



Simulating the Effects of Climate Change on Irrigated Barley (*Hordeum vulgare*) in Lorestan and Hamedan Provinces

Ali Valipour¹ | Khosro Azizi²✉ | Sajjad Rahimi-Moghaddam³

1. Department of Production and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Production and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: azizi.kh@lu.ac.ir
3. Department of Production and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: rahimi.s@lu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: January 30, 2023
Received in revised form: July 01, 2023
Accepted: July 06, 2023
Published online: December 22, 2023

Keywords:

AgMIP,
APSIM model,
barley plant,
grain yield,
RCP scenario.

ABSTRACT

The present research was conducted to simulate the impact of climate change on irrigated barley in Lorestan and Hamadan provinces. For this purpose, nine regions including Aligudarz, Borujerd, Khorramabad, Kuhdasht, Pol-e Dokhtar, Hamedan, Malayer, Nahavand, and Kabudarahang were selected in the two provinces. The APSIM-barley model was employed to simulate the growth and development of irrigated barley. Firstly, the APSIM-barley model was evaluated using two independent field experiments. The first experiment was conducted in Khorramabad to calibrate the crop model; while the second experiment was done in Hamedan to validate the crop model. The future climate was projected using the AgMIP methodology under two scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) for the period 2040-2070. The results of the model validation showed that the crop model was able to simulate barley yield and biomass with nRMSE of 16.4% and 13.3%, respectively. Additionally, the results indicated that on average across the study locations, barley grain yield would decrease by 3.8% and 5.7% under RCP4.5 and RCP8.5, respectively. However, in Pol-e Dokhtar, barley grain yield is projected to increase by 1.3% and 4.8% under RCP4.5 and RCP8.5, respectively. Based on these findings, adaptation strategies should be considered in the future to prevent the reduction of irrigated barley yield in the studied provinces.

Cite this article: Valipour, A., Azizi, K., & Rahimi Moghadam, S. (2023). Simulating the effects of climate change on irrigated barley (*Hordeum vulgare*) in Lorestan and Hamedan provinces. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(4), 79-91. DOI: 10.22059/ijfcs.2023.354454.654977.



© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.354454.654977>



شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر محصول جو آبی (*Hordeum vulgare*) در استان‌های لرستان و همدان

علی ولی‌پور^۱ خسرو عزیزی^۲ | سجاده رحیمی مقدم^۳

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.
 ۲. نویسنده مسئول، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: azizi.kh@lu.ac.ir
 ۳. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: rahimi.s@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مطالعه حاضر به منظور شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر محصول جو آبی در استان‌های لرستان و همدان انجام شد. بدین منظور، نه منطقه (الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوه‌دشت، پل‌دختر، همدان، ملایر، نهاوند و کبودرآهنگ) در سطح استان‌های مذکور انتخاب شدند. برای شبیه‌سازی رشد و نمو محصول جو آبی از مدل APSIM-barley استفاده شد. ابتدا مدل APSIM-barley با استفاده از دو آزمایش مستقل مزرعه‌ای، مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش اول در شهرستان خرم‌آباد انجام شد که برای واسنجی مدل زراعی مورد استفاده قرار گرفت؛ در حالی که آزمایش دوم در شهرستان همدان برای اعتبارسنجی مدل به کار برده شد. اقلیم آینده با استفاده از روش AgMIP تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که مدل زراعی توانست عملکرد و بیوماس گیاه جو را با ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب به میزان ۱۶/۴ و ۱۳/۳ درصد شبیه‌سازی کند. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد دانه جو به طور میانگین در سراسر مناطق مورد بررسی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده به ترتیب ۳/۸ و ۵/۷ درصد کاهش خواهد یافت. با این وجود در شهرستان پلدختر تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 عملکرد دانه گیاه جو به ترتیب ۱/۳ و ۴/۸ درصد افزایش پیدا کرد. بر اساس این نتایج، باید راهکارهای سازگاری در آینده برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصول جو آبی در استان‌های مورد بررسی در نظر گرفته شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱	
کلیدواژه‌ها: AgMIP، سناریو RCP، عملکرد دانه، گیاه جو، مدل APSIM.	

استناد: ولی‌پور، ع، عزیزی، خ، و رحیمی مقدم، س. (۱۴۰۲). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر محصول جو (*Hordeum vulgare*) آبی در استان‌های لرستان و همدان. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۴(۴)، ۷۹-۹۱. DOI: 10.22059/ijfcs.2023.354454.654977



۱. مقدمه

در میان محصولات زراعی، گیاه جو (*Hordeum vulgare*) با اختصاص دادن سطح زیر کشتی برابر با ۵۸۷۴۴۷ هکتار جو آبی و ۱۲۸۲۹۴۸ هکتار جو دیم و در مجموع ۱۷۶۵۵۳۸ هکتار و تولید ۳/۴ میلیون تن در ایران از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در این بین استان‌های لرستان و همدان به ترتیب با داشتن بیش از ۱۵۳۸۶۷ و ۱۵۴۴۲۴ هکتار نقش بسزایی در تولید (۵۶۳۱۵۵ تن) این گیاه زراعی در کشور داشته‌اند (Anonymous, 2017).

تغییر اقلیم بر اساس تعریف کنوانسیون چارچوب تغییر اقلیم سازمان ملل (UNFCCC) به تغییر در شرایط اقلیمی گفته می‌شود که به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم به فعالیت‌های انسانی که موجب تغییر در ترکیبات اتمسفر می‌شود، وابسته است و علاوه بر تغییرپذیری اقلیمی طبیعی، در طول دوره‌های زمانی متفاوت قابل مقایسه است. تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده در ارتباط با افزایش غلظت اتمسفری گازهای گلخانه‌ای و تأثیر آن در تغییر میزان و پراکنش فصلی الگوهای بارش و دما در بسیاری از مناطق دنیا به‌خوبی پذیرفته شده است (IPCC, 2014). نتایج ذکرشده در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2014) نشان می‌دهد که از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲، میانگین دمای جهانی ۰/۶۵ تا ۱/۰۶ درجه سانتیگراد افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال‌های ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در مقایسه با سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۰۵ میانگین دما تحت سناریوهای خوش‌بینانه ۱/۷-۰/۳ درجه سانتیگراد و تحت سناریوهای بدبینانه ۴/۸-۲/۶ درجه سانتیگراد افزایش یابد. همچنین در این گزارش بیان شده است که در میان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن دارای بیشترین اثر تابشی بوده و بر موازنه تابشی و در نتیجه موازنه گرمایی کل زمین تأثیر می‌گذارد. متغیرهای اقلیمی به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی در فرآیند تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شوند و هر گونه تغییر و تنوع در این متغیرها از جمله غلظت دی‌اکسید کربن جوی، دما و بارش می‌تواند اثرات معنی‌داری بر فنولوژی، رشد و عملکرد محصولات زراعی داشته باشد (Babaeian & Kouhi, 2012; Rahimi-Moghadam et al., 2017; Kumagai et al., 2014).

