

شبیه‌سازی عملکرد گندم در آینده تحت شرایط تغییر اقلیم و پیشرفت فناوری در ایران

صادق قربانی^{۱*} | بهنام کامکار^۲ | بنیامین ترابی^۳ | حامد منصوری^۴

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای اکرواکولوژی، گروه زراعت، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: s.ghorbani@gau.ac.ir

۲. گروه اکروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: kamkar@um.ac.ir

۳. گروه زراعت، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: b.torabi@gau.ac.ir

۴. بخش تحقیقات چغندرقد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران، رایانامه: h.mansori@areeo.ac.ir

چکیده

مطالعه حاضر با هدف شبیه‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی، پیشرفت فناوری، افزایش دی اکسید کربن و اثرات تلفیقی آنها بر عملکرد گندم در شرایط آینده انجام شد. بدین منظور از مدل DSSAT-Nwheat به‌عنوان مدل رشد گیاهی برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد گندم استفاده شد و عملکرد گندم برای سه دوره زمانی ۲۵ ساله در آینده (۱۴۰۵-۱۴۵۴، ۱۴۳۰ و ۱۴۷۹-۱۴۵۵) در مقایسه با سال پایه (۱۴۰۱-۱۳۷۱) تحت دو سناریو از مدل CMIP6 شامل SSP245 و SSP585 شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اثر فناوری نسبت به سال پایه مثبت بوده و میزان این اثر بسته به منطقه، سناریو و دوره زمانی از ۱ تا ۲۷ درصد متغیر بود. تحت تأثیر تغییرات اقلیمی آینده، عملکرد گندم در هر دو سناریو و در تمام مناطق به‌ویژه در مناطق گرمسیر و خشک نسبت به سال پایه کاهش نشان داد که این کاهش در سناریوی SSP585 شدیدتر بود، بطوری‌که میانگین کاهش عملکرد گندم در سناریوی SSP245 نسبت به سال پایه معادل ۲۹/۳ درصد و در سناریوی SSP585 برابر با ۴۶/۴ درصد شبیه‌سازی شد. به‌طور کلی نتایج بررسی اثرات تلفیقی هر سه عامل تغییر اقلیم، تکنولوژی و دی اکسید کربن نشان داد که در دوره زمانی اول (۱۴۰۵-۱۴۲۹) اثرات توأم همه عوامل بر عملکرد گندم در اکثر مناطق نسبت به سال پایه بیشتر بود، در صورتی‌که با گذشت زمان و در دوره زمانی سوم (۱۴۷۹-۱۴۵۵) اثرات تلفیقی در تمام مناطق منجر به کاهش عملکرد گندم در مقایسه با سال پایه شد که در این میان بیشترین اثر منفی در منطقه اهواز در سناریوی SSP585 با کاهش ۵۷ درصدی عملکرد برآورد شد. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد پیشرفت فناوری و دی اکسید کربن در دوره زمانی اول پتانسیل جبران اثرات منفی تغییر اقلیم را داشته است، در صورتی‌که با گذشت زمان و در دوره زمانی سوم اثرات منفی تغییر اقلیم بیشتر شده و منجر به کاهش عملکرد گندم مخصوصاً در مناطق گرمسیری و خشک خواهد شد. بنابراین به‌منظور جلوگیری از کاهش عملکرد گندم در آینده سیاست‌های کلان مدیریتی بایستی در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار گرفته و همچنین توسعه و استفاده از فناوری‌های نوین در آینده نسبت به گذشته با سرعت بیشتری افزایش یابد.

کلمات کلیدی: توسعه فناوری، دی اکسید کربن، سناریوهای اقلیمی، کاهش عملکرد.

Simulating future wheat production under climate change and technological advancement in Iran

Abstract

This study aimed to simulate the effects of climate change, technological advancements, increased carbon dioxide levels and their combined effects on wheat yield in the future. For this purpose, the DSSAT-Nwheat model was used as a plant growth model to evaluate the impact of climate change on wheat yield and wheat production was simulated over three 25-year periods: 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100, using data from the baseline period of 1992-2022. The simulations were based on two scenarios from the CMIP6 model, labeled as SSP245 and SSP585. The simulation results indicated that technology had a positive effect compared to the baseline year, with this impact varying from 1% to 27% depending on the region, scenario, and time period. However, future climate change is expected to reduce wheat production across all regions and scenarios, with the most significant declines occurring in tropical and arid regions relative to the baseline year. The SSP585 scenario forecasts an average wheat yield decrease of 46.4%. In the SSP245 scenario, the average decline in wheat yield compared to the baseline year is projected to be 29.3%. Overall, the combined effects of climate change, technology, and carbon dioxide reveal that, during the first period (2026-2050), the impact of these factors on wheat yield in most regions was greater than in the baseline year. However, over time, particularly in the third period (2076-2100), the cumulative effects in all regions led to a decrease in wheat yield when compared to the baseline year. The most significant negative impact was estimated in the Ahvaz region under the SSP585 scenario, predicting a 57% reduction in yield. The results suggest that advancements in technology and increased carbon dioxide levels during the first period had the potential to offset some of the negative effects of climate change. Yet, over time, particularly in the third period, the adverse effects of climate change intensified, resulting in notable declines in wheat yield, especially in tropical and arid regions. To prevent a decline in wheat yields in the future, macro-management policies should focus on reducing greenhouse gas emissions. Additionally, the development and adoption of new technologies should accelerate at a faster rate than in the past.

Key words: Carbon dioxide, Climate change scenario, Technological development, Yield reduction.

۱. مقدمه

کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه خشک جهان می باشد که (Shayanmehr *et al*, 2020) به دلیل حساسیت و آسیب پذیر بودن این مناطق نسبت به تغییرات محیطی، اثرات منفی تغییر اقلیم در این مناطق بسیار شدید خواهد بود (Bannayan *et al*, 2010). تولید محصولات کشاورزی و تأمین امنیت غذایی کشور نیز طی پدیده تغییر اقلیم دستخوش تغییر خواهد شد (Ahmadi *et al*, 2015). از این رو، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی در ایران می تواند اطلاعات مناسبی به برنامه ریزان و سیاست گذاران برای تدوین و اجرای سیاست های مناسب به منظور کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی فراهم آورد.

تأثیر تغییر اقلیم بر تولید محصول با استفاده از مدل های گردش جهانی (GCM) همراه با مدل های شبیه سازی رشد گیاهان زراعی تحت سناریوهای مختلف در نقاط مختلف جهان مورد مطالعه قرار گرفته است (Rahman *et al.*, 2018). از

مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی می‌توان به مدل DSSAT-Nwheat اشاره کرد که یک مدل گیاهی پرکاربرد برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم است که از مدل CERES-Wheat مشتق شده است. این مدل بیلان آب و نیتروژن و همچنین انواع تنش‌های مختلف در گیاه گندم را به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. تولید و تجمع ماده خشک بر اساس تشعشع خورشیدی، دما، شاخص سطح برگ و کارایی مصرف تشعشع تعیین می‌گردد. فنولوژی و نمو محصول نیز به صورت تابعی از درجه روز رشد، دوره بهاره‌سازی و فتوپریود است (Ritchie *et al.*, 1998). سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای را برای پروژه تغییر اقلیم بر اساس عوامل مختلف اجتماعی-اقتصادی، فناوری و مصرف انرژی تعریف کرده‌اند (IPCC, 2023). به علت وابستگی زیاد به تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی، غلظت CO₂ در جو از سال ۱۷۵۰ از حدود ۲۸۰ پی‌پی‌ام به ۴۲۵ پی‌پی‌ام در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است (NOAA, 2024). مطالعات مختلف نشان می‌دهد که عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی در پاسخ به CO₂ بالا اگر سایر عوامل بدون تغییر در نظر گرفته شوند، افزایش می‌یابد (Amthor, 2001; De Costa *et al.*, 2006; Bannayan *et al.*, 2005; Yoon *et al.*, 2009).

بررسی عملکرد محصولات زراعی در سال‌های اخیر روند افزایشی نشان می‌دهد که به دلیل پیشرفت در فناوری (از جمله ارقام جدید، شیوه‌های مدیریت کشاورزی و ...) می‌باشد (Burchfield *et al.*, 2020). تجزیه و تحلیل روند ۵۰ ساله تولید گندم در ایران نیز نشان داد که افزایش تولید گندم در کشور به‌ویژه طی سال‌های گذشته به دلیل افزایش سطح زیر کشت نبوده و عمدتاً به دلیل افزایش عملکرد در واحد سطح بوده که ناشی از پیشرفت فناوری در زمینه تولید می‌باشد (Koocheki, *et al.*, 2003). پیشرفت فناوری مانند استفاده از ارقام جدید، زیست فناوری، کود، آفت‌کش‌ها، مکانیزاسیون، روش‌های نوین آبیاری و سایر عوامل تا حد زیادی دلیل افزایش عملکرد در دهه‌های گذشته بوده‌اند. بنابراین، برای محاسبه دقیق تغییرات عملکرد در آینده، لازم است علاوه بر تغییر متغیرهای آب‌وهوا و اثرات CO₂، پیشرفت فناوری نیز به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار در نظر گرفته شود (Ewert *et al.*, 2005). این مطالعه با هدف برآورد تغییرات عملکرد گندم در ایران در شرایط تغییر اقلیم آینده با ارزیابی اثرات تلفیقی تغییر اقلیم، غلظت CO₂ و پیشرفت فناوری انجام شد.

