

Assessment of the Resilience of Traditional Indigenous Rice Cropping Systems to Climate Change 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)
- 3- 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)
- 4- 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 is increasingly recognized as one of the most critical challenges of the twenty-first century, with far-reaching consequences for agricultural production and food security. Global projections indicate that irrigated rice yields may decline by 10–12% by 2050, even when excluding the fertilization effects of elevated CO₂. Such reductions are particularly alarming given the rapid growth in global food demand and the reliance of billions of people on rice as a staple crop. In Iran, rice cultivation is concentrated in the northern provinces, where indigenous cultivars such as *Tarom Domsiah* are highly valued for their quality and market preference. These traditional systems, typically based on transplanting and flood irrigation, are highly vulnerable to climatic stresses, including rising temperatures, altered precipitation patterns, and increased water demand. Assessing their resilience under future climate scenarios is therefore essential for safeguarding national food security. The objective of this study was to evaluate the resilience and adaptability of the *Tarom Domsiah* cropping system in Golestan Province using the CERES-Rice model, with a particular focus on sensitivity analysis of yield responses to changes in temperature and precipitation under three Shared Socioeconomic Pathways (SSP126, SSP245, and SSP585).

Materials and Methods

Field experiments were conducted during the 2019–2020 cropping season on two one-hectare farms located in Azadshahr and Minudasht counties of Golestan Province. The experimental design followed traditional transplant–flooding practices, including nursery preparation, transplanting at a spacing of 25 × 25 cm, and continuous shallow flooding. Fertilization schedules included multiple applications of urea, superphosphate, and potassium, while pest and weed control were managed through chemical spraying and manual weeding. Detailed records were maintained for sowing and transplanting dates, phenological stages (flowering, grain filling, and physiological maturity), biomass accumulation, and grain yield. Soil samples were analyzed for texture, organic carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium, providing essential input data for the model.

Baseline climate data (1990–2020) were obtained from the Minudasht synoptic station and statistically downscaled using the HadGEM3-GC31-LL global circulation model within the CMIP6 framework. Future climate projections for the period 2031–2090 were generated under three SSP scenarios: SSP126 (sustainability-oriented, optimistic), SSP245 (intermediate), and SSP585 (fossil-fuel-intensive, pessimistic). The CERES-Rice model, embedded in DSSAT-CSM v4.8, was calibrated using field data from Azadshahr and validated with independent data from Minudasht. Calibration involved iterative adjustment of genetic coefficients (P1, P2R, P2O, P5, G1, G2, G3, and PHINT) using the GenCalc and GLUE interfaces, with optimization based on minimizing the root mean square error (RMSE) and maximizing Willmott's Agreement Index (d). Model performance was evaluated using RMSE, normalized RMSE (NRMSE), and d to ensure close agreement between simulated and observed values.

Sensitivity analysis was conducted to quantify yield responses to incremental changes in temperature and precipitation. In addition, resilience indices were calculated to assess the system's capacity to maintain productivity under climatic stress. Adaptation strategies, including shifts in planting dates and adjustments in transplanting density, were simulated to explore potential mitigation options.

Results and Discussion

Calibration results confirmed the strong predictive capacity of the CERES-Rice model, with NRMSE values below 10% and Willmott's Agreement Index exceeding 0.9, indicating excellent agreement between simulated and observed phenology, biomass, and yield. Sensitivity analysis revealed that rising temperatures, particularly during the grain-filling stage, exerted a pronounced impact on yield. Under the optimistic SSP126 scenario, yields increased by up to 18.6% relative to the baseline, reflecting favorable temperature and precipitation conditions. In contrast, under the pessimistic SSP585 scenario, yields declined sharply by as much as 80.7%, accompanied by substantial increases in water requirements. These results highlight the vulnerability of traditional transplant-flooded systems to extreme climate scenarios.

Resilience indices indicated that under SSP126, the cropping system maintained relative productivity with limited yield variability, whereas under SSP585, resilience declined markedly and yield fluctuations intensified. The intermediate SSP245 scenario produced moderate outcomes, characterized by partial yield reductions and increased variability. Simulations of adaptation strategies demonstrated that adjusting planting dates was highly effective: planting on May 15 or June 5 consistently resulted in higher yields and lower variability compared with late planting dates, which exposed the crop to elevated temperatures during the grain-filling period. Adjustments in transplant density also influenced yield stability, although their effects were less pronounced than those of planting date shifts. Overall, these findings underscore the importance of adaptive management practices in sustaining agricultural productivity under climate change.

Conclusion

This study provides clear evidence that traditional indigenous rice cropping systems in Iran exhibit varying levels of resilience to climate change depending on the scenario considered. Under optimistic conditions, the system can sustain relative productivity, whereas under pessimistic scenarios, severe yield reductions and increased water demand are expected. The results emphasize that adaptation strategies such as adjusting planting dates and managing transplant density can play a crucial role in enhancing resilience and reducing production risks. These strategies are cost-effective, practical, and accessible to farmers, making them suitable for widespread adoption. The study also highlights the value of integrating resilience assessment with adaptation analysis. While adaptation refers to proactive measures taken to reduce vulnerability, resilience reflects the system's inherent capacity to maintain stability and recover from stress. Evaluating both dimensions simultaneously provides a more comprehensive understanding of cropping system performance under climate change. The findings contribute to the scientific basis for national policymaking in food security and water resource management, offering guidance for climate-smart agricultural planning. By integrating process-based crop modeling with scenario analysis, this research demonstrates how traditional systems can be systematically assessed and strengthened to address future challenges. Ultimately, the combined resilience-adaptation approach offers a practical framework for designing evidence-based policies that support sustainable agriculture and ensure food security in the face of climate change.

KeyWords: Climate adaptation, Sustainable agriculture, Environmental stress, Modeling.

ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های سنتی کشت برنج بومی در برابر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل CERES-Rice

پروین ذوالفقاری^۱، ابوطالب هزارجریبی^{۲*}، محمد اسماعیل اسدی^۲، 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 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@gu.ac.ir

چکیده

این پژوهش باهدف ارزیابی تاب‌آوری سامانه کشت یکی از ارقام بومی برنج (طارم دمسپاه) در برابر تغییرات اقلیمی در استان گلستان انجام شد. داده‌های مزرعه‌ای طی سال زراعی ۱۴۰۰ جمع‌آوری گردید و برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل CERES-Rice مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اقلیمی پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) از ایستگاه سینوپتیک مینودشت استخراج و با استفاده از مدل HadGEM3-GC31-LL تحت سه سناریوی انتشار SSP126، SSP245، SSP585 برای دوره‌های آینده (۲۰۳۱-۲۰۹۰) پیش‌بینی شد.

نتایج واسنجی نشان داد که مدل CERES-Rice توانایی بالایی در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک، رشد زیست‌توده و عملکرد دانه دارد (ریشه مربعات خطای نرمال‌شده $1 < \text{NRMSE}$ و شاخص توافق ویلموت $d^2 < 0.9$ تحلیل حساسیت عملکرد نسبت به تغییرات دما و بارش نشان داد که افزایش دما به‌ویژه در مرحله پر شدن دانه، موجب تغییر معنی‌دار عملکرد شلتوک (در خوش‌بینانه‌ترین و بدبینانه‌ترین حالت به ترتیب بین $18/6\% +$ تا $80/7\% -$ درصد نسبت به عملکرد در دوره پایه) می‌شود؛ به‌طوری‌که در سناریوی SSP585 کاهش شدید عملکرد و افزایش نیاز آبی مشاهده گردید. ارزیابی شاخص‌های تاب‌آوری فیزیکی نشان داد که در سناریوی خوش‌بینانه SSP126، سیستم کشت توان حفظ بهره‌وری نسبی دارد، اما در سناریوی بدبینانه SSP585 تاب‌آوری کاهش یافته و نوسانات عملکرد افزایش می‌یابد. به‌کارگیری راهبردهایی مانند تغییر تاریخ کشت و تراکم مورد نشان داد، کشت در تاریخ‌های ۲۵ اردیبهشت یا ۵ خرداد به‌مراتب عملکرد بالاتر و نوسان عملکرد کمتری نسبت به کشت دیر هنگام داشت. این نتایج نشان می‌دهد رویکرد سازگاری می‌تواند نقش مهم و اساسی در امنیت غذایی کشور داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: سازگاری اقلیمی، کشاورزی پایدار، تنش محیطی، مدل‌سازی

مقدمه

امنیت غذایی توسط مؤسسه بین‌المللی تحقیقات سیاست غذایی نشان می‌دهد که به‌استثنای اثرات جداگانه کوددهی دی‌اکسیدکربن (CO_2)، پیش‌بینی می‌شود تغییرات اقلیمی باعث کاهش ۱۰ تا ۱۲ درصدی عملکرد جهانی برنج آبی تا سال ۲۰۵۰ شود (Nelson et al., 2010). چنین کاهش در عملکرد برنج، به‌ویژه با توجه به افزایش سریع تقاضای جهانی غذا، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی است (Rogelz et al., 2016). بنابراین ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های کشت برنج برای ارقام مختلف و اقلیم‌های مختلف در راستای تنوع بخشیدن به گونه‌ها و هماهنگی با شرایط اقلیمی اجتناب‌ناپذیر است. تنوع بخشیدن به گونه‌ها، بهبود بهره‌وری بالقوه و هماهنگ کردن رشد محصول با شرایط آب و هوایی، نقاط ورودی متنوعی را برای سازگاری محصولات با تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده ارائه می‌دهد (Ali and Erenstein, 2017; Tesfaye et al., 2019).

تنوع گونه‌ای نقش مهمی در سازگاری با محیط در حال تغییر ایفا می‌کند. گونه‌های مختلف برنج می‌توانند اثرات آب و هوای متغیر، مانند دمای بالا، سیل و خشکسالی را تا درجات مختلفی تحمل کنند؛ بنابراین، دانستن مناسب‌ترین گونه‌های برنج تحت

¹ Normalized Root Mean Square Error

² Willmott index

شرایط خاص می‌تواند به مقابله با چالش‌های ناشی از شرایط آب و هوایی آینده کمک کند (Fao 2007; Babel et al., 2011; Yoshida et al., 2015; Chun et al., 2016; Guo et al., 2019a). شبیه‌سازی محصول مبتنی بر فرایند و سناریوهای تغییر اقلیم برای بررسی تأثیر آینده تغییرات اقلیمی بر عملکرد محصولات است. مدل‌های محصول می‌توانند برای توصیف پویایی رشد و نمو گیاه استفاده شوند و روشی نسبتاً ساده و مقرون‌به‌صرفه برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و سازگاری ارائه دهند. مدل‌های شبیه‌سازی محصول مبتنی بر فرایند، پویایی روزانه فرایندهای مدیریت، آب و هوا، خاک و گیاه را پارامتری می‌کنند و می‌توانند برای پیش‌بینی عملکرد برنج در آینده مورد استفاده قرار گیرند (Boonwichai et al., 2019; Halder et al., 2020; Islam et al., 2020; Truong An 2020).

سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری‌های کشاورزی (DSSAT) یکی از مدل‌های شناخته‌شده شبیه‌سازی محصول است که به طور گسترده برای شبیه‌سازی رشد محصولات مختلف، از جمله برنج، استفاده شده است. عملکرد شبیه‌سازی‌شده برنج بر اساس داده‌های اقلیمی ورودی و اطلاعات زراعی قابل‌پیش‌بینی است. مدل DSSAT می‌تواند از داده‌های اقلیمی با تفکیک مکانی شده (downscaled) شامل بارندگی روزانه و دماهای بیشینه و کمینه به‌عنوان ورودی آب‌وهوایی برای ارزیابی عملکرد محصول تحت سناریوهای اقلیمی آینده استفاده کند (Eitzinger et al., 2017). مطالعات متعددی با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی محصول به بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر محصول برنج پرداخته‌اند و گاهی راهکارهایی همچون تغییر تاریخ کشت، استفاده از ارقام مقاوم، بهینه‌سازی مصرف آب و کود را به‌عنوان روش‌های سازگاری با تغییر اقلیم مورد بررسی قرار داده‌اند (Vilavan et al., 2024). دنگ و همکاران (Dang et al., 2023) به ارزیابی تأثیر تغییرات آب‌وهوایی و شرایط کشت بر عملکرد برنج در دلتای مکنونگ ویتنام با استفاده از مدل DSSAT-CERES-Rice پرداختند. نتایج نشان داد با تغییر پارامترهای هواشناسی در آینده، عملکرد برنج تغییر خواهد کرد و دما بیشترین تأثیر را بر تولید برنج خواهد داشت. بن وپچای و همکاران (Boonwichai et al., 2017) به مطالعه اثرات تغییر آب‌وهوا بر نیاز آبیاری (IWR)، عملکرد برنج، و بهره‌وری آب محصول (CWP) برنج یاس تایلندی در حوزه رودخانه Songkhram تایلند با استفاده از نرم‌افزار DSSAT، تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 تا سال ۲۰۸۰ به ترتیب ۱۰-۱۴ درصد کاهش یابد. همچنین باتوجه به افزایش مصرف آب محصول و کاهش عملکرد برنج، بهره‌وری آبی برنج می‌تواند تا سال ۲۰۸۰ تا ۳۲ درصد تحت سناریوی RCP4.5 و ۲۹ درصد در سناریوی RCP8.5 کاهش یابد. دارمراتنا و همکاران (Dharmarathna et al., 2014) با مطالعه اثر تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد برنج فصل خشک با استفاده از نرم‌افزار DSSAT برای چهار رقم برنج در سریلانکا گزارش کردند، پیش انداختن تاریخ کاشت برنج به مدت ۱ ماه برای هر چهار رقم برنج را می‌توان به‌عنوان یک استراتژی سازگاری بدون هزینه با تغییرات آب‌وهوایی برای تولید برنج در این ناحیه باشد. داریکنده و همکاران (Darikandeh et al., 2023) به ارزیابی عملکرد برنج و استراتژی‌های سازگاری تحت تغییرات اقلیمی بر اساس مدل CSM-CERES-Rice در منطقه شمال ایران پرداختند. ارزیابی این سناریوهای سازگاری نشان داد که تغییر تاریخ نشاکاری بهترین راهبرد در بین تمامی راهکارهای سازگاری از جمله مدیریت آبیاری و کود به شمار می‌رود. اگرچه مطالعات متعددی به بررسی راهکارهای سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم پرداخته‌اند، اما هیچ‌یک میزان تاب‌آوری سامانه‌های کشت برنج را برای ارقام مختلف مورد ارزیابی قرار نداده‌اند.

