



Simulating Future Wheat Production under Climate Change and Technological Advancement in Iran

Sadegh Ghorbani¹ | Behnam Kamkar² | Benjamin Torabi³ | Hamed Mansouri⁴

1. Corresponding Author, Department of Agronomy, College of Plant Protection, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: s.ghorbani@gau.ac.ir
2. Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: kamkar@um.ac.ir
3. Department of Agronomy, College of Plant Protection, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: b.torabi@gau.ac.ir
4. Sugar Beet Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran. E-mail: h.mansori@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: June 01, 2025

Revised: September 23, 2025

Accepted: October 18, 2025

Keywords:

Carbon dioxide,
climate change scenario,
technological development,
tropical regions,
yield reduction.

Extended Abstract

Introduction. Climate change and its impact on agriculture has become a very important issue worldwide. Climate change is generally associated with global warming, which is caused by the obvious increase in greenhouse gas emissions. The effects of climate change can be harmful or beneficial for agriculture, depending mainly on the region and the type of crop. The impact of climate change on crop production has been studied using global circulation models (GCM) along with crop growth simulation models under different scenarios in different parts of the world. The studies of crop yields in recent years show an increasing trend due to advances in technology (such as new varieties and agricultural management methods, etc.). An analysis of the 50-year trend of wheat production in Iran also shows that the increase in wheat production in the country, especially in recent years, was not due to an increase in the cultivated area, but mainly due to an increase in yield per unit area, which is due to technological development in production. Therefore, to accurately estimate future yield changes, it is necessary to consider technological development as an influential factor in addition to changes in climate variables and CO₂ effects.

Materials and Methods. In the study, the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) was used to investigate the future climate situation using two scenarios (SSP585 and SSP245). To simulate wheat growth, the DSSAT-Nwheat model in DSSAT software, which effectively simulates crop growth, development, and yield, was utilized. In order to parameterize and validate the model, data from field experiments conducted for the compatibility of promising wheat genotypes and lines at the country's grain research stations in the main wheat production regions of the country were used. In each region, data from two years 2019 and 2020 were used to parameterize the model, and data from two years 2021 and 2023 were used to evaluate the model. To evaluate the model, the normalized root mean square error (NRMSE) and the model efficiency (EF) criterion were used. Comparison of the fitted linear regression between the simulated (y) and observed (x) data with the 1:1 line was also used to evaluate the model. To quantify the impact of technological advancements on future wheat yields, the method developed by Ewert *et al.* (2005) was utilized. To calculate the impact of CO₂ on wheat yield, the future CO₂ concentration was first estimated, and then the increase in yield per unit increase in CO₂ was evaluated. Finally, the combined effects of influencing factors (climate change, CO₂, and technological development) on wheat yield in future conditions were estimated.

Results and Discussion. The results of the climate model evaluation showed that the climate data have acceptable accuracy for simulating climate variables, due to the low values of the NRMSE index. The crop growth model has an acceptable estimate for simulating traits in wheat plants based on the NRMSE and ME statistical indices. Simulation of the effect of technological development on wheat yield in future conditions in different scenarios showed that in all different regions of the country, the effect of technology was positive compared to the baseline years, and the extent of this effect varied from 1% to 27%, depending on the region, scenario, and time period. The results showed that an increase in carbon dioxide will lead to an increase in wheat production in the future, such that the increase in production due to an increase in CO₂ varied from 2.6 to 27.8% compared to the baseline years, depending on the year and scenario. Simulation of the effect of climate change on wheat production in different regions of the country showed that climate change caused a decrease in wheat production compared to the baseline years in both scenarios and in all time periods, the extent of this decrease varies by scenario, region, and time, ranging from 3% to 86%. In general, the combined effects had the least impact in the first time period and the greatest impact in the third time period on wheat yield in different regions. During the second period (2051-2075), the overall impact of various factors resulted in a decrease in wheat yield across most regions compared to the base year. However, in some regions, such as Ardabil, Ilam, Tehran, Zanjan, Sari, Shahr-e-Kord, Karaj, and Hamedan did not experience a decline in yield under the SSP245 scenario. In the third period (2076-2100), the combined effects showed a negative and decreasing effect on wheat yield compared to the base year in all regions of the country. The highest negative effect was observed in the Ahvaz region in the SSP245 scenario with a 57% decrease in production compared to the baseline years and the lowest negative effect was observed in the Ardabil region in the SSP585 scenario with an 8% decrease in production compared to the baseline years.

Conclusion. It seems that the development of technology and carbon dioxide in the first and second time periods has the potential to offset the negative effects of climate change, especially in cold regions of the country, and even in the first time period it has led to an increase in wheat production compared to the base year. However, with the passage of time and in the third time period, the negative effects of climate change have intensified and prevailed over the positive effects of technology and carbon dioxide, leading to a decrease in wheat production, especially in tropical and arid regions.