۲. پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر تولیدات گیاهی انجام شده است (Guntukula *et al.*, 2020; Raza *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019). در پژوهشی روند تغییرات دمای ۱۸ شهر از چهار ناحیه اقلیمی در طی سال‌های (۱۳۹۱-۱۳۷۱) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مناطق گرم و مرطوب خزری افزایش دمای میانگین سالانه، با شدت کمی طول دوره پر شدن و عملکرد دانه را افزایش داده است. اما در مناطق گرم و خشک جنوب و مرکز ایران افزایش دما به‌تدریج با ایجاد تنش در دوره رسیدگی دانه منجر به کاهش طول دوره پر شدن دانه و کاهش عملکرد گندم شده است. با توجه به نوع مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی رشد گیاهان و همچنین سال‌های مورد مطالعه نتایج متفاوتی در مورد عملکرد گندم گزارش شده است (Abbasi Ali Kemer *et al.*, 2019). در مطالعه دیگری که بر روی برآورد اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر هشت محصول عمده زراعی انجام شد. نتایج نشان داد که درجه حرارت و بارندگی اثر معنی‌داری بر عملکرد محصولات بر جای می‌گذارد (Momeni & Zibaei, 2013). بررسی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد و نیاز آبی گیاه گندم در

منطقه گرگان با استفاده از مدل SSM-Wheat نشان داد که در منطقه گرگان در سال‌های آتی حداقل و حداکثر دما در تمام سناریوهای اقلیمی افزایش خواهد یافت که کمترین مقدار افزایش دمای متوسط سالانه در ۶۰ سال آینده حداقل ۶/۶۸ درجه سانتی‌گراد و حداکثر ۸/۳۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. همچنین شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم با مدل SSM-Wheat نشان داد که در دوره ۶۰ سال آینده با توجه به نتایج شبیه‌سازی مدل لارس برای دوره‌های آینده دما افزایش خواهد یافت و به همین دلیل طول دوره جوانه‌زنی و به طور کلی طول دوره رشد در دوره‌های آینده کاهش می‌یابد. در مورد میزان عملکرد نیز نتایج این تحقیق حاکی از آن است که در تاریخ کشت‌های دیرتر، عملکرد کاهش و در آینده به طور کلی افزایش می‌یابد (Keshtkar, 2020). گزارشات در مورد تغییرات آب و هوایی در مقیاس جهانی کاهش عملکرد گندم دیم و آبی را به ترتیب ۴۰-۱۰ و ۲۰-۵۰ درصد نشان داده است (Parry et al., 2004). در مطالعه‌ای اثر افزایش CO₂ و افزایش دما بر رشد سیستم ریشه دو رقم گندم بهاره بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش غلظت CO₂ باعث افزایش ریشه و ساقه گردید، اما این اثر مثبت هنگامی که گیاهان در درجه حرارت بالا رشد داده شدند، کاهش یافت (Benlloch et al., 2014).

۳. روش شناسی پژوهش

۳.۱. داده‌های اقلیمی و سناریوهای تغییر اقلیم

در این پژوهش برای بررسی وضعیت آب‌وهوای آینده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6) و از دو سناریو SSP245 و SSP585 استفاده شد. SSP245 یک سناریوی «میان‌رو» با انتشار گازهای گلخانه‌ای متوسط را نشان می‌دهد، در حالی که SSP585 یک سناریوی «بدبینانه» با انتشار گازهای گلخانه‌ای بالا را نشان می‌دهد که اغلب به‌عنوان مسیر «توسعه با سوخت فسیلی» توصیف می‌شود که از این سناریوها برای پیش‌بینی تأثیرات تغییرات اقلیمی آینده استفاده می‌شود.

مدل‌های (CMIP6) توسط کارگروه جهانی برنامه تحقیقات آب و هوایی (WCRP) و کارگروه مدل‌های جفت شده (WGCM) به‌عنوان یک چارچوب اساسی برای اجرای شبیه‌سازی آب و هوایی سازماندهی شده‌اند. طیف وسیعی از مدل‌های اقلیمی و سناریوهای مختلف در CMIP6 وجود دارد که در شبیه‌سازی متغیرهای آب و هوایی برای تغییرات اقلیمی آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Eyring et al., 2016). به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در شرایط آینده، داده‌های اقلیمی روزانه شامل حداکثر و حداقل درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)، تشعشع (مگاژول بر مترمربع در روز) و بارندگی (میلی‌متر) برای یک دوره زمانی ۳۰ ساله (بازه زمانی ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱) از ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی استان‌های مختلف کشور جمع‌آوری شد. پس از استخراج داده‌های هواشناسی گذشته، با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) داده‌های اقلیمی برای شرایط آب و هوایی آینده در مناطق مختلف کشور شبیه‌سازی شد. برای این منظور چهار دوره زمانی شامل ۱۳۷۱-۱۴۰۱ (سال پایه) و سه دوره اقلیمی آینده شامل: دوره زمانی ۱۴۲۹-۱۴۰۵، ۱۴۵۴-۱۴۳۰ و ۱۴۷۹-۱۴۵۵ برای دو سناریوی SSP245 و SSP585 در

۱Coupled Model Intercomparison Project phase 6

۲World Climate Research Programme

۳Working Group on Coupled Modelling

۴Statistical Downscaling model

نظر گرفته شد. برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری از داده‌های هواشناسی واقعی و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای سال پایه استفاده شد.

۳.۲. مدل رشد گیاهی

به منظور شبیه‌سازی رشد گندم از مدل رشد گیاهی DSSAT-Nwheat موجود در نرم‌افزار^۱ DSSAT (سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای انتقال فناوری کشاورزی) که یک نرم‌افزاری کاربردی برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد محصول می‌باشد، استفاده شد (Hoogenboom *et al.*, 2017). ورودی‌های مدل شامل اطلاعات اقلیمی (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، حداکثر و حداقل دما، تشعشع و بارندگی)، خاک (بافت خاک، مقدار ماده آلی، نیتروژن خاک، ظرفیت نگهداری آب، pH خاک)، گیاه (ضرایب ژنتیکی) و عملیات مدیریتی - زراعی (تاریخ کاشت، تراکم، عمق کاشت، مقدار و زمان آبیاری و کود) می‌باشد.

۳.۳. واسنجی و اعتبارسنجی مدل رشد گیاهی

به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای که برای سازگاری ژنوتیپ‌ها و لاین‌های امیدبخش گندم در ایستگاه‌های تحقیقات غلات کشور در مناطق اصلی تولید انجام می‌شود، استفاده شد. برای این منظور از اطلاعات مربوط به تیمار شاهد هر آزمایش که رقم رایج منطقه بوده و از سطح زیر کشت قابل توجهی نیز در مناطق مختلف برخوردار هستند، انتخاب شد. برای چهار اقلیم سردسیر، معتدل، مرطوب و گرمسیر، رقم متفاوتی به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. اطلاعات مورد نیاز از ایستگاه‌های تحقیقاتی شامل محل و سال اجرای آزمایش، تاریخ کاشت، تراکم، تاریخ‌های مختلف فنولوژیک (گلدهی و رسیدگی)، عملکرد دانه، اطلاعات خاک محل اجرای آزمایش و مدیریت زراعی بود. اطلاعات برای چهار سال زراعی (از سال ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱) استخراج گردید. در هر منطقه داده‌های دو سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ برای واسنجی مدل و داده‌های دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

به منظور ارزیابی مدل، چندین معیار برای تعیین کمیت تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده محاسبه گردید (رابطه ۱). ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE)، که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را بیان می‌کند (Rinaldi *et al.*, 2003). برای ارزیابی سیستماتیک مدل نیز از معیار کارایی مدل (ME) استفاده شد که برای تخمین عملکرد مدل در رابطه با میانگین داده‌های مشاهده‌شده استفاده می‌شود.

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

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

^۱Decision Support System for Agrotechnology Transfer

^۲Normalized Root Mean Square Error

^۳Model Efficiency

در روابط بالا P و O به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌شده، O میانگین داده‌های مشاهده‌شده و n تعداد مشاهدات است. $nRMSE$ خطای پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد که در صورتی که مقدار آن کمتر از ۱۰ درصد باشد بیانگر دقت بالای مدل، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیانگر دقت خوب مدل، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد دقت متوسط و مقادیر بالای ۳۰ درصد نشان دهنده دقت ضعیف مدل می‌باشد (Huang *et al.*, 2009). ME نیز کارایی مدل را نشان می‌دهد و می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد که هرچه قدر عدد به دست آمده به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی داده‌ها می‌باشد. علاوه بر این، از مقایسه رگرسیون خطی برازش داده شده بین داده‌های شبیه‌سازی (y) و مشاهده‌شده (x) با خط ۱:۱ نیز برای ارزیابی مدل استفاده گردید. برای این منظور معادله خطی رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده ($y = a + (b \times x)$) با معادله خط ۱:۱ ($y=x$) با استفاده از آزمون t مورد مقایسه قرار گرفت. برای ارزیابی عرض از مبدا و شیب دو خط، فرض صفر (H_0) برابر با $a=0, b=1$ و فرض یک (H_1) برابر با $a \neq 0, b \neq 1$ در نظر گرفته شد. در صورتی که فرض صفر قبول و فرض یک رد شود به این مفهوم است که اختلاف بین دو خط معنی‌دار نبوده و بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (Mansouri *et al.*, 2021).

۴.۳. اثرات پیشرفت فناوری

به منظور کمی کردن اثر پیشرفت فناوری بر بهبود عملکرد گندم در شرایط آینده از روش اورت و همکاران استفاده شد (Ewert *et al.*, 2005). برای این منظور عملکرد واقعی گندم از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ برای ایستگاه‌های مختلف از مراکز جهاد کشاورزی که مناطق اصلی تولید گندم در کشور می‌باشند، جمع‌آوری گردید، سپس روند عملکرد گندم با برازش رگرسیون خطی در دوره ۳۰ ساله محاسبه شد (معادله ۳). برای برآورد اثر فناوری بر عملکرد گندم در آینده، روند عملکرد گندم در گذشته با استفاده از روش سری زمانی و حذف اثر نوسانات فصلی تصحیح شد. برای به‌دست آوردن داده‌های تصحیح‌شده، از روش تجزیه^۱ (Mansouri *et al.*, 2015) استفاده شد تا داده‌ها به مؤلفه‌های روند خطی و فصلی و همچنین خطا تفکیک شوند و با حذف اثر مؤلفه فصلی، داده‌های عملکرد تصحیح گردید.

$$Y_e = a + r_y \times t \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه ۳، Y_e مقدار برازش داده شده عملکرد گندم در یک سال خاص t نرخ سالانه تغییر عملکرد و a ثابت معادله است. پارامترهای a و r_y با رگرسیون خطی برازش داده شده بین عملکرد تصحیح‌شده و زمان برای هر منطقه برآورد شد. میزان دقت رگرسیون برازش شده با میانگین درصد مطلق خطا (MAPE) آزمایش شد. MAPE دقت را به صورت درصد بیان می‌کند.

$$MAPE = \frac{\sum (Y_a - Y_e) / Y_a}{n} \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن Y_a برابر با مقدار واقعی عملکرد، Y_e برابر با مقدار پیش‌بینی شده عملکرد و n برابر با تعداد مشاهدات است. مقادیر کوچکتر MAPE نشان‌دهنده برازش بهتر مدل بوده و به عنوان شاخصی برای ارزیابی دقت رگرسیون برازش داده شده استفاده گردید. سپس تغییر عملکرد نسبی (Y_T) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

^۱Decomposition method

$$Y_r(t) = \frac{Y_e(t)}{Y_e(t-1)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

تغییر عملکرد گندم تحت تأثیر پیشرفت فناوری در زمان آینده در مقایسه با سال پایه (Pt0) با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

$$\frac{P_{t,T}}{P_{t0}} = Y_r(t_0) + \int_{t_0}^{t=T} \left(\frac{Y_{r,a} \cdot f_{T,P}(t) \cdot f_{T,G}(t)}{0.5} \right) dt \quad \text{رابطه (۶)}$$

Pt, T عملکرد آینده گندم تحت تأثیر پیشرفت فناوری، Yr(t0) تغییر عملکرد نسبی در سال پایه و Yr,a افزایش سالانه تغییر عملکرد نسبی با توجه به سال پایه را نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات کوچکی و همکاران (۱۳۹۶)، عملکرد فعلی گندم در ایران حدود ۵۰ درصد عملکرد بالقوه است، بنابراین سهم نسبی از عملکرد بالقوه مقدار نصف عملکرد فعلی در نظر گرفته شد. همانطور که توسط Ewert et al. (2005) گزارش شده است، این مقدار برای کشورهای اروپایی ۰/۸ است. پیشرفت فناوری از طریق افزایش عملکرد پتانسیل (fT,P) و همچنین کاهش خلاء بین عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل (fT,G) منجر به افزایش عملکرد می‌شود. مقادیر fT,P و fT,G از روش اورت و همکاران به دست آمد (Ewert et al., 2005).