سازگاری^۳ به مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی، زراعی، یا فناورانه اطلاق می‌شود که کشاورزان را قادر می‌سازد اثرات منفی اقلیم را کاهش داده یا از آن اجتناب نمایند. در مقابل، تاب‌آوری^۴ بیانگر توانایی سامانه کشت در حفظ عملکرد پایدار و بازگشت‌پذیری پس از مواجهه با تنش‌های اقلیمی است (Li et al., 2024; IPCC, 2021). این دو رویکرد مکمل یکدیگرند و ارزیابی هم‌زمان آن‌ها می‌تواند به طراحی سیاست‌های هوشمندانه و عملیاتی در مدیریت اقلیمی کشاورزی منجر شود. این در حالی است که بدون شناخت و آگاهی کافی از میزان تاب‌آوری هر رقم و سامانه کشت - آبیاری در برابر تغییرات اقلیمی نمی‌توان راهکار صحیحی برای مواجهه و سازگاری با آن پیشنهاد داد.

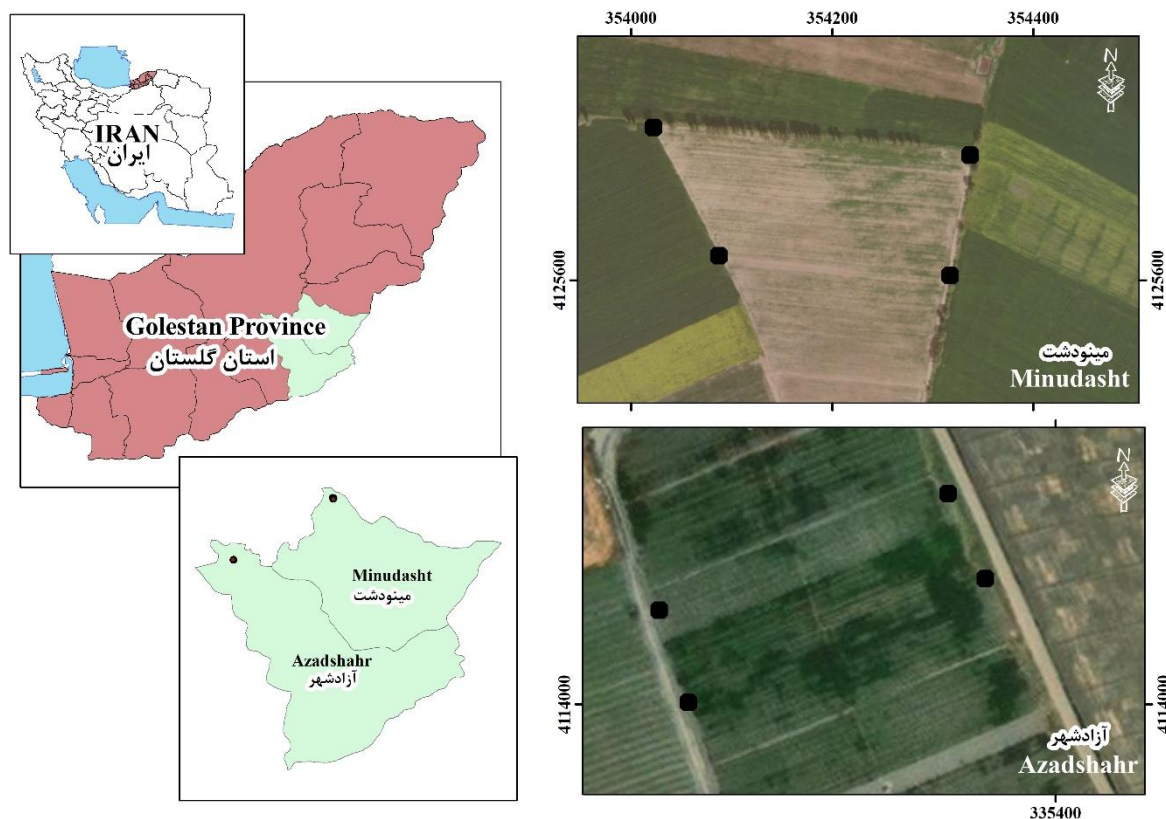
³Adaptation

⁴ Resilience

در این پژوهش به طور همزمان بر تاب‌آوری و سازگاری محصول برنج یکی از ارقام بومی و رایج ایرانی که دارای کیفیت و بازارپسندی بالایی است و معمولاً به طور سنتی در سامانه‌های نشایی - غرقابی کشت می‌شود، در برابر تغییرات اقلیمی در اقلیم مدیترانه‌ای شمال ایران، استان گلستان پرداخته شده است و در ادامه با آنالیز حساسیت عملکرد محصول به پارامترهای اقلیمی میزان تأثیرپذیری محصول برنج از هریک از پارامترهای اقلیمی مورد واکاوی قرار گرفته است.

مواد و روش:

این مطالعه در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ در استان گلستان، شهرستان‌های آزادشهر و مینودشت در دو مزرعه یک هکتاری انجام شد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مزارع را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزرعه مورد مطالعه

Fig 1. Geographical location of the studied farm

رقم مورد استفاده، در آزمایش رقم دم‌سیاه بود که یک رقم بومی برنج با کیفیت عالی محسوب می‌شود. بذر رقم طارم دم‌سیاه در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۰ در خزانه خاکی کشت گردید. ۷۰ کیلوگرم بذر پیش از کاشت، بذرها به مدت ۲۴ ساعت خیسانده و سپس با استفاده از قارچ کش ضدعفونی شدند. خزانه با کود پایه (اوره و فسفات) آماده‌سازی شد و آبیاری روزانه به صورت غرقابی سبک (۲-۳ سانتی‌متر) انجام گرفت. در طول دوره خزانه‌داری، یک نوبت کوددهی سرک با اوره در مرحله ۲-۳ برگی و دو نوبت وجین دستی برای کنترل علف‌های هرز صورت گرفت.

نشاها پس از ۴۰ روز، در مرحله ۴-۵ برگی و با ارتفاع متوسط حدود ۱۸-۲۰ سانتی‌متر آماده انتقال شدند. عملیات انتقال در تاریخ ۲۵ خرداد ۱۴۰۰ به زمین اصلی انجام شد. پیش از نشاکاری، زمین با عملیات گلخرابی آماده گردید و سپس آبیاری غرقابی با عمق حدود ۱۰ سانتی‌متر برقرار شد. تراکم نشاکاری به صورت ۲۵ × ۲۵ سانتی‌متر تنظیم گردید.

آبیاری مزرعه به صورت غرقابی انجام شد و ارتفاع آب آبیاری همواره بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر در طی دوره رشد متغیر بود. نمونه‌برداری خاک به منظور تجزیه شیمیایی و تعیین نیاز کودی پیش از عملیات زراعی و در فروردین ماه ۱۴۰۰، از عمق ۰-۳۰

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.

جزئیات کوددهی و سم‌پاشی در طول فصل رشد به شرح زیر است:

در تاریخ ۱۳ خرداد ۱۴۰۰: مصرف ۱۰۰ کیلوگرم کود سوپر فسفات تریپل به همراه ۵۰ کیلوگرم پتاس.

در تاریخ ۲۱ خرداد ۱۴۰۰: مصرف ۱۰۰ کیلوگرم اوره.

در تاریخ ۳۱ خرداد ۱۴۰۰: مصرف ۱۰۰ کیلوگرم اوره.

در تاریخ ۲۰ تیر ۱۴۰۰: مصرف قارچ‌کش تیلد به میزان ۳ لیتر در هکتار.

در تاریخ ۳۱ تیر ۱۴۰۰: مصرف ۱۰۰ کیلوگرم سولفات آمونیوم.

در تاریخ ۲۵ مرداد ۱۴۰۰: سم‌پاشی با سایپرمتترین به میزان ۱ لیتر در هکتار.

در تاریخ ۷ شهریور ۱۴۰۰: سم‌پاشی با دورسبان و سایپرمتترین هر کدام به میزان ۱ لیتر در هکتار.

در تاریخ ۱۵ شهریور ۱۴۰۰: سم‌پاشی با دورسبان (۱ لیتر) و سایپرمتترین (۲ لیتر) در هکتار.

در تاریخ ۱۹ شهریور ۱۴۰۰: مصرف گرانول دیازینون ۱۰ درصد به میزان ۲۰ لیتر در هکتار.

همچنین در طول فصل رشد، دومرتبه وجین دستی برای کنترل علف‌های هرز انجام شد

اندازه‌گیری‌های میدانی

یادداشت‌برداری‌ها و اندازه‌گیری‌های میدانی شامل ثبت تاریخ کشت، تاریخ انتقال نشاء، تاریخ‌های مربوط به کوددهی، زمان گلدهی، آغاز دانه‌بندی، رسیدگی فیزیولوژیک، و همچنین اندازه‌گیری عملکرد زیست‌توده (بر حسب مترمربع)، عملکرد دانه و عملکرد کل بود. آغاز فاز زایشی در تاریخ ۲۵ مرداد ۱۴۰۰ ثبت شد. حدود ۲۰ روز پس از آن فرایند دانه‌بندی شروع گردید و در نهایت برداشت محصول در تاریخ ۲۹ شهریور ۱۴۰۰ با استفاده از کمباین انجام شد.

در زمان رسیدن فیزیولوژیک و پیش از برداشت محصول از داخل مزارع، از هر بلوک یک نمونه 1×1 برداشت شد و پس از خشک شدن مقابل آفتاب، متغیرهای مرتبط با عملکرد دانه و زیست توده محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری آب مصرفی هر بلوک در هر آبیاری، اقدام به نصب کنتور حجمی شد. همچنین جهت کنترل شیر قطع و وصل جریان روی لوله‌های ورودی به زمین نصب شد.

مدل CERES-Rice

مدل CERES-Rice، زیر ماژولی از سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری DSSAT-CSM، یک مدل فرایندمحور 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 داده ورودی شامل پارامترهای اقلیمی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، مدیریت زراعی و صفات ژنتیکی رقم برنج، فرایندهای 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 موردنیاز برای ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد گرگان (واقع در ۲۰ کیلومتری غرب سایت مورد مطالعه) از سازمان هواشناسی استان گلستان دریافت شد. این داده‌ها از طریق نرم‌افزار رابط آب‌وهوایی به نام Weatherman که داده‌های هواشناسی را به فرمت قابل‌استفاده 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 موردنیاز مدل بر اساس آزمایش‌های خاک مزارع به مدل معرفی گردید. جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. اطلاعات خاک‌شناسی مزارع مورد مطالعه

Table 1- Soil information of the studied farms

Texture	Sand	Silt	Clay	K (avg)	P (avg)	Total N	OC	TNV	pH	EC	Depth	Treat
بافت	شن	سیلت	رس	متوسط پتاسیم	متوسط فسفر	کل نیتروژن	آلی	کدورت	اسیدیته	شوری	عمق	تیمار
-	%	%	%	mg/kg	mg/kg	%	%	-	-	ds/m	cm	
C - L	35	37	28	850	102	0.22	2.36	2.4	7.4	2.7	0-30	Azadshahr
Si - L	10	64	26	220	4	0.11	1.05	11.5	7.6	1.1	30-60	Minudasht

این پژوهش به صورت آزمایش مزرعه‌ای تکرار شده (غیر مقایسه‌ای) در مزارع تحقیقاتی آزادشهر و مینودشت انجام شد. در این مطالعه فقط رقم طارم تحت یک سطح مدیریت زراعی کشت گردید و در سه تکرار مستقل اجرا شد. داده‌های حاصل از میانگین سه تکرار برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل CERES-Rice مورد استفاده قرار گرفتند. برای واسنجی مدل CERES-Rice از داده‌های آزمایش مزرعه‌ای شهرستان آزادشهر (سال ۱۴۰۰) استفاده شد. به منظور ارزیابی قابلیت تعمیم مدل، صحت‌سنجی با داده‌های مستقل حاصل از شهرستان مینودشت که از نظر شرایط اقلیمی و مدیریتی مشابه ولی از نظر موقعیت مکانی متفاوت است، انجام گردید.

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 مزرعه آزادشهر واسنجی گردید. این داده‌ها شامل تاریخ گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک، ارتفاع بوته، سطح برگ، زیست توده 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 داده‌های فنولوژیک واسنجی می‌گردند. انتخاب ضرایب بر اساس کمینه‌سازی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE⁵) و بیشینه‌سازی شاخص ویلموت (d) 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 شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی به کمتر از ۵ درصد کاهش یابد (Adnan et al., 2019; Ramazani Vasouklai et al., 2021). تخمین ضرایب ژنتیکی با استفاده از داده‌های مزرعه آزادشهر انجام گرفت. سپس مدل برای تیمار مینودشت صحت‌سنجی شد.

برای اعتبارسنجی مدل DSSAT از آماره‌های ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص توافق (d) استفاده شد. RMSE تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده یک پارامتر را اندازه‌گیری می‌کند (رابطه ۱) (Seifzadeh Momensaraei & Sabziparvar, 2022).

