دانشگاه جیرفت

Soil and Sustainable Development

Homepage: https://ssd.ujiroft.ac.ir

خـــاک و توسعه پایدار

Irrigation scheduling for forage maize using the CROPWAT 8.0 model and climatic data: A novel approach to Sustainable Water and Soil Resource Management in Agriculture

Iman Hajirad[1]✉

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, IRAN.

Email: i.hajirad@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July 01, 2025

Revised: Aug. 11, 2025

Accepted: Aug. 19, 2025

Published: Autumn, 2025

Keywords:

Crop irrigation requirement,

FAO-Penman-Monteith,

Irrigation management,

Irrigation scheduling.

ABSTRACT

Due to the excessive and unsustainable exploitation of available water resources, making informed decisions regarding the planning, development, and management of water resources has become increasingly essential. One effective approach in this regard is the use of simulation models to estimate crop water requirements. The aim of this study was to determine the water needs and irrigation scheduling of forage maize in the arid and semi-arid climate of Varamin using the CROPWAT 8.0 model. Developed by the FAO, this model estimates crop water requirements based on climatic data, soil characteristics, and crop parameters. The simulation results demonstrated that CROPWAT 8.0 is a suitable tool for irrigation planning of maize in the study region. The model estimated the crop evapotranspiration (ET_c) and crop water requirement (CWR) for forage maize to be 416.4 mm and 404.3 mm, respectively. Additionally, the gross irrigation depth for full irrigation and deficit irrigation at 80% and 60% levels was calculated to be 403 mm, 386 mm, and 376 mm, respectively. These findings indicate that the model can accurately estimate crop water requirements and serve as an effective tool for optimizing irrigation practices. Given the growing limitations in water availability, it is recommended that further studies explore the integration of simulation models with various soil types, the impact of climate change, and the combined use of hydrological and soil models for comprehensive natural resource management.

Cite this article: Hajirad, I., (2025), Irrigation scheduling for forage maize using the CROPWAT 8.0 model and climatic data: A novel approach to Sustainable Water and Soil Resource Management in Agriculture, Soil and Sustainable Development, 1 (2), 157-173.

DOI: https://doi.org/10.22034/ssd.2025.532170.1010

© The Author(s). Publisher: The University of Jiroft Press

خاک و توسعه پایدار
Homepage: https://ssd.ujiroft.ac.ir
دانشگاه جیرفت

برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 و داده‌های اقلیمی: رویکردی نوین در مدیریت پایدار منابع آب و خاک کشاورزی

ایمان حاجی‌راد[1]✉

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: i.hajirad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۰ تیر ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۲۰ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:
برنامه‌ریزی آبیاری بهینه،
نیاز آبی گیاه،
فائو-پنمن-مانتیث،
مدیریت آبیاری.

چکیده

در پی استفاده بی‌رویه و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی کشور، ضرورت اتخاذ تصمیمات صحیح در زمینه برنامه‌ریزی، توسعه و مدیریت منابع آب بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از ابزارهای کارآمد در این راستا، بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی جهت تعیین نیاز آبی محصولات کشاورزی است. هدف از این پژوهش، تعیین نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری برای محصول ذرت علوفه‌ای در اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه ورامین با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 می‌باشد. این مدل که توسط سازمان فائو توسعه یافته است، قادر است نیاز آبی گیاه را بر اساس داده‌های اقلیمی، خصوصیات خاک، و اطلاعات گیاه تعیین نماید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که مدل مذکور می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت در منطقه مورد مطالعه توصیه شود. مقادیر تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) و نیاز خالص آبیاری (CWR) برای ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب ۴۱۶/۴ و ۴۰۴/۳ میلی‌متر محاسبه شد. همچنین، عمق ناخالص آب مورد نیاز برای آبیاری این گیاه در شرایط آبیاری کامل، کم‌آبیاری در سطوح ۸۰٪ و ۶۰٪ به‌ترتیب برابر ۴۰۳، ۳۸۶ و ۳۷۶ میلی‌متر به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که مدل CROPWAT 8.0 می‌تواند به طور دقیق نیاز آبی گیاه را برآورد کرده و در مدیریت بهینه مصرف آب مؤثر باشد. با توجه به محدودیت منابع آبی، پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در خصوص به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی برای انواع مختلف خاک، بررسی تأثیر تغییرات اقلیم و استفاده تلفیقی از مدل‌های آبی و خاکی جهت مدیریت یکپارچه منابع طبیعی صورت گیرد.

ارجاع‌به مقاله: برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 و داده‌های اقلیمی: رویکردی نوین در مدیریت پایدار منابع آب و خاک کشاورزی، مجله خاک و توسعه پایدار، ۱ (۲)، ۱۵۷-۱۷۳.

© نویسندگان ، ناشر: انتشارات دانشگاه جیرفت

DOI: https://doi.org/10.22034/ssd.2025.532170.1010

مقدمه

افزایش تقاضای آب، ناشی از رشد سریع جمعیت، ضرورت افزایش تولید غذا را از طریق گسترش آبیاری و تولید صنعتی برای برآوردن نیازهای اولیه انسان ایجاد کرده است. هدف اولیه آبیاری، تأمین تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) در زمانی که بارندگی ناکافی باشد، است (Moncada et al., 2024; Gong et al., 2020; Hajirad et al., 2021). برنامه‌ریزی آبیاری فرایندی است که طی آن یک کشاورز زمان و عمق آبیاری محصول را تعیین می‌کند. نیاز آبی محصولات زراعی از مکانی به مکان دیگر، از محصولی به محصولی دیگر و همچنین در کل دوره رشد برای تک تک محصولات متفاوت است. دستیابی به کارایی بیشتر در استفاده از آب در آینده‌ای نزدیک یک چالش است و نیاز به استفاده از تکنیک‌ها و شیوه‌هایی است که تأمین آب دقیق‌تری را برای محصولات کشاورزی به ارمغان آورد (Bhat et al., 2017; Scobie et al., 2025). Hess (۲۰۰۵) نیاز آبی گیاه را به‌عنوان کل آب مورد نیاز محصول برای تبخیر - تعرق از مرحله کاشت تا مرحله برداشت در شرایط آب و هوایی خاص، هنگامی که رطوبت خاک با بارندگی یا آبیاری تأمین می‌شود تا رشد گیاه را محدود نکند، تعریف کرده است. نیاز آبی گیاه به شرایط آب و هوایی، منطقه و نوع محصول، نوع خاک، فصل رشد و فراوانی تولید محصول بستگی دارد (FAO, 2009; Lamsal & Marston, 2025). یکی از راه‌های دقیق برآورد نیاز آبی گیاه می‌تواند استفاده از مدل‌های گیاهی مانند CROPWAT باشد. این مدل یک برنامه کامپیوتری است که توسط بخش توسعه آب و خاک سازمان فائو نوشته شده است و از مدل فائو-پنمن-مانتیث برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_0)، نیاز آبی گیاه و نیاز آبیاری استفاده می‌کند. CROPWAT شامل ماژول‌های مختلف برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با به‌کارگیری داده‌های هواشناسی روزانه، یک دهه یا ماهانه است (HERBHA et al., 2017).

