

Simulating Climate Change Impacts and Adaptation scenarios for Yield and Water use efficiency of two Barley cultivars: A Case Study in Najafabad, Isfahan

Siavash Bardehji¹, Hamid Reza Eshghizadeh^{1*} , Morteza Zahedi¹, Mehrdad Mahlooji² and Mahdi Gheysari³

(Received: July 11-2025 ; Revised: December 5-2025 ; Accepted: January 10-2025)

1. Department of Crop Production and Genetics, Collage of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Department of Agronomy and Horticultural Sciences, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Isfahan Province, Isfahan, Iran.
3. Deptarmnt of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author Email: hr.eshghizadeh@iut.ac.ir

Abstract

Climate change significantly affects the water use efficiency (WUE) and yield of field crops. This study evaluates the impacts of climate change on biological yield, grain yield, water consumption, and WUE of two barley genotypes, Goharan and Reyhan 03, under autumn and spring planting regimes using the CERES-Barley model within the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) software. Data provided for model calibration and validation were sourced from the field experiments conducted at the Isfahan University of Technology research farm located in Najafabad, Iran. Meteorological data for the period of 2003 to 2016 were obtained from the Najafabad weather station, while future climate projections for 2020–2050 were generated using the MarkSim weather generator under the Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 scenario. Planting dates were analyzed within a ± 35 -day window relative to baseline dates of October 22 for autumn and March 3 for spring. The model demonstrated high accuracy in calibrating key traits, including days to anthesis, days to maturity, leaf area index, grain yield, and biological yield. Elevated temperatures associated with climate change reduced grain and biological yields across both planting seasons, with biological yield exhibiting a more pronounced decline, particularly under spring planting. During the 2040–2050 period, water consumption peaked at 387.5 mm for Goharan in autumn planting, while spring planting recorded a minimum of 239 mm for Reyhan 03. Delaying autumn planting by 20–25 days enhanced WUE, while planting earlier in the spring (10–20 days) improved WUE by exploiting cooler temperatures. Evapotranspiration increased by 399 mm in autumn but decreased by 267 mm in spring. The earlier-maturing Reyhan 03 genotype demonstrated smaller yield losses in spring planting due to climate change. The findings of this study suggest that programmed adjustments to planting dates may mitigate the adverse impacts of climate change on barley production, thereby enhancing sustainability.

Keywords: Water productivity, Planting date, Evapotranspiration, Grain yield, Field Crops

How to cite this article: Bardehji, S., Eshghizadeh, H.R., Zahedi, M., Mahlooji, M. and Gheysari, M. 2026. Simulating Climate Change Impacts and Adaptation scenarios for Yield and Water use efficiency of two Barley cultivars: A Case Study in Najafabad, Isfahan. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 160-177. DOI: [10.47176/jwss.30.1.12038](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.12038)

Copyright © 2026 Bardehji et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم و سناریوهای سازگاری در تولید و بهره‌وری آب مصرفی دو رقم جو: مطالعه موردی در نجف‌آباد اصفهان

سیاوش برده‌جی^۱، حمیدرضا عشقی‌زاده^{۱*} (ID)، مرتضی زاهدی^۱، مهرداد محلوچی^۲ و مهدی قیصری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰)

۱. گروه تولید و ژنتیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، اصفهان، ایران.

۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hr.eshghizadeh@iut.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم بر عملکرد و بهره‌وری آب محصولات زراعی تأثیرات قابل‌توجهی دارد. هدف این مطالعه ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد بیولوژیک و دانه و میزان مصرف و بهره‌وری مصرف آب (WUE) دو ژنوتیپ جو (گوهران و ریحان ۰۳) در تاریخ‌های مختلف کاشت پاییزه و بهاره با استفاده از مدل CERES-Barley نرم‌افزار DSSAT بود. بخش میدانی این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان (نجف‌آباد) برای جمع‌آوری داده‌های واسنجی و ارزیابی مدل انجام شد. داده‌های هواشناسی در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۳ از ایستگاه نجف‌آباد و داده‌های برآوردشده برای بازه زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ با استفاده از مدل مارکسیم تحت سناریو RCP 8.5 به‌دست آمد. تاریخ‌های کاشت در بازه ۳۵- تا ۳۵+ روز از تاریخ اصلی (۳۰ مهر برای کشت پاییزه و ۱۳ اسفند برای کشت بهاره) در نظر گرفته شدند. مدل مورد استفاده با دقت زیاد برای صفات روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی، سطح برگ و عملکرد دانه و بیولوژیک واسنجی شد. تغییر اقلیم، به‌ویژه افزایش دما، عملکرد دانه و بیولوژیک را در هر دو فصل کاشت کاهش داد؛ اما عملکرد بیولوژیک به ویژه در کاشت بهاره کاهش بیشتری پیدا کرد. در بازه ۲۰۴۰-۲۰۵۰، بیشترین میزان مصرف آب در پاییزه (۳۸۷/۵ میلی‌متر برای گوهران) و کمترین میزان آن در کاشت بهاره (۲۳۹ میلی‌متر برای ریحان ۰۳) به‌دست آمد. تأخیر ۲۵-۲۰ روزه در کاشت پاییزه، بهره‌وری مصرف آب را بهبود داد؛ درحالی‌که کاشت زود هنگام ۲۰-۱۰ روزه در کاشت بهاره، به دلیل بهره‌گیری از دماهای خنک‌تر بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد. میزان تبخیر-تعرق در کشت پاییزه (تا ۳۹۹ میلی‌متر) افزایش، ولی در کشت بهاره (تا ۲۶۷ میلی‌متر) کاهش یافت. رقم ریحان ۰۳ به دلیل زودرس‌تر بودن، تحت تأثیر تغییر اقلیم در کاشت بهاره نسبت به رقم گوهران کاهش عملکرد کمتری را نشان داد. به طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط مشابه این مطالعه، از طریق تغییر تاریخ کاشت می‌توان اثرات منفی تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گیاه جو را کاهش داد و پایداری تولید این گیاه را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تاریخ کاشت، تبخیر و تعرق، عملکرد دانه، محصولات زراعی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر در بخش کشاورزی محسوب می‌شود که با تأثیرگذاری بر مؤلفه‌های اقلیمی مانند دما، بارش و تابش، عملکرد محصولات زراعی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با کاهش روبه‌رو می‌کند (۲۰). تغییر در الگوهای اقلیمی، توزیع مکانی و زمانی بارش، افزایش بروز بیشینه‌ها و کمینه‌های اقلیمی-بارش و دما مانند خشکسالی و موج گرما، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی به شمار می‌رود (۱۰). در این میان، غلات از جمله جو (*Hordeum vulgare* L.) به دلیل نقش کلیدی در تغذیه انسان و دام و همچنین تحمل نسبی در برابر تنش‌های محیطی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (۷). جو به‌عنوان یکی از غلات متحمل به کم‌آبی، نقش مهمی در تولید دانه، مالت و علوفه دارد و با توجه به نیاز آبی کمتر نسبت به ذرت و گندم، گزینه‌ای مناسب برای مناطق دارای تنش آبی تلقی می‌شود (۲ و ۹).

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی، ابزاری مهمی برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و تدوین راهکارهای مدیریتی سازگار با آن محسوب می‌شود (۳، ۱۲ و ۱۹). مدل CERES-Barley به‌عنوان بخشی از بسته نرم‌افزاری DSSAT، توانایی شبیه‌سازی دقیق رشد، نمو و عملکرد جو را تحت سناریوهای مختلف اقلیمی دارد. برای نمونه، مطالعه‌ای در اتیوپی با استفاده از مدل CERES-Barley نشان داد که تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر عملکرد جو در برخی مناطق تا ۹۸٪ برای رقم Traveller و ۶۳٪ برای ژنوتیپ EH-1493 شود؛ با این حال، اعمال راهکارهای مدیریتی مانند تاریخ کاشت زودتر، افزایش تراکم کشت و مصرف بیشتر کود نیتروژن توانست تا حدی اثرات منفی را کاهش دهد (۸). در مطالعه‌ای دیگر در مناطق مرکزی اتیوپی، دقت زیاد مدل در شبیه‌سازی فنولوژی و عملکرد ارقام مختلف گندم و جو تأیید شد و شاخص توافق و خطای نسبی نرمال شده (nRMSE) عملکرد مدل را در سطح قابل قبولی نشان داد (۱۳). همچنین، پژوهش انجام‌شده در دشت‌های هند با استفاده از مدل CERES-Wheat

نشان داد که این مدل قادر است به‌خوبی تغییرات نیتروژن در خاک، جذب نیتروژن توسط گیاه و اثرات سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی را شبیه‌سازی کند (۱۲). مجموع این مطالعات بیانگر توانایی مدل‌های DSSAT، به‌ویژه CERES-Barley و CERES-Wheat، در تحلیل اثرات تغییر اقلیم و بهینه‌سازی مدیریت زراعی در شرایط اقلیمی و مدیریتی متنوع است. این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری به منظور توسعه کشاورزی پایدار و سازگار با اقلیم آینده مورد استفاده قرار گیرند.

