌های سنجش از دور در تخمین تبخیر-تعرق بر اساس روش باقی‌مانده انرژی و با برآورد شار تابش خالص، شار گرمایی خاک و شار گرمایی محسوس در زمان عبور ماهواره صورت می‌گیرد. از مدل‌هایی که با استفاده از روش بیلان انرژی، تبخیر-تعرق را برآورد می‌کنند، می‌توان به مدل‌های SEBAL^۴ (Bastiaanssen et al., 2007)، SEBS^۵ (Su., 2002)، METRIC^۶ (Allen et al., 2007) و ETLook (Bastiaanssen et al., 2012) اشاره نمود که به طور گسترده در برآورد تبخیر-تعرق در داخل کشور (مشتاق و همکاران، ۱۳۹۴) و خارج از کشور (Saiz Rodriguez et al., 2017; Corbari et al., 2017) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما با توجه به محدودیت دسترسی به باندهای حرارتی، در تعدادی از مطالعات شاخص‌های گیاهی در برآورد تبخیر-تعرق واقعی استفاده شده است (Saiz Rodriguez et al., 2017). در این مطالعات، پس از استخراج اجزاء بیلان انرژی شامل تابش خالص سطح زمین، گسیل‌مندی سطح، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس، در نهایت شار گرمای نهان و نقشه تبخیر-تعرق

^۱ Bridge Event And Continuous Hydrological

^۲ Water Evaluation And Planning

^۳ Soil and Water Assessment Tool

^۴ Soil-Water-Atmosphere-Plant

^۵ Soil Water Actual TRanspiration Extended

^۶ Surface Energy Balance Algorithm for Land

^۷ Surface Energy Balance System

^۸ Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration

بر پوشش‌های گیاهی استخراج گردیده و سپس با داده‌های متنوع زمینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اما بزرگ‌ترین محدودیت فناوری‌های مبتنی بر سنجش از دور، نبود و یا عدم دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا و دوره‌های بازدید کوتاه مدت و یا عدم وجود باندهای حرارتی می‌باشد که در نتیجه استخراج تبخیر-تعرق واقعی و پیوستگی داده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با تلفیق روش‌های مبتنی بر فناوری دورسنجی و مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان از بروز مشکلاتی مانند گسستگی در داده‌های محاسباتی که بدلیل عواملی مانند وجود ابر در آسمان و یا نبود تصویر مناسب بوجود می‌آید، جلوگیری نمود و مشکل عدم قطعیت در پارامترهای ورودی در مدل‌سازی‌های منطقه‌ای را کاهش داد (Corbari et al., 2017).

در این مطالعه، قابلیت یک رویکرد مبتنی بر مدل موازنه آب خاک پیاده‌سازی شده در محیط (GEE) را که با داده‌های سنجش از دور داده‌گواری گردیده برای ارزیابی مصرف آب آبیاری و تقویم آبیاری کشاورز، معرفی شد. ابزار پایش ماهواره‌ای کفایت آبیاری که در این مقاله توسعه یافته است، برای برآوردهای فضایی تبخیر-تعرق و ارزیابی بیلان آب در مقیاس پیکسل بر اساس روش فائو ۵۶ طراحی شده است. پس از واسنجی و اعتبار سنجی مدل در مقیاس کرت زراعی، این رویکرد برای مقایسه برآوردهای سنجش از دور نیازهای آبیاری محصول و ارزیابی مصرف آب آبیاری در مزرعه گندم در دشت آبی نیشابور (خراسان رضوی) و مزرعه در قم استفاده شد. هدف این تحقیق نشان دادن کاربرد عملیاتی یک مدل موازنه آب خاک مبتنی بر سنجش از دور برای پایش مصرف آبیاری در سطح مزرعه در مناطق وسیع آبیاری در راستای برطرف نمودن خلا نبود چارچوب یکپارچه با تفکیک‌پذیری فضایی بالا و پیوستگی زمانی قابل اطمینان در شرایط ابری و فقدان باند حرارتی است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، به منظور ارزیابی مدل بیلان آب سلول پایه یک مزرعه گندم در شهرستان نیشابور در استان خراسان رضوی و یک مزرعه گندم در استان قم به عنوان سایت‌های مشاهداتی انتخاب شدند که موقعیت جغرافیایی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی دو سایت انتخابی مزرعه گندم شامل سایت نیشابور (سمت راست) و سایت قم (سمت چپ)

منطقه مورد مطالعه در شهر قم در طول جغرافیایی $50^{\circ}64'$ تا $50^{\circ}67'$ و عرض جغرافیایی $38^{\circ}7'$ تا $38^{\circ}9'$ و در ارتفاع $932/8$ متر از سطح دریا با آب و هوای گرم و خشک قرار گرفته است. مزرعه مورد نظر در منطقه‌ای با میانگین بیشینه دمای سالانه $25/9$ و میانگین کمینه دمای سالانه $14/3$ درجه سلسیوس و میانگین بارش ماهانه $13/79$ میلی‌متر واقع شده است. میانگین تعداد روزهای بارش بیش از $0/1$ میلی‌متر نزدیک به 33 روز و میانگین تعداد روزهای بدون بارش معادل 332 روز است. میانگین رطوبت نسبی در این شهر معادل $32/14$ درصد است. (weatherandclimate.com, 2025) خاک مزرعه دارای بافت رسی-لومی بوده و روش آبیاری غرقابی

(فلود یا شیار) است. مزرعه مورد نظر به ۱۸ قطعه تقسیم شده است که در قطعه ۱۴ این مزرعه گندم کشت شده است. مزرعه گندم در شهرستان نیشابور در طول جغرافیایی ۵۸° ۸۳' تا ۵۸° ۸۴' و عرض جغرافیایی ۳۶° ۱۲' تا ۳۶° ۱۴' واقع گردیده است. این منطقه دارای آب و هوای سرد و کوهستانی و ارتفاع ۱۱۴۶ متر از سطح دریا است. این منطقه دارای میانگین بیشینه دمای سالانه ۱۹/۴۴ و میانگین کمینه دمای سالانه ۱۰/۹ درجه سلسیوس و میانگین بارش ماهانه ۴۲/۶۷ میلی‌متر است. میانگین تعداد روزهای بارش بیش از ۰/۱ میلی‌متر در حدود ۷۶ روز و میانگین تعداد روزهای بدون بارش معادل ۲۸۹ روز است. (weatherandclimate.com, 2025) این مزرعه به ۱۲ قطعه مجزا تقسیم شده است و در شکل یک با عنوان بلوک‌های یک تا دوازده نامگذاری شده است. آب و هوای گرم و خشک قم و آب و هوای سرد و کوهستانی نیشابور بر نوع پوشش گیاهی و میزان منابع آبی آنها تأثیر گذاشته است. درحالی‌که قم بیشتر با مشکل کم‌آبی مواجه است، نیشابور به نسبت دارای منابع آب زیرزمینی بیشتری است.

۲.۲. مدل بیلان آب خاک مینا سلول-پایه

مقدار آب خاک برحسب مقدار تخلیه، معمولاً به صورت عمق آب بیان می‌شود، با تعیین اجزای ورودی و خروجی موازنه آب خاک برآورد می‌گردد. برخی از اجزای موازنه آب و خاک از قبیل بارندگی، آبیاری و صعود مویینه آب موجب افزایش آب خاک شده و تبخیر-تعرق گیاهی و تلفات نفوذ عمقی موجب کاهش آب خاک می‌گردد. موازنه روزانه آب خاک برحسب مقدار تخلیه در پایان هر روز، طبق معادله ارائه شده در جدول ۱ قابل محاسبه است.

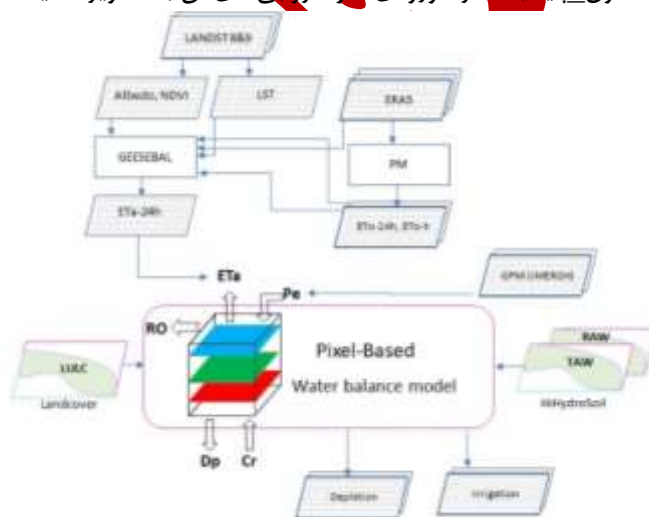
جدول ۱. معادلات بکار رفته در توسعه مدل بیلان آب سلول-پایه

شماره رابطه	کاربرد	معادله
۱	تخلیه روزانه آب خاک (mm)	$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - Cr_i + ETa_i + Dp_i$
۲	دامنه مجاز تغییرات تخلیه آب خاک	$0 \leq D_{r,i} \leq TAW$
۳	میزان تخلیه آب خاک در روز اول	$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1}) * Z_r$
۴	نفوذ عمقی (mm)	$Dp_i = (P - RO)_i + I_i - ETa_i - D_{r,i-1} \geq 0$
۵	کل آب قابل دسترس در منطقه ریشه‌ها	$TAW = 1000 * (\theta_{FC} - \theta_{pwp}) * Z_r$
۶	آب سهل‌الوصول در منطقه ریشه‌ها	$RAW = MAD * TAW$
۷	عمق ریشه همزمان با رشد محصول	$Z_r = Z_{rmin} + \frac{fc}{fc_{max}} * Z_{rmax} - Z_{rmin}$
۸	ضریب تنش آبی	$K_s = m * \left(\frac{TAW - D_{r,i}}{TAW - RAW} \right)$
۹	تبخیر-تعرق واقعی	$ETa_i = K_s * K_c * ET_{0,i}$
۱۰	نیاز خالص آب آبیاری (mm)	$NIR_i = ET_{0,i} + Dp_i + RO_i - P_i + D_{r,i}$

$D_{r,i}$ = تخلیه آب خاک از عمق توسعه ریشه گیاه در پایان روز i ام (mm) ETa_i = تبخیر-تعرق گیاهی در روز i ام (mm) RO_i = رواناب در روز i ام (mm)
 Cr_i = صعود مویینه از سطح ایستایی در روز i ام (mm) I_i = عمق خالص آبیاری در روز i ام (mm) θ_{FC} = رطوبت ظرفیت زراعی
 Dp_i = نفوذ عمقی به پایین منطقه توسعه ریشه در روز i ام (mm) P_i = بارندگی در روز i ام (mm) θ_{pwp} = رطوبت پژمردگی دائم

همانگونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، فرض شده که آب در منطقه توسعه ریشه گیاه تا حد ظرفیت زراعی قابل ذخیره می‌باشد. هر چند، مقدار آب خاک، ممکن است پس از بارندگی یا آبیاری سنگین بیشتر از ظرفیت زراعی گردد. که فرض می‌گردد آب مازاد بر ظرفیت زراعی در همان روز به صورت نفوذ عمقی و تبخیر-تعرق از دست می‌رود. بنابراین، با فرض آن که پس از یک آبیاری یا بارندگی سنگین، رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی است، مقدار تخلیه رطوبتی در ابتدای روز صفر می‌باشد. رطوبت موجود در خاک به تدریج به صورت نفوذ عمقی و تبخیر تعرق کاهش یافته و مقدار تخلیه افزایش می‌یابد. در شرایط عدم آبیاری و بارندگی مجدد، مقدار آب خاک به پایین‌ترین مقدار می‌رسد. در این حالت، تبخیر-تعرق و ضریب تنش آبی صفر بوده و تخلیه آب خاک بیشترین مقدار و مساوی کل آب قابل دسترس TAW است که با محاسبه عمق توسعه ریشه و رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم طبق رابطه ۵ (جدول ۱) محاسبه می‌گردد. عمق ریشه Z_r با توجه به مرحله رشد گیاه متفاوت است و فرض می‌شود که به صورت خطی با پوشش گیاهی کسری (fc) مطابق با رابطه (۷) (جدول ۱) مرتبط است. که در آن حداکثر پوشش کسری مربوط به حداکثر عمق ریشه‌زایی (Z_{rmax}) را نشان می‌دهد و Z_{rmin} حداقل عمق ریشه‌زایی است که پوشش گیاهی توسط ماهواره شناسایی می‌شود ($fc > 0$)

(T. Schnur, و غیره, ۲۰۱۰). در رابطه موازنه آب خاک (رابطه ۱۰ جدول ۱)، عبارت P_i بارندگی روزانه است. بارندگی روزانه کمتر از ۰/۲ تبخیر تعرق مرجع، به طور معمول، تبخیر شده و از محاسبه‌ها به ویژه در روش ضریب گیاهی یک جزیی، حذف می‌شود. عبارت I_i میانگین عمق آبیاری یکنواخت در کل سطح مزرعه است. مقدار رواناب (RO) ناشی از بارندگی را می‌توان با توجه به بسته بودن انتهای قطعات آبیاری صفر در نظر گرفت. هنگامی که مقدار بارندگی کافی نباشد، آب مورد نیاز برای انجام فرایند تبخیر- تعرق گیاه توسط آبیاری تأمین می‌شود. زمان و عمق آبیاری با محاسبه عمق تخلیه رطوبتی خاک با استفاده از موازنه روزانه آب خاک در عمق توسعه ریشه گیاه بر طبق معادله ۹ (جدول ۱)، برآورد می‌گردد. در پی بارندگی یا آبیاری سنگین، اگر مقدار آب خاک بیشتر از ظرفیت زراعی θ_{fc} شود، مقدار تخلیه رطوبتی در آن روز برابر با صفر فرض شده و مقدار نفوذ عمقی با استفاده از معادله ۴ (جدول ۱) محاسبه می‌شود. صعود موینگی مقدار جریان رو به بالای آب از سطح ایستابی است و به بافت خاک، سطح ایستابی و رطوبت خاک بستگی دارد. چنانچه فاصله سطح ایستابی از عمق توسعه ریشه گیاه بیشتر از یک متر باشد، می‌توان مقدار صعود موینه ای آب را صفر فرض کرد. در مدل توسعه داده شده، تبخیر تعرق واقعی از رویکرد بیلان انرژی سطح محاسبه می‌شود که در ادامه تشریح می‌شود. نیاز آب آبیاری محصول با استفاده از یک مدل بیلان آب خاک مبتنی بر سنجش از دور شبیه‌سازی شد که تغییرات روزانه در ذخیره‌سازی آب خاک را به عنوان تابعی از ورودی‌های حاصل از بارندگی مؤثر و آبیاری و خروجی‌های حاصل از نفوذ عمقی و تبخیر- تعرق واقعی دنبال می‌کند. برآورد آب خالص مورد نیاز آبیاری نیازمند بررسی موازنه روزانه آب خاک در عمق توسعه ریشه گیاه است. در شکل ۲، ساختار مفهومی مدل بیلان آب سلول پایه به همراه ورودی‌ها و خروجی‌های آن به تصویر کشیده است.