مدل CROPWAT می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای کمک به مهندسان و کشاورزان آبیاری در انجام محاسبات معمول برای مطالعات آبیاری و عمدتاً در مدیریت و طراحی طرح‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. این مدل علاوه بر برآورد تبخیر - تعرق محصول، آب مورد نیاز محصول و برنامه آبیاری را با الگوهای مختلف کشت برای برنامه‌ریزی آبیاری تعیین می‌کند (Navatha et al., 2020). مدلCROPWAT ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی آبیاری گیاه ذرت به حساب می‌آید، اما به‌دلیل عدم انطباق مقادیر تبخیر - تعرق پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در مزرعه، بایستی نتایج برآورد کاهش

محصـــول مدل با تأمل و احتیاط مورد پذیرش قرار گیرد (Cavero et al., 2000). در این زمینه مطالعات متعددی انجام گرفته است که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

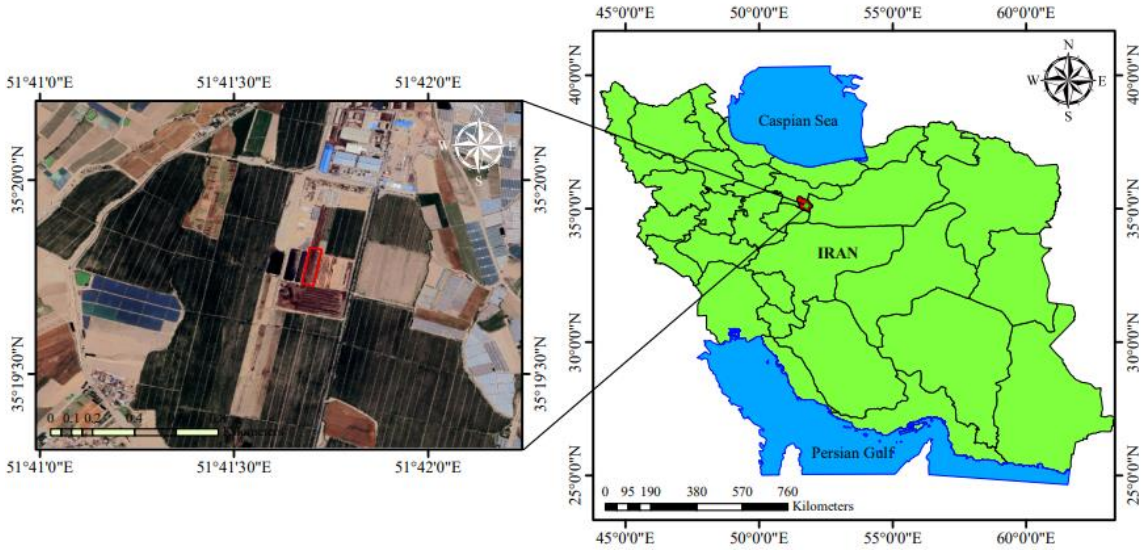
Constantin و همکاران (۲۰۲۴) پژوهشی را تحت عنوان مدیریت آبیاری کشت گندم با استفاده از شبیه‌سازی نیاز آبیاری توسط مدل CROPWAT در رومانی انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل CROPWAT 8.0 با شبیه‌سازی تبخیر - تعرق، بارش مؤثر و نیاز آبیاری، نیاز آبی گندم زمسـتانه را به‌صـورت چهار نوبت آبیاری در طول سـال، عمدتاً در ماه‌های آوریل، می و جولای، برآورد کرده است. همچنین مشخص شد که آبیاری در زمان تخلیه بحرانی، باعث کاهش ۱۰۰ درصدی افت عملکرد در مراحل میانی و پایانی رشد شد. از طرفی، بارش، تأثیر مستقیمی بر نیاز آبی و بهبود عملکرد محصول تا ۱۰۰ درصد دارد که این یافته‌ها اطلاعات مفیدی برای تصمیم‌گیران بخش کشاورزی ارائه می‌کند. همچنین، Roja و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشـی تحت عنوان ارزیابی نیاز آبی ذرت با اسـتفاده از مدل CROPWAT 8.0 را انجام دادند. در این پژوهش میزان نیاز آبی و نیاز آبیاری گیاه ذرت به ترتیب برابر ۲۳۸/۶ میلی‌متر و ۲۱۲/۶ میلی‌متر برآورد شـد. در این تحقیق برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع از روش پنمن – مانتیث استفاده شد. هم‌چنین پیشـنهاد شد که از مدل CROPWAT 8.0 برای برآورد نیاز آبی سـایر محصـولات نیز اسـتفاده شـود. در تحقیقی دیگر که توسـط Champaneri و همکاران (۲۰۲۴) تحت عنوان ارزیابی مدل CROPWAT 8.0 برای برنامه‌ریزی کم‌آبیاری انجام شـد، نتایج نشـان داد که برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر CROPWAT 8.0 دقت بالاتری نسـبت به داده‌های سـنسـورهای رطوبتی داشـته و با کاهش میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربعات خطا، بهبود عملکرد را نشـان داده اسـت. همچنین، این مدل موجب صـرفه‌جویی ۴۵ درصـد در مصـرف آب و افزایش بهره‌وری آبی شـده اسـت، که قابلیت آن را به‌عنوان یک راهکار هوشـمند در مدیریت منابع آبی تأیید می‌کند. همچنین، Somani و همکاران (۲۰۲۵) تحقیقی را تحت عنوان زمان‌بندی آبیاری در پروژه پاواله با استفاده از FAO-CROPWAT 8.0 انجام دادند. نتایج آن‌ها نشـان داد که مدل CROPWAT 8.0 با اسـتفاده از داده‌های اقلیمی ۱۹ سـاله و تحلیل پارامترهای خاک، نیاز آبی هفت محصـول را با دقت قابل قبولی تعیین کرده اسـت. همچنین در این پژوهش مشخص شد که ظرفیت نگهداشت آب خاک نقش مهمی در زمان‌بندی آبیاری داشته، به‌طوری که تعداد دورهای آبیاری برای خاک‌های مختلف بین چهار تا نه مرتبه متغیر بوده اسـت. لذا، هدف از انجام تحقیق حاضـر، شـبیه‌سـازی نیاز

آبی ذرت علوفه‌ای با اســـتفاده از مدل CROPWAT 8.0 تحت مدیریت‌های آبیاری کامل و کم‌آبیاری، برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک ورامین و ایجاد یک برنامه زمان‌بندی آبیاری بهینه برای کشاورزان بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سال ۱۳۹۸در طی یک دوره کشت تابستانه ذرت علوفه‌ای در بخشی از مزرعه مجموعه دامپروری صفاری به مســاحت حدود۳۰۰ هکتار واقع در منطقه ورامین اجرا شــد (شــکل ۱). طول و عرض جغرافیایی محل اجرای آزمایش به‌ترتیب "۴۲/۸ ′ ۴۱ °۵۱ شرقی و "۵۱/۹ ′ ۱۹ °۳۵ شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۹۳۳ متر بود.