در میان راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم، بهینه‌سازی تاریخ کاشت یکی از مؤثرترین شیوه‌ها برای کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی و افزایش بهره‌وری مصرف آب است. تاریخ کاشت متناسب با نیازهای اکوفیزیولوژیک گیاه، موجب بهبود استقرار اولیه، استفاده مؤثر از منابع در طول فصل رشد و اجتناب از مراحل حساس رشد در زمان بروز تنش‌های شدید محیطی می‌شود (۱ و ۶). در اروپای مرکزی و غربی نتایج حاصل از مدل CERES-Barley نشان داد که کاشت زود هنگام تا ۶۰ روز می‌تواند منجر به افزایش ۱۵ تا ۲۲ درصدی عملکرد در شرایط آب و هوایی با غلظت دو برابر CO₂ شود. همچنین در حوضه مدیترانه‌ای، شبیه‌سازی‌ها در ۹ منطقه با استفاده از DSSAT نشان داد که کاهش بارندگی و افزایش دما موجب ۹٪ افت میانگین عملکرد جو خواهد شد؛ اما تاریخ کاشت مناسب و انطباق با ویژگی‌های اقلیمی و خاکی هر منطقه می‌تواند تا حدودی از اثرات منفی بکاهد (۳). در مناطق خشک مدیترانه‌ای مانند استان آلمریا در اسپانیا، مدل AquaCrop نشان داد که تغییر تاریخ کاشت به‌تنهایی تأثیر پایداری بر عملکرد جو ندارد؛ اما ترکیب مناسب آن با مالچ‌پاشی و آبیاری می‌تواند موجب افزایش عملکرد تا ۲۱٪ شود و نیاز آبی را تا ۴۰٪ کاهش دهد (۱۸). بنابراین، نتایج مطالعات متعدد حاکی از آن است که انتخاب صحیح تاریخ کاشت، به‌ویژه در تعامل با ویژگی‌های خاک، اقلیم و رقم، نقش کلیدی در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و حفظ پایداری عملکرد محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کند.

۳- آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش در دو فصل کاشت پاییزه (۳۰ مهر ۱۳۹۶) و بهاره (۱۳ اسفند ۱۳۹۶) در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. هر واحد آزمایشی ۲ مترمربع با ردیف‌های کاشت ۱ متری، فاصله ردیف ۱۵ سانتی‌متر و تراکم ۳۵۰ بوته در متر مربع بود. آبیاری با نوارهای پلی‌اتیلنی (قطر ۱۶ میلی‌متر، فاصله قطره‌چکان‌ها ۱۵ سانتی‌متر) و بر اساس تبخیر - تعرق جو (محاسبه‌شده با روش فائو - پنمن - مانتیث و ضریب گیاهی) انجام شد. رژیم آبیاری شاهد بر اساس ۵۵ درصد تخلیه رطوبت مجاز خاک اعمال شد. رژیم آبیاری شاهد بر اساس ۵۵ درصد تخلیه رطوبت مجاز خاک اعمال (Management Allowable Depletion; MAD=55%) شد. این مقدار بر اساس توصیه‌های استاندارد برای محصولات غلات مانند جو انتخاب شده است که در آن بیشینه تخلیه مجاز خاک برای جلوگیری از تنش آبی بدون کاهش قابل توجه عملکرد، در محدوده ۵۵-۵۰٪ پیشنهاد می‌شود. همچنین، بر اساس راهنمای FAO برای محاسبه نیاز آبی محصولات، ضریب تخلیه خاک بدون تنش (p) برای جو برابر با ۰/۵۵ (معادل ۵۵٪) در شرایط تبخیر - تعرق روزانه حدود ۵ میلی‌متر در روز است. این انتخاب با بافت خاک لوم رسی محل آزمایش (با حدود ۳۰٪ رس، ۳۱٪ سیلت و ۳۹٪ شن) سازگار است؛ زیرا خاک‌های با بافت متوسط تا ریز مانند لوم رسی، ظرفیت نگهداری آب مناسب تقریبی ۱۱-۱۰٪ حجمی دارند و اجازه می‌دهند تا ۵۵٪ تخلیه بدون ایجاد تنش شدید رخ دهد که با توصیه‌های استاندارد برای جو همخوانی دارد (۲). میزان آب مصرفی با استفاده از کنتور اندازه‌گیری و رطوبت خاک در اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری به روش وزنی پایش شد. برداشت بوته‌ها در تاریخ ۲۵ خرداد ۱۳۹۷ انجام شد.

۴- محاسبه مقدار آب آبیاری

مقدار آب آبیاری با معادله ۱ محاسبه شد (۱۶).

$$\theta_{\text{irrig}} = \theta_{\text{fc}} - (\theta_{\text{fc}} - \theta_{\text{pwp}}) \times \text{MAD} \quad (1)$$

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر غلات، مطالعات جامع در خصوص ترکیب تاریخ کاشت، تنوع ژنتیکی و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند CERES-barley در مناطق مختلف کشت در ایران به‌ویژه در استان اصفهان، محدود است. همچنین، بررسی هم‌زمان عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب در دو فصل کشت پاییزه و بهاره با تمرکز بر سناریوهای اقلیمی آینده، خلأ تحقیقاتی مهمی را نشان می‌دهد. هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب دو ژنوتیپ جو در تاریخ‌های مختلف کاشت پاییزه و بهاره با استفاده از مدل CERES-barley در نرم‌افزار DSSAT است. این مطالعه با تمرکز بر سازگاری اقلیم‌محور در کشت جو، می‌تواند به تدوین استراتژی‌های پایدار کشت در مناطق مستعد تنش خشکی کمک کند و مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی بلندمدت در مدیریت منابع آب و کشاورزی اقلیم‌محور فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

۱- محل مطالعه

بخش میدانی این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان، واقع در لورک نجف‌آباد (۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی، ۵۱ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی، ارتفاع ۱۶۳۰ متر از سطح دریا) انجام شد. میانگین دمای سالانه این منطقه ۱۴/۵ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالانه آن ۱۴۰ میلی‌متر است. خاک منطقه لومی رسی با هدایت الکتریکی ۱/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر، pH ۸/۳، کربن آلی ۰/۶۹۱ درصد، فسفر ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم ۳۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و نیتروژن کل ۰/۰۶۳ درصد بود.

۲- مواد ژنتیکی

بذرهای دو رقم شش ردیفه جو شامل گوهران (شجره Rhn-03//L.527/NK1272) و ریحان ۰۳ (شجره As46//Avt/Aths)، از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان تهیه شد.

مشاهده‌ای ثبت شد. اندازه‌گیری سطح برگ به روش با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج الکترونیکی (شرکت مهام آزما فارمد بین الملل، ایران) از بوته‌های برداشت‌شده از یک مترمربع سطح مزرعه در مرحله گلدهی بوته‌ها اندازه‌گیری شد. در هر واحد آزمایشی، بوته‌ها پس از رسیدن به مرحله رسیدگی برداشت از سطح زمین برداشت شده و عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک بوته‌ها توسط ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. بهره‌وری مصرف آب دانه و بیوماس (اندام هوایی یا کاه و دانه) با در دست داشتن میزان آب آبیاری و از تقسیم عملکرد محصول (دانه، بیوماس) بر میزان آب مصرفی محاسبه شد.

۶- شبیه‌سازی با مدل CERES-Barley

مدل CERES-Barley قابل ارائه توسط نرم‌افزار DSSAT (نسخه ۴/۶) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد جو استفاده شد. مدل CERES-Barley یکی از مدل‌های اختصاصی مجموعه مدل‌های CERES در بسته شبیه‌سازی DSSAT است که برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد گیاه جو در شرایط مختلف محیطی و مدیریتی توسعه یافته است. این مدل با استفاده از رویکرد تعادل کربن-آب-نیتروژن، فرایندهایی مانند فنولوژی، توسعه سطح برگ، رشد ریشه، جذب و تخصیص ماده خشک، مصرف آب، جذب و کارایی استفاده از نیتروژن را شبیه‌سازی می‌کند (۸). ورودی‌های اصلی مدل شامل داده‌های روزانه هواشناسی (بیشینه و کمینه دما، بارندگی، تابش خورشیدی)، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و اطلاعات مدیریتی (تاریخ کاشت، تراکم بوته، مقدار و زمان مصرف نیتروژن و برنامه آبیاری) هستند. برای نمایش تفاوت میان ژنوتیپ‌ها، مدل از مجموعه‌ای از ضرایب ژنتیکی استفاده می‌کند که تعیین‌کننده خصوصیات فنولوژیک و پتانسیل عملکرد هر رقم هستند. این ضرایب شامل P1V، P1D، P5، G1، G2، G3 و PHINT بوده و نشان‌دهنده نیاز سرمایی، حساسیت به طول روز، طول دوره پر شدن دانه، اجزای پتانسیل عملکرد و فاصله فیلوکرونی هستند.

θ_{irrig} : آستانه محتوای رطوبت خاک در زمان آبیاری برای MAD مشخص شده (مترمکعب/مترمکعب)

θ_{fc} : رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی

θ_{pwp} : رطوبت حجمی خاک در حالت پژمردگی دائم

MAD: کسری از کل آب در دسترس $((1 \pm 0.05) \times 55\%)$ که می‌تواند از ناحیه ریشه تخلیه شود (۲).

عمق آبیاری براساس محتوای رطوبت خاک و با استفاده از معادله ۲ تخمین زده شد.

$$D_{\text{irrig}} = (\theta_{\text{fc}} - \theta_{\text{avg}}) \times D_{\text{rz}} \quad (2)$$

D_{irrig} : عمق آبیاری (سانتی‌متر)

θ_{avg} : محتوای رطوبت خاک در ناحیه ریشه قبل از آبیاری

(مترمکعب/مترمکعب)

Z_e : عمق ریشه (سانتی‌متر)

ظرفیت مزرعه (θ_{fc}) و نقطه پژمردگی دائمی (θ_{pwp}) خاک به ترتیب ۲۷ و ۱۷ درصد توسط آزمایشگاه فیزیک خاک دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شد. این مقادیر با استفاده از روش صفحه فشار (Pressure plate apparatus) در پتانسیل‌های ماتریک ۰/۳۳- بار (معادل ۳۳- کیلوپاسکال) برای ظرفیت مزرعه و ۱۵- بار (معادل ۱۵۰۰- کیلوپاسکال) برای نقطه پژمردگی دائمی تعیین شدند که روش استاندارد در فیزیک خاک برای اندازه‌گیری این پارامترهاست. عمق نفوذ ریشه (Z_e) به صورت میانگین ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

۵- صفات مورد ارزیابی

در این مطالعه صفات روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی، سطح برگ، عملکرد دانه و بیولوژیک (کیلوگرم بر هکتار)، آب مصرفی (میلی‌متر)، تبخیر و تعرق (میلی‌متر)، بهره‌وری مصرف آب دانه (WUE_G) و بیوماس (WUE_B) بر اساس کیلوگرم بر مترمکعب مورد ارزیابی قرار گرفت.