۵.۳. اثرات غلظت CO2

در محاسبه اثر CO2 بر عملکرد گندم ابتدا غلظت CO2 در آینده برآورد و سپس میزان افزایش عملکرد به ازای هر واحد افزایش CO2 مدنظر قرار می‌گیرد. تخمین غلظت CO2 آینده در سناریوهای SSP توسط منشاسن و همکاران انجام شد (Meinshausen et al., 2020). بر این اساس غلظت CO2 در سناریوها و دوره‌های زمانی مورد بررسی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. غلظت دی اکسید کربن برآورد شده (ppm) در دوره‌های زمانی مختلف برای دو سناریوی اقلیمی SSP858 و SSP245

سناریوی اقلیمی	غلظت CO2	دوره زمانی		
		۱۴۰۵-۱۴۲۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۵۵-۱۴۷۹
SSP245	دامنه	۴۳۲-۵۰۶	۵۱۰-۵۷۵	۵۷۷-۶۰۳
	میانگین	۴۶۹	۴۵۵	۵۹۴
	اختلاف با دوره پایه	۵۲	۱۲۷	۱۷۷
SSP585	دامنه	۴۳۵-۵۶۳	۵۲۰-۸۰۲	۸۱۴-۱۱۳۵
	میانگین	۴۹۳	۶۷۶	۹۷۲
	اختلاف با دوره پایه	۷۶	۲۵۹	۵۵۵

به منظور محاسبه اثر دی اکسید کربن بر تغییر عملکرد گندم، تغییر عملکرد نسبی تحت تأثیر افزایش سطوح CO2 با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Ewert et al., 2005):

$$\frac{P_{t,co}}{P_{t0}} = \frac{f_{co,r} \cdot \Delta C_t - t_0}{100} + 1 \quad \text{رابطه (۷)}$$

Pt,co عملکرد آینده گندم تحت تأثیر غلظت CO2، fco,r تغییر عملکرد نسبی به ازای تغییر در واحد غلظت CO2 (fco,r = 0.05% و Ct-t0Δ تفاوت بین غلظت CO2 آینده و غلظت فعلی است. غلظت دی اکسید کربن در سال پایه (۱۴۰۱) (۲۰۲۲) برابر با ۴۱۷ ppm در نظر گرفته شد (NOAA, 2024). میزان افزایش عملکرد گندم به ازای افزایش هر واحد CO2 برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد (Koocheki & Nassiri, 2010; Bannayan et al., 2014; Mansouri et al., 2015).

۱.۶.۳ اثرات تلفیقی عوامل بر عملکرد گندم

به منظور برآورد اثرات تلفیقی عوامل تاثیرگذار (تغییر اقلیم، CO₂ و پیشرفت فناوری) بر عملکرد گندم در شرایط آینده از معادله زیر استفاده شد (Ewert *et al.*, 2005).

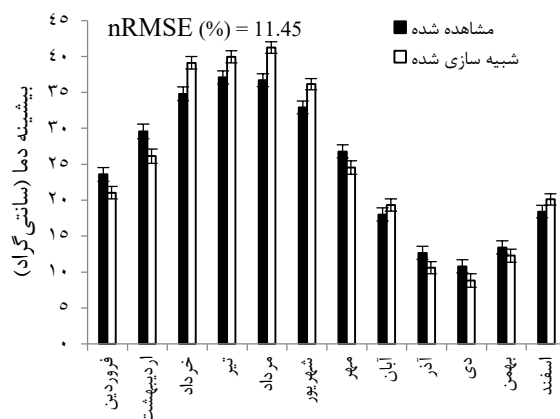
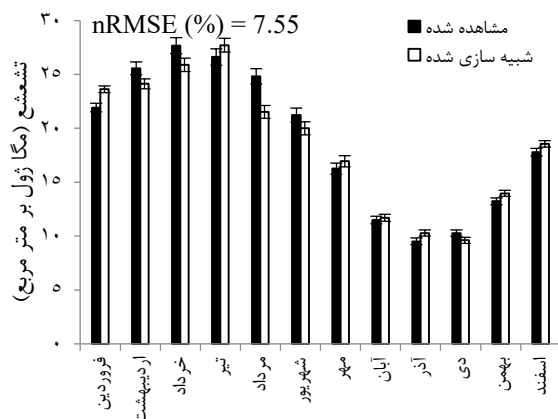
$$\frac{P_t}{P_{t0}} = \frac{1 + ((P_{t,cl}/P_{t0} - 1) + (P_{t,co}/P_{t0} - 1) + (P_{t,T}/P_{t0} - 1))}{1} \quad \text{رابطه (۸)}$$

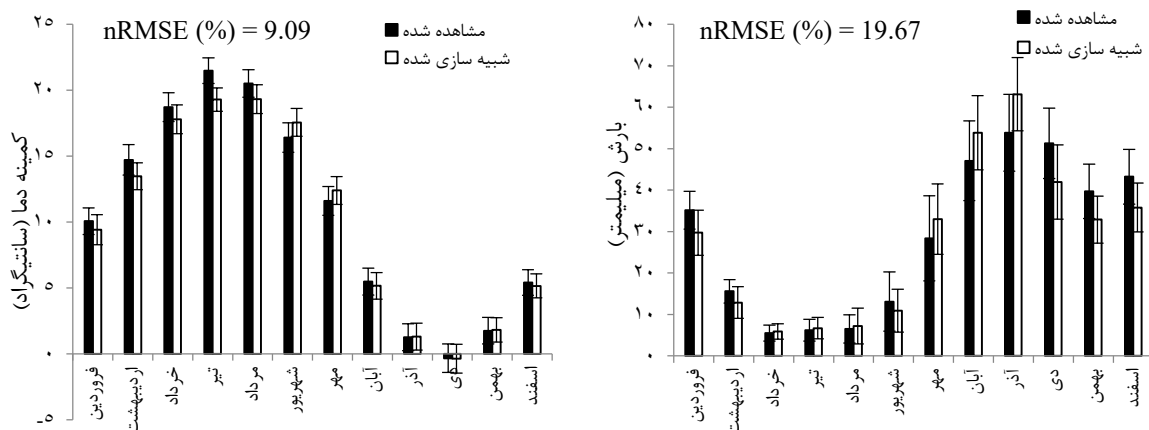
در رابطه ۸، P_t عملکرد آینده گندم است که تحت تاثیر هر سه عامل تغییر اقلیم، CO₂ و پیشرفت فناوری قرار می گیرد. بعد از برآورد اثرات هر سه عامل و همچنین اثرات تلفیقی آنها بر عملکرد گندم، میزان اثر افزایشی یا کاهششی هر کدام از عوامل در مناطق مختلف مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که به منظور ارزیابی و مقایسه اثرات عوامل بر عملکرد گندم، عملکرد سال پایه به عنوان مبنای مقایسه و یک در نظر گرفته شده و اثرات سایر عوامل نسبت به آن مورد مقایسه قرار گرفتند، بدین صورت که اعداد کمتر از یک نشان دهنده میزان یا درصد کاهش عملکرد گندم و اعداد بیشتر از یک نشان دهنده میزان یا درصد افزایش عملکرد نسبت به سال پایه می باشند.

۴. یافته های پژوهش

۱.۶.۴ اعتبارسنجی مدل اقلیمی

مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده داده های اقلیمی به صورت میانگینی از مناطق مختلف کشور در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج اعتبارسنجی مدل اقلیمی ریزه مقیاس نمایی آماری بر اساس شاخص nRMSE نشان داد که مقدار این شاخص برای داده های تشعشع، بیشینه دما، کمینه دما و بارندگی به ترتیب برابر با ۷/۵۵، ۱۱/۴۵، ۹/۰۹ و ۱۹/۶۷ درصد بود. با توجه به نتایج مدل اقلیمی تشعشع را با دقت بالاتر و داده های بارندگی را با دقت پایین تری شبیه سازی نمود، به طوری که داده های تشعشع با اختلاف $\pm 7/55$ درصد و داده های بارندگی با اختلاف $\pm 19/67$ درصد نسبت به داده های واقعی شبیه سازی شدند. به طور کلی نتایج اعتبارسنجی مدل اقلیمی نشان داد که داده های اقلیمی با توجه به مقادیر پایین شاخص nRMSE از دقت قابل قبولی برای شبیه سازی متغیرهای اقلیمی برخوردار است.