تغییرات اقلیمی می‌تواند در نواحی که دارای آسیب‌پذیری بیشتری هستند اثرات شدیدتری داشته باشند. از جمله این نواحی، مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که ایران از لحاظ طبقه‌بندی اکولوژیکی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (<https://www.yieldgap.org/Iran>). این تأثیرات منفی بر عملکرد برخی گیاهان زراعی مختلف ایران همچون گندم (*Triticum aestivum* L.) (Kuchaki & Nasiri Mahalati, 2008)، ذرت (*Zea mays* L.) (Rahimi-Moghadam et al., 2017) و برنج (*Oryza sativa* L.) (Ramazanipour, 2018) را می‌توان در گزارش‌های مختلف مشاهده کرد. به‌عنوان مثال برای گندم آبی در مناطق مختلف ایران کاهش ۱۴ تا ۲۱ درصد گزارش شده است (Kuchaki & Nasiri Mahalati, 2008). در مطالعه‌ای دیگر روی ریسک ناشی از تنش گرما برای ذرت دانه‌ای استان خوزستان احتمال تشکیل عملکرد اقتصادی (عملکرد بالای ۴/۵ تن در هکتار) در دوره آینده ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (Rahimi-Moghadam et al., 2017).

برای ارزیابی اثرات اقلیمی روی محصولات زراعی می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه زراعی بهره گرفت. یکی از این مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی مدل APSIM می‌باشد. این مدل که توسط محققان استرالیایی طراحی شده است توانایی شبیه‌سازی ۲۵ محصول زراعی از جمله گیاه جو، رشد و زیست‌توده مراتع و درختان، رقابت محصولات با علف‌های هرز، سیستم‌های کشت مخلوط، تناوب و آیش، سیستم‌های جنگل زراعی، عوامل مدیریتی و پیش‌بینی‌های دقیق تولید محصول در ارتباط با متغیرهای آب و هوا از جمله دما، بارش، تشعشع و دی‌اکسید کربن را دارد (Keating et al., 2003; Holzworth et al., 2014). این مدل برای شبیه‌سازی رشد و نمو و همچنین بررسی تغییرات اقلیمی در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان مثال در تحقیقی توسط Moghaddam et al. (2023) در زمینه بررسی تأثیر مدیریت تاریخ کاشت و میزان نیتروژن روی عملکرد گندم زمستانه در ایران با استفاده از مدل APSIM نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای برای شبیه‌سازی بیوماس و عملکرد دانه گندم به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۰/۱۵ تن بود. آن‌ها همچنین گزارش کردند تحت شرایط تغییر اقلیم برای ۲۰۳۹-۲۰۱۰، مدل‌های اقلیمی افزایش کمی در عملکرد گندم را شبیه‌سازی کردند، با این حال، برای ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۳۹

۲۰۷۰، اکثر مدل‌های اقلیمی کاهش طول فصل رشد و عملکرد دانه را شبیه‌سازی کردند. در تحقیقی دیگر، با استفاده از مدل APSIM در مناطق نیمه‌خشک ایران گزارش شد که عملکرد گندم دیم تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده نزدیک (۲۰۳۰)، متوسط (۲۰۵۰) و دور (۲۰۸۰) به ترتیب ۱۲/۳، ۱۷/۱ و ۱۷/۷ درصد افزایش پیدا می‌کند (Deihimfard et al., 2023).

باتوجه به اهمیت اثرات تغییر اقلیم روی محصولات کشاورزی به‌ویژه تأثیرات بیشتر آن بر مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند کشور ایران و همچنین اهمیت جایگاه محصول جو در کشور و استان‌های لرستان و همدان و لزوم توجه و استفاده از رهیافت‌های جدید در راستای صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های مانند مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی این تحقیق به منظور ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد جو آبی در استان‌های لرستان و همدان با استفاده از مدل APSIM انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مناطق مورد بررسی و مشخصات این مناطق: استان‌های لرستان و همدان

این تحقیق در تعدادی از شهرستان‌های استان لرستان شامل الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوه‌دشت و پلدختر و استان همدان شامل همدان، ملایر، نهاوند و کبودرآهنگ انجام شد. استان لرستان در غرب ایران، بین ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته و وسعت آن حدود ۲۸۵۵۹ کیلومتر مربع است. این استان، از شمال به استان‌های مرکزی و همدان، از جنوب به استان خوزستان، از شرق به استان اصفهان و از غرب به استان‌های کرمانشاه و ایلام محدود است. استان همدان بین مدارهای ۵۹ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۳۴ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. استان همدان با مساحت ۲۰ هزار و ۱۷۲ کیلومتر مربع، ۲/۱ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد. استان همدان جزء استان‌های غربی ایران است که از شمال به استان زنجان، از جنوب به استان لرستان، از شرق به استان مرکزی و از غرب به استان‌های کرمانشاه و کردستان محدود می‌شود. آب و هوای استان همدان متغیر است و معمولاً دارای زمستان‌های سرد و پر برف و تابستان‌های معتدل و بیلابقی است و به‌طور کلی در دره‌های شمالی کوه الوند و شمال استان سردتر و جنوب استان ملایم‌تر است. ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی مناطق در جدول ۱ مشاهده می‌شوند.

جدول ۱. ویژگی‌های اقلیمی، جغرافیایی و مدیریتی مناطق مورد مطالعه.

Location	Longitude/ latitude	Elevation (m)	Annual mean temperature (°C)	Annual cumulative rainfall (mm)	Number of irrigation	Nitrogen fertilizer (kg ha ⁻¹)	Sowing date
Aligudarz	49.42/33.24	2022	12.4	402.1	5	180	14-Oct
Borujerd	48.45/33.55	1629	14.7	456.6	5	200	18-Oct
Khorramabad	48.17/32.26	1155	17.2	500.1	5	175	20-Oct
Kuhdasht	47.39/33.31	1197	15.9	366.7	4	220	17-Oct
Poldkhtar	47.43/33.09	713	22.8	360.7	5	175	12-Oct
Hamedan	48.53/34.87	1740	11	317.7	5	200	08-Nov
Kabudarahng	48.42/35.12	1666	9	273	6	175	01-Nov
Malayer	48.49/34.17	1725	10.5	300	6	180	17-Oct
Nahavand	48.15/34.15	1644	12.7	410	5	220	20-Oct

۲-۲. مدل زراعی مورد استفاده و پارامترهای مورد نیاز

در این تحقیق شبیه‌ساز سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی (APSIM) که توسط واحد تحقیقاتی سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی در استرالیا (APSRU) تهیه شده است به کار گرفته شد. این مدل توسط محققان استرالیایی طراحی شده است و از قدرت بالایی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی برخوردار است. این مدل، رشد و نمو گیاه را به صورت روزانه شبیه‌سازی

می‌کند و به عوامل مختلف از جمله آب و هوا (دما، بارش و تابش)، خاک (آب خاک و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی گیاه زراعی وابسته است. مدل مذکور مراحل نمو، تجمع و تخصیص بیوماس، شاخص سطح برگ و نیز رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه را در مقیاس روزانه از مرحله کاشت تا رسیدگی شبیه‌سازی می‌کند. در مدل APSIM، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن از طریق تاثیر بر کارایی مصرف نور، کارایی تعرق و غلظت بحرانی نیتروژن برگ بر رشد گیاه زراعی تاثیر می‌گذارد (Wang et al., 2017). در این مدل سرعت تبخیر آب خاک و تعرق گیاه به‌صورت جداگانه و توسط نیاز بوم نظام و توانایی خاک برای تامین آب در پاسخ به این نیاز محاسبه می‌شود (Dietzel et al., 2016).