شکل ۲. ساختار مدل بیلان آب سلول پایه به همراه ورودی‌ها و خروجی‌های آن. تبخیر- تعرق واقعی ETA در این مدل، از بیلان انرژی سطح (مدل $GeeSEBAL$)
(Laipelt et al., 2021) و تبخیر- تعرق مرجع ETo از روش پنمن مانیت فائو (PM) برآورد می‌گردد.

۳،۲ مقایسه تبخیر- تعرق پتانسیل و تبخیر- تعرق واقعی

نمودارهای روند تبخیر- تعرق پتانسیل و تبخیر- تعرق واقعی $GEE-SEBAL$ و $MOD16$ در شکل زیر آورده شده است.

۲،۴ تبخیر- تعرق بر اساس روش بیلان انرژی سطح زمین $SEBAL$

$SEBAL$ یک مدل تعادل انرژی سطحی است که از داده‌های سنجش از دور و داده‌های باز تحلیل داده به منظور تخمین آهنگ تبخیر- تعرق واقعی و بالقوه به همراه دیگر تبدلات انرژی بین زمین و جو استفاده می‌کند. تابش‌های طیف الکترومغناطیس در محدوده مرئی، فروسرخ و حرارتی از ورودی‌های اصلی به مدل $SEBAL$ هستند (Bastiaanssen و همکاران، ۱۹۹۸). در این مطالعه، تصاویر

ماهواره لندست^۱ که تابش‌ها را در طیف مورد نیاز فراهم می‌کند، پس از پیش‌پردازش تصاویر با استفاده از باندهای حرارتی، نزدیک به فرورسرخ و قرمز برای محاسبه شاخص‌های مختلف مانند NDVI، آلبیدو و دمای سطح زمین (LST) محاسبه می‌شوند. مدل SEBAL، تبخیر-تعرق واقعی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی مورد نیاز (سرعت باد، دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی ورودی) و بر اساس رابطه بیلان انرژی محاسبه می‌کند. از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای فقط می‌توانند اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه دهند، بنابراین مدل SEBAL می‌تواند مقدار شار تبخیر-تعرق لحظه‌ای را در زمان تصویربرداری برآورد کند و خروجی‌ها به گام زمانی ۲۴ ساعته تبدیل می‌شوند. برای اجرای مدل SEBAL و محاسبه تبخیر-تعرق واقعی، ابتدا پارامترهای پوشش گیاهی مانند شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی^۲، شاخص سطح برگ^۳، ضریب بازتاب سطح زمین و دمای اصلاح شده سطح زمین برای هر تصویر لندست محاسبه می‌شوند و در نهایت، شار تبخیر-تعرق برای هر سلول تصویر، به صورت باقیمانده رابطه بیلان انرژی سطح محاسبه می‌گردد. رابطه‌های اصلی در برآورد شار تبخیر-تعرق از باقیمانده بیلان انرژی در جدول ۲ آورده شده‌اند که λET شار گرمای نهان (Wm^{-2}) ، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (Wm^{-2}) ، G ، شار گرمای خاک (Wm^{-2}) و H ، شار گرمای محسوس (Wm^{-2}) است.

جدول ۲. رابطه اصلی در برآورد تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۱)

شماره معادله	توضیح	معادله
۱۱	بیان انرژی	$\lambda ET = R_n - G - H$
۱۲	تابش خالص در سطح	$R_n = (1 - \alpha) RS_{\downarrow} + RS_{\uparrow} + RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1 - \epsilon_0) RL_{\downarrow}$
۱۳	شار گرمای خاک	$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4)$
۱۴	شار گرمای محسوس	$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}}$
۱۵	تبخیر-تعرق لحظه‌ای	$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda \rho_w}$
۱۶	تبخیر-تعرق روزانه	$ET_{a24} = \frac{ET_{inst}}{ET_{ref_{inst}}} \times ET_{ref_{24}}$

با توجه به جدول ۲، مقدار R_n که شار تابش خالص در سطح زمین است، از موازنه چهار شار تابشی شامل تابش موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$) (بخشی از این انرژی تابشی توسط سطوح مختلف بازتاب می‌شود، $R_{s\uparrow}$)، تابش موج بلند ورودی از اتمسفر ($R_{L\downarrow}$) و تابش طول موج بلند گسیل شده از سطح ($R_{L\uparrow}$)، و α آلبیدوی سطحی و ϵ_0 توان تشعشعی سطحی باند پهن طبق رابطه ۱۲ (جدول ۲) بدست می‌آید. شار گرمای خاک (G) در واقع آهنگ ذخیره حرارت در خاک و گیاه در اثر انتقال است. SEBAL ابتدا نسبت G/R_n را با استفاده از رابطه تجربی (رابطه ۱۳ - جدول ۲) تخمین می‌زند (Bastiaanssen, 2000) و سپس شار گرمای خاک را با ضرب G/R_n در R_n محاسبه می‌کند که در رابطه یاد شده T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$)، α آلبیدوی سطحی و $NDVI$ شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی است. برای برآورد شار گرمای محسوس (H) در روش SEBAL، ابتدا سلول‌های سرد و گرم انتخاب می‌شوند. سلول سرد مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و آبیاری شده است که دمای سطح زمین در این سلول نزدیک به دمای هواست و تبخیر-تعرقی معادل تبخیر-تعرق مرجع دارد. سلول گرم معرف، زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک است. بنابراین مقدار شار گرمای نهان تبخیر در این سلول صفر در نظر گرفته می‌شود. در GeeSEBAL، انتخاب سلول‌های سرد و گرم به صورت خودکار و با کدنویسی برای تعیین درصد برای تعریف هر گروه از سلول‌های گرم و سرد صورت می‌پذیرد. پیکسل سرد دمای بالای ۵ درصد میانگین و $NDVI$ پایین‌تر از ۵ درصد میانگین و پیکسل گرم برعکس آن محاسبه می‌شود. مقدار شار گرمای محسوس از رابطه ۱۴ (جدول ۲) برآورد می‌شود که در آن، ρ چگالی هوا $1/225 \text{ } ^{\circ}C/m^3$ ، C_p گرمای ویژه هوا برابر 1004 J/kg/K ، dT اختلاف دمای هوای نزدیک سطح زمین (K) و r_{ah} مقاومت اُترو‌دینامیک برای انتقال گرماست ($Sday/m^{-1}$). پس از محاسبه شار تابش خالص، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و شار

^۱Landsat

^۲NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

^۳LAI: Leaf Area Index

گرمای تبخیر، مقدار تبخیر_تعرق واقعی لحظه‌ای در زمان عبور ماهواره و تبخیر_تعرق روزانه از رابطه ۱۶ (جدول ۲) به دست می‌آید که در آن ET_{inst} مقدار تبخیر_تعرق لحظه‌ای ($mm.hr^{-1}$)، $ET_{ref_{inst}}$ مقدار تبخیر_تعرق لحظه‌ای گیاه مرجع ($mm.hr^{-1}$)، عدد ۳۶۰۰ تبدیل واحد زمان از ثانیه به ساعت، λ گرمای نهان تبخیر یا گرمای جذب شده برای تبخیر یک کیلوگرم آب ($J.kg^{-1}$) و ρ_w چگالی آب (معادل $1000 kg.m^{-3}$) می‌باشد.

۴.۲. داده‌های ورودی مدل بیلان آب سلول-پایه و آماده‌سازی آن‌ها

مدل بیلان آب سلول-پایه از مجموعه‌ای گسترده از داده‌ها استفاده می‌کند که اغلب آن‌ها از منابع سنجش از دور و نهادهای مستقل تأمین می‌گردد. جدول ۳ خلاصه‌ای از داده‌های اصلی مورد نیاز در اجرای مدل بیلان آب سلول-پایه به همراه منابع داده و اطلاعات و خصوصیات وضوح زمانی و مکانی این داده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ورودی‌های داده برای پیاده‌سازی مدل بیلان آب سلول-پایه (لینک دسترسی به داده‌های بر روی نام آنها قرار داده شده است)

شماره	نام متغیر	منبع دسترسی به داده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی	دوره زمانی
۱	تبخیر_تعرق واقعی	اجرای مدل GeeseBAL با تصاویر Landsat	۳۰ متر	۸ روزه	۲۰۲۲-۲۰۲۴
۲	تبخیر_تعرق مرجع	ECMWF/ERA5 بازسازی شده و واسنجی شده با داده‌های ایستگاهی	۲۵۰	روزانه	۲۰۲۲-۲۰۲۴
۳	تبخیر_تعرق پتانسیل	MODIS یا نام MOD16A2.061 و واسنجی شده با داده‌های ایستگاهی	۵۰۰ متر	۸ روزه	۲۰۲۲-۲۰۲۴
۴	پارامترهای هوشناسی (بارش، دما، باد، تابش و رطوبت هوا)	ECMWF/ERA5, GPM (IMERG)	۱۰۰۰ متر	روزانه	۲۰۲۲-۲۰۲۴
۵	کاربری / پوشش اراضی	استفاده از محصولات ESA مربوط به سال ۲۰۲۳	۱۰	سالانه	۲۰۲۲-۲۰۲۴
۷	نقشه خصوصیات هیدرولیکی خاک	HydroSoil (رطوبت مزرعه، رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع خاک)	۲۵۰	یکبار	یکبار
۸	ضریب گیاهی	داده‌های Sentinel2	۱۰	۵ روزه	۲۰۲۲-۲۰۲۴
۹	حداکثر عمق ریشه	تولید از نقشه پوشش اراضی و شاخص گیاهی	۳۰	سالانه	یکبار
۱۰	نقشه رقمی ارتفاع	محصول DEM از SRTM	۳۰	یکبار	یکبار

۵.۲. تصاویر ماهواره‌ای Landsat

در اجرای مدل GeeseBAL و استخراج نقشه‌های تبخیر_تعرق در بازه سال‌های ۲۰۲۳ الی ۲۰۲۴ به صورت همزمان از تصاویر ماهواره لندست ۸ و ۹ (Level 2, Collection 2, Tier 1) استفاده گردید. کلیه تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS از لندست ۸ و ۹ که منطبق با منطقه مورد مطالعه بود (مسیر ۱۵۹ و ردیف ۳۵) برای مزرعه نیشابور و (مسیر ۱۶۴ و ردیف ۳۶) برای مزرعه قم، به لحاظ درصد ابرناکی مناسب تشخیص داده شدند، در فصل رشد گندم فراخوانی گردید. در این مقاله، از محصول Landsat 8 SR با وضوح مناسب مجموعه حاوی محصولات بازتابش سطح زمین استفاده گردید که قبلاً عملیات تصحیح جوی شامل تبدیل تابندگی بالای جو به سطح زمین بر روی این مجموعه اعمال گردیده است و خروجی آن شامل ۵ باند مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) و ۲ باند مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) و یک باند مادون قرمز حرارتی (TIR) است. برای حذف سلول‌های نامعتبر به دلیل حضور ابر و سایه ابر، از باند QA استفاده می‌شود که با داده‌های تصویری ارائه می‌شود.

۶.۲. داده‌های هواشناسی

برای اجرای مدل‌های GeeseBAL و بیلان آب سلول-پایه، از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land در زمان عبور ماهواره بر فراز منطقه و میانگین ۲۴ ساعته، استفاده گردید. داده‌های ERA5-Land یک محصول جهانی تلفیقی از داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های مبتنی بر ایستگاه‌های زمینی است که پارامترهای هواشناسی را در سطوح جو و لایه سطحی زمین با وضوح بالا ارائه می‌کند. توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های هوا (ECMWF) تولید شده و نسل پنجم داده‌های بازتحلیل داده‌های ERA5-Land است که مشاهدات گذشته را با مدل‌هایی برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته ترکیب می‌کند. ERA5-Land داده‌های شبکه‌ای از پارامترهای هواشناسی با وضوح فضایی ۱۰ کیلومتر در سطح جهانی (۰/۱ در ۰/۱ درجه) ارائه می‌کند، که برای کاربردهای زمینی مانند هیدرولوژی، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی ایده‌آل است. محدوده زمانی از سال ۱۹۸۱ تاکنون و وضوح زمانی داده‌ها، ساعتی است که بر تعاملات سطح زمین با جو

متمركز است. داده‌های هواشناسی متناظر با ساعت برداشت (۱۰:۰۰ تا ۱۰:۳۰ صبح به وقت محلی) ماهواره‌های لندست با میانگین‌گیری از خروجی‌های داده‌های ساعتی و داده‌های روزانه مورد نیاز از میانگین‌گیری داده‌های ساعتی ERA5-Land در طول یک شبانه روز استخراج گردید. تمامی متغیرهای هواشناسی مورد نیاز از داده‌های ERA5-Land با استفاده از روش Bicubic Interpolation به ابعاد ۰/۰۶۲۵ درجه (۱ کیلومتر) بازسازی گردید. داده‌های ERA5 به فرمت netCDF دریافت و سپس مراحل پردازش شامل تبدیل واحدهای دمای هوا، فشار و رطوبت نسبی و محاسبه متغیرهای هواشناسی در گام زمانی ساعتی و روزانه مورد نیاز انجام شده‌اند. برای کنترل کیفی داده‌های ERA5، با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی زمینی مقایسه شد و عملیات واسنجی بر روی داده‌های ERA5 صورت پذیرفت.

