

Simulating Rice Yield (Transplanted and Direct-Seeded) Under Climate Change Conditions Using the CERES-Rice Model

Parvin Zolfaghary¹, AbuTaleb HezarJeribi^{2*}, Mohammad Ismail Asadi³, Ebrahim Amiri⁴

1- PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, ORCID ID: [0000-0002-1194-7502](https://orcid.org/0000-0002-1194-7502)

2- Associate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, ORCID ID: [0009-0002-8432-3554](https://orcid.org/0009-0002-8432-3554)
Assistant and Master of Science in Technical and Engineering Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research Center, Gorgan, Iran, ORCID ID: [0000-0002-3729-0502](https://orcid.org/0000-0002-3729-0502)

3- Associate, Department of Water Engineering Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran, ORCID ID: [0000-0002-5057-6759](https://orcid.org/0000-0002-5057-6759)

*Corresponding Author: hezarjaribi@gau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Climate change, characterized by rising temperatures, altered precipitation regimes, and increased evapotranspiration, poses a severe threat to sustainable agricultural production, particularly for rice. As a globally critical staple crop, rice is indispensable for food security but is highly water-intensive and vulnerable to heat stress. In northern Iran, rice is traditionally cultivated under continuously flooded conditions, a practice that ensures high yields but consumes excessive water resources. Given escalating water scarcity and warming trends, optimizing irrigation management and deploying heat-tolerant cultivars are essential adaptation strategies. This study aimed to simulate the agronomic performance of the Fajr rice cultivar under alternative irrigation regimes (flood, sprinkler, and drip) and establishment methods (transplanted and direct-seeded) using the CERES-Rice crop model. The research evaluated the impacts of projected climate change on grain yield and biomass in SarkhonKolah, Gorgan County (Golestan Province), for the future period 2031–2090 relative to a baseline (1990–2020), under three Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios: SSP126, SSP245, and SSP585.

Materials and Methods

The CERES-Rice model was calibrated and validated using field experimental data for the Fajr cultivar, including flowering date, physiological maturity, plant height, leaf area index (LAI), and grain yield. Model performance was quantified using root mean square error (RMSE), normalized RMSE (NRMSE), and Willmott's index of agreement (*d*). Future climate projections were downscaled using the LARS-WG stochastic weather generator and the HadGEM3-GC31-LL global climate model (CMIP6 dataset) across three future time slices: 2031–2050, 2051–2070, and 2071–2090. Simulations were conducted for three irrigation systems combined with two planting methods, analyzing grain yield, biomass accumulation, and water-use efficiency under SSP126, SSP245, and SSP585. A sensitivity analysis was also performed to isolate the effects of incremental temperature rises, combined heat–soil moisture stress, and elevated atmospheric CO₂ concentrations on crop productivity.

Results and Discussion

Model validation demonstrated high predictive accuracy ($d > 0.9$, $NRMSE < 10\%$), confirming its suitability for regional climate-impact simulations. Climate projections indicated that under the high-emission SSP585 scenario, mean maximum and minimum temperatures could increase by 2–5 °C, with reference evapotranspiration (ET₀) rising by up to 11% compared to the baseline. Simulations revealed that the Fajr cultivar exhibits strong yield stability under future climates. In the transplanted–flood system, grain yield increased from 8,978 kg ha⁻¹ (baseline) to 10,259 kg ha⁻¹ under SSP585 (2051–2070), representing a 14.26% gain, with biomass increasing by 13.65%. Although yields slightly declined in the 2071–2090 period due to intensified heat stress, they remained above baseline levels. Direct-seeded systems showed more pronounced gains: sprinkler irrigation yielded an 18.18% increase (from 4,868 to 5,753 kg ha⁻¹), while drip irrigation achieved the highest gain of 25.55% (from 4,666 to

5,858 kg ha⁻¹) during 2051–2070 under SSP585. Both systems maintained yields above baseline in the late century. Sprinkler irrigation provided the most stable yields under extreme heat, as evaporative cooling reduced canopy temperature and mitigated spikelet sterility above 35 °C. Drip irrigation excelled in water-use efficiency under moderate stress (SSP245), whereas flood irrigation, despite current high productivity, is projected to face declining efficiency due to rising evapotranspiration and water scarcity. Sensitivity analysis indicated that each 1 °C increase in daily maximum temperature reduced grain yield by 4–6%, primarily through flowering-stage spikelet sterility. Combined heat and moisture stress exacerbated losses by >10%, but elevated CO₂ (up to 868 ppm under SSP585) exerted a compensatory fertilization effect via enhanced photosynthesis. The cultivar's extended grain-filling period and inherent physiological efficiency underpinned its resilience.

Conclusion

The Fajr rice cultivar demonstrates considerable adaptive capacity and yield resilience under projected climate change scenarios, making it a suitable candidate for climate-smart agriculture in northern Iran. Transitioning from traditional flood irrigation to modern, pressurized systems is critical for sustainable water management and yield stability. Sprinkler irrigation is recommended for heat-prone environments due to its canopy-cooling benefits, while drip irrigation is optimal for water-limited conditions. Both methods significantly reduce water consumption and mitigate climate-induced yield penalties. To enhance long-term climate resilience, agricultural policymakers and extension services should promote direct-seeded cultivation integrated with sprinkler or drip irrigation, accelerate the development and dissemination of heat-tolerant cultivars like Fajr, and invest in farmer training, adaptive irrigation infrastructure, and advanced climate monitoring and modeling frameworks.

Keywords: Food security, Climate resilience, Global warming, Crop modeling.

شبیه‌سازی عملکرد برنج (کشت نشایی و مستقیم) تحت شرایط تغییر اقلیم با

استفاده از مدل گیاهی CERES-Rice

پروین ذوالفقاری^۱، ابوطالب هزارجریبی^{۲*}، محمد اسماعیل اسدی^۳، ابراهیم امیری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- ۳- استادیار پژوهش و کارشناس ارشد بخش تحقیقات فنی و مهندسی، بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، گرگان، ایران.
- ۴- استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: hezarjaribi@gau.ac.ir

چکیده

کشت پایدار محصولات نیازمند آینده‌نگری و تحلیل شرایط پیش رو است. برنج، به‌عنوان یکی از غلات اساسی، نقش مهمی در تأمین کالری انسان‌ها ایفا می‌کند. با این حال، نیاز آبی بالای این محصول و کاهش منابع آبی، چالشی جدی محسوب می‌شود. این پژوهش به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر کشت برنج (نشایی و مستقیم) در شهر سرخنگلاه، شهرستان گرگان، طی دوره‌های ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی (SSP126، SSP245، SSP585) پرداخته است. بررسی آمار هواشناسی نشان می‌دهد دمای حداکثر و حداقل در بدترین شرایط بین ۲ تا ۵ درجه افزایش خواهد یافت. همچنین، روند تغییرات بارش و تبخیر تعرق مرجع نسبت به دوره پایه افزایشی خواهد بود.

مدل‌سازی رشد گیاه با استفاده از مدل CERES-Rice برای روش‌های کشت مستقیم و نشایی صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد عملکرد دانه از دوره پایه بیشتر بود. در سناریوی سوم (SSP585)، کمترین افزایش عملکرد دانه برای سامانه کشت مستقیم به ترتیب با آبیاری غرقابی ۶ درصد، بارانی ۱۴ درصد و قطره‌ای ۷ درصد بود. افت عملکرد در سامانه کشت مستقیم با آبیاری نوین نسبت به کشت نشایی با آبیاری غرقابی کمتر بود که نشان‌دهنده بهره‌وری بیشتر آب است. نتایج نشان می‌دهد عقیمی سنبلیچه در دماهای بالا موجب پوک شدن دانه‌ها می‌شود. به همین دلیل اتخاذ راهبردهایی نظیر ترویج ارقام مقاوم، توسعه سامانه‌های کشت مستقیم با آبیاری نوین، آموزش کشاورزان درباره اثرات تغییر اقلیم، و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های پایش اقلیمی و مدل‌سازی، از جمله اقدامات راهبردی برای حفظ پایداری تولید برنج در دهه‌های آینده خواهند بود.

کلمات کلیدی: امنیت غذایی، تاب آوری اقلیمی، گرمایش جهانی، مدل‌سازی گیاهی.

مقدمه

برنج، پس از گندم دومین محصول عمده جهانی از نظر سطح زیر کشت است و در اکثر نقاط جهان، به ویژه کشورهای جنوب شرقی آسیا به صورت غرقاب دائم کشت می‌شود (Ali et al., 2022). آمارهای متفاوتی در مورد وسعت اراضی شالیزاری ایران وجود دارد، مطابق با آمار جهاد کشاورزی ۵۳۵ هزار هکتار از اراضی شالیزاری در دو استان مازندران و گیلان وجود دارد (Gholinezhad et al., 2021). کاهش منابع آبی، بهره‌برداری بیش‌از حد از منابع زیرزمینی و آثار ناشی از تغییر اقلیم، آینده

کشت برنج در بسیاری از مناطق آسیایی با چالش‌های جدی مواجه کرده است (Zheng et al., 2020; Hussain et al. 2020). مدل‌های اقلیمی به‌عنوان ابزاری مناسب برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌روند و می‌توانند پارامترهای اقلیمی نظیر دما، بارش و تشعشع خورشیدی را برای یک بازه طولانی با استفاده از سناریوهای تایید شده هیئت بین دولتی تغییر اقلیم محاسبه پیش‌بینی نمایند (Munawar et al., 2022; Borzoo et al., 2024). در میان مدل‌های زیرمقیاسی SDSM و LARS-WG عملکرد مناسبی در بازتولید شرایط اقلیمی در مقیاس محلی دارند (Lotfi et al., 2022). مدل LARS-WG به‌دلیل ساختار ساده و داده‌محور بودن، در بسیاری از مطالعات اقلیمی ایران کاربرد وسیعی دارد (Hassan et al., 2014).

براساس خروجی مدل‌های اقلیمی و شبیه‌سازی‌های مختلف، پیش‌بینی می‌شود اقلیم آینده با نوسانات شدیدتری در دسترسی به منابع آبی همراه باشد که این ناپایداری می‌تواند کمیت تولید محصولات کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد (Li et al., 2024).

از طرفی دماهای بالاتر از ۳۵ سلیسیوس به‌ویژه در مرحله گلدهی، باعث افزایش آسیب‌پذیری فیزیولوژیکی گیاه شده و منجر به اختلال در رسیدگی دانه و کاهش قابل‌توجه عملکرد برنج می‌شود (Wang et al., 2019). نتایج متاآنالیز مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد برنج در سراسر مناطق آسیایی، نشان می‌دهد که تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، عملکرد برنج تا پایان قرن ۲۱، به‌ویژه در مناطق حساس اقلیمی مانند جنوب و جنوب شرقی آسیا، کاهش می‌یابد (Li et al., 2024). به‌عنوان نمونه، در مطالعات منطقه‌ای، داده‌های شبیه‌سازی شده نشان داده‌اند که در مناطقی مانند شمال شرقی تایلند، دمای بالا و تنش‌های حرارتی می‌تواند تا پایان قرن حاضر، کاهش عملکرد برنج را به میزان بیش از ۲۰ الی ۳۰ درصد در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به دنبال داشته باشد (Wang et al., 2019). در ایران نیز، تحلیل داده‌های اقلیمی چند دهه گذشته، وقوع تغییرات اقلیمی را تأیید می‌کند و روند افزایش دمای فصلی، کاهش بارش و تشدید رخدادهای حدی مانند موج‌های گرما و خشکسالی را نشان می‌دهد (Zarrin et al., 2021). از مهم‌ترین نشانه‌های وقوع تغییر اقلیم در ایران می‌توان به افزایش دمای میانگین سالانه، کاهش فراوانی و شدت بارش برف، بروز خشکسالی‌های مکرر، رخداد بارش‌های ناگهانی و سیلابی، و گسترش پدیده گرد و غبار اشاره کرد که در مطالعات اقلیمی اخیر به‌خوبی مستند شده‌اند (Fallah-Ghalhari et al., 2019). بنابراین، با توجه به نقش کلیدی کشاورزی در امنیت غذایی و اقتصاد ایران، پیش‌بینی دقیق وضعیت اقلیمی و اثرات آن بر محصولات اساسی نظیر برنج، به‌ویژه در مناطق شمالی کشور، ضرورتی انکارناپذیر است (Bahmanabadi et al., 2023). داریکنده و همکاران (Darikandeh et al., 2023) نشان داده‌اند که برنامه‌ریزی برای انطباق با تغییر اقلیم، برای حفظ پایداری تولید برنج در دهه‌های آتی ضروری است. همچنین دهقانی سانچ و ازغدی (Dehghanisanij and Azghadi, 2025) بر اهمیت پژوهش‌های مستقل و تحلیل‌های بلندمدت برای شناخت بهتر تغییرات اقلیمی تأکید نموده‌اند.