صفات روز تا گرده‌افشانی و روز تا رسیدگی، برحسب تعداد روز از کاشت تا زمانی که ۵۰ درصد بوته‌های هر واحد آزمایشی به مرحله فنولوژیک مد نظر رسیده بودند، به‌طور

واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Barley

داده‌های مورد استفاده برای واسنجی مدل CERES-Barley از آزمایشی به دست آمد که در آن ژنوتیپ‌های جو تحت دو رژیم آبیاری (آبیاری شاهد و کم‌آبیاری) و دو سطح کود نیتروژن (مقدار موجود و ۶۲/۵ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) در دو فصل کاشت پاییزه و بهاره کشت شده بودند. در مرحله واسنجی، تنها داده‌های مربوط به تیمارهای فاقد تنش (آبیاری شاهد همراه با نیتروژن) و صفات مراحل فنولوژیکی، سطح برگ، عملکرد دانه و عملکرد بیوماس برای تنظیم ضرایب ژنتیکی استفاده شدند. در مجموع چهار سری داده مستقل (دو رقم × دو فصل) برای استخراج ضرایب ژنتیکی به کار گرفته شد. پارامترهای ژنتیکی شامل P1V، P1D، P5، G1، G2، G3 و PHINT طی یک فرایند چندمرحله‌ای و تکراری تنظیم شدند تا مقادیر شبیه‌سازی‌شده سه صفت یادشده بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌شده داشته باشند. ضرایب نهایی پس از واسنجی در جدول ۱ ارائه شده است.

در این آزمایش برای مقایسه داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مزرعه، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده برحسب درصد (Normalized Root Mean Square Error: NRMSE) با استفاده از معادلات ۳ و ۴ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (4)$$

S_i و O_i = به ترتیب مشاهده i ام و مقدار شبیه‌سازی‌شده آن

n = تعداد مشاهدات

$\bar{O}$ = میانگین مشاهدات

مقدار NRMSE که برحسب درصد بیان می‌شود، میزان اختلاف میان داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. NRMSE کمتر از ۱۰ درصد شبیه‌سازی بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد شبیه‌سازی خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد شبیه‌سازی

اطلاعات هواشناسی (دما، بارندگی، تابش و رطوبت نسبی) از ایستگاه سینوپتیک خودکار نجف‌آباد (تأسیس ۱۳۷۹) واقع در ۱۰ کیلومتری محل آزمایش (۲۰۱۶-۲۰۰۳) استخراج و داده‌های آب‌وهوایی آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۰) با استفاده از مدل MarkSim (<https://gisweb.ciat.cgiar.org/MARKSIMGCM>) یک ژنراتور آب‌وهوایی مبتنی بر داده‌های (IPCC AR5/CMIP5) تحت سناریو RCP8.5 پیش‌بینی شدند (۱۲). سناریو RCP8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5) یکی از مسیرهای غلظت نماینده در مدل‌های اقلیمی IPCC است که نشان‌دهنده سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای زیاد به عنوان 'کسب‌وکار معمول' یا (business as usual) می‌باشد؛ جایی که نیروی تابشی تا سال ۲۱۰۰ به ۸/۵ وات بر متر مربع می‌رسد و غلظت CO₂ بدون تلاش‌های جدی برای کاهش انتشارات آن، تا حدود ۹۴۰ میکرومول در مول افزایش می‌یابد. این سناریو اغلب به عنوان بدترین حالت (worst-case scenario) در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌کند رشد جمعیت زیاد، پیشرفت کند فناوری‌های پاک و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی ادامه یابد (۱۷).

این سناریو انتخاب شد؛ زیرا امکان ارزیابی اثرات شدید تغییر اقلیم بر عملکرد محصول (مانند جو) را فراهم می‌کند، حتی اگر محتمل‌ترین سناریو نباشد. در مدل‌سازی اقلیمی برای کشاورزی، RCP8.5 برای بررسی ریسک‌های بالقوه مانند کاهش بازده محصول تحت شرایط افراطی (مانند افزایش دما و خشکسالی) مفید است و به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا استراتژی‌های سازگاری قوی‌تری طراحی کنند. همچنین، مدل MarkSim این سناریو را برای تولید داده‌های آب‌وهوایی محلی (مانند بارش و دما) در شبیه‌سازی‌های زراعی مانند DSSAT پشتیبانی می‌کند که با اهداف مطالعه ما برای پیش‌بینی اثرات بهره‌وری آب و عملکرد جو در مطالعه موردی در شرایط نجف‌آباد اصفهان همخوانی دارد. داده‌های خاک (بافت، رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی) با نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری به‌دست آمد.

جدول ۱. ضرایب ژنتیکی واسنجی شده برای ارقام جو

ارقام	PIV	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
گوهران	۱۰/۰	۸۰/۰	۴۵۰	۳۰/۰	۴۰/۰	۱/۵	۹۰/۰
ریحان ۰۳	۱۰/۰	۸۰/۰	۴۰۰	۳۰/۰	۵۲/۰	۱/۵	۸۰/۰

- PIV: تعداد روز با دمای مطلوب برای کامل کردن فرایند بهاره‌سازی.

- P1D: میزان تأخیر در رشد گیاه (کاهش در نرخ توسعه فازهای فنولوژیکی) در اثر نور ناکافی. P1D نشان‌دهنده درصد کاهش در نرخ توسعه فنولوژیکی گیاه در یک دوره فتوپریودی کوتاه (۱۰ ساعته) نسبت به شرایط فتوپریودی مطلوب است. این پارامتر میزان حساسیت گیاه به کوتاهی روز را نشان می‌دهد.

- P5: مدت‌زمان مرحله پر شدن دانه (بر حسب درجه روز رشد). این شاخص تعیین‌کننده مدت زمانی است که گیاه برای انتقال مواد ذخیره‌ای به دانه‌ها نیاز دارد. - G1: تعداد دانه‌هایی که در هر گرم از وزن خشک کانوپی تولید می‌شود. بیانگر تعداد دانه در واحد وزن خشک کانوپی در زمان گلدهی است (معمولاً به صورت "تعداد دانه بر گرم کانوپی" بیان می‌شود). این پارامتر پتانسیل زایشی گیاه را نسبت به زیست‌توده نشان می‌دهد.

- G2: نرخ رشد هر دانه در شرایط ایده‌آل (فاقد تنش). نرخ رشد دانه تحت شرایط مطلوب است و معمولاً به صورت میلی گرم در روز به ازای هر دانه بیان می‌شود. - G3: ضریب کاهش یا افت در تعداد پنجه‌ها یا ساقه‌های بارده در طول رشد. ضریب مرگ پنجه‌ها (tiller mortality) است که به صورت نسبت بین وزن کل ساقه‌ها و سنبه‌ها به وزن استاندارد گیاه اصلی محاسبه می‌شود. این شاخص پایداری پنجه‌ها تا زمان برداشت را منعکس می‌کند.

- PHINT فاصله فیلوکرونی: فاصله زمانی بین ظهور دو برگ متوالی، برحسب نیاز حرارتی (GDD). PHINT یا فاصله فیلوکرونی نشان‌دهنده درجه‌روز رشد (GDD) مورد نیاز برای ظاهر شدن هر برگ جدید است. این پارامتر بیانگر سرعت رشد برگ‌ها و تعیین‌کننده دینامیک توسعه سطح برگ در گیاه است.

متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد شبیه‌سازی ضعیف را نشان می‌دهد (۱۵ و ۱۷).

برای ارزیابی مدل واسنجی شده، از داده‌هایی که در مرحله کالیبراسیون استفاده نشده بودند (آبیاری شاهد بدون نیتروژن و آبیاری تنش + ۶۲/۵ کیلوگرم نیتروژن) بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی صفات رشد و عملکرد، دقت مناسب و قابل اتکایی دارد. مدل CERES-Barley با ضرایب ژنتیکی واسنجی شده، رشد و عملکرد جو (گوهران و ریحان ۰۳) را با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. داده‌های شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مقدار آبیاری واقعی بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای و همچنین آبیاری اتوماتیک در مدل CERES-Barley در DSSAT محاسبه شد.