۷.۲. جمع آوری داده‌های مزرعه‌ای

داده‌های مشاهده‌ای جمع‌آوری شده از دو سایت مزرعه قم و نیشابور مورد استفاده در ارزیابی خروجی‌های مدل بیلان آب سلول-پایه، شامل بافت خاک، زمان آبیاری، روش آبیاری، نوع محصول، زمان کاشت و زمان برداشت در جدول ۴ ارائه شده است. در مزرعه قم به مساحت ۱۸۷/۳ هکتار، باغ پسته، استخر پرورش ماهی و چندین مزارع زراعی وجود دارد و مشخصات توصیفی هر قسمت در جدول ۵ آورده شده است. مزرعه نیشابور تحت کشت گندم رقم پیشگام بود. این مزرعه با مساحت کل ۱۲/۶ هکتار با ابعاد ۴۲۰ متر طول و ۳۰۰ متر عرض دارد که به ۱۲ قطعه با مساحت هر قطعه ۱۰۵۰۰ مترمربع تقسیم‌بندی شد. اطلاعات آبیاری اعلام شده از سوی زارع، مزرعه نیشابور با تقویم آبیاری از ۱۰ آبان ۱۴۰۲ لغایت ۷ خرداد ۱۴۰۳ در جدول ۴ آورده شده است. آبیاری در این مزرعه قطره‌ای بوده با فاصله ردیف تیپ‌ها ۶۰ سانتی‌متر و طول تیپ ۷۰ متر که عمق آب آبیاری حدود ۸۰ سانتی‌متر است. اطلاعات و تقویم آبیاری از ۱۰ آبان ۱۴۰۲ لغایت ۷ خرداد ۱۴۰۳ برای قطعات به شرح جدول ۴ می‌باشد. تاریخ کشت گندم ده آبان ۱۴۰۲ و طول مراحل چهارگانه رشد (آغازین، توسعه، میانی و پایانی رشد) به ترتیب برابر با ۶۰، ۷۵، ۷۵ و ۲۵ روز می‌باشد. حداکثر ارتفاع یک متر و عمق ریشه بین ۱/۵ تا ۱/۸ متر می‌باشد (FAO56, 1998). خاک مزرعه مورد مطالعه با توجه به درصد شن، سیلت و رس در بافت خاک (رس: ۳۶، شن: ۲۵، سیلت: ۳۹ درصد) از نوع خاک لومی می‌باشد. مقدار رطوبت زراعی و رطوبت پژمردگی دائم با استناد به جداول فائو ۵۶ به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۰۷ درصد برآورده گردیده است.

جدول ۵. داده‌ها و اطلاعات حجم آبیاری و تقویم آبیاری از بازه ی زمانی ۱۰ آبان ۱۴۰۲ تا ۷ خرداد ۱۴۰۳ برای هر یک از قطعات در مزارع گندم

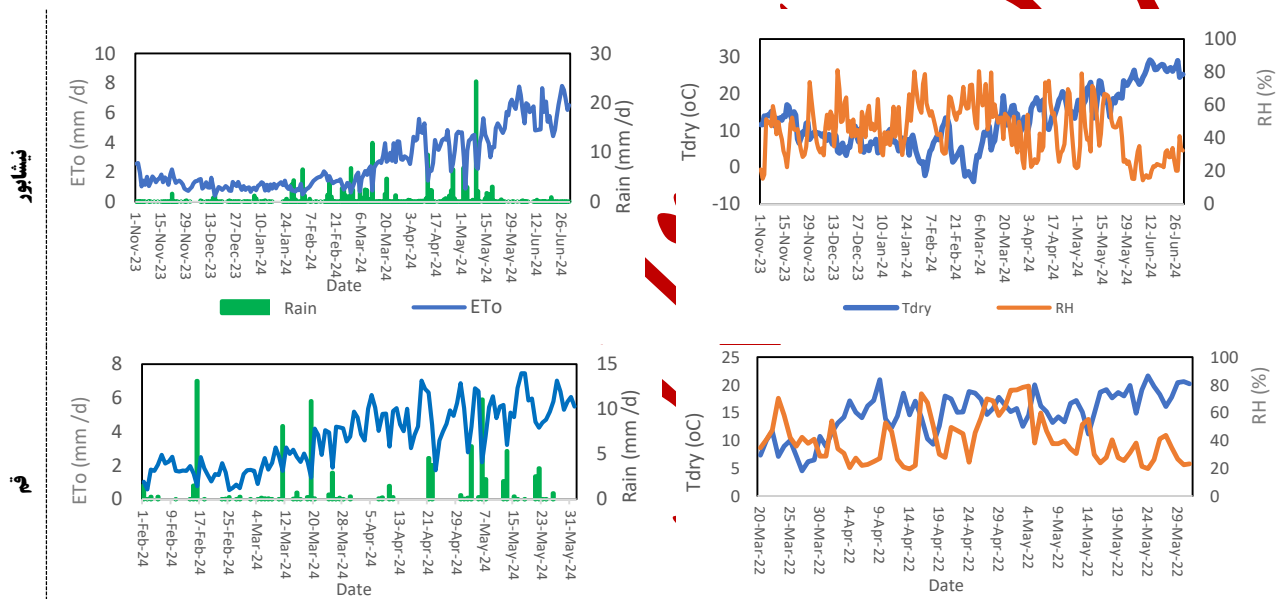
سایت	محصول	تاریخ کشت	قطعه	آبیاری	روش آبیاری	مقدار آبیاری متر مکعب	مدت آبیاری ساعت	تاریخ آبیاری
نیشابور	گندم	۱۰ آبان	B1-B12	آبیاری اول	قطره ای	۸۶۴	۶	۱۰ الی ۱۵ آبان ۱۴۰۲
				آبیاری دوم		۴۳۲	۳	۲۵ الی ۳۰ آبان ۱۴۰۲
				آبیاری سوم		۲۸۸	۲	۱۰ الی ۱۵ آذر ۱۴۰۲
				آبیاری چهارم		۵۷۶	۵	۲۰ الی ۲۵ دی ۱۴۰۲
				آبیاری پنجم		۵۷۶	۴	۲۰ الی ۲۵ بهمن ۱۴۰۲
				آبیاری ششم		۴۳۲	۱۴	۱۹ اسفند ۱۴۰۲
				آبیاری هفتم		۴۳۲	۶	۱۱ فروردین ۱۴۰۳
				آبیاری هشتم		۴۳۲	۳	۶ اردیبهشت ۱۴۰۳
				آبیاری نهم		۵۷۶	۴	۱۵ الی ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۳
				آبیاری دهم		۵۷۶	۴	۲۰ الی ۲۵ خرداد ۱۴۰۳
قم	گندم	یک آبان	B14	آبیاری اول	غرقایی	۶۰۰	۶	۲۶ اسفند ۱۴۰۲ الی ۱ فروردین ۱۴۰۳
				آبیاری دوم		۶۰۰	۶	۲۰ الی ۲۶ فروردین ۱۴۰۳
				آبیاری سوم		۶۰۰	۶	۵ الی ۹ اردیبهشت ۱۴۰۳
				آبیاری چهارم		۶۰۰	۶	۱۶ الی ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۳
				آبیاری پنجم		۶۰۰	۶	۲۹ اردیبهشت الی ۲ خرداد ۱۴۰۳
				آبیاری ششم		۶۰۰	۶	۱۰ الی ۱۴ خرداد ۱۴۰۳
				آبیاری هفتم		۶۰۰	۶	۱۰ الی ۱۴ خرداد ۱۴۰۳
				آبیاری هشتم		۶۰۰	۶	۱۰ الی ۱۴ خرداد ۱۴۰۳

۸.۲. داده و اطلاعات خاکشناسی

در این مطالعه، نقشه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از پایگاه داده HiHydroSoil (Boer, 2015) برای استخراج ظرفیت نگهداری آب در خاک (شکل ۳) دریافت گردید که اطلاعات مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را به ترتیب با وضوح فضایی ۲۵۰ متر ارائه می‌کند.

۹.۲. بررسی تغییرات زمانی پارامترهای هواشناسی

در تغییرات زمانی بارندگی و تبخیر_تعرق مرجع، در طول دوره رشد از کاشت تا برداشت گندم در دو سایت قم و نیشابور نشان داده شده است که تبخیر_تعرق دارای نوسان و روند افزایشی است. این روند در انتهای فصل رشد شیب بیشتری دارد. نمودار تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا برای دو سایت‌های قم و نیشابور در شکل ۴ آورده شده است. به طور کلی، رابطه بین دما و رطوبت نسبی نشان می‌دهد که با افزایش دما، حتی با مقدار ثابت بخار آب، رطوبت نسبی کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که در دماهای پایین‌تر، رطوبت نسبی ممکن است افزایش یابد. تبخیر_تعرق مرجع در فصل رشد در سایت‌های نیشابور و قم به ترتیب برابر با ۵۳۸ و ۴۱۵ میلی‌متر است و میزان بارش در این دو سایت مشابه و در بازه ۱۵۵ الی ۱۵۸ میلی‌متر متغیر می‌باشد. دمای هوا در سایت نیشابور از ۵- الی ۳۰ درجه سلسیوس و در سایت قم از ۴ تا ۲۲ درجه سلسیوس متغیر است. رطوبت نسبی برای هر دو سایت نیشابور و قم به ترتیب از ۱۴ الی ۸۱ و از ۲۰ تا ۸۰ متغیر است.

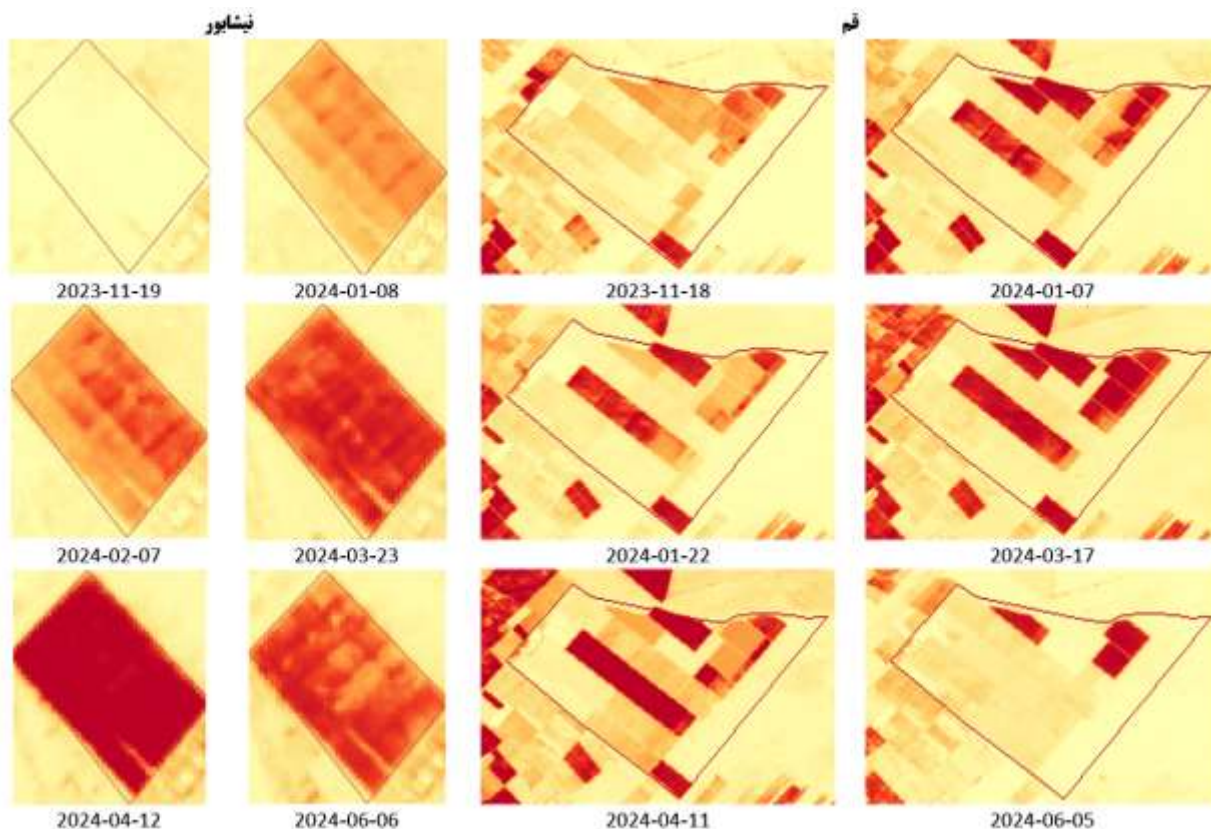


شکل ۴. تغییرات زمانی بارندگی، دمای هوا، تبخیر_تعرق مرجع و رطوبت نسبی در طول دوره رشد از کاشت تا برداشت گندم در دو سایت قم و نیشابور