مدل‌های زراعی از روابط ریاضی برای شبیه‌سازی روندهای پیچیده رشد و توسعه گیاهان در شرایط محیطی و مدیریتی متنوع استفاده می‌کنند (Aryal et al., 2024). این مدل‌ها برای تحلیل اثرات متقابل اقلیم، خصوصیات خاک، و شیوه‌های مدیریتی بر شاخص‌هایی نظیر شاخص سطح برگ، بیوماس و عملکرد نهایی کاربرد دارند. (da Silva et al., 2025). DSSAT یکی از جامع‌ترین بسته‌های نرم‌افزاری مدل‌سازی زراعی است که شامل بیش از ۴۰ مدل گیاه مختلف است و در سطح جهانی برای تصمیم‌گیری‌های کشاورزی کاربرد دارد. (Gobezie et al., 2025; Ansari et al., 2025). زیرمدل CERES از بسته DSSAT، که برای شبیه‌سازی دقیق رشد غلاتی نظیر گندم، برنج، ذرت و جو توسعه یافته و در سناریوهای مختلف اقلیمی ارزیابی شده است (Zhou et al., 2022; Abbas et al., 2025). CERES-Rice دقیق‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی رشد برنج محسوب می‌شود که توانایی بالایی در پیش‌بینی مراحل فنولوژیک، شاخص‌های رشد و عملکرد نهایی در شرایط متنوع اقلیمی، خاک و مدیریت زراعی دارد. این مدل در پروژه‌های گسترده‌ای در آسیا، آفریقا و آمریکای لاتین واسنجی و ارزیابی شده و به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری در سناریوهای تغییر اقلیم، مصرف بهینه نهاده‌ها و ارزیابی اثرات کشاورزی بایدار مورد استفاده قرار گرفته است (da Silva et al., 2025; Sajjad et al., 2024).

ترکیب داده‌های اقلیمی حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) با مدل‌های زراعی نظیر DSSAT، به‌عنوان رویکردی رایج و مؤثر در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، خروجی مدل‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف مانند RCP یا SRES، به‌عنوان ورودی مدل‌های زراعی استفاده می‌شود تا رفتار گیاه در شرایط محیطی آینده شبیه‌سازی گردد. ربانی (Rabbani et al., 2015) به شبیه‌سازی تولید برنج تحت سناریوهای مختلف اقلیمی Sra1b، Sra2 و Srb1 در سواحل جنوبی دریای خزر پرداختند. آن‌ها برای بررسی نتایج تغییر اقلیم بر برنج از مدل CERES-Rice استفاده نمودند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده پایه محصول برنج تحت سناریوهای مختلف اقلیمی نشان داد که با افزایش میانگین دما و کاهش بارندگی، عملکرد و زیست‌توده محصول برنج کاهش می‌یابد. بنویچای و همکاران (Boonwichai et al., 2018) با استفاده از مدل DSSAT به شبیه‌سازی رشد و نمو برنج پرداختند و سپس با استفاده از سناریوهای مختلف تغییر اقلیم عملکرد آن را تحت شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان از افزایش نیاز آبی طی سناریوهای اقلیمی افزایش دما داشت، همچنین سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب بین ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش بهره‌وری آب در محصول زراعی را برای پیش‌بینی ۶۰ سال آینده نشان داد. در سال‌های اخیر، مدل HadGEM3 به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های اقلیمی نسل جدید (CMIP6) در بسیاری از مطالعات اقلیمی-زراعی به‌کار رفته است.

این مدل با دقت مکانی- زمانی مناسب، امکان شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تری از پارامترهایی نظیر دما، بارندگی و تابش خورشیدی را فراهم می‌سازد. نگسان (N'guessan et al., 2023) با استفاده از خروجی مدل HadGEM و شبیه‌سازی با CERES-Rice نشان دادند که تغییرات دما و بارندگی موجب افزایش نیاز آبی و کاهش عملکرد برنج می‌شود. همچنین فاروق (Farooq et al., 2023) نیز در مروری جامع، استفاده از مدل‌های اقلیمی پیشرفته مانند HadGEM3 را برای پیش‌بینی دقیق‌تر و ارائه راهکارهای سازگاری در تولید غلات تحت سناریوهای اقلیمی توصیه کرده‌اند. چنین مطالعاتی برای دینفعان امکان برنامه‌ریزی برای جبران اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید برنج را فراهم می‌کند.

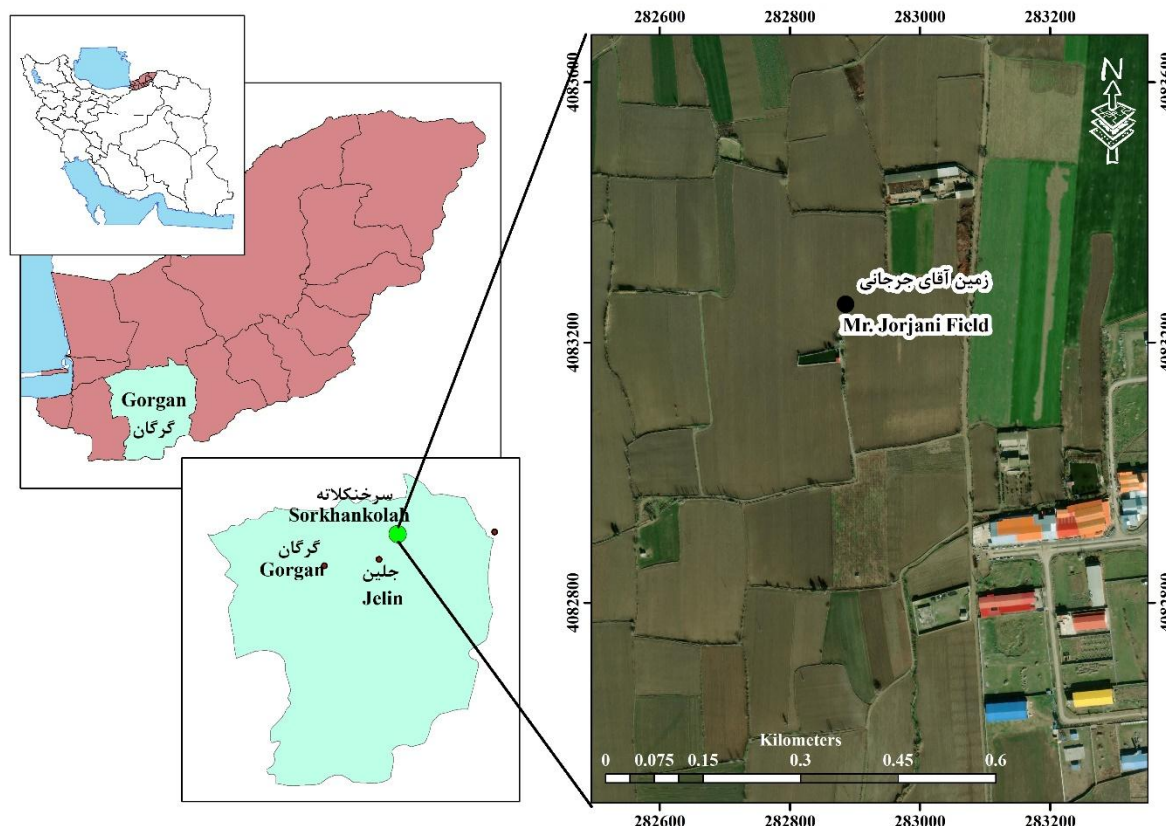
وجود مطالعات متعدد در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر تولید برنج در ایران و جهان، بیشتر پژوهش‌ها بر سناریوهای قدیمی‌تر (RCP) متمرکز بوده و کمتر به استفاده هم‌زمان از سناریوهای جدید CMIP6 (SSP) ها در کنار مقایسه روش‌های مختلف کاشت و آبیاری پرداخته‌اند. با افزایش شدت و تکرار خشکسالی‌ها و تغییر الگوی بارش‌ها طی تغییر اقلیم، روش‌های سنتی آبیاری کمتر قابل اعتماد می‌شوند و نیاز به سامانه‌های مدرن‌تر و هوشمندتر برای مدیریت منابع آبی احساس می‌شود (Arvandi, 2024). با این وجود ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر سامانه‌های کشت نشایی و مستقیم در شرایط واقعی مدیریت مزرعه در مناطق شمالی کشور، به‌ویژه با استفاده از مدل CERES-Rice، تاکنون به‌صورت جامع انجام نشده است. این خلأ دانشی ضرورت انجام پژوهش حاضر را برجسته می‌کند.

بر همین اساس، هدف این مطالعه، شبیه‌سازی و مقایسه‌ی عملکرد برنج رقم فجر در دو سامانه کشت نشایی و مستقیم، تحت سه سناریوی اقلیمی SSP126، SSP245 و SSP585، با استفاده از مدل CERES-Rice در منطقه گرگان است. در این چارچوب، پژوهش حاضر تلاش دارد ضمن تبیین اثر تغییرات دما و بارش بر شاخص‌های رشد و عملکرد، راهکارهای مدیریتی مؤثر برای حفظ پایداری تولید در شرایط اقلیمی آینده را شناسایی نماید.

مواد و روش

موقعیت منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در استان گلستان، شهرستان گرگان، شهر سرخنگلاته در سه مزرعه مجاور، هرکدام به مساحت یک هکتار، انجام شد. مختصات جغرافیایی منطقه شامل طول جغرافیایی $40^{\circ} 57'$ تا $40^{\circ} 83'$ شرقی و عرض جغرافیایی آن $28^{\circ} 29'$ تا $28^{\circ} 32'$ شمالی با ارتفاع ۱۰۲ متر از سطح دریا است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزرعه مورد مطالعه
Fig 1. Geographical location of the studied farm

آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی ($RCBD^1$) انجام گردید. بلوک‌ها بر اساس تکرار (هر بلوک ۳ تکرار) تعریف شدند. رقم مورد استفاده، در آزمایش رقم فجر بود که یک رقم اصلاح شده، مقاوم و پرمحصول برنج محسوب می‌شود. از آن‌جا که اثر روش کاشت و پس از آن روش آبیاری در هر روش کاشت در نظر بوده است، از دو روش کشت نشایی و کشت مستقیم برای مزارع استفاده شد. در روش کشت نشایی، بذرها از ۳۵ روز قبل داخل خزانه کشت شدند و سپس به مزرعه گل‌خراش شده انتقال داده شدند. روش آبیاری در مزارع خشکه‌کاری (کاشت بذر در بستر خشک) شامل تیمارهای آبیاری قطره‌ای (DTGF) و بارانی (DSGF) و در مزرعه نشایی، شامل تیمار آبیاری غرقابی (TFGF) بود. آبیاری قطره‌ای-نواری با استفاده از نوارهای تیپ با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از هم، دارای فاصله خروجی ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۶ میلی‌متر و دبی ۳ لیتر در ساعت و آبیاری بارانی به صورت سامانه کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با فاصله آبپاش‌ها ۲۵×۲۵ متر، با آرایش مربعی و دبی خروجی آبپاش ۶ لیتر در ثانیه انجام شد. برای اندازه‌گیری آب مصرفی هر کرت، اقدام به نصب کنتور حجمی شد. همچنین جهت کنترل شیر قطع و وصل جریان روی لوله‌ی ورودی به زمین نصب شد.

