

Evaluation of Irrigated Barley for Adaptation to Climate Change in Hamadan and Lorestan provinces

Ali Valipour¹, Khosro Azizi^{*2} , Sajjad Rahimi-Moghaddam³

Received: October 30, 2023

Accepted: May 21, 2024

1-Ph.D. Student, Dept. of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Khorramabad, Iran.

2-Prof., Dept. of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Khorramabad, Iran.

3-Assist. Prof., Dept. of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Khorramabad, Iran.

*Corresponding Author Email: azizi.kh@lu.ac.ir

Abstract

Background & Objective: The current research aimed to assess the adaptation of irrigated barley to climate changes in Hamadan and Lorestan provinces. Estimating future irrigated barley yield under different climate scenarios and providing solutions to improve irrigated barley yield under climate change conditions.

Materials & Methods: The study was conducted in 9 counties of Hamadan and Lorestan provinces. APSIM model was employed to simulate of barley growth and development. The future climate (2040-2070) of the counties was projected using HadGEM2-ES climate model, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, and AgMIP methodolog. Adaptation strategies included different cultivars (Azaran, Jolgeh and Bahman) and sowing dates (23-Sep, 7-Oct, 22-Oct, 6-Nov, and 21-Nov).

Results: The validation results of the APSIM model showed that the model accurately simulated grain yield under different treatments, so that the nRMSE was equal to 15.02%. The results indicated that climate change decreased barley grain yield in the studied provinces by -4% and -2% under RCP4.5 and RCP8.5, respectively. For various combinations, across all studied locations and climate scenarios, yield changed from -17.3% for 21-Nov × Azaran cultivar and +20.9% for 23-Sep and Jolgeh cultivar.

Conclusion: Based on the results obtained, future adaptation strategies should be considered to prevent the decline in irrigated barley yields in the provinces under study. Overall, in the future, optimal combinations were 23-Sep and Azaran cultivar for warm regions such as Pol-e Dokhtar, 23-Sep and Jolgeh cultivar for temperate areas such as Khorramabad and Kuhdasht, and, 21-Nov and Bahman cultivar for the other locations which are mostly cold regions.

Keywords: Agmip Methodology, APSIM Model, Barley Cultivars, Hadgem2-ES Climate Model, Sowing Date

بررسی سازگاری جو آبی در استان‌های همدان و لرستان با شرایط تغییر اقلیم

علی ولی‌پور^۱، خسرو عزیزی^{۲*}، سجاد رحیمی مقدم^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱
--------------------------	-------------------------

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
۲- استاد و استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
*مسئول مکاتبه: Email: azizi.kh@lu.ac.ir

چکیده

مقدمه و اهداف: هدف مطالعه حاضر شبیه‌سازی ارزیابی سازگاری جو آبی به تغییرات اقلیمی در استان‌های همدان و لرستان، برآورد عملکرد جو آبی در آینده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد جو آبی در شرایط تغییر اقلیم است.

مواد و روش‌ها: مطالعه در ۹ شهرستان استان‌های همدان و لرستان انجام شد. شبیه‌سازی رشد و نمو محصول جو با استفاده از مدل APSIM انجام شد. اقلیم آینده شهرستان‌ها با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2-ES، سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و روش AgMIP برای دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد. راهکارهای سازگاری شامل ارقام (آذران، جلگه و بهمن) و تاریخ کاشت‌های مختلف (۱ مهر، ۱۵ مهر، ۳۰ مهر، ۱۵ آبان و ۳۰ آبان) بودند.

یافته‌ها: نتایج اعتبارسنجی مدل زراعی APSIM نشان داد که مدل با دقت قابل قبولی عملکرد دانه را تحت تیمارهای مختلف شبیه‌سازی کرد به طوری که $nRMSE$ برابر با ۱۵/۰۲ درصد بود. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی باعث کاهش عملکرد محصول جو در استان‌های مورد بررسی به میزان ۴- و ۲- درصد به ترتیب برابر تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 شد. در زمینه ترکیب‌های مختلف، در سراسر مناطق مورد مطالعه و سناریوهای اقلیمی، تغییرات عملکرد از ۱۷/۳- درصد در ترکیب تاریخ کاشت ۳۰ آبان و رقم آذران و ۲۰/۹+ درصد در ترکیب تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم جلگه متفاوت بود.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج کسب شده باید راهکارهای سازگاری در آینده برای جلوگیری از کاهش محصول جو آبی در استان‌های مورد بررسی در نظر گرفته شود. به طور کلی، در دوره آینده ترکیب‌های بهینه در مناطق گرم مانند شهرستان پلدختر تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم آذران، در مناطق معتدل مانند خرم‌آباد و کوهدشت تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم جلگه و در سایر مناطق که اکثراً جز مناطق سرد هستند تاریخ کاشت ۳۰ آبان و رقم بهمن می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: ارقام جو، تاریخ کاشت، روش AgMIP، مدل اقلیمی HadGEM2-ES، مدل APSIM

مقدمه

سطح کره زمین به میزان ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (لی و همکاران ۲۰۲۱) که به طور قابل توجهی بخش کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (گونگ و گونگ ۲۰۲۰، جی و همکاران ۲۰۱۲). افزایش دما می‌تواند با

تغییر اقلیم به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در قرن ۲۱ شناخته می‌شود. انتظار می‌رود به علت افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ میانگین جهانی دمای

توجه به منطقه و گیاه زراعی باعث افزایش عملکرد محصول زراعی یا کاهش عملکرد آن شود. با این وجود با توجه به گزارش‌هایی که وجود دارد افزایش دما و تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث کاهش عملکرد گیاه جو (*Hordeum vulgare*) شود (بن‌تو و همکاران ۲۰۲۱). بنابراین، تاثیر تغییرات آب و هوایی بر گیاه جو و بررسی راهکارهای سازگاری از جمله انتخاب رقم و تنظیم تاریخ کاشت در مقیاس‌های زمانی و مکانی برای مقابله با اثرات منفی تغییرات آب و هوایی دارای اهمیت می‌باشد.

جو به عنوان یکی از چند محصول زراعی مهم دنیا به شماره می‌رود. در ایران، در میان محصولات زراعی، گیاه جو با اختصاص دادن سطح زیرکشتی برابر با ۶۰۰ هزار هکتار جو آبی و ۱/۳ میلیون هکتار جو دیم و در مجموع ۱/۸ میلیون هکتار و تولید ۳/۴ میلیون تن از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در این بین استان‌های لرستان و همدان به ترتیب با داشتن بیش از ۱۵۳ و ۱۵۴ هزار هکتار و نقش بسزایی در تولید (۵۶ هزار تن) این گیاه زراعی در کشور داشته‌اند (بی‌نام ۲۰۱۷).

اگرچه تغییرات اقلیمی در حال رخ دادن است، اما دانشمندان کشاورزی در حال توسعه راه‌هایی برای مقابله با آن هستند. از جمله این اقدامات می‌توان تنظیم تاریخ کاشت، کاربرد ارقام مقاوم به گرما و خشکی برای کاستن از کاهش عملکرد محصول اشاره کرد (چن و همکاران ۲۰۱۲). تولید محصول زراعی به شدت به شرایط آب و هوایی محلی مانند دما، بارندگی و تابش خورشیدی بستگی دارد که عملکرد محصول زراعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (لیو و همکاران ۲۰۲۱). شرایط آب و هوایی در هر مرحله رشد محصول زراعی نیز با تغییر رقم و تاریخ کاشت تغییر می‌کند که بر رشد و تشکیل عملکرد تاثیر گذار است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که کاشت زودرس نسبت به کاشت دیر هنگام و همچنین استفاده از ارقام مقاوم به گرما و خشکی (به ویژه ارقام زودرس) می‌تواند برای کاهش تلفات عملکرد استفاده شوند (گائو و همکاران ۲۰۱۸، لی و همکاران ۲۰۲۰، مقدم و همکاران ۲۰۲۳، دیهیم‌فرد و همکاران ۲۰۲۳a).