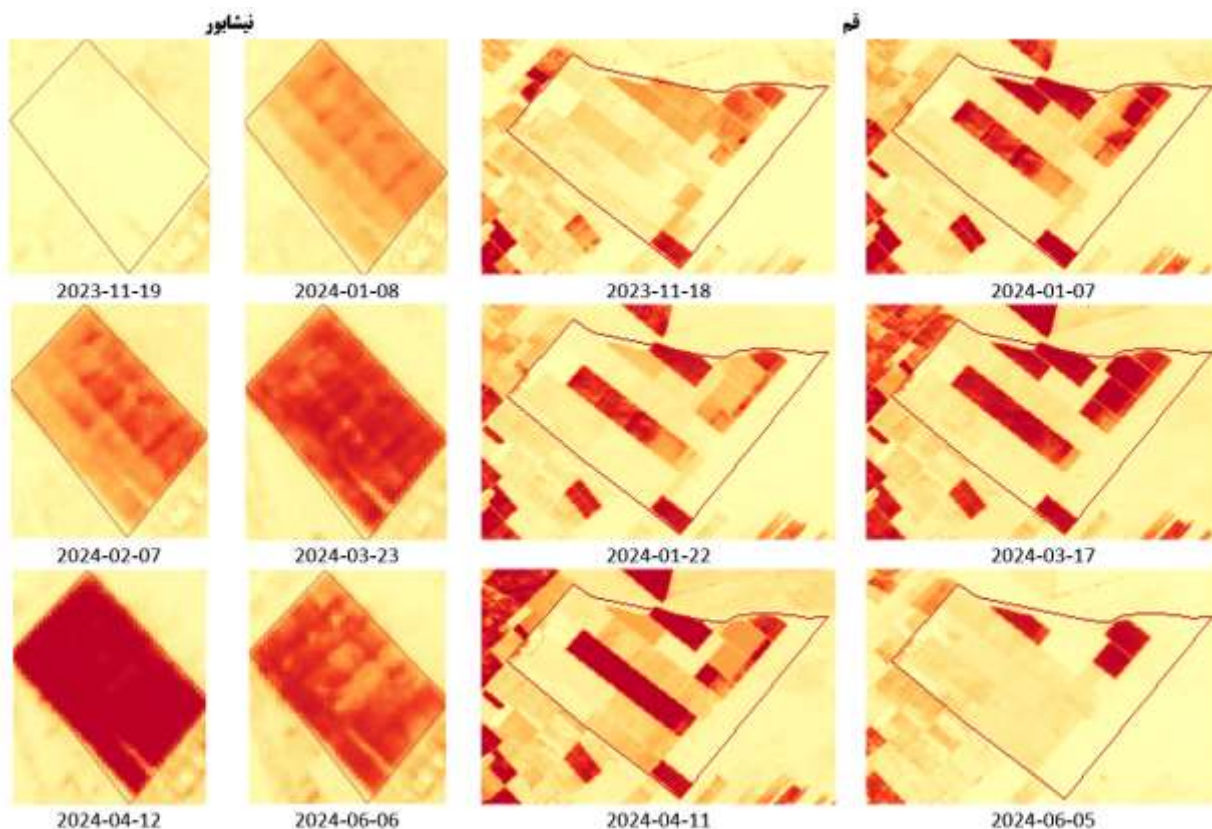
۳. نتایج

۱.۳. بررسی روند تغییرات مکانی - زمانی شاخص و ضریب گیاهی NDVI

مستند

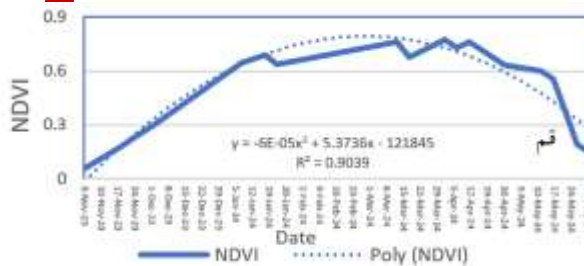
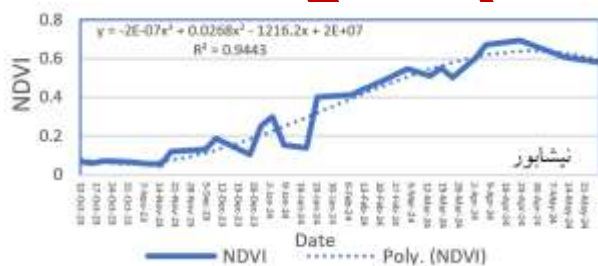


شکل ۵، تغییرات مکانی NDVI در طول دوره رشد از کاشت تا برداشت محصول گندم در سایت‌های نیشابور و قم را نشان می‌دهد. رنگ تصاویر، مقادیر مختلف NDVI از (زرد کم‌رنگ) کمترین مقدار NDVI تا (قرمز تیره) بیشترین مقدار NDVI تغییر می‌کند. مقادیر بالاتر NDVI معمولاً نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم‌تر و انبوه‌تر است. به طور کلی، تصویر نشان می‌دهد که NDVI در طول فصل رشد افزایش یافته است که نشان‌دهنده توسعه و رشد پوشش گیاهی است. این روند با افزایش تدریجی رنگ‌های زرد به سمت قرمز در تصاویر قابل مشاهده است. در تصاویر NDVI مربوط به سایت نیشابور، می‌توان یک‌نواختی نسبی در توزیع NDVI را مشاهده کرد که نشان‌دهنده یک‌نواختی پوشش گیاهی در ابتدای دوره رشد است که با رشد محصول تفاوت‌ها آشکارتر می‌شود. برخی قطعات دارای مقادیر NDVI بالاتر هستند که نشان‌دهنده رشد بهتر گیاه آن قطعه است. بر اساس مقادیر NDVI، گندم در سایت نیشابور در تاریخ ۱۰ آبان معادل یک نوامبر کشت شده است و روند کامل شدن پوشش گیاهی زمین از قطعه ۱ شروع و با یک تأخیر زمانی تا قطعه ۱۲ کامل شده است و تاریخ برداشت محصول از روز ششم تا دهم ماه ژوئن ۲۰۲۴ معادل ۱۷ الی ۲۱ خرداد ۱۴۰۳ می‌باشد. در قطعه ۱۴ سایت مزرعه قم، گندم در تاریخ ۱۷ آذر ۱۴۰۲ (هشتم دسامبر ۲۰۲۳) کشت شده است و روند تکمیل پوشش گیاهی ادامه داشته است و در نهایت محصول در بازه زمانی ۱۲ لغایت ۱۶ خرداد ۱۴۰۳ (اول تا پنجم ماه ژوئن ۲۰۲۴) برداشت گردیده است. در ابتدای رشد قسمت‌های بالایی مزرعه رشد بهتری دارند که می‌تواند مرتبط با آبیاری باشد و همچنین نشان‌دهنده این است که کشت از شمال به جنوب شروع شده و در نتیجه قسمت‌های شمالی رشد سریع‌تری داشته‌اند.

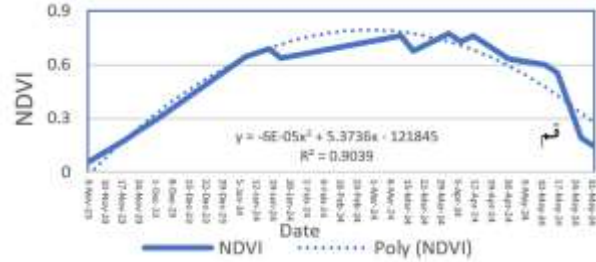
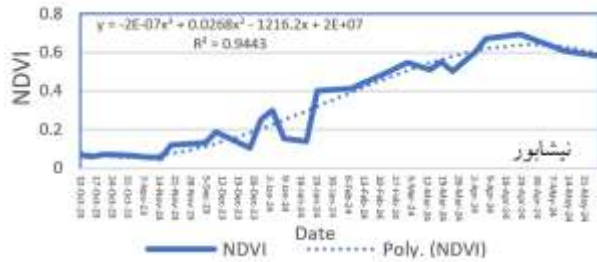


شکل ۵. تغییرات مکانی شاخص گیاهی NDVI از تصاویر سنتینل ۲ در طول دوره رشد از کاشت تا برداشت گندم (تاریخ هر تصویر به میلادی در زیر هر تصویر درج شده است). در سایت نیشابور و قم

نمودارهای



شکل ۶ تغییرات زمانی میانگین مکانی شاخص پوشش گیاهی NDVI در طول دوره رشد گندم در سایت‌های نیشابور و قم را نشان می‌دهند. روند کلی نمودارها نشان‌دهنده افزایش تدریجی NDVI در ابتدای دوره رشد و سپس کاهش تدریجی آن تا پایان دوره است. این روند با رشد و توسعه گیاه گندم و در نهایت رسیدن به مرحله بلوغ و برداشت مطابقت دارد. افزایش سریع NDVI در ابتدای دوره رشد نشان‌دهنده جوانه‌زنی سریع، رشد رویشی گیاه گندم و افزایش پوشش گیاهی است. ثبات نسبی NDVI در اواسط دوره رشد نشان‌دهنده رشد پایدار گندم و توسعه کامل پوشش گیاهی است. کاهش تدریجی NDVI در پایان دوره رشد نشان‌دهنده بلوغ گیاه گندم و شروع مرحله رسیدگی و فرایند خشک شدن و ریزش برگ‌ها است. در مزرعه نیشابور، بیشترین مقدار NDVI ۰/۶۹۳ در اواسط خرداد ماه (ژوئن) ۱۴۰۲ و کمترین مقدار NDVI حدود ۰/۰۴۹ در اواخر مهر ماه ۱۴۰۱ (اکتبر ۲۰۲۴) رخ داده است در حالی که در سایت قم بیشترین مقدار NDVI در اواسط فروردین ۱۴۰۳ (آوریل ۲۰۲۴) حدود ۰/۷ و کمترین مقدار NDVI حدود در اواسط ژولای ۲۰۲۴ معادل اواخر تیر ۱۴۰۳ رخ داده است.



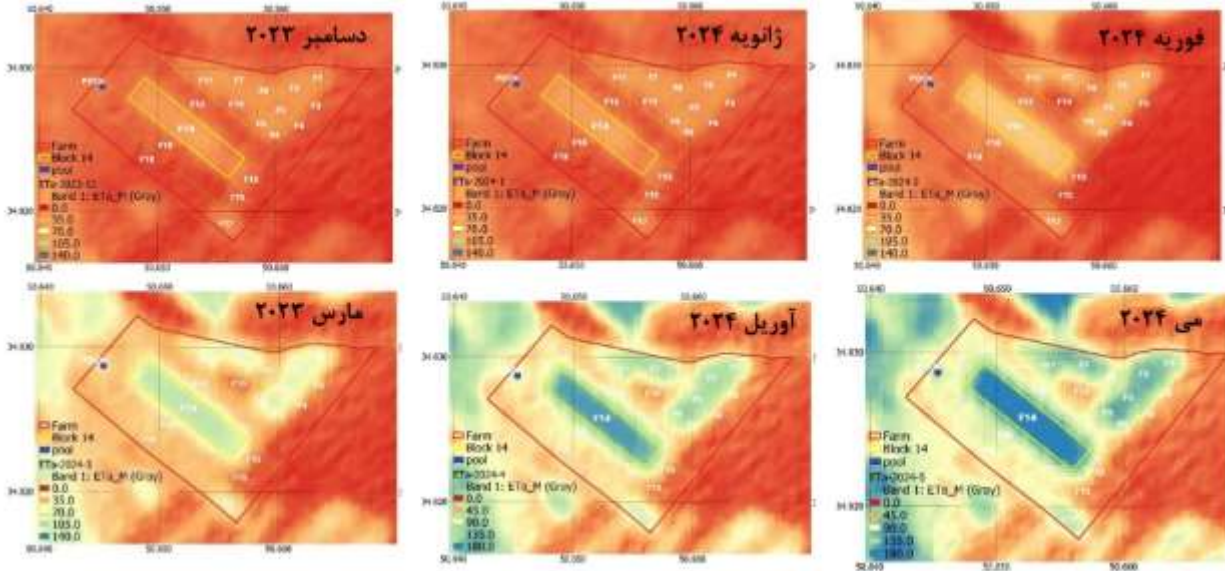
شکل ۶. نمودار تغییرات میانگین مکانی شاخص گیاهی NDVI (میانگین مکانی بر روی مزرعه) با استفاده از معادله polynomial درجه ۳ در طول دوره رشد از کاشت تا برداشت گندم در سایت‌های نیشابور و قم

در نیشابور در تاریخ‌های ۶ آبان ۱۴۰۲ (۲۸ اکتبر ۲۰۲۳) و ۳۱ خرداد ۱۴۰۳ (۲۰ ژوئن ۲۰۲۴) بیشترین مقادیر خاک بدون پوشش دیده می‌شود که تاریخ اول قبل از کشت و تاریخ دوم بعد از برداشت می‌باشد. بیشترین درصد پوشش گیاهی متراکم در تاریخ ۲۲ اسفند ۱۴۰۲ (۱۲ مارس ۲۰۲۴) است. همچنین در مزرعه قم مشاهده می‌شود که در تاریخ ۱۸ آبان ۱۴۰۲ (۹ نوامبر ۲۰۲۳) و ۶ تیر ۱۴۰۳ (۲۶ ژوئن ۲۰۲۴) بیشترین مقادیر خاک بدون پوشش دیده می‌شود که تاریخ اول قبل از کشت و تاریخ دوم بعد از برداشت می‌باشد. در تاریخ ۳ اردیبهشت ۱۴۰۳ معادل ۲۱ آوریل ۲۰۲۴ تقریباً ۷۶ درصد مزرعه دارای پوشش گیاهی متراکم است.