خاک مزرعه دارای بافت لومی-سیلتی بود. نمونه‌برداری خاک به‌منظور تجزیه شیمیایی و تعیین نیاز کودی پیش از عملیات زراعی و در فروردین‌ماه ۱۴۰۰، از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر انجام شد. بر اساس نتایج آزمون خاک و توصیه‌های کودی مبتنی بر نیاز گیاه و وضعیت عناصر غذایی خاک، مزارع پیش از کشت کوددهی شدند. برای مدیریت کنترل آفات و علف‌های هرز در مزارع از علف‌کش پیش‌رویشی و پیش از کاشت و نشای بذور از قارچ‌کش استفاده شد. کنترل آفات و علف‌های هرز در مرحله داشت، در چهار مرحله سم‌پاشی با حشره‌کش و یک مرحله وجین‌دستی انجام شد. این اقدامات به‌منظور افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها، کاهش تنش‌های زیستی و تضمین یکنواختی رشد گیاه در کل دوره‌ی رشد برنج صورت گرفت.

¹ Randomized Complete Block Design

برای نمونه برداری از مزارع در زمان رسیدن فیزیولوژیک و پیش از برداشت محصول از داخل مزارع، هر مزرعه یک تیمار فرض شده و برای هر تیمار، سه کرت به عنوان تکرار در نظر گرفته شد. ابتدا در هر مزرعه از هر کرت، ۱۰ بوته به طور تصادفی انتخاب و پارامترهای متوسط ارتفاع بوته، طول خوشه، تعداد دانه‌ی پر و پوک اندازه‌گیری شد. در زمان برداشت محصول در هر مزرعه، از میانه‌ی کرت‌ها با فاصله حداقل ۵ متر از حاشیه‌ها، محل انشعاب لوله‌های تیپ از مانیفولد و حوالی رایزر آبپاش، ۳ نمونه هریک به مساحت یک متر مربع برداشت گردید. پس از خشک شدن مقابل آفتاب، متغیرهای مرتبط با عملکرد و اجزای عملکرد اندازه‌گیری شدند.

مدل CERES-Rice

مدل CERES-Rice، زیرماژولی از سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری DSSAT-CSM، یک مدل فرآیندمحور و دینامیک است که رشد روزانه، تجمع زیست‌توده و عملکرد نهایی گیاه برنج را در شرایط مزرعه‌ای شبیه‌سازی می‌کند (Darikandeh et al., 2023). این مدل با بهره‌گیری از چهار دسته داده‌ی ورودی شامل پارامترهای اقلیمی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، مدیریت زراعی و صفات ژنتیکی رقم برنج، فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوفیزیکی رشد گیاه را در مقیاس روزانه پیش‌بینی می‌نماید. داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی و ساعات آفتابی می‌باشد. داده‌های مورد نیاز برای ایستگاه سینوپتیک هاشم آباد گرگان (واقع در ۲۰ کیلومتری غرب سایت مورد مطالعه) از سازمان هواشناسی استان گلستان دریافت شد. این داده‌ها از طریق نرم افزار رابط آب و هوایی به نام (Weatheman) که داده‌های هواشناسی را به فرمت قابل استفاده برای مدل تبدیل می‌کند تهیه شد.

داده‌های خاک شامل درصد رس، سیلت، شن، درصد کربن آلی، درصد نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک می‌باشد. درصد اجزای خاک برای تخمین ظرفیت نگهداری آب توسط مدل استفاده می‌گردد. داده‌های مورد نیاز مدل بر اساس آزمایش‌های خاک مزارع به مدل معرفی گردید. خاک مزارع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی یکسانی داشتند که در جدول (۱) ارایه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

Table 1. Physical and chemical properties of the studied farm soil

Depth عمق	EC شوری	pH اسیدیته	κ _{sat} کدورت	OC کربن آلی	Total N نیتروژن کل	P (avg) متوسط فسفر	K (avg) متوسط پتاسیم	Clay رسی	Silt سیلت	Sand شن	Texture بافت
cm	ds/m			%	%	mg/kg	mg/kg	%	%	%	
0-30	2.8	7.3	24	2.37	0.24	111	900	22	54	24	Si - L
30-60	2.2	7.5	24	1.63	0.16	72	600	24	54	22	Si - L

داده‌های مدیریت مزرعه شامل رقم، زمان کاشت، زمان نشاء، طول دوره خزان، دمای خزان، میزان بذر مورد استفاده، روش و عمق کشت، فاصله و جهت کاشت، تراکم کاشت، مدیریت آبیاری شامل روش و میزان و زمان آبیاری، روش، نوع و زمان مصرف کود و سایر اطلاعات جانبی به مدل معرفی شد.

در این پژوهش از نسخه ۴.۸ نرم افزار DSSAT استفاده شد. مدل CERES-Rice با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای برنج حاصل از مطالعات رزاقی و همکاران (Razzaghi et al., 2020) واسنجی گردید. این داده‌ها شامل تاریخ گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک، ارتفاع بوته، سطح برگ، زیست‌توده و عملکرد دانه برنج برای رقم فجر و در شرایط بدون تنش (کشت نشایی- آبیاری غرقابی) بودند.

خصوصیات رقم با استفاده از ضرایبی که در فایل ژنوتیپ برای هر گیاهی وجود دارد ساخته می‌شود. واسنجی ضرایب ژنتیکی مدل با استفاده از رابط GenCalc، Glue و بعضاً دستی به صورت آزمون و خطا انجام شد. پارامترهای واسنجی شامل P1، P2R، P2O، P5، G1، G2، G3، PHINT، THOT، TCLDP و TCLDF بودند (جدول ۲). روش تخمین به این صورت است که، با

دریافت صفات فنولوژیکی شامل تاریخ گلدهی، تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک و برخی از صفات رشدی شاخص مثل سطح برگ، مقدار زیست توده و عملکرد دانه فرآیند آزمون و خطا شروع شده و در هر گام ضرایب خاصی با استفاده از داده های فنولوژیک واسنجی می گردند. انتخاب ضرایب بر اساس کمینه سازی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و بیشینه سازی شاخص ویلموت (d-index Willmott) انجام گردید. این فرآیند تا زمانی ادامه یافت که RMSE به کمتر از ۱۰ درصد و شاخص تطابق به بیش از ۰/۹ برسد یا اختلاف مقادیر شبیه سازی شده با داده های واقعی به کمتر از ۵ درصد کاهش یابد (Adnan et al., 2019; ۲۰۲۱). تخمین ضرایب ژنتیکی با استفاده از داده های حاصل از تیمارهای بدون تنش به دست می آید و سپس برای داده های سایر تیمارها ارزیابی و صحت سنجی می گردد. سپس مدل برای سه تیمار آزمایشی حاضر در این مطالعه (آبیاری غرقابی، بارانی، و قطره ای) به صورت جداگانه صحت سنجی شد. برای جلوگیری از بیش برآزش (Overfitting)، واسنجی فقط روی داده های تیمار شاهد (TFGF) صورت گرفت و پارامترهای مدیریتی ثابت نگه داشته شدند. این رویکرد از تداخل میان تیمارها جلوگیری می کند و امکان تحلیل اثرات تیمارهای آبیاری را فراهم می سازد.

برای اعتبارسنجی مدل DSSAT از آماره های ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافق (d) استفاده شد. RMSE تفاوت بین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده یک پارامتر را اندازه گیری می کند (رابطه ۱) (Seifzadeh Momensaraei & Sabziparvar, 2022).

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

که در آن O_i عملکرد برنج شبیه سازی شده (کیلوگرم در هکتار)، S_i عملکرد برنج مشاهده شده (کیلوگرم در هکتار)، و n تعداد داده های مشاهداتی است. همچنین آماره جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

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

شاخص توافق ویلموت (d) یک معیار استاندارد شده از خطای پیش بینی مدل است که از صفر تا یک متغیر است (رابطه ۳). این شاخص نشان دهنده نسبت میانگین مربعات خطا و خطای بالقوه است. مقدار ۱ نشان دهنده توافق کامل است، در حالی که مقدار صفر نشان دهنده عدم توافق است. با توجه به مجذور تفاوتها، شاخص توافق نسبت به مقادیر شدید در میانگین ها و واریانس های مشاهده شده و شبیه سازی شده بیش از حد حساس است.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

که در آن $\bar{O}$ میانگین عملکرد است.

مدل اقلیمی

برای برنامه ریزی و مدیریت صحیح منابع آبی با توجه به شرایط کنونی و پیش رو تغییرات اقلیمی، خروجی مدل های گردش عمومی جوی- اقیانوسی (Global Circulation Models) در قالب داده های CMIP در اختیار کاربران قرار گرفته است. این داده ها در قالب نسخه های مختلف منتشر می شوند و شامل داده های تاریخی از سال ۱۸۵۰ و داده های پیش بینی تا سال ۲۱۰۰ هستند. آخرین نسخه داده های CMIP در قالب گزارش ششم CMIP6 منتشر شده است که شامل خروجی داده های مختلف جوی- اقیانوسی است. یکی از تفاوت های مهم مدل های سری CMIP6 با دیگر پایگاه های داده، استفاده از سناریوهای SSP به جای RCP می باشد (Hamidianpour and Shoja; 2022). در این مطالعه از سه سناریو SSP126، SSP245، SSP585 مورد بررسی قرار گرفته اند. خصوصیات این سه سناریو به شرح زیر می باشد:

SSP126: گرمایش کمتر از ۲ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه ۱۸۵۰-۱۹۰۰ (متوسط) با انتشار صفر خالص در نیمه دوم. نزدیکترین سناریو RCP به این سناریو، RCP126 می باشد.

SSP245: این سناریو کمابیش مطابق با سطح بالای انتشار NDC کل تا سال ۲۰۳۰ است. این سناریو با اندکی انحراف از سناریوی مرجع "بدون سیاست اقلیمی اضافی"، منجر به بهترین تخمین گرمایش حدود ۲/۷ درجه سلسیوس در پایان قرن بیست و یکم نسبت به سال های ۱۸۵۰-۱۹۰۰ می شود. نزدیکترین سناریو RCP به این سناریو، RCP4.5 می باشد و تا سال ۲۰۵۰، RCP6.0

SSP585: یک سناریوی مرجع بالا بدون سیاست اقلیمی اضافی است. سطوح انتشار به اندازه‌ای است که توسط مدل‌های یکپارچه (IAMs) تحت هیچ یک از SSPها به غیر از مسیر توسعه اجتماعی-اقتصادی SSP5 با سوخت فسیلی به دست نمی‌آید (سوخت‌های فسیلی همچنان به‌عنوان منابع انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند و میزان غلظت CO₂ به سرعت افزایش و در سال ۲۱۰۰، به حد ۱۱۳۵ قسمت در میلیون خواهد رسید). نزدیک‌ترین سناریو RCP به این سناریو، RCP8.5 می‌باشد (Hamidianpour & Shoja, 2022).

مدل HadGEM3-GC31-LL نسل سوم از مدل‌های آب و هوایی Had GEM می‌باشد. در مجموعه مدل‌های گردش عمومی جو - اقیانوس از سری ششم گزارش تغییر اقلیم در چهارچوب پروژه IPCC توسعه پیدا کرده و ارایه شده است. یکی از مزیت‌های اصلی این مدل نسبت به نسخه‌های قبلی خود لحاظ کردن چهارچوب مدل سازی اقیانوس NEMO است، که همچنین در سامانه پیش‌بینی اقیانوس، از پایگاه Met Office بهره گرفته می‌شود (Mohammadi et al., 2024).