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

⁵ Root Mean Square

که در آن S_i عملکرد برنج شبیه‌سازی شده (کیلوگرم در هکتار)، O_i عملکرد برنج مشاهده شده (کیلوگرم در هکتار)، و n تعداد داده‌های مشاهداتی است. همچنین آماره جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بر اساس رابطه‌ی (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 پیش‌بینی مدل است که از صفر تا یک متغیر است (رابطه ۳). این شاخص نشان‌دهنده نسبت میانگین مربعات خطا و خطای بالقوه است. مقدار ۱ نشان‌دهنده توافق کامل است، درحالی‌که مقدار صفر نشان‌دهنده عدم توافق است. باتوجه‌به مجذور تفاوت‌ها، شاخص توافق نسبت به مقادیر شدید در میانگین‌ها و واریانس‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی 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 برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آبی باتوجه‌به شرایط کنونی و پیشرو تغییرات اقلیمی، خروجی مدل‌های گردش عمومی جوی - اقیانوسی ($GCMs^6$) در قالب داده‌های CMIP در اختیار کاربران قرار گرفته است. این داده‌ها در قالب نسخه‌های مختلف منتشر می‌شوند و شامل داده‌های تاریخی از سال ۱۸۵۰ و داده‌های پیش‌بینی تا سال ۲۱۰۰ هستند. آخرین نسخه داده‌های CMIP در قالب گزارش ششم CMIP6 منتشر شده است که شامل خروجی داده‌های مختلف جوی - اقیانوسی است. یکی از تفاوت‌های مهم مدل‌های سری CMIP6 با دیگر پایگاه‌های داده، استفاده از سناریوهای SSP به جای RCP می‌باشد. این سناریوها در ۵ قالب قرار می‌گیرند. سناریوهای SSP1، سناریوهای خوش‌بینانه پایداری هستند که خط سیری سبز را نشان می‌دهند (چالش‌های کم برای راهبردهای کاهش و سازگاری)، سناریوهای SSP2، سناریوهای معتدل و میانه رویی هستند (چالش برای راهبردهای کاهش سازگاری)، سناریوهای SSP3، رقابت‌های منطقه‌ای و چالش‌های بزرگ پیشروی راهبردهای کاهش و سازگاری را نشان می‌دهند، سناریوهای SSP4 بر نابرابری‌ها و نقش آن در ایجاد چالش‌های بسیار در راه سازگاری با شرایط تغییر اقلیم تأکید دارند و سناریوهای SSP5 یا بدبینانه‌ترین سناریوها با فرض توسعه سوخت‌های فسیلی و استفاده از بزرگراه‌ها چالش‌های بزرگ در برابر راهبردهای کاهش و تعدیل در نظر می‌گیرند (Hamidianpour and Shoja, 2022). در این مطالعه از سه سناریوی SSP126 (گرمایش کمتر از ۲ درجه سلسیوس نسبت به متوسط (۱۸۵۰-۱۹۰۰) و انتشارات صفر خالص در نیمه دوم قرن، به‌عنوان یک سناریوی خوش‌بینانه)، SSP245 (انتشار گازها تا ۲۰۳۰ تغییر قابل‌توجهی نخواهد داشت و گرمایش حدود ۲/۷ درجه سلسیوس در پایان قرن بیست و یکم نسبت به سال‌های ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰، به‌عنوان یک سناریوی میانه گرا)، SSP585 (یک سناریوی بدبینانه با بالاترین سطوح انتشار که بر مبنای توسعه اجتماعی و اقتصادی با سوخت‌های فسیلی است) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مدل HadGEM3-GC31-LL نسل سوم از مدل‌های آب‌وهوایی Had GEM می‌باشد. در مجموعه مدل‌های گردش عمومی جو - اقیانوس از سری ششم گزارش تغییر اقلیم در چهارچوب پروژه IPCC توسعه پیدا کرده و ارائه شده است. یکی از مزیت‌های اصلی این مدل نسبت به نسخه‌های قبلی خود لحاظ‌کردن چهارچوب مدل‌سازی 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 بد بینانه، 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.

⁶ Global Circulation Models

شبیه‌سازی برای دوره پیشرو (۲۰۳۰-۲۰۹۰)

داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و ساعت آفتابی روزانه برای بازه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ برای ایستگاه سینوپتیک مینودشت، از سازمان هواشناسی استان گلستان دریافت و به‌عنوان دوره پایه به نرم‌افزار 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 نرم‌افزار DSSAT، مقدار تبخیر - تعرق مرجع، به دلیل محدود بودن داده‌های ورودی به دما و تابش با استفاده از روش پریستلی تیلور^۷، توسط افزونه Weatherman محاسبه گردید. سپس عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت شرایط تغییر آب‌وهوا برای سناریوهای مختلف انتشار با استفاده از مدل CERES-Rice شبیه‌سازی شد. داده‌های آب‌وهوا و غلظت CO₂ به‌منظور شبیه‌سازی شرایط آب‌وهوایی آینده در سه سناریوی مختلف اقلیمی (SSP126، SSP245 و SSP585) پیش‌نمایی شده بودند، درحالی‌که سایر پارامترهای ورودی خاک، محصول و شیوه‌های مدیریتی (شامل آبیاری، کود، تراکم بذر، عمق کاشت و غیره) بدون تغییر در طول زمان نگه داشته شدند. اثرات تغییر اقلیم به‌صورت مقایسه عملکرد دانه و زیست‌توده در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و پیشرو (۲۰۳۰-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۰، ۲۰۷۱-۲۰۹۰) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی ارزیابی شدند.

تحلیل حساسیت عملکرد دانه و زیست‌توده نسبت به پارامترهای اقلیمی

به‌منظور 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 دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) برای چهار پارامتر دمای بیشینه (T_{max})، دمای کمینه (T_{min})، بارندگی (P) و تبخیر - تعرق مرجع (ET₀) 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 مرحله بعد، درصد تغییرات داده‌های سالانه عملکرد دانه و زیست‌توده شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل CERES-Rice نیز نسبت به مقدار پایه (میانگین ۱۹۹۰-۲۰۲۰) محاسبه شده و به‌صورت $\Delta Y/Y_{base}$ و $\Delta B/B_{base}$ به دست آمد. این مقادیر به تفکیک سه سناریوی اقلیمی (SSP126، SSP245 و SSP585)، با روش طبقه‌بندی پیوسته تحلیل شدند؛ به‌طوری‌که برای هر پارامتر اقلیمی، بازه‌هایی تعریف گردید (مثلاً برای تغییرات بارش به‌صورت طبقات ۵۰-۵۰، ۵۰-۱۵۰، ۱۵۰-۵۰۰ میلی‌متر). سپس میانگین و انحراف معیار برای هر طبقه به تفکیک به‌دست‌آمده و برای هر تیمار به طور جداگانه ارائه شد.

تاب‌آوری

به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری سامانه کشت برنج تحت سناریوهای تغییر اقلیم، از دو شاخص اصلی استفاده شد. شاخص اول، نسبت میانگین عملکرد یا سود خالص در دوره آینده (۲۰۳۱-۲۰۹۰) به مقدار متناظر در سال پایه (سال زراعی ۱۴۰۰) بود. این شاخص به‌عنوان «تاب‌آوری فیزیکی» تعریف شد و بیانگر توان نسبی حفظ بهره‌وری سیستم در مواجهه با تغییرات بلندمدت اقلیم هستند. ساختار این شاخص مطابق رابطه‌ی (۴) است:

$$\text{تاب‌آوری فیزیکی} = \frac{\bar{Y}(2031-2090)}{Y_{base}} \quad (۴)$$

که در آن Y عملکرد دانه (kg/ha) این رویکرد مشابه تعریف "نسبت پایداری عملکرد" یا "شاخص مقاومت نسبی بهره‌وری" است که در ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی تحت تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mishra & Eeswaran et al., 2021). (et al., 2025)

علاوه بر این شاخص‌های نسبی، برای بررسی نوسانات عملکرد در طول دوره، از ضریب پایداری عملکرد نیز استفاده شد که به‌صورت میانگین عملکرد در دوره آتی با انحراف معیار عملکرد یا سود کم طی بازه مورد بررسی تعریف می‌شود. این شاخص

⁷ Priestley Taylor method

ساختاری ساده و درعین حال گویای ثبات سیستم در برابر تنش‌های اقلیمی دارد. مقدار بیشتر این شاخص بیانگر پایداری بیشتر عملکرد سیستم در برابر نوسانات بین سالی اقلیمی است (Urruty et al., 2016). در این پژوهش از نسبت میانگین به انحراف معیار به عنوان شاخص تاب‌آوری (RI) استفاده شده است.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل

مدل CERES-Rice مبتنی بر شبیه‌سازی دقیق مراحل فنولوژیک، توسعه زیست‌توده، و تخصیص مواد فتوسنتزی به اندام‌های گیاه است و تعامل دقیق‌تری با متغیرهای اقلیمی، خاک، و مدیریت زراعی دارد (جونز و همکاران، ۲۰۰۳). مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده تاریخ‌های فنولوژیک شامل (گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیکی)، حداکثر شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در فرایندهای واسنجی (داده‌های مربوط به مزرعه آزادشهر) به همراه آماره‌های ارزیابی مدل در جدول (۲) ارائه شد.

جدول ۲. عوامل گیاهی مورد استفاده برای واسنجی
Table 2. Plant factors used for calibration

LAI ⁸ شاخص سطح برگ ماکزیمم	Biomass عملکرد بیولوژیک	Grain yield عملکرد دانه	Maturity date تاریخ رسیدگی	Anthesis date تاریخ گلدهی	Stage مرحله
-	Kg/ha	Kg/ha	Day of the Year	Day of Year	
2.339	9162.7	4750	263	228	Calibration واسنجی
1.629	8122	3700	242	205	Validation صحت سنجی

پس از وارد کردن پارامترهای گیاهی، ضرایب ژنتیکی رقم با استفاده از ابزار GenCalc به صورت گام‌به‌گام محاسبه شدند. نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. ضرایب ژنتیکی گیاه با استفاده در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج واسنجی مدل CERES-Rice برای رقم طارم نشان داد که ضرایب ژنتیکی به دست آمده از نظر دامنه و رفتار فیزیولوژیک در محدوده قابل قبول و منطبق با واقعیت‌های رشد این رقم در شرایط اقلیمی شمال ایران قرار دارند. مقدار پارامترهای فنولوژیکی شامل $P1 = 334.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ ، $P5 = 417.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ و $P2O = 12.55 \text{ hr}$ بیانگر طول دوره رشد متوسط و حساسیت نسبتاً بالا به فتوپریود است که ویژگی ارقام محلی طارم محسوب می‌شود. مقدار $\text{PHINT} = 83^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ نیز با فواصل ظهور برگ‌ها در شرایط خزری مطابقت دارد. ضرایب عملکردی ($G1 = 75.75$ ، $G2 = 0.028$ ، $G3 = 0.9$) مقادیر منطقی و سازگار با مقادیر گزارش شده برای ارقام برنج ایرانی در مطالعات پیشین هستند و نشان‌دهنده ظرفیت بالقوه تولید نسبتاً بالا در شرایط بهینه می‌باشند. مقایسه ضرایب حاضر با پژوهش (Sadeghi et al. (2023 در مدل APSIM-Oryza برای رقم هاشمی نشان می‌دهد که رقم طارم دارای دوره رشد کوتاه‌تر و حساسیت فتوپریودی بالاتری است؛ ویژگی‌ای که انتظار می‌رود در ارقام بومی زودرس‌تر مشاهده شود. از سوی دیگر، مقایسه با مطالعه (Koolaeian et al. (2022 که مدل AquaCrop را برای ارقام طارم و شیروودی به کار برده است، تطابق بالایی بین مجموع حرارت مؤثر تا گل‌دهی و رسیدگی (حدود ۷۰۰ تا ۱۱۵۰ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$) با مقادیر حاصل از این پژوهش مشاهده می‌شود. همچنین ضرایب عملکردی $G1$ و $G2$ در محدوده مقادیر گزارش شده برای طارم در آن تحقیق قرار دارند.

فتحی و همکاران (۲۰۱۸) (Fathi et al.) گزارش کردند که برای رقم محلی طارم، محدوده دمایی ۲۴ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد به عنوان بازه بهینه برای گرده‌افشانی در نظر گرفته می‌شود و افزایش دما به بیش از این محدوده موجب کاهش معنی‌دار در عملکرد شلتوک و کیفیت دانه می‌گردد. همچنین نتایج مطالعه آنان نشان داد که به ازای افزایش هر یک درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای مرحله پر شدن دانه، راندمان تبدیل برنج سفید کاهش یافته و میزان ضایعات افزایش می‌یابد. باتوجه به اینکه

⁸ Leaf Area Index

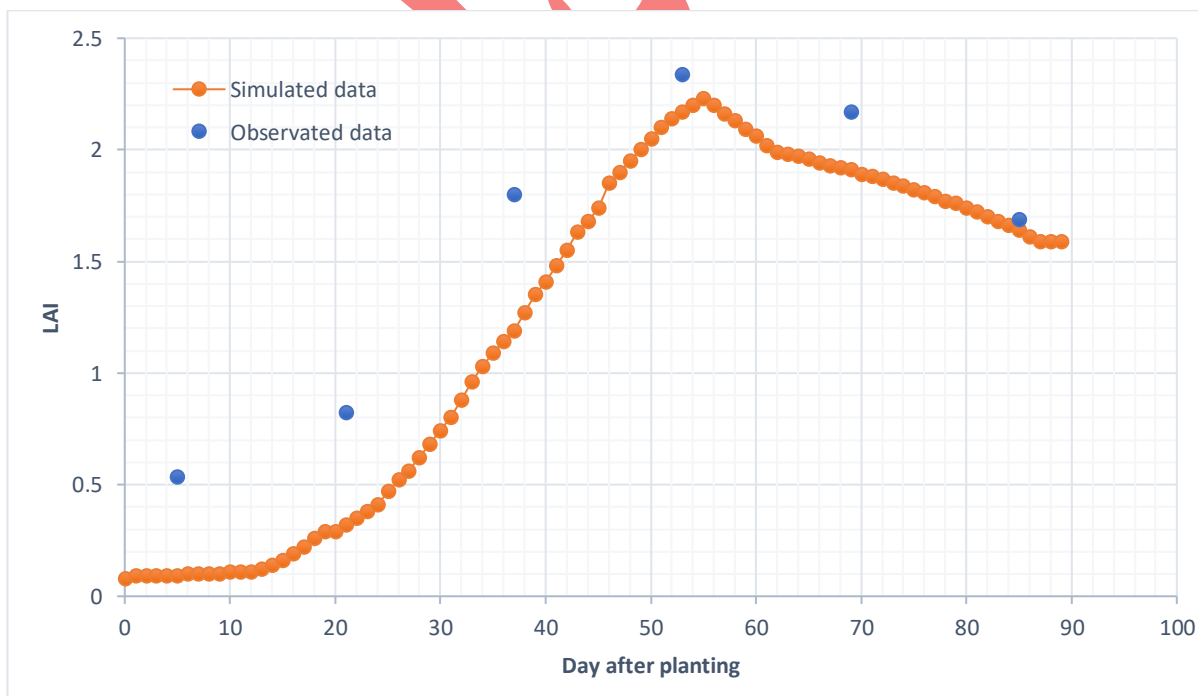
تابستان‌های منطقه مینودشت معمولاً دماهای روزانه‌ای در حدود یا بالاتر از 30°C را تجربه می‌کنند، تعیین آستانه حرارتی $\text{THOT} = 30^{\circ}\text{C}$ برای رقم طارم در مدل CSM-CERES-Rice انتخابی منطقی و مبتنی بر شواهد است که به مدل اجازه می‌دهد استرس حرارتی را در دمایی شبیه به آستانه واقعی وقوع اثرات فیزیولوژیک در گیاه، به‌درستی شبیه‌سازی کند. در مجموع، هم‌خوانی ضرایب به‌دست‌آمده با نتایج مطالعات یادشده، دقت واسنجی انجام‌شده را تأیید کرده و نشان می‌دهد که مدل CERES-Rice با پارامترهای حاضر قادر است رشد و عملکرد رقم طارم را در شرایط اقلیم خزری بادقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کند.