۲.۳. بررسی آب مصرفی (تبخیر-تعرق واقعی) با استفاده از مدل ییلان انرژی GeeseBAL

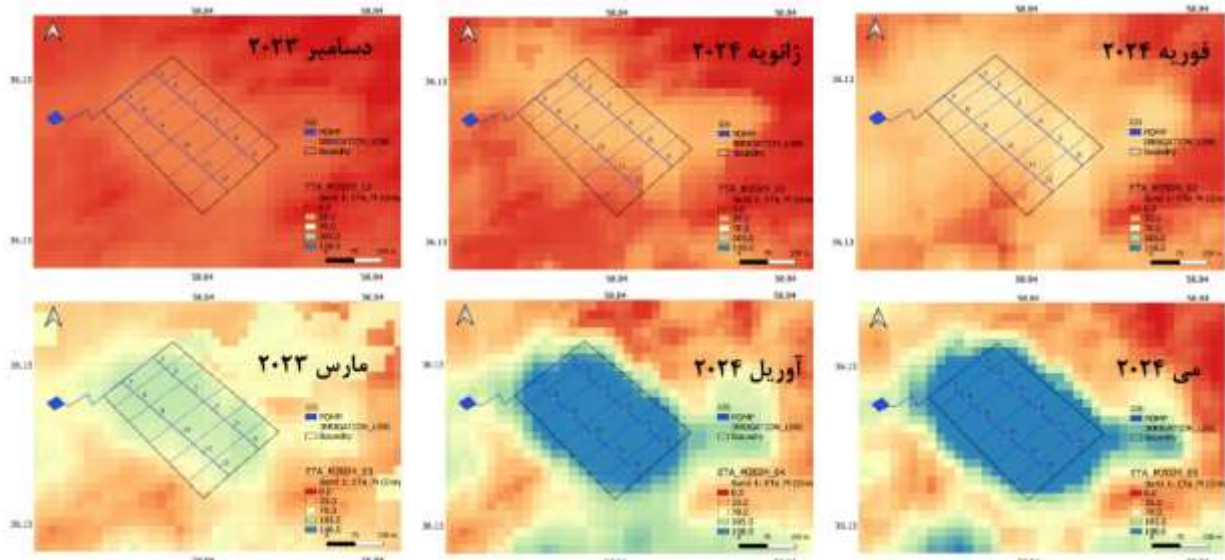
شکل ۶، تغییرات مکانی تبخیر-تعرق واقعی (ETA) را در طول دوره رشد گندم با گام زمانی ماهانه در سایت نیشابور نشان می‌دهد. از رنگ‌های گرم (قرمز، نارنجی) برای نشان دادن مناطق با ETA پایین و رنگ‌های سرد (آبی، سبز) برای نشان دادن مناطق با ETA بالا استفاده شده است. تصاویر نشان‌دهنده افزایش تدریجی ETA در ابتدای دوره رشد و سپس کاهش تدریجی آن در اواخر دوره است. این روند با رشد و توسعه گیاه گندم و افزایش نیاز آبی آن‌ها در مراحل اولیه رشد و کاهش نیاز آبی پس از رسیدن به بلوغ مطابقت دارد. دامنه تغییرات تبخیر-تعرق ماهانه از کمتر از ۵۰ میلی‌متر در ماه در اوایل رشد تا بیش از ۱۸۰ میلی‌متر در ماه در بیک رشد محصول متغیر است. نقشه میزان تبخیر-تعرق واقعی ماهانه در دوره کاشت گندم در سایت نیشابور و قم در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که ETA بین مقادیر مشابه ۰ تا ۱۴۰ میلی‌متر متغیر است. مناطق با رنگ قرمز نشان‌دهنده تبخیر-تعرق کمتر (نزدیک به ۰) و رنگ آبی نشان‌دهنده تبخیر-تعرق بیشتر (نزدیک به ۱۴۰ میلی‌متر) هستند. بر اساس تحقیقات منتشر شده در نشریه شماره ۱۷۲ معاونت تولیدی، فنی و زیربنایی وزارت نیرو ویرایش شده در سال ۱۴۰۲، با عنوان "راهنمای روش‌های برآورد تبخیر در شرایط اقلیمی مختلف"، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده ماهانه سال ۱۳۹۵، بین ۰ تا ۱۳۰ و مقادیر سالانه آن بین ۰ تا ۷۰۰

میلی‌متر برای سال آبی ۹۵-۹۶ محاسبه شده است (وزارت نیرو، ۱۴۰۲). در شکل

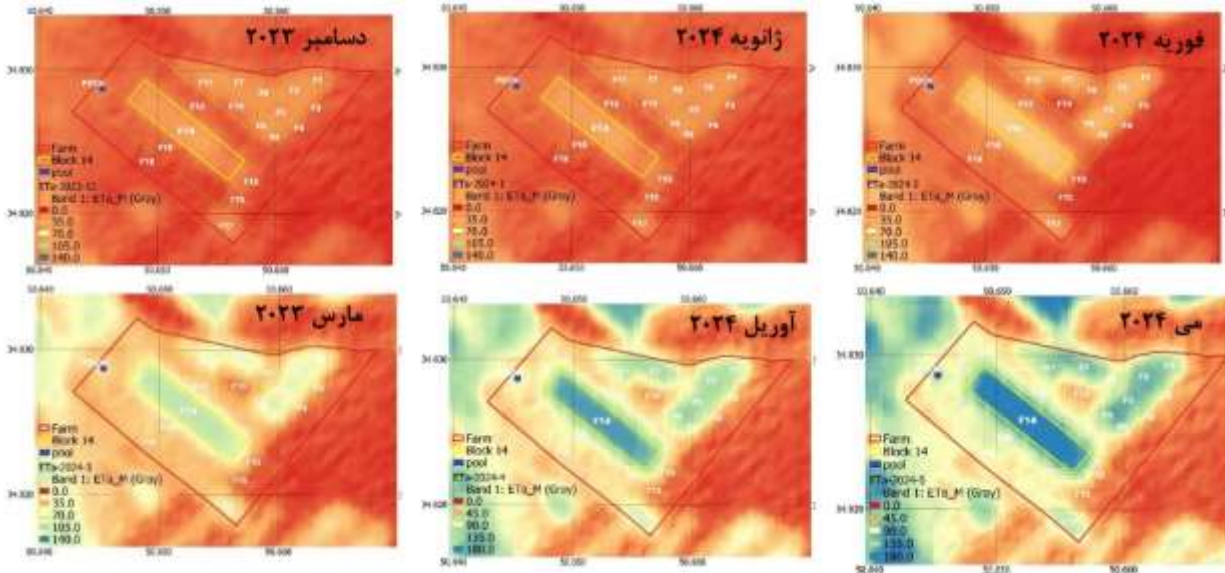


شکل ۸ تغییرات مکانی تبخیر_تعرق واقعی در کل فصل رشد از کاشت تا برداشت محصول قابل مشاهده است. واحدها بر حسب میلی‌متر است و پس از صرب در عدد ۱۰ به مترمکعب در هکتار تبدیل می‌شود. نقشه میزان تبخیر_تعرق واقعی در دوره کشت در سایت گندم نیشابور نشان می‌دهد که ETa بین ۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر متغیر است. مناطق با رنگ قرمز نشان‌دهنده تبخیر_تعرق کمتر (نزدیک به ۵۰) و مناطق با رنگ آبی، تبخیر_تعرق بیشتر (نزدیک به ۷۰۰ میلی‌متر) هستند. مقادیر تبخیر_تعرق واقعی در دوره کشت گندم در سایت قم تا بیش از ۵۰۰ میلی‌متر متغیر است. مناطق با رنگ قرمز، تبخیر_تعرق کمتر (نزدیک به ۴) و مناطق با رنگ آبی نشان‌دهنده تبخیر_تعرق بیشتر (نزدیک به ۵۰۰ میلی‌متر) هستند. بررسی سایر پژوهش‌های مشابه با این تحقیق همسو می‌باشد. به عنوان مثال، بر اساس تحقیقات یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) مقادیر تبخیر_تعرق واقعی در دوره کشت گندم در سال ۲۰۰۸-۲۰۰۹ از ۱۹۰ تا بیش از ۵۰۶ میلی‌متر متغیر می‌باشد. همچنین، بر اساس پژوهشی مشابه، میان‌آبادی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی و ارزیابی الگوریتم SEBAL با هدف تخمین تبخیر_تعرق واقعی در حوضه نیشابور، مقدار کل تبخیر_تعرق واقعی گندم در نیشابور تا ۸۰۰ میلی‌متر محاسبه نمودند.

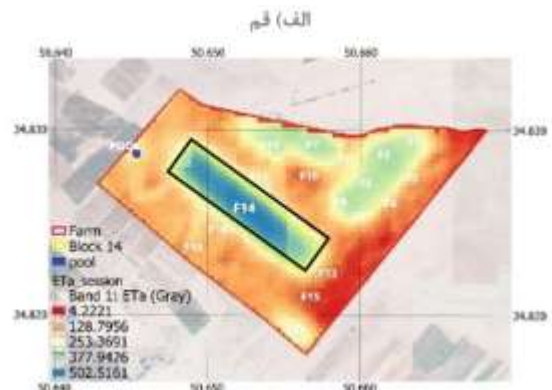
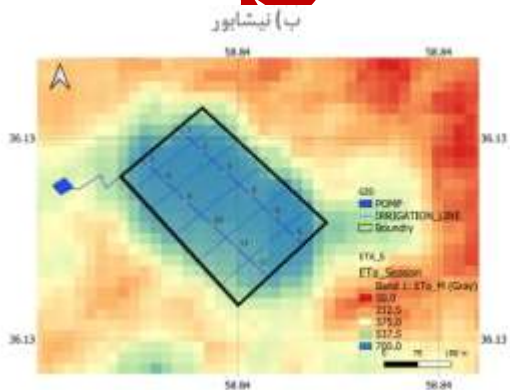
مستند



شکل ۶. تغییرات مکانی تبخیر-تعرق واقعی با گام زمانی ماهانه از آذر ۱۴۰۲ (دسامبر ۲۰۲۳) تا خرداد ۱۴۰۳ (می ۲۰۲۴) در مزرعه نیشابور



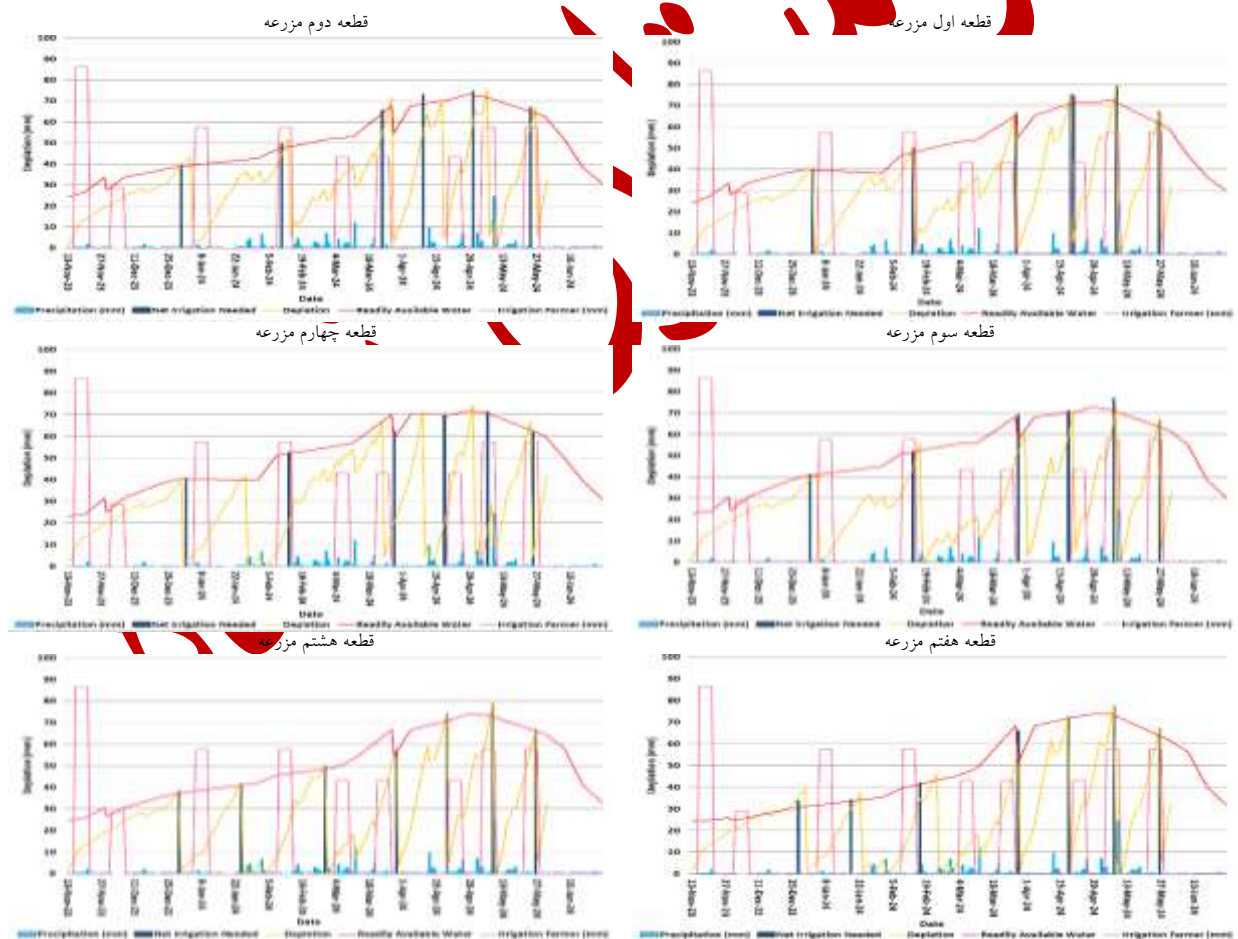
شکل ۷. تغییرات مکانی تبخیر-تعرق واقعی با گام زمانی ماهانه از آذر ۱۴۰۲ (دسامبر ۲۰۲۳) تا خرداد ۱۴۰۳ (می ۲۰۲۴) در مزرعه قم



شکل ۸. تغییرات مکانی تبخیر-تعرق واقعی در کل فصل رشد (مهر ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳) در مزارع سایت (الف) قم و (ب) نیشابور

۳,۳. برآورد آب آبیاری مورد نیاز با استفاده از مدل بیلان آب سلول پایه

در مدل بیلان آب سلول پایه، اجزای بیلان آب شامل بارندگی، تبخیر-تعرق واقعی، نیاز خالص آبیاری، تخلیه رطوبتی خاک (جدول ۱ رابطه ۱) هستند و از صعود مویگی و رواناب سطحی صرف نظر شده است. با اجرای مدل برای هر یک از پیکسل‌ها، خروجی‌ها شامل تخلیه رطوبتی و مقدار آب آبیاری مورد نیاز برای هر یک از سلول‌های شبکه به صورت سری زمانی قابل نمایش است. نمودار تغییرات تخلیه رطوبتی در قطعات گندم در دو سایت قم و نیشابور به همراه نمودارهای بارش و تقویم آبیاری پیش‌بینی شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود. خط زرد رنگ نمایانگر تغییرات تخلیه رطوبت خاک در طول زمان است. تقویم آبیاری با میله‌های آبی پررنگ نشان داده شده است و میله‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده تقویم آبیاری است که توسط کشاورز انجام شده است. خط قرمز رنگ میزان رطوبت قابل استفاده برای گیاه در خاک را نشان می‌دهد. بر اساس نمودارها، بارندگی در اکثر موارد کمتر از نیاز خالص آبیاری است و نشان‌دهنده این است که بارش‌ها به تنهایی قادر به تأمین نیاز آبی گیاه نیستند و نیاز به آبیاری توسط کشاورز وجود دارد. با کاهش رطوبت خاک، به خصوص زمانی که خط زرد به نزدیکی خط قرمز رطوبت قابل استفاده می‌رسد، کشاورز اقدام به آبیاری می‌کند. این نشان می‌دهد که آبیاری در نقاط زمانی انجام شده که گیاه به میزان بالایی از رطوبت خاک استفاده کرده و نیاز به آبیاری دارد. این امر نشان می‌دهد که آبیاری موثر بوده و توانسته است نیاز آبی گیاه را تأمین کند. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان آبیاری کشاورز عمدتاً

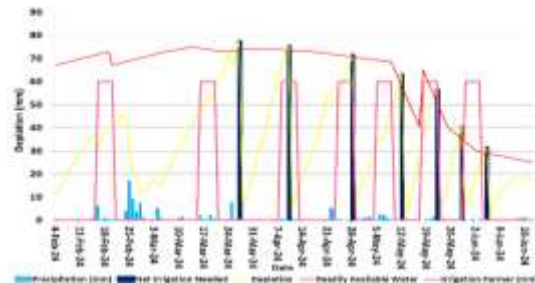


شکل ۷. نمودارهای سری زمانی تخلیه رطوبتی (خط زرد)، رطوبت قابل دسترس (قرمز)، بارش (آبی)، تقویم آبیاری پیش‌بینی شده (سورمه‌ای) و تقویم آبیاری کشاورز (صورتی) در کل فصل رشد از مهر ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳ در قطعات ۱ الی ۸ مزرعه گندم سایت نیشابور

زمانی انجام می‌شود که رطوبت قابل استفاده کاهش یافته و گیاه به آستانه استرس آبی نزدیک می‌شود.