در این پژوهش از مدل HadGM3-GC31-LL تحت سناریوهای SSPs، برای پیش‌بینی نیاز آبی برنج در سال‌های آینده و تغییرات آن استفاده شد. داده‌های هواشناسی در بازه‌های زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰، ۲۰۵۰ تا ۲۰۷۰ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۰ و در سه حالت خوشبینانه، متوسط و بدبینانه، برای پارامترهای دمای حداکثر و حداقل، ساعات آفتابی، باران و خالص انرژی خورشیدی پیش‌نمایی شدند. سال‌های پایه برای این بررسی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی برای دوره پیش‌رو (۲۰۳۰-۲۰۹۰)

داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعت آفتابی روزانه برای بازه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ برای ایستگاه سینوپتیک هاشم آباد گرگان، از سازمان هواشناسی استان گلستان دریافت و به‌عنوان دوره پایه به نرم افزار Lars-WG نسخه هشتم، معرفی گردید و پس از اطمینان از ارزیابی مدل، برای پیش‌نمایی داده‌ها در بازه پیش‌رو (۲۰۳۱-۲۰۹۰) اقدام شد. مدل Lars-WG، عوامل اقلیمی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش را برای بازه پیش‌رو با استفاده از مدل HadGM3-GC31-LL و تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 پیش‌نمایی نمود. پس از ورود اطلاعات به نرم افزار DSSAT، مقدار تبخیر-تعرق مرجع، به دلیل محدود بودن داده‌های ورودی به دما و تابش با استفاده از روش پریستلی تیلور^۲، توسط افزونه Weatherman محاسبه گردید. سپس عملکرد دانه و زیست توده برنج تحت شرایط تغییر آب و هوا برای سناریوهای مختلف انتشار با استفاده از مدل CERES-Rice شبیه‌سازی شد. داده‌های آب و هوا و غلظت CO₂ به‌منظور شبیه‌سازی شرایط آب و هوایی آینده در سه سناریوی مختلف اقلیمی (SSP126، SSP245 و SSP585) پیش‌نمایی شده بودند، در حالی که سایر پارامترهای ورودی خاک، محصول و شیوه‌های مدیریتی (شامل آبیاری، کود، تراکم بذر، عمق کاشت و غیره) بدون تغییر در طول زمان نگه‌داشته شدند. اثرات تغییر اقلیم به صورت مقایسه عملکرد دانه و زیست‌توده در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و پیش‌رو (۲۰۳۰-۲۰۵۰، ۲۰۳۰-۲۰۷۰، ۲۰۵۱-۲۰۹۰) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی ارزیابی شدند.

تحلیل حساسیت عملکرد دانه و زیست توده نسبت به پارامترهای اقلیمی

به منظور بررسی میزان اثرپذیری عملکرد گیاه برنج از تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده، از یک روش تحلیل حساسیت مبتنی بر انحراف عملکرد سالانه نسبت به دوره پایه استفاده شد. این روش نوعی تحلیل حساسیت تجربی (empirical sensitivity analysis) مبتنی بر داده‌های واقعی مدل اقلیمی و زراعی است. برای این منظور، ابتدا میانگین اقلیمی دوره‌ی پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) برای چهار پارامتر دمای بیشینه (T_{max})، دمای کمینه (T_{min})، بارندگی (P) و تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) محاسبه گردید. سپس، برای هر سال از دوره آتی (۲۰۳۱-۲۰۹۰)، مقدار انحراف از این میانگین پایه به تفکیک سه سناریوی اقلیمی (SSP126، SSP245 و SSP585) استخراج شد (مثلاً $\Delta T_{max} = T_{max_{year}} - T_{max_{base}}$).

در مرحله‌ی بعد، درصد تغییرات داده‌های سالانه عملکرد دانه و زیست‌توده شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل CERES-Rice نیز نسبت به مقدار پایه (میانگین ۱۹۹۰-۲۰۲۰) محاسبه شده و به صورت $\Delta Y/Y_{base}$ و $\Delta B/B_{base}$ به‌دست آمد. این مقادیر به تفکیک سه سناریوی اقلیمی (SSP126، SSP245 و SSP585)، با روش طبقه‌بندی پیوسته تحلیل شدند؛ به‌طوری که برای

² Priestley Taylor method

هر پارامتر اقلیمی، بازه‌هایی تعریف گردید (مثلاً برای تغییرات بارش به صورت طبقات ۵۰-۵۰، ۵۰-۱۵۰، ... میلی‌متر). سپس میانگین و انحراف معیار برای هر طبقه به تفکیک به دست آمده و برای هر تیمار به طور جداگانه ارایه شد.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل CERES-Rice

پس از ورود داده‌های رزاقی و همکاران (Razzaghi et al., 2020) و اجرای مدل، ضرایب ژنتیکی و عوامل گیاهی مدل (روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده) با استفاده از روش گام به گام به نحوی واسنجی شدند که نتایج دارای کمترین میزان خطا با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه باشند. ضرایب ژنتیکی واسنجی شده برای رقم فجر محصول برنج به ترتیب در جدول (۲) ارائه شده است. مطالعات متعددی به کالیبراسیون ضرایب ژنتیکی ارقام محصول برنج با استفاده از مدل CERES-RICE در چارچوب نرم‌افزار DSSAT پرداخته‌اند (Goswami et al., 2020; Mote et al., 2016; Amiri et al., 2013; Nazari et al., 2022). نظری و همکاران (Nazari et al., 2022)، ضرایب ژنتیکی برای ارقام شمال کشور شامل گوهر، SA1، M7 و SA6 (به عنوان ارقام با عملکرد بالا/متوسط، میان رس و دیررس) را تحت مدل CERES-Rice گزارش کرده‌اند. محدوده‌ی محاسبه شده ضریب P1 برای این ارقام بین ۴۲۲ تا ۶۴۱ درجه-روز بوده است، درحالی‌که مقدار به‌دست‌آمده برای رقم فجر محصول برنج ۳۳۲ درجه-روز است. هرچند این مقدار کمتر است، اما با توجه به مقدار P5 برابر ۶۵۴/۹ درجه-روز که بیشترین مقدار گزارش شده در ارقام بررسی شده محسوب می‌شود، مدل فاز زایشی را با دقت و تأخیر کافی بازنمایی می‌کند. این ترکیب از P1 پایین و P5 بالا می‌تواند با ویژگی دیررسی برنج رقم فجر (حدود ۱۳۰ روز طول دوره رشد) که در معرفی رقم فجر محصول برنج توسط (مرکز تحقیقات برنج کشور) نیز گزارش شده، به‌خوبی هم‌خوانی داشته باشد و نشان‌دهنده‌ی دقت بالای برآورد ساختار فازهای رشدی در مدل است (Nassiri et al., 2006). همچنین در ضرایب حساس به فتوپریود، تفاوت‌های ساختاری رقم مورد بررسی با سایر ارقام به‌درستی در ضرایب مدل بازتاب یافته است. مقاله نظری و همکاران (Nazari et al., 2022) مقدار P2R برای اغلب ارقام مختلف برنج را در بازه ۲۳ الی ۲۵ درجه-روز/ساعت گزارش کرده است، درحالی‌که این مقدار برای رقم فجر، ۵۳/۸ به‌دست آمده است. این اختلاف قابل توجه کاملاً توجیه‌پذیر است، زیرا طبق توصیف مرکز تحقیقات برنج کشور، رقم فجر حساس به طول روز معرفی شده و این حساسیت باید در قالب ضریبی بالا در مدل نمایان شود. در همین راستا، مقدار P2O برابر ۱۱ ساعت محاسبه شده است که کمتر از مقدار ثابت ۱۲/۵، گزارش شده در مطالعه نظری و همکاران (Nazari et al., 2022) می‌باشد و این نشان‌دهنده تنظیم دقیق‌تر پاسخ نوری در این رقم است. همچنین، مقدار G1 برابر ۷۵، که بالاتر از بیشینه مقدار گزارش شده برای ارقام دیگر (حداکثر ۵۸ در M7) است، مؤید توان خوشه‌دهی بالاتر رقم است که باز هم با گزارش رسمی از پتانسیل عملکرد بالای فجر در شرایط آبیاری شده شمال کشور مطابقت دارد (Nassiri et al., 2006). در مجموع، این ضرایب، بلکه بازتابی دقیق از تیپ رشدی، حساسیت فتوپریود، و ویژگی‌های فیزیولوژیک برنج رقم فجر هستند و نشان می‌دهند که فرآیند کالیبراسیون انجام شده از اعتبار و دقت علمی نسبتاً مناسبی برخوردار بوده است.

جدول ۲. عوامل ژنتیکی واسنجی شده در مدل CERES-Rice - رقم فجر محصول برنج، شهر گرگان
Table 2. Calibrated Genetic Parameters of the CERES-Rice Model for the Fajr Rice Cultivar in Gorgan

Coefficient ضریب	Unit واحد	Fajr cultivar رقم فجر	Description توضیحات
P1	°Cday	332.4	The period (growth degree days) from seedling emergence during which the rice plant does not respond to photoperiodic changes دوره (درجه-روز رشد) از زمان سبز شدن گیاهچه که طی آن گیاه برنج به تغییرات فتوپریود (طول روز) پاسخ نمی‌دهد
P2R	°Cday	53.86	The developmental range in which each hour of photoperiod increases above P20 delays panicle initiation دامنه رشدی که در آن هر ساعت افزایش طول دوره نوری (فتوپریود) بالاتر از P20 باعث تأخیر در آغاز تشکیل پانیکول (خوشه برنج) می‌شود..
P5	°Cday	654.9	Length of grain filling cycle based on degree-days from the start date of the cycle to physiological maturity طول دوره پر شدن دانه بر اساس درجه-روزها، از تاریخ شروع این دوره تا رسیدگی فیزیولوژیک
P2O	hr	11.00	The longest day length that produces the maximum growth rate بیشترین طول روزی که حداکثر نرخ رشد را ایجاد می‌کند.
G1	-	75.0	Potential spikelet number coefficient ضریب پتانسیل تعداد سنبلچه‌ها
G2	gr	0.025	Single seed weight under optimal growing conditions وزن یک دانه در شرایط بهینه رشد
G3	-	1	Tillering coefficient compared to the IR64 variety under favorable growing conditions ضریب پنجه‌زنی در مقایسه با رقم IR64 تحت شرایط مطلوب رشد.
PHINT	°Cday	83.0	Time interval (degree-days) for the tip of each leaf to emerge under non-stress conditions فاصله زمانی (بر حسب درجه-روز) برای ظاهر شدن نوک هر برگ در شرایط بدون تنش.
THOT	°C	35.0	The maximum temperature above which spike fertility is affected by heat. حداکثر دمایی که بالاتر از آن باروری سنبله تحت تأثیر تنش گرمایی قرار می‌گیرد.
TCLDP	°C	15.0	The temperature below which panicle initiation is delayed
TCLDF	°C	15.0	The temperature below which the fertility of spikes is affected by low temperatures. دمایی که پایین‌تر از آن باروری سنبله‌ها تحت تأثیر دماهای پایین قرار می‌گیرد.

Table 2. Genetic factors calibrated in the CERES-Rice model - Fajr cultivar, Gorgan city

همچنین مقادیر آماره‌های ارزیابی عوامل گیاهی مدل در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان داد برای تمامی ارقام همبستگی بالای ۷۰ درصد را برای تمامی عوامل گیاهی نشان داد. مقدار NRMSE برای شاخص‌های روز گلدهی، عملکرد دانه، رسیدگی فیزیولوژیک کمتر از ۱۰ درصد و در محدوده بسیار خوب قرار گرفت ولی برای عملکرد زیست توده بین ۱۰ تا ۲۰ و در محدوده خوب قرار گرفت. همچنین شاخص ویلموت برای پارامتر عملکرد زیست توده کمترین مقدار و برابر ۰/۸۸ به دست آمد ولی قابل قبول می‌باشد.