سناریوهای تغییر اقلیم

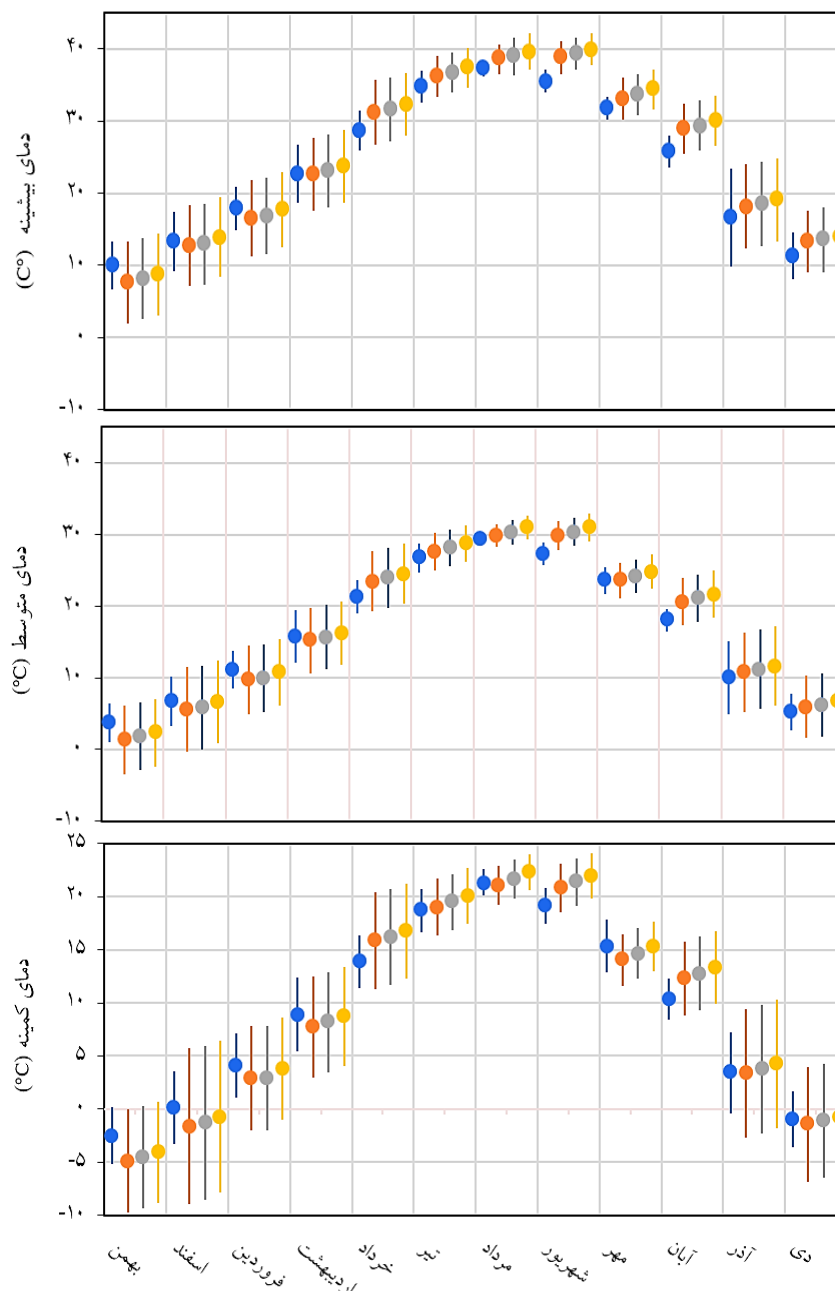
اثر تغییر اقلیم بر عملکرد بیولوژیک و دانه و میزان مصرف و بهره‌وری مصرف آب (WUE) در بازه‌های ۲۰۱۶-۲۰۳۰، ۲۰۳۰-۲۰۴۰، ۲۰۴۰-۲۰۵۰ و ۲۰۵۰-۲۰۶۰ شبیه‌سازی شد. داده‌های هواشناسی برآورده شده برای آینده با میانگین ۱۷ مدل گردش عمومی شامل GFDL-CM3، FIO-ESM، CSIRO-Mk3-6-0، BCC-CSM1-1

، GISS-E2-R، GISS-E2-H، GFDL-ESM2M، GFDL-ESM2G، IPSL-CM5A-LR، HadGEM2-ES، MIROC-ESM-CHEM، BCC-CSM1-1، MIROC5، MIROC-ESM، IPSL-CM5A-MR، RCP8.5، MRI-CGCM3، 1-M و NorESM1-M تحت سناریو از مدل مارکسیم استخراج شدند (۱۱). تعداد ۱۴ تاریخ کاشت با فواصل ۵ روز (۳۵- تا ۳۵+) روز نسبت به تاریخ‌های اصلی شامل ۳۰ مهر برای کشت پاییزه و ۱۳ اسفند برای کشت بهاره) ارزیابی شد (شکل ۱). معیار انتخاب تاریخ کاشت بهینه، بیشترین بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد بیولوژیک و دانه بود.

نتایج و بحث

۱- کالیبراسیون و ارزیابی مدل CERES-Barley

در این مطالعه ضرایب ژنتیکی (جدول ۱) با تطبیق داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده بهینه شدند. از نظر PIV (تعداد روز با دمای مطلوب برای کامل کردن فرایند بهاره‌سازی) و P1D (میزان تأخیر در رشد گیاه (کاهش در نرخ توسعه فازهای فنولوژیکی در اثر نور ناکافی)) ورنالیزاسیون و پاسخ به طول روز هر دو رقم مقدار مشابهی داشتند که نشان‌دهنده نیاز پایین به سرمای



شکل ۱. میانگین ماهانه دمای بیشینه، متوسط و کمینه روزانه در بازه‌های زمانی مختلف (تاریخ کاشت پاییزه ۳۰ مهر و تاریخ کاشت بهاره ۱۳ اسفند)

دانه (مقدار P5) برای گوه‌ران (۴۵۰) بیشتر از ریحان ۰۳ (۴۰۰) بود، که می‌تواند نشان‌دهنده طولانی‌تر بودن دوره پر شدن دانه و پتانسیل عملکرد زیادتر در شرایط با تنش کمتر باشد. G1 و G2 پتانسیل تولید و رشد دانه: ریحان ۰۳ دارای G2 زیادتری است (۵۲ در برابر ۴۰) که نشان‌دهنده پتانسیل رشد سریع‌تر

بهاره‌سازی و پاسخ نوری نسبتاً زیاد است. این مقادیر با نتایج مطالعاتی در مناطق مدیریت‌های هم‌راستا است که در آن ژنوتیپ‌های دارای شکل‌های مختلف یک ژن غیرحساس به سرما (مانند آلل غالب VRN-H1) و حساس به طول روز (Ppd-H1) برای اجتناب از تنش گرمایی مؤثر بودند (۴). مدت پر شدن

($NRMSE < 10\%$) نشان‌دهنده قابلیت اطمینان آن برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گوه‌ران است. به طور کلی عملکرد بیولوژیک گیاه ارتباط مستقیمی با مقدار تشعشع جذب‌شده توسط برگ‌ها در مدت‌زمان کاشت تا برداشت و تأمین سایر نیازهای اولیه گیاه دارد که این موارد تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط محیطی از جمله دما و رطوبت و تاریخ کاشت قرار دارند (۱۴). دقت کمتر در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک به دلیل حساسیت این صفت به این نوع تغییرات محیطی است.

• ریحان ۰۳

واسنجی برای ریحان ۰۳، در فصل پاییزه، $NRMSE$ برای روز تا گرده‌افشانی $6/0\%$ ، روز تا رسیدگی $2/9\%$ و عملکرد دانه $6/0\%$ ، اما برای سطح برگ $11/5\%$ و عملکرد بیولوژیک $13/0\%$ دقت کمتری داشت (جدول ۲). در فصل بهاره، $NRMSE$ برای روز تا گرده‌افشانی $14/8\%$ ، روز تا رسیدگی $4/7\%$ ، سطح برگ $9/56\%$ ، عملکرد دانه $17/8\%$ و عملکرد بیولوژیک $8/4\%$ بود (جدول ۲). ارزیابی مدل با داده‌های مستقل نشان داد $NRMSE$ برای صفات روز تا رسیدگی و سطح برگ کمتر از $10/0\%$ و برای روز تا گرده‌افشانی $4/3-15/6\%$ ، ولی برای صفات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک این مقادیر بیشتر بود (جدول ۳).

این دقت‌های شبیه‌سازی با نتایج مطالعات مشابه در محیط‌های مدیریت‌های و خشک همسو است. برای نمونه، کامارانو و همکاران گزارش کردند که مدل CERES-Barley می‌تواند روز تا رسیدگی و عملکرد دانه را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند؛ اگرچه دقت سطح برگ و عملکرد بیولوژیک تحت تأثیر ویژگی‌های اقلیمی و مدیریت آبیاری کمی کاهش می‌یابد (۳ و ۴). مطالعه گاردی و همکاران در اتیوپی (۶) و سارتو و همکاران (۱۸) در استان آلمریا، اسپانیا نیز نشان داد که دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه زیاد و برای شاخص‌های فیزیولوژیک مانند سطح برگ محدودتر است. نتایج مشابهی نیز در مطالعات لودویگ و آستگ برای سایر غلات مدیریت‌های دیده شد که نشان می‌دهد مدل DSSAT/CERES-Barley قابلیت شبیه‌سازی عملکرد را به‌طور قابل قبول در شرایط متفاوت

دانه در شرایط مطلوب است. این پارامتر در مطالعات قبلی برای شبیه‌سازی دقیق عملکرد در تراکم‌های زیاد بسیار مؤثر گزارش شده است؛ به ویژه در نسخه CL مدل CERES-Maize که با تغییر در G2 و G3 دقت شبیه‌سازی عملکرد بهبود یافت (۵). مقدار ضریب مرگ پنجه (G3) در هر دو رقم مشابه (۱/۵) بود و در حد معمول برای ارقام با تراکم متوسط پنجه گزارش شده است: فاصله فیلوکرونی (PHINT) برای گوه‌ران (۰/۹۰) بیشتر از ریحان ۰۳ (۰/۸۰) بود که نشان‌دهنده فاصله بیشتر بین ظهور برگ‌ها و بنابراین نرخ رشد کندتر برگ در گوه‌ران است. این تأخیر می‌تواند در مناطق گرم‌تر به تأخیر در گل‌دهی منجر شود که در شرایط تنش گرمایی پایانی نامطلوب خواهد بود. مقایسه ضرایب ژنتیکی این مطالعه با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ارقام گوه‌ران و ریحان ۰۳ با شرایط اقلیمی خشک و گرم سازگارند. مقادیر کم P1V و زیاد P1D نشان‌دهنده آن است که این ارقام برای فرار از تنش‌های گرمایی انتهای فصل رشد مناسب هستند. تفاوت در P5 و G2 بین دو رقم نیز بیانگر استراتژی‌های متفاوت برای پر شدن دانه و تجمع ماده خشک است که می‌تواند بر پایه مدیریت‌های متفاوت آبی و تغذیه‌ای بهینه‌سازی شود.