شکل ۱. مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده متغیرهای اقلیمی کشور برای سال پایه (دوره زمانی ۱۳۷۱-۱۴۰۱) و شاخص nRMSE

۲.۴. واسنجی مدل رشد گیاهی

نتایج واسنجی مدل برای برآورد ضرایب ژنتیکی ارقام گندم برای مناطق سردسیر، معتدل، مرطوب و گرم در جدول ۲ ارائه شده است. هشت ضریب ژنتیکی مورد استفاده در مدل گیاهی شامل دمای مورد نیاز (درجه روز) از شروع جوانه زنی تا آغاز گلدهی، دمای مورد نیاز (درجه روز) از پر شدن دانه تا زمان رسیدگی، حساسیت به فتوپریود و بهاره سازی، فاصله فیلوکرون، تعداد دانه بر وزن ساقه در زمان شروع پر شدن دانه، بیشترین سرعت رشد دانه و وزن خشک نهایی تک ساقه برای ارقام گندم برآورد گردید (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی برای ارقام مختلف گندم

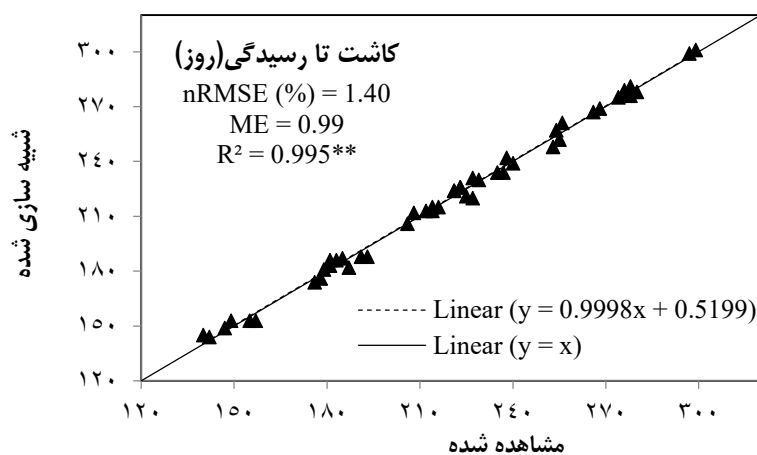
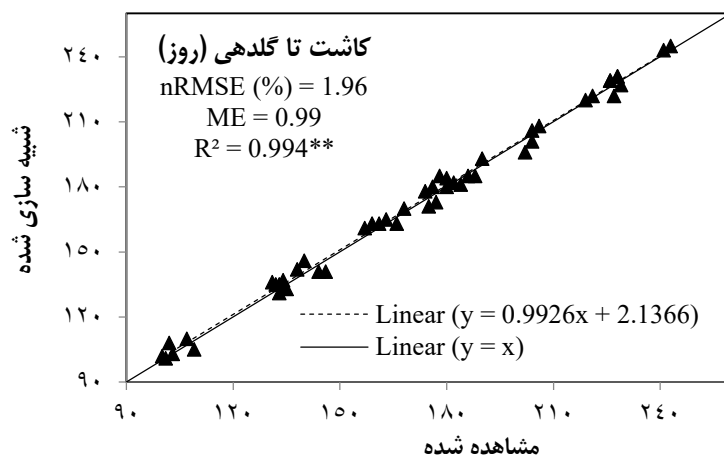
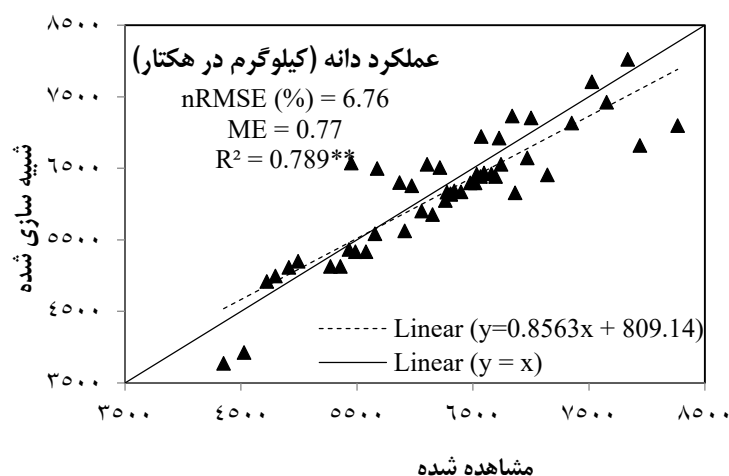
پارامتر	واحد	حیدری (سردسیر)	ترابی (معتدل)	تیرگان (مرطوب)	مهرگان (گرم)
P1	°C	۲۸۰	۲۸۰	۲۷۰	۲۴۰
P5	°C	۷۱۰	۷۹۰	۷۲۰	۷۰۰
PPSEN	-	۵/۷	۵/۱	۴/۹	۴/۸
VSEN	-	۲/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
PHINT	°C	۸۴	۸۵	۸۳	۸۰
GRNO	تعداد دانه به وزن ساقه	۳۸	۳۷	۳۲	۳۵
MXFIL	میلی گرم دانه در روز	۲/۰	۲/۷	۲/۵ یا ۲/۶	۲/۶
STMMX	گرم	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰

P1: درجه روز مورد نیاز از شروع جوانه زنی تا آغاز گلدهی، P5: درجه روز مورد نیاز از شروع جوانه زنی تا آغاز گلدهی، PPSEN: حساسیت به فتوپریود، VSEN: حساسیت به بهاره سازی، PHINT: فاصله فیلوکرون، GRNO: تعداد دانه بر وزن ساقه در زمان شروع پر شدن دانه، MXFIL: بیشترین سرعت رشد دانه، STMMX: وزن خشک نهایی تک ساقه.

۳-۴. اعتبارسنجی مدل رشد گیاهی

پراکنش داده های شبیه سازی شده در مقابل داده های مشاهده شده به همراه رگرسیون برازشی و مقادیر nRMSE و ME برای صفات عملکرد دانه، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی گندم در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج اعتبارسنجی

مدل رشد گیاهی نشان داد که با توجه به اینکه مقادیر محاسبه شده برای شاخص nRMSE کمتر از ۱۰ و برای شاخص ME بیشتر از ۰/۷۷ بود، بنابراین می‌توان عنوان کرد که مدل رشد گیاهی از برآورد قابل قبولی برای شبیه‌سازی صفات در گیاه گندم بر اساس شاخص‌های آماری nRMSE و ME برخوردار است (شکل ۲).



شکل ۲. صفات عملکرد دانه، کاشت تا گلدهی و کاشت تا رسیدگی شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده گندم و مقایسه با خط ۱:۱.

همچنین بر اساس نتایج آزمون t ، عرض از مبدا و شیب خط رگرسیون برازش داده شده در تمام صفات مورد مطالعه گندم اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری با عرض از مبدا و شیب خط ۱:۱ نشان نداد (جدول ۳). بنابراین به طور کلی با توجه به نتایج ارزیابی مدل رشد گیاهی بر اساس شاخص‌های مورد بررسی، می‌توان عنوان کرد که مدل رشد گیاهی DSSAT-Nwheat توانایی و دقت کافی برای شبیه‌سازی داده‌های مربوط به صفات گیاه گندم را دارا می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج آزمون t برای مقایسه عرض از مبدا و شیب خط ۱:۱ با رگرسیون برازش داده شده بین داده‌های مشاهده و شبیه‌سازی شده

صفات	عرض از مبدا (a)		شیب (b)		مقدار t		فرض صفر
	ضریب	انحراف معیار	ضریب	انحراف معیار	t_a	t_b	
عملکرد دانه	۸۰۹/۱۴	۴۱۱/۴۳	۰/۸۵۶۳	۰/۰۷۵	۱/۹۶۷	۱/۹۱۱	قبول
کاشت تا گلدهی	۲/۱۳۶۶	۰/۰۶۶	۰/۹۹۲۶	۰/۰۱۲	۱/۰۳۴	۰/۶۲۷	قبول
کاشت تا رسیدگی	۰/۵۱۹۹	۲/۳۴۶	۰/۹۹۹۸	۰/۰۱۰	۰/۲۲۲	۰/۰۱۸	قبول

۴.۴. اثرات پیشرفت فناوری

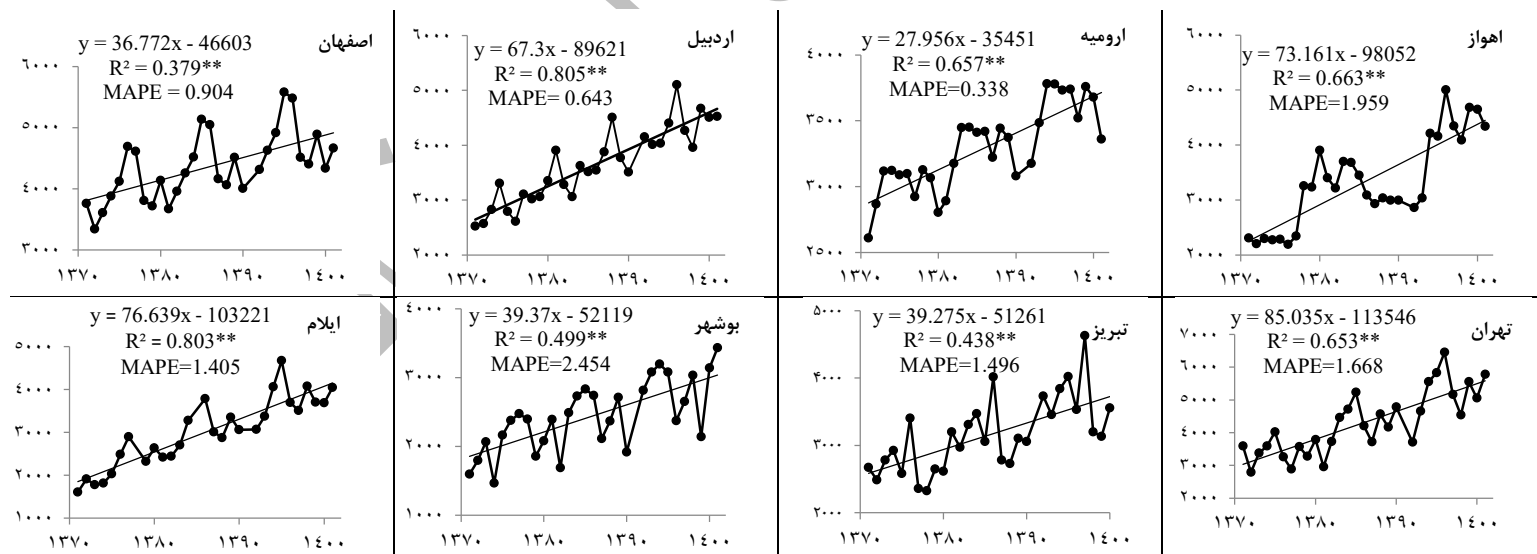
روند افزایش عملکرد گندم طی دوره زمانی ۳۰ ساله در گذشته (از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱) بیانگر افزایش عملکرد گندم در این دوره زمانی در مناطق مختلف کشور بود که مدیون پیشرفت فناوری شامل مکانیزاسیون، به زراعی و به نژادی گندم بوده است. اثر فناوری از جمله استفاده از ارقام جدید می‌تواند سبب افزایش عملکرد گردد. پژوهشگران گزارش کردند که در ارقام جدید سبز شدن مناسب به دلیل برخورد گیاه با شرایط مساعدتر محیطی برای رشد رویشی بوته‌های مادری، تولید و تجمع ماده خشک و به تبع آن باعث بهبود عملکرد گیاه می‌شود. همچنین ارقام اصلاح شده و مقاوم در برابر تنش و بیماری‌ها عملکرد بالاتری دارند (Momtazi & Emam, 2006). نتایج مطالعه دیگری نشان داد که اصلاح برای ایجاد مقاومت به بیماری‌ها در گندم، بیشترین تأثیر را در پیشگیری از خسارت و کاهش عملکرد دارد (Aiyong *et al.*, 2015). شیب خط رگرسیونی برازش‌یافته بین زمان و عملکرد گندم در این دوره زمانی نشان داد که شیب افزایش عملکرد سالانه بین ۲۶/۵ تا ۱۰۱/۷ کیلوگرم در هکتار (به ترتیب برای مناطق یاسوج و ساری) بوده است (شکل ۲). مقادیر تغییر عملکرد نسبی برای سال پایه ($Y_r(t_0)$) در مناطق مختلف کشور از ۱/۰۰۷ تا ۱/۰۲۴ متغیر بود که کمترین مقدار مربوط به یزد و بیشترین مقدار مربوط به ساری بود (جدول ۴). در این میان مناطق ایلام، اهواز، زنجان و کرج بعد از ساری از لحاظ تغییر عملکرد نسبی در سال پایه در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. مناطق ارومیه، اصفهان، شهرکرد و یاسوج نیز از تغییر عملکرد نسبی پایینی در مقایسه با سال پایه برخوردار بودند (جدول ۴).