سپس مدل گیاهی با استفاده از داده‌های برداشت شده در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ صحت‌سنجی گردید. نتایج صحت‌سنجی نشان داد مدل CERES-Rice برای هر دو روش از دقت مناسبی برخوردار است. نتایج شبیه سازی در جداول (۴) و (۵) و آماره‌های ارزیابی در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۳. واسنجی عوامل گیاهی مدل CERES-Rice - رقم فجر محصول برنج، شهر گرگان

Table 3. Calibration of plant factors of CERES-Rice model - Fajr cultivar, Gorgan city

Parameter شاخص	Unit واحد	d شاخص ویلموت	NRMSE مجموع مربعات خطای نرمال شده	RMSE مجموع مربعات خطا	R ² ضریب تبیین
Anthesis day	day	0.90	8.82	6.62	0.86
Tops wt	Kg ha ⁻¹	0.88	14.89	1805.57	0.87
Mat Yield	Kg ha ⁻¹	0.99	3.54	190.19	0.99
Maturity	day	0.94	4.12	4.86	0.97

جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای روزهای فنولوژیک گیاه در مرحله صحت‌سنجی مدل CERES-Rice

Table 4. Measured and simulated values for plant phenological days in the validation phase of the CERES-Rice model

Treatment تیمار	Maturity day روز رسیدگی			Anthesis day روز گلدهی		
	Measurement اندازه‌گیری شده	Simulation شبیه‌سازی شده	Error (%) خطا (%)	Measurement اندازه‌گیری شده	Simulation شبیه‌سازی شده	Error (%) خطا (%)
Unit	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹
TFGF	94	104	-10	51	58	-7
DSGF	123	123	0	78	78	0
DTGF	123	123	0	78	78	0

جدول ۵. مقادیر زیست‌توده و عملکرد دانه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل CERES-Rice

Table 5. Biomass and grain yield values measured and simulated in the validation phase of the CERES-Rice model

Treatment تیمار	Mat Yield عملکرد دانه			Tops wt عملکرد زیست‌توده		
	Measurement اندازه‌گیری شده	Simulation شبیه‌سازی شده	Error (%) خطا (%)	Measurement اندازه‌گیری شده	Simulation شبیه‌سازی شده	Error (%) خطا (%)
Unit	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹
TFGF	8021	8144	-123	16710	15179	1531
DSGF	5578	5547	31	12678	9637	3041
DTGF	4890	5106	-216	11372	10269	1103

جدول ۷. صحت‌سنجی کارایی مدل CERES-Rice برای تیمارهای مختلف آبیاری - رقم فجر محصول برنج، شهر گرگان

Table 7. Validation of CERES-Rice model performance for different irrigation treatments - Fajr cultivar, Gorgan city

Parameter شاخص	Unit واحد	d شاخص ویلموت	NRMSE مجموع مربعات خطای نرمال شده	RMSE مجموع مربعات خطا	R ² ضریب تبیین
Anthesis	day	0.97	5.86	4.0	0.99
Tops wt	Kg ha ⁻¹	0.83	15.21	2066.3	0.89
Mat Yield	Kg ha ⁻¹	0.99	2.35	144.6	0.99
Maturity	day	0.94	5.11	5.8	0.99

مقادیر همبستگی برای تمامی تیمارها بالای ۰/۷ می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد. همچنین مقادیر NRMSE در تمامی تیمارها کمتر از ۲۰ به دست آمد که نشان می‌دهد مدلسازی خوب و در

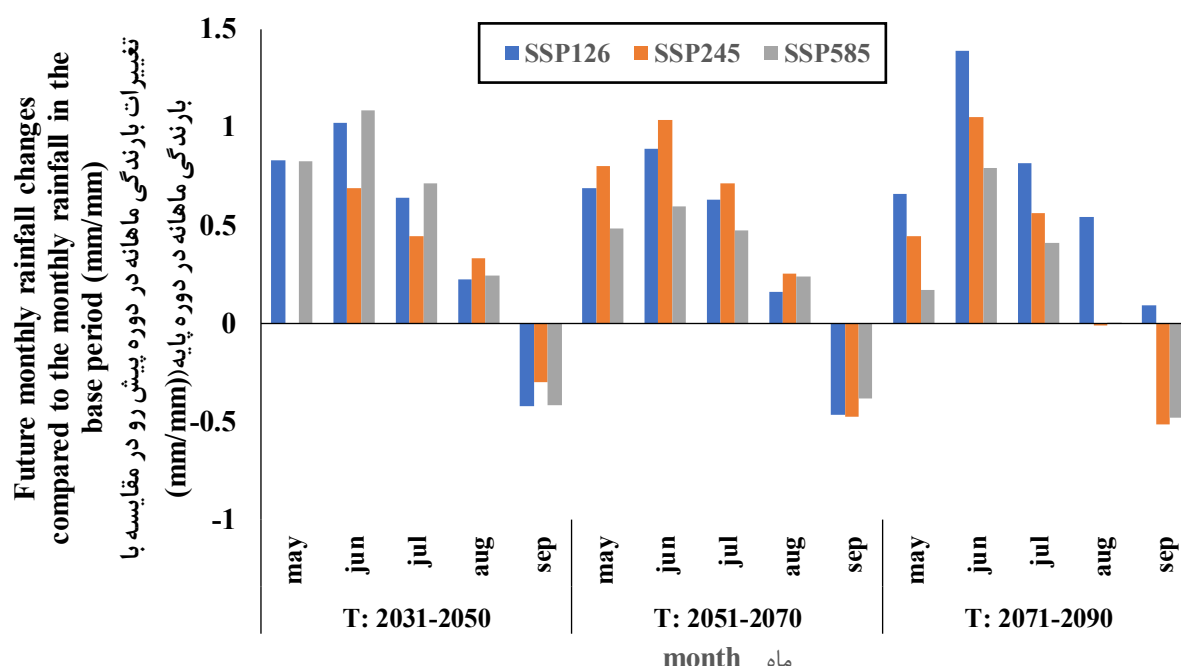
مورد عملکرد دانه، روز گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک (مقادیر بین ۰ تا ۱۰) شبیه‌سازی بسیار خوب بوده است. مقادیر شاخص ویلموت نیز برای تمامی تیمارها قابل قبول بوده است. رضایی (Rezaei, 2015) در برآورد تاثیر تغییرات میزان کاربرد آب آبیاری بر بهره‌وری آب در سطح وسیع با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و مدل DSSAT مقدار NRMSE شبیه‌سازی عملکرد را ۱۲ گزارش نمود. تفرا و همکاران (Tefera et al., 2023) با استفاده از DSSAT عملکرد برنج در دشت فوگر اتیوپی را شبیه‌سازی نمود. یافته‌ها نشان داد که تعداد روزهای تا گلدهی، رسیدگی و عملکرد دانه همه به درستی پیش‌بینی شده‌اند و RMSE نرمال شده بین شبیه‌سازی ارقام مورد مطالعه به ترتیب ۲/۲۱ و ۱/۴۶ و ۲/۲۰ درصد است. آن‌ها گزارش نمودند که این مدل دقت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد محصول دارد.

مدلسازی تغییرات اقلیمی

مدل LARS-WG به‌گونه‌ای طراحی شده است که با داده‌های مشاهده‌شده ایستگاهی (station-level observed data) واسنجی می‌شود و بر اساس ویژگی‌های آماری همان داده‌ها، شبیه‌سازی را انجام می‌دهد (Mohammed and Hassan; 2022; Chota, 2019; Zanello, 2016). داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۰ برای مدلسازی اقلیمی استفاده شد. سپس با استفاده از عملکرد "Site Analysis" مدل LARS-WG ارزیابی این مدل انجام گرفت. برای تایید عملکرد مدل علاوه بر مقایسه گرافیکی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در طی صحت‌سنجی، از آزمون آماری F و t -K-S استفاده شد. از آزمون K-S برای آزمایش برابری توزیع‌های فصلی تر و خشک، توزیع روزانه بارش، توزیع روزانه حداقل و حداکثر دما و تابش انجام شد. آزمون F و t برای بررسی برابری میانگین بارش ماهانه، میانگین دمای حداکثر و حداقل و تابش انجام شد. در همه آزمون‌ها مقدار p -value محاسبه شده و نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با سطح احتمال ۵ درصد است. نتایج کلی شاخص‌های آماری، پاسخ قابل قبولی از ارزیابی مدل HadGem3 نشان داد (جدول ۷). پیش‌بینی‌های اقلیمی (جدول ۹) نشان می‌دهد که دما (هم حداقل دما و هم حداکثر) در ایستگاه مورد بررسی در آینده، افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار تبخیر-تعرق در سناریوهای مختلف نسبت به حالت پایه افزایش خواهد یافت. دلیل این تغییرات را می‌توان در تغییرات مقدار CO_2 موجود در جو و اثر گلخانه‌ای آن جستجو کرد. بارش در طی دوره رشد گیاه در سناریو خوشبینانه افزایش و در سناریو معتدل ابتدا افزایش و سپس در ۲۰ سال انتهایی کاهش می‌یابد و در سناریو بدبینانه روند کاهشی دارد ولی مقدار آن نسبت به پایه در کمترین حالت ۱/۰۹ می‌باشد.

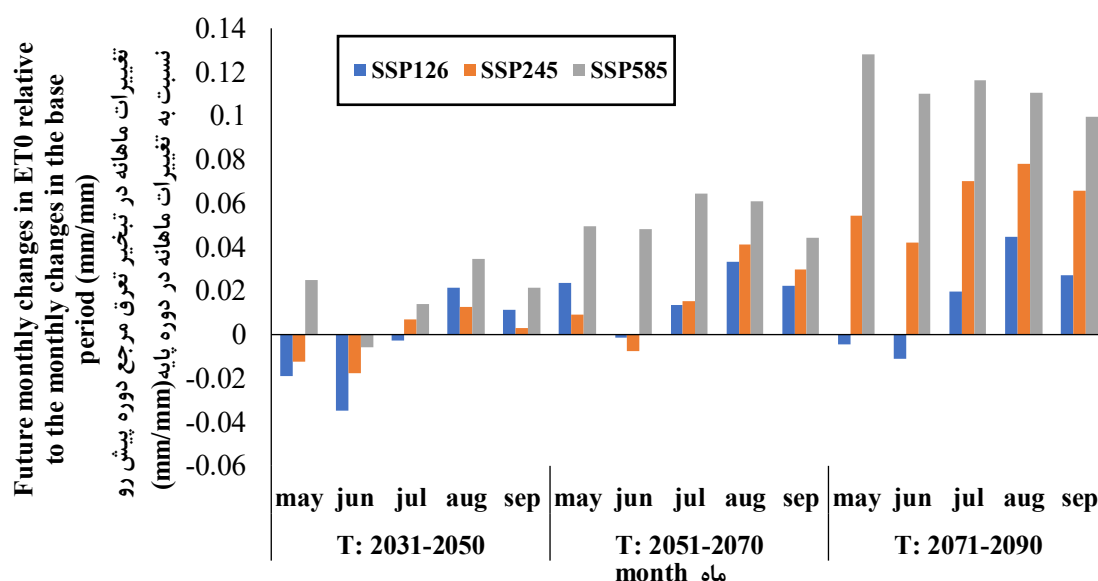
تغییرات بارندگی در سناریوهای مختلف نسبت به بارندگی در دوره پایه در شکل (۲) نشان داده شده است. چنان‌که در نتایج مشاهده می‌شود، در تمامی سناریوها افزایش نسبی در بارش نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰)، $(P_{base}-P)/P_{base}$ ، دیده می‌شود. شدت این روند در سناریوی بدبینانه‌تر SSP585، کمتر مشاهده می‌شود. میزان تغییرات تبخیر-تعرق مرجع نیز در نمودار (شکل ۳) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، افزایش نسبی در تبخیر-تعرق مرجع نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰)، $(ET_{base}-ET)/ET_{base}$ ، در سناریوی SSP585 بیشتر از سایر سناریوها بوده و به ویژه در دوره‌ی زمانی ۲۰۷۱-۲۰۹۰ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این افزایش را می‌توان در ارتباط با روند افزایشی دمای هوا و میزان تابش دریافتی در این سناریو در نظر گرفت. در مطالعات مشابه نیز روندهای همسو با یافته‌های این پژوهش گزارش شده است. برای نمونه، قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2025) با استفاده از مدل SWAT در حوضه گرگانود نشان دادند که دمای میانگین در دوره آتی ممکن است تا ۴/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد و میزان تبخیر-تعرق نیز تا ۱۱ درصد رشد کند. همچنین، مطالعه‌ی قربانی مینایی و همکاران (Ghorbani Minaei et al., 2024) در ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد، افزایش دمای حداقل و حداکثر، و رشد ۱۸ درصدی نسبت بارش در سناریوی SSP585 را گزارش کرده‌اند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. از سوی دیگر، در پژوهش بابائیان و همکاران (Babaeian et al., 2023) با بهره‌گیری از نرم‌افزار CMHyd و داده‌های CMIP6، تغییرات بارش در ایستگاه گرگان برای بازه‌ی ۲۰۷۵-۲۱۰۰ در حدود $\pm 10\%$ درصد بسته به نوع مدل اقلیمی پیش‌بینی شده است. همچنین ظهیری و مرادی (Zahiri and Moradi-Sabzkouhi, 2023) گزارش کردند اثرات متقابل فشار سطح در درجه حرارت و میزان تابش بیشترین تاثیر را بر میزان تبخیر دارد که با نتایج پژوهش حاضر همراستاست.