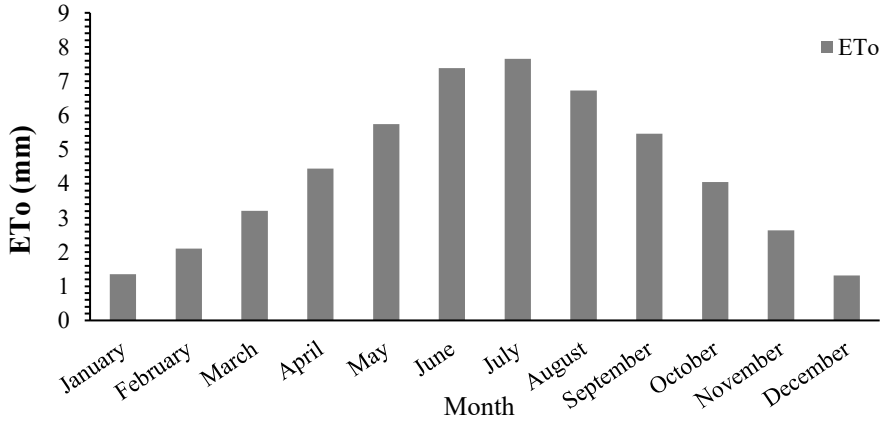


شکل ۱ – موقعیت منطقه مورد مطالعه روی نقطه و عکس هوایی

طرح آزمایشی

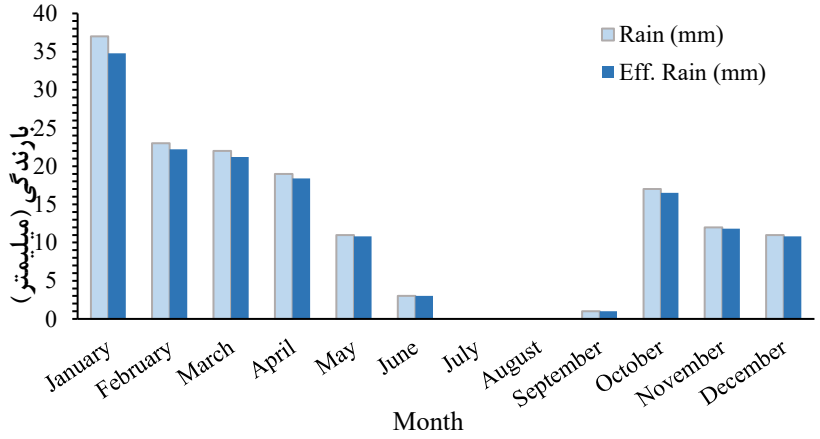
در این پژوهش تیمارهای مورد بررسی شامل سه رژیم آبیاری به صورت آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، FI)، کم‌آبیاری (شــامل تأمین ۸۰ و ۶۰ درصــد نیاز آبی گیاه، $DI_{80\%}$، $DI_{60\%}$) بودند. بافت خاک مزرعه، لومی و متوســط ظرفیت زراعی (θ_{fc}) ۳۳/۵ درصـــد حجمی، متوســـط ظرفیت نقطه پژمردگی (θ_{pwp}) ۱۵/۶ درصـــد حجمی و چگالی مخصوص ظاهری آن برابر ۱/۵۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب (برای عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک) بود. هر تیمار شامل سه خط دو ردیفه کشت بود که دو خط کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و داده‌های مورد نیاز از خط میانی برداشت شد. طول خطوط کشت ۲۰ متر بود. سیستم آبیاری مورد استفاده شامل آبیاری قطره‌ای تیپ با دبی قطره‌چکان‌های ۰/۷ لیتر

در ساعت و فاصله قطره‌چکان‌های ۲۰ سانتی‌متر بود. نوارهای تیپ در فاصله بین دو ردیف کشت قرار گرفت. آبیاری برای همه تیمارها ثابت و دو روز یک‌بار بود. ابتدا با استفاده از گاوآهن یک‌طرفه شخم عمیق زده شد و بعد از آن با استفاده از دیسک‌های بشقابی و سیکلوتیلر، کلوخه‌های خاک به صورت کامل خرد و آماده‌ی کشت شد. آبیاری‌ها تا زمان سبزشدن کامل مزرعه یعنی در مرحله ۶ برگی برای تمامی تیمارها یکسان انجام شد و تیمارهای مورد بررسی پس از مرحله ۶ برگی از نوبت آبیاری چهارم اعمال شد. نیاز ازت ذرت در طی دوره رشد در این پژوهش حدود ۴۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار برآورد شد (۱۰۰ کیلوگرم در ابتدای فصل رشد، ۱۵۰ کیلوگرم در مرحله ۸-۷ برگی و ۱۵۰ کیلوگرم قبل از مرحله گل‌دهی) که به‌صورت کود آبیاری از طریق تانک کود انجام شد. برداشت محصول بعد از گذشت ۹۵ روز از زمان کاشت انجام شد. برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) در این پژوهش به کمک مدل CROPWAT از روش فائو-پنمن- مانتیث که توسط Allen و همکاران (۱۹۹۸) پیشنهاد شده بود، استفاده شد. پارامترهای اقلیمی مورد نیاز معادله فائو-پنمن- مانتیث از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مطالعاتی که فاصله ۸ کیلومتری با محل اجرای طرح داشت، اخذ شد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده برای محاسبه ET_o عبارت از: طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه از سطح دریا، حداقل و حداکثر دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی (درصد)، سرعت باد (کیلومتر در روز) و ساعات آفتابی (ساعت) بودند. در مرحله اول، داده‌های هواشناسی وارد مدل شد و میزان تبخیر – تعرق در هر ماه از سال تعیین شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار تغییرات تبخیر – تعرق مرجع در هر ماه از سال در منطقه مورد مطالعه

با توجه به شـــکل (۲)، بیشـــترین و کمترین میزان تبخیر – تعرق مرجع به ترتیب در ماه‌های جولای و ژانویه با مقادیر ۷/۶۵ و ۱/۳۵ میلی‌متر بر روز مشـاهده شـد. در مرحله دوم با اسـتفاده از میزان تبخیر – تعرق مرجع محاسـبه شـده در مرحله اول و معرفی ضـرایب گیاهی در مراحل اولیه، میانی و انتهایی و سـایر خصـوصـیات گیاهی مورد نیاز، نیاز آبی گیاه ذرت علوفه‌ای توسـط مدل تعیین گردید. در مرحله سـوم، باران مؤثر محاسـبه و از نیاز آبی گیاه کم شـد و بر این اسـاس، نیاز آبیاری گیاه[1] (CWR) محاسبه شد (شکل ۳).