Cite this article: Ghorbani, S., Kamkar, B., Torabi, B., & Mansouri, H. (2026). Simulating future wheat production under climate change and technological advancement in Iran. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 57(1), 13-30. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.396046.655144.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

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، گروه زراعت، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: s.ghorbani@gau.ac.ir
۲. گروه آگروتکنولوژی، 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 چغندرکند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران. رایانامه: h.mansori@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مطالعه حاضر با هدف شبیه‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی، پیشرفت فناوری، افزایش دی‌اکسیدکربن 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 (۱۴۲۹-۱۴۰۵، 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 یک 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؛ به طوری که 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 دی‌اکسیدکربن نشان داد که در دوره زمانی اول (۱۴۲۹-۱۴۰۵) اثرات توأم همه عوامل بر عملکرد گندم در اکثر مناطق نسبت به سال پایه بیشتر بود؛ در صورتی که 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. باتوجه‌به نتایج به نظر می‌رسد پیشرفت فناوری و دی‌اکسیدکربن در دوره زمانی اول پتانسیل جبران اثرات منفی تغییر اقلیم را داشته است؛ در صورتی که 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.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶	
کلیدواژه‌ها: توسعه فناوری، دی‌اکسیدکربن، سناریو تغییر اقلیم، کاهش عملکرد، نواحی گرمسیری.	

استناد: قربانی، ص، کامکار، ب، ترابی، ب، و منصوری، ح. (۱۴۰۵). شبیه‌سازی عملکرد گندم در آینده تحت شرایط تغییر اقلیم و پیشرفت فناوری در ایران. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۱۳(۱)، ۳۰-۱۳. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.396046.655144



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان می‌باشد (Shayanmehr *et al.*, 2020) که به دلیل حساسیت و آسیب‌پذیر 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 می‌تواند اطلاعات مناسبی به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران برای تدوین و اجرای سیاست‌های مناسب به‌منظور کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی فراهم آورد.

تأثیر تغییر اقلیم بر تولید محصول با استفاده از مدل‌های گردش جهانی (GCM) همراه با مدل‌های شبیه‌سازی 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 به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. تولید و تجمع ماده خشک بر اساس تشعشع خورشیدی، دما، شاخص سطح برگ و کارایی مصرف تشعشع تعیین می‌شود. فنولوژی و نمو محصول نیز به‌صورت 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، زیست‌فناوری، 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.

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 گرم‌ومرطوب خزری افزایش دمای میانگین سالانه، با شدت کمی طول دوره‌ی پر شدن و عملکرد دانه را افزایش داده است؛ اما در مناطق گرم‌وخشک جنوب و مرکز ایران افزایش دما به‌تدریج با ایجاد تنش در دوره‌ی رسیدگی دانه منجر به کاهش طول دوره‌ی پر شدن دانه و کاهش عملکرد گندم شده است. باتوجه‌به 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). نتایج مطالعه دیگری که روی برآورد اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر هشت محصول عمده زراعی انجام شد 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 آبی 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 باتوجه به نتایج شبیه‌سازی مدل لارس برای دوره‌های آینده دما افزایش خواهد یافت و به همین دلیل طول دوره جوانه‌زنی و به‌طور 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 به‌طور کلی افزایش می‌یابد (Keshtkar, 2020). گزارش‌های تغییرات آب و هوایی در مقیاس جهانی کاهش عملکرد گندم و آبی را به ترتیب ۱۰-۴۰ و ۲۰-۵۰ درصد نشان داده است (Parry *et al.*, 2004). نتایج مطالعه بررسی اثر افزایش CO₂ و افزایش دما بر رشد سیستم ریشه دو رقم گندم بهاره نشان داد که افزایش غلظت CO₂ باعث افزایش ریشه و ساقه شد، اما این اثر مثبت هنگامی که گیاهان در درجه حرارت بالا رشد داده شدند، کاهش یافت (Benlloch *et al.*, 2014).

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. داده‌های اقلیمی و سناریوهای تغییر اقلیم

در این پژوهش برای بررسی وضعیت آب‌وهوای آینده از مدل‌های جفت‌شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6^۱) 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 آب‌وهوایی (WCRP^۲) و کارگروه مدل‌های جفت‌شده (WGCM^۳) به‌عنوان یک چارچوب اساسی برای اجرای شبیه‌سازی آب‌وهوایی 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 (درجه‌سنتی‌گراد)، 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^۴ (SDSM) داده‌های اقلیمی برای شرایط آب و هوایی آینده در مناطق مختلف کشور شبیه‌سازی شد. برای این منظور چهار دوره زمانی شامل ۱۴۰۱-۱۳۷۱ (سال پایه) و سه دوره اقلیمی آینده شامل دوره زمانی ۱۴۲۹-۱۴۰۵، ۱۴۵۴-۱۴۳۰ و ۱۴۷۹-۱۴۵۵ برای دو سناریوی SSP245 و SSP585 در نظر گرفته شد. برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری از داده‌های هواشناسی واقعی و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای سال پایه استفاده شد.