همچنین، روشنی و حمیدی (Roshani and Hamidi, 2022) با مطالعه سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس سناریوهای گزارش ششم، گزارش کردند که میانگین تغییرات دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سانتی گراد و به صورت صعودی خواهد بود. این تغییرات برای بارش بین ۲۴ تا ۳۶ درصد تخمین زده شد. در مجموع، با توجه به همراستایی نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی و بین‌المللی منطقه‌ای، می‌توان گفت روندهای شبیه‌سازی شده در بارش و تبخیر-تعرق نه تنها قابل انتظار بوده، بلکه از پایداری علمی قابل قبولی برخوردارند.



شکل ۲. تغییرات بارندگی در سناریوهای مختلف نسبت به بارندگی در دوره پایه (فقط دوره رشد)

Fig2. Rainfall changes in different scenarios compared to the rainfall in the base period (growing period only)



شکل ۳. تغییرات تبخیر-تعرق مرجع در سناریوهای مختلف نسبت به تبخیر-تعرق مرجع در دوره پایه (فقط دوره رشد)

Fig 3. Changes in the referenced evapotranspiration in different scenarios compared to the referenced evapotranspiration in the base period (only in growing period)

جدول ۷. ارزیابی LARS-WG از مدل HadGEM3 (p-value)

Table 7. LARS-WG evaluation of HadGEM3 model (p-value)

Parameter شاخص	May اردیبهشت	Jun خرداد	Jul تیر	Aug مرداد	Sep شهریور
Rain	0.524	0.698	0.493	0.422	0.968
TMin	0.479	0.86	0.454	0.048	0.386
TMax	0.515	0.391	0.615	0.404	0.226
RAD	0.066	0.574	0.407	0.348	0.247

جدول ۸. مقادیر شاخص های اقلیمی در دوره پایه (از ۱۰ اردیبهشت تا ۱۰ مهر)

Table 8. Values of climatic parameters in the base period (May to October)

Scenario سناریو	Time زمان	ETo- Average میانگین تبخیر تعرق مرجع	T Max - Averag میانگین متوسط دمای حداکثر	T Min - Averag میانگین دمای حداقل	P- Average میانگین بارش	CO ₂ غلظت کربن دی اکسید
Unit	year	mm mm ⁻¹	°C	°C	mm mm ⁻¹	ppm
Base time	1990-220	771.59	31.36	20.68	135.53	389.0 1

جدول ۹. نتایج مدل سازی برای دوره های پایه و پیش رو در ایستگاه های مطالعاتی بر اساس سناریوهای گزارش ششم (از ۱۰ اردیبهشت تا ۱۰ مهر)

Table 9. Modeling results for the base and future periods at studied stations based on the sixth report scenarios (from May to September)

Scenario سناریو	Time زمان	ETo/ETo _{base} میانگین تبخیر تعرق مرجع / متوسط تبخیر تعرق مرجع در دوره پایه	Tmax- Tmax _{base} میانگین متوسط دمای حداکثر - متوسط دمای حداکثر دوره پایه	Tmin- Tmin _{base} میانگین دمای حداقل - متوسط دمای حداقل دوره پایه	P/ P _{base} میانگین بارش / متوسط بارش پایه	CO ₂ غلظت کربن دی اکسید
Unit	year	mm mm ⁻¹	°C	°C	mm mm ⁻¹	ppm
SSP126	2030-2050	0.99	0.6	1.0	1.37	455.7
	2050-2070	1.02	1.3	1.0	1.29	472.0
	2070-2090	1.01	1.4	1.7	1.62	465.7
SSP245	2030-2050	1.00	0.8	1.1	1.27	475.3
	2050-2070	1.02	1.7	2.1	1.36	536.0
	2070-2090	1.06	2.8	2.8	1.21	582.3
SSP585	2030-2050	1.02	1.5	1.7	1.39	505.0
	2050-2070	1.05	2.9	3.0	1.20	650.0
	2070-2090	1.11	5.1	5.1	1.09	868.7

تغییرات اجزای عملکرد تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی پیش بینی شده

یافته های این پژوهش نشان داد که رقم فجر محصول برنج، به عنوان یکی از ارقام نسبتاً مقاوم به تنش گرمایی در اقلیم شمال ایران، در مواجهه با سناریوهای مختلف تغییر اقلیم (SSP126، SSP245 و SSP585) عملکردی پایدار و در اغلب موارد رو به افزایش از خود نشان داده است. این پایداری عملکردی در شرایطی حاصل شده که هم دما و هم غلظت CO₂ جوی در مدل های اقلیمی افزایش یافته اند، اما رقم فجر با ویژگی های فیزیولوژیکی خود نظیر طول دوره پرشدن دانه و تحمل گرمای انتهای فصل، توانسته است بخشی از استرس ها را تعدیل کند. نتایج بررسی تغییرات عملکرد در واحد سطح دانه و زیست توده برای برنج رقم

فجر با آبیاری غرقابی در جدول (۱۰) نشان داده شده است. در تیمار آبیاری غرقابی (TFGF)، عملکرد دانه از میانگین پایه ۸۹۷۸/۶۱ کیلوگرم در هکتار، در سناریوی SSP585 برای بازه ۲۰۵۱-۲۰۷۱ به ۱۰۲۵۹/۱۵ کیلوگرم در هکتار (رشد ۱۴/۲۶ درصدی) رسید. با اینکه در بازه ۲۰۷۱-۲۰۹۰ افتی نسبی به ۹۵۸۴ کیلوگرم در هکتار (رشد ۶/۷۴ درصدی نسبت به پایه) رخ داد، اما همچنان عملکرد بالاتر از سطح پایه حفظ شد. عملکرد زیست توده در همین سناریو نیز رشد ۱۳/۶۵ درصد را تجربه کرد.

جدول ۱۰. نتایج تغییرات مقدار متوسط عملکرد دانه و زیست توده نسبت به دوره پایه برای تیمار TFGF

Table 10. Results of changes in average grain yield and biomass compared to the baseline period for TFGF treatment

Time زمان	Yield عملکرد دانه	Change V.S base period درصد تغییرات نسبت به دوره پایه	Biomass عملکرد زیست توده	Change V.S base period درصد تغییرات نسبت به دوره پایه
Unit	Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	%
Hist: 1990-2020	8978.61	-	16816.48	-
SSP126: 2031-2050	9935.45	10.66	18542.8	10.27
SSP126: 2051-2071	9967.45	11.01	18526.75	10.17
SSP126: 2071-2090	9871.65	9.95	18253.7	8.55
SSP245: 2031-2050	9942.85	10.74	18498.65	10.00
SSP245: 2051-2071	10081.85	12.29	18598.95	10.6
SSP245: 2071-2090	10144.15	12.98	18568.2	10.42
SSP585: 2031-2050	9792.50	9.06	18158.2	7.98
SSP585: 2051-2071	10259.15	14.26	18735.9	11.41
SSP585: 2071-2090	9584.0	6.74	19112.0	13.65

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱۱)، در تیمار آبیاری بارانی (DSGF)، با وجود مقدار پایه پایین تر (۴۸۶۸/۳۹ کیلوگرم)، افزایش عملکرد در سناریوی SSP585 به ۵۷۵۳/۶ کیلوگرم (۱۸/۱۸ درصد) در بازه ۲۰۵۱-۲۰۷۱ رسید. حتی در دهه پایانی نیز عملکرد با ۱۴/۳۵ درصد نسبت به پایه باقی ماند. این روند یکنواخت افزایشی در این روش، قابلیت اطمینان آن را در آینده های خشک تر افزایش می دهد.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱۲)، در روش قطره ای (DTGF)، که عملکرد پایه آن ۴۶۶۶/۰۳ کیلوگرم بود، در سناریوی SSP585 و بازه ۲۰۵۱-۲۰۷۱، بالاترین نرخ رشد عملکرد یعنی رشد ۲۵/۵۵ درصدی (۵۸۵۸/۱۰ کیلوگرم) ثبت شد. اگرچه در دهه بعدی کاهش نسبی به ۴۹۹۵/۱۵ کیلوگرم رخ داد، اما همچنان ۷/۰۵ درصد بالاتر از دوره پایه باقی ماند. این مسئله، تأکید مضاعفی بر قابلیت آبیاری قطره ای در حفظ عملکرد در شرایط اقلیمی آینده دارد و نیز نشان می دهد در شرایط بسیار گرم (بازه ۲۰۷۱-۲۰۹۰ در SSP585) آبیاری بارانی نسبت به قطره ای عملکرد بهتری دارد زیرا قابلیت خنک کردن تاج پوشش در شرایط بحرانی می تواند از میزان کاهش عملکرد بکاهد. کلیمارتین (Kilmartin, 2023) نشان داد آبیاری بارانی در مقایسه با آبیاری قطره ای توانایی بالاتری در خنک سازی تاج پوشش گیاه دارد؛ این ویژگی موجب کاهش دمای سطحی گیاه، کاهش شدت تنش حرارتی و در نتیجه حفظ راندمان فتوسنتز و عملکرد گیاه در شرایط بحرانی گرما می شود.