پارامترهای مورد نیاز برای اجرای مدل شامل پارامترهای اقلیمی، خاکی، مدیریتی و گیاهی می‌باشند. پارامترهای خاکی برای هر شهرستان شامل توصیف خاک، طبقه‌بندی خاک، طول و عرض جغرافیایی، اسیدیته، ضخامت لایه (cm)، وزن مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$)، محتوای آب در نقطه پژمردگی ($mm\ mm^{-1}$)، مزرعه ($mm\ mm^{-1}$) و اشباع ($mm\ mm^{-1}$)، هدایت الکتریکی ($mS\ m^{-1}$) و ماده آلی (%) خاک می‌باشد. این داده‌ها از طریق مکاتبه با سازمان جهاد کشاورزی، مراکز تحقیقات منابع طبیعی و کشاورزی، آزمایشگاه‌های خاک، گزارش‌های سازمان خوار و بار جهانی و همچنین سایت اطلس خلاء ایران در سطح هر شهرستان جمع‌آوری شد (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های خاکی مناطق مورد مطالعه.

Location	Bulk density ($g\ cm^{-3}$)	Soil water content at wilting point ($mm\ mm^{-1}$)	Soil water content at field capacity ($mm\ mm^{-1}$)	Saturation water content ($mm\ mm^{-1}$)
Aligudarz	1.31	0.237	0.388	0.507
Borujerd	1.29	0.258	0.402	0.515
Khorramabad	1.28	0.231	0.392	0.518
Kuhdasht	1.33	0.259	0.396	0.500
Poldkhtar	1.38	0.062	0.286	0.475
Hamedan	1.44	0.143	0.277	0.458
Kabudarahng	1.37	0.212	0.360	0.485
Malayer	1.43	0.104	0.255	0.461
Nahavand	1.42	0.192	0.328	0.464

پارامترهای اقلیمی شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه ($^{\circ}C$)، بارش (mm) و تابش خورشیدی ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) به‌صورت بلندمدت (۲۰۱۰-۱۹۸۰) برای شهرستان‌های مورد مطالعه است که از ایستگاه‌های هواشناسی جمع‌آوری شد. با توجه به عدم وجود تابش در برخی مناطق، این داده‌ها با استفاده از روش‌های متداول در بازسازی داده‌های هواشناسی تولید شد. به همین منظور در صورت نیاز برای محاسبه تابش و تصحیح آن بر اساس ساعات آفتابی از رابطه خطی آنگستروم (Almorox et al., 2005) استفاده شد:

$$Rs = \left(a + b \frac{n}{N}\right) Ra \quad \text{معادله ۱}$$

در این معادله، Rs نشان‌دهنده تابش روزانه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، n تعداد ساعات آفتابی، N حداکثر تعداد ساعات آفتابی ممکن و Ra تابش فرازمینی ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) می‌باشد. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبره شده محلی هستند. در این تحقیق مقدار پارامترهای a و b برای مناطق مختلف در استان‌های همدان و لرستان به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد.

ورودی‌های مدیریتی شامل تراکم بوته (۳۵۰ بوته در متر مربع)، فاصله بین ردیف (۲۵ سانتی‌متر)، نوع شخم (مرسوم)، عمق کاشت (پنج سانتی‌متر)، تاریخ کاشت (۳۰ مهر)، تعداد آبیاری و مقدار کود نیتروژن می‌باشند. این اطلاعات مربوط به کشاورزان هر شهرستان می‌باشد که از طریق تهیه پرسش‌نامه و توزیع بین کشاورزان جمع‌آوری شده است (جدول ۱). افزون‌براین، ورودی دیگر مورد نیاز برای اجرای مدل، اطلاعات گیاهی است. در واقع اطلاعات گیاهی یک رقم شامل ضرایب ژنتیکی آن رقم می‌باشد که به‌وسیله آزمایش‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری می‌شوند که در بخش بعد به آن پرداخته شده است.

۲-۳. ارزیابی مدل زراعی

ارزیابی مدل شامل واسنجی و اعتبارسنجی مدل زراعی بود که از آزمایش اول برای واسنجی و از آزمایش دوم به منظور اعتبارسنجی استفاده شد. آزمایش اول در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، واقع در شهرستان خرم‌آباد، کیلومتر پنج جاده خرم‌آباد- اندیمشک با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۱۲۵ متر از سطح دریا در شرایط پتانسیل انجام گرفت. آزمایش به صورت اسپلیت پلات در پایه بلوک‌های کامل تصادفی بود. کرت‌های اصلی شامل تیمارهای تاریخ کاشت در چهار سطح (۱۵ مهر، ۳۰ مهر، ۱۵ آبان و ۳۰ آبان) و کرت‌های فرعی شامل ارقام مختلف جو آبی (رقم زودرس آذران، متوسط‌رس جلگه و دیررس بهمن) بود. معیار انتخاب چهار تاریخ کاشت، بازه کاشت کشاورزان در منطقه خرم‌آباد بود، به طوری که تاریخ کاشت‌های زود هنگام تا دیر هنگام را پوشش دهد. پیش از شروع آزمایش نمونه برداری از نقاط مختلف خاک محل اجرای طرح از سه عمق ۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر انجام گرفت. بعد از کشت بلافاصله آبیاری صورت گرفت (جدول ۳). هر کرت شش ردیف به طول شش متر با فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود و بذرها در عمق سه تا پنج سانتیمتری کاشته و تراکم نهایی بر اساس ۴۰۰ بوته در متر مربع تنظیم شد. عملیات داشت شامل آبیاری، کوددهی و مبارزه با بیماری‌ها و آفات شایع در منطقه و علف‌های هرز در مواقع لزوم انجام گرفت، به طوری که هیچ‌گونه آثاری از تنش خشکی، کمبود عناصر غذایی، آفت‌زدگی، بیماری و خسارت علف‌های هرز در گیاه جو مشاهده نشد و گیاه توانست در شرایط پتانسیل رشد کند. برای اندازه‌گیری مراحل فنولوژیک ابتدا تعداد شش بوته در هر کرت در مرحله سبز شدن با علامت‌گذاری مشخص و تمامی یادداشت‌برداری‌های فنولوژیک تا انتهای دوره رشد روی این بوته‌ها انجام شد. به منظور اندازه‌گیری عملکرد نهایی و اجزای عملکرد با رعایت حاشیه تعداد دو خط کاشت در پایان فصل رشد برداشت و عملکرد آن تعیین شد. برای واسنجی از صفات روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، بیوماس و عملکرد دانه استفاده شد و پارامترهای ویژه رقم جلگه (به‌عنوان رقم مرسوم مناطق مورد بررسی) از طریق واسنجی مدل به‌دست آمد (جدول ۴). برای واسنجی از تیمارهای رقم جلگه در چهار تاریخ کاشت ذکر شده استفاده شد. در مرحله واسنجی گیاه جو ابتدا پارامترهای مربوطه نمو و فنولوژی واسنجی و سپس پارامترهای مربوطه سرعت رشد دانه، تعداد دانه و عملکرد دانه واسنجی شدند. در واسنجی هر پارامتر ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده (در سطح مزرعه) وارد مدل شد، اگر داده وارد شده (اندازه-گیری شده) و شبیه‌سازی شده با یک درصد خطای قابل قبول به یکدیگر نزدیک باشد، به‌عنوان پارامتر واسنجی شده در نظر گرفته می‌شود. اگر درصد خطا بالا بود، مقدار ورودی با تغییر، به مقدار شبیه‌سازی شده نزدیک شده و این کار تا جایی ادامه یافت که دقت شبیه‌سازی دارای درصد خطای قابل قبولی شود. همچنین باید ذکر شود که تغییرات در مقدار هر پارامتر در دامنه‌ای که در مدل برای گروه‌های مختلف رسیدگی تعریف کرده است صورت گرفت. آزمایش دوم شامل آزمایش مزرعه‌ای در قالب طرح اسپلیت پلات فاکتوریل در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی واقع در شهر همدان (طول و عرض جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و ۳۴ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۷۴۰ متر) در سال ۱۳۹۸ انجام شد. در آزمایش مذکور سطوح مختلف آبیاری، نیتروژن و رقم مورد بررسی قرار گرفتند. فاکتور اصلی شامل سه سطح آبیاری به صورت ۹۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه، ۶۰ تا ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه و ۳۰ تا ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه بودند. فاکتورهای فرعی شامل سه سطح رقم (رقم زودرس آذران، متوسط‌رس جلگه و دیررس بهمن) و سه سطح نیتروژن (سه سطح صفر، ۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌عنوان متوسط و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به‌عنوان بهینه) بودند. تعیین میزان نیتروژن باتوجه‌به میزان آزمون خاک بود (جدول ۴).