• گوه‌ران

مدل CERES-Barley برای گوه‌ران واسنجی شد. در فصل پاییزه، میزان $NRMSE$ برای روز تا رسیدگی صفر درصد، روز تا گرده‌افشانی $3/6\%$ و عملکرد بیولوژیک $3/8\%$ به‌دست آمد که کمتر از مقادیر مرتبط با سطح برگ $11/2\%$ و عملکرد دانه $11/2\%$ بود (جدول ۲). در فصل بهاره، میزان $NRMSE$ برای روز تا رسیدگی ($6/6\%$)، روز تا گرده‌افشانی ($6/1\%$) بیشتر از مقادیر ثبت‌شده در فصل پاییزه بود و برای سطح برگ $4/9\%$ ، عملکرد دانه $9/0\%$ ، عملکرد دانه $1/5\%$ و عملکرد بیولوژیک $6/2\%$ بود. ارزیابی مدل با داده‌های مستقل نشان داد $NRMSE$ برای صفات روز تا گرده‌افشانی، روز تا رسیدگی و سطح برگ کمتر از $10/0\%$ ، ولی برای صفات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک این مقادیر بیشتر بود (جدول ۳). دقت زیاد مدل

جدول ۲. نتایج کالیبراسیون مدل برای مراحل فنولوژیکی، سطح برگ، عملکرد دانه و عملکرد بیوماس در دو ژنوتیپ جو مورد مطالعه با

استفاده از مدل CERES-barley در بسته نرم‌افزاری DSSAT

رقم	فصل کاشت	گرده‌افشانی	رسیدگی فیزیولوژیک	سطح برگ	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک
			(تعداد روز پس از کاشت)		(کیلوگرم در هکتار)	
پاییزه	مشاهده	۱۶۳	۲۰۰	۲/۹	۴۶۲۵	۱۳۰۳۷
	شبیه‌سازی	۱۶۸	۲۰۶	۲/۸	۴۴۵۴	۱۰۱۲۸
	RMSE	۶/۵	۷/۸	۰/۱۳	۲۲۲	۳۷۸۲
	NRMSE	۴/۳	۴/۲	۴/۸	۵/۲	۳۱/۲
گوه‌ران	مشاهده	۹۴	۱۱۷	۳/۶	۲۵۷۸	۱۰۸۸۵
	شبیه‌سازی	۱۰۰	۱۲۳	۳/۷	۲۸۳۲	۹۵۶۵
	RMSE	۷/۸	۷/۸	۰/۱۳	۳۳۰	۱۷۱۶
	NRMSE	۸/۹	۷/۲	۳/۹	۱۳/۸	۱۷/۰
پاییزه	مشاهده	۱۶۳	۱۹۸	۳/۱	۳۶۱۵	۱۱۸۴۹
	شبیه‌سازی	۱۶۸	۲۰۳	۲/۹	۳۷۱۸	۱۰۰۵۸
	RMSE	۶/۵	۶/۵	۰/۲۶	۱۳۴	۲۳۲۸
	NRMSE	۴/۳	۳/۵	۹/۰	۴/۰	۲۱/۲
ریحان ۰۳	مشاهده	۹۰	۱۲۰	۳/۹	۲۳۵۷	۸۳۸۹
	شبیه‌سازی	۱۰۰	۱۲۱	۳/۸	۲۰۰۱	۷۱۴۹
	RMSE	۱۳	۱/۳	۰/۱۳	۴۶۳	۱۶۱۲
	NRMSE	۱۵/۶	۱/۲	۳/۶	۲۱/۱	۲۰/۷

اقلیمی دارد (۱۴). افزون بر این، متاآنالیزها نشان می‌دهند که تغییر تاریخ کاشت و مدیریت بهینه مزرعه‌ای می‌تواند دقت مدل و میزان عملکرد پیش‌بینی شده را تا حد زیادی بهبود بخشد (۶).

۲- شبیه‌سازی پاسخ رشد و عملکرد به تغییرات اقلیم

۲-۱- کاشت پاییزه

• گوه‌ران

در بازه ۲۰۰۳-۲۰۱۶، میانگین زمان تا گرده‌افشانی و رسیدگی به ترتیب ۱۸۳ و ۲۱۵ روز، سطح برگ ۴/۰۵، عملکرد دانه ۳۹۵۸ کیلوگرم و عملکرد بیولوژیک ۱۲۹۰۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). در ۲۰۵۰-۲۰۴۰، روز تا گرده‌افشانی (۱۸۶ روز)، رسیدگی (۲۱۳ روز) و سطح برگ (۴/۲۵) افزایش، ولی عملکرد دانه و بیولوژیک کاهش یافت. مصرف آب (۳۸۷/۵ میلی‌متر) و

تبخیر - تعرق (۳۹۹ میلی‌متر) در دوره زمانی ۲۰۵۰-۲۰۴۰ بیشینه بود که نسبت به بازه ۲۰۱۶-۲۰۰۳ به ترتیب ۱۲٪ و ۱۱٪ افزایش نشان داد (جدول ۴). WUE_G (۱/۱۵) کیلوگرم بر مترمکعب و WUE_B (۳/۷۶) کیلوگرم بر مترمکعب) در ۲۰۰۳-۲۰۱۶ بیشینه و سپس در ده‌های آتی کاهش بود (جدول ۴). با توجه به تیمارهای آبیاری مورد استفاده در شبیه‌سازی رشد و عملکرد جو، مقادیر تیمار آبیاری اتوماتیک مدل برای میزان آب مصرفی و تبخیر و تعرق رقم گوه‌ران به ترتیب ۲۷ و ۳۲ میلی‌متر بیشتر از آبیاری اعمال‌شده در مزرعه بود. بر اساس سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5 برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰، افزایش دما در بهار (ماه اردیبهشت) (شکل ۱) احتمالاً دوره پرشدن دانه را کوتاه کرده و منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود؛ درحالی‌که در زمستان، رشد رویشی و سطح برگ افزایش

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل برای مراحل فنولوژیکی، سطح برگ، عملکرد دانه و بیولوژیک در دو رقم جو مورد مطالعه با استفاده از مدل

DSSAT در CERES-barley بسته نرم‌افزاری

ژنوتیپ	فصل کاشت	گرده‌افشانی	رسیدگی فیزیولوژیک	سطح برگ	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک
		(تعداد روز پس از کاشت)		(کیلوگرم در هکتار)		
گوهران	پاییزه	مشاهده	۱۶۵	۲۰۶	۳/۵	۵۳۳۲
		شبیه‌سازی	۱۶۸	۲۰۶	۳/۷	۱۲۷۶۶
		RMSE	۲/۴	۰	۰/۲۸	۱۳۵۵
		NRMSE	۳/۶	۰	۱۱/۲	۳/۸
	بهاره	مشاهده	۹۷	۱۱۹	۴/۰	۳۲۲۵
		شبیه‌سازی	۱۰۰	۱۲۳	۴/۱	۳۲۰۱
		RMSE	۴/۳	۵/۶	۰/۱۴	۳۳/۶
		NRMSE	۶/۱	۶/۶	۴/۹	۱/۵
ریحان ۰۳	پاییزه	مشاهده	۱۶۳	۲۰۰	۳/۴	۴۲۹۱
		شبیه‌سازی	۱۶۸	۲۰۳	۳/۶	۴۴۲۳
		RMSE	۷/۰	۴/۲	۰/۲۸	۱۸۴
		NRMSE	۶/۰	۲/۹	۱۱/۵	۶/۰
	بهاره	مشاهده	۹۳	۱۲۴	۴/۱	۲۵۰۴
		شبیه‌سازی	۱۰۰	۱۲۱	۴/۳	۲۲۷۶
		RMSE	۹/۸	۴/۲	۰/۲۸	۳۱۹
		NRMSE	۱۴/۸	۴/۷	۹/۵۶	۱۷/۸

۴٪ و ۲/۶٪ افزایش نشان داد (جدول ۴). WUE_G (۰/۹۶۵) کیلوگرم بر مترمکعب) و WUE_B (۳/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب) در ۲۰۱۶-۲۰۰۳ بیشینه بود. ریحان ۰۳ به دلیل زودرسی، نسبت به گوهران کمتر تحت تأثیر دمای بهاره قرار گرفت؛ اما کاهش عملکرد دانه در آینده به دلیل کوتاه شدن دوره پرشدن دانه بود. افزایش مصرف آب و تبخیر - تعرق مشابه گوهران، WUE را کاهش داد.

۲-۲- کاشت بهاره

• گوهران

در بازه ۲۰۱۶-۲۰۰۳، روز تا گرده‌افشانی و رسیدگی به ترتیب ۷۹ و ۱۰۴ روز، سطح برگ ۳/۵۵، عملکرد دانه ۳۸۰۱ کیلوگرم و عملکرد بیولوژیک ۱۱۰۰۳ کیلوگرم در هکتار بود؛ ولی در

می‌یابد. همچنین، گرمای فصلی باعث افزایش مصرف آب و تبخیر - تعرق شده و در نتیجه WUE کاهش می‌یابد. این پیش‌بینی‌ها براساس داده‌های دمایی ارائه شده در شکل ۱ حاصل شده‌اند.