جدول ۱۱. نتایج تغییرات مقدار متوسط عملکرد دانه و زیست توده در واحد سطح نسبت به دوره پایه برای تیمار DSGF

Table 11. Results of changes in average grain yield and biomass per unit area compared to the baseline period for DSGF treatment

Time زمان	Yield عملکرد دانه	Change V.S base period درصد تغییرات نسبت به دوره پایه	Biomass عملکرد زیست توده	Change V.S base period درصد تغییرات نسبت به دوره پایه
Unit	Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	%
Hist: 1990-2020	4868.39	-	9148.81	-
SSP126: 2031-2050	5443.4	11.81	9684.84	5.86

SSP126: 2051-2071	5489.45	12.76	9914.8	8.37
SSP126: 2071-2090	5416.4	11.26	9849.25	7.66
SSP245: 2031-2050	5485.9	12.68	9785.95	6.96
SSP245: 2051-2071	5603.85	15.11	10076.60	10.14
SSP245: 2071-2090	5702.85	17.14	10276.15	12.32
SSP585: 2031-2050	5434.8	11.63	9794.90	7.06
SSP585: 2051-2071	5753.6	18.18	10353.2	13.16
SSP585: 2071-2090	5567.05	14.35	10869.95	18.81

جدول ۱۲. نتایج تغییرات مقدار متوسط عملکرد دانه و زیست توده در واحد سطح نسبت به دوره پایه برای تیمار DTGF
Table 12. Results of changes in average grain yield and biomass per unit area compared to the baseline period for DTGF treatment

Time زمان	Yield عملکرد دانه	Change V.S base period درصد تغییرات نسبت به دوره پایه	Biomass عملکرد زیست توده	Change V.S base period درصد تغییرات نسبت به دوره پایه
Unit	Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	%
Hist: 1990-2020	4666.03	-	9913.19	-
SSP126: 2031-2050	5287.4	13.32	10641.65	7.35
SSP126: 2051-2071	5389.9	15.51	10677.40	7.71
SSP126: 2071-2090	5315.0	13.91	10568.9	6.61
SSP245: 2031-2050	5411.10	15.97	10769.90	8.64
SSP245: 2051-2071	5539.0	18.71	10886.75	9.82
SSP245: 2071-2090	5711.40	22.40	10986.25	10.82
SSP585: 2031-2050	5296.70	13.52	10591.90	6.85
SSP585: 2051-2071	5858.10	25.55	11061.80	11.59
SSP585: 2071-2090	4995.15	7.05	11649.50	17.52

از نظر پایداری عملکرد تحت تنش اقلیمی، رقم فجر محصول برنج نشان داد که در هر سه نوع آبیاری و حتی در سناریوهای شدید اقلیمی نیز عملکرد مطلق در واحد سطح، چندان کاهش نمی‌یابد. عموماً کاهش محصول در ارقام بومی و حساس به تنش گرمایی رخ می‌دهد که در برابر افزایش دما در دوره پیش رو مقاومت کمتری دارند و پس از رسیدن به آستانه تحمل تنش گرمایی دچار عقیمی سنبلچه می‌شوند. این نتایج با مطالعات بین‌المللی نیز کاملاً همخوانی دارد. به‌طور خاص، مطالعه‌ی ویلاوان و همکاران (Vilavan et al., 2024) در دلتای چائوپرایا در تایلند نشان داد که استفاده از ارقام مقاوم به گرما همراه با مدل‌های آبیاری بهینه، در شرایط اقلیمی آینده می‌تواند جلوگیری قابل توجهی از کاهش عملکرد ایجاد کند. آن‌ها نشان دادند که مدیریت زمان کاشت، انتخاب رقم مناسب و تغییر در روش آبیاری سه عامل کلیدی در حفظ پایداری تولید برنج در سناریوهای تغییر اقلیم بودند. این در حالی است که ربانی و همکاران (Rabbani et al., 2015) با بررسی شرایط تغییر اقلیم در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از مدل اقلیمی ECHAM5 گزارش کردند در شرایط افزایش حداقل و حداکثر دما در ایستگاه رشت و کاهش بارندگی‌ها، با افزایش دمای ۲ درجه سانتی‌گراد عملکرد دانه محصول برنج، ارقام هاشمی و علی‌کاظمی ۲۴ الی ۲۷ و عملکرد زیست توده ۲۶ درصد از سطح دمای پایه کاهش می‌یابد. ارقام هاشمی و علی‌کاظمی از ارقام بومی و حساس به تنش دمایی هستند. چنین مطالعاتی نشان می‌دهند که با انتخاب رقم مقاوم مانند فجر، نه تنها از افت عملکرد جلوگیری می‌شود، بلکه در بسیاری از بازه‌ها می‌توان به افزایش عملکرد نیز دست یافت. این نکته‌ی مهم، ضرورت رویکرد اصلاح ژنتیکی و مدیریت پایدار آب در سطح مزارع را به‌عنوان سیاست کلیدی در مقابله با تغییر اقلیم برجسته می‌سازد. مطالعات کامروزامان (Kamruzzaman et al., 2024) نیز نشان داد که اثر مثبت افزایش CO₂ بر فتوسنتز در ارقام مقاوم به گرما می‌تواند اثرات منفی دما را خنثی کند، به‌خصوص زمانی که از آبیاری‌های موضعی (مثل قطره‌ای) استفاده شود. همچنین در مطالعه‌ی آریال و همکاران (Aryal et al., 2020) در جنوب آسیا، استفاده ترکیبی از ارقام مقاوم و روش‌های آبیاری مدرن به‌عنوان بهترین راهبرد انطباق برای کشاورزان خرده‌مالک معرفی شده است.

به منظور ارزیابی حساسیت مدل نسبت به متغیرهای اقلیمی اصلی، تحلیل حساسیت تجربی برای عملکرد دانه و زیست توده بر اساس تغییرات دما، بارش، تبخیر-تعرق و رطوبت خاک انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای بیشینه در دوره گلدهی بیشترین تأثیر منفی را بر عملکرد دانه دارد، به طوری که با افزایش یک درجه سلسیوس در دمای روزانه، عملکرد تا حدود ۴-۶ درصد کاهش یافت. کاهش رطوبت خاک نیز اثر منفی قابل توجهی بر عملکرد داشت، اما زمانی که با افزایش دما همزمان می شد، شدت کاهش عملکرد به بیش از ۱۰ درصد می رسید. در مقابل، تغییرات بارش اثر کمتری بر عملکرد داشت و بیشتر بر شاخص های رشد رویشی تأثیرگذار بود.

نتایج مدل نشان داد که در سناریوهای SSP245 و SSP585، استرس حرارتی در مرحله گلدهی و پر شدن دانه بیشترین کاهش عملکرد را ایجاد می کند. در این دوره ها، افزایش دمای بیشینه بیش از ۳۵ درجه سانتیگراد موجب عقیمی گل و افت معنی دار عملکرد دانه گردید، در حالی که زیست توده کلی افزایش یافت؛ موضوعی که بیانگر اختلال در تخصیص مواد فتوسنتزی به اندام های زایشی است.

با این حال، باید توجه داشت که مدل CERES-Rice در شبیه سازی برخی فرآیندهای فیزیولوژیک، از جمله پاسخ گیاه به تنش های همزمان گرمایی و خشکی، دارای محدودیت است و نتایج آن با عدم قطعیت همراه است. این مدل بر پایه داده های ورودی اقلیمی و پارامترهای واسنجی شده عمل می کند و ممکن است در شرایط شدید اقلیمی، تغییرات واقعی عملکرد را کمتر یا بیشتر برآورد کند. بنابراین، ترکیب مدل های فیزیولوژیک با داده های میدانی آبی و آزمایش های کنترلی می تواند به بهبود دقت شبیه سازی ها و کاهش عدم قطعیت نتایج کمک نماید.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه سازی مدل CERES-Rice نشان داد که رقم فجر به عنوان ژنوتیپی نیمه مقاوم به تنش گرمایی، در مواجهه با سناریوهای مختلف تغییر اقلیم SSP126، SSP245 و SSP585 از پایداری عملکرد قابل توجهی برخوردار است و حتی در برخی شرایط، افزایش عملکرد دانه و زیست توده نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) را نشان داده است. این امر بیانگر آن است که ویژگی های فیزیولوژیک رقم فجر، از جمله کارایی مصرف آب و سازگاری فنولوژیکی با دمای بالاتر، موجب شده تا اثرات منفی گرمایش جهانی بر رشد و نمو آن تا حدی تعدیل شود. با وجود افزایش دما و تبخیر-تعرق، توان این رقم در حفظ عملکرد مطلوب، اهمیت انتخاب و به کارگیری ژنوتیپ های سازگار با اقلیم آینده را برجسته می سازد.

در بررسی روش های مختلف آبیاری، مشخص شد که آبیاری بارانی در دوره های گرم تر (به ویژه بازه های ۲۰۷۱-۲۰۹۰ در SSP585) عملکرد مطلوب تری نسبت به روش آبیاری قطره ای داشته است. علت این برتری، توانایی خنک کنندگی سامانه بارانی و کاهش دمای سایه انداز گیاه است. این ویژگی در شرایط تنش حرارتی بالا، از عقیمی سنبله ها جلوگیری کرده و عملکرد اقتصادی را حفظ می کند. در مقابل، روش آبیاری قطره ای در بازه های میانه (۲۰۵۰-۲۰۷۰) بیشترین افزایش عملکرد را نسبت به پایه نشان داد که بیانگر کارایی بالای آن در دوره های با تنش متوسط است. روش غرقابی نیز گرچه در اقلیم فعلی عملکرد بالایی دارد، اما در شرایط اقلیمی پیش رو (به ویژه با افزایش ET_0 و دمای حداکثر) آسیب پذیرتر دارای نوسان عملکرد می باشد.

به طور کلی، اثر مثبت افزایش غلظت CO_2 بر فتوسنتز، به ویژه در ارقام مقاوم، توانسته بخشی از اثرات منفی افزایش دما را جبران کند. این اثر زمانی تقویت می شود که با مدیریت بهینه فرآیند آبیاری و انتخاب صحیح زمان کاشت همراه باشد. نتایج حاصل، با مطالعات قبلی در سطح منطقه ای و بین المللی همراستا بوده و نشان دهنده ی ظرفیت سازگاری مناسب کشت برنج رقم فجر در صورت استفاده از راهبردهای علمی-مدیریتی مناسب است. با این وجود، عدم بررسی سایر ارقام برنج (به ویژه ارقام بومی حساس به گرما)، عدم لحاظ تنش های ترکیبی مانند شوری یا کمبود مواد غذایی، و فرض ثبات پارامترهای مدیریتی در افق بلندمدت از محدودیت های این پژوهش بوده است. همچنین، سناریوهای مورد استفاده، طیفی از شرایط اقلیمی را پوشش داده اند، اما عدم قطعیت در مدل های اقلیمی و مدیریت کشاورزی پیش رو همچنان وجود دارد.

بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، افزایش دمای بیشینه بیشترین تأثیر منفی را بر عملکرد دانه داشت، در حالی که تغییرات رطوبت خاک اثر مکمل و تشدیدکننده بر استرس حرارتی ایجاد کرد. بیشترین حساسیت گیاه در مرحله گلدهی مشاهده شد که افزایش دمای بالاتر از آستانه تحمل گیاه، موجب افت عملکرد و کاهش شاخص باروری دانه گردید. با این حال، باید توجه

داشت که مدل CERES-Rice در شبیه‌سازی اثرات هم‌زمان گرما و خشکی دارای محدودیت‌هایی است و نتایج با عدم قطعیت همراه است.

بنابراین، توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده، شبیه‌سازی بر پایه‌ی سناریوهای مدیریتی مختلف (مانند تغییر در تاریخ کاشت، کوددهی، انتخاب رقم و الگوی آبیاری) توسعه یافته و تحلیل‌های حساسیت چندعاملی به‌صورت گسترده‌تر انجام شود. همچنین بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سایر شاخص‌های کیفی (مانند محتوای پروتئین، طول دوره برداشت و کیفیت پخت برنج) می‌تواند ابعاد تکمیلی مهمی به مطالعات اقلیم-محصول بیافزاید. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب تصمیم‌سازی برای راهبردهایی نظیر ترویج ارقام مقاوم، توسعه سامانه‌های آبیاری نوین، آموزش کشاورزان درباره اثرات تغییر اقلیم، و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های پایش اقلیمی در اختیار سیاست‌گذاران بخش کشاورزی و منابع آب قرار گیرد.

سپاسگزاری

در این بخش از همکاری و مساعدت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی برای حمایت‌های معنوی و ارایه آمار و اطلاعات مربوط به کشت برنج (نشایی و مستقیم) در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۹ برای واسنجی مدل CERES-Rice سپاسگزاریم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع

- Abbas, G., Ahmed, M., Ahmad, A., Wajid, A., Rasool, F., Ahmad, S., & Hoogenboom, G. (2022). Applications of Crop Modeling in Rice Production. In *Modern Techniques of Rice Crop Production* (pp. 565-584). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4955-4_28
- Adnan, A. A., Diels, J., Jibrin, J. M., Kamara, A. Y., Craufurd, P., Shaibu, A. S., Mohammed, I.B. & Tonnang, Z. E. H. (2019). Options for calibrating CERES-maize genotype-specific parameters under data-scarce environments. *PLoS One*, 14(2), e0200118. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200118>
- Ali, N. I. M., Aiyub, K., Lam, K. C., & Abas, A. (2022). A bibliometric review on the inter-connection between climate change and rice farming. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 30892-30907. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18880-1>
- Amiri, E., Rezaei, M., Bannayan, M., & Soufizadeh, S. (2013). Calibration and evaluation of CERES rice model under different nitrogen-and water-management options in semi-mediterranean climate condition. *Communications in soil science and plant analysis*, 44(12), 1814-1830. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.769565>
- Ansari, A., Lin, Y. P., & Lur, H. S. (2021). Evaluating and adapting climate change impacts on rice production in Indonesia: a case study of the Keduang subwatershed, Central Java. *Environments*, 8(11), 117. <https://doi.org/10.3390/environments8110117>
- Arvandi, S. (2024). The Effect of Climate Change on the Way of Investing in Modern Irrigation Systems. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(3), 97-110. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7834.1071>. [In Persian].
- Aryal, J. P., Sapkota, T. B., Khurana, R., Khatri-Chhetri, A., Rahut, D. B., & Jat, M. L. (2020). Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, development and sustainability*, 22(6), 5045-5075. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00414-4>
- Aryal, J. P., Sapkota, T. B., Khurana, R., Khatri-Chhetri, A., Rahut, D. B., & Jat, M. L. (2020). Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, development and sustainability*, 22(6), 5045-5075. <https://doi.org/10.48130/cas-0024-0010da>
- Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., Falamarzi, Y. and Malbusi, S. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 431-449. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>. [In Persian].
- Bahmanabadi, B., Kaviani, A., & Etedali, H. R. (2023). Crop monitoring and biomass estimation based on downscaled remote sensing data in AquaCrop model (case study: Qazvin Plain, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1275. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2632844/v1>

Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M. S., Weesakul, S., & Datta, A. (2018). Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1157-1164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.146>

Borzoo, F., Hadi, R. E., & Kaviani, A. (2024). The effects of climate change and change of planting date on spring wheat yield (case study: Qazvin Plain). *Water Management in Agriculture*, 11(1), 63-80.[In Persian].

Buddhaboon, C., Jintrawet, A., & Hoogenboom, G. (2018). Methodology to estimate rice genetic coefficients for the CSM-CERES-Rice model using GENCALC and GLUE genetic coefficient estimators. *The Journal of Agricultural Science*, 156(4), 482-492. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000527>

Chota, M. (2019). Downscaling global climate models statistically and generating projections of changes in precipitation and temperature at meteorological stations in Zambia (Doctoral dissertation, The University of Zambia). <https://dspace.unza.zm/handle/123456789/6881>

da Silva, E. H. F. M., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Cuadra, S. V., Porter, C. H., Scivittaro, W. B., Steinmetz, S., & Cerri, C. E. P. (2025). Implications of water management on methane emissions and grain yield in paddy rice: A case study under subtropical conditions in Brazil using the CSM-CERES-Rice model. *Agricultural Water Management*, 307, 109234. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109234>

Darikandeh, D., Shahnazari, A., Khoshravesh, M., & Hoogenboom, G. (2023). Evaluating rice yield and adaptation strategies under climate change based on the CSM-CERES-Rice model: a case study for northern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(3), 967-986. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04188-0>

Dehghanisani, G. and Bashi Azghadi, S. N. (2025). An overview of different perspectives on climate change: Analysis and Comparison. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(4), <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9047.1124>

Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3), 1539-1562. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02906-9>

Farooq, A., Farooq, N., Akbar, H., Hassan, Z. U., & Gheewala, S. H. (2023). A critical review of climate change impact at a global scale on cereal crop production. *Agronomy*, 13(1), 162. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010162>

Gholinezhad, G., Gholami Sefidkouhi, M. A., and Mosavi, S. Y. (2021). The Effect of Drip Strips Irrigation (Tape) on Physical and Economic Productivity of Paddy Fields in Sari City. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3127-3134. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.307913.668698>. [In Persian].

Ghorbani Minaei, L., Zakerinia, M., and Kalbali, E. (2024). Projection and Assessment of precipitation and temperature changes by the CMIP6 models (Case study: Hashemabad Gorgan station). *Journal of Climate Research*, 1403(57), 211-228. <https://doi.org/10.22034/jcr.2024.198109>. [In Persian].

Ghorbani, H., Akbari Azirani, T., Entezari, A. & Baaghdeh, M., (2025). The spatial-temporal changes in water balance components under future climate change in the Gorganroud Watershed, Iran. *Water Cycle*. 6, 319-334. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2025.02.003>

Gobezie, A., Ademe, D., & Sharma, L. K. (2025). CERES-Maize (DSSAT) Model Applications for Maize Nutrient Management Across Agroecological Zones: A Systematic Review. *Plants*, 14(5), 661. <https://doi.org/10.3390/plants14050661>

Goswami, P., & Dutta, G. (2020). Evaluation of DSSAT model (CERES rice) on rice production: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(5), 404-409. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5f.10327>

Hamidianpour, M. and Shoja, F. (2022). An Introduction to Methods and Techniques of Climate Modeling and Climate Change. First Edition, University of Sistan and Baluchestan Press.[In Persian].

Hassan, Z., Shamsudin, S., & Harun, S. (2014). Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and applied climatology*, 116(1), 243-257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0951-8>

Hosseini, G., Tayebbeh, A. A., Alireza, E., & Mohammad, B. (2025). The spatial-temporal changes in water balance components under future climate change in the Gorganroud Watershed, Iran. *Water Cycle*. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2025.02.003>

Hussain, S., Huang, J., Huang, J., Ahmad, S., Nanda, S., Anwar, S., Shakoor, A., Zhu, Ch., Zhu, L., Cao, X., Jin, Q., & Zhang, J. (2020). Rice production under climate change: adaptations and mitigating strategies. In *Environment, climate, plant and vegetation growth* (pp. 659-686). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_26

Kamruzzaman, M., Biswas, J. C., Islam, H. T., & Hossain, A. Z. (2024). Interannual climate variability and its impacts on major crop productivity. In *Climate Change and Soil-Water-Plant Nexus: Agriculture and Environment* (pp. 297-329). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6635-2_10

Kilmartin, M. (2023). Simulating Irrigation Requirements in Lanoraie, Quebec Using Aquacrop: Optimizing Agricultural Needs in an Ecologically-Sensitive Environment. McGill University, Canada.

- Li, N., Zhao, Y., Han, J., Yang, Q., Liang, J., Liu, X., Wang, Y., & Huang, Z. (2024). Impacts of future climate change on rice yield based on crop model simulation—A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 949, 175038. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175038>
- Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H., & Varshavian, V. (2022). Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4649-4659. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01393-8>
- M. Nassiri, , A. Eshraghi, , M. Bahrami, , A. Mohadesi, , M. Z. Nouri, , S. S. Hosseini Imeni, , F. Tavassoli Larijani, , T. Oskoo, , A. Valizadeh, , H. Pirdashti, , G. Azami, , R. Amani, , S. Salehi, and M. Najjar Omrani, (2006). Introduction of New High Yielding and Good Quality Rice Cultivar, Fajr. *Seed and Plant Journal*, 22(3), 411-414. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.110694>. [In Persian].
- Mohammadi, N. , Hejazizadeh, Z. , Zeaiean Firouzabadi, P. and Karbalaee, A. (2024). Detection of the Effect of Climate Change on the Mechanism of Heat Islands in Tehran Province. *Nivar*, 48(124-125), 203-224. <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281>. [In Persian].
- Mohammed, Z. M., & Hassan, W. H. (2022). Climate change and the projection of future temperature and precipitation in southern Iraq using a LARS-WG model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 4205-4218. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01358-x>
- Mote, B. M., & Kumar, N. (2016). Calibration and validation of CERES-rice model for different rice cultivars at Navsari. *Journal of Agrometeorology*, 18(1), 155-157.
- Munawar, S., Rahman, G., Moazzam, M. F. U., Miandad, M., Ullah, K., Al-Ansari, N., & Linh, N. T. T. (2022). Future climate projections using SDSM and LARS-WG downscaling methods for CMIP5 GCMs over the transboundary Jhelum River Basin of the Himalayas Region. *Atmosphere*, 13(6), 898. <https://doi.org/10.3390/atmos13060898>
- N'guessan, K. J. Y., Adahi, B., Konan-Waidhet, A. B., Masayoshi, S., & Assidjo, N. E. (2023). Assessment of climate change impact on water requirement and rice productivity. *Rice Science*, 30(4), 276-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsci.2023.03.010>
- Nazari, S. , hossieni, M. , Rahimi-Moghaddam, S. and Mohammadi, M. (2022). Investigation of genetic coefficients of rice cultivars for applying in crop simulation models. *Journal of Crops Improvement*, 24(4), 1085-1100. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.329050.2599>. [In Persian].
- Rabbani, F., Mohammadi, H., Azizi, G., & Mazaheri, D. (2015). Simulation of rice production under climate change scenarios in the Southern coasts of Caspian Sea. *Desert*, 20(2), 197-206.
- Ramazani Vasouklai, M. (2021). Evaluation of rice growth and yield under water table management using the DSSAT model. MSc dissertation, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.[In Persian].
- Razzaghi, M. H., Kiani, A., & Abyar, N. (2020). Rice transplanting and direct seeding cultivation, Technical and economic solution for rice production in Golestan province (on farm). *Water Management in Agriculture*, 7(1), 33-44. [DOR:20.1001.1.24764531.1399.7.1.4.1](https://doi.org/10.24764/531.1399.7.1.4.1). [In Persian].
- Rezaei, M. (2015). Estimating the impact of changes in irrigation water use on water productivity at a large scale using a combination of satellite data and the DSSAT model. PhD dissertation, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Iran. [In Persian].
- Roshani, A. & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603.920>. [In Persian].
- Sajjad, S., Munir, M., Akram, H. M. B., Akram, S., Anjum, L., Safdar, M., & Rizvi, S. A. (2024) Predicting and simulating rice growth and yield: a comparative modeling study on the impact of diverse production systems. *Journal of Xi'an Shiyou University*, 67(11), 105-141. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14219950>
- Seifzadeh Momensaraei A, Sabziparvar A. (2022). Optimization of rice (*Oryza sativa* L.) and subsequent soybean (*Glycine max* L. Merr) cropping calendars under the climate change conditions using dynamical general circulation models (GCMs) and DSSAT crop model. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 23 (4), 357-372. [DOR:20.1001.1.15625540.1400.23.4.5.5](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2862393/v1) [In Persian].
- Tefera, S., Tesfaye, K., Tadesse, T., Alem, T., & Ademe, D. (2023). Simulating the impacts of climate change on rice (*Oryza sativa* L.) yield using the DSSAT-CERES Rice Model in Fogera Plain, Ethiopia. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2862393/v1>
- Vilavan, S., Das, D., Ullah, H., Gade, S. A., Ahmed, S. F., Cha-Um, S., Praseartkul, P., Datta. A., & Himanshu, S. K. (2024). Exploring the impacts of climate change and identifying potential adaptation strategies for sustainable rice production in Thailand's Lower Chao Phraya Basin through crop simulation modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(12), 1192. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13362-y>
- Wang, R., Jiang, Y., Su, P., & Wang, J. A. (2019). Global spatial distributions of and trends in rice exposure to high temperature. *Sustainability*, 11(22), 6271. <https://doi.org/10.3390/su11226271>

- Zahiri, J. and Moradi-Sabzkouhi, A. (2023). Investigating the Interaction Effects of Meteorological Parameters on Evaporation from the Water Surface Using Variance Analysis. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(3), 87-104. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6498.1028>. [In Persian].
- Zanella, V. (2016). Integration of proximal sensing and crop modeling to optimize N variable fertilization on cereals. <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/81158>
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2021). Historical variability and future changes in seasonal extreme temperature over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(3), 1227-1248. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03795-7>
- Zheng, J., Wang, W., Ding, Y., Liu, G., Xing, W., Cao, X., & Chen, D. (2020). Assessment of climate change impact on the water footprint in rice production: Historical simulation and future projections at two representative rice cropping sites of China. *Science of the Total Environment*, 709, 136190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136190>
- Zhou, Z., Jin, J., Li, F., & Liu, J. (2025). Estimating the temperature sensitivity of rice (*Oryza sativa* L.) yield and its components in China using the CERES-Rice model. *European Journal of Agronomy*, 162, 127419. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2024.127419>