شکل ۳- نمودار تغییرات بارندگی و بارندگی مؤثر در هر ماه از سال در منطقه مورد مطالعه

مرحله بعدی، وارد نمودن مشخصات گیاهی در مدل بود. ضرایب گیاهی ذرت (به‌ترتیب از مقادیر ۰/۳، ۱/۲۰ و ۰/۳۵ که توسط مدل توصیه شده بود به مقادیر واقعی ۰/۲۷، ۱/۰۴ و ۰/۸۹ که در سطح مزرعه برآورد شده بود اصلاح شد. طول دوره برای مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی طبق اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای به‌ترتیب ۲۰، ۳۵، ۲۵ و ۲۰ روز در نظر گرفته شد. عمق توسعه ریشه گیاه پیشنهاد شده توسط مدل برای گیاه ذرت یک متر بود که براساس مشاهدات مزرعه‌ای از یک متر به ۰/۶ متر اصلاح گردید. ضریب کاهش عملکرد مطابق مقادیر توصیه شده مدل (برای مراحل ابتدای، توسعه، میانی و پایانی به‌ترتیب برابر ۰/۴، ۰/۴، ۱/۳۰ و ۰/۵۰ بود) استفاده شد. ضریب تخلیه بحرانی نیز طبق مقادیر توصیه شده مدل برای گیاهی ذرت به‌ترتیب ۰/۵۵، ۰/۵۵ و ۰/۸۰ جایگذاری شد. متوسط ارتفاع گیاه که در مدل به‌صورت پیش‌فرض دو متر بود که طبق اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای با عدد ۳ متر جایگزین شـد. مرحله پنجم، وارد نمودن مشـخصـات خاک مزرعه مطالعاتی بود. در بخش مشخصات خاک پس از انتخاب بافت خاک (لوم)، مشخصات خاک مزرعه که شامل مقدار

[1] Crop Irrigation Requirement

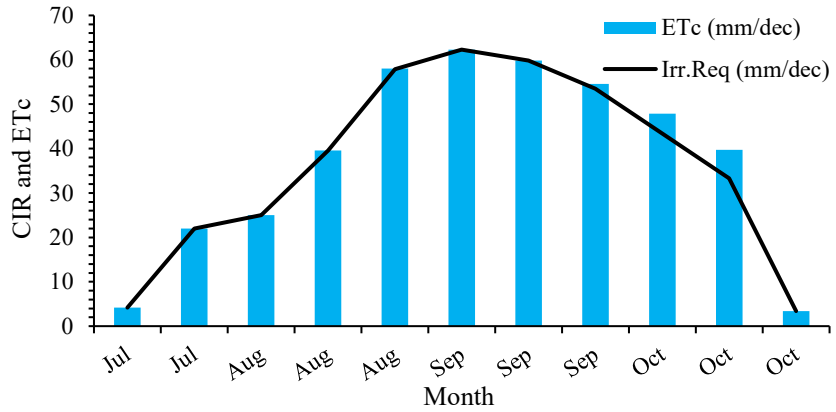
کل آب قابل استفاده در خاک (اختلاف حد رطوبتی ظرفیت زراعی با نقطه پژمردگی)، حداکثر سرعت نفوذ آب در خاک (میلی‌متر بر روز)، حداکثر عمق ریشه (سانتی‌متر)، درصدی از کل آب قابل استفاده گیاه که در ابتدا از محیط ریشه خارج می‌شود (درصد) و کل آب قابل دسترس گیاه در ابتدای آبیاری (میلی‌متر بر متر) به‌ترتیب برابر ۱۰۷/۵، ۴۰ میلی‌متر (طبق عدد توصیه شده مدل برای ذرت)، ۶۰ سانتی‌متر، صفر و ۱۰۷/۵ میلی‌متر بر متر به مدل معرفی شد. تاریخ کاشت و برداشت مطابق با طرح آزمایشی انجام شده در مزرعه مطالعاتی در مدل اصلاح شد. اطلاعات مدیریت آبیاری این مطالعه بر اساس پایش رطوبت در طول فصل رشد، به‌صورت زمانی و کمی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- برنامه‌ریزی آبیاری برای محصول ذرت علوفه‌ای

سال ۱۳۹۸			
زمان آبیاری	FI(mm)	DI80%(mm)	DI60%(mm)
۳۰ تیر	۳۰	۳۰	۳۰
۷ مرداد	۳۰	۳۰	۳۰
۱۴ مرداد	۲۰	۲۰	۲۰
۱۸ مرداد	۱۵/۴۵	۱۲/۳۶	۹/۲۷
۲۱ مرداد	۶/۳	۵/۰۴	۳/۷۸
۲۴ مرداد	۷/۵۶	۶/۰۵	۴/۵۴
۲۷ مرداد	۹/۳	۷/۴۴	۵/۵۸
۳۰ مرداد	۶/۲	۴/۹۶	۳/۷۲
۲ شهریور	۱۲/۲	۹/۷۶	۷/۳۲
۶ شهریور	۱۴/۵۸	۱۱/۶۶	۸/۷۵
۹ شهریور	۱۵/۴۶	۱۲/۳۷	۹/۲۸
۱۳ شهریور	۲۰/۸۷	۱۶/۷۰	۱۲/۵۲
۱۶ شهریور	۱۹/۵۶	۱۵/۶۵	۱۱/۷۴
۱۹ شهریور	۱۷/۱۰	۱۳/۶۸	۱۰/۲۶
۲۳ شهریور	۲۰/۲۸	۱۶/۲۲	۱۲/۱۷
۲۶ شهریور	۱۴/۵۲	۱۱/۶۲	۸/۷۱
۲۹ شهریور	۱۳/۵۰	۱۰/۸۰	۸/۱۰
۱ مهر	۱۷/۵۰	۱۴	۱۰/۵۰
۴ مهر	۱۴/۵۸	۱۱/۶۶	۸/۷۵
۷ مهر	۱۶/۲۵	۱۳	۹/۷۵
۱۱ مهر	۱۸/۲۳	۱۴/۵۸	۱۰/۹۴
۱۵ مهر	۱۷/۵۰	۱۴	۱۰/۵۰
۲۲ مهر	۱۲/۵۰	۱۰	۷/۵۰
۲۶ مهر	۱۵/۶۵	۱۲/۵۲	۹/۳۹
۲۹ مهر	۹/۵۰	۷/۶۰	۵/۷۰
۲ آبان	۱۰/۴۵	۸/۳۶	۶/۲۷
مجموع	**۴۰۵**	**۳۴۰**	**۲۷۵**

نتایج و بحث

شکل (۴) روند تغییرات تبخیر- تعرق برآوردی و نیاز آبیاری گیاه ذرت علوفه‌ای را نشان می‌دهد. میزان تبخیر- تعرق گیاه (ET_c) و نیاز خالص آبی (CWR) محاسبه‌شده توسط مدل CROPWAT 8.0 به‌ترتیب برابر با ۴۱۶/۴ و ۴۰۴/۳ میلی‌متر برآورد شد. این نتایج بیانگر توانایی مناسب مدل CROPWAT 8.0 در برآورد نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک منطقه ورامین است. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مقادیر برآوردشده در محدوده گزارش‌شده توسط Bhat و همکاران (۲۰۱۷) و Herbha و همکاران (۲۰۱۷) قرار دارد که این موضوع قابلیت بالای مدل در شبیه‌سازی نیاز آبی ذرت را تأیید می‌کند. همچنین هم‌راستایی نتایج با یافته‌های Roja و همکاران (۲۰۲۰) و Navatha و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که اگرچه مقدار مطلق تبخیر- تعرق تحت تأثیر شرایط اقلیمی و مدیریتی منطقه قرار دارد، اما الگوی تغییرات نیاز آبی گیاه و حساسیت مراحل رشد به تنش آبی رفتار مشابهی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، نتایج کم‌آبیاری در این پژوهش حاکی از آن است که با کاهش سطح تأمین آب تا ۸۰ و ۶۰ درصد، ضمن کاهش مصرف آب آبیاری، ضریب تنش آبی (Ks) در بخش عمده دوره رشد نزدیک به یک باقی‌مانده است که بیانگر عدم بروز تنش شدید آبی می‌باشد؛ این نتیجه با یافته‌های Champaneri و همکاران (۲۰۲۴) در زمینه افزایش بهره‌وری مصرف آب در شرایط کم‌آبیاری همخوانی دارد. افزون بر این، توافق نتایج این پژوهش با مطالعه Constantin و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که مدل CROPWAT 8.0 نه‌تنها برای ذرت، بلکه برای سایر محصولات زراعی نیز ابزاری قابل اعتماد در شبیه‌سازی نیاز آبی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی آبیاری محسوب می‌شود. در مجموع، نتایج حاصل از این پژوهش در کنار مطالعات پیشین تأیید می‌کند که استفاده از مدل CROPWAT 8.0 می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی مصرف آب و مدیریت پایدار منابع آبی در مناطق دارای محدودیت آب ایفا کند.



شکل ۴- نمودار تغییرات تبخیر – تعرق برآوردی و نیاز آبی در هر ماه از سال در منطقه مورد مطالعه

جدول (۲) برنامه‌ریزی آبیاری برای تیمار آبیاری کامل (FI) را نشـان می‌دهد که شـامل اطلاعات روزانه مربوط به مراحل رشـد گیاه، بارندگی، تبخیر - تعرق، میزان تخلیه رطوبتی خاک، نیاز خالص و ناخالص آبیاری، و دبی جریان آب (Flow) است. در جدول (۲)، ستون Date و Day بیانگر تاریخ و تعداد روزهای پس از کاشت هستند. Stage نشان‌دهندهٔ مرحله رشـد گیاه اسـت که شـامل ابتدایی (Init)، توسـعه (Dev)، میانی (Mid)، و پایانی (End) می‌شـود. Rain مقدار بارندگی روزانه (میلی‌متر) را نمایش می‌دهد که در این تیمار برابر با صفر است، نشان‌دهندهٔ آن است که تنها آبیاری تأمین‌کنندهٔ نیاز آبی گیاه بوده اسـت. Ks ضـریب کاهش تبخیر - تعرق را نشـان می‌دهد که مقدار آن برابر ۱ اسـت، به این معنی که گیاه در شـرایط مطلوب و بدون تنش آبی قرار دارد. ET_a مقدار تبخیر - تعرق واقعی را نشـان می‌دهد که همواره ۱۰۰ درصـد مقدار مورد انتظار تبخیر - تعرق بالقوه را پوشـش می‌دهد. سـتون Depl میزان تخلیه رطوبتی خاک را نمایش می‌دهد که در محدوده مشخصی مدیریت شده است تا از تنش آبی جلوگیری شود. Net Irr مقدار نیاز خالص آبیاری و Gr. Irr مقدار ناخالص آبیاری را نشـان می‌دهند که با در نظر گرفتن تلفات آب تنظیم شـده‌اند. همچنین Flow دبی جریان آب برای تأمین آبیاری را مشـخص می‌کند که در مراحل مختلف رشـد گیاه متفاوت اسـت. در مجموع، این جدول نشان می‌دهد که در طول دوره رشـد، آبیاری با فواصل منظم و به مقدار کافی انجام شده است تا سطح رطوبت خاک در محدوده بهینه باقی بماند و عملکرد گیاه تحت تأثیر تنش آبی قرار نگیرد.

همچنین در جدول (۲)، مقدار تخلیه رطوبتی خاک (Depl) نسـبت به تیمار FI افزایش یافته، به این معنا که رطوبت خاک قبل از اعمال آبیاری بیشـتر کاهش یافته اسـت. این نشـان می‌دهد که فواصـل بین نوبت‌های آبیاری افزایش یافته و

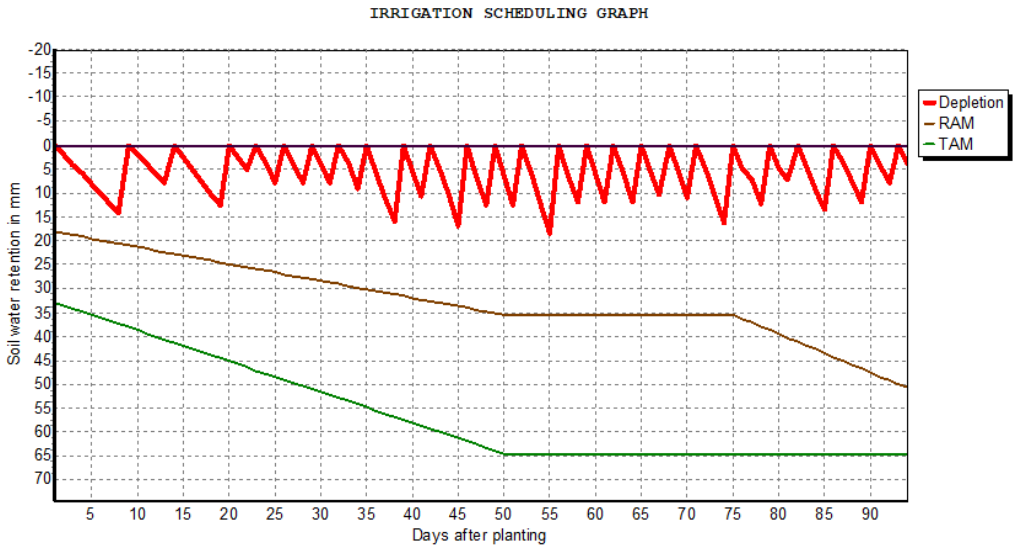
دفعات آبیاری کمتر شده است. با این حال، مقدار ضریب کاهش تبخیر- تعرق (Ks) برابر ۱ باقی مانده است که نشان می‌دهد گیاه دچار تنش آبی شدید نشده و همچنان قادر به حفظ عملکرد خود است. میزان نیاز خالص آبیاری (Net Irr) و آبیاری ناخالص (Gr. Irr) کمتر از تیمار FI است، که بیانگر کاهش مصرف آب و استفاده بهینه از منابع آبی است. این رویکرد نشان می‌دهد که کم‌آبیاری کنترل‌شده می‌تواند ضمن کاهش میزان آب مصرفی، بدون ایجاد تنش شدید آبی در گیاه، به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهینه‌سازی مصرف آب در شرایط کم‌آبی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲- برنامه‌ریزی آبیاری برای تیمار FI

Date	Day	Stage	Rain	Ks	ETa	Depl	Net Irr	Deficit	Loss	Gr. Irr	Flow
			mm	fract.	%	%	mm	Mm	mm	Mm	l/s/ha
19-Jul	1	Init	0	1	100	6	2.1	0	0	2.1	0.24
27-Jul	9	Init	0	1	100	42	16.1	0	0	16.1	0.23
1-Aug	14	Init	0	1	100	25	10.5	0	0	10.5	0.24
7-Aug	20	Dev	0	1	100	33	15	0	0	15	0.29
10-Aug	23	Dev	0	1	100	16	7.5	0	0	7.5	0.29
13-Aug	26	Dev	0	1	100	24	11.9	0	0	11.9	0.46
16-Aug	29	Dev	0	1	100	23	11.9	0	0	11.9	0.46
19-Aug	32	Dev	0	1	100	22	11.9	0	0	11.9	0.46
22-Aug	35	Dev	0	1	100	26	14.5	0	0	14.5	0.56
26-Aug	39	Dev	0	1	100	37	21.1	0	0	21.1	0.61
29-Aug	42	Dev	0	1	100	27	15.8	0	0	15.8	0.61
2-Sep	46	Dev	0	1	100	37	23	0	0	23	0.67
5-Sep	49	Dev	0	1	100	29	18.7	0	0	18.7	0.72
8-Sep	52	Mid	0	1	100	29	18.7	0	0	18.7	0.72
12-Sep	56	Mid	0	1	100	38	24.4	0	0	24.4	0.71
15-Sep	59	Mid	0	1	100	28	17.9	0	0	17.9	0.69
18-Sep	62	Mid	0	1	100	28	17.9	0	0	17.9	0.69
21-Sep	65	Mid	0	1	100	27	17.4	0	0	17.4	0.67
24-Sep	68	Mid	0	1	100	25	15.8	0	0	15.8	0.61
27-Sep	71	Mid	0.6	1	100	25	15.8	0	0	15.8	0.61
1-Oct	75	Mid	0	1	100	33	21.2	0	0	21.2	0.61
5-Oct	79	End	0	1	100	26	16.9	0	0	16.9	0.49
8-Oct	82	End	0	1	100	19	12.1	0	0	12.1	0.47
12-Oct	86	End	0	1	100	27	17.5	0	0	17.5	0.51
16-Oct	90	End	0	1	100	25	15.9	0	0	15.9	0.46
19-Oct	93	End	0	1	100	18	11.9	0	0	11.9	0.46
21-Oct	End	End	0	1	0	6	-	-	-	-	-

شکل (۵)، برنامه زمان‌بندی آبیاری را برای تیمار آبیاری کامل در نرم‌افزار CROPWAT 8.0 نمایش می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده روزهای پس از کاشت و محور عمودی بیانگر حفظ رطوبت خاک بر حسب میلی‌متر است. سه پارامتر کلیدی

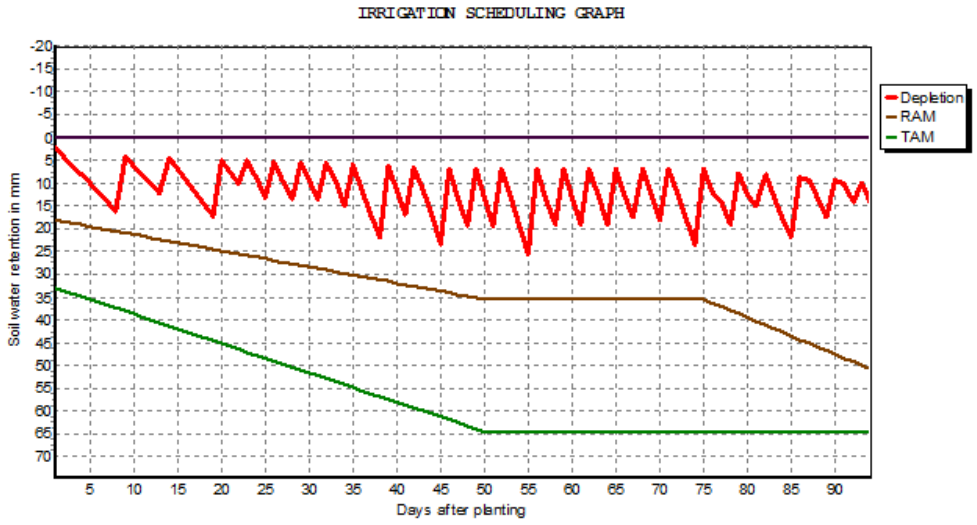
شـــامل تخلیه رطوبتی[۲]، حد دســـترســـی مجاز (RAM)[3] و حداکثر ظرفیت رطوبتی خاک [4](TAM) در نمودار مشـــخص شده‌اند. منحنی قرمز رنگ که نشان‌دهنده میزان تخلیه آب از خاک است، دارای نوساناتی است که بیانگر دوره‌های آبیاری در فواصل منظم است. این نوسانات به دلیل کاهش میزان رطوبت خاک در اثر تبخیر و تعرق گیاه و سپس افزایش آن در نتیجه اعمال آبیاری است. از آنجایی که مقدار تخلیه رطوبتی به ندرت از حد مجاز RAM فراتر می‌رود، نشان می‌دهد که مدیریت آبیاری به‌طور مؤثری اجرا شـــده و گیاه در وضـــعیت مطلوبی از نظر تأمین آب قرار دارد. در بخش‌های پایین‌تر نمودار، دو منحنی RAM و TAM نشـان می‌دهند که ظرفیت نگهداشـت رطوبتی خاک به تدریج کاهش یافته اسـت که می‌تواند ناشـی از افزایش نیاز آبی گیاه در مراحل رشـد و تغییرات در خواص فیزیکی خاک باشـد. منحنی سـبز رنگ که TAM را نشـان می‌دهد، روند کاهشـی دارد که احتمالاً به دلیل کاهش نفوذپذیری خاک یا تغییر در سـاختار آن در طول فصل رشد است. علاوه بر این، منحنی قهوه‌ای که مقدار RAM را مشخص می‌کند، در طی دوره رشد روندی نزولی دارد، که این امر حاکی از افزایش مصرف آب توسط گیاه و کاهش ظرفیت آب قابل دسترس برای آن در خاک است. در مجموع، این نمودار بیانگر یک برنامه آبیاری کارآمد اســـت که از تنش آبی جلوگیری کرده و رطوبت خاک را در محدوده مطلوب برای رشد گیاه حفظ می‌کند.



شکل ۵- نمودار تغییرات رطوبتی در طی رشد برای تیمار FI

[2] Depletion
[3] Readily Available Moisture
[4] Total Available Moisture

شکل (۶) نشان می‌دهد که در تیمار کم‌آبیاری $DI_{80\%}$، نوسانات زیادی در مقدار رطوبت خاک دیده می‌شود که نشان‌دهنده این است که گیاه در معرض کمبود آب قرار می‌گیرد و در بعضی از روزها رطوبت خاک به شدت کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که در بعضی روزها مقدار رطوبت خاک پایین‌تر از مقدار مطلوب گیاه قرار می‌گیرد، که می‌تواند به کاهش رشد یا آسیب به گیاه منجر شود. با توجه به کاهش مقدار رطوبت خاک نسبت به میزان مطلوب (TAM)، این وضعیت می‌تواند تاثیر منفی بر رشد گیاهان داشته باشد، به ویژه در طول دوره‌های خشکی.

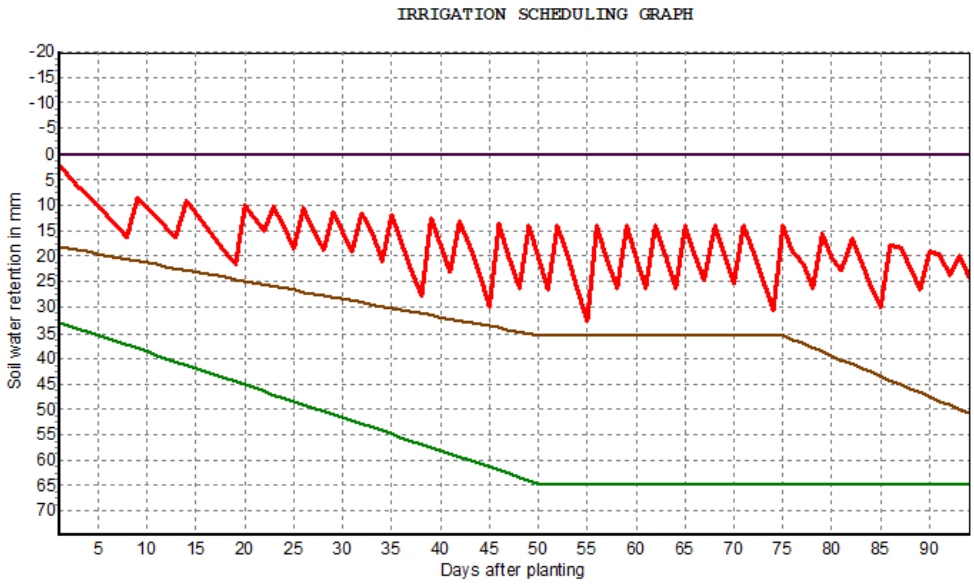


شکل ۶- نمودار تغییرات رطوبتی در طی رشد برای تیمار $DI_{80\%}$

با توجه به شکل (۵)، می‌توان چند راهکار مدیریتی را برای بهبود وضعیت آبیاری و افزایش کارایی آن پیشنهاد داد. نخست، برای کاهش نوسانات زیاد در خط قرمز (Depletion) که نشان‌دهنده کاهش رطوبت خاک است، پیشنهاد می‌شود که آبیاری با فواصل منظم‌تر و به میزان بیشتر انجام شود تا رطوبت خاک همواره در سطحی مناسب باقی بماند و از کاهش شدید رطوبت و وارد شدن به شرایط تنش آبی جلوگیری گردد. همچنین، زمان‌بندی آبیاری باید به دقت بررسی و تنظیم شود، به‌طوری که در روزهایی که کاهش رطوبت خاک زیاد است، آبیاری اضافی انجام شود تا رطوبت خاک به سطح مطلوب بازگردد و گیاه از تنش آبی در امان بماند. در دوره‌های بحرانی که کمبود رطوبت خاک بیشتر از حد معمول است، افزایش حجم آبیاری می‌تواند از آسیب به گیاه جلوگیری کند و موجب تأمین رطوبت مورد نیاز گیاه شود. علاوه بر این، استفاده از پوشش‌های مالچ می‌تواند به حفظ رطوبت خاک کمک کند و تبخیر را کاهش دهد، به‌طوری که نیاز به آبیاری کاهش یابد و نوسانات رطوبت خاک به حداقل برسد. همچنین، استفاده از تکنولوژی‌های آبیاری دقیق مانند

سیستم‌های آبیاری قطره‌ای یا آبیاری هوشمند می‌تواند کمک کند تا بر اساس نیاز واقعی گیاه آبیاری صورت گیرد و از هدررفت آب جلوگیری شود. در نهایت، توصیه می‌شود که شرایط خاک و گیاه به‌طور مستمر مانیتور شده و بر اساس داده‌های به‌دست آمده از وضعیت رطوبت خاک، نیاز آبی گیاه، و شرایط جوی، برنامه آبیاری به‌طور مداوم تنظیم گردد تا تصمیمات آبیاری به دقت اتخاذ شوند و از آسیب به گیاه جلوگیری شود.

با توجه به شکل (۷) که برای تیمار کم‌آبیاری در سطح ۶۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه ذرت علوفه‌ای است، می‌توان مشاهده کرد که در این شرایط رطوبت خاک در طول زمان کاهش زیادی را تجربه می‌کند و نوسانات شدید در خط قرمز (Depletion) به وضوح مشاهده می‌شود. این نشان‌دهنده کاهش سریع و پیوسته رطوبت خاک است که در بسیاری از موارد از سطح مطلوب (TAM) پایین‌تر می‌رود، که به معنای تنش آبی برای گیاه است. همچنین خط بنفش (RAM) که نشان‌دهنده نیاز آبی گیاه است، ثابت باقی می‌ماند و از آنجا که رطوبت خاک به طور مکرر از مقدار مطلوب (TAM) فاصله می‌گیرد، این امر می‌تواند تأثیر منفی بر رشد گیاه بگذارد. با توجه به این شرایط، راهکارهای مدیریتی برای بهبود وضعیت شامل چند نکته مهم است. نخست، پیشنهاد می‌شود که زمان‌بندی آبیاری به‌طور دقیق‌تری تنظیم شود تا در روزهایی که رطوبت خاک از حد مطلوب پایین‌تر می‌رود، آبیاری به موقع و کافی انجام گیرد. این اقدام می‌تولند به جلوگیری از تنش آبی و کاهش رشد گیاه کمک کند. دوم، افزایش حجم آبیاری در روزهایی که نوسانات شدید در رطوبت خاک مشاهده می‌شود، می‌تواند از بروز مشکلات ناشی از کمبود شدید آب جلوگیری کند. همچنین استفاده از پوشش‌های مالچ برای حفظ رطوبت خاک و کاهش تبخیر می‌تواند در این شرایط بسیار مفید باشد. این پوشش‌ها کمک می‌کنند تا نیاز به آبیاری کاهش یابد و نوسانات رطوبت خاک کمتر شود. علاوه بر این، توصیه می‌شود که از سیستم‌های آبیاری دقیق و هوشمند استفاده شود تا میزان آب مصرفی به‌طور دقیق‌تری مطابق با نیاز گیاه تنظیم گردد و از هدررفت آب جلوگیری شود. در نهایت، پایش مستمر وضعیت رطوبت خاک و نیاز آبی گیاه در طول فصل رشد و تنظیم آبیاری بر اساس شرایط واقعی موجود می‌تواند به بهبود کارایی آبیاری و رشد گیاه کمک کند.



شکل ۷- نمودار تغییرات رطوبتی در طی رشد برای تیمار $DI_{60\%}$

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف برآورد دقیق نیاز آبی محصول ذرت علوفه‌ای و تدوین برنامه آبیاری بهینه در منطقه ورامین انجام گرفت. در شرایط کمبود منابع آب و تغییرات اقلیمی، مدیریت هوشمندانه و علمی منابع آبی در کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده دقیق از آب آبیاری و تعیین مقادیر بهینه آن نه تنها منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در منابع آب می‌شود، بلکه می‌تواند بهره‌وری و عملکرد محصول را نیز افزایش دهد. در این پژوهش، مدل شبیه‌سازی CROPWAT 8.0 به‌عنوان یک ابزار معتبر در ارزیابی نیاز آبی گیاهان به کار گرفته شد. این مدل با استفاده از داده‌های اقلیمی منطقه، شامل دما، تابش، رطوبت نسبی و سرعت باد، توانست نیاز آبی گیاه ذرت را با دقت مناسبی تخمین بزند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) و نیاز خالص آبی (CWR) برای ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب ۴۱۶/۴ و ۴۰۴/۳ میلی‌متر در دوره رشد محاسبه شده‌اند. همچنین، میزان آب آبیاری ناخالص مورد نیاز برای ذرت در سطوح مختلف تأمین نیاز آبی (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) به‌ترتیب ۴۰۳، ۳۸۶ و ۳۷۶ میلی‌متر به‌دست آمد. با توجه به یافته‌های این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های تصمیم‌یار مانند CROPWAT می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف آب ایفا کند. در ادامه، پیشنهاد می‌شود بررسی توأمان پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک (مانند بافت، ظرفیت نگهداری رطوبت، و نفوذپذیری) نیز در برنامه‌ریزی آبیاری لحاظ شود، چرا که تعامل مؤثر میان آب و خاک، کلید اصلی توسعه پایدار در کشاورزی مناطق نیمه‌خشک نظیر ورامین است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، توصیه می‌شود مدل CROPWAT 8.0 به‌عنوان ابزاری دقیق، کاربردی و قابل اعتماد برای برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این مدل می‌تواند برنامه‌ریزی آبیاری را بهینه سازد و به مدیریت بهتر منابع محدود آبی کمک کند. این امر در شرایط فعلی کم‌آبی و افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی، اهمیت بسیار بالایی دارد. در فرآیند برنامه‌ریزی آبیاری باید توجه ویژه‌ای به زمان‌بندی و حجم دقیق آب مصرفی شود، به‌خصوص در شرایط کم‌آبیاری. تنظیم صحیح زمان آبیاری بر اساس مراحل رشد گیاه و شرایط اقلیمی منطقه می‌تواند از ایجاد تنش آبی جلوگیری کرده و رشد و عملکرد گیاه را بهینه نماید. علاوه بر این، انتخاب روش‌های مناسب آبیاری، مانند آبیاری قطره‌ای، بارانی تحت فشار یا آبیاری هوشمند، که امکان کنترل دقیق‌تر مصرف آب را فراهم می‌کنند، می‌تواند باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب شود و بهره‌وری آب را افزایش دهد. یکی از مهم‌ترین نکات، استفاده مستمر و پویا از داده‌های رطوبت خاک و شرایط محیطی برای اصلاح برنامه‌های آبیاری است. این کار می‌تواند با بهره‌گیری از حسگرهای رطوبت خاک، ایستگاه‌های هواشناسی محلی و سامانه‌های مانیتورینگ هوشمند انجام شود تا برنامه آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه و ظرفیت نگهداری آب خاک تنظیم شود. این رویکرد باعث کاهش هدررفت آب، جلوگیری از آبیاری بیش از حد یا کم‌آبیاری و نهایتاً افزایش بازدهی تولیدات کشاورزی خواهد شد. علاوه بر موارد فوق، توصیه می‌شود مطالعات تکمیلی بر روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق هدف انجام شود تا شناخت دقیق‌تری از ظرفیت نگهداری رطوبت، نفوذپذیری و وضعیت مواد غذایی خاک به‌دست آید. این اطلاعات می‌تواند به طراحی بهتر برنامه‌های آبیاری کمک کرده و هم‌چنین نقش مهمی در حفظ کیفیت و سلامت خاک ایفا نماید. تعامل صحیح بین آب و خاک به ویژه در مناطق نیمه‌خشک، کلید اصلی توسعه پایدار کشاورزی و حفظ منابع طبیعی است. در نهایت، آموزش کشاورزان و بهره‌برداران در زمینه استفاده بهینه از منابع آبی و کاربرد فناوری‌های نوین آبیاری اهمیت فراوانی دارد. فراهم آوردن دسترسی به اطلاعات علمی و فنی و ترویج روش‌های کشاورزی پایدار می‌تواند در تحقق مدیریت بهتر منابع آب و افزایش تولید پایدار نقش مؤثری ایفا کند.

منابع مورد استفاده

Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56(97), e156.

Bhat, S.A., Pandit, B.A., Khan, J.N., Kumar, R., & Jan, R. (2017). Water requirements and irrigation scheduling of maize crop using CROPWAT model. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 6: 1662-70.

Champaneri, D.D., Desai, K.D., Ahlawat, T.R., Shrivastava, A., & Pampaniya, N.K. (2024). Assessment of CROPWAT 8.0 model accuracy under deficit irrigation scheduling: A sustainable path toward smart water supply. *Water Supply*, 24(10), 3423-3437.

Constantin, D.M., Mincu, F.I., Diaconu, D.C., Burada, C.D., & Bălțățeanu, E. (2024). Water Management in Wheat Farming in Romania: Simulating the Irrigation Requirements with the CROPWAT Model. *Agronomy*, 15(1), 61.

FAO, (Food and Agriculture Organization). 2009. *CROPWAT Software, Food and Agriculture Organization, Land and Water Division*; Available at: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.ht

Gong, X., Qiu, R., Sun, J., Ge, J., Li, Y., & Wang, S. (2020). Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation. *Agricultural Water Management,* 235: 106154.

Hajirad, I., Mirlatifi, S. M., Dehghanisanij, H., & Mohammadi, S. (2021). Determining yield response factor (ky) of silage maize under different irrigation levels of pulsed and continuous irrigation management. *Central Asian Journal of Plant Science Innovation*, *1*(4), 214-220.

HERBHA, N., VORA, H., & Kunapara, A.N. (2017). Simulation of Crop Water Requirement and Irrigation Scheduling for Maize Crop Using FAO-CROPWAT 8.0 in Panchmahal Region of Middle Gujarat. *Trends in Biosciences*, 10: 9387-9391.

Hess, T., 2005. Crop water requirements. Water and Agriculture, WCA infoNET.

Lamsal, G., & Marston, L.T. (2025). Monthly crop water consumption of irrigated crops in the United States from 1981 to 2019. *Water Resources Research*, 61(2), e2024WR038334.

Moncada, J.V.L., de Oliveira, N.P.R., Freitag, L.V., Oliveira, D.S., Feletti, R.C.G., da Silva, P.F., & Júnior, J.H.C. (2024). Simulation of the soybean yield as a function of water sensitivity in rainfed cultivation using the CROPWAT model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-16.

Navatha, N., Roja, M., & Umareddy, R. (2020). Estimation of crop water requirement of maize and cotton using FAO CROPWAT 8.0 model in Jagtial district. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 2:718-724.

Roja, M., Deepthi, C., & Devender Reddy, M. (2020). Estimation of Crop Water Requirement of Maize Crop Using FAO CROPWAT 8.0 Model. *Indian Journal of Pure and Applied Biosciences*, 8: 222-228.

Scobie, M., Freebairn, D., Mushtaq, S., & Donahue, D. (2025). How Much Is Enough? Data Requirements for Practical Irrigation Decision-Making in Vietnamese Coffee Production. *Water*, 17(5), 646.

Somani, P., Charhate, S., & Garudkar, A. (2025). Irrigation Scheduling of Pawale Project using FAO-CROPWAT 8.0. *Recent Patents on Engineering*, 19(1), E021123223060.