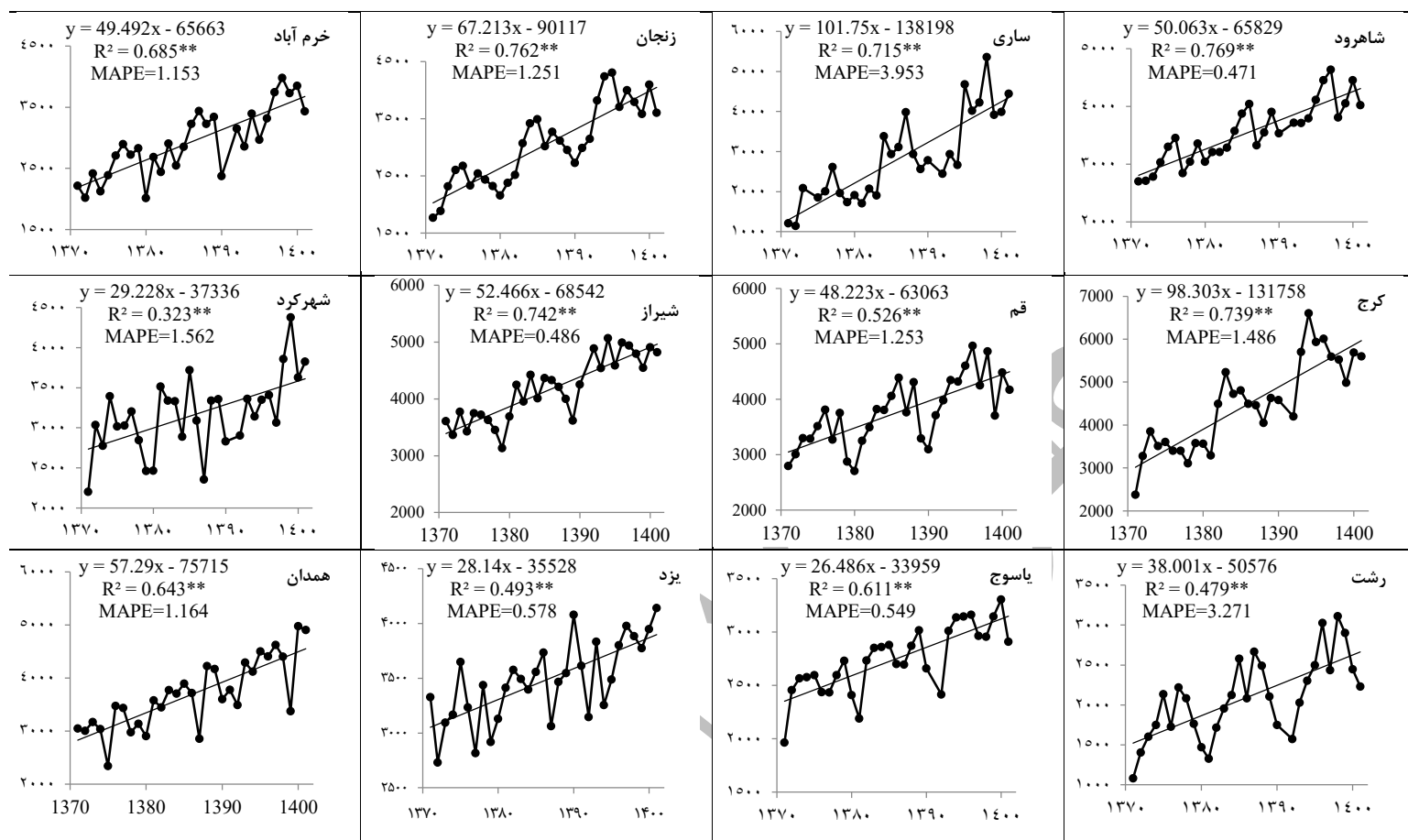
جدول ۴. مقادیر تغییر عملکرد نسبی گندم برای سال پایه (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱) در مناطق مختلف کشور

منطقه	$Y_r(t_0)$	منطقه	$Y_r(t_0)$	منطقه	$Y_r(t_0)$
اردبیل	۱/۰۱۵	ساری	۱/۰۲۴	کرج	۱/۰۱۷
ارومیه	۰/۰۰۸	شاهرود	۱/۰۱۲	کرمان	۱/۰۱۰
اصفهان	۱/۰۰۸	شیراز	۱/۰۱۱	کرمانشاه	۱/۰۱۶
ایلام	۱/۰۱۹	شهرکرد	۱/۰۰۸	گرگان	۱/۰۱۰

اهواز	۱/۰۱۷	زنجان	۱/۰۱۷	مشهد	۱/۰۰۹
بوشهر	۱/۰۱۳	رشت	۱/۰۱۴	همدان	۱/۰۱۳
تبریز	۱/۰۱۱	خرم آباد	۱/۰۱۴	یاسوج	۱/۰۰۸
تهران	۱/۰۱۵	قم	۱/۰۱۱	یزد	۱/۰۰۷

شبیه‌سازی اثر پیشرفت فناوری بر عملکرد گندم در شرایط آینده در سناریوهای مختلف نشان داد که در تمام مناطق مختلف کشور اثر فناوری نسبت به سال پایه مثبت بوده و میزان این اثر بسته به منطقه، سناریو و دوره زمانی از ۱ تا ۲۷ درصد متغیر بود (جدول ۵). بیشترین اثر مثبت فناوری بر عملکرد گندم مربوط به شهر زنجان با ۲۷ درصد افزایش نسبت به سال پایه در سناریو SSP245 در دوره زمانی ۱۴۳۰-۱۴۵۴ بود (جدول ۵). سایر محققان نیز اثر مثبت پیشرفت فناوری در آینده بر عملکرد محصولات مختلف را گزارش کرده‌اند که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی داشتند (Hampf *et al.*, 2020; Bannayan, *et al.*, 2014; Mansouri *et al.*, 2015; Ewert *et al.*, 2005). در مقایسه بین دوره‌های زمانی، در هر دو سناریو میزان اثر فناوری در دوره زمانی دوم (۱۴۳۰-۱۴۵۴) نسبت به هر دو دوره زمانی اول (۱۴۰۵-۱۴۲۹) و سوم (۱۴۵۵-۱۴۷۹) بیشتر خواهد بود، بطوریکه در سناریوی SSP245 میانگین اثر پیشرفت فناوری برای دوره زمانی ۱۴۳۰-۱۴۵۴ برابر با ۱۹/۹ درصد افزایش نسبت به سال پایه خواهد بود، در صورتی که برای دوره‌های زمانی اول و سوم به ترتیب برابر با ۱۲/۳ و ۱۲ درصد برآورد شد. در سناریوی SSP585 نیز اثر فناوری برای دوره زمانی دوم برابر با ۱۳/۷ درصد و برای دوره زمانی اول و سوم به ترتیب معادل ۱۰/۱ و ۱/۳ درصد شبیه‌سازی شد (جدول ۵). به طور کلی اثر فناوری بر عملکرد گندم در سناریوی SSP245 نسبت به سناریوی SSP585 بیشتر خواهد بود، بطوری که میانگین اثر پیشرفت فناوری بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور در دوره‌های زمانی مختلف در سناریوی SSP245 برابر با ۱۴/۷ درصد و در سناریوی SSP585 ۸/۴ درصد برآورد شد (جدول ۵).