۲-۲. مدل رشد گیاهی

به‌منظور شبیه‌سازی رشد گندم از مدل رشد گیاهی DSSAT-Nwheat موجود در نرم‌افزار^۵ 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.

1. Coupled Model Intercomparison Project phase 6
 2. World Climate Research Programme
 3. Working Group on Coupled Modelling
 4. Statistical Downscaling model
 5. Decision Support System for Agrotechnology Transfer

۳-۲. واسنجی و اعتبارسنجی مدل رشد گیاهی

به‌منظور 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 به‌عنوان 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 شد. در هر منطقه داده‌های دو سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ۱۳۹۸-۱۳۹۹ برای واسنجی مدل و داده‌های دو سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

به‌منظور ارزیابی مدل، چندین معیار برای تعیین کمیت تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده محاسبه شد (رابطه ۱). ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده $(nRMSE)^6$ اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را بیان می‌کند (Rinaldi et al., 2003). برای ارزیابی سیستماتیک مدل نیز از معیار کارایی مدل $(ME)^7$ استفاده شد که برای تخمین عملکرد مدل در رابطه با میانگین داده‌های مشاهده شده استفاده می‌شود.

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

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

در روابط بالا P و O به‌ترتیب داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده، O میانگین داده‌های مشاهده شده 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 نشان‌دهنده دقت ضعیف مدل می‌باشد (Huang et al., 2009). ME نیز کارایی مدل را نشان می‌دهد و می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد که هرچقدر عدد به‌دست‌آمده به یک نزدیکتر باشد نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی داده‌ها می‌باشد. علاوه‌براین، از مقایسه رگرسیون خطی برازش داده‌شده بین داده‌های شبیه‌سازی (y) و مشاهده شده (x) با خط ۱:۱ نیز برای ارزیابی مدل استفاده شد. برای این منظور معادله خطی رگرسیون برازش داده‌شده 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).

۴-۲. اثرات پیشرفت فناوری

به‌منظور 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 شد، 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 به‌دست‌آوردن داده‌های تصحیح شده، از روش تجزیه 8 (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 شد.

6. Normalized Root Mean Square Error

7. Model Efficiency

8. Decomposition method

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

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

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

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

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

تغییر عملکرد گندم تحت تأثیر پیشرفت فناوری در زمان آینده در مقایسه با سال پایه (P_{t0}) با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

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

$P_{t,T}$ ، T عملکرد آینده گندم تحت تأثیر پیشرفت فناوری، $Y_r(t_0)$ تغییر عملکرد نسبی در سال پایه و $Y_{r,a}$ افزایش سالانه تغییر عملکرد نسبی با توجه به سال پایه را نشان می دهد. 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 ($f_{T,P}$) و همچنین کاهش خلاء بین عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل ($f_{T,G}$) منجر به افزایش عملکرد می شود. مقادیر $f_{T,P}$ و $f_{T,G}$ از روش اورت و همکاران به دست آمد (Ewert *et al.*, 2005).

۵-۲. اثرات غلظت CO_2

در محاسبه اثر CO_2 بر عملکرد گندم ابتدا غلظت CO_2 در آینده برآورد و سپس میزان افزایش عملکرد به ازای هر واحد افزایش CO_2 مدنظر قرار می گیرد. تخمین غلظت CO_2 آینده در سناریوهای SSP توسط منشاسن و همکاران انجام شد (Meinshausen *et al.*, 2020). بر این اساس غلظت CO_2 در سناریوها و دوره های زمانی مورد بررسی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. غلظت دی اکسید کربن برآورد شده (ppm) در دوره های زمانی مختلف برای دو سناریوی اقلیمی SSP245 و SSP585.

دوره زمانی			غلظت CO_2	سناریوی اقلیمی
۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹		
۵۷۷-۶۰۳	۵۱۰-۵۷۵	۴۳۲-۵۰۶	دامنه	SSP245
۵۹۴	۵۴۴	۴۶۹	میانگین	
۱۷۷	۱۲۷	۵۲	اختلاف با دوره پایه	
۸۱۴-۱۱۳۵	۵۷۰-۸۰۲	۴۳۵-۵۶۳	دامنه	SSP585
۹۷۲	۶۷۶	۴۹۳	میانگین	
۵۵۵	۲۵۹	۷۶	اختلاف با دوره پایه	