• ریحان ۰۳

در بازه ۲۰۱۶-۲۰۰۳، روز تا گرده‌افشانی و رسیدگی ۱۸۳ و ۲۱۲ روز، سطح برگ ۳/۷، عملکرد دانه ۳۳۷۸ کیلوگرم بر هکتار و عملکرد بیولوژیک ۱۱۵۰۶ کیلوگرم بر هکتار بود. در ۲۰۵۰-۲۰۴۰، روز تا گرده‌افشانی (۱۸۶ روز) و سطح برگ (۳/۹۵) افزایش یافت. در این دوره روز تا رسیدگی (۲۱۲ روز) بدون تغییر ولی عملکرد دانه و بیولوژیک کاهش یافت. مصرف آب (۳۷۱ میلی‌متر) و تبخیر - تعرق (۳۸۸ میلی‌متر) در بازه ۲۰۵۰-۲۰۴۰ به اوج رسید که نسبت به ۲۰۱۶-۲۰۰۳ به ترتیب

جدول ۴. شبیه‌سازی برخی از ویژگی‌های رشدی و عملکردی ارقام گوجران و ریحان ۳ طی بازه‌های زمانی مختلف تحت شرایط آبیاری واقعی و اتوماتیک (برحسب تأمین نیاز آب محصول

توسط مدل) در فصل کاشت پاییزه

صفت	گوجران					ریحان ۳				
	آبیاری	۲۰۱۶-۲۰۲۰	۲۰۲۰-۲۰۳۰	۲۰۳۰-۲۰۴۰	۲۰۴۰-۲۰۵۰	آبیاری	۲۰۱۶-۲۰۲۰	۲۰۲۰-۲۰۳۰	۲۰۳۰-۲۰۴۰	۲۰۴۰-۲۰۵۰
گرددانشانی (روز)	اتوماتیک	۱۸۳	۱۹۰	۱۸۹	۱۸۶	اتوماتیک	۱۸۳	۱۹۰	۱۸۹	۱۸۶
رسیدگی (روز)	اتوماتیک	۲۱۵	۲۱۸	۲۱۶	۲۱۳	اتوماتیک	۲۱۲	۲۱۶	۲۱۴	۲۱۲
سطح برگ	اتوماتیک	۴/۱	۴/۷	۴/۶	۴/۲	اتوماتیک	۳/۷	۴/۳	۴/۱	۳/۹
عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	اتوماتیک	۳۹۹۲	۳۹۴۶	۳۸۵۹	۳۸۳۴	اتوماتیک	۳۴۰۸	۳۳۳۱	۳۲۳۶	۳۲۵۵
عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم بر هکتار)	اتوماتیک	۱۲۸۲۶	۱۲۷۲۸	۱۲۸۲۱	۱۳۱۸۶	اتوماتیک	۱۱۴۴۶	۱۱۳۳۱	۱۱۳۷۷	۱۱۵۶۳
آب مصرفی (میلی‌متر)	اتوماتیک	۳۴۱	۳۴۲	۳۶۳	۳۷۴	اتوماتیک	۳۶۱	۳۴۱	۳۶۰	۳۶۹
تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	اتوماتیک	۳۵۳	۳۶۳	۳۸۴	۴۰۱	اتوماتیک	۳۶۸	۳۵۷	۳۶۵	۳۷۴
WUE_n (کیلوگرم بر مترمکعب)	اتوماتیک	۱/۱۵	۱/۰۸	۱/۰۵	۱/۰۴	اتوماتیک	۱/۰۰	۰/۸۶	۰/۸۹	۰/۸۷
WUE_B (کیلوگرم بر مترمکعب)	اتوماتیک	۳/۶۸	۳/۵۳	۳/۷۲	۳/۵۲	اتوماتیک	۳/۷۸	۳/۱۹	۳/۱۸	۳/۱۴

۲۰۱۶-۲۰۲۰۳ بیشینه بود. دمای مناسب در خرداد و تیر در دوره ۲۰۱۶-۲۰۲۰۳ رشد رویشی و پرشدن دانه را بهبود داد. کاهش مصرف آب و تبخیر - تعرق در آینده به دلیل کوتاه شدن دوره رشد است؛ اما افزایش دما عملکرد به ویژه عملکرد بیولوژیک را حدود ۱۸٪ کاهش می‌دهد (جدول ۵، شکل ۱).

۲۰۵۰-۲۰۴۰، این صفات کاهش می‌یابد (جدول ۵). مصرف آب (۲۴۹/۵ میلی‌متر) و تبخیر - تعرق (۲۷۵ میلی‌متر) در ۲۰۵۰-۲۰۴۰ نسبت به بازه ۲۰۱۶-۲۰۲۰۳ به ترتیب حدود ۲٪ و ۷٪ کاهش نشان داد (جدول ۵). WUE_n (۱/۲۹) کیلوگرم بر مترمکعب) و WUE_B (۴/۳۳) کیلوگرم بر مترمکعب) در بازه

جدول ۵. شیمی‌سازی برخی از ویژگی‌های ریشی و عملکردی ژنوتیپ‌های کورمان و ریحان ۰۳، طی بازه‌های زمانی مختلف تحت شرایط آبیاری واقعی و اتوماتیک (برسب تأمین نیاز آب معقول توسط مدل) در فصل کاشت بهار

	ریحان ۰۳					کورمان				
	۲۰۴۰-۲۰۵۰	۲۰۳۰-۲۰۴۰	۲۰۲۰-۲۰۳۰	۲۰۱۶-۲۰۲۰	آبیاری واقعی	۲۰۴۰-۲۰۵۰	۲۰۳۰-۲۰۴۰	۲۰۲۰-۲۰۳۰	۲۰۱۶-۲۰۲۰	آبیاری واقعی
گردآفشانی (روز)	۷۷	۷۸	۷۸	۷۹	۷۹	۷۷	۷۸	۷۸	۷۹	۷۹
رسیدگی (روز)	۹۹	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۳	۱۰۳	۱۰۲	۱۰۲	۱۰۳	۱۰۴	۱۰۴
سطح برگ	۲/۳	۳/۱	۳/۱	۲/۹	۲/۹	۲/۷	۳/۱	۲/۳	۳/۴	۳/۴
عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	۲۹۹۱	۳۰۵۸	۳۰۹۳	۳۱۹۳	۳۳۷۰	۲۷۳۸	۲۹۶۸	۳۱۹۳	۳۳۶۵	۳۴۶۵
عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم بر هکتار)	۶۷۶۵	۶۷۱۳	۶۷۹۵	۸۷۹۵	۹۷۷۴	۷۷۷۴	۸۱۳۸	۸۴۹۲	۱۰۱۷۴	۱۰۱۷۴
آب مصرفی (میلی‌متر)	۲۴۴	۲۵۲	۲۳۹	۲۳۵	۲۵۵	۲۴۴	۲۵۲	۲۳۹	۲۴۶	۲۴۶
تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	۲۶۳	۲۶۴	۲۵۸	۲۸۶	۲۶۷	۲۶۷	۲۷۵	۲۷۲	۲۹۲	۲۹۲
WUE_G (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۴	۱/۰۴	۱/۱۹	۱/۰۳	۱/۰۸	۱/۱۷	۱/۱۸	۱/۱۸
WUE_B (کیلوگرم بر مترمکعب)	۳/۵۸	۳/۶۱	۳/۶۱	۳/۵۸	۴/۰۴	۳/۱۹	۳/۳۳	۳/۵۵	۴/۱۴	۴/۵۳

• ریحان ۰۳

در بازه ۲۰۰۳-۲۰۱۶، روز تا گرده‌افشانی و رسیدگی به ترتیب ۷۹ و ۱۰۳ روز، سطح برگ ۳/۶۵، عملکرد دانه ۲۸۵۸ کیلوگرم و عملکرد بیولوژیک ۹۶۰۲ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۵). در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰، این صفات کاهش یافت. مصرف آب

(۲۳۹ میلی‌متر) و تبخیر - تعرق (۲۶۷ میلی‌متر) در بازه ۲۰۵۰-۲۰۴۰ نسبت به ۲۰۱۶-۲۰۰۳ به ترتیب حدود ۴٪ و ۷٪ کاهش نشان داد (جدول ۵). WUE_G (۱/۱۶) کیلوگرم بر مترمکعب) و WUE_B (۳/۷۸۵) کیلوگرم بر مترمکعب) در ۲۰۱۶-۲۰۰۳ بیشینه بود و در بازه‌های زمانی آینده کاهش

می‌یابد (جدول ۵). کاهش تبخیر - تعرق در آینده به دلیل کوتاه شدن دوره رشد است؛ اما افزایش دما در مراحل حساس (شکل ۱)، عملکرد را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

۱- تأثیر تاریخ کاشت

تاریخ مرجع کاشت پاییزه برای این مطالعه ۳۰ مهرماه در نظر گرفته شد و تاریخ‌های کاشت با فاصله ۵ تا ۳۵ روز زودتر یا دیرتر از این تاریخ آزمایش شدند. معیار برتری تاریخ کاشت، بیشینه بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد دانه و ماده خشک (بیولوژیک) بود.

۱-۱- کاشت پاییزه

• گوه‌ران

برای رقم گوه‌ران کاشت زودهنگام (زودتر از ۳۰ مهر) منجر به کاهش بهره‌وری آب مصرفی برای عملکرد دانه و بیولوژیک شد (جدول ۶). این در حالی است که در بازه ۲۰۳۰-۲۰۲۰، با تاخیر ۲۰ و ۲۵ روزه نسبت به تاریخ کاشت ۳۰ مهرماه، به ترتیب بیشترین بهره‌وری آب برای عملکرد دانه و بیولوژیک به دست آمد. در بازه ۲۰۴۰-۲۰۳۰، تاخیر ۲۵ روزه، باعث دستیابی به بیشینه مقادیر بهره‌وری شد. همچنین در بازه ۲۰۵۰-۲۰۴۰، تاخیر ۲۰ روزه نسبت به تاریخ کاشت ۳۰ مهرماه، بیشترین مقادیر بهره‌وری برای دانه و بیوماس به دست آمد (جدول ۶).

• ریحان ۰۳

برای رقم ریحان ۰۳ نیز کاشت زودهنگام (زودتر از ۳۰ مهر) منجر به کاهش بهره‌وری آب مصرفی برای عملکرد دانه و بیولوژیک شد (جدول ۷). این در حالی است که در بازه ۲۰۳۰-۲۰۲۰، با تاخیر ۲۵ روزه نسبت به تاریخ کاشت ۳۰ مهرماه، بیشترین بهره‌وری آب برای عملکرد دانه و بیولوژیک به دست آمد. در بازه ۲۰۴۰-۲۰۳۰، تاخیر ۱۵ روزه، بیشترین بهره‌وری مصرف آب دانه و با تاخیر ۲۵ روزه بیشترین بهره‌وری

مصرف آب عملکرد بیولوژیک به دست می‌آید (جدول ۷). در بازه ۲۰۵۰-۲۰۴۰، با ۲۰ روز تاخیر نسبت به تاریخ کاشت ۳۰ مهرماه، بیشترین مقادیر بهره‌وری برای دانه و بیوماس به دست آمد (جدول ۷).