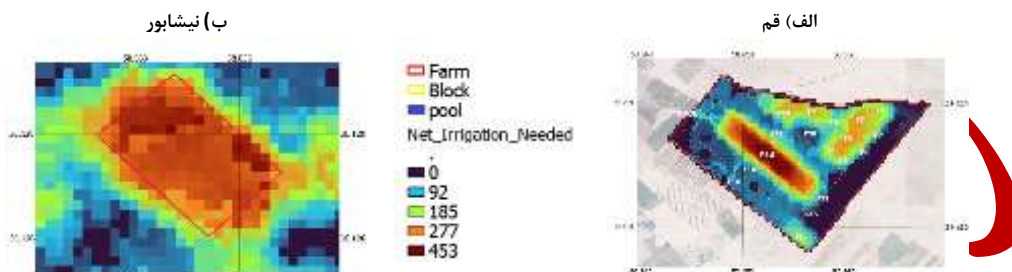
با نگاه دقیق تر به نمودار تخلیه رطوبتی در قطعه ۱۴ مزرعه قم که به کشت گندم اختصاص یافته است می توان مشاهده کرد که بیشترین میزان بارش ۱۶/۸ میلی‌متر در تاریخ ۲۵ ماه فوریه سال ۲۰۲۴ (۶ اسفند ۱۴۰۲) و آبیاری در طی روزهای ۱۸ فوریه، ۲۰ مارس، ۱۲ آوریل، ۲۸ آوریل، ۹ می، ۱۸ می، ۲۲ ماه می و ۲ ژوئن ۲۰۲۴ به ترتیب، معادل روزهای ۲۹ بهمن ۱۴۰۲، ۱ فروردین ۱۴۰۳، ۲۴ فروردین، ۹ اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت، ۲۹ اردیبهشت، ۲ خرداد و ۱۳ خرداد ۱۴۰۳ رخ داده است. رطوبت سهل الوصول از روز اول با روند افزایشی در برخی موارد شیب ملایم و یا شیب تند تا بیشترین مقادیر آن در تاریخ ۱۲ آوریل ۲۰۲۴ معادل ۲۴ فروردین ۱۴۰۳ (۸۰/۵۸ میلی‌متر) متغیر است. سپس با شیب تند از مقدار آن تا ۵۱/۲۷ در انتهای فصل رشد کاهش یافته است. از تاریخ ۱۶ فوریه ۲۰۲۴ (۲۷ بهمن ۱۴۰۲) تا ۱۹ مارس ۲۰۲۴ (۲۹ اسفند ۱۴۰۲) بارش مشاهده شده و در تاریخ ۱۸ فوریه ۲۰۲۴ (۲۹ بهمن ۱۴۰۲) به مقدار ۶۰ میلی‌متر آبیاری صورت گرفته درحالی‌که به علت بارش‌ها نیازی به آبیاری نبوده است. بجز این مورد در اکثر موارد آبیاری‌ها حدوداً با زمان نیاز به آبیاری تقریباً نزدیک می‌باشد اما مقادیر حجم آبیاری مورد نیاز متفاوت می‌باشد. از آنجا که حجم آبیاری ۶۰ میلی‌متر ثابت نیاز بوده بجز ۲۰ مارس (۱ فروردین ۱۴۰۳) که ۷۰/۱۱ میلی‌متر نیاز گیاه بوده، در اکثر موارد آبیاری‌ها بیشتر از مقادیر مورد نیاز به آبیاری می‌باشد. تخلیه رطوبتی (خط زرد) در ابتدا مقادیر صفر داشته با طی زمان که مقدار رطوبت خاک آن افزوده شده و مجدد از زمان‌هایی است که آبیاری صورت گرفته، مقادیر آن کاسته شده و صفر شده است. با گذشت زمان از تاریخ آبیاری مجدد بر مقدار آن افزوده می‌شود و این روند ادامه دارد. بیشترین مقدار تخلیه رطوبتی در تاریخ ۱۱ آوریل ۲۰۲۴ (۲۳ فروردین ۱۴۰۳) معادل ۷۶/۹۳ میلی‌متر است.

نمودارهای سری‌های زمانی تخلیه رطوبتی مربوط به قطعات ۱ الی ۸ مزرعه نیشابور را نشان می‌دهد. بیشترین میزان بارش ۱۲ و ۲۴ میلی‌متر در تاریخ‌های ۱۲ مارس و ۹ ماه می سال ۲۰۲۴ (۲۲ اسفند ۱۴۰۲ و ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۳) رخ داده و آبیاری در طی روزهای ۱ و ۱۶ نوامبر، ۱ دسامبر، ۵ ژانویه، ۹ فوریه، ۴ و ۲۱ مارس، ۲۰ آوریل و ۴ و ۲۲ می به ترتیب، معادل روزهای ۱۰ و ۲۵ آبان، ۱۰ آذر، ۱۵ دی، ۲۰ بهمن، ۱۴ اسفند سال ۱۴۰۲ و ۶ فرودین، ۱ و ۱۵ اردیبهشت و ۲ خرداد ۱۴۰۳ صورت گرفته است. رطوبت سهل الوصول از روز اول با روند افزایشی در برخی موارد شیب ملایم و یا شیب تند تا بیشترین مقادیر آن در تاریخ ۶ می ۲۰۲۴ معادل ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳ (۷۲/۶۸ میلی‌متر) متغیر است. پس از ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳ با شیب تند از مقدار آن تا ۲۹/۹۳ در انتهای فصل رشد کاهش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود علی‌رغم وقوع بارش، از تاریخ ۲۲ فوریه ۲۰۲۴ (۳ اسفند ۱۴۰۲) تا ۲۴ مارس ۲۰۲۴ (۵ فرودین ۱۴۰۳)، در تاریخ ۲۱ مارس ۲۰۲۴ (۲ فروردین ۱۴۰۳) به مقدار ۴۳/۲ میلی‌متر آبیاری صورت گرفته درحالی‌که به علت بارش‌ها نیازی به آبیاری نبوده است. با تطبیق زمان‌های آبیاری پیش‌بینی شده با آبیاری کشاورز مشاهده می‌شود که در اکثر موارد آبیاری‌ها از نظر زمانی با هم منطبق می‌باشد و کشاورز بر اساس منحنی تخلیه رطوبتی آبیاری کرده است، اما از نظر حجم آبیاری، در اکثر موارد تطابقی دیده نمی‌شود. در ابتدای کشت مقادیر حجم آبیاری کشاورز از مقدار مورد نیاز بیشتر بوده و در انتهای رشد مقادیر آبیاری کمتر از مقدار مورد نیاز گیاه می‌باشد. تخلیه رطوبتی (خط زرد) در ابتدا مقادیر صفر داشته و در طی زمان که به مقدار رطوبت خاک آن افزوده شده است تا زمان‌هایی که مجدد از مقادیر آن کاسته شده و مقدار آن صفر شده که معادل زمان‌هایی است که آبیاری صورت گرفته است. با گذشت زمان از تاریخ آبیاری مجدد بر مقدار آن افزوده می‌شود و این روند ادامه دارد. بیشترین مقدار تخلیه رطوبتی در تاریخ ۸ می ۲۰۲۴ (۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۳) معادل ۷۹/۱۵ میلی‌متر است.



شکل ۸. نمودار سری زمانی تخلیه رطوبتی (خط زرد)، رطوبت قابل دسترس (قرمز)، بارش (آبی)، تقویم آبیاری مدل (سورمه ای) و تقویم آبیاری کشاورز (صورتی) در کل فصل رشد از مهر ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳ در قطعه ۱۴ مزرعه گندم سایت قم

تغییرات مکانی مجموع آب آبیاری خالص حاصل از مدل بیلان آب سلول پایه در کل فصل رشد از مهر ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳ در مزارع سایت نیشابور و قم در **Error! Reference source not found.** نتایج حاکی است که مقادیر مجموع آب مورد نیاز در مزرعه قم و نیشابور در طی دوره فصل رشد از ۲۷۷ تا ۴۵۳ میلی متر در هر قطعه متغیر است.



شکل ۹. تغییرات مکانی آب آبیاری خالص حاصل از مدل بیلان آب سلول پایه در کل فصل رشد از مهر ۱۴۰۲ تا خرداد ۱۴۰۳ در مزارع سایت (الف) قم و نیشابور (ب)

۴.۳. ارزیابی خروجی مدل بیلان آب سلول پایه با داده‌های مشاهداتی

مقایسه مقادیر کل حجم آب آبیاری کشاورز با آب مصرفی در اثر فرایند تبخیر-تعرق حاصل از مدل GESEBAL و نیاز خالص آبیاری حاصل از اجرای مدل بیلان در جدول ۶ آورده شده است. حجم آب آبیاری که توسط کشاورز بکار گرفته شده در همه قطعات مقادیر ثابت بوده ولی مقادیر نیاز خالص آبیاری مورد نیاز که توسط مدل بیلان آب محاسبه گردیده است، از ۳۵۸۲ تا ۴۵۲۴ متر مکعب در هکتار متغیر می‌باشد. به دلیل اینکه بخشی از نیاز آبی توسط بارش تأمین شده است، در همه قطعات، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی از مقادیر آبیاری کشاورز و مدل بیلان آب بالاتر است. بیشترین آب آبیاری مورد نیاز و تبخیر-تعرق واقعی متعلق به قطعه‌های ۵ تا ۸ و کمترین آن مربوط به قطعه ۱ است. بیشترین اختلاف بین حجم کل آبیاری محاسبه شده و آبیاری کشاورز مربوط به قطعه ۴ و کمترین آن مربوط به قطعه یک می‌باشد. این اختلاف در مزرعه قم بیشتر و معادل ۱۲۵۶ متر مکعب در هکتار می‌باشد.

جدول ۶- مقایسه حجم آب آبیاری کشاورز با خروجی مدل بیلان انرژی و مدل بیلان آب سلول پایه بر حسب (mm³/ha) در مزرعه گندم نیشابور و قم

سایت	تاریخ کشت	قطعه	روش آبیاری	تبخیر-تعرق واقعی (مدل GESEBAL)	نیاز آب آبیاری خالص (مدل بیلان آب)	آب آبیاری کشاورز	مقدار اختلاف عددی	درصد اختلاف
نیشابور	۱۰ آبان	B1	قطره ای	۲۲۹۹	۴۵۲۴	۴۷۵۲	۲۲۸	۲۲۹۹
		B2		۲۳۷۸	۳۶۸۸	۴۷۵۲	۱۰۶۴	۲۳۷۸
		B3		۲۲۷۷	۳۷۶۰	۴۷۵۲	۹۹۲	۲۲۷۷
		B4		۲۳۰۴	۳۵۸۲	۴۷۵۲	۱۱۷۸	۲۳۰۴
		B5		۲۴۲۶	۴۱۳۲	۴۷۵۲	۳۲۶	۲۴۲۶
		B6		۲۴۰۸	۴۱۶۶	۴۷۵۲	۵۸۶	۲۴۰۸
		B7		۲۴۱۱	۳۹۱۶	۴۷۵۲	۸۳۶	۲۴۱۱
		B8		۲۴۰۴	۴۰۵۷	۴۷۵۲	۶۹۵	۲۴۰۴
		B9		۲۳۶۸	۳۸۱۷	۴۷۵۲	۹۳۵	۲۳۶۸
		B10		۲۲۹۶	۴۱۸۶	۴۷۵۲	۵۶۶	۲۲۹۶
		B11		۲۴۶۲	۳۷۹۶	۴۷۵۲	۹۵۶	۲۴۶۲
		B12		۲۳۸۹	۳۷۸۷	۴۷۵۲	۹۶۵	۲۳۸۹
		قم		یک آبان	B14	غربایی	۶۱۳۵	۲۹۴۴

به منظور اعتبار سنجی و مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآورد شده از معیار درصد خطای مطلق استفاده شد. (واکرلی و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج ارزیابی آماری در جدول ۷ نشان می‌دهد که برای بلوک‌های (۱ تا ۱۲) نیشابور، تعداد آبیاری کشاورز در همه قطعات همواره ۹ بوده است، در حالی که تعداد پیش‌بینی شده بین ۶ و ۷ متغیر بوده است. در بلوک ۱۴ قم تعداد آبیاری کشاورز ۷ و تعداد پیش‌بینی شده ۷