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های محل آزمایش در خرم‌آباد و همدان برای واسنجی مدل و اعتبارسنجی مدل.

Location	Soil depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	BD (g cm ⁻³)	OC (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)	N (%)	K (Mg kg ⁻¹)	P (Mg kg ⁻¹)
Khorramabad	0-30	38	25	37	1.36	0.72	7.5	1.4	0.1	413	47
	30-60	38	26	36	1.55	0.41	7	1.2	0.06	412	52
	60-90	36	26	38	1.72	0.35	7.6	1	0.03	410	63
Hamedan	0-30	45	26	29	1.55	0.47	8	1.13	0.04	471	35
	30-60	43	26	31	1.5	0.43	7.3	1	0.03	447	29
	60-90	49	26	25	1.58	0.38	8	0.9	0.03	411	27

BD: وزن مخصوص ظاهری؛ OC: کربن آلی؛ pH: اسیدیته خاک؛ EC: هدایت الکتریکی؛ N: نیتروژن؛ K: پتاسیم؛ P: فسفر.

بر این اساس، تعداد کل واحدهای آزمایشی ۸۱ واحد بود. تراکم برابر ۴۰۰ بوته در متر مربع بود. در تاریخ هفدهم آبان ۱۳۹۸ کاشت تمامی ارقام با فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر انجام شد. عملیات کنترل حشرات، بیماری‌های احتمالی و علف‌های هرز به‌خوبی صورت گرفت؛ به‌طوری‌که هیچ‌گونه آثاری از آفت‌زدگی، بیماری و خسارت علف‌های هرز در مزرعه مشاهده نشد. برای اعتبارسنجی از تیمارهای رقم جلگه در سطوح مختلف ذکر شده نیتروژن و آبیاری استفاده شد.

جدول ۴. مقدار ضرایب ژنتیکی برای رقم جلگه که از طریق واسنجی مدل به‌دست آمد.

Coefficient	Value	Unit
Thermal time accumulation from flowering to start of grain filling	470	°Cd
Number of grain per stem	34	-
Grain growth rate	0.0010	mg kernel ⁻¹ d ⁻¹
Sensitivity coefficient to photoperiod	3.1	-
Sensitivity coefficient vernalization	1.5	-

°Cd: درجه روز رشد؛ mg kernel⁻¹d⁻¹: میلی‌گرم وزن دانه بر روز.

برای ارزیابی مدل و مقایسه مقدارهای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، بیوماس و عملکرد دانه از شاخص‌های آماری nRMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (Wallach & Goffinet, 1987)؛ d-index؛ شاخص توافق (Willmott, 1982)؛ MBE؛ میانگین انحراف خطا (Willmott & Matsuura, 2005) با توجه به رابطه‌های زیر استفاده شد:

$$nRMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$d\text{-index} = 1.0 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad \text{رابطه ۲}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{n} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این روابط n: تعداد مشاهدات؛ O: داده مشاهده‌شده؛ S: داده شبیه‌سازی شده و \bar{O} : میانگین داده مشاهده‌شده می‌باشند. مقادیر شاخص nRMSE در بازه‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ درصد به‌ترتیب نشان‌دهنده وضعیت ایده‌آل (عالی) مناسب (خوب) و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد بیانگر عدم کارآبودن مدل می‌باشد (Dettori et al., 2011; Deihimfard et al., 2019). مقدار شاخص d-index بین ۰-۱ متغیر است که میزان انطباق میان داده‌های مشاهده‌شده و مقادیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و نزدیک بودن مقدار این شاخص به یک بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر واقعی و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است. MBE برآورد کم و بیش از حد مدل را نشان می‌دهد که از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت متغیر است و دقت مدل با نزدیک شدن مقدار MBE به صفر افزایش می‌یابد. علاوه بر شاخص‌های بالا، از ضریب تبیین برای اندازه‌گیری دقت مدل نیز در مطالعه حاضر بهره‌گیری شد. ضریب تبیین نسبت پراکندگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده‌شده را نشان می‌دهد (Mendenhall et al., 1996). در صورت وجود تطابق کامل رگرسیونی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده، مقدار ضریب تبیین برابر با یک بوده و با کاهش مقدار این شاخص، درصد کمتری از تغییرات داده‌ها توسط خط رگرسیونی توجیه می‌شود. در صورت عدم وجود هیچ‌گونه رابطه رگرسیونی مقدار ضریب تبیین صفر خواهد بود. بنابراین این ضریب بین صفر و یک متغیر می‌باشد که نزدیک بودن به یک نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی صفت مورد نظر می‌باشد. در این تحقیق برای تمامی تجزیه‌های آماری و رسم شکل‌ها و نمودارها از نرم‌افزار OriginPro (Seifert, 2014) استفاده شد.

۲-۴. شبیه‌سازی اقلیم آینده: مدل و سناریوهای اقلیمی

به‌منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد جو آبی در شرایط تغییر اقلیم آینده در استان لرستان و همدان ابتدا اقلیم آینده شهرستان‌های این استان‌ها با استفاده از مدل گردش عمومی HadGEM2-ES، سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 و روش AgMIP¹ شبیه‌سازی شد. در این روش سناریوهای اقلیمی آینده بر اساس داده‌های اقلیمی دوره پایه (شامل دمای بیشینه و کمینه، بارندگی و

تابش) از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ برای دوره آینده (۲۰۷۰-۲۰۴۰) تحلیل شدند. معیار استفاده از مدل گردش عمومی HadGEM2-ES دقت شبیه‌سازی و بازتولید داده‌های آب و هوایی این مدل برای اقلیم ایران بود (Ghahreman *et al.*, 2015; Rahimi-Moghaddam & Azizi, 2018; Ahmadi *et al.*, 2019a,b). سناریوهای اقلیمی در این تحقیق با استفاده از روش سناریوی دلتا در مدل گردش عمومی CMIP5² و با ابزارهای تولید سناریوهای اقلیمی (کد نوشته شده به زبان برنامه‌نویسی R) که توسط AgMIP ارائه شده است تولید شدند. به این صورت که از یک بسته نرم‌افزاری که توسط موسسه AgMIP به زبان برنامه‌نویسی R است استفاده شد. این بسته نرم‌افزاری روی نرم‌افزار R قابل نصب است بعد از نصب این بسته نرم‌افزاری داده‌های اقلیمی این دوره پایه شامل دمای کمینه و بیشینه، بارندگی و تابش به فرمت مورد نیاز تهیه شد و به عنوان ورودی وارد نرم‌افزار مورد نظر شدند. سپس با تعیین دوره و سناریو داده‌های اقلیمی آینده تولید شدند. همچنین میزان دی‌اکسید کربن تحت دوره پایه، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۳۶۰، ۴۹۹ و ۵۷۱ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد (Amiri *et al.*, 2021).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. واسنجی اعتبارسنجی مدل