۲-۱- فصل کاشت بهاره

تاریخ مرجع کاشت بهاره برای این مطالعه ۱۳ اسفندماه در نظر گرفته شد و تاریخ‌های کاشت با فاصله ۵ تا ۳۵ روز زودتر یا دیرتر از این تاریخ آزمایش شدند. معیار برتری تاریخ کاشت، بیشینه بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد دانه و ماده خشک (بیولوژیک) بود.

• گوه‌ران

برخلاف کاشت پاییزه، کاشت زودهنگام (زودتر از ۱۳ اسفندماه) رقم گوه‌ران منجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد دانه و بیولوژیک شد (جدول ۸). این در حالی است که در بازه ۲۰۳۰-۲۰۲۰، با ۱۰ و ۱۵ روز کاشت زودتر نسبت به تاریخ کاشت ۱۳ اسفند، بیشترین بهره‌وری مصرف آب به ترتیب برای عملکرد بیولوژیک و دانه به دست آمد. در بازه‌های ۲۰۴۰-۲۰۳۰ و ۲۰۵۰-۲۰۴۰، کاشت زودتر ۱۵ روزه، باعث دستیابی به بیشینه مقادیر بهره‌وری شد (جدول ۸).

• ریحان ۰۳

برای رقم ریحان ۰۳ تاریخ‌های کاشت دیرتر از ۱۳ اسفندماه منجر به کاهش بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد دانه و بیولوژیک شد (جدول ۹). این در حالی است که در بازه ۲۰۳۰-۲۰۲۰، با ۱۵ روز کاشت زودتر نسبت به تاریخ کاشت ۱۳ اسفند، به ترتیب بیشترین بهره‌وری مصرف آب برای عملکرد بیولوژیک و دانه به دست آمد. در بازه‌های ۲۰۴۰-۲۰۳۰ و ۲۰۵۰-۲۰۴۰، کاشت زودتر ۱۵ روزه (نسبت به ۱۳ اسفندماه) برای بهره‌وری مصرف آب عملکرد بیولوژیک و کاشت زودتر ۲۰ روزه برای بهره‌وری مصرف آب عملکرد دانه، باعث دستیابی به بیشینه مقادیر بهره‌وری شد (جدول ۹).

جدول ۷. تغییرات بهره‌وری مصرف آب ژئوتیپ گوه‌ران در بازه‌های زمانی مختلف در اثر تغییر تاریخ کاشت طی فصل کاشت پاییزه

تغییرات تاریخ کاشت (روز)	تغییرات تاریخ کاشت (روز)										
	+۳۵	+۳۰	+۲۵	+۲۰	-۱۵	-۱۰	-۵	۰	+۵	+۱۰	+۱۵
۲۰۰۳-۲۰۱۶	۱/۱۸	۱/۲۷	۱/۳۰	۱/۳۱	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۷	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۴۰	۱/۴۱
	۲/۱۶	۲/۱۲	۲/۱۰	۲/۱۵	۲/۱۴	۲/۱۳	۲/۱۲	۲/۱۱	۲/۱۰	۲/۹	۲/۸
۲۰۲۰-۲۰۳۰	۱/۳۲	۱/۴۷	۱/۵۰	۱/۵۲	۱/۵۳	۱/۵۴	۱/۵۵	۱/۵۶	۱/۵۷	۱/۵۸	۱/۵۹
	۲/۲۶	۲/۲۸	۲/۲۵	۲/۲۳	۲/۲۲	۲/۲۱	۲/۲۰	۲/۱۹	۲/۱۸	۲/۱۷	۲/۱۶
۲۰۳۰-۲۰۴۰	۱/۴۰	۱/۴۸	۱/۵۲	۱/۵۳	۱/۵۴	۱/۵۵	۱/۵۶	۱/۵۷	۱/۵۸	۱/۵۹	۱/۶۰
	۲/۳۱	۲/۴۰	۲/۴۶	۲/۴۷	۲/۴۸	۲/۴۹	۲/۵۰	۲/۵۱	۲/۵۲	۲/۵۳	۲/۵۴
۲۰۴۰-۲۰۵۰	۱/۲۴	۱/۳۵	۱/۴۶	۱/۴۹	۱/۵۲	۱/۵۳	۱/۵۴	۱/۵۵	۱/۵۶	۱/۵۷	۱/۵۸
	۲/۰۱	۲/۱۳	۲/۲۴	۲/۲۶	۲/۲۹	۲/۳۰	۲/۳۱	۲/۳۲	۲/۳۳	۲/۳۴	۲/۳۵

جدول ۸. تغییرات بهره‌وری مصرف آب ژئوتیپ ریحان ۰۳ در بازه‌های زمانی مختلف در اثر تغییر تاریخ کاشت طی فصل کاشت پاییزه

تغییرات تاریخ کاشت (روز)	تغییرات تاریخ کاشت (روز)										
	+۳۵	+۳۰	+۲۵	+۲۰	-۱۵	-۱۰	-۵	۰	+۵	+۱۰	+۱۵
۲۰۰۳-۲۰۱۶	۰/۹۸۴	۱/۰۴	۱/۱۴	۱/۱۶	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۰۴	۱/۰۲	۱/۰۰	۱/۰۴	۱/۰۵
	۳/۰۵	۳/۳۰	۳/۶۵	۳/۷۰	۳/۷۱	۳/۷۰	۳/۶۹	۳/۶۸	۳/۶۷	۳/۶۶	۳/۶۵
۲۰۳۰-۲۰۴۰	۱/۱۵	۱/۲۱	۱/۲۵	۱/۲۷	۱/۲۸	۱/۲۷	۱/۲۶	۱/۲۵	۱/۲۴	۱/۲۳	۱/۲۲
	۳/۷۸	۳/۹۳	۴/۰۱	۴/۰۴	۴/۰۵	۴/۰۶	۴/۰۷	۴/۰۸	۴/۰۹	۴/۱۰	۴/۱۱
۲۰۴۰-۲۰۵۰	۱/۰۸	۱/۱۵	۱/۱۸	۱/۲۴	۱/۲۵	۱/۲۶	۱/۲۷	۱/۲۸	۱/۲۹	۱/۳۰	۱/۳۱
	۳/۷۰	۳/۹۵	۴/۰۱	۴/۰۸	۴/۰۹	۴/۱۰	۴/۱۱	۴/۱۲	۴/۱۳	۴/۱۴	۴/۱۵
۲۰۵۰-۲۰۶۰	۰/۹۹۵	۱/۱۲	۱/۳۱	۱/۳۳	۱/۳۴	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۷	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۴۰
	۳/۴۳	۳/۷۵	۴/۰۸	۴/۱۰	۴/۱۱	۴/۱۲	۴/۱۳	۴/۱۴	۴/۱۵	۴/۱۶	۴/۱۷

مدل CERES-Barley با ضرایب ژنتیکی واسنجی‌شده، رشد و عملکرد جو (گوه‌ران و ریحان ۰۳) را با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. تغییر اقلیم، به‌ویژه افزایش دما، عملکرد دانه و بیولوژیک را در هر دو فصل کاشت کاهش داد؛ اما عملکرد بیولوژیک به ویژه در کاشت بهاره کاهش بیشتری پیدا کرد. در بازه ۲۰۴۰-

۲۰۵۰، بیشترین میزان مصرف آب در کشت پاییزه (۳۸۷/۵ میلی‌متر) برای گوه‌ران و کمترین میزان مصرف آب در کشت بهاره (۲۳۹ میلی‌متر) برای ریحان ۰۳ به‌دست آمد. در هر دو رقم، تأخیر ۲۵-۲۰ روزه در کاشت پاییزه، بهره‌وری مصرف آب را بهبود داد؛ درحالی‌که کاشت زودهنگام ۲۰-۱۰ روزه در کاشت

جدول ۸. تغییرات بهره‌وری مصرف آب ژئوتیپ گهران در بازه‌های زمانی مختلف در اثر تغییر تاریخ کاشت طی فصل کاشت بهاره

تغییرات تاریخ کاشت (روز)														
+۳۵	+۳۰	+۲۵	+۲۰	+۱۵	+۱۰	-۵	-۱۰	-۱۵	-۲۰	-۲۵	-۳۰	-۳۵		
۰/۸۱۲	۰/۸۸۵	۰/۹۰۵	۰/۹۵۴	۱/۰۱	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۳۹	۱/۳۰	۱/۱۵	۱/۰۱	WUE _G
۲/۳۰	۲/۴۳	۲/۸۸	۲/۸۴	۲/۹۰	۳/۳۸	۳/۳۸	۴/۱۴	۴/۱۴	۴/۲۲	۴/۲۰	۳/۸۷	۳/۵۷	۳/۱۸	WUE _B
۰/۸۶۵	۰/۹۱۱	۰/۹۷۵	۰/۹۸۳	۱/۱۸	۱/۲۹	۱/۱۳	۱/۱۷	۱/۲۰	۱/۲۸	۱/۳۵	۱/۳۳	۱/۲۸	۱/۲۶	WUE _G
۲/۲۱	۲/۵۶	۲/۸۵	۲/۸۷	۳/۱۷	۳/۳۹	۳/۵۰	۳/۵۵	۳/۵۹	۳/۷۶	۳/۷۱	۳/۶۶	۳/۴۶	۳/۲۲	WUE _B
۰/۸۸۴	۰/۸۹۰	۰/۸۸۰	۰/۸۰۴	۰/۹۹۵	۱/۰۹	۱/۱۲	۱/۰۸	۱/۳۷	۱/۴۶	۱/۴۸	۱/۳۳	۱/۲۸	۱/۲۰	WUE _G
۲/۱۴	۲/۳۰	۲/۴۵	۲/۵۱	۳/۰۲	۳/۲۲	۳/۲۵	۳/۲۳	۳/۵۵	۳/۶۸	۳/۷۵	۳/۶۶	۳/۵۴	۳/۵۰	WUE _B
۰/۸۵۰	۰/۹۸۵	۱/۰۱	۰/۹۹۴	۰/۹۹۳	۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۰۳	۱/۳۱	۱/۵۲	۱/۵۵	۱/۴۹	۱/۳۴	۱/۱۵	WUE _G
۲/۱۰۵	۲/۴۵	۲/۵۳	۲/۶۷	۲/۹۰	۳/۱۸	۳/۴۷	۳/۱۹	۳/۹۵	۴/۰۳	۴/۰۵	۳/۸۹	۳/۸۶	۳/۷۳	WUE _B

جدول ۹. تغییرات بهره‌وری مصرف آب ژئوتیپ ریحان ۳ در بازه‌های زمانی مختلف در اثر تغییر تاریخ کاشت طی فصل کاشت بهاره

تغییرات تاریخ کاشت (روز)														
+۳۵	+۳۰	+۲۵	+۲۰	+۱۵	+۱۰	+۵	۰	-۵	-۱۰	-۱۵	-۲۰	-۲۵	-۳۰	-۳۵
۰/۸۰۸	۰/۸۲۵	۰/۸۴۶	۰/۸۸۵	۱/۰۰	۱/۰۴	۱/۰۵	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۲۸	۱/۲۳	۱/۱۵	۱/۰۲	۱/۰۳	۰/۹۹۰
۲/۱۴	۲/۳۶	۲/۵۰	۲/۳۰	۲/۷۲	۳/۰۲	۳/۰۲	۳/۵۸	۳/۶۵	۳/۷۸	۳/۷۴	۳/۶۷	۳/۵۵	۳/۴۶	۲۰۰۳-۲۰۱۶
														WUE _G
														WUE _B
۰/۸۳۰	۰/۸۴۳	۰/۸۵۸	۰/۸۵۳	۰/۹۱۴	۰/۹۳۵	۰/۹۴۱	۰/۹۴۲	۱/۱۹	۱/۲۸	۱/۳۱	۱/۲۷	۱/۲۷	۱/۰۱	۰/۹۱۲
۲/۰۹	۲/۳۲	۲/۴۶	۲/۵۵	۲/۶۳	۲/۷۳	۲/۸۰	۲/۸۴	۳/۱۱	۳/۱۵	۳/۱۵	۲/۹۶	۲/۸۲	۲/۵۸	۲/۵۵
														۲۰۲۰-۲۰۲۰
														WUE _G
														WUE _B
۰/۸۵۰	۰/۸۸۱	۰/۸۰۱	۰/۸۱۲	۰/۸۴۵	۰/۸۸۹	۰/۸۸۴	۰/۹۰۴	۱/۲۰	۱/۳۰	۱/۳۲	۱/۳۵	۱/۲۱	۱/۰۷	۰/۹۵۵
۱/۴۳	۱/۶۷	۱/۸۰	۱/۹۰	۱/۸۴	۲/۱۷	۲/۲۶	۲/۶۶	۲/۷۲	۲/۷۴	۲/۸۸	۲/۵۷	۲/۴۴	۲/۲۱	۲۰۲۰-۲۰۲۰
														WUE _G
														WUE _B
۰/۸۵۳	۰/۸۸۶	۰/۹۱۲	۰/۹۴۳	۰/۸۹۶	۱/۰۹	۱/۰۷	۰/۹۰۴	۱/۱۴	۱/۲۰	۱/۲۲	۱/۲۵	۰/۹۱۱	۰/۸۸۹	۲۰۵۰-۲۰۴۰
۲/۱۰۵	۲/۱۳	۲/۲۵	۲/۳۲	۲/۳۷	۲/۴۸	۲/۷۰	۲/۷۶	۲/۹۵	۳/۰۱	۳/۲۳	۳/۱۷	۳/۱۲	۳/۰۵	۲/۸۹
														WUE _G
														WUE _B

بهره‌وری آب را بهبود بخشید. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت تاریخ کاشت برای پایداری تولید جو در شرایط تغییر اقلیم تأکید دارند. پیشنهاد می‌شود علاوه بر بهره‌وری مصرف آب، شاخص‌های اقتصادی تولید نیز در نظر گرفته شوند تا اثرات تغییرات مدیریت و اقلیم بر سودآوری بررسی شود. همچنین، ارزیابی اثر مستقیم افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر عملکرد گیاه جو می‌تواند تصویر دقیق‌تری از اثرات تغییر اقلیم ارائه کند.

بهاره، به دلیل بهره‌گیری از دمای مناسب این شاخص‌های رشد را افزایش داد. تبخیر - تعرق در پاییزه (تا ۳۹۹ میلی‌متر) افزایش، ولی در کشت بهاره (تا ۲۶۷ میلی‌متر) کاهش یافت. رقم ریحان ۳ به دلیل زودرسی، تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم در کاشت بهاره کاهش عملکرد کمتری را نشان داد. کاشت دیر هنگام در پاییز و کاشت زود هنگام در بهار، اثرات منفی تغییر اقلیم را کاهش داد، تبخیر - تعرق را تعدیل کرد و

References

منابع مورد استفاده

1. Abbas, G., H. Younis, S. Naz, Z. Fatima, A. Rehman, S. Hussain, M. Ahmed and S. Ahmad. 2019. PP. 131-147. In: M. Hasanuzzaman (Ed.). Effect of Planting Dates on Agronomic Crop Production, Agronomic Crops, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9151-5_8
2. Bardehji, S., H.R. Eshghizadeh, M. Zahedi, M.R. Sabzalian and M. Gheisari. 2021. The combined effect of nitrogen fertilizer and sowing season on response to water-limited stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Agricultural Science* 159: 31–49. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000149>
3. Cammarano, D., S. Ceccarelli, S. Grando, I. Romagosa, A. Benbelkacem, T. Akar, A. Al-Yassin, N. Pecchioni, E. Francia and D. Ronga. 2019. The impact of climate change on barley yield in the Mediterranean basin. *European Journal of Agronomy* 106: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.03.002>
4. Cammarano, D., D. Ronga, E. Francia, T. Akar, A. Al-Yassin, A. Benbelkacem, S. Grando, I. Romagosa, A.M. Stanca and N. Pecchioni. 2021. Genetic and Management Effects on Barley Yield and Phenology in the Mediterranean Basin. *Frontiers in Plant Science* 12: 665406. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.655406>
5. Cazanga, R., J.F. Ledent and E. von Bennewitz. 2019. Adaptation of CERES-Maize model for a better simulation of plant population density effects. *Field Crops Research* 238: 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.017>
6. Dadrasi, A., E. Soltani, D. Makowski and J.R. Lamichhane. 2024. Does shifting from normal to early or late sowing dates provide yield benefits? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 318: 109600. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109600>
7. Elakhdar, A., S. Solanki, T. Kubo, A. Abed, I. Elakhdar, R. Khedr, A. Hamwiah, L.J.A. Capo-chichi, M. Abdelsattar, J.D. Franckowiak and C.O. Qualset. 2022. Barley with improved drought tolerance: Challenges and perspectives. *Environmental and Experimental Botany* 201: 104965. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104965>
8. Gardi, M.W., E. Memic, E. Zewdu, E. and S. Graeff-Hönniger. 2022. Simulating the effect of climate change on barley yield in Ethiopia with the DSSAT-CERES-Barley model. *Agronomy Journal* 114:1128–1145. <https://doi.org/10.1002/agj2.21005>
9. George, A., R. Murali, G.E. Jolly and M. Jincy. 2025. Drought Stress on Barley Crop: A Review. *Agricultural Reviews* 46(6): 858-867. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2715>
10. Gitz, V., A. Meybeck, L. Lipper, C. Young and S. Braatz. 2016. Climate change and food security: Risks and responses, *Food and Agriculture Organization of the United Nations* 110(2): 3-36. <https://doi.org/10.1080/14767058.2017.1347921>
11. Jones, P.G. and P.K. Thornton. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems* 114: 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002>
12. Jones, P.G., P.K. Thornton, W. Díaz and P.W. Wilkens. 2002. MarkSim: A computer based tool that generates simulated weather data for crop modelling and risk assessment. CD-ROM Series, Cali: CIAT. 10.3109/9780203427583-32.
13. Kumar, K., C.M. Parihar, D.R. Sena, S. Godara, K. Patra, A. Sarkar, K.S. Reddy, P.C. Ghasal, S. Bharadwaj, A.L. Meena, T.K. Das, S.L. Jat, D.K. Sharma, Y.S. Saharawat, M.K. Gathala, U. Singh and H.S. Nayak. 2024. Modeling the growth, yield and N dynamics of wheat for decoding the tillage and nitrogen nexus in 8-years long-term conservation agriculture based maize-wheat system. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 8:1371472. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1321472>
14. Ludwig, F. and S. Asseng. 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems* 90(1-3): 159-179. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.12.002>
15. Megersa, G. 2022. Calibration and Evaluation of Ceres Models for Simulating the Growth and Yield in Central Ethiopia. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4063581> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4063581>
16. Nematpour, A., H.R. Eshghizadeh and M. Zahedi. 2019. Drought-tolerance mechanisms in foxtail millet (*Setaria italica*) and proso millet (*Panicum miliaceum*) under different nitrogen supply and sowing dates. *Crop and Pasture Science* 70: 442. <https://doi.org/10.1071/CP18501>
17. Riahi, K., S. Rao, V. Krey, C. Cho, V. Chirkov, G. Fischer, G. Kindermann, K. Nakicenovic and P. Rafaj. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109: 33-57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
18. Saretto, F., B. Roy, R. Encarnação Coelho, A. Reder, G. Fedele, R. Oakes, L. Brandimarte and T. Capela Lourenço. 2024. Impacts of Climate Change and Adaptation Strategies for Rainfed Barley Production in the Almería Province, Spain. *Atmosphere (Basel)* 15:606. <https://doi.org/10.3390/atmos15050606>
19. Soler, C.M.T., P.C. Sentelhas and G. Hoogenboom. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of*

Agronomy 27: 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.03.002>

20. Yuan, X., S. Li, J. Chen, H. Yu, T. Yang, C. Wang, S. Huang, H. Chen and X. Ao. 2024. Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. *Agronomy* 14: 1360. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>