برای ارزیابی اثرات اقلیمی بر 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 زیست توده مراتع و درختان، رقابت با محصولات با علف‌های هرز سیستم‌های کشت مخلوط، تناوب و آیش، سیستم‌های جنگل زراعی، عوامل مدیریتی و پیش‌بینی‌های دقیق تولید محصول را در ارتباط با متغیرهای آب و هوا از جمله دما، بارش، تشعشع و دی اکسید کربن را دارد (کتینگ و همکاران ۲۰۰۳، هولزورث و همکاران ۲۰۱۴). این مدل برای شبیه‌سازی رشد و نمو و همچنین بررسی تغییرات اقلیمی در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال در تحقیقی توسط مقدم و همکاران (۲۰۲۳) در زمینه بررسی تاثیر مدیریت تاریخ کاشت و میزان نیتروژن بر روی عملکرد گندم زمستانه در ایران با استفاده از مدل APSIM نشان دادند که ریشه میانگین مربعات خطا برای شبیه‌سازی زیست توده 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 در شبیه‌سازی نشان دادند، با این حال، برای ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰، اکثر مدل‌های اقلیمی کاهش طول فصل رشد و عملکرد دانه را شبیه‌سازی کردند. در تحقیقی دیگر با استفاده از مدل APSIM در مناطق نیمه خشک 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 (دیهیم‌فرد و همکاران ۲۰۲۳b).

بنابراین، مطالعه حاضر بر انتخاب رقم گیاه جو و تنظیم کاشت برای انطباق با شرایط رشد، ارتقاء رشد و نمو گیاه و دستیابی به عملکرد پایدار و بالا متمرکز شد. با توجه به این موضوع، اهداف شامل: ارزیابی تغییرات آب و هوایی بر عملکرد دانه و صفات موثر بر رشد گیاه جو و تجزیه و تحلیل خطرات ناشی از تغییرات اقلیمی بر صفات مذکور و ارزیابی اثرات رقم و انتخاب تاریخ کاشت بر عملکرد دانه گیاه جو در استان‌های همدان و لرستان با استفاده از مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی APSIM بود.

مواد و روش‌ها

شهرستان‌های مورد بررسی در استان‌های لرستان

و همدان

شهرستان‌های مورد مطالعه در استان لرستان شامل الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوهدشت و پلدختر و استان همدان شامل همدان، ملایر، نهاوند و کبودرآهنگ بودند. 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 و 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. ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی شهرستان‌های مورد مطالعه در جدول ۱ مشاهده می‌شوند.

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

منطقه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (m)	میانگین دما سالانه (°C)	میانگین بارندگی سالانه (mm)	تعداد آبیاری	کود نیتروژن ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	تاریخ کاشت
الیگودرز	۴۹/۴۲	۳۳/۲۴	۲۰۲۲	۱۲/۴	۴۰۲	۵	۱۸۰	۲۳-مهر
بروجرد	۴۸/۴۵	۳۳/۵۵	۱۶۲۹	۱۴/۷	۴۵۷	۵	۲۰۰	۲۷-مهر
خرم‌آباد	۴۸/۱۷	۳۲/۲۶	۱۱۵۵	۱۷/۲	۵۰۰	۵	۱۷۵	۲۹-مهر
کوهدشت	۴۷/۳۹	۳۳/۳۱	۱۱۹۷	۱۵/۹	۳۶۷	۴	۲۲۰	۲۶-مهر
پلدختر	۴۷/۴۳	۳۳/۰۹	۷۱۳	۲۲/۸	۳۶۱	۵	۱۷۵	۲۱-مهر
همدان	۴۸/۵۳	۳۴/۸۷	۱۷۴۰	۱۱	۳۱۸	۵	۲۰۰	۱۸-آبان
کبودرآهنگ	۴۸/۴۲	۳۵/۱۲	۱۶۶۶	۹	۲۷۳	۶	۱۷۵	۱۱-آبان
ملایر	۴۸/۴۹	۳۴/۱۷	۱۷۲۵	۱۰/۵	۳۰۰	۶	۱۸۰	۲۶-مهر
نهاوند	۴۸/۱۵	۳۴/۱۵	۱۶۴۴	۱۲/۷	۴۱۰	۵	۲۲۰	۲۹-مهر

مدل APSIM^۱

در این تحقیق شبیه‌ساز مدل APSIM که توسط واحد تحقیقاتی سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی در استرالیا (APSRU^۲) تهیه شده است بکار گرفته شد. مدل مذکور توسط محققین استرالیایی طراحی شده است. این مدل رشد و نمو گیاه را در پاسخ به عوامل مختلف از جمله آب و هوا (دما، بارش و تابش)، خاک (رطوبت خاک و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. مراحل نمو، تجمع و تخصیص زیست توده، شاخص سطح برگ و نیز رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه را در مقیاس روزانه از مرحله کاشت تا رسیدگی توسط مدل شبیه‌سازی می‌شوند. در مدل APSIM، افزایش غلظت دی اکسید کربن از طریق تاثیر بر کارایی مصرف نور، کارایی تعرق و غلظت بحرانی نیتروژن برگ بر رشد گیاه زراعی تاثیر می‌گذارد (گایدون و همکاران ۲۰۱۷). در مدل APSIM سرعت

تبخیر رطوبت خاک و تعرق گیاه به صورت جداگانه و توسط نیاز بوم‌نظام و توانایی خاک برای تامین آب در پاسخ به این نیاز محاسبه می‌شود (دیتزل و همکاران ۲۰۱۶).

پارامترهای مورد نیاز برای اجرای مدل شامل پارامترهای اقلیمی، خاکی، مدیریتی و گیاهی می‌باشند. پارامترهای خاکی برای هر شهرستان شامل توصیف خاک، وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، محتوای رطوبتی در نقطه پژمردگی (میلی‌متر بر میلی-متر)، مزرعه (میلی‌متر بر میلی‌متر) و اشباع (میلی‌متر بر میلی‌متر) خاک می‌باشد. این داده‌ها از طریق مکاتبه با سازمان جهاد کشاورزی، مراکز تحقیقات منابع طبیعی و کشاورزی، آزمایشگاه‌های خاک، گزارشات سازمان خواروبار جهانی و همچنین سایت اطلس خلاء ایران در سطح هر شهرستان جمع‌آوری شد (جدول ۲).

^۱ The Agricultural Production Systems sIMulator^۲ The Agricultural Production Systems Research Unit

جدول ۲- ویژگی های خاکی شهرستان های مورد بررسی

مناطق	وزن مخصوص ظاهری خاک (g.cm^{-3})	ظرفیت رطوبت خاک در نقطه پژمردگی (mm.mm^{-1})	ظرفیت رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه (mm.mm^{-1})	ظرفیت رطوبت خاک در نقطه اشباع (mm.mm^{-1})
الیگودرز	۱/۳۱	۰/۲۳۷	۰/۳۸۸	۰/۵۰۷
بروجرد	۱/۲۹	۰/۲۵۸	۰/۴۰۲	۰/۵۱۵
خرم آباد	۱/۲۸	۰/۲۳۱	۰/۳۹۲	۰/۵۱۸
کوهدشت	۱/۳۳	۰/۲۵۹	۰/۳۹۶	۰/۵۰۰
پلدختر	۱/۳۸	۰/۰۶۲	۰/۲۸۶	۰/۴۷۵
همدان	۱/۴۴	۰/۱۴۳	۰/۲۷۷	۰/۴۵۸
کبودرآهنگ	۱/۳۷	۰/۲۱۲	۰/۳۶۰	۰/۴۸۵
ملایر	۱/۴۳	۰/۱۰۴	۰/۲۵۵	۰/۴۶۱
نهاد	۱/۴۲	۰/۱۹۲	۰/۳۲۸	۰/۴۶۴

مقدار کود نیتروژن می باشند. این اطلاعات مربوط به کشاورزان هر شهرستان می باشند که از طریق تهیه پرسشنامه و توزیع در بین کشاورزان جمع آوری شد (جدول ۱). افزون بر این، ورودی دیگر مورد نیاز برای اجرای مدل شامل اطلاعات گیاهی است. در واقع، اطلاعات گیاهی شامل ضرایب ژنتیکی ارقام مورد بررسی می- باشند که به وسیله آزمایشات مزرعه ای اندازه گیری شدند که در بخش بعد به آن پرداخته شده است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل زراعی

آزمایش اول برای واسنجی و آزمایش دوم به منظور اعتبارسنجی استفاده شد. آزمایش اول در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، واقع در شهرستان خرم آباد، کیلومتر ۵ جاده خرم آباد - 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 اسپلینت پلات در پایه بلوک های کامل تصادفی بود. کرت- های اصلی شامل تیمارهای تاریخ کاشت در چهار سطح (۱۵ مهر، ۳۰ مهر، ۱۵ آبان و ۳۰ آبان) و کرت های 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

پارامترهای اقلیمی شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه (درجه سانتی گراد)، بارش (میلی متر) و تابش خورشیدی (مگاژول بر متر مربع در روز) به صورت بلند مدت (۲۰۱۰ - ۱۹۸۰) برای شهرستان های مورد مطالعه بودند که از ایستگاه های هواشناسی جمع آوری شد. با توجه به عدم وجود تابش در برخی مناطق، این داده ها با استفاده از روش های متداول در بازسازی داده های هواشناسی تولید گردید. به همین منظور در صورت نیاز برای محاسبه تابش و تصحیح آن بر اساس ساعات آفتابی از رابطه خطی آنگستروم (آلموروکس و همکاران ۲۰۰۵) استفاده شد:

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

در این معادله، Rs نشان دهنده تابش روزانه (مگاژول بر متر مربع در روز)، n تعداد ساعات آفتابی، N حداکثر تعداد ساعات آفتابی ممکن و Ra تابش فرازمینی^۱ (مگاژول بر متر مربع در روز) می باشد. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبر شده محلی هستند. در این تحقیق، مقدار عددی پارامترهای a و b برای مناطق مختلف در استان- های همدان و لرستان به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد.

ورودی های مدیریتی شامل تراکم بوته (۳۵۰ بوته در متر مربع)، فاصله بین ردیف (۲۵ سانتی متر)، نوع شخم (مرسوم)، عمق کاشت (۵ سانتی متر)، تعداد آبیاری و

مدل برای گروه‌های مختلف رسیدگی تعریف شده است صورت گرفت.

آزمایش دوم شامل آزمایشی 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 (۱۰۰-۹۰) درصد ظرفیت مزرعه (۷۰-۶۰) درصد ظرفیت مزرعه و (۴۰-۳۰) درصد ظرفیت مزرعه بودند. فاکتورهای فرعی شامل سه سطح رقم (رقم زودرس آذران، متوسط رس جلگه و دیررس بهمن) و سه سطح نیتروژن (سه سطح صفر، ۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به عنوان متوسط و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به عنوان بهینه) بودند. تعیین نیتروژن با توجه به میزان آزمون خاک بود (جدول ۳). 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 سانتی متر انجام شد. عملیات کنترل حشرات، بیماری‌های احتمالی و علف‌های هرز به خوبی صورت گرفت به طوری که هیچ گونه آثاری از آفت زدگی، بیماری و خسارت علف هرز در مزرعه مشاهده نشد.

برای ارزیابی مدل و مقایسه مقدارهای شبیه سازی و اندازه گیری شده روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، زیست توده و عملکرد دانه از شاخص های آماری nRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (والاش و گافینت ۱۹۸۷)؛ d-index: شاخص توافق و یلموت (۱۹۸۲)؛ MBE: میانگین انحراف خطا (ویلموت و ماتسورا ۲۰۰۵) با توجه به رابطه های زیر استفاده شد:

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)^2}{n}} \times \frac{100}{O} \quad \text{معادله ۲}$$

$$d\text{-index} = 1.0 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si-\bar{O}| + |Oi-\bar{O}|)^2} \right] \quad \text{معادله ۳}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Si-Oi)}{n} \quad \text{معادله ۴}$$

خرم آباد بود بطوری 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 سانتی متر انجام گرفت. بعد از کشت، بلافاصله آبیاری صورت گرفت (جدول ۳). هر کرت ۶ ردیف به طول ۶ متر با فاصله ردیف ۲۰ سانتی متر و بذرها در عمق ۳ تا ۵ سانتی متری کاشت شدند 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 هیچ گونه آثاری از تنش خشکی، کمبود عناصر غذایی، آفت زدگی، بیماری و خسارت علف‌های هرز در گیاه جو مشاهده نشد و گیاه توانست در شرایط پتانسیل رشد کند. برای اندازه گیری مراحل فنولوژیک، ۶ بوته در هر کرت در مرحله سبز شدن با علامت گذاری شدند و تمامی یادداشت برداری‌های فنولوژیک تا انتهای دوره رشد روی این بوته‌ها انجام شد. به منظور اندازه گیری عملکرد نهایی و اجزای عملکرد با رعایت حاشیه تعداد ۲ خط کاشت در پایان فصل رشد، برداشت و عملکرد آن تعیین شد. برای واسنجی از صفات روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، زیست توده و عملکرد دانه استفاده شد و پارامترهای ویژه رقم ارقام مختلف از طریق واسنجی مدل به دست آمد (جدول ۴). برای واسنجی از تیمارهای رقم جلگه در چهار تاریخ کاشت ذکر شده استفاده شد. در مرحله واسنجی گیاه جو ابتدا پارامترهای مربوط به نمو و فنولوژی واسنجی شدند و بعد از آن پارامترهای مربوط به سرعت رشد دانه، تعداد دانه و عملکرد دانه واسنجی گردیدند. در واسنجی هر پارامتر ابتدا داده‌های اندازه گیری شده (در سطح مزرعه) وارد مدل شد، اگر داده وارد شده (اندازه گیری شده) و شبیه سازی شده با یک درصد خطا قابل قبول به یکدیگر نزدیک گردید، به عنوان پارامتر واسنجی شده در نظر گرفته می شود و اگر درصد خطای بالا بود، مقدار ورودی با تغییر، به مقدار شبیه سازی شده نزدیک گردید و این کار تا جایی ادامه یافت، که دقت شبیه سازی دارای درصد خطای قابل قبولی باشد. همچنین باید ذکر شود که تغییرات در مقدار هر پارامتر در دامنه‌ای که در

جدول ۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های محل آزمایش در خرم آباد و همدان برای واسنجی مدل و اعتبارسنجی مدل

منطقه	عمق خاک (cm)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	وزن مخصوص ظاهری خاک (g.cm ⁻³)	کربن آلی (%)	اسیدیته	شوری (dS.m ⁻¹)	نیتروژن (%)	پتاسیم (g.kg ⁻¹)	فسفر (g.kg ⁻¹)
خرم آباد	۳۰-۰	۲۸	۲۵	۳۷	۱/۳۶	۰/۷۲	۷/۵	۱/۴	۰/۱	۴۱۳	۴۷
	۶۰-۳۰	۳۸	۲۶	۳۶	۱/۵۵	۰/۴۱	۷	۱/۲	۰/۰۶	۴۱۲	۵۲
	۹۰-۶۰	۳۶	۲۶	۳۸	۱/۷۲	۰/۳۵	۷/۶	۱	۰/۰۳	۴۱۰	۶۳
همدان	۳۰-۰	۴۵	۲۶	۲۹	۱/۵۵	۰/۴۷	۸	۱/۱۳	۰/۰۴	۴۷۱	۳۵
	۶۰-۳۰	۴۳	۲۶	۳۱	۱/۵۰	۰/۴۳	۷/۳	۱	۰/۰۳	۴۴۷	۲۹
	۹۰-۶۰	۴۹	۲۶	۲۵	۱/۵۸	۰/۳۸	۸	۰/۹	۰/۰۳	۴۱۱	۲۷

جدول ۴- مقدار ضرایب ژنتیکی برای ارقام مختلف جو که از طریق واسنجی مدل به دست آمدند

ضریب	رقم			واحد
	بهمن	جلگه	آذران	
زمان حرارتی تجمعی از گلدهی تا شروع پرشدن دانه	۵۵۰	۴۷۰	۵۰۰	درجه روز رشد
تعداد دانه به ازای ساقه	۵۵	۳۴	۳۰	-
سرعت رشد دانه	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۵	میلی گرم دانه به ازای روز
ضریب حساسیت به فتوپریود	۴	۳/۱	۱/۵	-
ضریب حساسیت به بهاره سازی	۲	۱/۵	۱/۵	-

که در این روابط n : تعداد مشاهدات؛ O : داده مشاهده شده؛ S : داده شبیه سازی شده و $\bar{O}$: میانگین داده مشاهده شده می باشند. مقادیر شاخص $nRMSE$ در بازه های ۱۰-، ۲۰-، ۳۰-۲۰ درصد به ترتیب نشان دهنده وضعیت ایده آل (عالی) مناسب (خوب) و متوسط مدل در پیش بینی و بیشتر از ۳۰ درصد بیانگر عدم کارا بودن مدل می باشد (دتوری و همکاران ۲۰۱۱، دیهیم فرد و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار شاخص $d-index$ بین ۱-۰ متغیر است که میزان انطباق میان داده های مشاهده شده و مقادیر شبیه سازی شده را نشان می دهد و نزدیک بودن مقدار این شاخص به ۱ بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه سازی شده به مقادیر واقعی و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است. MBE برآورد کم و بیش از حد مدل را نشان می دهد که از منفی بی نهایت تا مثبت بی نهایت متغیر است و دقت مدل با نزدیک شدن مقدار MBE به صفر افزایش می یابد. علاوه بر شاخص های بالا، از ضریب تبیین برای اندازه گیری دقت مدل نیز در مطالعه حاضر بهره گیری شد. ضریب تبیین نسبت پراکندگی بین داده های پیش بینی شده و

مشاهده شده را نشان می دهد (مندنهای و همکاران ۱۹۹۶). در صورت وجود تطابق کامل رگرسیونی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده، مقدار ضریب تبیین برابر با ۱ بوده و با کاهش مقدار این شاخص، درصد کمتری از تغییرات داده ها توسط خط رگرسیونی توجیه می شود در صورت عدم وجود هیچگونه رابطه ای رگرسیونی مقدار ضریب تبیین صفر خواهد بود. بنابراین این ضریب بین صفر و یک متغیر می باشد که نزدیک بودن به یک، نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش بینی صفت مورد نظر می باشد.

پیش بینی اقلیم آینده

به منظور شبیه سازی رشد و عملکرد جو آبی در شرایط تغییر اقلیم آینده در استان لرستان و همدان ابتدا اقلیم آینده شهرستان های این استان ها با استفاده از مدل گردش عمومی HadGEM2-ES، سناریوهای اقلیمی

تهیه شد و به عنوان ورودی وارد نرم افزار موردنظر شدند. سپس با تعیین دوره و سناریو، داده‌های اقلیمی آینده تولید شدند. همچنین میزان دی اکسید کربن تحت دوره پایه، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۳۶۰، ۴۹۹ و ۵۷۱ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد (امیری و همکاران ۲۰۲۱).

آزمایش‌های شبیه‌سازی و راهکارهای سازگاری

آزمایش‌های شبیه‌سازی شامل ۹ منطقه (الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوهدشت، پلدختر، همدان، ملایر، نهاوند و کبودرآهنگ)، سه رقم جو (آذران، جلگه و بهمن)، پنج تاریخ کاشت تاریخ کاشت (۱ مهر، ۱۵ مهر، ۳۰ مهر، ۱۵ آبان و ۳۰ آبان)، ۳۱ سال، دور پایه، دوره آینده (شامل دو سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5) بودند. در این تحقیق از راهکارهای سازگاری تاریخ کاشت و ارقام مختلف استفاده شد. معیار انتخاب پنج تاریخ کاشت، بازه کاشت کشاورزان در مناطق مورد بررسی بود؛ بطوری که تاریخ کاشت‌های زودهنگام تا دیرهنگام را پوشش دهد. همچنین، برای تیمار رقم از سه رقم با طول دوره رسیدگی متفاوت استفاده شد؛ به طوری که ارقام آذران، جلگه (رقم مرسوم) و بهمن به ترتیب ارقام زودرس، متوسط‌رس و دیررس بودند. بنابراین، در مجموع تعداد آزمایشات شبیه‌سازی ۱۲۵۵۵ بود. در این تحقیق برای تمامی تجزیه‌های آماری و رسم شکل‌ها و نمودارها از نرم افزار OriginPro (سیفرت ۲۰۱۴) استفاده گردید.

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

نتایج واسنجی مدل مشخص کرد که nRMSE روز تا گلدی، روز تا رسیدگی، زیست توده و عملکرد دانه ۲/۴۳، ۲/۴، ۲۹/۹ و ۱۵/۰۲ درصد بود. میزان MBE روز تا گلدی و روز تا رسیدگی برابر ۰/۵۱ و ۲/۷- روز و برای زیست توده و عملکرد دانه برابر ۰/۶۴- و ۰/۰۳۴ تن در هکتار بود. همچنین d-index برای روز تا گلدی، روز تا

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 باز تولید داده‌های آب و هوایی این مدل برای اقلیم ایران بود (قهرمان و همکاران ۲۰۱۵، رحیمی‌مقدم و عزیزی ۲۰۱۸، احمدی و همکاران ۲۰۱۹، احمدی و همکاران ۲۰۱۹). مدل اقلیمی HadGEM2-ES ساخت کشور انگلستان می‌باشد و دارای قدرت تفکیک مکانی به میزان ۱/۹ درجه در ۱/۲۵ درجه می‌باشد. معیار انتخاب سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 این بود که هم سناریوهای خوش-بینانه و هم بدبینانه را مورد بررسی قرار بگیرد به طوری که RCP4.5 سناریوی خوش‌بینانه و RCP8.5 سناریوی بدبینانه می‌باشد. این سناریوها بر اساس نتایج حاصل از برخی فراسنجه‌های اجتماعی-اقتصادی، تکنولوژیکی و همچنین میزان غلظت برخی گازها برای دهه‌های آینده طراحی شده‌اند. در سناریوی RCP8.5، میزان غلظت دی-اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰، ۱۳۷۰ قسمت در میلیون تخمین زده شده است و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت‌های تابشی را تا ۸/۵ وات بر متر مربع تخمین زده است. در سناریوی RCP4.5، میزان غلظت دی-اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰، ۶۵۰ قسمت در میلیون تخمین زده شده است و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت‌های تابشی را ۴/۵ وات بر متر مربع تخمین زده است. 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 برنامه نویسی R) که توسط AgMIP ارائه شده است تولید شدند. به این صورت که از یک بسته نرم افزاری که توسط موسسه AgMIP به زبان برنامه نویسی R است استفاده شد. این بسته نرم افزاری بر روی نرم افزار R قابل نصب است بعد از نصب این بسته نرم افزاری داده‌های اقلیمی این دوره پایه شامل دمای کمینه و بیشینه، بارندگی و تابش به فرمت موردنیاز

² Coupled Model Intercomparison Project Phase

¹ Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project

رسیدگی، زیست توده و عملکرد دانه ۰/۹۸، ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ تخمین زده شد (جدول ۵).

نتایج اعتبارسنجی مدل زراعی نشان داد که nRMSE عملکرد دانه ۱۵/۰۲ درصد، MBE برابر ۰/۳۴ تن در هکتار، d-index ۰/۹۶ و R^2 برابر با ۰/۸۲ بود (شکل ۱). به طور کلی نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل APSIM مشخص نمود که این مدل می‌تواند به خوبی نمو و عملکرد ارقام مختلف جو را تحت شرایط مختلف مدیریتی شبیه‌سازی کند. نتایج آزمایشات مختلف نیز نشان‌دهنده این موضوع بود که مدل APSIM قدرت خوبی در شبیه‌سازی رشد و نمو محصولات مختلف را تحت شرایط متفاوت مدیریتی دارد (گایدون و همکاران ۲۰۱۷، آرچانتلیس و همکاران ۲۰۱۴، رحیمی مقدم و همکاران

۲۰۲۱). در مجموع واسنجی و اعتبار سنجی مدل APSIM نشان داد که این مدل می‌تواند به خوبی نمو و عملکرد دانه ارقام جو را شبیه‌سازی کند. محاسبه دقیق ضرایب ارقام مختلف توانست باعث شبیه‌سازی دقیق عملکرد دانه در مرحله اعتبارسنجی مدل شود. ارزیابی دقیق پارامترهای فنولوژیک باعث پیش‌بینی خوب شاخص سطح برگ و در نهایت زیست توده شد. زیست توده تولیدی در نهایت باید در بین اندام‌های مختلف گیاه تقسیم شود که ارزیابی دقیق پارامترهای وزن دانه و تعداد دانه در ساقه، می‌تواند به تسهیم دقیق زیست توده به دانه‌ها و نهایتاً تعیین دقیق عملکرد دانه شود (آرچانتلیس و همکاران ۲۰۱۴).

جدول ۵- نتایج واسنجی برای روز تا گلدهی، روزتا رسیدگی، زیست توده و عملکرد دانه

شاخص	روز تا گلدهی		روز تا رسیدگی		زیست توده (t.ha ⁻¹)		عملکرد دانه (t.ha ⁻¹)	
	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده
میانگین مشاهدات	۱۸۸/۱۵	۱۸۸/۶۶	۲۲۵/۳۷	۲۲۲/۶۶	۱۰/۵۸	۹/۹۳	۴/۴۳	۴/۴۶
ریشه میانگین مربعات	۲/۴۳		۲/۴		۲۴/۹			۱۵/۰۲
خطای نرمال								
میانگین انحراف خطا	۰/۵۱		-۲/۷		-۰/۶۴			۰/۰۳۴
شاخص توافق	۰/۹۹		۰/۹۹		۰/۹۸			۰/۹۶
تعداد مشاهدات	۲۷		۲۷		۲۷			۲۷

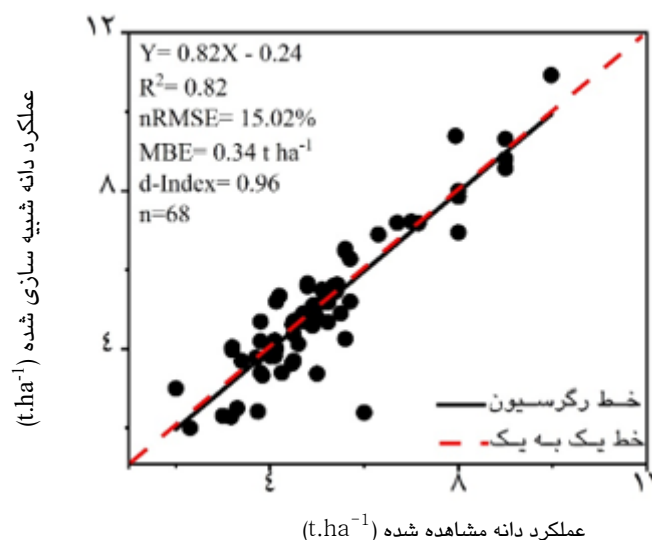
nRMSE: ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده؛ d-index: شاخص توافق؛ MBE: میانگین انحراف خطا؛ n: تعداد مشاهدات.

اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد دانه گیاه جو: راهکارهای سازگاری

تحت شرایط دوره پایه در سراسر مناطق مورد بررسی، ارقام و تاریخ کاشت‌ها، میزان عملکرد دانه جو برابر با ۳/۰۶ تن در هکتار بود. مقدار عملکرد استان لرستان برابر با ۳/۴ تن در هکتار بود و این میزان در استان کرمانشاه برابر با ۲/۷ تن در هکتار شبیه‌سازی شد. در بین مناطق در دو استان مورد بررسی میزان عملکرد بالاتری برای شهرستان پلدختر (۴/۳ تن در هکتار) به دست آمد. به طور میانگین در سراسر مناطق

و ارقام مورد بررسی، بالاترین عملکرد دانه (۴/۲ تن در هکتار) در تاریخ کاشت ۳۰ آبان ثبت شد و کمترین میزان عملکرد تحت تاریخ کاشت ۱ مهر با ۱/۹ تن در هکتار به دست آمد. در سراسر تاریخ کاشت‌ها و مناطق مورد بررسی میزان عملکرد بیشتری با مقدار ۳/۲ تن در هکتار برای رقم بهمن شبیه‌سازی شد و تحت این شرایط عملکرد کمتر با مقدار ۳ تن در هکتار مربوط به رقم آذران بود (شکل ۲). در دوره پایه در زمینه ترکیب‌های مختلف بالاترین عملکرد تحت ترکیب رقم آذران و تاریخ کاشت ۳۰ آبان (۴/۳ تن در هکتار) و کمترین عملکرد تحت ترکیب

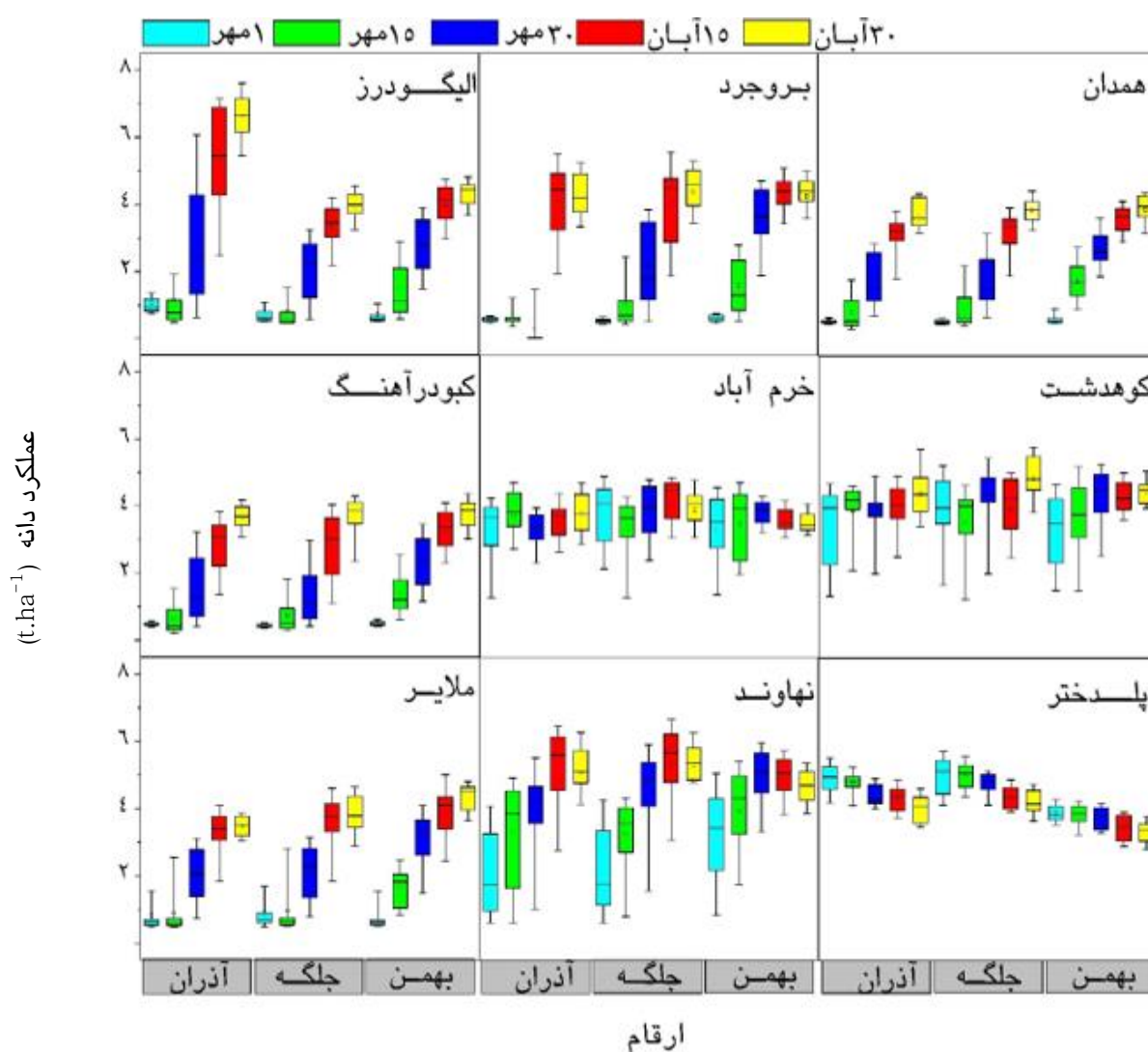
آذران و تاریخ کاشت ۱ مهر (۱/۹ تن در هکتار) ثبت شد. با این وجود در شهرستان پلدختر، بیشترین عملکرد با مقدار ۵/۰۱ تن در هکتار در ترکیب رقم جلگه و تاریخ کاشت ۱۵ مهر به دست آمد.



شکل ۱- اعتبارسنجی عملکرد دانه مدل APSIM برای ارقام مختلف تحت شرایط مختلف مدیریت آب و نیتروژن در سالهای مختلف. nRMSE: ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده؛ d-index: شاخص توافق؛ MBE: میانگین انحراف خطا؛ n: تعداد مشاهدات؛ R^2 : ضریب تبیین.

منطقه شرق با ظرفیت نگهداری رطوبت خاک ۱۵۰ میلی-متر از لحاظ نوع تاثیر خشکی بر عملکرد گندم دیم اختلاف قابل توجهی وجود داشت (چنو و همکاران ۲۰۱۳). از نظر تاثیر تاریخ کاشت ها و ارقام مختلف بر عملکرد دانه، نتایج مشخص نمود که تاریخ کاشت های زود هنگام و رقم متوسط ترس برای مناطق گرم مانند پلدختر کارکرد بهتری داشتند؛ در حالی برای مناطق خنک تر تاریخ کاشت دیر هنگام و رقم زودرس کارکرد بهتری از خود نشان دادند. در واقع تاریخ کاشت های زود هنگام در مناطق گرم می توانند باعث شوند که گیاه از استرس های گرمایی و خشکی آخر فصل جلوگیری کند.

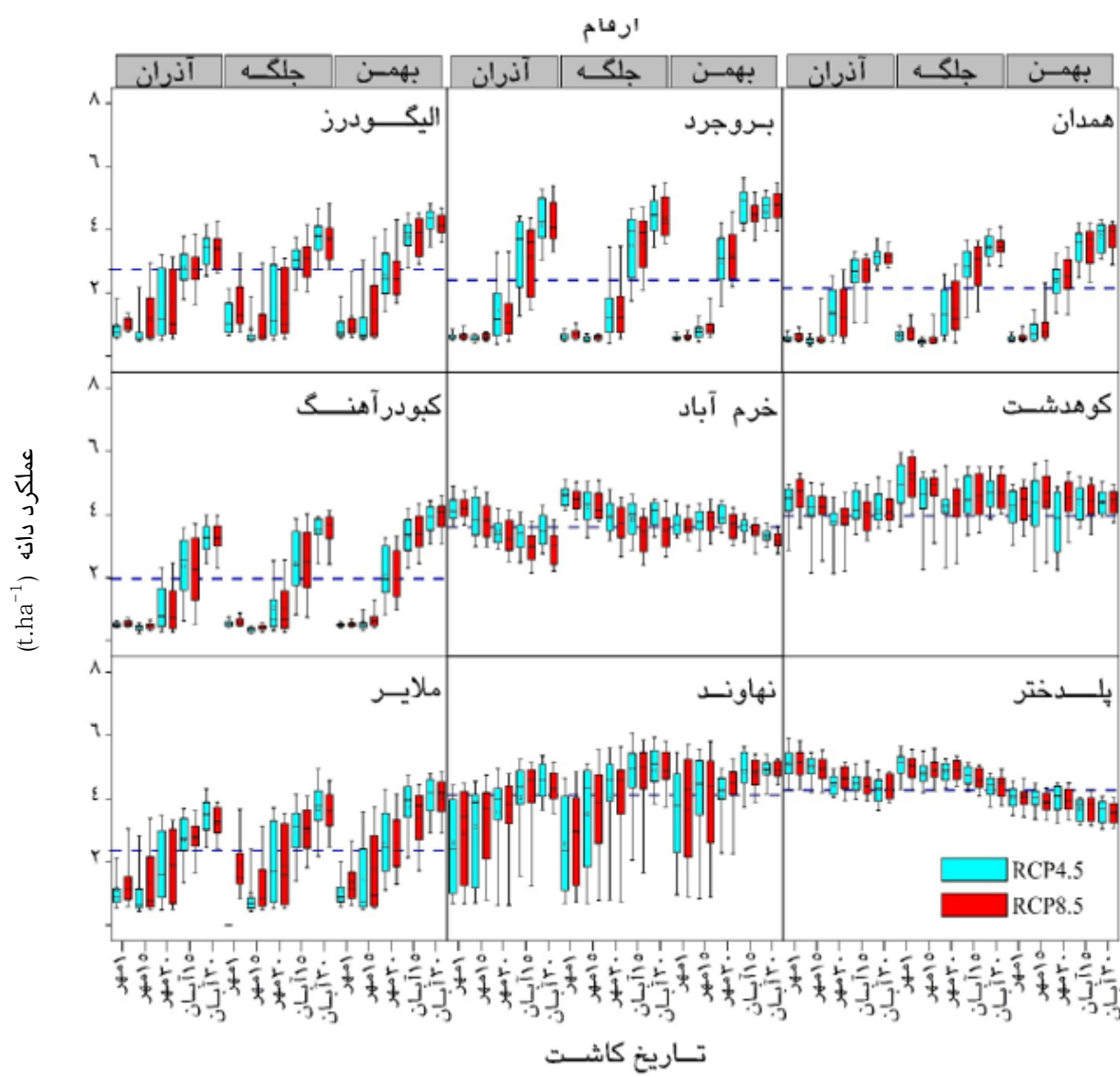
بالا بودن عملکرد در استان لرستان نسبت به همدان مربوط به میزان ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک بالاتر این استان (۰/۱۶۳ میلی متر بر میلی متر) نسبت به همدان (۰/۱۴۲ میلی متر بر میلی متر) و همچنین میزان بارندگی بیشتر این استان (۴۱۷ میلی متر) نسبت به همدان (۳۲۵/۲ میلی متر) است (جدول ۱ و ۲). این موضوع را در شهرستان پلدختر نیز می توان دید؛ به طوری که این شهرستان ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک آن (۰/۲۲۴ میلی متر بر میلی متر) نسبت به سایر مناطق مورد بررسی بیشتر بود و به موازات آن عملکرد بیشتری نیز تولید کرد. در تحقیقی نشان داده شده که در غرب و جنوب استرالیا با ظرفیت نگهداری رطوبت خاک ۱۰۰ میلی متر و



شکل ۲- عملکرد دانه محصول جو تحت شرایط دوره پایه برای مناطق، ارقام و تاریخ کاشت های مختلف.

در ۱ مهر متغیر بود. از نظر ارقام نیز تغییرات عملکرد از ۰/۸- درصد در رقم بهمن تا ۷/۱۶- درصد در رقم آذران متفاوت بود. در زمینه ترکیب های مختلف، در سراسر مناطق مورد مطالعه و سناریوهای اقلیمی، تغییرات عملکرد از ۱۷/۳- درصد در ترکیب تاریخ کاشت ۳۰ آبان و رقم آذران و ۲۰/۹+ درصد در ترکیب تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم جلگه متفاوت بود (شکل ۳).

تحت شرایط دوره آینده میزان عملکرد دانه گیاه جو در سراسر مناطق مورد بررسی ۳- درصد کاهش پیدا کرد. این کاهش تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر با ۴- و ۲- درصد بود. در بین مناطق مورد بررسی تغییرات عملکرد از ۱۸/۰۵- درصد در منطقه الیگودرز تا ۷/۸۵+ درصد در کوهدشت متغیر بود. از نظر تاریخ کاشت های مختلف تغییرات عملکرد در دوره آینده نسبت به دوره پایه از ۸/۳- درصد در ۱۵ مهر تا ۱۸/۳۳+ درصد

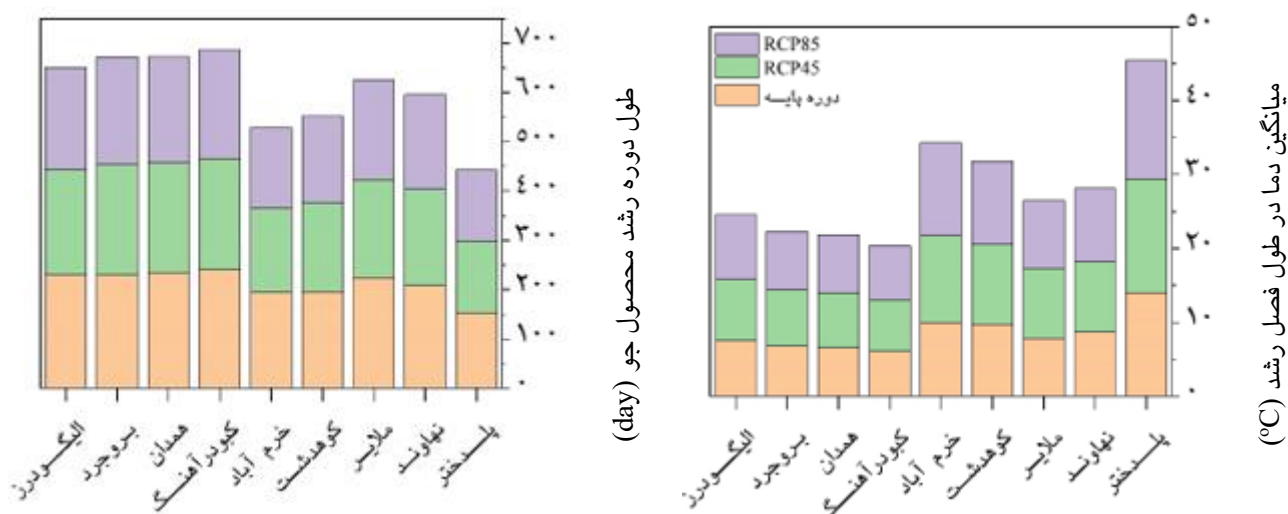


شکل ۳- عملکرد دانه محصول جو تحت شرایط دوره آینده (سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5) برای مناطق، ارقام و تاریخ کاشت‌های مختلف

تاریخ کاشت دیر هنگام ۳۰ آبان در دوره آینده می‌باشد (داده‌ها نشان داده نشدند). در یک مطالعه، آتری و راتور (۲۰۰۳) در هند مشاهده کردند که یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما و دو برابر شدن غلظت دی‌اکسید کربن عملکرد گندم را ۲۹ تا ۳۷ درصد افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین نشان دادند که افزایش دما بیشتر از سه درجه سانتی‌گراد اثرات مفید افزایش دی‌اکسید کربن را خنثی می‌کند و عملکرد گندم تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

از نظر کاهش عملکرد در دوره آینده باید ذکر کرد در سراسر مناطق، تیمارهای مورد بررسی و سناریوهای اقلیمی، میانگین دما در طول فصل رشد جو به میزان +۱۵/۷ درصد افزایش می‌یابد و طول دوره رشد به میزان -۷/۱ درصد کاهش خواهد یافت (شکل ۴). در میان تاریخ کاشت‌های مختلف نیز مشاهده شد که تاریخ کاشت‌های زودهنگام می‌توانند برای مقابله با کاهش عملکرد دانه موثر باشند. به عنوان مثال تاریخ کاشت زودهنگام ۱ مهر دارای طول فصل رشد بیشتری (۸/۸ درصد) نسبت به

(°C)



شکل ۴- طول دوره رشد و میانگین دما در طول فصل رشد محصول جو تحت شرایط دوره پایه و آینده (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5) برای مناطق مختلف.

عنوان مثال در مناطق گرم مانند پلدختر تاریخ کاشت بهینه از ۱۵ مهر به سمت ۱ مهر و رقم بهینه از رقم متوسط سطر س جلگه به سمت رقم زودرس آذران جابجا می‌شود. در واقع این تغییرات به علت مواجه شدن با استرس های گرمایی و خشکی آخر فصل و اجتناب از این استرس ها می‌باشد که رقم زودرس و تاریخ کاشت زود هنگام باعث می‌شوند گلدهی را به عنوان حساس ترین مرحله به تنش گرما (کالسنس و همکاران ۲۰۲۳) را قبل از این تنش تشکیل دهند. این موضوع را می‌توان در جدول ۴ مشاهده کرد جایی که در آن مهم ترین ضرایب ژنتیکی موثر در تشکیل گلدهی یعنی حساسیت به فتوپریود (۱/۵) و بهاره سازی (۱/۵) این رقم نسبت به دو رقم دیگر کمتر می‌باشد و باعث می‌شود این رقم زودتر وارد مرحله گلدهی شود. نشان داده شده است که در جو بهاره، افزایش دمای محیط از ۱۸ درجه سانتی گراد به ۲۶ درجه سانتی گراد باعث کاهش تعداد گلچه و دانه در سنبله شد (همینگ و همکاران ۲۰۱۲، ایجاز و فن کوروف، ۲۰۱۷). در تحقیقی دیگر در شبه جزیره ایبری نشان داده شد که کاهش عملکرد محصول جو مناطق جنوبی این شبه جزیره تحت شرایط تغییر اقلیم و دو سناریوی اقلیمی (RCP4.5 و RCP8.5) مورد بررسی افزایش دما در بهار می‌باشد (بنتو و همکاران ۲۰۲۱). در مناطق معتدل مانند

با توجه به اطلاعات به دست آمده از کشاورزان مناطق مورد مطالعه، رقم مرسوم در مناطق مورد مطالعه رقم جلگه و تاریخ کاشت مرسوم ۳۰ مهر بود. تحت این ترکیب عملکرد کشاورزان به طور میانگین در سراسر مناطق و سناریوهای مورد بررسی برابر با ۲/۷ تن در هکتار می‌باشد در حالی تحت ترکیب ۳۰ آبان و رقم بهمن عملکرد دانه ۴۹/۵ درصد (۴/۱ تن در هکتار) بهبود پیدا می‌کند. با این وجود در آینده این ترکیب برای همه ی مناطق بهینه نیست. به عنوان مثال در منطقه گرم پلدختر برترین ترکیب در سراسر دو سناریوی مورد بررسی تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم آذران با عملکرد ۵/۱ تن در هکتار بود که نسبت به رقم جلگه و تاریخ کاشت ۳۰ مهر عملکرد را ۷ درصد افزایش داد. در مثال دیگر، در شهرستان خرم آباد و کوهدشت در سراسر دو سناریوی مورد بررسی، بالاترین عملکرد تحت تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم جلگه به ترتیب ۴/۵۳ و ۵/۰۳ تن در هکتار به دست آمد که نسبت به ترکیب مرسوم عملکرد دانه را در دوره آینده به ترتیب ۱۸/۶ و ۲۱/۹ درصد در خرم آباد و کوهدشت افزایش دادند.

به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر مناطق مورد مطالعه ترکیب های بهینه در آینده نسبت به دوره پایه با توجه به افزایش دما تغییرات خواهند داشت. به

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی مدل APSIM مشخص نمود که این مدل می‌تواند به خوبی نمو و عملکرد ارقام مختلف جو را تحت شرایط مختلف مدیریتی شامل تاریخ کاشت‌های مختلف، تیمارهای مختلف نیتروژن و آبیاری شبیه‌سازی کند و بنابراین این مدل می‌تواند برای کاربرد تحت این شرایط مورد استفاده قرار گیرد. در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر روی عملکرد محصول جو در استان‌های لرستان و همدان نشان داده شد که عملکرد این محصول در دوره آینده کاهش می‌یابد و این کاهش در مناطق مختلف دارای تغییراتی خواهد بود. همچنین مشخص شد که در صورت عدم کاربرد راهکارهای سازگاری در آینده، کاهش عملکرد می‌تواند بیشتر باشد. نتایج همچنین مشخص نمود که برای بدست آوردن عملکرد بهینه در آینده با توجه به منطقه مورد بررسی باید تغییراتی در تاریخ کاشت و رقم مورد استفاده توسط کشاورزان در دوره آینده صورت بگیرد. به طور کلی، در دوره آینده، کشاورزان در مناطق گرم مانند شهرستان پلدختر باید به سمت تاریخ کاشت زود هنگام (۱ مهر) و رقم زودرس (آذران) بروند در حالی که کشاورزان در مناطق معتدل مانند خرم‌آباد و کوهدشت باید تحت تاریخ کاشت زود هنگام (۱ مهر) یک رقم متوسط‌رس (جلگه) کشت کنند. در نهایت در سایر مناطق که اکثراً جز مناطق سرد هستند تاریخ کاشت ۳۰ آبان و رقم دیررس (بهمن) می‌تواند بهترین گزینه مدیریتی تحت شرایط تغییر اقلیم باشد.

سیاسگزاری

از دانشگاه لرستان به منظور فراهم کردن زمینه انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌گردد

کوهدشت و خرم‌آباد نیز ترکیب بهینه در آینده تغییراتی داشت به طوری که از ۳۰ آبان و ۱۵ مهر و رقم جلگه به تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم جلگه تغییر می‌یابد. در سایر مناطق که جز مناطق سرد به حساب می‌آیند ترکیب بهینه نسبت به دوره پایه تغییراتی داشت به طوری که رقم زودرس آذران و تاریخ کاشت ۳۰ آبان جای خود را به رقم دیررس بهمن و تاریخ کاشت ۳۰ آبان می‌دهد. در واقع با توجه به افزایش دما و کاهش طول دوره رشد (شکل ۴) رقم‌های متوسط‌رس و دیررس در مناطق معتدل و سرد می‌تواند بهتر از رقم زودرس کاهش طول دوره رشد را جبران کنند و عملکرد بالاتری تولید کنند. در تحقیقی در سیستان و بلوچستان نشان داده شده که تغییرات اقلیمی باعث کاهش طول دوره رشد گندم و به موازات آن کاهش عملکرد دانه می‌شود و باید برای این کاهش، راهکارهای سازگاری در نظر گرفته شود (ولی-زاده و همکاران ۲۰۱۴). لیو و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی بر روی اثرات گرمایش اقلیمی بر روی عملکرد ذرت در شمال شرقی چین مشخص کردند که در شرایط تغییر اقلیم کاربرد ارقامی با طول فصل رشدی بیشتر باعث افزایش عملکرد در دامنه‌ای بین ۱۳ تا ۳۸ درصد شد. آن‌ها نشان دادند معرفی ارقامی با نیاز دمایی بالاتر در شمال شرقی چین باعث شد که اثرات منفی گرمایش اقلیمی تعدیل شوند. در نهایت در راستای موارد مطرح شده در بالا، نتایج تحقیق حاضر مشخص نمود که تحت شرایط تغییر اقلیم، بهترین ترکیب در منطقه گرم پلدختر تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم آذران می‌باشد و در مناطق معتدل مانند خرم‌آباد و کوهدشت تاریخ کاشت ۱ مهر و رقم جلگه و در سایر مناطق که اکثراً جز مناطق سرد هستند تاریخ کاشت ۳۰ آبان و رقم بهمن می‌باشند.

منابع مورد استفاده

- Ahmadi H, Ghalhari GF and Baaghdeh, M. 2019a. Impacts of climate change on apple tree cultivation areas in Iran. *Climatic Change*, 153 (1): 91-103. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2316-x>
- Ahmadi M, Dadashi Roudbari A, Akbari Azirani, T and 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. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2019.279480.1007109> (In Persian with English abstract).

- Almorox J, Benito M and Hontoria C. 2005. Estimation of monthly Angstrom–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, 30: 931–936. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.08.002>
- Amiri S, Eyni-Nargeseh H, Rahimi-Moghaddam S and Azizi K. 2021. Water use efficiency of chickpea agro-ecosystems will be boosted by positive effects of CO₂ and using suitable genotype× environment× management under climate change conditions. *Agricultural Water Management*, 252: 106928. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106928>
- Anonymous, 2017. Lorestan province crop statistics, Agricultural Jihad Organization of Lorestan Province. (In Persian with English abstract).
- Archontoulis SV, Miguez FE and Moore KJ. 2014. Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States. *Agronomy Journal*, 106 (3): 1025–1040. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0421>
- Attri SD and Rathore LS. 2003. Simulation of impact of projected climate change on wheat in India. *International Journal of Climatology*, 23: 693–705. <https://doi.org/10.1002/joc.896>
- Bento VA, Ribeiro AF, Russo A, Gouveia CM, Cardoso RM and Soares PM. 2021. The impact of climate change in wheat and barley yields in the Iberian Peninsula. *Scientific reports*, 11 (1): 15484. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95014-6>
- Callens C, Fernandez-Goméz J, Tucker MR, Zhang D and Wilson ZA. 2023. Heat stress responses vary during floret development in European spring barley cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 13: 918730. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918730>
- Chen CQ, Qian CR, Deng AX and Zhang WJ. 2012. Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 38: 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.07.003>
- Chenu K, Deihimfard R and Chapman SC. 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. <https://doi.org/10.1111/nph.12192>
- Deihimfard R, Rahimi-Moghaddam S and 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. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01682-5>
- Deihimfard R, Rahimi-Moghaddam S, Eyni-Nargeseh H and Collins B. 2023a. An optimal combination of sowing date and cultivar could mitigate the impact of simultaneous heat and drought on rainfed wheat in arid regions. *European Journal of Agronomy*, 147: 126848. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126848>
- Deihimfard R, Rahimi-Moghaddam S, Javanshir F and Pazoki A. 2023b. Quantifying major sources of uncertainty in projecting the impact of climate change on wheat grain yield in dryland environments. *Journal of Arid Land*, 15: 545–561. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0056-x>
- Dettori M, Cesaraccio C, Motroni A, Spano D and Duce P. 2011. Using CERES-wheat to simulate durum wheat production and phenology in southern Sardinia, Italy. *Field Crops Research*, 120 (1): 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.008>
- Dietzel R, Liebman M, Ewing R, Helmers M, Horton R, Jarchow M and Archontoulis S. 2016. How efficiently do corn-and soybean-based cropping systems use water? A systems modeling analysis. *Global Change Biology*, 22: 666–681. <https://doi.org/10.1111/gcb.13101>
- Ejaz M and von Korff M. 2017. The genetic control of reproductive development under high ambient temperature. *Plant Physiology*, 173: 294–306. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01275>
- Gao Z, Feng HY, Liang XG, Zhang L, Lin S, Zhao X, Shen S, Zhou LL and Zhou SL. 2018. Limits to maize productivity in the North China Plain: A comparison analysis for spring and summer maize. *Field Crops Research*, 228: 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.022>

- Gaydon DS, Wang E, Poulton PL, Ahmad B, Ahmed F, Akhter S, Ali I, Amarasingha RP, Chaki AK, Chen C and Choudhury BU. 2017. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204: 52-75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.015>
- Ghahreman N, Tabatabaei M and 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.
- Gong DP and Gong WL. 2020. Impacts of Climate Change on Maize Production in Northeast China and Countermeasures. *Journal of Agriculture*, 10: 35–38. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.954940>
- Hemming MN, Walford SA, Fieg S, Dennis ES and Trevaskis B. 2012. Identification of high temperature-responsive genes in cereals. *Plant Physiology*, 158: 1439-1450. <https://doi.org/10.1104/pp.111.192013>
- Holzworth DP, Huth NI, deVoil PG, Zurcher EJ, Herrmann NI, McLean G, Chenu K, van Oosterom EJ, Snow V, Murphy C and Moore AD. 2014. APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62: 327-350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Ji RP, Zhang YS, Jiang LX, Zhang SJ, Feng R, Chen PS, Wu, JW and Mi N. 2012. Effect of climate change on maize production in Northeast China. *Geographical Research*, 31: 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.073>
- Keating BA, Carberry PS, Hammer GL, Probert ME, Robertson MJ, Holzworth D, Huth NI, Hargreaves JN, Meinke H, Hochman Z and McLean G. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4): 267-288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Lee JY, Marotzke J, Bala G, Cao L, Corti S, Dunne JP, Engelbrecht F, Fischer E, Fyfe JC, Jones C, Maycock A, Mutemi J, Ndiaye O, Panickal S and Zhou E. 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and NearTerm Information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R and Zhou B (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>.
- Liu Z, Hubbard KG, Lin X and Yang X. 2013. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biology*, 19 (11): 3481-3492. <https://doi.org/10.1111/gcb.12324>
- Liu Z, Yang X, Xie R, Lin X, Li T, Batchelor WD, Zhao J, Zhang Z, Sun S and Zhang F. 2021. Prolongation of the grain filling period and change in radiation simultaneously increased maize yields in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308–309: 108573. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108573>
- Mendenhall W, Sincich T and Boudreau NS. 1996. *A second course in statistics: regression analysis*. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.
- Moghaddam H, Oveisi M, Mehr MK, Bazrafshan J, Naeimi MH, Kaleibar BP and 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126825>
- Rahimi-Moghaddam S and 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. <https://doi.org/10.22069/EJCP.2018.12078.1930> (In Persian with English abstract).

- Rahimi-Moghaddam S, Dehimfard R, Azizi K and 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126333>
- Seifert E. 2014. OriginPro 9.1: Scientific Data Analysis and Graphing Software—Software Review. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54 (5): 1552–1552. <https://doi.org/10.1021/ci500161d>
- Valizadeh J, Ziaei SM and Mazlounzadeh SM. 2014. Assessing climate change impacts on wheat production (a case study). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2): 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.02.002>
- Wallach D and Goffinet B. 1987. Mean squared error of prediction in models for studying economic and agricultural systems. *Biometrics*, 43: 561–576. <https://doi.org/10.2307/2531995>
- Willmott CJ and 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. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Willmott CJ. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63: 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/15200477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2)