نتایج مرحله واسنجی نشان داد که مدل با دقت بسیار خوبی صفات مختلف برای رقم جو جلگه را شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۵). همان‌طور که در جدول ۵ مشخص می‌باشد ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، شاخص توافقی و میانگین انحراف خطا به ترتیب برای روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی به ترتیب برابر با ۲/۲ و ۱/۰۴ درصد، ۰/۹۹ و ۰/۹۷ و ۰/۵- و ۰/۵+ روز بود. همچنین تغییرات در شبیه‌سازی روز تا گلدهی در تیمارهای مختلف تاریخ کاشت از ۱۰۲ تا ۱۵۱ روز متغیر و مقدارهای مشاهده شده از ۱۰۳ تا ۱۴۷ روز تغییرات داشت. همچنین این مقدارها برای روز تا رسیدگی به ترتیب برابر با ۱۷۲ تا ۱۸۹ روز و ۱۷۳ تا ۱۸۸ روز بود. برای بیوماس و عملکرد دانه ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، شاخص توافقی و میانگین انحراف خطا به ترتیب برابر با ۵/۱۸ و ۴/۷۴ درصد، ۰/۹۷ و ۰/۹۵ و ۰/۲۱۲- و ۰/۸۱۴+ تن در هکتار بود.

جدول ۵. نتایج واسنجی مدل برای صفات مختلف رقم جلگه تحت تاریخ کاشت‌های مختلف.

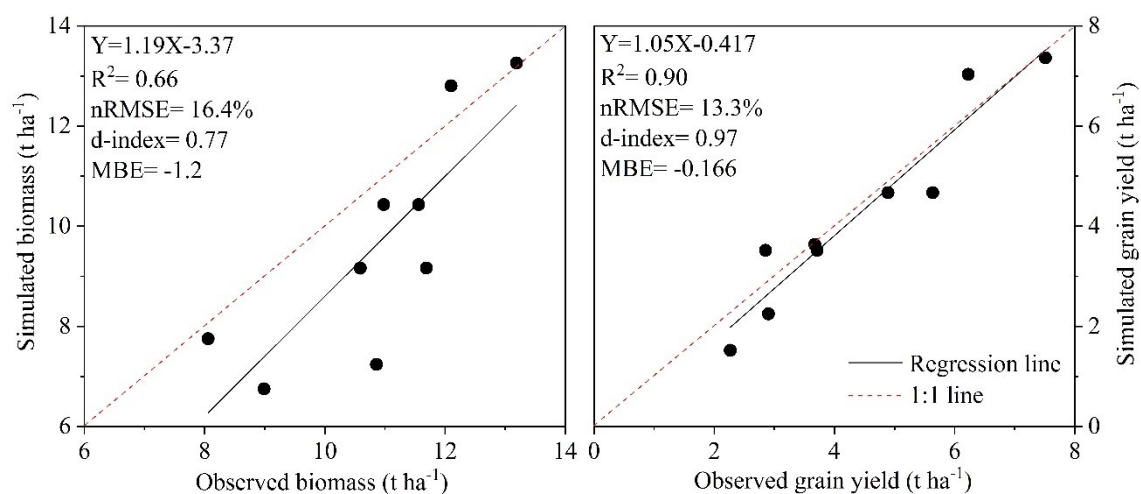
Index	Sowing date	Days to flowering		Days to maturity		Biomass (t.ha ⁻¹)		Grain yield (t.ha ⁻¹)	
		S	O	S	O	S	O	S	O
	7-Oct	102	103	172	174	15	14.5	6.3	6.3
	22-Oct	131	132	178	178	19.1	18.3	9.2	10
	6-Nov	138	142	176	173	20.6	19.5	9.5	9.2
	21-Nov	151	147	189	188	19.4	18.5	9.1	9.4
nRMSE (%)		2.22		1.04		5.18		4.74	
d-index		0.99		0.97		0.97		0.95	
MBE		-0.5		+0.5		-0.212		+0.814	
n		4		4		4		4	

S و O به ترتیب مقدارهای شبیه‌سازی و مشاهده شده صفات مختلف را نشان می‌دهند؛ nRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده؛ d-index: شاخص توافقی؛

MBE: میانگین انحراف خطا؛ n: تعداد مشاهدات.

نتایج اعتبارسنجی مدل حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل در شبیه‌سازی صفات بیوماس و عملکرد دانه برای رقم جو جلگه تحت شرایط مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن بود (شکل ۱). ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، شاخص توافقی و میانگین انحراف خطا برای بیوماس به ترتیب برابر با ۰/۶۶، ۱۶/۴ درصد، ۰/۷۷ و ۱/۲- تن در هکتار بود. این در حالی بود که شاخص‌های بیان شده برای عملکرد دانه به ترتیب برابر با ۰/۹، ۱۳/۳ درصد، ۰/۹۷ و ۰/۱۶۶- تن در هکتار بود (شکل ۱). به طور کلی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل APSIM-Barley نشان داد که این مدل می‌تواند به خوبی رشد، نمو و عملکرد رقم جو جلگه را شبیه‌سازی کند. واسنجی دقیق و تعیین پارامترهای رقم می‌تواند در نهایت باعث شبیه‌سازی دقیق در مرحله اعتبارسنجی مدل شود. به طور کلی واسنجی دقیق پارامترهای فنولوژیک می‌تواند باعث پیش‌بینی دقیقی در شاخص سطح برگ و نهایتاً بیوماس شود. این بیوماس تولیدی نهایتاً باید در بین اندام‌های مختلف گیاه تقسیم شود که ارزیابی دقیقی از پارامترهایی نظیر وزن دانه و تعداد دانه در ساقه می‌تواند به این موضوع کمک کند. نشان داده شده است که شبیه‌سازی دقیق مرحله گلدهی باعث شبیه‌سازی

دقیق شاخص سطح برگ می‌شود که باعث برآورد دقیق تشعشع جذبی توسط گیاه می‌شود و در نهایت بیوماس با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌شود (Archontoulis *et al.*, 2014). با وجود اینکه مدل عملکرد دانه را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد، اما در شبیه‌سازی بیوماس ضعیف‌تر عمل کرد. همان‌طور که بیان شد اعتبارسنجی مدل تحت شرایط محدودیت آب و نیتروژن صورت گرفته است. به‌نظر می‌رسد تحت این شرایط نسبت به شرایط پتانسیل کارایی مدل کمتر می‌باشد. گزارش شده است که ضعف اصلی مدل APSIM، عدم حساسیت مدل نسبت به تأثیر کمبود نیتروژن بر فنولوژی گیاه است (Madadzadeh *et al.*, 2022). این موضوع می‌تواند تحت شرایط محدودیت نیتروژن در نهایت روی بیوماس از طریق تأثیر روی طول دوره رشد تا حدودی تأثیرگذار باشد. بیان شده است که میزان رطوبت خاک در طول فصل رشد گندم با دقت بالایی توسط مدل APSIM شبیه‌سازی شد؛ به‌طوری‌که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده از ۵/۳ درصد تا ۱۱ درصد و مقادیر شاخص توافقی از ۰/۸۶ تا ۰/۹۷ در تیمارها و فصول مختلف کشت متغیر بود. همچنین نشان داده شده که مدل APSIM عملکرد دانه گندم در مرحله اعتبارسنجی را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد؛ به‌طوری‌که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برابر با ۱۲/۳ درصد، میانگین انحراف خطا برابر با ۱۰۵ کیلوگرم در هکتار، شاخص توافقی برابر با ۰/۹۹ و مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۸۸ بود (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021). در شبیه‌سازی اثر تاریخ کاشت روی رشد و نمو ارقام نخود در شهرستان کرمانشاه با مدل CROPGRO-CHICKPEA، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای ارقام و تاریخ کاشت‌های مختلف برابر با ۵/۱۳ درصد گزارش شده بود (Hajishabani *et al.*, 2020). در تحقیقی گزارش شد که مدل APSIM برای یک مجموعه داده از ۱۲ کشور، مجموعه‌ای از خاک‌ها، روش‌های مدیریتی و محصولات مختلف در آسیا مورد بررسی قرار گرفت که مدل عملکرد دانه محصولات مختلف از جمله گندم و ذرت را به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۹ و ۰/۸۵ شبیه‌سازی کرد و در زمینه شبیه‌سازی عملکرد دانه سویا و کلزا ضریب تبیین به‌ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۰/۷۱ بود (Gaydon *et al.*, 2017).

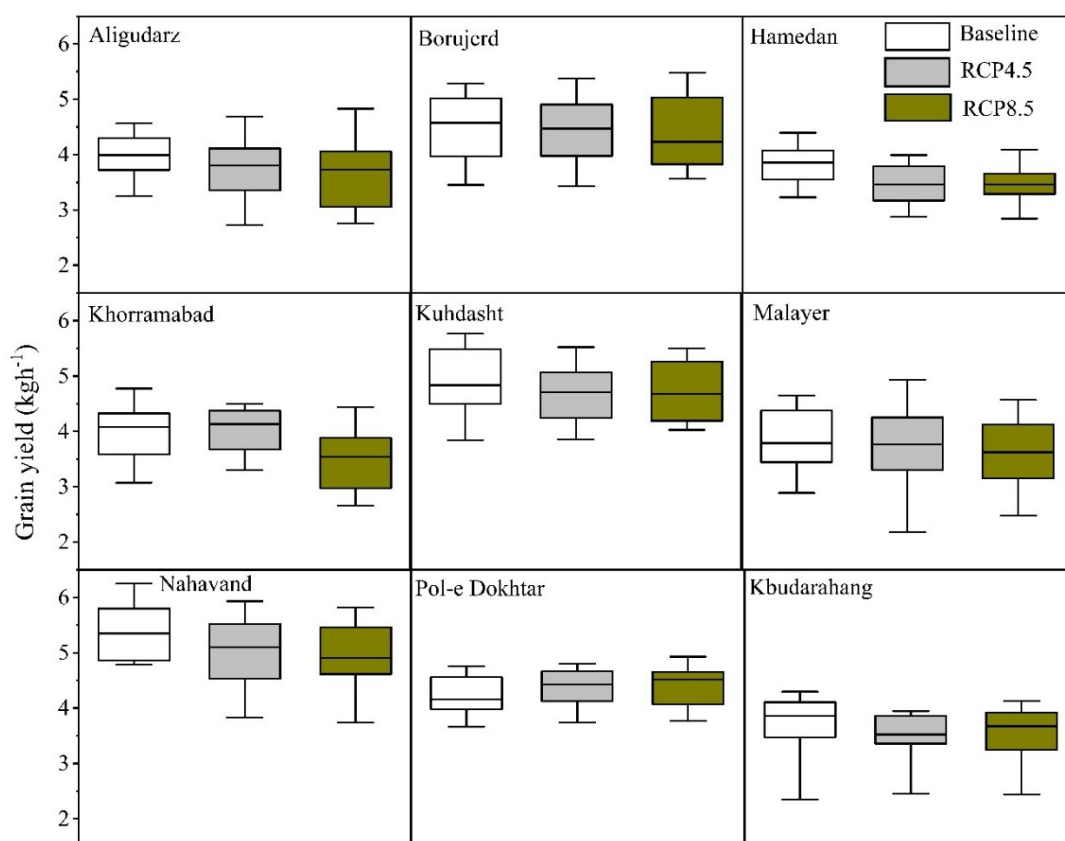


شکل ۱. اعتبارسنجی بیوماس و عملکرد دانه برای رقم جلگه تحت تیمارهای مختلف آبیاری و نیتروژن. R^2 : ضریب تبیین؛ nRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده؛ d-index: شاخص توافقی؛ MBE: میانگین انحراف خطا؛ n: تعداد مشاهدات.

۳-۲. تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه محصول جو آبی

به‌طور کلی عملکرد دانه محصول جو در دوره پایه در سراسر مناطق مورد بررسی برابر با ۴/۲ تن در هکتار بود (شکل ۲). همچنین تولید گیاه جو در استان لرستان (۴/۳ تن در هکتار) بیشتر از استان همدان (۴/۱ تن در هکتار) بود. در بین مناطق مورد بررسی عملکرد دانه از ۵/۳ تن در هکتار در شهرستان نهاوند تا ۳/۸ تن در هکتار در شهرستان همدان متغیر بود. تغییرات و اختلاف عملکرد دانه در مناطق مورد بررسی در دوره پایه را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله اقلیم، خاک و عوامل مدیریتی نسبت داد. به‌عنوان مثال از لحاظ تغییرات دمایی، میانگین دما در طول دوره رشد از شش درجه سانتی‌گراد تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد در بین مناطق متغیر بود. همچنین از لحاظ ظرفیت نگهداری آب خاک در بین مناطق این اختلاف از ۱۳۴ میلی‌متر تا ۲۲۴ میلی‌متر متغیر بود. از سوی

دیگر میزان کوددهی نیتروژن در بین مناطق مختلف از ۱۷۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تا ۲۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار اختلاف داشت (جدول ۱). در تحقیقی نشان داده شد که حرکت از کشت زمستانه ذرت به سمت کشت تابستانه باعث کاهش ۲/۶ درجه سانتی‌گراد در طول فصل رشد شد و به موازت آن طول دوره رشد به میزان ۷/۹ روز افزایش یافته و کارایی مصرف آب و عملکرد دانه به ترتیب ۴/۳۸ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر و ۸۸/۳۲ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019). در زمینه تاثیر خاک، به‌عنوان مثال، در غرب و جنوب استرالیا با ظرفیت نگهداری آب خاک ۱۰۰ میلی‌متر و منطقه شرق با ظرفیت نگهداری آب خاک ۱۵۰ میلی‌متر از لحاظ نوع تاثیر خشکی بر عملکرد گندم دیم اختلاف قابل توجهی وجود داشت (Chenu *et al.*, 2013). همچنین در زمینه تاثیر مدیریت بر تغییرات عملکرد در مناطق مختلف نشان داده شده که در استان خراسان رضوی مدیریت آبیاری در مناطق مختلف این استان باعث تغییراتی از ۶۱/۲۲- تا ۴۸/۲۹+ درصد در دوره آینده نسبت به دوره پایه در عملکرد دانه ذرت شد (Moradi *et al.*, 2013).



شکل ۲. عملکرد دانه در مناطق مختلف تحت دوره پایه و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5. طول هر باکس نشان‌دهنده تغییرات در بین سال‌های شبیه‌سازی شده است.