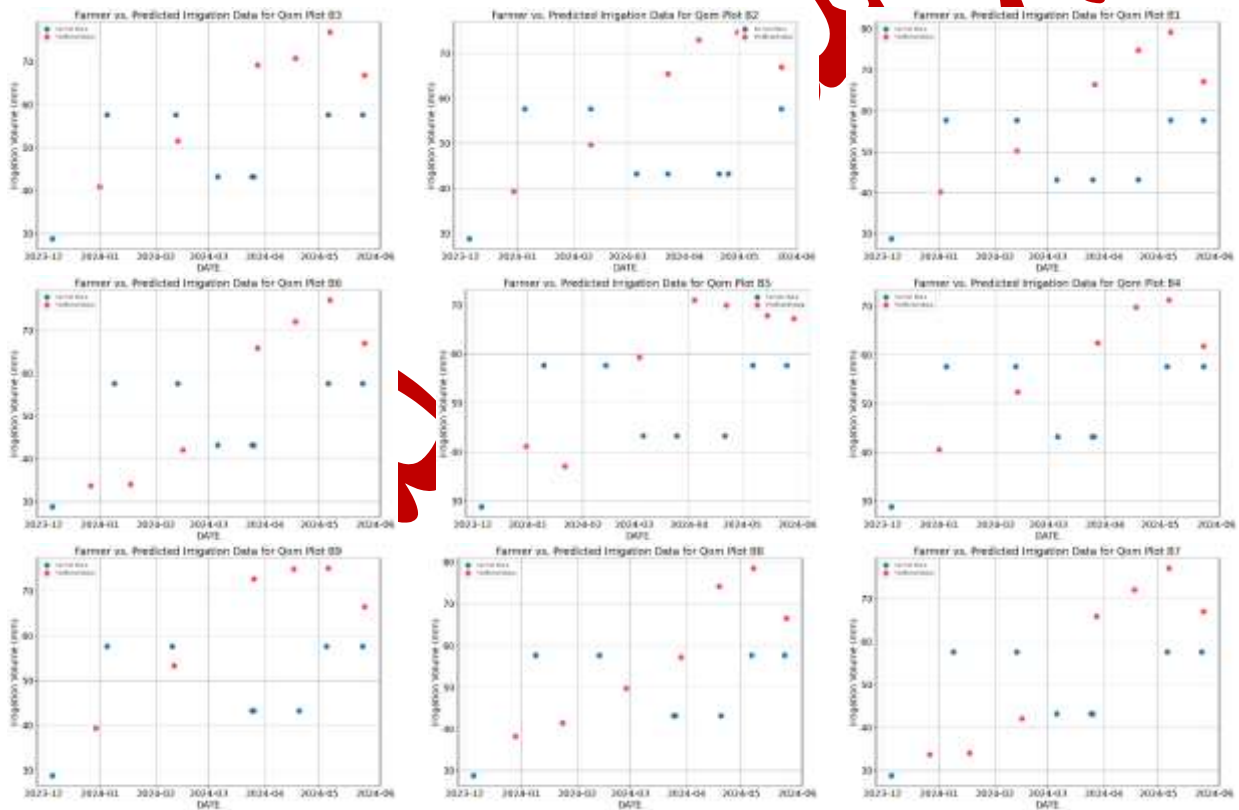
MAE: Mean Absolute Error

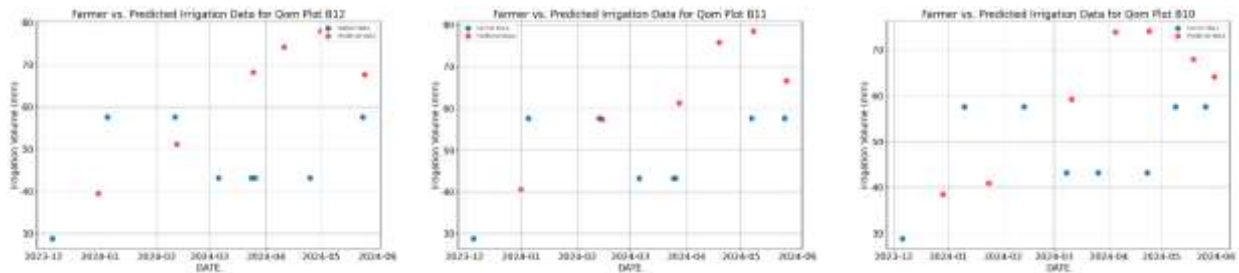
بوده است. نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که قطعات ۵۶،۷۸،۱۰ در مزرعه نیشابور و قطعه ۱۴ در مزرعه قم با یک آبیاری اضافه تطابق بیشتری با هم از نظر تعداد دفعات آبیاری انجام شده داشت ولی سایر بلوک‌ها ۲ آبیاری اضافه بر نیاز گیاه صورت گرفته است. برای کمی کردن میزان اختلاف بین دفعات آبیاری کشاورز و پیش‌بینی شده و بیان درصد عدم تطابق برای هر قطعه، از درصد خطای مطلق محاسبه شد. این معیار بر اساس عدم تطابق بر حسب درصد عملکرد مدل محاسبه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که میزان عدم تطابق در دفعات آبیاری بین ۲۲ تا ۳۳ درصد متغیر می‌باشد.

جدول ۷- اعتبارسنجی تطابق تعداد دفعات آبیاری کشاورز و تعداد دفعات آبیاری پیش‌بینی شده با استفاده از آماره میانگین خطای مطلق

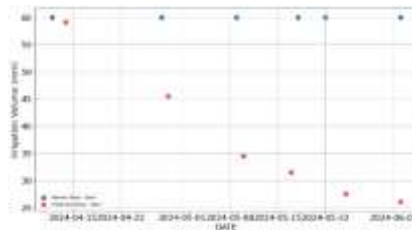
قم	نیشابور												معیار ارزیابی	
	B14	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2		B1
۷	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	تعداد دفعات آبیاری کشاورز
۷	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	تعداد دفعات آبیاری پیش‌بینی شده
۲۲/۲۲	۳۲/۳۳	۳۲/۳۳	۲۲/۲۲	۳۲/۳۳	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۲۲/۲۲	۳۲/۳۳	۳۲/۳۳	۳۲/۳۳	۳۲/۳۳	درصد خطای مطلق

به منظور مقایسه بهتر تقویم آبیاری کشاورز با تقویم آبیاری پیش‌بینی شده، نمودار پراکنش آبیاری کشاورز و آبیاری مدل در شکل ۱۰. Error! Reference source not found. مربوط به قطعات گندم سایت نیشابور و شکل ۱۱ مربوط به قطعه ۱۴ گندم در سایت قم قابل مشاهده می‌باشد.





شکل ۱۰- نمودار پراکنش حجم و زمان آبیاری کشاورز (آبی) و آبیاری پیش‌بینی شده (قرمز) برای ۱۲ قطعه گندم از مزرعه نیشابور



شکل ۱۱- نمودار پراکنش حجم و زمان آبیاری کشاورز (آبی) و آبیاری پیش‌بینی شده (قرمز) برای بلوک ۱۴ مزرعه قم

بررسی همبستگی داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون برای تعیین میزان رابطه بین حجم واقعی و محاسبه شده آب و تاریخ‌های واقعی و محاسبه شده آبیاری برای هر بلوک استفاده شد که نتایج آن در جدول ۸ قابل مشاهده است. نتایج همبستگی نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی زمان‌بندی کلی آبیاری عملکرد نسبتاً خوبی در دنبال کردن روند تاریخ‌ها برای بیشتر بلوک‌ها داشته است (همبستگی تاریخ بالا است). با این حال، عملکرد مدل در پیش‌بینی حجم آبیاری برای بلوک‌های مختلف متفاوت است و در برخی بلوک‌ها همبستگی حجم پایین است، که نشان‌دهنده حجم زیادتر از نیاز گیاه است. بلوک‌های ۵، ۶، ۱۰ بلوک‌هایی که همبستگی حجم پایینی وجود دارد. جدول ۸- ضریب همبستگی پیرسون بین حجم و زمان آبیاری واقعی و آبیاری محاسبه شده برای هر بلوک از مزرعه نیشابور و بلوک ۱۴ مزرعه قم

قم	نیشابور													معیار ارزیابی
	B14	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	
	NaN	-۰/۷۵	-۰/۴۰	۰/۲۹	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۳۱	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۵۴	۰/۵۲	ضریب همبستگی حجم
۱	۰/۹۹	۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۹	ضریب همبستگی تاریخ

در جدول همبستگی، اگر یکی از متغیرها ثابت باشد (یعنی تمام مقادیر آن یکسان باشند)، انحراف معیار آن صفر خواهد بود. در نتیجه محاسبه ضریب همبستگی پیرسون نیز در این حالت امکان‌پذیر نیست و به دلیل حجم واقعی در داده‌های ارائه شده برای این بلوک قم است و نتیجه NaN بود. همبستگی پیرسون بین تبخیر-تعرق واقعی و مقادیر مورد نیاز محاسبه شده برابر با حدود ۰/۵۳ است. این نشان‌دهنده یک همبستگی خطی مثبت متوسط بین میزان تبخیر-تعرق واقعی و مقادیر آبیاری مورد نیاز محاسبه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی دقیق مصرف آب و بهینه‌سازی تقویم آبیاری در مزارع گندم دشت‌های قم و نیشابور در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ صورت گرفت. تحلیل نتایج، تفاوت‌های چشمگیری را در الگوهای آبیاری و نیاز آبی بین دو منطقه نشان داد؛ دامنه تغییرات تبخیر-تعرق مرجع در نیشابور و قم مشابه بود، اما بارش در نیشابور تقریباً دو برابر قم گزارش شد و رطوبت نسبی نیز در نیشابور نوسانات بیشتری داشت. این تفاوت‌ها، اهمیت رویکردهای منطقه‌ای در مدیریت آبیاری را برجسته می‌کند. مهم‌ترین یافته مطالعه، آشکارسازی آبیاری‌های اضافی و غیرضروری در هر دو سایت بود. در نیشابور، تعداد دفعات آبیاری توسط کشاورزان (۹ نوبت) به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از پیش‌بینی مدل (۶ تا ۷ نوبت) بود که منجر به ۲ تا ۳ نوبت آبیاری اضافه بر نیاز واقعی گیاه اعمال شده بود. این امر به ویژه در مواردی که آبیاری بلافاصله پس از بارش‌های قابل توجه انجام شده بود، مانند آبیاری ۴۳/۲ میلی‌متری در نیشابور پس از بارش‌های اسفند و فروردین، یا آبیاری ۶۰ میلی‌متری در قم پس از بارش‌های بهمن، نمود بارزتری داشت و نشان‌دهنده عدم

همگام‌سازی کافی با شرایط اقلیمی موجود بود. یکی دیگر از ابعاد کلیدی این مطالعه، تحلیل اختلاف بین حجم آبیاری اعمال شده و نیاز واقعی گیاه بود. در مزرعه قم، حجم آبیاری همواره ۶۰ میلی‌متر گزارش شد، در حالی که نیاز واقعی گیاه در بسیاری موارد کمتر از این مقدار بود. اگرچه مدل بیلان آب در پیش‌بینی زمان‌بندی نسبی آبیاری برای اکثر بلوک‌ها همبستگی خوبی نشان داد، اما پیش‌بینی دقیق حجم مورد نیاز آب آبیاری همچنان به عنوان یک چالش باقی ماند. همچنین، تنوع در نیاز آبیاری قطعات مختلف یک مزرعه (قطعات ۱ و ۵ تا ۸ در نیشابور) بر لزوم مدیریت آبیاری در مقیاس خرد تأکید دارد. یافته‌های این پژوهش، ضرورت بازنگری در شیوه‌های سنتی آبیاری و اتخاذ رویکردهای مبتنی بر داده‌های دقیق و مدل‌سازی پیشرفته را یادآور می‌شود. بر حسب یافته‌های این پژوهش توصیه می‌شود که اگر بارش از دارای تداوم بیشتر از دو روز و حجم بیشتر از ۵ میلی‌متر باشد و یا خاک پس از بارندگی هنوز خیس بود، آبیاری بلافاصله بعد از بارش انجام نشود. با توجه به محدودیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، بهینه‌سازی زمان‌بندی و حجم آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه، منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب می‌شود و می‌تواند ابزاری قدرتمند برای دستیابی به مدیریت و پایش دقیق‌تر آب آبیاری در آینده باشد. همچنین در جهت تکمیل این پژوهش پیشنهاد می‌شود که زمان دقیق پیشنهادی آبیاری و مقادیر آن پیش‌بینی شود.

علیرغم حجم سنگین محاسبات در محیط GEE این مطالعه دارای محدودیت‌هایی بود که زمان دقیق آبیاری و مقدار آن را مشخص نمی‌کند و صرفاً تخمینی از زمان و مقدار آبیاری است. هر چند روش‌های مورد استفاده در این مطالعه با هدف بکارگیری در مناطق وسیع کشاورزی که امکانات لازم برای اندازه‌گیری‌های میدانی را ندارند، مد نظر قرار گرفته‌اند، با این حال، انجام اندازه‌گیری‌های میدانی از رطوبت خاک می‌تواند دقت روش‌های مورد استفاده را مورد سنجش قرار دهد.

"هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

۵. سپاسگزاری

این پایان نامه مستخرج از رساله دکتری است و بخشی از اعتبار مالی آن توسط دانشگاه تهران تأمین شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از آقای مهندس علی محمدیان کشاورز نمونه استان خراسان رضوی و همچنین آقای فراهانی کشاورز مزرعه قم به دلیل به اشتراک گذاری داده‌های مزرعه ای و همکاری شان در طول انجام این پایان نامه قدردانی می‌گردد.

۶. منابع

امیری، ابراهیم؛ بحرانی، عبدالله؛ خورسند، افشین و حق‌جو، مهتا (۱۳۹۴). ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس گندم، تحت تنش کم‌آبی. *دانش آب و خاک*، (۲۴/۲۵) ۲۱۷-۲۲۹.

توکلی، علیرضا و قدمی فیروزآبادی، علی (۱۳۹۹). آشنایی با شیوه‌های اعمال مدیریت کم‌آبیاری در زراعت گندم. *مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی، دفتر شبکه دانش و رسانه‌ای. نشر آموزش کشاورزی*، - صفحه ۱-۳۲. - ISBN: 978-964-520-743-2.

حاجی‌حسینی، عباس و یزدانی، عباسعلی (۱۳۹۰). مدیریت و بهره‌وری آب در کشاورزی. مدیریت هماهنگی ترویج کشاورزی، سازمان جهاد کشاورزی یزد، چاپ اول، یزد.

خسروی‌پور، بهمن و لویمی، کوثر (زمستان ۱۴۰۳). نقش آبیاری‌های نوین در مدیریت بهینه آب در زمان خشکسالی. *جغرافیا و روابط انسانی*. ۷(۳)، ۳۱۸-۳۰۳.

دهقانی‌سانج، حسین؛ اسعدی‌اسکویی، ابراهیم و تقی‌زاده قصاب، افروز (بهمن و اسفند ۱۴۰۰). تحلیلی بر آب مصرفی بخش کشاورزی مبتنی بر تبخیر و تعرق واقعی. *آبیاری و زهکشی ایران*، (۶) ۱۵، شماره پیاپی ۹۰. ۱۲۵۱-۱۲۶۲. Doi: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.2.2.