شکل ۲. روند افزایش عملکرد گندم از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ در مناطق مختلف کشور

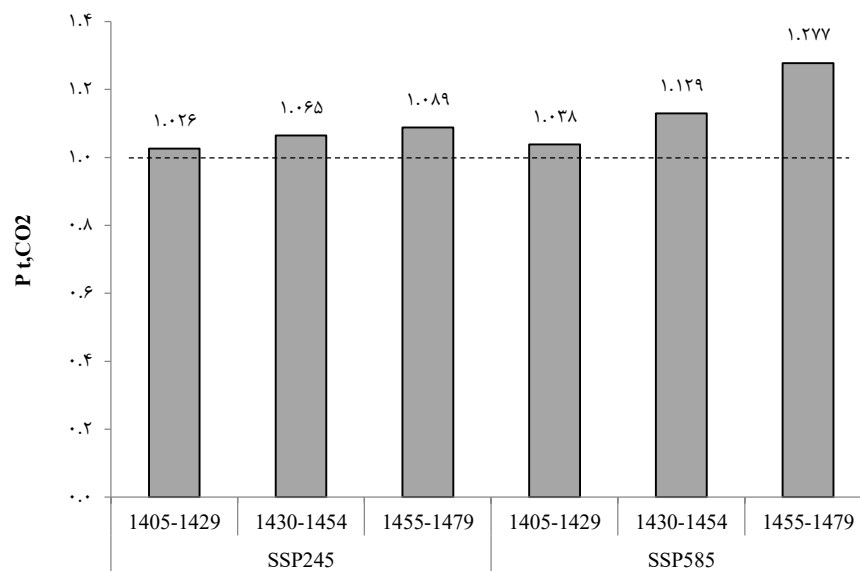
جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی اثر پیشرفت فناوری بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585

منطقه	سناریوها					
	SSP585			SSP245		
	۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹	۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹
اردبیل	۱/۰۱	۱/۱۶	۱/۱۲	۱/۱۴	1.23	1.14
ارومیه	۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۱۶	۱/۰۷	۱/۱۲	۱/۰۷
اصفهان	۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۷	۱/۱۲	۱/۰۷
ایلام	۱/۰۲	۱/۲۰	۱/۱۵	۱/۱۸	۱/۳۰	۱/۱۸
اهواز	۱/۰۲	۱/۱۸	۱/۱۳	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۱۶
بوشهر	۱/۰۱	۱/۱۴	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۱۳
تبریز	۱/۰۱	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۱۰	۱/۱۷	۱/۱۰
تهران	۱/۰۲	۱/۱۷	۱/۱۲	۱/۱۵	۱/۲۴	۱/۱۵
ساری	۱/۰۲	۱/۲۶	۱/۱۹	۱/۲۳	۱/۲۸	۱/۲۳
شاهرود	۱/۰۱	۱/۱۳	۱/۰۹	۱/۱۱	۱/۱۹	۱/۱۲
شیراز	۱/۰۱	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۱۷	۱/۱۰
شهرکرد	۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۰۷	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۰۸

زنجان	۱/۱۷	۱/۳۷	۱/۱۶	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۰۲
رشت	۱/۱۲	۱/۲۰	۱/۱۲	۱/۱۴	۱/۱۰	۱/۰۱
خرم آباد	۱/۱۳	۱/۲۲	۱/۱۳	۱/۱۵	۱/۱۱	۱/۰۱
قم	۱/۱۱	۱/۱۷	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۰۱
کرج	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۱۶	۱/۱۸	۱/۱۳	۱/۰۲
کرمان	۱/۱۰	۱/۱۶	۱/۱۰	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۰۱
کرمانشاه	۱/۱۶	۱/۲۵	۱/۱۵	۱/۱۷	۱/۱۳	۱/۰۲
گرگان	۱/۰۹	۱/۱۵	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۰۸	۱/۰۱
مشهد	۱/۰۹	۱/۱۴	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۰۷	۱/۰۱
همدان	۱/۱۳	۱/۲۰	۱/۱۲	۱/۱۴	۱/۱۰	۱/۰۱
یاسوج	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۰۸	۱/۰۹	۱/۱۷	۱/۰۱
یزد	۱/۰۷	۱/۱۱	۱/۰۷	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۱
میانگین	۱/۱۲۳	۱/۱۹۹	۱/۱۲۰	۱/۱۳۷	۱/۱۰۱	۱/۰۱۳
		۱/۱۴۷		۱/۰۸۴		

۴.۵. اثرات دی اکسید کربن

میزان اثر افزایش دی اکسید کربن در آینده بر عملکرد گندم در سناریوها و دوره‌های زمانی آینده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که افزایش دی اکسید کربن منجر به افزایش عملکرد گندم در آینده خواهد شد، به‌طوری‌که افزایش عملکرد ناشی از افزایش CO₂ بسته به سال و سناریو نسبت به سال پایه از ۲/۶ تا ۲۷/۸ درصد متغیر خواهد بود (شکل ۳). با توجه به اینکه افزایش غلظت CO₂ سرعت فتوسنتز را تحریک می‌کند و باعث افزایش عملکرد زیستی و اقتصادی محصولات می‌شود (De Costa et al., 2006; Bannayan et al., 2010)، بنابراین افزایش عملکرد گندم با افزایش غلظت دی اکسید کربن قابل انتظار بود. بیشترین افزایش عملکرد ناشی از افزایش CO₂ در سناریوی SSP585 در دوره زمانی ۱۴۵۵-۱۴۷۹ و کمترین آن در سناریوی SSP245 در دوره زمانی ۱۴۲۹-۱۴۰۵ خواهد بود (شکل ۳). شیب افزایش عملکرد در سناریوی SSP585 به دلیل افزایش بیشتر غلظت دی اکسید کربن در این سناریو (جدول ۱) نسبت به سناریو SSP245 در تمام دوره‌های زمانی آینده بیشتر بود (شکل ۳).



شکل ۳. شبیه‌سازی اثر دی اکسید کربن بر عملکرد گندم تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585

۶-۴. اثر تغییر اقلیم

شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور نشان داد که تغییر اقلیم باعث کاهش عملکرد گندم در مقایسه با سال پایه در هر دو سناریوی مورد بررسی و در تمام دوره‌های زمانی خواهد شد که میزان این کاهش بسته به سناریو، منطقه و زمان متفاوت بوده و از ۳ درصد تا ۸۶ درصد متغیر خواهد بود (جدول ۶). بیشترین اثر منفی تغییر اقلیم بر عملکرد گندم مربوط به شهر اهواز در سناریوی SSP585 و دوره زمانی سوم (۱۴۷۹-۱۴۵۵) با ۸۶ درصد کاهش عملکرد نسبت به سال پایه و کمترین اثر تغییر اقلیم نیز مربوط به شهر اردبیل با کاهش ۳ درصدی عملکرد در سناریوی SSP245 و دوره زمانی اول (۱۴۲۹-۱۴۰۵) خواهد بود (جدول ۶). به نظر می‌رسد با توجه به بالا بودن دما در منطقه اهواز، افزایش دما در اثر تغییر اقلیم سبب اثرات منفی بیشتری نسبت به سایر شهرها می‌گردد. پژوهشگران دیگر نیز بیان کردند که اثرات منفی تغییر اقلیم در مناطق گرم و خشک بسیار شدید می‌باشد (Gregory *et al.*, 2005). تغییر اقلیم سبب افزایش دما می‌شود و بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز و تنفس، سرعت توسعه و کارایی محصول برای تکمیل چرخه رشد آن تأثیر می‌گذارد (Yang & Zhang, 2006; Chartzoulakis & Psarras, 2005). مطالعات نشان می‌دهد این افزایش دما بر اثر تغییر اقلیم به دلیل کوتاه شدن دوره پر شدن دانه باعث کاهش عملکرد دانه غلات می‌شود (Smith *et al.*, 2013). افزایش دمای تا ۲ درجه سانتی‌گراد در آینده می‌تواند منجر به کاهش میانگین ۹ درصدی در عملکرد محصول شود (Jagermeyr *et al.*, 2021). میانگین کاهش عملکرد گندم در اثر تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی مختلف نشان داد که در هر دو سناریو با گذشت زمان اثر منفی تغییر اقلیم بیشتر می‌شود که شیب این کاهش عملکرد در سناریوی SSP585 نسبت به سناریوی SSP245 تندتر بود (جدول ۶). در سناریوی SSP245 با گذشت زمان میانگین کاهش عملکرد گندم نسبت به سال پایه از ۱۰/۵ درصد در دوره زمانی اول به ۴۸/۲ درصد در دوره زمانی سوم رسید که کاهش ۳۷/۷ درصدی را در فاصله دو دوره زمانی اول و سوم نشان داد، در صورتیکه در سناریوی SSP585 از ۱۴/۸ درصد در دوره اول به ۷۵/۸ درصد در دوره سوم رسیده و کاهش ۶۱ درصدی

را شامل شد. در مقایسه بین دو سناریو نیز سناریو SSP245 در مقایسه با سناریوی SSP585 اثر منفی کمتری بر میزان عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور داشت، بطوریکه میانگین کاهش عملکرد گندم در سناریوی SSP245 نسبت به سال پایه معادل ۲۹/۳ درصد و در سناریوی SSP585 برابر با ۴۶/۴ درصد شبیه‌سازی شد (جدول ۶). بررسی‌ها نشان داد که سناریوی SSP585 نسبت به سناریوی SSP245 اثرات بیشتری برای اکثر مناطق بین این دو مدل CMIP دارد (Huopo *et al.*, 2020).

جدول ۶. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585

منطقه	سناریوها					
	SSP585			SSP245		
	۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹	۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹
اردبیل	۰/۳۶	۰/۶۲	۰/۹۵	۰/۶۹	۰/۸۸	۰/۹۷
ارومیه	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۸۷	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۹۰
اصفهان	۰/۱۹	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۸۴
ایلام	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۷۹	۰/۴۲	۰/۶۷	۰/۸۷
اهواز	۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۶۹	۰/۳۸	۰/۵۶	۰/۸۸
بوشهر	۰/۱۶	۰/۴۰	۰/۸۴	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۸۹
تبریز	۰/۲۸	۰/۵۲	۰/۸۸	۰/۴۹	۰/۶۴	۰/۹۲
تهران	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۴۵	۰/۷۲	۰/۸۹
ساری	۰/۱۸	۰/۳۸	۰/۸۷	۰/۴۵	۰/۶۴	۰/۹۰
شاهرود	۰/۲۱	۰/۶۷	۰/۸۵	۰/۵۶	۰/۷۳	۰/۹۰
شیراز	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۸۴	۰/۴۳	۰/۶۶	۰/۸۵
شهرکرد	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۹۴	۰/۶۴	۰/۸۴	۰/۹۶
زنجان	۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۸۶	۰/۶۱	۰/۸۲	۰/۹۱
رشت	۰/۲۲	۰/۴۳	۰/۸۲	۰/۵۱	۰/۶۸	۰/۸۸
خرم آباد	۰/۳۶	۰/۶۷	۰/۹۲	۰/۵۹	۰/۷۱	۰/۹۴
قم	۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۸۴
کرج	۰/۳۳	۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۵۰	۰/۷۵	۰/۹۰
کرمان	۰/۱۸	۰/۴۶	۰/۸۲	۰/۵۹	۰/۷۳	۰/۸۵
کرمانشاه	۰/۱۸	۰/۵۳	۰/۷۹	۰/۴۳	۰/۶۳	۰/۸۹
گرگان	۰/۳۴	۰/۵۹	۰/۸۴	۰/۶۴	۰/۷۹	۰/۸۸
مشهد	۰/۲۱	۰/۶۴	۰/۸۶	۰/۵۱	۰/۶۸	۰/۸۷
همدان	۰/۳۱	۰/۵۴	۰/۸۷	۰/۶۱	۰/۸۵	۰/۹۰
یاسوج	۰/۱۹	۰/۵۷	۰/۸۹	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۹۳
یزد	۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۶۲	۰/۷۶	۰/۹۱
میانگین	۰/۲۴۲	۰/۵۱۵	۰/۸۵۲	۰/۵۱۸	۰/۷۰۹	۰/۸۹۵
		۰/۵۳۶			۰/۷۰۷	

۴.۷. اثرات تلفیقی

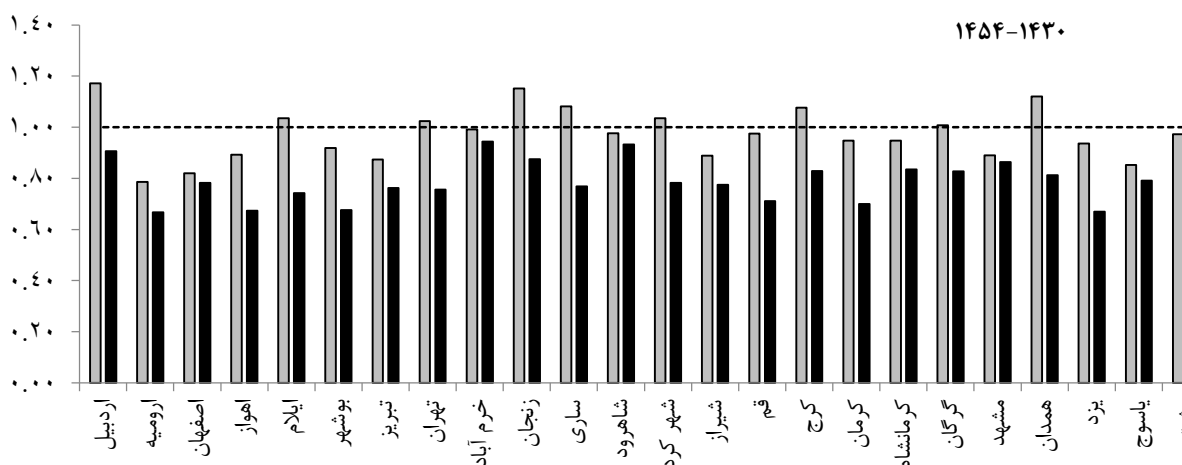
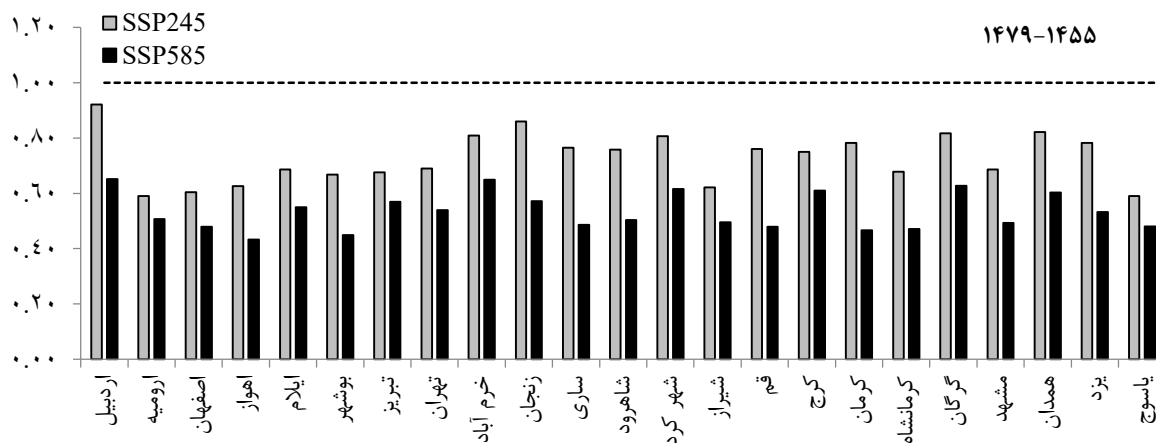
شکل ۴ اثرات تلفیقی تغییر اقلیم، دی اکسید کربن و پیشرفت فناوری بر عملکرد گندم مناطق مختلف کشور در سناریوها و دوره‌های زمانی مختلف را در مقایسه با سال پایه (خط نقطه چین) نشان می‌دهد. در مقایسه بین دو سناریو،

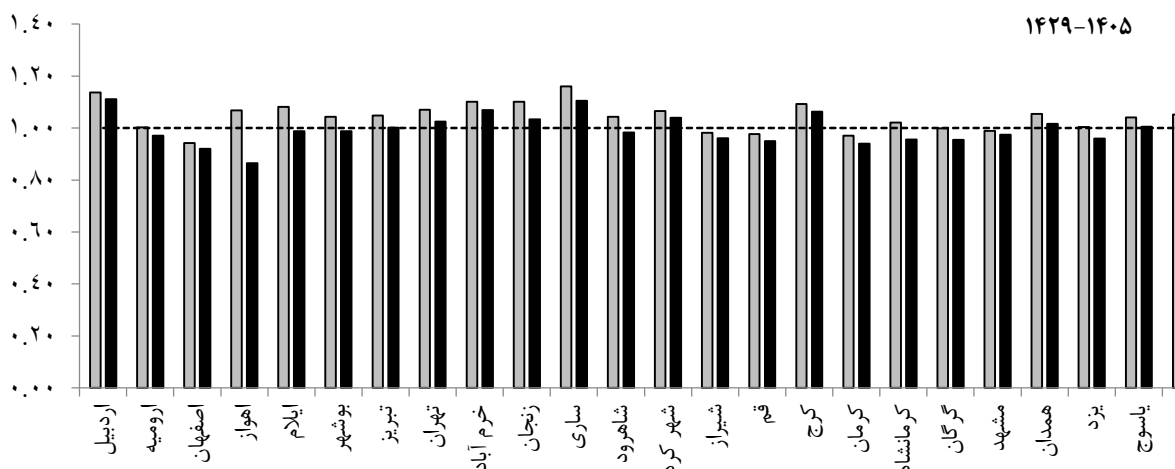
سناریوی SSP245 در هر سه دوره زمانی و در تمام مناطق کشور اثرات کمتری بر عملکرد گندم نسبت به سال پایه در مقایسه با سناریوی SSP585 داشت. به طور کلی اثرات تلفیقی کمترین تاثیر را در دوره زمانی اول و بیشترین تاثیر را در دوره زمانی سوم بر عملکرد گندم در مناطق مختلف داشت. در دوره زمانی اول (۱۴۰۵-۱۴۲۹) اثرات تلفیقی عوامل به غیر از مناطق اصفهان، شیراز، قم، کرمان، مشهد، گرگان، ارومیه و یزد اثر مثبتی بر عملکرد گندم در اکثر مناطق کشور در مقایسه با سال پایه داشتند (شکل ۴). مطالعات نشان می‌دهد عملکرد بسیاری از محصولات کشاورزی در گذشته روند افزایشی داشته است که بیشتر به دلیل پیشرفت فناوری (از جمله ژنتیک ارقام، شیوه‌های مدیریت کشاورزی و ...) می‌باشد (Burchfield *et al.*, 2020). با این حال، روند افزایش دما و رویدادهای شدید آب و هوایی در طول فصل رشد که ناشی از تغییرات آب و هوایی است، عملکرد محصول را در بسیاری از مناطق کاهش می‌دهد (Guo *et al.*, 2022).

برایند اثرات افزایشی پیشرفت فناوری و تاثیرات تغییر اقلیم ممکن است برای مناطق و محصولات مختلف متفاوت باشد و پیشرفت فناوری می‌تواند اثرات منفی تغییر اقلیم را جبران و یا حتی در نهایت باعث افزایش بیشتری نیز شود. نتایج مطالعه‌ای که به بررسی اثرات تلفیقی افزایش CO₂ و پیشرفت فناوری در شرایط تغییر اقلیم آینده بر عملکرد گندم پرداخته شد، نشان داد که پیشرفت فناوری عامل مؤثر بر افزایش عملکرد گندم در آینده خواهد بود که اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر عملکرد گندم را تعدیل می‌کند (Ewert *et al.*, 2005). با گذشت زمان و در دوره زمانی دوم (۱۴۳۰-۱۴۵۴) برخلاف دوره زمانی اول، در اکثر مناطق اثرات تلفیقی عوامل منجر به کاهش عملکرد گندم در مقایسه با سال پایه شد و فقط برخی از مناطق از جمله اردبیل، ایلام، تهران، زنجان، ساری، شهرکرد، کرج، و همدان در سناریوی SSP245 کاهش عملکرد نداشتند. در دوره زمانی سوم (۱۴۵۵-۱۴۷۹) اثرات تلفیقی در مقایسه با سال پایه در تمام مناطق کشور اثر منفی و کاهشی بر عملکرد گندم نشان دادند که در این میان بیشترین اثر منفی در منطقه اهواز در سناریوی SSP585 با کاهش ۵۷ درصدی عملکرد نسبت به سال پایه و کمترین اثر منفی در منطقه اردبیل در سناریوی SSP245 با کاهش ۸ درصدی عملکرد نسبت به سال پایه مشاهده شد (شکل ۴). بعد از اردبیل مناطق زنجان، همدان، خرم‌آباد و شهرکرد در سناریوی SSP245 با کاهش ۱۴، ۱۸، ۱۹ و ۱۹ درصدی عملکرد در مقایسه با سال پایه در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. از طرف دیگر مناطق بوشهر (۵۵ درصد کاهش عملکرد نسبت به سال پایه)، کرمان و کرمانشاه (۵۳ درصد کاهش عملکرد نسبت به سال پایه)، اصفهان، قم و یاسوج (۵۲ درصد کاهش عملکرد نسبت به سال پایه) در سناریوی SSP585 تحت تاثیر اثرات تلفیقی عوامل بیشترین کاهش عملکرد را نشان دادند (شکل ۴).

در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در آینده تحت شرایط تغییر اقلیم و پیشرفت فناوری در برزیل پرداختند و نتایج شبیه‌سازی رشد گیاهان نشان داد که عملکرد سویا تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند، در حالی که عملکرد ذرت و پنبه بین سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۵ و ۲۰۴۰-۲۰۳۵ به ترتیب ۲۸ درصد و ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش در عملکرد به کاهش بارندگی و دماهای بالاتر در آینده ارتباط دارد. همچنین برآورد روند فناوری نشان داد که پیشرفت فناوری احتمالاً با افزایش عملکرد سویا به میزان ۴۰ درصد و عملکرد ذرت و پنبه تا ۶۸ درصد، اثرات منفی تغییر اقلیم را جبران می‌کند (Hampf *et al.*, 2020). با توجه به نتایج به نظر می‌رسد پیشرفت فناوری و دی اکسید کربن در دوره‌های زمانی اول و دوم

پتانسیل جبران اثرات منفی تغییر اقلیم را به ویژه در مناطق سردسیر کشور داشته و حتی در دوره زمانی اول منجر به افزایش عملکرد گندم در مقایسه با سال پایه شده است، در صورتی که با گذشت زمان و در دوره زمانی سوم اثرات منفی تغییر اقلیم تشدید پیدا کرده و بر اثرات مثبت فناوری و دی اکسید کربن غالب گشته و منجر به کاهش عملکرد گندم مخصوصاً در مناطق گرم و خشک خواهد شد.





شکل ۴. اثرات تلفیقی (تغییر اقلیم، دی اکسید کربن و پیشرفت فناوری) بر عملکرد گندم در سناریوهای اقلیمی و دوره‌های زمانی مختلف

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که استان‌های اهواز، بوشهر، کرمان، قم، کرمانشاه، اصفهان و یاسوج پرمخاطره‌ترین استان‌های کشور در رویارویی با اثرات منفی تغییر اقلیم خواهند بود و به نظر می‌رسد پیشرفت فناوری‌ها در آینده می‌تواند تا حدودی اثرات منفی تغییر اقلیم را تعدیل کند. نکته‌ای که بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که با گذشت زمان اثرات منفی تغییر اقلیم به‌ویژه در سناریوی SSP585 تشدیدتر شده و اثرات مثبت توسعه فناوری، پتانسیل جبران اثرات منفی تغییر اقلیم را نخواهد داشت که این امر منجر به کاهش عملکرد گندم خواهد شد. به عبارت دیگر در دوره‌های زمانی دوم و سوم، اثرات منفی تغییر اقلیم بر اثرات مثبت فناوری غالب شده و در نهایت منجر به کاهش عملکرد گندم خواهد شد؛ بنابراین جلوگیری از کاهش عملکرد گندم در آینده نیازمند این خواهد بود که توسعه و استفاده از فناوری‌های نوین در آینده نسبت به گذشته با سرعت بیشتری افزایش یابد. به طور کلی از جمله رویکردهای مهم مقابله با کاهش عملکرد گندم در آینده می‌توان به سیاست‌گذاری کلان بین‌المللی و منطقه‌ای در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حرکت در مسیر سناریوهای زیست محیطی تغییر اقلیم، استفاده و توسعه فناوری‌های مدرن در مزارع، تغییر مدیریت زراعی بسته به شرایط تغییر اقلیم و همچنین استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و گرما به ویژه در مناطق گرمسیری و خشک کشور اشاره کرد که در مطالعات بایستی مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- Abbasi Ali Kemer, R., Nasiri Mahalati, M., Kochaki, A. (2019). Investigating the trend of temperature changes and its effects on the length of the grain filling period and the yield potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) in different regions of Iran during a 20-year period (1371-91). *Journal of Agricultural Ecology* 12(2), 319 -343. (In Persian).
- Ahmadi, M., Lashkari, H., Keykhosravi, Gh. and Azadi, M. (2015). Analysis of temperature extreme indicators. In detecting climate change in large Khorasan. *Journal of Geography*. 13(45), 53-75. (In Persian).

- Aiyong, Q.I., Xing, L.I., Lingzhi, S.H.I., Daqun, L.I.U. & Zaifeng, L.I. (2015). Identification of a Leaf Rust Resistance Gene in the Chinese Wheat Line LB0288. *Czech J. Genet. Plant Breed*, 51(2), 43-49.
- Amthor, J.S. (2001). Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Research*, 73, 1-34.
- Bannayan, M., Mohamadian, A., Alizadeh, A. (2010), "On climate variability in North-East of Iran", *Journal of Water and Soil* 24 (1): 118-131.
- Bannayan, M., Kobayashi, K., Kim, H.Y., Liffering, M., Okada, M., Miura, S. (2005). Modelling the interactive effects of CO₂ and N on rice production performance. *Field Crops Research*, 14, 237-251.
- Bannayan, M., Mansoori, H., & Eyshi Rezaei, E. (2014). Estimating climate change, CO₂ and technology development effects on wheat yield in northeast Iran. *International journal of biometeorology*, 58, 395-405.
- Benlloch-Gonzalez, M., Bochicchio, R. & Berger, J. (2014). High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. *Field Crops Research*, 165, 71-79.
- Burchfield, E., Matthews-Pennanen, N., Schoof, J. & Lant, Ch. (2020). Changing yields in the Central United States under climate and technological change. *Climatic Change*, 159, 329-346.
- Chartzoulakis, K. & Psarras, G. (2005). Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece. *Agric Ecosyst Environ*, 106, 147-157.
- De Costa, W., Weerakoon, W., Herath, H., Amaratunga, K. & Abeywardena, R. (2006). Physiology of yield determination of rice under elevated carbon dioxide at high temperatures in a subhumid tropical climate. *Field Crops Research*, 96, 336-347.
- Ewert, F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.J. & Leemans, R. (2005). Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agric Ecosyst Environ*, 107, 101-116.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization: *Geoscientific Model Development*, (Online), 9(LLNL-JRNL-736881).
- Gregory, P.J., Ingram, J.S.I. & Brklacich, M. (2005). Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 360, 2139-2148.
- Guntukula, R., Goyari, P. (2020). Climate Change Effects on the Crop Yield and Its Variability in Telangana, India. *Studies in Microeconomics*, 8(1) 119-148.
- Guo, S., Erjing, G., Zhentao, Z., Meiqi, D., Xi W., Zhenzhen, F., Kaixin G., Wenmeng Z., Wenjing Zg, Jin Zhao., Zhijuan L., Chuang Z. & Xiaoguang Y. (2022). Impacts of mean climate and extreme climate indices on soybean yield and yield components in Northeast China. *Science of The Total Environment*, 838(3), 156284.
- Hampf, A.C., Stella, T., Berg-Mohnicke, M., Kawohl, T., Kawohl, T., Kilian, M. & Nendel, C. (2020). Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. *Agricultural Systems*, 177, 102707.
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L.P. & Jones, J.W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
- Huang, Y., Yu, Y., Zhang, W., Sun, W., Liu, S., Jiang, J., Wu, J., Yu, W. & Yang, Z. (2009). Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agr Forest Meteorol*, 149, 106-129.
- Huopo, C., Jianqi, S., Wenqing, Lin. & Huiwen, X. (2020). Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. *Science Bulletin*, 65(17-15), 1415-1418.

- IPCC, 2023: Climate Change (2023). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. *IPCC, Geneva, Switzerland*, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Jagermeyr, J., Muller, C., Ruane, A.C., Elliott, J., Balkovic, J. & Castillo, O. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature food*, 2(11), 873–885.
- Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Mansouri, H., Moradi, R. (2017). Effect of Climate and Management Factors on Potential and Gap of Wheat Yield in Iran with Using WOFOST Model. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(2), 244-256. (In Farsi)
- Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Soltani, A., Sharifi, H.R., Kamali, G., Rezvani Moghaddam, P. (2003). Simulating Iran's climate changes under conditions of doubling CO₂ by general circulation models. *Desert*, 8(2), 178-191.
- Mansouri, H., Noshad, H., Hassani, M. (2021). Optimization of Nitrogen Fertilizer and Water Consumption in Sugar Beet by using Response-Surface Method. *Journal of Agroecology*, 13(1), 57-72. (In Farsi)
- Mansouri, H., Raei, Y., & Zaeim, A.N. (2015). Simulating future wheat yield under climate change, carbon dioxide enrichment and technology improvement in Iran. Case study: Azarbaijan region. *Spanish journal of agricultural research*, 13(4), 10.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z.R., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N. & Canadell, J.G., (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), pp.3571-3605.
- Momeni, S. & Zibaei, M. (2013). The Potential Impacts of Climate Change on the Agricultural Sector of Fars Province. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 27(3), p 18. (In Farsi)
- Momtazi, F. & Emam Y. (2006). The effect of planting date and plant density on yield and yield components of winter wheat, Shiraz cultivar. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 37(1), 1-11. (In Farsi)
- Nassiri, M. & Koocheki A.R. (2010). Agroecological zoning of wheat in Khorasan provinces: Estimating yield potential and yield gap. *Iranian Journal Field Crops Research*, 7, 695-709. (In Farsi)
- NOAA. (2024). NOAA global monitoring laboratory: trends in atmospheric carbon dioxide', NOAA global monitoring laboratory: trends in atmospheric carbon dioxide (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>)
- Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. & Fischer, G., (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Glob. Environ. Change*, 14, 53–67.
- Rahman, M.H., Ahmad, A., Wang, X., Wajid, A., Nasim, W., Hussain, M., Ahmad, B., Ahmad, I., Ali, Z. & Ishaque, W. (2018). Multi-Model Projections of Future Climate and Climate Change Impacts Uncertainty Assessment for Cotton Production in Pakistan. *Agric. For. Meteorol*, 253–254, 94–113.
- Raza, A., Razzaq, A., Saher Mahmood, S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., Xu, J. (2019). Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome, A Review. *Plant*, 8(34), 1-29.
- Rinaldi, M., Losavio, N., & Flagella, Z. (2003). Evaluation of OIL CROP-SUN model for sun flower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78, 17-30.
- Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D., & Bowen, W.T. (1998). Cereal growth, development, and yield. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton (Eds.). *Understanding Options for Agricultural Production*. The Netherlands: Kluwer Academic, Dordrecht, p. 79-98.
- Shayanmehr, S., Rastegari Henneberry, S., Sabouhi Sabouni, M. and Shahnoushi Foroushani, N. (2020) Drought, Climate Change, and Dryland Wheat Yield Response: *An Econometric Approach*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(14): 5264.

- Smith, W., Grant, B., Desjardins, R., Kroebel, R., Li, C., Qian, B., Worth, D., McConkey, B. & Drury, C. (2013). Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada. *Agric. Ecosyst. Environ*, 179, 139–150.
- Yang, Ch., Ferga, H., Van Leperen, W., Trindade, H., Santos, J. A. (2019). Effects of climate change and adaptation options on winter wheat yield under rainfed Mediterranean conditions in southern Portugal. *Climatic Change*, 154, 159-178.
- Yang, J.C. & Zhang, J.H. (2006). Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*, 169, 223-236.
- Yoon, S.T., Hoogenboom, G. & Bannayan, M. (2009). Growth and development of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in response to CO₂ enrichment under two different temperature regimes. *Environ Exp Bot*, 67(1), 178-187.