به‌طور میانگین در سراسر مناطق مورد بررسی عملکرد دانه گیاه جو ۴/۷- درصد نسبت به دوره گذشته کاهش خواهد یافت. این در حالی است که کاهش عملکرد دانه در سناریوهای مورد بررسی از ۳/۸- درصد تحت RCP4.5 تا ۵/۷- درصد RCP8.5 بود (شکل ۲). همچنین کاهش عملکرد در استان همدان (۷/۸- درصد) از استان لرستان (۲/۳- درصد) بیشتر بود. در بین مناطق مورد مطالعه میزان کاهش از ۱/۸- درصد تحت سناریوی RCP8.5 در منطقه بروجرد تا ۱۱/۳- درصد تحت سناریوی RCP8.5 در شهرستان همدان متغیر بود. با وجود کاهش در اکثر مناطق در شهرستان پلدختر در استان لرستان میزان عملکرد افزایش پیدا کرد؛ به‌طوری‌که در این شهرستان تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 عملکرد دانه گیاه جو به ترتیب ۳/۱+ و ۴/۸+ درصد افزایش پیدا کرد (شکل ۲). به‌طور کلی افزایش دما باعث کاهش طول فصل رشد در مناطق مورد مطالعه شد. همان‌طوری‌که در جدول ۶ مشاهده می‌شود طول دوره رشد محصول جو در سراسر مناطق در دوره آینده با کاهش ۶/۸۳ درصدی مواجه می‌شود که این کاهش

طول دوره رشد همراه با افزایش دما به میزان ۱/۴۱ درجه سانتی‌گراد همراه است. در زمینه افزایش دما میزان افزایش دما تحت سناریوی RCP8.5 (۱/۴ درجه سانتی‌گراد) بیشتر از سناریوی RCP4.5 (۰/۹ درجه سانتی‌گراد) است که به موازات آن نیز طول دوره رشد در سناریو RCP8.5 (-۸/۱ درصد) به میزان بیشتری نسبت به سناریوی RCP4.5 (-۵/۸ درصد) کاهش پیدا خواهد کرد. بسیاری از مطالعات در زمینه تغییر اقلیم نشان می‌دهند که افزایش دما باعث کاهش طول دوره رشد محصولات کشاورزی می‌شوند که به موازات آن باعث کاهش عملکرد در محصولات زراعی می‌شود. به عنوان مثال در تحقیقی روی گندم آبی استان خوزستان نشان داده شد که تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 میانگین دما در طول دوره رشد گندم به ترتیب ۱/۶ و ۲/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند که طول دوره رشد گندم را ۷/۵ و ۹/۳ درصد کاهش می‌دهد و عملکرد گندم به ترتیب به میزان ۷/۹ و ۹/۳ درصد کاهش خواهد یافت (Eyni-Nargeseh *et al.*, 2020). در تحقیقی دیگر گزارش شده است که تغییر اقلیم و دماهای بالا باعث کاهش تعداد روزهایی می‌شود که گندم می‌تواند برای فرآیند فتوسنتز نور جذب کند که در نهایت باعث کاهش بیوماس و عملکرد دانه گندم می‌شود (Asseng *et al.*, 2015).

اگرچه عملکرد دانه در بیشتر مناطق کاهش پیدا کرد، ولی در شهرستان پلدختر میزان عملکرد دانه تحت سناریوهای اقلیمی افزایش پیدا کرد. این موضوع می‌تواند مربوط به اثرات مثبت دی‌اکسید کربن باشد؛ به طوری که اثر مثبت می‌تواند اثرات منفی افزایش دما را کاهش دهد. در تحقیقی اثرات مثبت دی‌اکسید کربن بر عملکرد دانه نخود مشاهده شد؛ به طوری که تحت شرایط بهینه مدیریتی عملکرد دانه نخود در سراسر بوم‌نظام‌های نخود کشور به طور میانگین نسبت به دوره پایه به میزان ۱۸۰۸/۴ کیلوگرم در هکتار افزایش پیدا می‌کند (Amiri *et al.*, 2021). تاثیر دما و دی‌اکسید کربن می‌تواند در مناطق مختلف متفاوت باشد؛ به طوری که گزارش شده است که عملکرد گندم دیم تحت شرایط تغییر اقلیم در مناطق شمالی چین کاهش پیدا می‌کند؛ در حالی که در مناطق جنوبی این کشور افزایش پیدا خواهد کرد (Lv *et al.*, 2013). همچنین در شهرستان پلدختر ظرفیت نگهداری آب خاک نسبت به شهرستان‌های دیگر همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است بیشتر است. این موضوع نیز می‌تواند به افزایش عملکرد در دوره آینده کمک کند. به طور کلی افزایش دما، منجر به افزایش سطح تبخیر و تعرق می‌شود (Hoseini *et al.*, 2013) و در نتیجه تنش خشکی به گیاه زراعی وارد می‌شود. این در حالی هست که خاکی با نگهداری آب بالاتر کمتر تحت تاثیر این تنش خشکی به واسطه افزایش دما و افزایش تبخیر و تعرق قرار می‌گیرد. بسیاری از مطالعات نشان‌دهنده تاثیر ویژگی‌های خاکی بر عملکرد دانه هستند (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021; Chenu *et al.*, 2013; Kholov'a *et al.*, 2013). به عنوان مثال در تحقیقی مشاهده شد که در مناطق خیلی سرد و بارانی عملکرد دانه خیلی کمتر از مناطق معتدل با بارندگی کم بود؛ چرا که در منطقه خیلی سرد و بارانی ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۹۰/۱ میلی‌متر) کمتر از منطقه معتدل با بارندگی کم (۱۱۱ میلی‌متر) بود (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021).

جدول ۶. میانگین دما و طول دوره رشد محصول جو در دوره پایه و تغییرات آن‌ها سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5.

Location	Mean temperature (°C)			Length of growing season		
	Baseline	RCP4.5	RCP8.5	Baseline (day)	RCP4.5 (%)	RCP8.5 (%)
Aligudarz	7.4	+0.87	+1.29	209.2	-5.7	-7.8
Borujerd	6.7	+0.8	+1.24	216.8	-5.5	-7.9
Khorramabad	9.7	+1.5	+2	183.3	-8.7	-11.7
Kuhdasht	9.6	+0.85	+1.3	184.0	-5.2	-7.9
Poldkhtar	13.0	+0.95	+1.5	148.7	-5.4	-8.9
Hamedan	6.5	+0.81	+1.2	213.2	-5.0	-7.3
Kabudarahng	6.0	+0.77	+1.2	216.8	-4.9	-7.0
Malayer	7.8	+0.8	+1.2	204.7	-5.2	-7.7
Nahavand	9.2	+0.8	+1.3	184.3	-4.5	-6.7

۴. نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج نشان داد که مدل APSIM-barley به خوبی توانست رشد و نمو محصول جو آبی را تحت تیمارهای مختلف مدیریتی شبیه‌سازی کند. بنابراین، مدل APSIM-barley می‌تواند در مطالعات مختلف از جمله بررسی تاثیر عوامل مدیریتی و تغییر

اقلیم روی محصول جو مورد استفاده قرار گیرد. باتوجه به اینکه ارزیابی مدل تحت تاریخ‌های مختلف کاشت، سطوح مختلف آبیاری و نیتروژن بوده است؛ بنابراین، مدل مذکور را می‌توان برای شرایط محدودیت آب و نیتروژن مورد استفاده قرار داد. همچنین نتایج مشخص کرد که در استان‌های همدان و لرستان به‌طور کلی عملکرد محصول جو در آینده تحت سناریوهای مورد بررسی کاهش پیدا خواهد کرد. لذا برای حفظ تولید این محصول در آینده باید راهکارهای سازگاری مختلفی در نظر گرفته شود. لذا پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی، محققان روی بررسی راهکارهای سازگاری (مانند تغییر در روش‌های مدیریتی همچون استفاده از ارقام مقاوم و تغییر در تاریخ کاشت) بر تولید محصول جو در آینده تحت شرایط تغییر اقلیم تمرکز کنند. همچنین، تنها در شهرستان پلدختر افزایش عملکرد محصول جو تحت شرایط تغییر اقلیم مشاهده شد که نشان‌دهنده عدم نیاز به استفاده راهکارهای سازگاری برای این منطقه می‌باشد و می‌توان در این شهرستان از راهکارهایی برای افزایش بیشتر عملکرد تحت شرایط تغییر اقلیم از جمله ارزیابی ارقام با تولید و پاسخ بهتر به افزایش دی‌اکسید کربن بهره گرفت.

۵. منابع

- Ahmadi, H., Ghalhari, G.F., & Baaghideh, M. (2019a). Impacts of climate change on apple tree cultivation areas in Iran. *Climatic Change*, 153(1), 91-103. (In Persian).
- Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A., Akbari Azirani, T., & Karami, J. (2019b). 'The performance of the HadGEM2-ES model in the evaluation of seasonal temperature anomaly of Iran under RCP scenarios'. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(3), 625-644. (In Persian).
- Almorox, J., Benito, M., & Hontoria, C. (2005). Estimation of monthly angstrom–prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, 30, 931–936.
- Amiri, S., Eyni-Nargeseh, H., Rahimi-Moghaddam, S., & Azizi, K. (2021). Water use efficiency of chickpea agroecosystems will be boosted by positive effects of CO₂ and using suitable genotype× environment× management under climate change conditions. *Agricultural Water Management*, 252, 106928.
- Anonymous (2017). Lorestan province crop statistics, Agricultural Jihad Organization of Lorestan Province. (In Persian).
- Archontoulis, S.V., Miguez, F.E., & Moore, K.J. (2014). Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States. *Agronomy Journal*, 106(3), 1025–1040.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., & Reynolds, M.P. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143-147.
- Babaeian, I., & Kouhi, M. (2012). Agroclimatic indices assessment over some selected weather stations of Khorasan Razavi province under climate change scenarios. *Water and Soil*, 26(4), 953-967. (In Persian).
- Chenu, K., Deihimfard, R., & Chapman, S.C. (2013). Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt—spatial and temporal trends. *New Phytologist*, 198(3), 801–820.
- Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Javanshir, F., & Pazoki, A. (2023). Quantifying major sources of uncertainty in projecting the impact of climate change on wheat grain yield in dryland environments. *Journal of Arid Land*, 1-17.
- Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., & Chenu, K. (2019). Risk assessment of frost damage to sugar beet simulated under cold and semi-arid environments. *International Journal of Biometeorology*, 63, 511-521.
- Dettori, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D., & Duce, P. (2011). Using CERES-wheat to simulate durum wheat production and phenology in southern Sardinia, Italy. *Field Crops Research*, 120(1), 179–188.
- Dietzel, R., Liebman, M., Ewing, R., Helmers, M., Horton, R., Jarchow, M., & Archontoulis, S. (2016). How efficiently do corn-and soybean-based cropping systems use water? A systems modeling analysis. *Global Change Biology*, 22, 666-681.
- Eyni-Nargeseh, H., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2020). Analysis of growth functions that can increase irrigated wheat yield under climate change. *Meteorological Applications*, 27(1), e1804.
- Gaydon, D.S., Wang, E., Poulton, P.L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R.P., Chaki, A.K., Chen, C., & Choudhury, B.U. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204, 52-75.
- Gahreman, N., Tabatabaei, M., & Babaeian, I. (2015). Investigation of uncertainty in the IPCC AR5 precipitation and temperature projection over Iran under RCP scenarios. Investigation of uncertainty in the IPCC AR5 precipitation and temperature projection over Iran under RCP scenarios. In: Proceedings of common future under climate change, 7-10 Jul., Paris, France.

- Hajjshabani, H., Mondani, F., & Bagheri, A. (2020). Simulation effects of sowing date on growth and yield of rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.) by CHICKPEA model. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(2), 197-212. (In Persian).
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., & Moore, A.D. (2014). APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327-350.
- Hoseini, S.S., Nazari, M., & Araghinejad, S. (2013). Investigating the impacts of climate on agricultural sector with emphasis on the role of adaptation strategies in this sector. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 1, 1-16. (In Persian).
- IPCC. (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, Pachauri, R.K., and Meyer, L.A., (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 pp.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N., Meinke, H., Hochman, Z., & McLean, G. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 267-288.
- Kholov'a, J., McLean, G., Vadez, V., Craufurd, P., & Hammer, G.L. (2013). Drought stress characterization of post-rainy season (rabi) sorghum in India. *Field Crops Research*, 141, 38-46.
- Kuchaki, A., & Nasiri Mahalati, M. (2017). Impacts of climate change and CO2 concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 1, 73-79. (In Persian).
- Kumagai, E., & Sameshima, R. (2014). Genotypic differences in soybean yield responses to increasing temperature in a cool climate are related to maturity group. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 265-272.
- Lv, Z., Liu, X., Cao, W., & Zhu, Y. (2013). Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171, 234-248.
- Madadzadeh, M., Amiri, S.R., Kambouzia, J., & Soufizadeh, S. (2022). Calibration and evaluation of APSIM model for simulation of growth and development of KSC 704 and Maxima maize hybrids under different amounts of nitrogen. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 20(4), 363-379.
- Mendenhall, W., Sincich, T., & Boudreau, N.S. (1996). A second course in statistics: Regression analysis. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.
- Moghaddam, H., Oveisi, M., Mehr, M.K., Bazrafshan, J., Naeimi, M.H., Kaleibar, B.P., & Müller-Schärer, H. (2023). Earlier sowing combined with nitrogen fertilization to adapt to climate change effects on yield of winter wheat in arid environments: Results from a field and modeling study. *European Journal of Agronomy*, 146, 126825.
- Rahimi-Moghaddam, S., & Azizi, K. (2018). Early sowing date as a strategy for improvement of maize yield and maize physiological and phenological characteristics in climate change conditions at Kermanshah province. *Journal of Crop Production*, 10(4), 91-105. (In Persian).
- Rahimi-Moghaddam, S., Dehinfard, R., Azizi, K., & Roostei, M. (2021). Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: A modelling approach. *European Journal of Agronomy*, 129, 126333.
- Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Dehinfard, R. (2017). Risk assessment of heat stress to grain maize in Khuzestan province under climate change. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(3), 749-764. (In Persian).
- Ramazanipour, M. (2018). Predict the impact of climatic change on the agro-climatic indexes and rice yield case study: North of Iran. *Journal of Regional Planning*, 8(32), 69-80. (In Persian).
- Seifert, E. (2014). OriginPro 9.1: Scientific data analysis and graphing software—Software Review. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54(5), 1552-1552.
- Tan, K., Zhou, G., Lv, X., Guo, J., & Ren, S. (2018). Combined effects of elevated temperature and CO2 enhance threat from low temperature hazard to winter wheat growth in North China. *Scientific Reports*, 8(1), 4336.
- Wallach, D., & Goffinet, B. (1987). Mean squared error of prediction in models for studying economic and agricultural systems. *Biometrics*, 43, 561-576.
- Wang, B., Li Liu, D., Asseng, S., Macadam, I., Yang, X., & Yu, Q. (2017). Spatiotemporal changes in wheat phenology, yield and water use efficiency under the CMIP5 multimodel ensemble projections in eastern Australia. *Climate Research*, 72, 83-99.
- Willmott, C.J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82.
- Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313.