جدول ۳. مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل CERES-RICE

Table 3. Values of calibrated coefficients of the CERES-RICE model

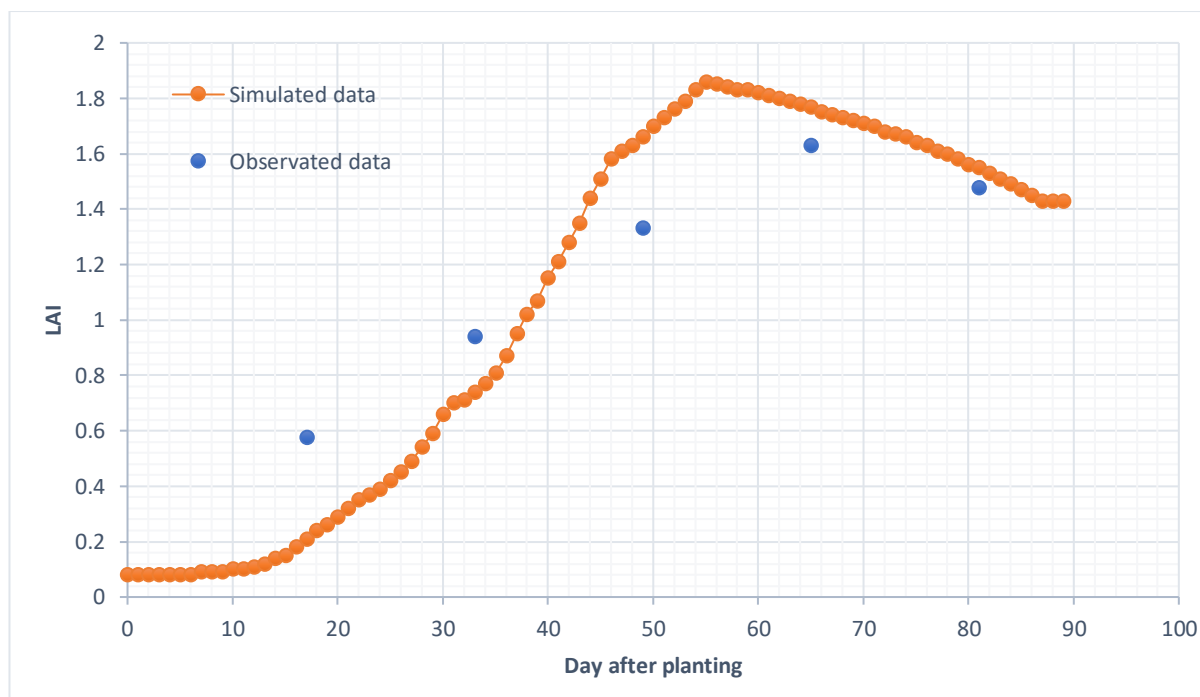
TCLDF	TCLDP	THOT	PHINT	G3	G2	G1	P2O	P5	P2R	P1	Parameters
15	15	30	83	0.9	0.028	75.75	12.55	417.6	69.6	334.5	Predicted

شکل‌های (۲) و (۳) به‌ترتیب نتایج واسنجی و صحت‌سنجی شاخص سطح برگ (LAI) در طول دوره رشد برنج را در مدل CERES-Rice نشان می‌دهند. بر اساس آماره‌های ارزیابی خطا (جدول ۴)، همبستگی بالایی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده مشاهده شد. همچنین، شاخص تطابق ویلمات (d-index) در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بیش از 0.9 بوده که نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل است. مقدار شاخص خطای نرمال‌شده (NRMSE) در هر دو مرحله بین 20 تا 30 درصد قرار گرفت که بیانگر دقت متوسط و قابل قبول مدل در بازسازی تغییرات LAI طی دوره رشد گیاه است. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد مدل CERES-Rice در شبیه‌سازی روند گسترش سطح برگ و رشد رویشی برنج از دقت مناسبی برخوردار است. در مطالعه مشابه، ژائو و همکاران (Gao et al., 2023) نیز مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای LAI را در تیمارهای مختلف آبیاری مقایسه کردند و گزارش نمودند که مدل CERES-Rice توانست تغییرات دینامیک سطح برگ را با دقت بسیار بالا بازسازی کند ($\text{NRMSE} = 9.69\%$ و $d = 0.98$) این انطباق تقریباً کامل بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در توصیف رشد رویشی و گسترش سطح فتوسنتزی گیاه است.



شکل ۲. واسنجی مقادیر تاج پوشش گیاهی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد برنج

Fig 2. Calibration of the observed and simulated canopy cover values during the rice growth period



شکل ۳. صحت سنجی مقادیر تاج پوشش گیاهی مشاهداتی و شبیه سازی شده در طول دوره رشد برنج
Fig 3. Validation of observed and simulated canopy cover values during the rice growth period

جدول ۴. عوامل ارزیابی خطا در شبیه سازی تاج پوشش تحت تیمارهای مختلف در مدل CERES-RICE
Table 4. Evaluation factors of error in canopy simulation under different treatments in the CERES-RICE model

d	NRSME	RMSE	R ²	Treatment
شاخص توافق	ریشه مربعات خطای نرمال شده	ریشه مربعات خطا	ضریب تبیین	تیمار
0.931	25.06	0.391	0.952	Calibration واسنجی
0.937	20.76	0.247	0.955	Validation صحت سنجی

ارزیابی آماره خطای مدل نشان داد که مقدار NRMSE برای پارامترهای روز گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک، زیست توده، عملکرد دانه و شاخص سطح برگ ماکزیمم در مرحله واسنجی کمتر از ۱۰ درصد بوده و در سطح عالی ارزیابی می شود؛ درحالی که در مرحله صحت سنجی مقدار آن کمتر از ۲۰ درصد بود که نشان دهنده دقت خوب تا بسیار خوب مدل در بازتولید داده های مزرعه ای است. همچنین، بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی در هر دو مرحله همبستگی بالایی مشاهده شد و شاخص تطابق ویلموت (d-index) در تمام پارامترها بالاتر از ۰/۹ بود که بیانگر برازش مطلوب مدل است (جداول ۵ تا ۷). نتایج به دست آمده با دیگر یافته های پژوهشگران همخوانی دارد (Hussain et al., 2023; Eghbali, Shahabad et al., 2025; Gao et al., 2023; Alejo et al., 2021). به طوری که در این مطالعات نیز مدل CERES-Rice توانسته است مراحل فنولوژیکی، زیست توده و عملکرد دانه را با دقت بالا شبیه سازی کند و مقادیر شاخص های آماری مانند NRMSE کمتر از ۱۰ تا ۱۵ درصد و d-index بالاتر از ۰/۹ گزارش شده است. این همسویی نتایج نشان می دهد که مدل CERES-Rice در شرایط اقلیمی و مدیریتی متنوع، از قابلیت اعتماد بالایی برای شبیه سازی رشد و عملکرد گیاه برخوردار است.

جدول ۵. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای روزهای فنولوژیک گیاه مدل CERES-RICE

Table 5. Measured and simulated values for plant phenological days of the CERES-RICE model

Maturity date تاریخ رسیدگی			Anthesis date تاریخ گلدهی			Treatment تیمار
Error (%) خطا	Simulation شبیه‌سازی	Observation اندازه‌گیری	Error (%) خطا	Simulation شبیه‌سازی	Observation اندازه‌گیری	
7.00	89	97	6.0	56	62	Calibration واسنجی
-1.00	89	88	-5.0	56	51	Validation صحت سنجی

جدول ۶. مقادیر زیست‌توده و عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مدل CERES-RICE

Table 6. Measured and simulated biomass and yield values of CERES-RICE model

Grain yield عملکرد دانه			Biomass عملکرد بیولوژیک			Treatment تیمار
Error (%) خطا	Simulation شبیه‌سازی	Observation اندازه‌گیری	Error (%) خطا	Simulation شبیه‌سازی	Observation اندازه‌گیری	
417	4333	4750	-912	10074	9162	Calibration واسنجی
450	3250	3700	-1152	9274	8122	Validation صحت سنجی

جدول ۷. کارایی مدل CERES-RICE

Table 7. Performance of CERES-RICE model

d شاخص توافق	NRSME ریشه مربعات خطای نرمال شده	RMSE ریشه مربعات خطا	R ² ضریب تبیین	Parameter عامل	Treatment تیمار
0.98	9.68	6.00	0.97	Anthesis date	Calibration واسنجی
0.99	9.95	912.0	0.99	Grain yield	
0.96	8.78	417.0	0.98	Biomass	
0.97	4.66	0.11	0.99	LAI max	
0.98	8.25	8.00	0.98	Maturity date	
0.967	9.80	5.00	0.96	Anthesis date	Validation صحت سنجی
0.97	11.97	443.00	0.99	Grain yield	
0.95	14.18	1152	0.97	Biomass	
0.93	14.17	0.23	0.99	LAI max	
0.99	1.14	1.00	0.99	Maturity date	

پس از اطمینان از توانایی مدل CERES-Rice در شبیه‌سازی پارامترهای فنولوژیکی و عملکرد برنج، لازم بود شرایط اقلیمی منطقه برای دوره‌های آینده به صورت مناسب شبیه‌سازی شود. بدین منظور، از مدل اقلیمی انتخابی و نرم‌افزار LARS-WG برای تولید داده‌های اقلیمی آینده بر اساس داده‌های مشاهده‌ای دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) استفاده گردید. ابتدا کارایی مدل LARS-WG و مدل اقلیمی منتخب در بازتولید داده‌های اقلیمی گذشته ارزیابی شد تا از دقت آن‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای دما، بارش و تابش اطمینان حاصل شود. سپس داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده برای دوره‌های آتی به مدل CERES-Rice وارد گردید و تأثیر تغییرات اقلیم بر رشد و عملکرد برنج در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

کارایی مدل لارس

نسخه هشتم مدل LARS-WG شامل شش مدل اقلیمی منتخب بود که برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی آینده مورد بررسی قرار گرفتند. ارزیابی آماره‌های عملکرد از جمله میانگین خطا، انحراف معیار و ضریب همبستگی نشان داد که مدل HadGEM3

بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی دوره پایه داشته است. براین اساس، مدل HadGEM3 به عنوان مناسب‌ترین مدل اقلیمی برای تولید داده‌های ورودی آینده در مدل CERES-Rice انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت.

مدل LARS-WG توانایی مناسبی در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره پایه نشان داد؛ به طوری که نتایج آزمون‌های t-Student و F اختلاف معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نشان ندادند. جدول (۸) مقادیر P-value مربوط به آزمون t را برای متغیرهای اقلیمی مختلف ارائه می‌دهد.

مطالعات پیشین در شمال ایران نشان داده‌اند که مدل LARS-WG قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی روزانه دارد (Helmi et al., ۲۰۲۴) و از سوی دیگر، ارزیابی‌های اخیر نشان داده‌اند که مدل HadGEM3-GC31-LL در تخمین بارش تاریخی منطقه شمال ایران نسبت به سایر مدل‌های CMIP6 برتری دارد (Zareian et al., 2024).

جدول ۸. ارزیابی LARS-WG
Table 8. LARS-WG evaluation

Parameter	p-value										
	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb
Rain	0.9	0.12	0.82	0.23	0.9	0.94	0.8	0.87	0.61	0.12	0.53
Tmin	0.61	0.96	0.35	0.74	0.03	0.53	0.19	0.78	0.14	0.91	0.83
Tmax	0.77	0.07	0.2	0.44	0.36	0.72	0.35	0.95	0.04	0.84	0.57
Radiation	0.91	0.01	0.6	0.85	0.24	0.61	0.44	0.72	0.82	0.93	0.11

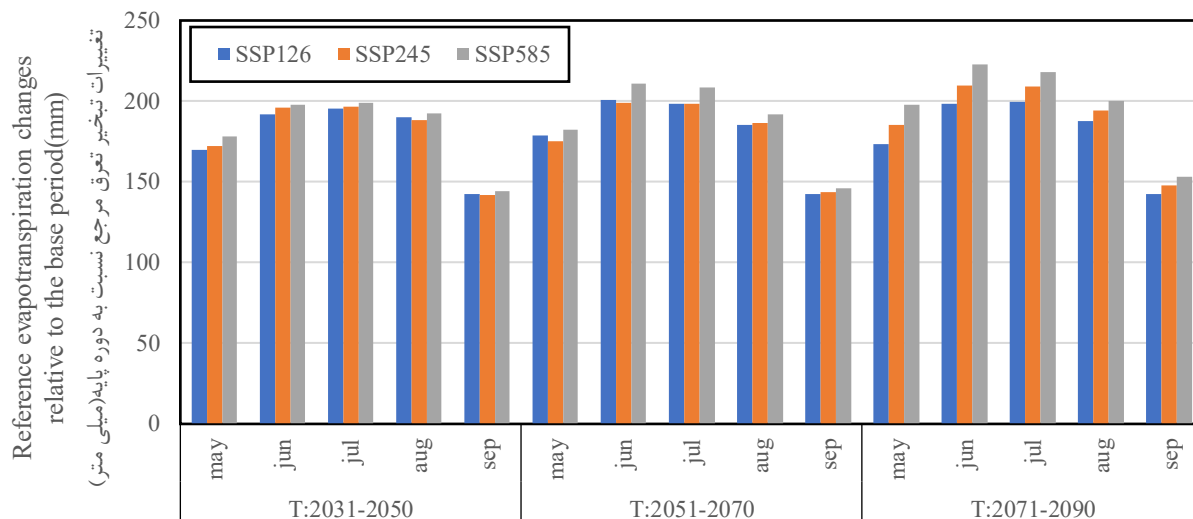
نتایج مدل‌سازی برای دوره‌های پایه و آتی با استفاده از مدل HadGem3 برای هر سه ایستگاه در جدول (۹) ارائه شده است. همچنین میزان تغییرات شرایط را نسبت به شرایط پایه نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان می‌دهد که دما (هم حداقل دما و هم حداکثر) در آینده، افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار بارش و تبخیر تعرق در سناریوهای مختلف نسبت به حالت پایه افزایش خواهد یافت. همچنین تفاضل دمای حداکثر و حداقل به صورت افزایشی ارزیابی شد.