شیخ، واحدبردی و موشخیان، یوسف (۱۳۸۸). تهیه نقشه رطوبت خاک با استفاده از مدل دینامیکی BEAC. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران.

صبوحی، محمود و زارع، شجاعت (۱۳۹۲). نگاهی بر تحولات، چالش‌ها و قوانین حفاظت و بهره‌برداری از منابع آبی در ایران. *اقتصاد کشاورزی*.

عابدین پور، میثم و رزاقی، محمدحسین (۱۳۹۹). شبیه سازی خاک و عملکرد گندم با مدل AquaCrop در شرایط مزرعه ای دشت نیشابور. نشریه پژوهشی آب در کشاورزی، شماره ۱. جلد ۳۴.

گودرزی، مصطفی و عابدی کوهپایه، جهانگیر (بهار و تابستان ۱۳۹۹). اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و نیاز آبیاری در مناطقی تحت آبیاری، مطالعه موردی: دشت نجف آباد. مجله ترویجی و بهره‌وری آب، جلد ۱.

مرکز ملی خشکسالی (۱۴۰۳). بولتن هواشناسی. تهران: سازمان هواشناسی.

مشتاق، ناهید، جعفری، رضا، سلطانی، سعید و رضانی، نفیسه (۱۳۹۴). کاربرد مدل توازن انرژی و داده‌های ماهواره لندست سنجنده TM در تخمین تبخیر و تعرق. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد سال ۱۹، ۷۳-۲۰۶-۲۱۷.

میان‌آبادی، آمنه؛ علیزاده، امین؛ ثنایی‌نژاد، سیدحسین؛ قهرمان، بیژن و داوری، کامران (۱۳۹۵). ارزیابی الگوریتم سیال برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی در حوضه نیشابور با استفاده از مدل SWAT. پژوهش آب در کشاورزی، (۳۰)۴. <http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2017.109014>.

وزارت نیرو دستورالعمل روش‌های محاسبه بیلان منابع آب (۱۳۹۳). نشریه شماره ۴۱۸ - الف. - معاونت امور آب و آبفا.

وزارت نیرو راهنمای روش‌های برآورد تبخیر در شرایط اقلیمی مختلف (۱۴۰۲). معاونت تولیدی، فنی و زیربنایی وزارت نیرو، ۱-۲۱۸.

یعقوب زاده مصطفی؛ پرومندنسب، سعید؛ ایزدیناه، زهرا و سیدکابلی، حسام (۱۳۹۵). اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر- تعرق در طی دوره رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل‌های AOGCM. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، شماره ۴، جلد ۳۰.

یعقوب‌زاده، مصطفی (۱۳۹۵). تخمین تبخیر و تعرق واقعی بوسیله مدل آگروهیدرولوژیکی و تکنیک سنجش از دور. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، (۴)۳۰. <http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2017.109013>.

نیازی شهرکی (۱۴۰۳). وزارت جهاد کشاورزی، آنلاین. مشاهده در تاریخ ۱۳۹۵/۰۲/۲۱.

اصلی-ترین-مأموریت-وزارت-جهاد-کشاورزی-ارنقه-راندمان-آبیاری-است <https://www.tasnimnews.com/fa/news/1404/07/17/3419388>

References

- Abedinpour, M., & Razaghi, M. H. (2020). Simulation of soil and wheat yield with AquaCrop model in Nayshabur plain field conditions. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(1). <http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2024.364259.1020/>. (inPersian).
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56
- Allen, R. G., Trezza, R., Tasumi, M., 2006. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agric. For. Meteorol.* 139, 55-73. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.05.012>.
- Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).
- Amiri, E., Bahrami, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2015). Evaluation of AquaCrop model in predicting grain yield and biomass of wheat under water stress. *Water and Soil Science*, 25(4/2), 217-229. (inPersian).
- Arnold, J., Williams, J., Nicks, A., & Sammons, N. (1991, July 1). SWRBB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. 20(1), 82-83. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(91\)90038-K](https://doi.org/10.1016/0378-3774(91)90038-K)
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M., 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrol.* 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4).
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., van der Wal, T., 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *J. Hydrol.* 212-213, 213-229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6).
- Bastiaanssen, W. G. M., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin. Turkey. *J. Hydrol.* 229, 87-100 [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4).

- Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B.P. Thoreson, and R.G. Allen (2005). "SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions". *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131, 85-93.
- Dehghani Sanij, H., Asadi Eskouei, E., & Taghizadeh Ghasab, A. (February & March 2022). An analysis of agricultural water consumption based on actual evapotranspiration. *Iran Irrigation and Drainage*, 15(6), Serial No. 90, 1251-1262. Doi: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.2.2. (inPersian).
- Goodarzi, M., & Abedi Kohpayeh, J. (2020). Effects of climate change on water requirement and irrigation requirement in irrigated areas, case study: Najafabad plain. *Journal of Water Extension and Productivity*. (inPersian).
- Haji Hosseini, A., & Yazdani, A. (2011). *Water management and productivity in agriculture*. Coordination Management of Agricultural Extension, Yazd Jihad-e-Agriculture Organization, First Edition, Yazd. (inPersian).
- Heidari, H. A., Bagheri, A., & Ketabchi, H. (2023). Serious games in water resources management. *Third National Conference on Water Resources Management Strategies and Environmental Challenges*. Sari, 1-8. (inPersian).
- Hosseini, S. T., Khoshroo, M., & Ziatabar, M. (2015). Investigation of climate change effects and evaluation of planting date change on soybean yield. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(4). (inPersian).
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., 2019. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: *The Bekaa Valley, Lebanon. Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.033>.
- Khosravipour, B., & Loimyi, K. (Winter 2024). The role of modern irrigation in optimal water management during drought. *Geography and Human Relations*, 7(3), 303-318. (inPersian).
- Kroes, J., & van Dam, J. (2003). Reference Manual SWAP version 3.0.3. WIMEK Wageningen Environmental Research. Wageningen: Alterra. <https://edepot.wur.nl/35471>
- Laipelt L., Henrique Bloedow Kayser R., Santos Fleischmann A., Ruhoff A., Bastiaanssen W., A. Erickson T., Melton F., 2021. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178 (2021) 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>.
- Mianabadi, A., Alizadeh, A., Sanaeinejad, S. H., Ghalraman, B., & Davari, K. (2016). Evaluation of the SEBAL algorithm for estimating actual evapotranspiration in the Neyshabur basin using the SWAT model. *Water Research in Agriculture*, 30(4). <http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2017.109014>. (inPersian).
- Ministry of Energy. (2014). *Instructional guidelines for calculating water resource balance*. Publication No. 418 - A. - Deputy for Water and Wastewater Affairs. (inPersian).
- Ministry of Energy. (2023). Guide to methods for estimating evaporation in different climatic conditions. Deputy of Production, Technical, and Infrastructure, *Ministry of Energy*, 1-218. (inPersian).
- Mushtaq, Nahid; Jafari, Reza; Soltani, Saeed and Ramezani, Nafiseh (2015). Application of energy balance model and Landsat TM satellite data in estimating evapotranspiration. *Soil and Water Sciences (Agricultural Sciences and Arts and Natural Resources)*, Volume 19, 73. 206-217. (inPersian).
- National Drought Center. (2024). *Meteorological Bulletin*. Tehran: *Meteorological Organization*. (inPersian).
- Nikzad Salami, M., Borna, R., & Asadian, F. (December 2019). The impact of climate change on agricultural products with an emphasis on soybean oilseed using LARS-WG (Case study: Moghan Plain). *Natural Geography, Islamic Azad University*, 12(6), No. 45, 75-86. (inPersian).
- Paredes, P., J. Rodrigues, G., T. Petry, M., O. Severo, P., Carlesso, R., & Santos Pereira, L. (2018, April 26). Evapotranspiration Partition and Crop Coefficients of Tifton 85 Bermudagrass as Affected by the Frequency of Cuttings. Application of the FAO56 Dual Kc Model. *Water*, 10(558). <https://doi.Org/10.3390/w1005055>
- Sabouhi, M., & Zare, S. (2013). An overview of developments, challenges, and laws for the protection and utilization of water resources in Iran. *Agricultural Economics, Special Issue*. (inPersian).
- Saiz Rodríguez, R., Aguirre López, G., Rodríguez, J., Watts Thorp, C., Saiz Rodríguez, J., Ochoa Granillo, A., & Saiz Hernández, J. (2017). Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *TERRA LATINOAMERICANA*, 35(4).
- Sheikh, Vahedbari and Moshekhian, Yousef (2009). Preparing soil moisture map using BEAC dynamic model. *Fifth National Conference of Iranian Watershed Science and Engineering*. (inPersian).

- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Tavakoli, A., & Ghadami Firouzabadi, A. (2020). Introduction to methods of implementing deficit irrigation management in wheat cultivation. Agricultural Education and Extension Institute, Knowledge and Media Network Office. Agricultural Education Publishing, pp. 1-32. ISBN: 978-964-520-743-2. (inPersian).
- T. Schnur Mark, Xie Hongjie and Wang Xianwei Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern. *Ecological Informatics*. - May 10, 2010. - 5 : Vol. 5. - pp. 400-409 <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.05.001>.
- Tavakoli, Alireza and Ghadami Firouzabadi, Ali (2019). Familiarity with methods of implementing drought management in wheat cultivation. Agricultural Education and Extension Institute, Knowledge and Media Network Office. *Agricultural Education Publication*, - Page 1-32. - ISBN:978-964-520-743-2. (inPersian).
- Yaghoobzadeh Mostafa, Boroomanad-Naseb, S., Izadpanah, Z., & Seyed Kaboli, H. (2016). The effect of climate change on evapotranspiration trends during the growth period of irrigated and rainfed crops using AOGCM models. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(4B). (inPersian)
- Yaghoobzadeh, M. (2016). Estimation of actual evapotranspiration using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(4). <http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2017.109013>. (inPersian).
- weatherandclimate. (2025). <https://weatherandclimate.com/iran/qom>.
- weatherandclimate. (2025). <https://weatherandclimate.com/iran/razavi-khorasan/neyshabur>.

پایگاه نشریات

Extended Abstract

Introduction:

Addressing escalating challenges of climate change and water scarcity in Iran, this study aimed to estimate crop water requirements and predict irrigation timing and volume for efficient agricultural water management. Specifically, it focused on developing a cell-based water balance model to evaluate water consumption and irrigation schedules for wheat fields in Qom and Neyshabur during the 2022-2023 agricultural year.

Materials and Methods:

A remote sensing-based soil water balance model was employed to simulate crop irrigation water requirements. This model tracked daily changes in soil water storage, considering effective rainfall and irrigation as inputs, and deep percolation and actual evapotranspiration (ET_a) as outputs. Daily farm-scale evapotranspiration maps were generated using the GeeSEBAL algorithm, applied to Landsat 8 & 9 satellite imagery and the ERA5 meteorological dataset. Crop growth curves, root depth, and plant height were derived from Sentinel-2 NDVI vegetation index data. Soil water holding capacity was extracted from the HiHydroSoil dataset. Model validation utilized field observational data from Qom and Neyshabur for the 2022-2023 agricultural year, including soil texture, irrigation timing and method, crop type, and planting/harvest dates.

Results:

- Wheat in Neyshabur was planted on November 1st, with harvest between June 6th and 10th, 2024. In Qom (Plot 14), planting occurred on December 8th, 2023, and harvest between June 1st and 5th, 2024, as determined by NDVI imagery.
- Reference evapotranspiration (ET_r) during the growing season was 538 mm in Neyshabur and 415 mm in Qom. Precipitation was approximately 150 mm at both sites. Actual evapotranspiration (ET_a) in Neyshabur wheat fields ranged from 520 to 730 mm, while in Qom, it varied from 377 to 502 mm.
- Farmers applied a constant volume of irrigation water across all plots. However, the net irrigation requirement calculated by the water balance model ranged from 3582 to 4524 m³/ha. Due to rainfall contributing to water requirements, ET_a exceeded both farmer-applied and model-calculated irrigation amounts in all plots. Neyshabur's Plots 5 to 8 showed the highest irrigation water requirement and ET_a, with Plot 1 having the lowest. The largest discrepancy between model-calculated and farmer-applied irrigation was in Neyshabur's Plot 4, while in Qom, this discrepancy was more significant at 1265 m³/ha.
- Neyshabur farmers consistently performed 9 irrigation events, whereas the model predicted only 6 to 7 events were needed. In Qom (Plot 14), both farmer and model applied 7 irrigation events. Neyshabur's Plots 5, 6, 7, 8, and 10, along with Qom's Plot 14, showed closer alignment with the model when considering one additional irrigation. Other blocks received two extra irrigation events beyond actual crop need. Although the model effectively predicted irrigation timing, its predicted irrigation depth differed from farmer practices. In Qom, despite similar irrigation event numbers, timing and volume varied from the model. The constant 60-mm irrigation depth applied by farmers often exceeded actual crop requirements. Instances of over-irrigation, particularly immediately after rainfall, were observed at both sites.

Conclusion:

This study effectively assessed water consumption and optimized wheat irrigation schedules in Qom and Neyshabur during the 2022-2023 agricultural year. Analysis revealed significant regional differences in irrigation patterns and water requirements. Although precipitation was similar, Neyshabur's ETr was approximately 100 mm higher than Qom's, emphasizing the need for region-specific irrigation management.

A critical finding was the identification of unnecessary and excessive irrigation events at both sites. While the model accurately scheduled irrigation timing, Neyshabur farmers applied 2 to 3 more irrigation events than required, indicating clear over-irrigation.

These findings highlight the necessity of transitioning from traditional irrigation practices to approaches based on precise data and advanced modeling. Given Iran's limited water resources in arid and semi-arid regions, optimizing irrigation timing and volume according to actual crop needs can yield substantial water savings. This study demonstrates the potential of such models as powerful tools for achieving more precise and monitored irrigation water management in the future.

Author Contributions

First author: Collecting and analyzing data, writing — original draft preparation, review, and editing. Second and Third authors: Conceptualization, writing — review and editing, methodology, guidance, research oversight, Research administration.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest