



Journal of Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: <https://hws.tabrizu.ac.ir/?lang=en>



Research Article

Optimizing Irrigation Management of Sweet Corn Using AquaCrop: Analysis of Deficit Irrigation Scenarios and Transplanting Age Effects

Ardalan Zolfagharan ^{ID}*, Seyed Abolghasem Haghayeghi-Moghadam²

1,2- Academic member of Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran.

Received: March 12, 2025

Accepted: May 12, 2025

Revised: May 27, 2025

Published online: September 21, 2025

*Corresponding Author's Email: azolfagharan@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Biomass,
Crop yield potential,
Moisture stress,
Semi-arid climate,
Transplanting,
Water resource
management

Background and Objectives

Sweet corn is a vital crop in global agriculture, contributing significantly to food security and farmers' livelihoods. In arid and semi-arid regions, where water resources are limited, optimizing irrigation management is crucial for sustainable agricultural production. Advanced technologies, such as crop simulation models, play a pivotal role in understanding crop responses to water stress and improving water use efficiency. The AquaCrop model, developed by the Food and Agriculture Organization (FAO), is a widely recognized tool for simulating crop yield under various irrigation conditions. This study aimed to evaluate the performance of the AquaCrop model in simulating sweet corn yield under different irrigation levels and transplanting ages in the semi-arid and cold climate of Khorasan Razavi Province, Iran. Additionally, the study sought to analyze various deficit irrigation scenarios to identify the most effective strategy for water management in sweet corn cultivation.

Methodology

The research was conducted as a field experiment at the Torogh Research Station in Mashhad during two growing seasons (spring and summer). The experiment was designed as a split-plot arrangement within a randomized complete block design with four replications. The main plots consisted of three irrigation levels: 75%, 100%, and 125% of the full crop water requirement. The subplots included two transplanting ages: 20 and 30 days. Data on crop cover, ear yield, and biomass were collected throughout the growing season. The AquaCrop model was calibrated and validated using meteorological data, soil properties, irrigation management, and crop characteristics. Key statistical indices, including normalized root mean square error (NRMSE), coefficient of determination (R^2), Willmott's index of agreement (d), coefficient of residual mass (CRM), and mean error (ME), were used to evaluate the model's accuracy. Various deficit

How to cite:

Zolfagharan, A. Haghayeghi-Moghadam, SA. *Optimizing Irrigation Management of Sweet Corn Using AquaCrop: Analysis of Deficit Irrigation Scenarios and Transplanting Age Effects*. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (2):15-30. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.65774.1013>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



irrigation scenarios, such as 10% to 40% water reduction and irrigation cutoff at different growth stages, were simulated to assess their impact on crop performance.

Findings

The results demonstrated that the AquaCrop model had acceptable accuracy in simulating ear yield and biomass under full irrigation conditions (100% and 125% of water requirement), with NRMSE values below 20%. However, under severe water deficit conditions (75% of water requirement), the model tended to overestimate ear yield and underestimate biomass, highlighting the need for further improvement in simulating extreme water stress. Analysis of deficit irrigation scenarios revealed that a 20% reduction in irrigation (80% of full water requirement) during the growing season did not significantly affect yield and could be recommended as an optimal strategy for water resource management .

Furthermore, the study found that sweet corn grown in loamy soil achieved the highest yield, while clay soil resulted in the lowest yield, emphasizing the importance of soil texture in crop performance. Twenty-day-old transplants generally outperformed 30-day-old transplants in terms of yield, but under water deficit conditions, 30-day-old transplants also demonstrated acceptable performance, suggesting their suitability for water-limited environments. The model's ability to simulate crop growth and yield under varying conditions was further validated by the strong correlation between observed and simulated data, as indicated by high R^2 values and low RMSE.

The simulation results using the AquaCrop model indicated that transplanting maize cultivation in Khorasan Razavi Province has a relatively high production potential, with the highest yields observed in Kashmar and Sarakhs counties and the lowest yields in Fariman and Quchan counties.

Conclusion

This study underscores the effectiveness of the AquaCrop model as a reliable tool for simulating sweet corn yield under different irrigation levels and transplanting ages. The findings suggest that a 20% reduction in irrigation can be implemented without significantly compromising yield, offering a practical solution for water resource management in semi-arid regions. However, the model's limitations in simulating severe water stress conditions indicate the need for further refinement, particularly in capturing the complex interactions between water deficit and crop physiological responses.

The results also highlight the importance of soil texture and transplanting age in optimizing sweet corn production. Loamy soils and 20-day-old transplants were found to be the most favorable conditions for achieving high yields, although 30-day-old transplants showed resilience under water deficit conditions. These insights can guide farmers and water resource managers in adopting sustainable irrigation practices to enhance crop productivity in water-scarce environments.

For future research, it is recommended to investigate the effects of additional environmental factors, such as soil moisture dynamics, solar radiation, and agronomic management practices, on sweet corn performance. Moreover, expanding the AquaCrop model's capabilities to simulate non-water stresses, such as salinity and high temperature, would further enhance its applicability in diverse agricultural systems. By integrating these improvements, the AquaCrop model can serve as an even more powerful tool for optimizing irrigation management and ensuring food security in the face of climate change and water scarcity.

The findings of this study suggest that the warmer regions of Khorasan Razavi Province have a higher potential for transplanting maize production. Additionally, the spatial distribution of cob yield and biomass across the province revealed that climatic differences significantly influence crop performance.



نشریه دانش آب و هیدرولیک

شاپا الکترونیکی: ۶۱۱۴-۳۰۹۲

درگاه نشریه: hws.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مدیریت آبیاری ذرت شیرین با استفاده از AquaCrop: تحلیل سناریوهای کم آبیاری و

تأثیر سن نشاء

اردلان ذوالفقاران^{۱*}، سید ابوالقاسم حقایقی مقدم^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷

۱ و ۲-استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azolfagharan@gmail.com

چکیده

کلمات کلیدی

اقلیم نیمه خشک،

تنش رطوبتی،

پتانسیل تولید

محصول،

زیست توده،

کشت نشایی،

مدیریت منابع آبی

این پژوهش با هدف ارزیابی توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت شیرین تحت شرایط مختلف آبیاری و سن‌های مختلف نشاء انجام شد. آزمایش به صورت کشت بهاره و تابستانه در خاک سیلتی لومی و در اقلیم نیمه‌خشک و سرد در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. داده‌های مورد استفاده از یک آزمایش میدانی شامل سه سطح آبیاری (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی کامل با روش مستقیم) و دو سن نشاء (۲۰ و ۳۰ روزه) در سال ۱۳۹۷ استخراج شدند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی) از دقت قابل قبولی برخوردار است ($NRMSE < 20\%$). با این حال، در شرایط کمبود آب (۷۵ درصد نیاز آبی)، مدل عملکرد بلال را بیشتر و زیست‌توده را کمتر از حد برآورد کرد که نشان‌دهنده نیاز به بهبود مدل در شرایط تنش رطوبتی است. شبیه‌سازی عملکرد بلال و زیست‌توده با استفاده از مدل AquaCrop نشان داد که در سال‌های با دمای بالاتر (حدود ۳۲ درجه سانتی‌گراد)، افزایشی در حدود ۲۰ درصد در عملکرد بلال و زیست‌توده نسبت به سال‌های با دمای پایین‌تر (حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد) مشاهده می‌شود. تحلیل سناریوهای مختلف آبیاری نشان داد که کاهش ۲۰ درصدی میزان آبیاری (۸۰ درصد نیاز آبی) در طول فصل زراعی، تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد نداشت و می‌تواند به عنوان یک راهکار بهینه در مدیریت منابع آبی پیشنهاد شود.



مقدمه

ذرت شیرین نه تنها به عنوان یک محصول غذایی اصلی در امنیت غذایی و بازارهای کشاورزی جهانی نقش حیاتی ایفا می کند (شاکیا و همکاران ۲۰۲۰)، بلکه در کشورهای در حال توسعه نیز به دلیل جبران بخشی از نیاز غذایی کلیدی و محتوای قند بالا، جایگاه ویژه ای دارد. با این حال، تولید پایدار این محصول در مناطق خشک و نیمه خشک، که با محدودیت منابع آب و نوسانات دمایی روبه رو است، نیازمند مدیریت بهینه آبیاری است. در این راستا، مدل AquaCrop توسعه یافته توسط FAO (استدوتو و همکاران ۲۰۱۲)، به عنوان ابزاری کارآمد برای شبیه سازی عملکرد ذرت شیرین تحت سطوح مختلف آبیاری شناخته شده و در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری، دقت قابل قبولی در پیش بینی عملکرد نشان داده است. اما چالش اصلی در بکارگیری این مدل، ناتوانی آن در شبیه سازی اثرات همزمان تنش های غیرآبی مانند دمای بالا است (بای و همکاران ۲۰۲۱)، محدودیتی که به ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه خشک در حال توسعه، جایی که ذرت شیرین به عنوان محصولی استراتژیک کشت می شود، می تواند برنامه ریزی برای افزایش تولید را تحت تأثیر تغییرات اقلیمی مختل کند. بنابراین، بهبود مدل برای در نظر گرفتن تعامل تنش رطوبتی و حرارتی، نه تنها دقت پیش بینی ها را افزایش می دهد، بلکه به بهینه سازی مدیریت آب در جهت تضمین پایداری تولید این محصول کمک می کند.

ریچی و همکاران (۱۹۹۳)، رودس و همکاران (۱۹۹۲)، هیلل (۱۹۹۸)، برادی و ویل (۲۰۰۸)، و جونز (۲۰۰۳) همگی تأکید کردند که خاک های لومی (با بافت متوسط) به دلیل تعادل مناسب بین ظرفیت نگهداری آب و زهکشی، بیشترین عملکرد ذرت را دارند. در مقابل، خاک های رسی (با بافت سنگین) به دلیل محدودیت در تهویه و زهکشی، عملکرد کمتری دارند. راس و همکاران (۲۰۰۹) تأیید کردند که مدل AquaCrop در شرایط تنش آبی ممکن است دقت کمتری داشته باشد، زیرا مدل به طور پیش فرض برای شرایط بدون تنش یا تنش ملایم طراحی شده است. نویسندگان پیشنهاد می کنند که برای بهبود دقت مدل در شرایط تنش شدید آب، پارامترهای گیاهی مرتبط با پاسخ گیاه به تنش باید به دقت واسنجی شوند. هسیائو و همکاران (۲۰۰۹) نیز نشان دادند که مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد ذرت در شرایط تنش آبی ممکن است نیاز به تنظیم پارامترهای خاصی مانند حساسیت گیاه به تنش آب و میزان کاهش فتوسنتز تحت تنش داشته باشد. نویسندگان تأکید می کنند که واسنجی دقیق این پارامترها می تواند دقت مدل را در شرایط تنش آبی بهبود بخشد.

کشت نشایی ذرت شیرین به عنوان یک استراتژی مهم در بهبود کارایی مصرف آب و افزایش تولید در شرایط کم آبیاری مورد بحث قرار گرفته است (ژانگ و ونگ ۲۰۲۲). تحقیقات منصوری و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که میزان آب مصرفی به طور مستقیم بر عملکرد گیاهان و به ویژه ذرت شیرین تأثیر می گذارد. احمدی و سپاسخواه (۲۰۱۶) نیز به ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد ذرت در شرایط کم آبیاری در یک منطقه نیمه خشک پرداختند و نشان دادند که مدل می تواند با دقت قابل قبولی عملکرد ذرت را در شرایط مختلف آبیاری پیش بینی کند. خان و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که سن نشاء و سطوح مختلف آبیاری تأثیر قابل توجهی بر رشد و محصول نهایی ذرت شیرین دارند. لی و همکاران (۲۰۲۳) نیز تأثیر سطوح مختلف کم آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) بر عملکرد ذرت شیرین را بررسی کردند و دریافتند که کاهش ۲۵ درصدی آب دهی (۷۵ درصد نیاز آبی) تأثیر کمی بر عملکرد بلال دارد، اما کاهش ۵۰ درصدی باعث کاهش قابل توجه عملکرد می شود.

گارسیا-ویلا و فررس (۲۰۱۲) نیز تأیید کردند که کم آبیاری متوسط (۲۰٪ کاهش آب) می تواند عملکرد و بهره وری آب را در کشت ذرت به طور همزمان بهینه کند. با این حال، کاهش بیشتر آب (۳۰٪ و ۴۰٪) منجر به کاهش چشمگیر عملکرد می شود. هسیائو و همکاران (۲۰۰۹) و استدوتو و همکاران (۲۰۱۲) تأیید کردند که کم آبیاری متوسط (۲۰٪ کاهش آب) می تواند عملکرد و بهره وری آب را در کشت ذرت بهبود بخشد، اما کم آبیاری شدید (۳۰٪ و ۴۰٪ کاهش آب) منجر به کاهش عملکرد شدید می شود. اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان دادند که کم آبیاری متوسط (۲۰٪ کاهش آب) می تواند عملکرد و بهره وری آب را در کشت گندم بهبود بخشد، اما کم آبیاری شدید (۳۰٪ و ۴۰٪ کاهش آب) منجر به کاهش عملکرد شدید می شود.

در نهایت، تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی می تواند تأثیر منفی بر عملکرد ذرت شیرین داشته باشد (لول و همکاران ۲۰۱۱). ونگ و ژانگ (۲۰۲۳) نشان دادند که افزایش دما در مناطق گرم تر باعث افزایش عملکرد بلال می شود، اما کاهش بارندگی تأثیر منفی بر عملکرد دارد. چن و ژنگ (۲۰۲۲) نیز به بررسی کشت نشایی ذرت شیرین در مناطق مختلف اقلیمی پرداختند و دریافتند که کشت نشایی در مناطق نیمه خشک و سرد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است، اما در مناطق گرم تر هزینه های تولید افزایش می یابد. گارسیا و فریرز (۲۰۲۳) تأکید کردند که مدل AquaCrop در شبیه سازی تنش های رطوبتی دقت بالایی دارد، اما در شرایط تنش شدید رطوبتی ممکن است دقت آن کاهش یابد. اسمیت و جانسون (۲۰۲۳) نیز نشان دادند

شکل ۱- موقعیت مکانی محل اجرای طرح داده‌های هواشناسی

بر اساس داده‌های ایستگاه اداره کل هواشناسی مشهد، توسط بارندگی سالانه منطقه ۲۵۴ میلی متر، حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق به ترتیب ۳۱ و ۷ درجه سانتی گراد، متوسط حداکثر و حداقل درجه حرارت به ترتیب برابر ۲۷ و ۱۲ درجه سانتی گراد می‌باشد.

مشخصات طرح

در این آزمایش، کرت‌های اصلی شامل سه سطح تأمین آب آبیاری (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز کامل آبی) و کرت‌های فرعی شامل دو روش کشت نشاء (نشاء ۲۰ روزه و نشاء ۳۰ روزه) بودند. نشاء‌های ۲۰ و ۳۰ روزه به ترتیب به مدت ۲۰ و ۳۰ روز در گلخانه نگهداری و سپس به مزرعه منتقل شدند. از رقم فوق‌شیرین Basin برای کشت ذرت استفاده شد. ابعاد زمین آزمایش ۴۰ × ۳۰ متر و هر کرت شامل ۴ خط کاشت با فاصله ردیف‌های ۷۵ سانتی‌متر و طول ۸ متر با تراکم ۷۶۰۰۰ بوته در هکتار بود. در طول فصل رشد، عملیات زراعی لازم (کوددهی، تنک و وجین) در زمان مناسب انجام شد.

محاسبه حجم آب آبیاری

حجم آب لازم بر اساس تأمین کسر رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی در منطقه توسعه ریشه، با استفاده از کنتور حجمی به تیمارها داده شد. برای این منظور، میزان رطوبت موجود در خاک روزانه توسط رطوبت‌سنج الکترومغناطیسی (TDR) که میله‌های آن به صورت عمودی در خاک قرار گرفته بودند، اندازه‌گیری شد. با مشخص شدن عمق موثر ریشه گیاه و ظرفیت زراعی (FC) آب مورد نیاز برای آبیاری در آن نوبت محاسبه و در اختیار گیاه قرار گرفت (روش مستقیم محاسبه نیاز آبی با استفاده از رطوبت خاک). به منظور اطمینان از توزیع دقیق و یکنواخت آب در بین تیمارهای آبیاری، عملیات آبیاری با استفاده از نوارهای تیپ انجام گردید. در زمان برداشت، پس از حذف دو ردیف کناری و ۰/۵ متر از حاشیه ابتدایی، بوته‌های دو ردیف وسط در ۵ متر طول هر کرت شمارش شد و تعداد بلال در هر بوته مشخص گردید.

معرفی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop یک مدل سه‌فازی است که برای شبیه‌سازی رشد گیاه و تأثیر آب بر رشد آن توسعه یافته است. این مدل پارامترهای مختلفی را در نظر می‌گیرد، از جمله شرایط اتمسفری (مانند بارندگی، تابش خورشیدی، و سرعت باد)، نوع گیاه و شرایط آن، مدیریت زمین کشاورزی (مانند آبیاری، مالچ‌پاشی، و کوددهی) و ویژگی‌های خاک و سطح آب زیرزمینی.

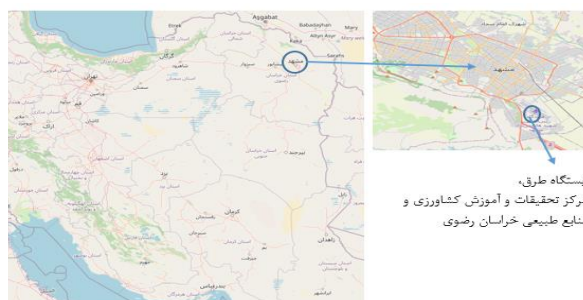
که خاک‌های سیلتی لومی بهترین عملکرد را در کشت ذرت شیرین در مناطق نیمه‌خشک دارند.

این پژوهش با هدف ارزیابی توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت شیرین تحت شرایط مختلف آبیاری و سن‌های مختلف نشاء انجام شد. اهداف اصلی این تحقیق عبارتند از: ۱- ارزیابی دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت شیرین تحت سطوح مختلف آبیاری (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی کامل). ۲- تحلیل تأثیر سن نشاء (۲۰ و ۳۰ روزه) بر عملکرد ذرت شیرین در شرایط مختلف آبیاری. ۳- بررسی سناریوهای کم‌آبیاری و تعیین سطح بهینه آبیاری که کمترین تأثیر منفی بر عملکرد محصول داشته باشد. نوآوری این پژوهش در چند محور اساسی قابل تشخیص است. نخست، کاربرد مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت شیرین به‌عنوان محصولی نسبتاً کمتر بررسی‌شده در مطالعات مدل‌سازی، وجه تمایز مهمی را نسبت به پژوهش‌های پیشین ایجاد می‌کند. دوم، در این مطالعه برای نخستین بار تأثیر هم‌زمان دو عامل مدیریتی شامل سن نشاء و سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد ذرت شیرین با استفاده از مدل AquaCrop مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ ترکیبی که در کمتر پژوهشی به‌صورت توأمان بررسی شده است. سوم، تحلیل پاسخ عملکرد ذرت شیرین به دماهای مختلف محیطی با تکیه بر شبیه‌سازی مدل، امکان ارزیابی حساسیت عملکرد به تغییرات اقلیمی را فراهم کرده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آزمایش‌ها به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در دو فصل زراعی بهار و تابستان در اراضی ایستگاه تحقیقاتی طرق در مشهد و در خاکی با بافت سیلتی لوم در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی (ایستگاه طرق) واقع در ۵ کیلومتری جنوب شرقی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶° و ۱۳' شمالی و طول جغرافیایی ۵۹° و ۴۰' شرقی و با ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است.



به عوامل دیگری مانند نوع خاک، شرایط اقلیمی و مدیریت زراعی نیز وابسته است. سناریوهای زیر به منظور انتخاب سناریوی برتر برای اعمال مدیریت کم آبیاری در نظر گرفته شدند: ۱- اعمال ۱۰٪ کم آبیاری از ابتدا تا انتهای فصل رشد (Scen1)، ۲- اعمال ۲۰٪ کم آبیاری از ابتدا تا انتهای فصل رشد (Scen2)، ۳- اعمال ۳۰٪ کم آبیاری از ابتدا تا انتهای فصل رشد (Scen3)، ۴- اعمال ۴۰٪ کم آبیاری از ابتدا تا انتهای فصل رشد (Scen4)، ۵- قطع سه نوبت آبیاری پس از استقرار و سبز شدن گیاه (Scen5)، ۶- قطع سه نوبت آبیاری آخر (Scen6)، ۷- قطع سه نوبت آبیاری در میانه دوره رشد (Scen7) و ۸- قطع یکدورمیان آبیاری (Scen8) استفاده از مدل AquaCrop در کشت نشایی ذرت شیرین در این پژوهش، از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط کشت نشایی استفاده شد. برای واسنجی مدل، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی عملکرد بلال، عملکرد زیست‌توده و پوشش گیاهی (Crop Cover) در تیمارهای نشایی ۲۰ و ۳۰ روزه و سطوح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی در کشت بهاره استفاده گردید.

واسنجی مدل

برای واسنجی مدل، ابتدا فایل‌های مربوط به اطلاعات هواشناسی، گیاه (با استفاده از فایل پیش‌فرض مدل برای ذرت)، مدیریت آبیاری، خصوصیات خاک و شرایط اولیه رطوبت خاک وارد مدل شدند. پس از اجرای مدل، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مزرعه‌ای مقایسه گردید. برای بهبود دقت مدل، پارامترهای گیاهی در فایل پیش‌فرض به تدریج تعدیل شدند تا بهترین تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده حاصل شود.

فرآیند واسنجی به صورت مرحله‌ای انجام شد:

۱. پوشش گیاهی (Crop Cover): در مرحله اول، مدل بر اساس داده‌های پوشش گیاهی واسنجی شد.
۲. عملکرد بلال: در مرحله دوم، مدل واسنجی‌شده در مرحله اول، بر اساس داده‌های عملکرد بلال مجدداً تنظیم گردید.
۳. وزن زیست‌توده: در مرحله سوم، مدل واسنجی‌شده در مراحل قبلی، بر اساس داده‌های وزن زیست‌توده واسنجی نهایی شد.

پارامترهای گیاهی واسنجی‌شده برای کشت نشایی ذرت در مدل AquaCrop در جدول ۱ ارائه شده است.

صحت‌سنجی مدل:

برای ارزیابی دقت مدل AquaCrop، داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های اندازه‌گیری‌شده از تیمارهای نشایی ۲۰ و ۳۰ روزه در سطوح مختلف آبیاری (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز

در این پژوهش، از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط کشت نشایی استفاده شد. برای واسنجی مدل، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی عملکرد بلال، عملکرد زیست‌توده و پوشش گیاهی (Crop Cover) در تیمارهای نشایی ۲۰ و ۳۰ روزه و سطوح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی در کشت بهاره استفاده گردید.

آنالیز حساسیت مدل AquaCrop

به منظور بررسی اثر تغییرات پارامترهای کلیدی مدل بر خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده (عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت شیرین)، آنالیز حساسیت مدل AquaCrop انجام شد. این تحلیل به شناسایی پارامترهایی کمک می‌کند که بیشترین تأثیر را بر دقت مدل داشته و در شرایط مختلف آبیاری و سن نشاء، رفتار مدل را کنترل می‌کنند.

پارامترهای مورد بررسی و روش تحلیل

پنج پارامتر مؤثر شامل کارایی استفاده از آب (WP)، حداکثر پوشش سبز گیاهی (CCx)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، عمق مؤثر ریشه‌زایی (Zr) و ضریب پاسخ عملکرد به تنش رطوبتی (Ky) به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. این پارامترها در مدل AquaCrop به میزان $10 \pm$ ، $20 \pm$ و $30 \pm$ درصد از مقدار پایه تغییر داده شدند و خروجی مدل برای شرایط آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و سن نشاءهای ۲۰ و ۳۰ روزه تحلیل شد.

محاسبه تبخیر و تعرق

مدل AquaCrop، تبخیر و تعرق (ET) را محاسبه نمی‌کند؛ بنابراین از یک برنامه جداگانه به نام ET Calculator (نسخه ۱/۳) جهت محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از نرم‌افزار ET0 Calculator و به روش فائو پنمن-مانتیت برآورد گردید. داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل سرعت باد، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا به صورت روزانه بودند. در صورت عدم وجود داده‌های روزانه، ورودی‌ها به صورت داده‌های ده‌روزه یا ماهیانه استفاده شدند و برنامه با استفاده از روش درونیایی، تبخیر-تعرق مرجع روزانه را محاسبه کرد.

مقایسه سناریوها

مدل AquaCrop ابزار قدرتمندی برای مقایسه سناریوهای آبیاری و کم‌آبیاری است. این مدل نشان می‌دهد که کم‌آبیاری متوسط می‌تواند عملکرد و بهره‌وری آب را به طور همزمان بهینه کند، در حالی که کم‌آبیاری شدید یا قطع آبیاری در مراحل حساس رشد می‌تواند باعث کاهش شدید عملکرد شود. با این حال، نتایج

شاخص CRM تمایل مدل به برآورد بیش از حد یا کمتر از حد را نشان می دهد. اگر تمامی مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده برابر باشند، مقادیر RMSE، ME و CRM برابر صفر و مقادیر d و R² برابر ۱ خواهند بود. ضریب تعیین (R²) نشان دهنده میزان تغییرات متغیر وابسته است که توسط متغیر مستقل در مدل رگرسیونی توضیح داده می شود. هرچه R² به ۱ نزدیک تر باشد، مدل بهتر می تواند تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهد.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامترهای WP و Ky در مدل AquaCrop نقش تعیین کننده ای در برآورد عملکرد بلال ذرت شیرین دارند. در نتیجه، پیشنهاد می شود در فرایند کالیبراسیون، تمرکز بیشتری بر تعیین دقیق این دو پارامتر صورت گیرد. همچنین در شرایط کم آبیاری، رفتار مدل نسبت به Ky حساس تر بوده و باید با دقت تنظیم شود. سایر پارامترها نظیر CGC و CCx دارای حساسیت کمتر بودند و تغییرات آنها تأثیر محدودی بر خروجی ها داشت.

ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد عملکرد بلال و زیست توده

جدول ۲ مقادیر شاخص های آماری مورد استفاده برای ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد عملکرد بلال و زیست توده ذرت در کشت تابستانه را نشان می دهد. نتایج این جدول نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد بلال در کشت تابستانه از دقت قابل قبولی برخوردار است. مقدار NRMSE برای عملکرد بلال ۱۶/۲۷ درصد بود که در محدوده ی ۱۰ تا ۲۰ درصد قرار دارد و نشان دهنده ی شبیه سازی خوب توسط مدل است. مقادیر R² و d نیز به ترتیب نزدیک به ۱ بودند که نشان دهنده ی توانایی خوب مدل در برآورد عملکرد بلال است. با این حال، مقدار CRM برابر با ۰/۰۵- بود که نشان می دهد مدل تمایل به برآورد بیش از حد عملکرد بلال دارد. همچنین، مقدار ME برابر با ۵/۹۵ بود که نشان دهنده ی وجود خطای سیستماتیک در مدل است.

برخی مطالعات به خطای سیستماتیک AquaCrop در شرایط تنش آبی اشاره کرده اند. به عنوان مثال، آنداریزیان و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که مدل تمایل به برآورد بیش از حد عملکرد (CRM منفی) دارد که ناشی از ساده سازی رابطه بین تنش آبی و کاهش رشد برگ است. این خطا در شرایط کم آبی شدید (۵۰٪ نیاز آبی) به اوج خود می رسد و پیش بینی عملکرد دانه را تا ۲۰٪ مختل می کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

آبی) در کشت تابستانه مقایسه شدند. دقت مدل با استفاده از شاخص های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب تعیین (R²)، شاخص سازگاری ویلموت (d)، شاخص خطای سیستماتیک (CRM) و میانگین خطا (ME) مورد ارزیابی قرار گرفت.

برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی مدل با نتایج مشاهده شده، از شاخص های آماری زیر استفاده شد:

شاخص های آماری

برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی مدل با نتایج مشاهده شده، از شاخص های آماری زیر استفاده شد:

الف) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad ۲$$

ب) ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده (NRMSE):

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad ۳$$

$$\times 100$$

ج) شاخص سازگاری ویلموت (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad ۴$$

د) ضریب باقیمانده (CRM):

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad ۵$$

ه) حداکثر خطا (ME):

$$ME = \max |S_i - M_i| \times 100 / \bar{M} \quad ۶$$

ی) ضریب تعیین یا ضریب همبستگی (R²):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad ۷$$

که در آن S_i: مقادیر شبیه سازی شده، M_i: مقادیر اندازه گیری شده، n: تعداد مشاهدات و $\bar{M}$: متوسط مقادیر اندازه گیری شده است. این شاخص های آماری برای ارزیابی مدل AquaCrop در مرحله صحت سنجی استفاده شدند. مقدار NRMSE کمتر از ۱۰٪ نشان دهنده شبیه سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰٪ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰٪ متوسط و بیش از ۳۰٪ نشان دهنده شبیه سازی ضعیف است. مقدار زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است.

پارامترهایی مانند «بهره‌وری آب نرمال‌شده» و «ضریب گیاهی» در شرایط کم‌آبی به شدت بر خروجی مدل تأثیرگذارند. این موضوع نیاز به واسنجی دقیق و مبتنی بر داده‌های محلی را آشکار می‌کند. استدیو و همکاران (۲۰۱۲) نیز بر این نکته تأکید کردند که عدم تطابق پارامترهای مدل با شرایط واقعی مزرعه (مانند تفاوت در بافت خاک یا رقم ذرت)، می‌تواند خطای پیش‌بینی عملکرد را تا ۳۰٪ افزایش دهد. از سوی دیگر، شای و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که در سطوح آبیاری کمتر از ۷۵٪ نیاز آبی، مدل تمایل به کم‌برآوردی بهره‌وری آب دارد که ناشی از ناتوانی آن در شبیه‌سازی پاسخ فیزیولوژیکی گیاه به تنش شدید است.

اثر دما بر شبیه‌سازی عملکرد

میانگین دمای حداقل و حداکثر در شش ماهه اول سال (مطابق با فصل کشت ذرت) در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فرودگاه مشهد طی ۱۵ سال گذشته (۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳) مورد تحلیل قرار گرفت (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد که در طی این ۱۵ سال، کمترین دمای میانگین حداقل در سال ۱۳۸۲ (۱۴/۸) درجه سانتی‌گراد و بیشترین دمای میانگین حداکثر در سال ۱۳۹۰ (۳۱/۷) درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

برای اجرای مدل در سال‌هایی با شرایط دمایی متنوع، سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۰ به ترتیب به عنوان نماینده کمترین و بیشترین دما انتخاب شدند. نتایج اجرای مدل AquaCrop برای این سال‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، عملکرد بلال در سال ۱۳۹۰ (با بیشترین دما) برابر با ۱۳/۳۴ تن در هکتار بود که نسبت به سال ۱۳۸۲ (با کمترین دما) افزایشی معادل ۲/۲ تن در هکتار (۱۹/۷٪) داشت. همچنین، عملکرد زیست‌توده در سال ۱۳۹۰ برابر با ۲۶/۰۳ تن در هکتار بود که نسبت به سال ۱۳۸۲ افزایشی معادل ۴/۲ تن در هکتار (۱۹/۱٪) نشان داد.

تحلیل تأثیر دما بر عملکرد ذرت

شبیه‌سازی با مدل AquaCrop نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر، عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت نسبت به دماهای پایین‌تر افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، در سال‌هایی با دمای بالاتر، افزایشی در حدود ۲۰٪ در عملکرد بلال و زیست‌توده نسبت به سال‌هایی با دمای پایین‌تر مشاهده شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش دما در برخی سال‌ها می‌تواند به عنوان یک فرصت برای بهبود تولید بلال و زیست‌توده در نظر گرفته شود. با این حال، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، بررسی تأثیر سایر عوامل محیطی مانند رطوبت خاک، تابش خورشید و مدیریت زراعی نیز ضروری است.

نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که دما به عنوان یک عامل کلیدی، تأثیر مستقیمی بر رشد و عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت

برای رفع این چالش‌ها، پژوهشگران پیشنهاد داده‌اند که ادغام داده‌های سنجش از دور، توسعه الگوریتم‌های پاسخ به تنش‌های ترکیبی، و واسنجی پارامترها با داده‌های محلی می‌تواند دقت مدل را در شرایط واقعی بهبود بخشد.

در رابطه با عملکرد زیست‌توده، مدل AquaCrop نیز از دقت قابل قبولی برخوردار بود. مقدار NRMSE برابر با ۱۸/۱۶ درصد بود که نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب توسط مدل است. مقادیر R^2 و d نیز نزدیک به ۱ بودند که نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در برآورد زیست‌توده است. با این حال، مقدار CRM برابر با ۰/۰۹ بود که نشان می‌دهد مدل تمایل به برآورد کمتر از حد زیست‌توده دارد. همچنین، مقدار ME برابر با ۹/۳۷ بود که نشان‌دهنده وجود خطای سیستماتیک در مدل است. یکی از نقاط ضعف کلیدی AquaCrop، ناتوانی در شبیه‌سازی همزمان تنش‌های محیطی (مانند کم‌آبی + دمای بالا) است. استدیو و همکاران (۲۰۲۲) و گراسیاولا و فریرس (۲۰۱۲) به این محدودیت اشاره کرده‌اند و توضیح دادند که الگوریتم‌های مدل، اثرات هم‌افزایی تنش‌ها را در نظر نمی‌گیرند. این ضعف در مراحل حساس رشد گیاه (مانند گلدهی) تشدید می‌شود؛ هی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه روی تنش‌های پی‌درپی خشکی نشان دادند که خطای مدل در شبیه‌سازی کاهش زیست‌توده و عملکرد در مرحله گلدهی به ۱۵-۲۰٪ می‌رسد. همچنین، مطالعات اولیه ریز و همکاران (۲۰۰۹) و هسیاو و همکاران (۲۰۰۹) تأیید کردند که مدل در پیش‌بینی پاسخ گیاه به تنش آبی در مراحل اولیه رشد (مانند جوانه‌زنی) ضعف دارد.

جدول ۳ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده برای عملکرد بلال و زیست‌توده را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر واقعی عملکرد بلال بین ۱۳/۷ تا ۱۹/۶ تن در هکتار متغیر بود، در حالی که مقادیر شبیه‌سازی‌شده در محدوده‌ی ۱۱/۰ تا ۲۴/۳ تن در هکتار قرار داشتند. حداکثر اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در تیمار نشایی ۳۰ روزه با سطح آبیاری ۷۵ درصد برابر با ۳۵- درصد بود. این موضوع نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی عملکرد بلال در شرایط کمبود آب ضعف دارد.

ضعف مدل در شرایط کمبود آب (۷۵ درصد نیاز آبی) ممکن است به دلیل عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی دقیق پاسخ گیاه به تنش آب یا محدودیت‌های داده‌های ورودی باشد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که حساسیت بالای مدل AquaCrop به پارامترهای ورودی، به ویژه در شرایط تنش آبی، یکی از چالش‌های اصلی این مدل است. به عنوان مثال، ژائو و همکاران (۲۰۲۴) با تحلیل حساسیت پارامترهای ذرت سیلویی دریافتند که

تهویه و زهکشی، عملکرد کمتری دارند (هیلل ۱۹۹۸ و برادی وویل ۲۰۰۸).

نتایج نشان داد که بافت خاک تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ذرت دارد، به طوری که خاک‌های لومی بیشترین عملکرد را داشتند. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، بررسی تأثیر سایر عوامل محیطی مانند رطوبت خاک و تابش خورشید نیز ضروری است.

شبیه سازی عملکرد بلال در استان خراسان رضوی با استفاده از آمار و اطلاعات موجود در مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان‌های مربوطه، مدل AquaCrop که پیش‌تر برای منطقه مشهد صحت‌سنجی و واسنجی شده بود، برای برآورد عملکرد بلال و عملکرد زیست‌توده ذرت در مناطق جدید به کار گرفته شد. با توجه به تفاوت‌های اقلیمی بین مناطق (مانند دما، بارش، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی)، پارامترهای مدل از جمله پارامترهای گیاهی و استراتژی‌های آبیاری تعدیل شدند. داده‌های اقلیمی و خاکی جدید جمع‌آوری و با خروجی‌های مدل مقایسه شدند تا اطمینان حاصل شود که مدل به درستی شرایط جدید را شبیه‌سازی می‌کند. پس از انجام تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم قطعیت، مدل برای پیش‌بینی عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت در مناطق جدید مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل قادر به برآورد عملکرد با دقت قابل قبولی است، که این امر امکان برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت آب و کشت ذرت در این مناطق را فراهم می‌کند. نتایج شبیه سازی عملکرد و وزن زیست توده شهرستان‌های استان خراسان رضوی در جدول ۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد کشت ذرت نشایی در مناطق مختلف اقلیمی استان خراسان رضوی پتانسیل تولید دارد. بیشترین عملکرد بلال، در شهرستان‌های کاشمر و سرخس به ترتیب با عملکردهای ۱۳/۶ و ۱۳/۴ تن در هکتار و کمترین عملکرد در شهرستان‌های فریمان و قوچان به ترتیب با عملکردهای ۱۰/۴۴ و ۱۰/۴۷ تن در هکتار بدست آمد. نتایج مشابه‌ای نیز برای وزن زیست توده بدست آمد بطوریکه، بیشترین وزن زیست توده، در شهرستان‌های کاشمر و سرخس به ترتیب با عملکردهای ۲۶/۴ و ۲۶/۱ تن در هکتار و کمترین وزن زیست توده در شهرستان‌های فریمان و قوچان به ترتیب با عملکردهای ۲۰/۴ و ۲۰/۵ تن در هکتار بدست آمد. عملکرد بلال و وزن زیست توده در مناطق گرمسیر افزایش می‌یابد.

پراکندگی و توزیع عملکرد بلال و زیست توده کشت نشایی ذرت برای استان خراسان رضوی با مدل واسنجی و صحت سنجی شده با استفاده از پارامترهای هواشناسی، گیاهی، آبیاری و مدیریتی این آزمایش، شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در شهرستانهای گرمسیری مانند

درد. مدل AquaCrop به عنوان یک ابزار کارآمد، توانست تغییرات عملکرد بلال و زیست‌توده را تحت شرایط مختلف دمایی با دقت بالایی پیش‌بینی کند. مطالعات پیشین نیز تأیید کرده‌اند که افزایش دما می‌تواند منجر به بهبود عملکرد برخی محصولات در شرایط خاص شود (استدیو و همکاران ۲۰۰۹ و لیزاسو و همکاران ۲۰۱۸). با این حال، این تأثیر به عوامل دیگری مانند دسترسی به آب و مدیریت زراعی نیز وابسته است.

تحلیل سناریوهای کم‌آبیاری

نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop بر اساس این سناریوها در جدول ۶ ارائه شده است. مقایسه سناریوهای کم‌آبیاری نشان داد که اعمال ۲۰٪ کم‌آبیاری در کلیه مراحل رشد (سناریوی دوم) با عملکرد بلال ۱۲/۹۵ تن در هکتار و بهره‌وری مصرف آب ۲/۵۴ کیلوگرم بر متر مکعب، به عنوان بهترین گزینه برای مدیریت کم‌آبیاری در کشت ذرت شناخته شد، در حالی که سناریوهای با کاهش بیشتر آب (۳۰٪ و ۴۰٪) یا قطع آبیاری در مراحل حساس رشد، منجر به کاهش چشمگیر عملکرد و بهره‌وری آب شدند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که اعمال کم‌آبیاری متوسط (۲۰٪ کاهش آب) می‌تواند عملکرد و بهره‌وری آب را در کشت ذرت به طور همزمان بهینه کند (عابدین پور و همکاران ۲۰۱۲ و گارسیاویلا و فریرس ۲۰۱۲). با این حال، کم‌آبیاری شدید (۳۰٪ و ۴۰٪ کاهش آب) یا قطع آبیاری در مراحل حساس رشد می‌تواند باعث کاهش چشمگیر عملکرد شود (استدیو و همکاران ۲۰۱۲ و هسیاو و همکاران ۲۰۰۹).

سناریوی دوم (اعمال ۲۰٪ کم‌آبیاری در کلیه مراحل رشد) به عنوان بهترین گزینه برای مدیریت کم‌آبیاری در کشت ذرت شناخته شد. این سناریو نه تنها عملکرد بلال را به حداکثر رساند، بلکه بهره‌وری مصرف آب را نیز بهبود بخشید.

بافت خاک نقش کلیدی در شبیه‌سازی رشد گیاه و عملکرد محصول با استفاده از مدل AquaCrop دارد. نتایج شبیه‌سازی بر اساس سناریوی بافت خاک در جدول ۷ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که با تغییر بافت خاک از سنگین به سبک، عملکرد بلال و زیست‌توده کاهش می‌یابد. بیشترین عملکرد بلال (۱۳/۱۶ تن در هکتار) و زیست‌توده (۲۵/۷۲ تن در هکتار) در خاک لومی و کمترین عملکرد بلال (۱۰/۹۵ تن در هکتار) و زیست‌توده (۲۱/۲۷ تن در هکتار) در خاک رسی مشاهده شد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که خاک‌های لومی به دلیل تعادل مناسب بین ظرفیت نگهداری آب و زهکشی، بیشترین عملکرد ذرت را دارند (ریتیچی و همکاران ۱۹۹۳ و روادس و همکاران ۱۹۹۲). در مقابل، خاک‌های رسی به دلیل محدودیت در

گناباد، کاشمر، سرخس و تربت جام عملکرد بلال بین ۱۳ تا ۱۴ تن در هکتار و عملکرد زیست توده بین ۲۶ تا ۲۷ تن در هکتار برآورد شده است. در شهرستان‌های سرد سیری مانند فوچان و فریمان عملکرد بلال بین ۱۱/۵ تا ۱۲ تن در هکتار و عملکرد زیست توده بین ۲۰/۵ تا ۲۱ تن در هکتار توسط مدل AquaCrop، برآورد شده است. علت آن بخاطر این است که ذرت یک گیاه چهارکرینه است و برای رشد و عملکرد بالا نیاز به یه حداقل درجه گرمای روزانه دارد. پتانسیل تولید بلال در مناطق مختلف اقلیمی استان خراسان رضوی بین ۱۰/۵ تا ۱۴ تن در هکتار و پتانسیل تولید زیست توده بین ۲۰/۵ تا ۲۷ تن در هکتار می باشد.

نتایج نشان می‌دهد که کشت ذرت نشایی در استان خراسان رضوی تحت شرایط آبیاری بهینه (۱۰۰ درصد نیاز آبی)، از پتانسیل تولید مطلوبی برخوردار است ولی در عین حال برای نشان دادن اینکه آیا دارای پتانسیل تولید بالایی است یا خیر، بایستی با کشت ذرت بذری مقایسه و مورد قضاوت قرار گیرد.

جدول ۱- پارامترهای گیاهی واسنجی شده کشت نشایی ذرت در مدل *AquaCrop*.

پارامترهای ورودی مدل	مقدار	واحد
Kc-T	۵۰	درصد
ضریب افزایش سطح سایه انداز (CGC)	۱۸/۳	درصد
بهره‌وری آب نرمال شده (WP)	۳۳/۷	گرم بر متر-مربع
فاکتور تخلیه آب برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	۰/۱۴	-
فاکتور تخلیه آب برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	۰/۷۲	-
شاخص برداشت مرجع (HIo)	۵۱	درصد
ماکزیم پوشش گیاهی (CCx)	۹۸	درصد
پوشش گیاهی اولیه (CCo)	۱/۱۴	درصد در روز
فاکتور شکل تابع تنش	۶	-
دمای پایه	۸	درجه سانتی-گراد
دمای ماکزیم	۳۰	درجه سانتی-گراد
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	۱۱/۶۹	درصد
حداکثر عمق ریشه	۱	m
KC.t	۱/۰۸	mm/day

 جدول ۲- مقادیر شاخص‌های آماری مدل *AquaCrop* در برآورد عملکرد بلال و زیست توده ذرت.

R2	NRMSE	RMSE	d	ME	CRM	
۰/۸۵	۱۶/۲۷	۴/۶۵	۰/۸۷	۵/۹۵	-۰/۰۵	عملکرد بلال
۰/۸۲						عملکرد زیست
	۱۸/۱۶	۶/۶۶	۰/۸۱	۹/۳۷	۰/۰۹	توده

جدول ۳- مقایسه مقادیر پیش بینی شده، اندازه گیری شده و اختلاف عملکرد بلال و زیست توده ذرت.

عملکرد بلال		عملکرد زیست توده		عملکرد بلال		عملکرد زیست توده	
اندازه‌گیری شده	برآورد شده	اختلاف	اندازه‌گیری شده	برآورد شده	اختلاف	اندازه‌گیری شده	برآورد شده
t/ha	t/ha	(%)	t/ha	t/ha	(%)	t/ha	t/ha
۱۳/۷	۱۱/۰	۱۹/۹	۲۹/۶	۳۴/۷	-۱۷/۱	۲۹/۶	۳۴/۷
۱۹/۳	۱۵/۹	۱۷/۷	۴۱/۰	۳۳/۵	۱۸/۲	۴۱/۰	۳۳/۵
۱۹/۵	۱۴/۷	۲۴/۸	۴۷/۳	۳۷/۹	۱۹/۸	۴۷/۳	۳۷/۹
۱۵/۶	۲۱/۱	-۳۵/۰	۲۸/۶	۳۴/۹	-۲۲/۰	۲۸/۶	۳۴/۹
۱۸/۴	۲۴/۳	-۳۲/۴	۳۴/۶	۲۸/۴	۱۷/۸	۳۴/۶	۲۸/۴
۱۹/۶	۲۴/۳	-۲۳/۸	۳۸/۹	۳۳/۱	۱۴/۹	۳۸/۹	۳۳/۱

جدول ۴- میانگین دمای حداقل و حداکثر در مشهد در فصل بهار و تابستان (۷۹-۹۳)

سال	دمای حداکثر (°C)	دمای حداقل (°C)
۱۳۷۹	۳۰/۷	۱۶/۵
۱۳۸۰	۳۱/۵	۱۶/۳
۱۳۸۱	۳۰/۰	۱۵/۳
۱۳۸۲	۲۸/۹	۱۴/۸
۱۳۸۳	۲۹/۲	۱۵/۲
۱۳۸۴	۲۹/۱	۱۵/۶
۱۳۸۵	۳۰/۷	۱۶/۵
۱۳۸۶	۲۹/۶	۱۶/۱
۱۳۸۷	۳۱/۱	۱۶/۹
۱۳۸۸	۲۸/۳	۱۵/۱
۱۳۸۹	۳۰/۴	۱۵/۷
۱۳۹۰	۳۱/۷	۱۶/۷
۱۳۹۱	۳۰/۵	۱۵/۸
۱۳۹۲	۳۰/۱	۱۵/۶
۱۳۹۳	۳۰/۸	۱۵/۸

جدول ۵- شبیه‌سازی عملکرد بلال و زیست توده در کشت ذرت نشایی در بالاترین و کمترین دما

سال	۱۳۸۲	۱۳۹۰
مشخصه سال	کمترین	بیشترین
عملکرد بلال (ton/ha)	۱۱/۱۴	۱۳/۳۴
عملکرد زیست توده (ton/ha)	۲۱/۸۵	۲۶/۰۳

جدول ۶- شبیه سازی مدل AquaCrop بر اساس سناریوهای مختلف کم آبیاری در ذرت

سناریو	عملکرد بلال (ton/ha)	بهره‌وری ماده خشک (Kg/m ³)
Scen1	۱۲/۸۳	۲/۵۲
Scen2	۱۲/۹۵	۲/۵۴
Scen3	۱۱/۰۴	۲/۵۳
Scen4	۹/۹۲	۲/۵۰
Scen5	۱۲/۷۴	۲/۵۲
Scen6	۱۲/۸۷	۲/۵۳
Scen7	۱۱/۱۴	۲/۴۹
Scen8	۹/۱۱	۲/۴۹

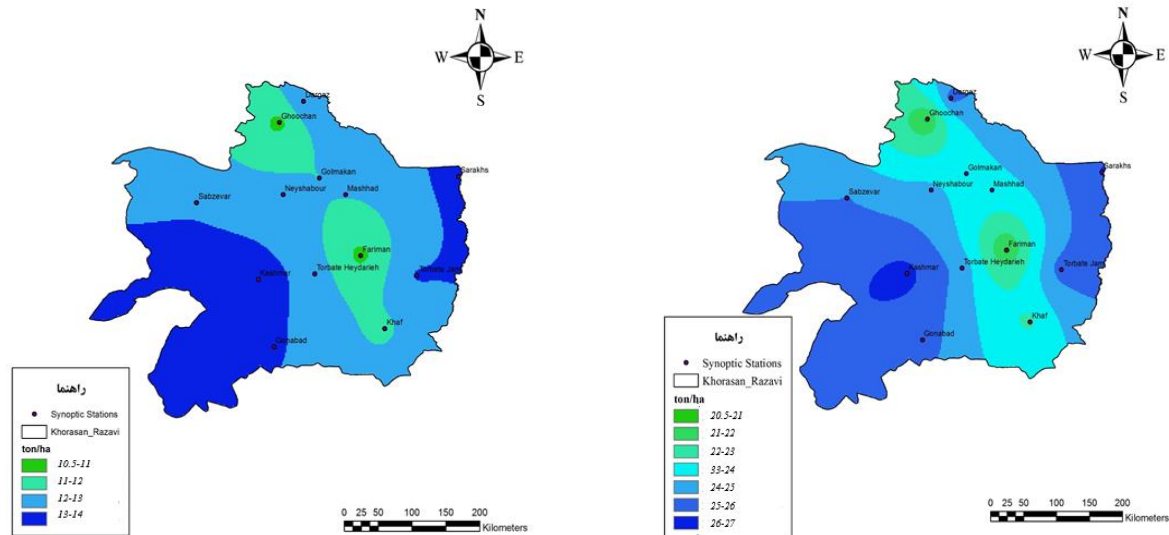
تأثیر بافت خاک بر عملکرد ذرت:

جدول ۷- نتایج شبیه سازی بر اساس سناریوی بافت خاک.

نوع خاک	رسی	سیلتی	لومی	شنی
عملکرد بلال (ton/ha)	۱۰/۹۵	۱۳/۱۵	۱۳/۱۶	۱۲/۴۹
زیست توده (ton/ha)	۲۱/۲۷	۲۳/۸۳	۲۵/۷۲	۲۴/۳۶

جدول ۸- شبیه سازی عملکرد بلال و وزن زیست توده در شهرستان‌های استان خراسان رضوی

شهرستان	عملکرد بلال (t/ha)	عملکرد زیست توده (t/ha)
مشهد	۱۲/۰۴	۲۳/۵۸
درگز	۱۳/۰۲	۲۵/۵۳
فریمان	۱۰/۴۴	۲۰/۴۸
قوچان	۱۰/۴۷	۲۰/۵۴
گلمکان	۱۱/۹۷	۲۳/۴۸
گناباد	۱۳/۱۷	۲۵/۵۱
کاشمر	۱۳/۶۰	۲۶/۴۶
خواف	۱۱/۷۱	۲۲/۶۷
نیشابور	۱۲/۴۰	۲۴/۳۱
سبزوار	۱۲/۹۰	۲۵/۰۳
سرخس	۱۳/۴۰	۲۶/۰۸
تربت حیدریه	۱۲/۶۹	۲۴/۸۳
تربت جام	۱۳/۱۶	۲۵/۷۰



شکل ۲- پراکندگی و توزیع عملکرد بلال و عملکرد زیست توده به ترتیب در شکل سمت چپ و سمت راست

بهتری داشتند، اما در شرایط کم آبیاری، نشاءهای ۳۰ روزه نیز عملکرد قابل قبولی نشان دادند.

این مطالعه تأکید می‌کند که مدل AquaCrop ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت شیرین تحت شرایط مختلف آبیاری و سن‌های مختلف نشاء است. با این حال، بهبود مدل در شبیه‌سازی تنش‌های رطوبتی شدید و شرایط غیرآبی مانند شوری و دمای بالا ضروری است. نتایج این پژوهش می‌تواند به کشاورزان و مدیران منابع آب کمک کند تا با مدیریت بهینه آب، عملکرد ذرت شیرین را در شرایط کم آبیاری بهبود بخشند. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، بررسی تأثیر سایر عوامل محیطی مانند رطوبت خاک، تابش خورشید و مدیریت زراعی نیز پیشنهاد می‌شود. همچنین، انجام مطالعات بیشتر در مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت و توسعه مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی تنش‌های غیرآبی از جمله پیشنهادات برای تحقیقات آینده است.

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل AquaCrop پس از واسنجی و صحت‌سنجی برای منطقه مشهد، قابلیت خوبی در برآورد عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت در سایر شهرستان‌های استان خراسان رضوی دارد. این نتایج حاکی از آن است که مناطق گرمسیری استان خراسان رضوی پتانسیل بالاتری برای تولید ذرت نشایی دارند. همچنین، پراکندگی عملکرد

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف ارزیابی توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت شیرین تحت شرایط مختلف آبیاری و سن‌های مختلف نشاء در منطقه نیمه‌خشک و سرد خراسان رضوی انجام شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بلال و زیست‌توده ذرت شیرین در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی) از دقت قابل قبولی برخوردار است ($NRMSE < 20\%$). با این حال، در شرایط کمبود آب (۷۵ درصد نیاز آبی)، مدل تمایل به برآورد بیش‌ازحد عملکرد بلال و کمتر از حد زیست‌توده داشت، که نشان‌دهنده نیاز به بهبود مدل در شبیه‌سازی تنش‌های رطوبتی شدید است.

تحلیل سناریوهای کم آبیاری نشان داد که کاهش ۲۰ درصدی میزان آبیاری (۸۰ درصد نیاز کامل آبی) در طول فصل زراعی، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر عملکرد نداشت و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار بهینه در مدیریت منابع آبی پیشنهاد شود. همچنین، نتایج نشان داد که کشت نشایی ذرت شیرین در خاک‌های لومی بیشترین عملکرد را داشت، در حالی که خاک‌های رسی کمترین عملکرد را نشان دادند. نشاءهای ۲۰ روزه در مقایسه با نشاءهای ۳۰ روزه عملکرد

- an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, 36(1), 21-31.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.003>
- García-Vila M, and Fereres E, 2023. Simulating water stress effects on crop yield using AquaCrop: A review. *Agricultural Water Management*, 280, 108-120.
- He X, Wang C, Zhao H, and Zhou, W, 2024. Evaluating cumulative drought stress impacts on maize growth and AquaCrop performance. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1444246. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1444246>
- Hillel D, 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press.
- Hsiao T C, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, and Fereres E, 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0141s>
- Jones J B, 2003. *Agronomic handbook: management of crops, soils, and their fertility*. CRC Press.
- Khan M, Ali R and Hosseini S, 2021. The impact of seedling age and different irrigation levels on the growth and yield of sweet corn. *Journal of Agricultural Sciences*, 30(2), 45-58. (In Persian with English abstract).
- Li J, and Zhang H, 2023. Effect of seedling age on sweet corn yield under deficit irrigation. *Journal of Crop Science*, 72(3), 45-56.
- Lizaso J I, Ruiz-Ramos M, Rodríguez L, Gabaldón-Leal C, Oliveira J A, Lorite I J, ... and Rodríguez-Fonseca B, 2018. Impact of high temperatures on the yield of maize (*Zea mays* L.) under climate change scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 48-58.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.020>
- بلال و زیست توده در سطح استان نشان داد که تفاوت های اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصول دارند. این یافته ها می تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای برنامه ریزی کشت ذرت و مدیریت بهینه منابع آب در مناطق مختلف اقلیمی استان مورد استفاده قرار گیرد.
- ### منابع مورد استفاده
- Abedinpour M, Sarangi A, Rajput T B S, Singh M, Pathak H, and Ahmad T, 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55-66.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Ahmadi A, and Sepaskhah A R, 2016. Evaluation of AquaCrop model for simulating maize yield under different irrigation strategies in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 178: 105-116. (In Persian with English abstract).
- Andarzian B, Bannayan M, Steduto P, Mazraeh H, Barati M E, Barati M A, and Rahnama A, 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Bai S, Liu H, and Zhang Y, 2021. Limitations of AquaCrop in Non-Water Stress Conditions. *Journal of Agricultural Research*, 9(2), 121-130.
- Brady N C, and Weil R R, 2008. *The nature and properties of soils*. Pearson Prentice Hall.
- Chen L, and Zhang W, 2022. Economic feasibility of transplanting sweet corn seedlings in different climatic regions. *Agricultural Economics*, 68(4), 789-801.
- FAO, 2017. *AquaCrop: The FAO Crop Water Productivity Model*. Version 6.1. FAO, Rome, Italy.
- García-Vila M, and Fereres E, 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with

- Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Steduto P, Hsiao T C, Raes D, and Fereres E, 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Wang X, Li Y, and Zhang Q, 2023. Climate variability and its impact on sweet corn yield in semi-arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 325, 108-120.
- Xie Y, Zhang X, Li Y, and Huang M, 2023. Evaluating AquaCrop model performance under full and deficit irrigation in maize: Sensitivity to stress timing. *Sustainability*, 15(4), 1347. <https://doi.org/10.3390/su15041347>
- Zhang T, Liu Y, and Jin J, 2024. Field validation of AquaCrop model for maize under varying irrigation regimes. *Scientific Reports*, 14, Article 5248. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92481-z>
- Zhang Y, Li X, and Wang Z, 2022. The impact of seedling age on the growth and yield of sweet corn under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 265, 107-118.
- Zhao X, Chen M, and Fang Q, 2024. Sensitivity analysis and parameter optimization of AquaCrop for silage maize. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1304611. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1304611>
- Lobell D B, Burke M B, and Tebaldi C, 2011. Climate Change and Agricultural Adaptation. *Nature Climate Change*, 1(8), 382-385.
- Mansouri A, Ahmadi M and Rezaei H, 2019. The effect of water consumption on the performance of sweet corn under deficit irrigation conditions. *Journal of Water and Soil Research*, 25(3), 123-135. (In Persian with English abstract).
- Raes D, Steduto P, Hsiao T C, and Fereres E, 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Raes D, Steduto P, Hsiao T C, and Fereres E, 2021. AquaCrop: A robust model for simulating crop productivity under water-limited conditions. *Agricultural Systems*, 190, 103-115.
- Rhoades J D, Kandiah A, and Mashali A M, 1992. The use of saline waters for crop production. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Ritchie S W, Hanway J J, and Benson G O, 1993. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Special Report No. 48.
- Shakya S, Sharma R, and Gupta P, 2020. Sweet Corn: A Crop for Food Security. *Agricultural Science Journal*, 20(3), 15-30.
- Smith R, and Johnson L, 2023. Soil properties and their impact on sweet corn yield in semi-arid regions. *Soil Science Society of America Journal*, 87(2), 123-135.
- Steduto P, Hsiao T C, and Fereres E, 2022. Limitations and future perspectives of crop simulation models under non-water stress conditions. *European Journal of Agronomy*, 135, 126-135.
- Steduto P, Hsiao T C, Raes D, and Fereres E, 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I.