نتایج نشان می‌دهد ایستگاه مینودشت تغییرات اقلیمی جدی را در دوره آینده تجربه خواهد کرد. به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5 و در بازه ۲۰۷۱-۲۰۹۰، دمای حداکثر و حداقل به ترتیب بیش از ۵/۹ و ۶/۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به پایه افزایش می‌یابد، و تبخیر تعرق مرجع تا ۱/۱۵ برابر می‌کند.

جدول ۹. نتایج مدل‌سازی برای دوره‌های پایه و آتی در ایستگاه‌های مطالعاتی (دوره رشد محصول ۱۰ اردیبهشت تا ۱۰ مهر)
Table 4. Modeling results for the base and the future periods at the studied stations (crop growth period from May to October)

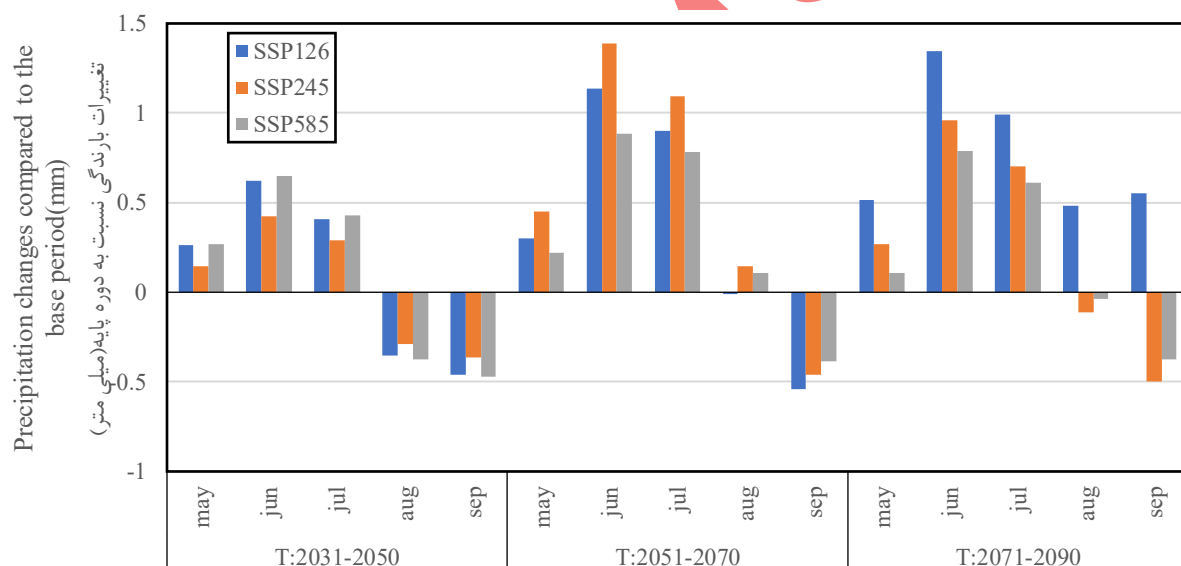
Scenario	Time	CO ₂ (ppm)	R/R _{hist}	Tmin-Tmin _{hist}	Tmax-Tmax _{hist}	ET ₀ /ET ₀ _{hist}
Base	1990-2020	389.01	103.78	19.66	32.71	862.4
	2031-2050	455.7	1.08	1.4	1.7	0.99
	2051-2070	427	1.36	2.0	2.3	1.05
SSP1-2.6	2071-2090	465.7	1.79	2.3	2.3	1.04
	1990-2020	475.3	1.06	1.6	1.8	1.04
	2031-2050	536	1.53	2.7	2.7	1.05
SSP2-4.5	2051-2070	582.3	1.27	3.5	4.0	1.1
	1990-2020	505	1.11	2.2	2.6	1.06
	2031-2050	650	1.33	3.7	4.0	1.09
SSP4-8.5	2051-2070	868.7	1.22	5.9	6.4	1.15

تغییرات تبخیر تعرق مرجع در سناریوهای مختلف (SSP5.85, SSP2.45, SSP1.26) در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) برای نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در بازه ۲۰۳۱-۲۰۹۰ روند تغییرات بارش و تبخیر تعرق مرجع صعودی است و هرچه به انتهای بازه زمانی نزدیکتر می‌شویم، مقدار آن بیشتر می‌شود. که این موضوع تأکیدی بر تشدید وقایع حدی می‌باشد. به این ترتیب که بارش‌ها شدیدتر و خشکی‌ها نیز شدیدتر خواهند بود.



شکل ۴. تغییرات تبخیر تعرق مرجع در سناریوهای مختلف اقلیمی

Fig 4. Changes in reference transpiration rate in different climate scenarios



شکل ۵. تغییرات بارندگی نسبت به دوره پایه در سناریوهای مختلف اقلیمی

Fig 5. Precipitation changes compared to the base period in different climate scenarios

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در ایستگاه مینودشت، هر دو متغیر دمای حداقل و حداکثر روندی افزایشی دارند و به‌ویژه در سناریوهای شدیدتر (به‌ویژه SSP5-8.5) افزایش چشمگیری را تجربه خواهند کرد. هم‌زمان، بارش سالانه نیز در بیشتر ماه‌های سال روندی افزایشی نشان داد، درحالی‌که تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) در کلیه سناریوها با آهنگی صعودی پیش‌بینی شد. این افزایش ET₀ عمدتاً ناشی از افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی است که منجر به تشدید کسری فشار بخار و در نتیجه افزایش نیاز آبی گیاهان می‌شود. یافته‌های حاضر با نتایج زرین و همکاران (Zareian et al., 2024) در حوضه سفیدرود (شمال ایران) هم‌خوانی نسبی دارد؛ آن پژوهش نیز افزایش میانگین سالانه دمای بیشینه بین ۰/۹ تا ۲/۸ درجه سانتی‌گراد و تغییر بارش بین ۶/۸- تا ۱۷/۷ میلی‌متر را تحت سناریوهای مختلف انتشار گزارش کرده است. همچنین صادقی‌نیا و همکاران (SadeghiNia et al., 2022) در بررسی شواهد تغییر اقلیم در حوضه دریای خزر، افزایش سالانه ۵/۱ و ۳/۱ برای دمای حداکثر و حداقل و کاهش بارش سالانه را نشان داد. بر خلاف مطالعات جهانی که افزایش بارندگی را نشان می‌دهند این حوزه روند کاهشی داشت؛

اما افزایش دما مطابق با افزایش دمای جهانی بود. قاری و قانقرمه (Gary and Qanqarmeh, 2022) با بررسی سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 افزایش دمای حداقل و حداکثر را برای بازه (۲۰۴۱-۲۰۶۰) پیش‌نمایی نمودند. آنها نرخ و تغییرات روزهای بارشی را بی‌نظم‌تر از دوره پایه گزارش کردند، به‌نحوی که تعداد روزهای بارانی کاهش و نرخ بارندگی افزایش خواهد یافت.

تاب‌آوری فیزیکی

نتایج شبیه‌سازی با مدل CERES-Rice برای دوره‌ی آتی (۲۰۳۱-۲۰۹۰) نشان داد که عملکرد دانه برنج در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم با کاهش قابل‌توجهی مواجه خواهد بود. شدت این کاهش در سناریوهای میانه و شدید (SSP245 و SSP585) بیشتر بوده و بیانگر تأثیر منفی گرمایش اقلیمی بر فرایندهای فیزیولوژیکی حساس گیاه است. در این مطالعه، شاخص تاب‌آوری به‌صورت نسبت میانگین عملکرد در بازه‌ی آتی به میانگین عملکرد در دوره‌ی پایه تعریف شد. نتایج نشان داد که مقدار این شاخص در سناریوی خوش‌بینانه SSP126 نسبتاً بالا (۱/۲۸) در مینودشت و ۱/۰۵ در آزادشهر) بوده و بیانگر توان نسبی سیستم تولید برای حفظ عملکرد در شرایط اقلیمی ملایم‌تر است. اما در سناریوهای SSP245 و SSP585، این شاخص به ترتیب به حدود ۱/۱ و ۰/۷۷ در مینودشت و ۰/۸۹ و ۰/۵۹ در آزادشهر کاهش یافت. این روند حاکی از افت تدریجی توان سیستم تولید در حفظ سطح عملکرد پایه تحت گرمایش است. از سوی دیگر، شاخص RI که نسبت میانگین عملکرد به انحراف معیار عملکرد در دوره‌ی آتی است، روندی کاهشی نشان داد و از حدود ۶/۵۷ و ۵/۷۳ در SSP126 به مقادیر ۲/۰۷ و ۱/۶۶ در SSP585 رسید. این کاهش بیانگر افزایش نوسانات عملکرد و کاهش پایداری تولید در مواجهه با شرایط متغیر اقلیمی است.

جدول ۱۰. ارزیابی تغییرات عملکرد دانه و تاب‌آوری آن تحت تغییرات اقلیمی

Table 10. Assessment of grain yield changes and its resilience under climate change				
Percentage of changes	Minudasht	Percentage of changes	Azadshahr	Time
درصد تغییرات	مینودشت	درصد تغییرات	آزادشهر	زمان
	Kg/ha		Kg/ha	
	4360.43		4668.33	Hist: 1990-2020
18.66	5174.20	17.12	5467.55	SSP126: 2031-2050
7.64	4693.60	5.31	4916.30	SSP126: 2051-2071
0.37	4376.60	-0.84	4629.25	SSP126: 2071-2091
	1.28		1.05	Resilience
	6.57		5.73	RI
12.65	4912.15	13.60	5303.40	SSP245: 2031-2050
-1.82	4281.05	-4.46	4460.35	SSP245: 2051-2071
-30.31	3038.95	-36.06	2985.05	SSP245: 2071-2091
	1.1		0.89	Resilience
	4.06		3.38	RI
-1.34	4302.15	-3.14	4521.90	SSP585: 2031-2050
-30.71	3021.55	-36.77	2951.75	SSP585: 2051-2071
-70.84	1271.35	-80.78	897.25	SSP585: 2071-2091
	0.77		0.59	Resilience
	2.07		1.66	RI

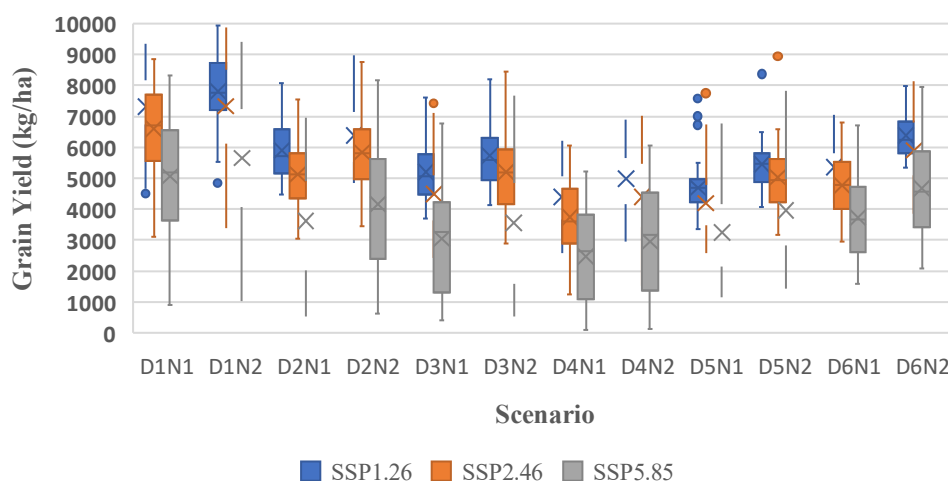
علت اصلی افت عملکرد در سناریوهای گرم‌تر، افزایش وقوع دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در مرحله‌ی گرده‌افشانی است. این پدیده موجب کاهش زنده‌مانی دانه‌های گرده و اختلال در تشکیل دانه‌های پر می‌شود که نهایتاً عملکرد را کاهش می‌دهد. ربانی و همکاران (Rabbani et al., 2015) با بررسی شرایط تغییر اقلیم در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از مدل اقلیمی ECHAM5 گزارش کردند حداقل و حداکثر دما در ایستگاه رشت صعودی و بارندگی‌ها کاهشی خواهد بود. همچنین آنها با مدل‌سازی عملکرد برنج با استفاده از مدل CERES-Rice گزارش کردند با افزایش دمای ۲ درجه سانتی‌گراد عملکرد برنج هاشمی

و علی کاظمی به ترتیب ۲۴ و ۲۷ درصد از سطح دمای پایه کاهش می‌یابد. زیست‌توده در هاشمی و علی کاظمی ۲۶ درصد از سطح دمای پایه کاهش می‌یابد که با نتایج شبیه‌سازی در پژوهش حاضر همخوانی دارد.

سناریوهای افزایش تاب آوری

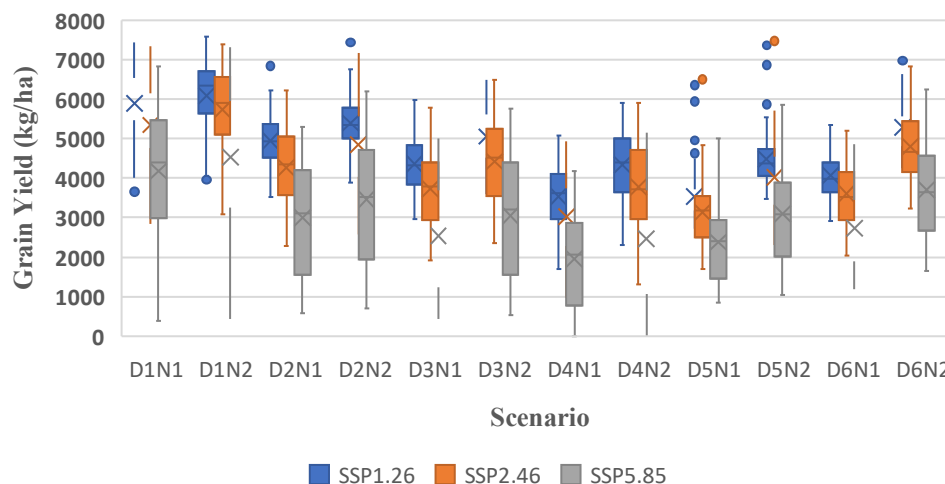
شرایط اقلیمی هر دو مزرعه آزادشهر و مینودشت با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه مینودشت شبیه‌سازی شده است. شکل‌های (۶) و (۷) نتایج شبیه‌سازی تغییرات عملکرد دانه و زیست توده را برای این تیمارها تحت شرایط تغییر اقلیم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو نمودار، با حرکت از تاریخ‌های ابتدایی به انتهایی از مقدار عملکرد دانه و زیست توده کاسته می‌شود.

بیشترین عملکرد دانه در تاریخ D2 (۲۰ اردیبهشت) با تراکم N2 مشاهده شد کشت دیر هنگام (D4-D6) منجر به کاهش شدید عملکرد دانه و زیست توده می‌شود. به خصوص در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریو ۵-۸۵، افت عملکرد بسیار شدیدتر از دو سناریو دیگر است. همچنین دامنهی تغییرات در سناریو ۵-۸۵ وسیع‌تر از دو سناریو دیگر است که این موضوع شدت حساسیت و آسیب‌پذیری عملکرد دانه را در شرایط اقلیمی سخت سناریو ۵-۸۵ نشان می‌دهد. از طرفی در کشت دیر هنگام افزایش اثر افزایش تراکم به عنوان عامل جبران کاهش عملکرد کاهش یافته و در برخی تیمارها اثر آن حذف می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود از کشت دیر هنگام این رقم در شرایط آب و هوایی مینودشت به شدت پرهیز گردد. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تاریخ D5 و D6 هم‌زمان با اوج تابش و دما در مرحله زایشی قرار می‌گیرند و این امر بیشترین نرخ عقیمی سنبلچه را در میان تمام تیمارها رقم می‌زند. برای سازگاری بیشتر با شرایط اقلیمی سخت، کشت در تاریخ‌های ۲۰ اردیبهشت یا ۵ خرداد با تراکم توصیه می‌گردد. این نتایج با مطالعاتی که نشان می‌دهد که دماهای بالای شبانه در مرحله گلدهی تا پر شدن دانه، باعث کاهش فتوسنتز برگ پرچم و در نتیجه افت تجمع ماده خشک در دانه‌ها می‌شود (Gao et al., 2017) مطابقت دارد. همچنین یوسفی و همکاران (Yusefi et al., 2024) گزارش کردند رعایت زمان‌بندی مناسب کشت برنج می‌تواند تنش و بیماری‌ها را کاهش داده و کیفیت محصول را بهبود بخشد. آن‌ها کشت در فروردین و اوایل اردیبهشت را بهترین زمان کاشت برای رقم طارم هاشمی در استان مازندران معرفی نمودند.



شکل ۶. تغییرات تولید عملکرد برای سناریوهای مختلف اقلیمی در بازه زمانی پایه و آتی آزادشهر

Fig 6. Changes in yield production for different climate scenarios in the base and future time periods of Azadshahr

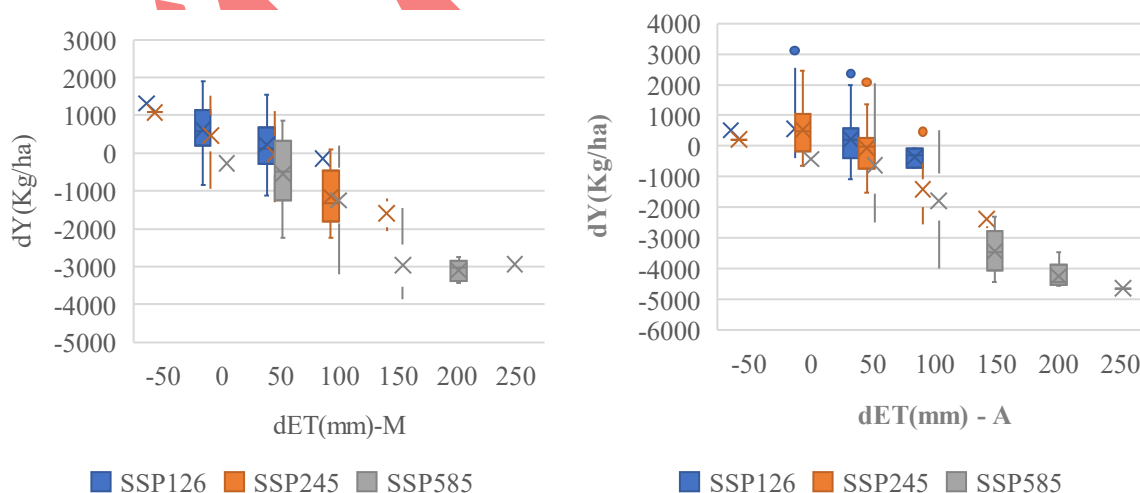


شکل ۷. تغییرات تولید عملکرد برای سناریوهای مختلف اقلیمی در بازه زمانی پایه و آتی مینودشت
Fig 7. Changes in yield production for different climate scenarios in the base and future time periods of Minudasht

آنالیز حساسیت مدل اقلیمی

تبخیر - تعرق

تنوع و تغییر اقلیم با تأثیرگذاری بر ضریب گیاهی (K_c)، تبخیر و تعرق مرجع محصول ETo و تبخیر و تعرق بالقوه محصول (ETh) به طور قابل توجهی بر تقاضای آب محصول تأثیر می‌گذارد (Rahman et al., 2022). نتایج آنالیز حساسیت مدل CERES-Rice نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق مرجع (ETo) نشان داد که عملکرد برنج به طور چشمگیری نسبت به افزایش نیاز تبخیری اتمسفر واکنش منفی دارد. در سناریوی خوش‌بینانه (SSP126)، افزایش ETo تا حدود ۵۰ میلی‌متر تأثیر محسوسی بر کاهش عملکرد نداشت، اما در سناریوهای میانه و شدید (SSP245 و SSP585) افزایش بیش از این مقدار باعث افت قابل توجه عملکرد شد، به‌طوری‌که در SSP585 با افزایش ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر ETo ، عملکرد بیش از ۳ تا ۴ تن در هکتار کاهش یافت.



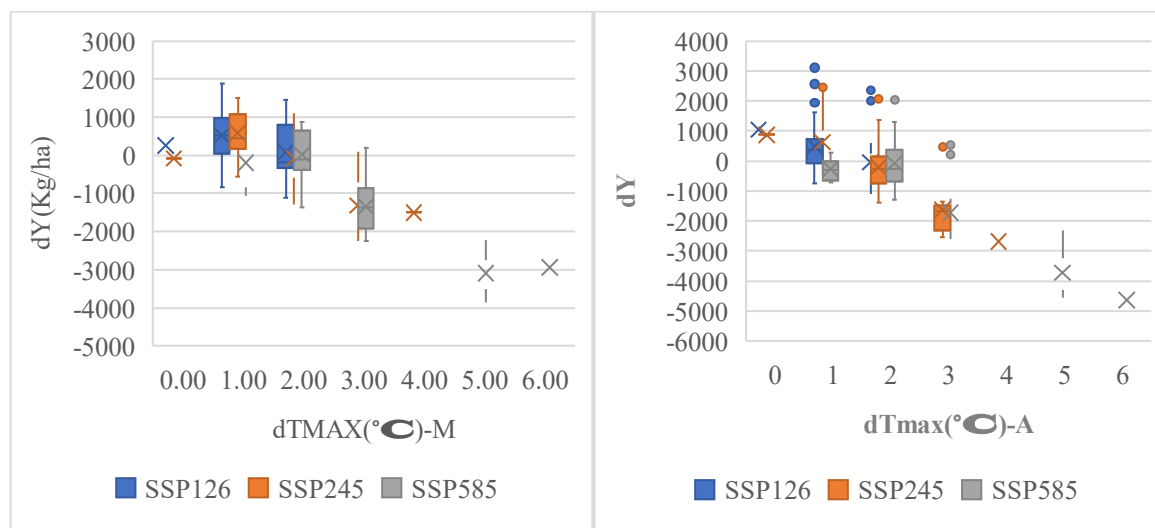
شکل ۸. تحلیل حساسیت عملکرد دانه به تغییرات تبخیر تعرق مرجع در شرایط تغییر اقلیم
Fig 8. Sensitivity analysis of grain yield relative to the changes in the referenced evapotranspiration under climate change conditions

جدول ۱۱. میانگین و انحراف معیار تغییرات عملکرد دانه در طبقات مختلف تغییرات تبخیر تعرق مرجع در شرایط تغییر اقلیم
 Table 11. Mean and standard deviation of grain yield changes in different classes of the referenced evapotranspiration changes under climate change conditions

Minudasht مینودشت		Azadshahr آزادشهر		Number of years تعداد سال‌ها	طبقه	Scenario سناریو
Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد	Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد		تغییرات تبخیر تعرق مرجع dETo classes	
	kg/ha		kg/ha		mm	
-	1312.6	-	518.7	1.0	-50	SSP125
±711	607.9	±906	555.2	26.0	0	SSP126
±703	218.9	±851	209.4	30.0	50	SSP126
±121	-140.4	±329	-357.7	3.0	100	SSP126
-	1078.6	-	208.7	1.0	-50	SSP245
±702	470.8	±888	531.4	19.0	0	SSP245
±678	-33.3	±891	-69.8	20.0	50	SSP245
±739	-1146.1	±881	-1409.2	17.0	100	SSP245
±359	-1596.4	±208	-2386.3	4.0	150	SSP245
±801	-279.4	±198	-427.3	3.0	0	SSP585
±948	-552.2	±1087	-635.9	25.0	50	SSP585
±981	-1255.2	±1193	-1797.4	12.0	100	SSP585
±676	-2969.0	±693	-3432.2	13.0	150	SSP586
±281	-3103.8	±449	-4248.3	5.0	200	SSP585
-	250.0	-	250.0	1	250	SSP585

دمای حداکثر

نتایج آنالیز حساسیت مدل CERES-Rice نسبت به تغییرات دمای حداکثر نشان داد که افزایش دمای بیشینه تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد برنج دارد. در سناریوی خوش‌بینانه (SSP126)، افزایش دما تا حدود ۱ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش اندک عملکرد (حدود ۴۸۶+ تا ۵۲۵+ کیلوگرم در هکتار) شد، اما با افزایش بیشتر دما به ۲ درجه سانتی‌گراد، عملکرد تقریباً بدون تغییر یا اندکی منفی شد و در سناریوهای میانه و شدید (SSP245 و SSP585) افزایش دماهای بالاتر از ۲-۳ درجه سانتی‌گراد باعث افت شدید عملکرد گردید. در SSP245، افزایش ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش عملکرد بیش از ۱۳۰۰ تا ۲۶۰۰ کیلوگرم در هکتار شد، و در SSP585، افزایش ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد باعث افت بسیار شدید عملکرد (بیش از ۳۰۰۰ تا ۴۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) گردید. این نتایج بیانگر حساسیت بالای رشد و عملکرد برنج به افزایش دمای بیشینه است، به‌ویژه در دماهای بحرانی بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد که مرحله گرده‌افشانی و تشکیل دانه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطابق با یافته‌های پیکسان و همکاران (Pickson et al., 2021) که با بررسی داده‌های ۳۰ استان چین در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۷ رابطه‌ای منفی و معنادار بین افزایش دما و عملکرد برنج گزارش کردند، نتایج این مطالعه نیز نشان داد که افزایش دمای حداکثر از یک حد آستانه به بعد، موجب کاهش شدید عملکرد می‌شود. همچنین این نتایج با گزارش رحمان و همکاران (Rahman et al., 2022) مبتنی بر اینکه افزایش دما به مقدار کم اثر مثبت و به مقدار زیاد اثر منفی بر عملکرد برنج دارد، همخوانی دارد.



شکل ۹. تحلیل حساسیت عملکرد دانه به تغییرات دمای حداکثر در شرایط تغییر اقلیم

Fig 9. Sensitivity analysis of grain yield relative to the changes in maximum temperature under climate change conditions

جدول ۱۲. میانگین و انحراف معیار تغییرات عملکرد دانه در طبقات مختلف تغییرات دمای حداکثر در شرایط تغییر اقلیم

Table 12. Mean and standard deviation of grain yield changes in different classes of maximum temperature changes under climate change conditions

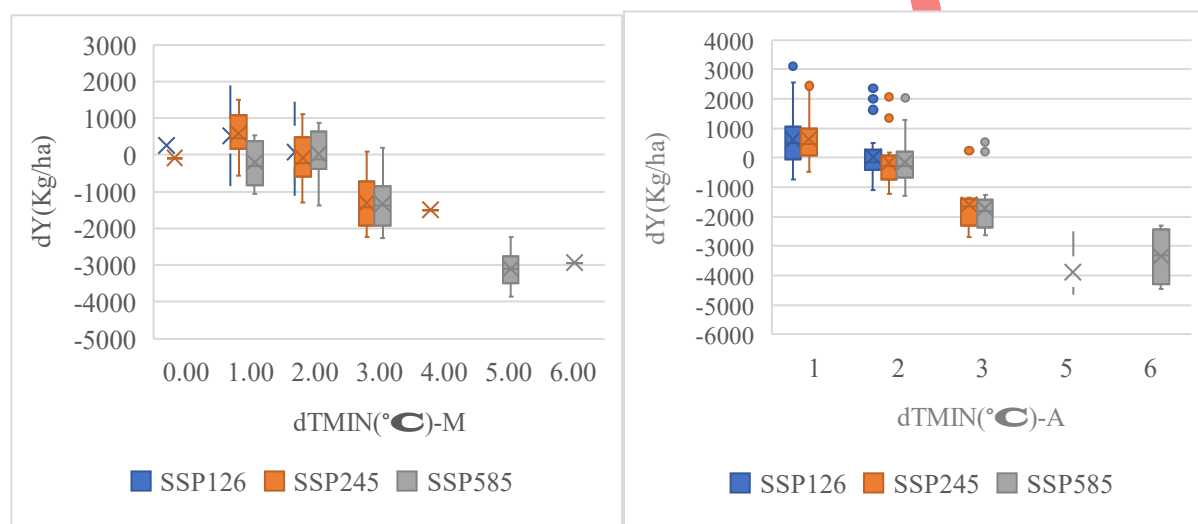
Minudasht مینودشت		Azadshahr آزادشهر		Number of years تعداد سال‌ها	طبقه تغییرات دمای حداکثر dTmax classes	Scenario سناریو میانگین تغییر عملکرد
Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد kg/ha	Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد kg/ha			
-	258.6	-	1046.7	1	0	SSP126
±690	525.1	±809	486.6	41.0	1	SSP126
±740	81.8	±931	-46.3	18.0	2	SSP126
-	-84.4	-	871.7	1	0	SSP245
±599	585.2	±810	622.6	19.0	1	SSP245
±659	-79.4	±802	-208.0	20.0	2	SSP245
±656	-1312.1	±842	-1630.8	19.0	3	SSP245
-	-1500.4	-	-2681.3	1.0	4	SSP245
±635	-201.3	±347	-266.3	7.0	1	SSP585
±651	18.7	±934	-81.9	13.0	2	SSP585
±662	-1338.9	±832	-1716.6	20.0	3	SSP585
±459	-3097.3	±675	-3725.3	19.0	5	SSP585
±449	-2933.4	±707	-4640.3	1.0	6	SSP585

دمای حداقل

نتایج آنالیز حساسیت مدل CERES-Rice نسبت به تغییرات دمای حداقل نشان داد که اثر افزایش دمای شبانه بر عملکرد برنج به شدت وابسته به میزان افزایش و سناریوی اقلیمی است. در سناریوی خوش‌بینانه (SSP126)، افزایش دمای حداقل تا ۱ درجه سانتی‌گراد موجب بهبود نسبی عملکرد (حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم در هکتار) شد که احتمالاً ناشی از کاهش تنش سرمای شبانه و بهبود کارایی فتوسنتز در مراحل رشد رویشی است. با این حال، در سناریوهای میانه و شدید SSP245 و SSP585 با افزایش بیشتر دمای حداقل به بالاتر از ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد، روند معکوس شده و عملکرد کاهش یافت؛ به گونه‌ای که در

SSP585 با افزایش دمای حداقل ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد، عملکرد در هر دو منطقه به طور میانگین بیش از ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که گرمای شبانه بیش از حد، با افزایش تنفس نگهدارنده و کاهش بازده انرژی گیاه، موجب افت محسوس عملکرد دانه می‌شود.

مطالعات متعددی این الگو را تأیید کرده‌اند. پنگ و همکاران (Peng et al., 2004) با بررسی ۲۵ سال داده در فیلپین نشان دادند که افزایش دمای شبانه به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد، حدود ۱۰٪ عملکرد برنج را کاهش می‌دهد. همچنین ولج و همکاران (Welch et al., 2010) گزارش کردند که افزایش دمای حداقل، به‌ویژه در مرحله پرشدن دانه، باعث کاهش کارایی پر شدن دانه و افت وزن هزار دانه می‌شود.



شکل ۱۰. تحلیل حساسیت عملکرد دانه به تغییرات دمای حداقل در شرایط تغییر اقلیم

Fig 10. Sensitivity analysis of grain yield in relative to the changes in minimum temperature under the climate change conditions

جدول ۱۳. میانگین و انحراف معیار تغییرات عملکرد دانه در طبقات مختلف تغییرات دمای حداقل در شرایط تغییر اقلیم

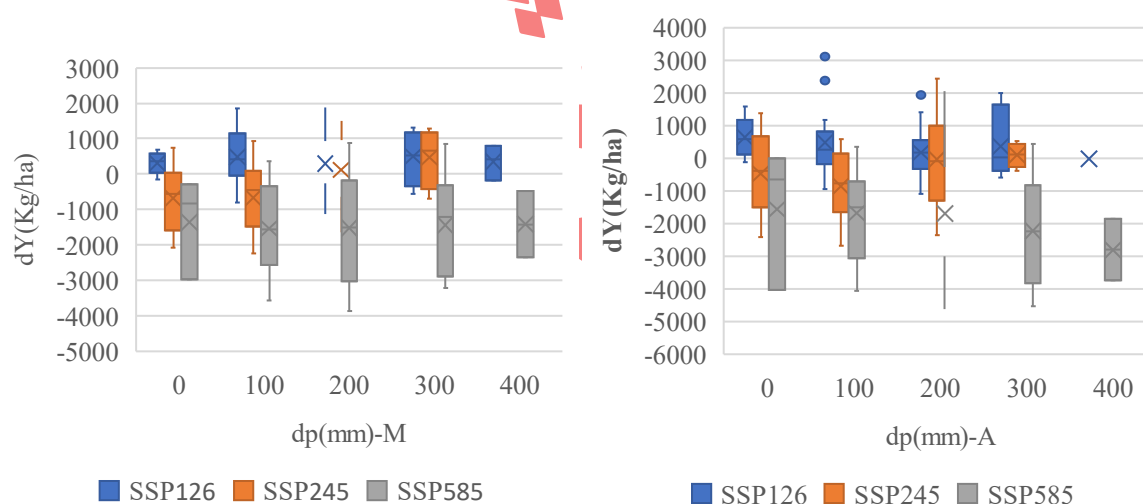
Table 13. Mean and standard deviation of grain yield changes in different classes of minimum temperature changes under climate change conditions

Minudasht مینودشت		Azadshahr آزادشهر		Number of years تعداد سال‌ها	طبقه تغییرات دمای حداقل dTmin	Scenario سناریو میانگین تغییر عملکرد
Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد	Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد			
	kg/ha		kg/ha		mm	
±655	709.7	±849	618.9	31.0	1	SSP126
±635	43.5	±806	33.6	29.0	2	SSP126
±602	551.7	±790	635.1	20.0	1	SSP245
±695	-68.7	±790	-167.4	18.0	2	SSP245
±697	-1217.3	±909	-1582.3	22.0	3	SSP245
±638	-58.3	±773	-146.4	20.0	2	SSP245
±662	-1338.9	±832	-1716.6	20.0	3	SSP585
±406	-2965.4	±599	-3876.1	16.0	5	SSP585
±190	-3583.7	±953	-3351.1	4.0	6	SSP585

بارش

نتایج آنالیز حساسیت مدل CERES-Rice نسبت به تغییرات بارندگی نشان داد که اثر تغییرات dp بر عملکرد برنج در محدوده‌ای محدود مثبت است، اما در شرایط اقلیمی شدیدتر اثر منفی می‌شود. در سناریوی خوش‌بینانه (SSP126)، افزایش بارش تا حدود ۳۰۰ میلی‌متر باعث افزایش عملکرد (به‌ویژه در مینودشت حدود ۴۹۰+ کیلوگرم در هکتار) شد که بیانگر پاسخ مثبت گیاه به بهبود تأمین رطوبت خاک است. با این حال، در افزایش بیش از ۴۰۰ میلی‌متر، کاهش جزئی در عملکرد مشاهده شد که می‌تواند ناشی از اشباع بیش از حد خاک، تهویه نامناسب ریشه و کاهش اکسیژن‌رسانی در ناحیه ریشه باشد. در سناریوهای میانه و شدید SSP245 و SSP585 اثر بارش ناپایدارتر بود و در SSP585 حتی با افزایش بارش، عملکرد به‌طور پیوسته کاهش یافت (تا بیش از ۲ تا ۲/۸ تن در هکتار افت)، که احتمالاً به دلیل هم‌زمانی بارش‌های شدید با شرایط اقلیمی بد سناریو بدبینانه شامل دمای حداقل و حداکثر بالاست.

مطالعات مشابه نیز این یافته را تأیید کرده‌اند؛ براتی و همکاران (Barati et al., 2022) گزارش کردند که تغییرپذیری بارش، عامل کلیدی در نوسانات عملکرد برنج در سامانه‌های دیم و آبیاری شده جنوب هند است و بارش‌های سنگین متناوب می‌تواند به اندازه کمبود بارش مخرب باشد. در مطالعه‌ای دیگر، جوزف و همکاران (Joseph et al., 2023) با مدل‌سازی جهانی تولید برنج نشان دادند که توزیع فصلی بارش (نه فقط مقدار کل سالانه) نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری عملکرد دارد. همچنین نگوین و همکاران (Nguyen et al., 2024) در ویتنام دریافتند که تغییر در الگوی بارش فصلی با جابجایی زمان‌های بارندگی و بروز سیلاب‌های ناگهانی، تأثیر منفی قابل توجهی بر تولید برنج دارد.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت عملکرد دانه به تغییرات بارش در شرایط تغییر اقلیم

Fig 11. Sensitivity analysis of grain yield in relative to the precipitation changes under climate change conditions

جدول ۱۴. میانگین و انحراف معیار تغییرات عملکرد دانه در طبقات مختلف تغییرات بارش در شرایط تغییر اقلیم

Table 14. Mean and standard deviation of grain yield changes in different classes of precipitation changes under climate change conditions

Minudasht مینودشت		Azadshahr آزادشهر		Number of years تعداد سال ها	طبقه تغییرات بارش (mm) dP	Scenario سناریو میانگین تغییر عملکرد
Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد kg/ha	Standard deviation انحراف معیار	Average yield changes میانگین تغییر عملکرد kg/ha			
±311	308.9	±613	640.3	6.0	0	SSP126
±744	474.1	±1042	465.5	22.0	100	SSP126
±836	295.5	±746	164.3	22.0	200	SSP126
±713	492.6	±1035	360.0	7.0	300	SSP126
±490	342.9	±341	-18.3	3.0	400	SSP126
±957	-684.6	±1275	-478.2	8.0	0	SSP245
±904	-674.2	±1040	-864.1	24.0	100	SSP245
±951	116.2	±1429	-38.4	24.0	200	SSP245
±855	471.6	±386	90.7	4.0	300	SSP245
±1425	-1371.4	±2169	-1573.7	3.0	0	SSP585
±1352	-1535.0	±1370	-1687.5	16.0	100	SSP585
±1537	-1525.2	±1917	-1698.8	22.0	200	SSP585
±1357	-1450.1	±1651	-2232.9	17.0	300	SSP585
±1315	-1422.4	±1336	-2814.3	2.0	400	SSP585

باتوجه به اینکه داده‌های اقلیمی هر دو منطقه از ایستگاه سینوپتیک مینودشت استخراج شد، شرایط اقلیمی برای آزادشهر و مینودشت یکسان در نظر گرفته شد؛ بنابراین اختلاف نتایج عملکرد و حساسیت محصول به تغییرات اقلیمی ناشی از تفاوت‌های خاک و ویژگی‌های محلی مدیریت مزرعه است. خاک آزادشهر با بافت رسی-لوم (C-L) و شوری بالاتر، ظرفیت نگهداری آب بیشتری دارد و از نظر فسفر و پتاسیم غنی‌تر است. در مقابل، خاک مینودشت با بافت سیلتی-لوم (Si-L) و شوری کمتر، زهکش سریع‌تر و عناصر غذایی محدودتری دارد. این تفاوت‌های خاکی موجب تغییر در کارایی مصرف آب و کود و در نهایت اختلاف عملکرد بین دو منطقه گردید. به عبارت دیگر، اختلاف مشاهده‌شده در نتایج دو منطقه ناشی از شرایط خاک و مدیریت محلی بوده و نه تفاوت اقلیمی، زیرا داده‌های آب‌وهوایی برای هر دو منطقه یکسان در نظر گرفته شده است.

بررسی هم‌زمان چهار متغیر فوق نشان می‌دهد که این عوامل به صورت برهم‌کنشی (interactive) بر سامانه‌ی زراعی اثر می‌گذارند، نه به شکل مستقل. افزایش دمای بیشینه و تبخیر و تعرق مرجع، در حضور بارندگی نامنظم و دمای شبانه‌ی بالا، منجر به ترکیب پیچیده‌ای از تنش‌های حرارتی، آبی و فیزیولوژیک می‌شود که ظرفیت سازگاری گیاه را کاهش می‌دهد. در چنین شرایطی حتی افزایش بارندگی نیز نمی‌تواند نقش جبرانی مؤثری ایفا کند، زیرا توزیع نامناسب بارش و افزایش تبخیر موجب از بین رفتن بخشی از آب در دسترس می‌گردد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تاب‌آوری اقلیمی برنج مفهومی چندبعدی است که در آن دما، رطوبت و تعادل آبی به طور هم‌زمان باید مدیریت شوند؛ بنابراین، راهبردهای سازگاری مؤثر شامل استفاده از ارقام متحمل به گرما و تنش آبی، اصلاح تقویم زراعی برای اجتناب از هم‌زمانی گرده‌افشانی با اوج دما، و بهینه‌سازی آبیاری برای کاهش اثر تبخیر می‌باشد. چنین رویکردی می‌تواند پایداری تولید و تاب‌آوری فیزیکی سیستم برنج‌کاری در مناطق شمالی کشور را در برابر سناریوهای آینده تغییر اقلیم تضمین کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل CERES-Rice توانایی بالایی در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک، رشد زیست‌توده و عملکرد دانه دارد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر شاخص‌های آماری NRMSE کمتر از ۱۰ درصد و شاخص توافق ویلموت (d) بیش از ۰/۹ به‌دست آمد. این امر بیانگر دقت و قابلیت اعتماد مدل در شرایط اقلیمی شمال ایران است.

تحلیل حساسیت عملکرد نسبت به تغییرات دما و بارش نشان داد که افزایش دما به‌ویژه در مرحله پر شدن دانه، بیشترین اثر منفی را بر عملکرد دارد. در سناریوی خوش‌بینانه SSP126 عملکرد نسبت به دوره پایه تا ۱۸/۶ درصد افزایش یافت، در حالی که در سناریوی بدبینانه SSP585 عملکرد تا ۸۰/۷ درصد کاهش نشان داد. همچنین نیاز آبی در SSP585 به‌طور متوسط ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از دوره پایه برآورد شد.

ارزیابی شاخص‌های تاب‌آوری فیزیکی نشان داد که در SSP126 سامانه کشت توانست بهره‌وری نسبی خود را حفظ کند، اما در SSP585 تاب‌آوری کاهش‌یافته و نوسانات عملکرد تا حدود ± 30 درصد افزایش یافت. نتایج آزمایش‌های مدیریتی نشان داد که تغییر تاریخ کشت از ۲۵ اردیبهشت یا ۵ خرداد، عملکرد را به‌طور متوسط ۱۲ تا ۱۵ درصد بالاتر از کشت دیر هنگام (اواخر خرداد) قرار داد و نوسانات عملکرد را حدود ۱۰ درصد کاهش داد.

به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که تاب‌آوری و سازگاری دو رویکرد مکمل در مدیریت اقلیمی کشاورزی هستند. بدون اتخاذ راهبردهای سازگاری، عملکرد برنج در آینده با کاهش شدید مواجه خواهد شد؛ در مقابل، با مدیریت صحیح زراعی، مانند انتخاب تاریخ کشت مناسب، می‌توان بخشی از اثرات منفی تغییر اقلیم را تعدیل کرد و پایداری تولید را تضمین نمود. این یافته‌ها برای برنامه‌ریزی امنیت غذایی کشور اهمیت ویژه دارد، زیرا نشان می‌دهد که حتی در شرایط بدبینانه، اتخاذ راهبردهای مدیریتی ساده می‌تواند تا ۱۵ درصد عملکرد بالاتر و نوسانات کمتر را به همراه داشته باشد.

منابع

- Dang, L. T. T., Tran, A. H., Vu, T. L. T., & Nguyen, T. A. T. (2023, April). Assessment of the impact of climate change and cultivation conditions on rice yield in Vietnamese Mekong Delta. A case study in Vinh Thanh District, Can Tho city. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 1170, No. 1, p. 012001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200118>
- Aggarwal, P.K. (2008). Global climate change and Indian agriculture: impacts, adaptation and mitigation. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 78(11), 911.
- Akinbile, C. O., Ogunmola, O. O., Abolude, A. T., & Akande, S. O. (2020). Trends and spatial analysis of temperature and rainfall patterns on rice yields in Nigeria. *Atmospheric Science Letters*, 21(3), e944. <https://doi.org/10.1002/asl.944>
- Alejo, L. A. (2021). Assessing the impacts of climate change on aerobic rice production using the DSSAT-CERES-Rice model. *Journal of Water and Climate Change*, 12(3), 696-708. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.286>
- Ali, A. & Erenstein, O. (2017). Assessing farmer use of climate change adaptation practices and impacts on food security and poverty in Pakistan. *Climate Risk Management*, 16, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2016.12.001>
- Babel, MS., Agarwal, A., Swain, DK. & Herath, S. (2011). Evaluation of climate change impacts and adaptation measures for rice cultivation in Northeast Thailand. *Climate Research*, 46(2), 137-146. <https://doi.org/10.3354/cr00978>
- Barati, M.K., Manivasagam, V.S., Nikoo, M.R., Saravanane, P., Narayanan, A. & Manalil, S. (2022). Rainfall variability and rice sustainability: An evaluation study of two distinct rice-growing ecosystems. *Land*, 11(8), 1242. <https://doi.org/10.3390/land11081242>
- 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> [Get rights and content](#)
- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, MS., Weesakul, S., & Datta, A. (2019). Evaluation of climate change impacts and adaptation strategies on rainfed rice production in Songkhram River Basin, Thailand. *Science of the Total Environment*, 652, 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.201>
- Chun, JA., Li, S., Wang, Q., Lee, W., Lee, E., Horstmann, N., Park, H., Veasna, T., Vannady, L., & Pros, K. (2016). Assessing rice productivity and adaptation strategies for Southeast Asia under climate change through multi-scale crop modeling. *Agricultural Systems*, 143, 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.001>

- Dang, L. T. T., Tran, A. H., Vu, T. L. T., & Nguyen, T. A. T. (2023, April). Assessment of the impact of climate change and cultivation conditions on rice yield in Vietnamese Mekong Delta. A case study in Vinh Thanh District, Can Tho city. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 1170, No. 1, p. 012001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1170/1/012001>
- Darikandeh, D., Shahnazari, A., Khoshravesht, 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>
- Dharmarathna, W. R. S. S., Herath, S., & Weerakoon, S. B. (2014). Changing the planting date as a climate change adaptation strategy for rice production in Kurunegala district, Sri Lanka. *Sustainability science*, 9(1), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s11625-012-0192-2>
- Eeswaran, R., Nejadhashemi, A. P., & Miller, S. R. (2021). Evaluating the climate resilience in terms of profitability and risk for a long-term corn-soybean-wheat rotation under different treatment systems. *Climate Risk Management*, 32, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100284>
- Eghbalishahabad, S., Nasiri Mahalati, M., Jahan, M., and Fallah, M. H. (2024). Simulating the Growth and Development of Quinoa using the DSSAT 4.7 Software Model in Field Conditions. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(1), 107-124. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6801.1045>. [In Persian].
- Eitzinger, A., Läderach, P., Rodriguez, B., Fisher, M., Beebe, S., Sonder, K., & Schmidt, A. (2017). Assessing high-impact spots of climate change: spatial yield simulations with the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) model. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 22(5), 743-760. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9696-2>
- Fao. (2007). *Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: perspective, framework and priorities*. Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/au030e/au030e.pdf>
- Fathi, N., Pirdashti, H., Nasiri, M. & Bakhshandeh, E. (2021). Influence of elevated air temperature during the grain-filling stage on milling parameters and rice grain wastage under different local climates in Mazandaran province. *Journal of Plant Production Research*, 28(1), 1-15. <https://doi.org/10.22069/jopp.2021.14824.2324>. [In Persian].
- Gao, S., Gu, Q., Gong, X., Li, Y., Yan, S., & Li, Y. (2023). Optimizing water-saving irrigation schemes for rice (*Oryza sativa* L.) using DSSAT-CERES-Rice model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(2), 142-151. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231602.7361>
- Gary, A. & Qanqarmeh, A. (2021). Precipitation assessment based on the development and extension of the North Caspian Sea index for the future period on the southern shores of the Caspian Sea. *Climate Change Research Publication*, 2(8), 1-22. <https://doi.org/10.30488/CCR.2021.311761.1054>. [In Persian].
- Guo, Y., Wu, W., Du, M., Bryant, C. R., Li, Y., Wang, Y., & Huang, H. (2019). Assessing potential climate change impacts and adaptive measures on rice yields: The case of zhejiang province in China. *Sustainability*, 11(8), 2372. <https://doi.org/10.3390/su11082372>
- Halder, D., Khoroar, S., Srivastava, R. K., & Panda, R. K. (2020). Assessment of future climate variability and potential adaptation strategies on the yield of peanut and Kharif rice in eastern India. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3), 823-838. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03123-5>
- Hamidianpour, M. & 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].
- Helmi, M., Zeraati Neyshabouri, S., Amirabadizadeh, M., & Yaghoobzadeh, M. (2024). Evaluation of SDSM, LARS-WG, and ANN Methods in Downscaling of Temperature and Precipitation for Two Different Climates. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(4), 105-118. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6996.1049>. [In Persian].
- Hussain, T., Mulla, D. J., Hussain, N., Qin, R., Tahir, M., Liu, K., Harrison, M., Sinutok, S., & Duangpan, S. (2023). Optimizing nitrogen fertilization to enhance the productivity and profitability of upland rice using CSM-CERES-Rice. *Plants*, 12(21), 3685. <https://doi.org/10.3390/plants12213685>
- IPCC (2021) *Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Islam, A. R. M. T., Shen, S., Yang, S., Hu, Z., & Rahman, M. A. (2020). Spatiotemporal rice yield variations and potential agro-adaptation strategies in Bangladesh: A biophysical modeling approach. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 121-138. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.07.005>
- Joseph, M., Moonsammy, S., Davis, H., Warner, D., Adams, A. & Oyedotun, T.D.T. (2023). Modelling climate variabilities and global rice production: A panel regression and time series analysis. *Heliyon*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15480>
- Koolaeian, N., Amiri, E., & Pazira, E. (2022). Spatial simulation of rice grain yields by empirical models. *Romanian Agricultural Research*, (39).

- Li, N., Zhao, Y., Han, J., Yang, Q., Liang, J., and Liu, X. (2024b). Impacts of future climate change on rice yield based on crop model simulation—A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 922, 170689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175038>
- Li, S., Wu, F., Zhou, Q. & Zhang, Y. (2024a). Adopting agronomic strategies to enhance the adaptation of global rice production to future climate change: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(2), <https://doi.org/63.10.1007/s13593-024-00963-7>
- Mishra, H., Gautam, S., Dwivedi, S., Raza, M. Y., Ali, H., & Ikram, S. (2025). *Evaluation of Climate Resilient Agriculture Practices in the Subcontinent*. In *Climate Resilient and Sustainable Agriculture: Volume 1: Adaptation and Mitigation Strategies*, 225-278. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00190-0_11
- Mohammadi, N., Hejazizadeh, Z., Zeaiean Firouzabadi, P., & 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.2024.442784.128>. [In Persian].
- Nelson, GC., Rosegrant, MW., Palazzo, A., Gray, I., Ingersoll, C., Robertson, R., Tokgoz, S., Zhu, T., Sulser, TB. & Ringler, C. (2010). *Food security, farming, and climate change to 2050: scenarios, results, policy options*. International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/9780896291867>
- Nguyen, P.T.M., Ho, P.T. & Pham, H.X. (2024). Impacts of seasonal climate variation on rice yield: Evidence from the Central Coast of Vietnam. *Cogent Economics & Finance*, 12(1), p.2421894. <https://doi.org/10.1080/23322039.2024.2421894>
- Peng, S., Huang, J., Sheehy, J.E., Laza, R.C., Visperas, R.M., Zhong, X., Centeno, G.S., Khush, G.S. & Cassman, K.G.B. (2004). Rice yields decline with higher night temperatures from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(27), 9971-9975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403720101>
- Pickson, R. B., He, G., & Boateng, E. (2022). Impacts of climate change on rice production: evidence from 30 Chinese provinces. *Environment, Development and Sustainability*, 24(3), 3907-3925. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01594-8>
- Rabbani, F., Mohammadi, H., Azizi, G., & Mazaheri, D. (2015). Simulation of rice production under climate change scenarios in the Southern coasts of the Caspian Sea. *Desert*, 20(2), 197-206.
- Rahman, M.A., Ali, M., Mojid, M.A., Anjum, N., Haq, M.E., Kainose, A., and Dissanayaka, K.D.C.R. (2023). Crop coefficient, reference crop evapotranspiration, and water demand of dry-season Boro rice as affected by climate variability: A case study from northeast Bangladesh. *Irrigation and Drainage*, 72(1), 148-165. <https://doi.org/10.1002/ird.2754>
- 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. [In Persian].
- Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K. & Meinshausen, M. (2016) Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. *Nature* 534(7609), 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- Sadeghi, H., Shobairi, S. O. R., Shamsipour, A., Mohammadi, H., Karimi, M., Amiri, E., & Soufizadeh, S. (2023). Effects of climate change on rice yield in northern areas of Iran: Humidity as a large source of climate variability. *Journal of Climate Change*, 9(4), 25-36. <https://doi.org/10.3233/JCC230029>
- Sadeghinia, A., Sedaghat, M., & Rafati, S. (2022). Analysis of evidence of climate change on the southern coast of the Caspian Sea, *Physical geography*. 15(55), 95-113, <https://doi.org/20.1001.1.20085656.1401.15.55.6.8>. [In Persian].
- Saito, K., Oort, P. V., Dieng, I., Johnson, J. M., Niang, A., Ahouanton, K., ... & Mabone, F. L. (2017). *Yield gap analysis towards meeting future rice demand* (pp. 157-182). <https://doi.org/10.19103/AS.2016.0003.26>
- Schneider, P., & Asch, F. (2020). Rice production and food security in Asian Mega deltas—A review on characteristics, vulnerabilities and agricultural adaptation options to cope with climate change. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(4), 491-503. <https://doi.org/10.1111/jac.12415>
- Seck, P. A., Diagne, A., Mohanty, S., & Wopereis, M. C. (2012). Crops that feed the world 7: Rice. *Food security*, 4(1), 7-24. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0168-1>
- 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/20.1001.1.15625540.1400.23.4.5.5). [In Persian].
- Tesfaye, K., Khatri-Chhetri, A., Aggarwal, PK., Mequanint, F., Shirsath, PB., Stirling, CM., Jat, ML., Rahut, DB. & Erenstein, O. (2019). Assessing climate adaptation options for cereal-based systems in the eastern Indo-Gangetic Plains. South Asia. *The Journal of Agricultural Science*. 157(3), 189–210. <https://doi.org/10.1017/S0021859619000492>

- Truong An, D. (2020). Shifting crop planting calendar as a climate change adaptation solution for rice cultivation region in the Long Xuyen Quadrilateral of Vietnam. *Chilean journal of agricultural research*, 80(4), 468-477. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000400468>
- Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., & Huyghe, C. (2016). Stability, robustness, vulnerability, and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>
- Vilavan, S., Das, D., Ullah, H., Gade, S. A., Ahmed, S. F., Cha-Um, S., ... & 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, W., Cai, C., He, J., Gu, J., Zhu, G., Zhang, W., ... & Liu, G. (2020). Yield, dry matter distribution and photosynthetic characteristics of rice under elevated CO₂ and increased temperature conditions. *Field Crops Research*, 248, 107605. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107605>
- Welch, J.R., Vincent, J.R., Auffhammer, M., Moya, P.F., Dobermann, A. & Dawe, D. (2010). Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(33), 14562-14567. <https://doi.org/10.1073/pnas.1001222107>
- Yoshida, R., Fukui, S., Shimada, T., Hasegawa, T., Ishigooka, Y., Takayabu, I. & Iwasaki, T. (2015). Adaptation of rice to climate change through a cultivar-based simulation: a possible cultivar shift in eastern Japan. *Climate Research*. 64(3), 275–290. <https://doi.org/10.3354/cr01320>
- Yosefi Kebriya, A., and Reza Norooz Valashedi, R. (2024). Presenting the Suitable Planting Calendar of Tarem Hashemi Rice Variety in Mazandaran Province using Remote Sensing Technique. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 67-84. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8087.1076> [In Persian].
- Zareian M, Seraj Ebrahimi R, Dehban H. (2024). Investigating the Impact of Climate Change on Extreme Temperature and Precipitation in the Sefidrood Basin Based on CMIP6 Models. *Journal of Water and Soil Science*, 28(3), 53-71. <https://doi.org/10.47176/jwss.28.3.31502> [In Persian].