به منظور محاسبه اثر دی اکسید کربن بر تغییر عملکرد گندم، تغییر عملکرد نسبی تحت تأثیر افزایش سطوح CO_2 با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Ewert *et al.*, 2005):

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

$P_{t,CO}$ عملکرد آینده گندم تحت تأثیر غلظت CO_2 ، $f_{CO,r}$ تغییر عملکرد نسبی به ازای تغییر در واحد غلظت CO_2 و ΔC_{t-t_0} تفاوت بین غلظت CO_2 آینده و غلظت CO_2 فعلی است. غلظت دی اکسید کربن در سال پایه ($f_{CO,r} = 0.05\%$)

(۱۴۰۱) (۲۰۲۲) برابر با ۴۱۷ ppm در نظر گرفته شد (NOAA, 2024). میزان افزایش عملکرد گندم به‌ازای افزایش هر واحد CO₂ برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد (Koocheki & Nassiri, 2010; Bannayan et al., 2014; Mansouri et al., 2015).

۶-۲. اثرات تلفیقی عوامل بر عملکرد گندم

به‌منظور 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).

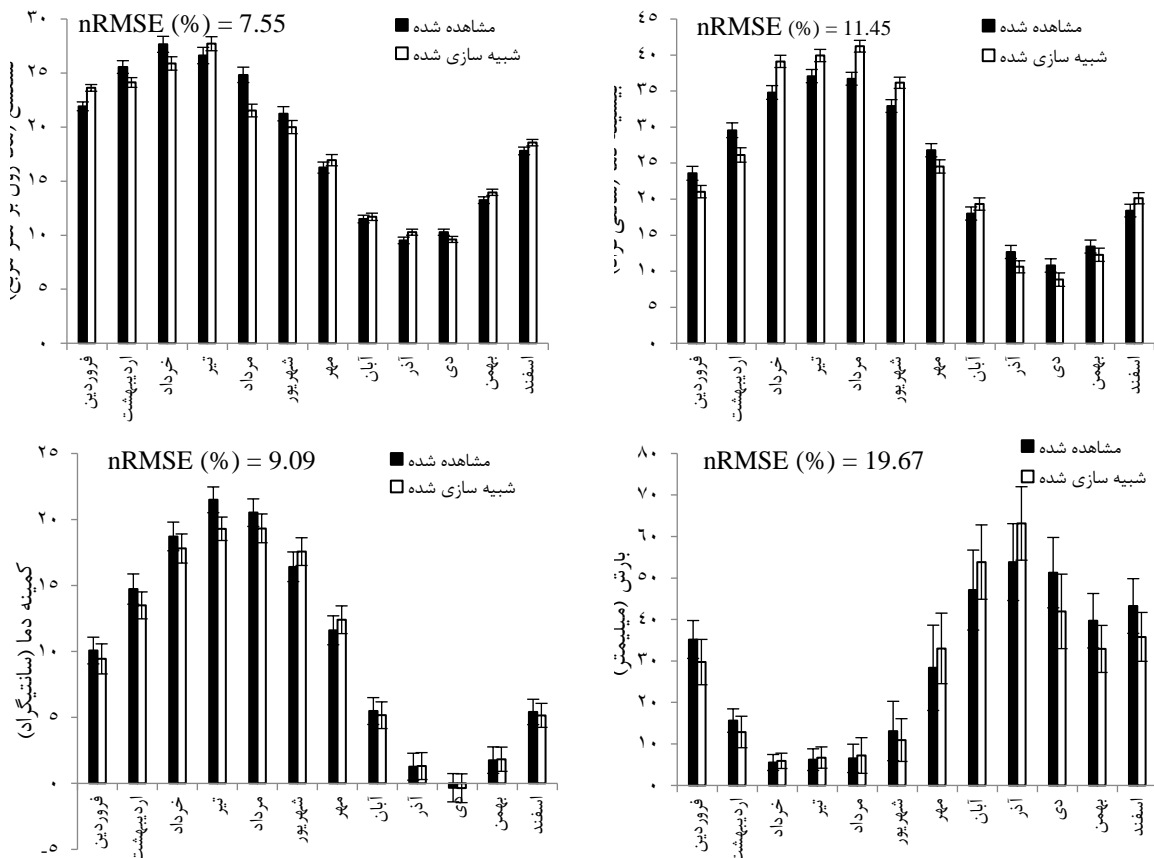
$$\frac{P_t}{P_{t0}} = \frac{1 + ((P_{t,cl}/P_{t0} - 1) + (P_{t,co}/P_{t0} - 1) + (P_{t,T}/P_{t0} - 1))}{1} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه ۸، P_t عملکرد آینده گندم است که تحت‌تاثیر هر سه عامل تغییر اقلیم، CO₂ و پیشرفت فناوری قرار می‌گیرد. بعد از برآورد اثرات هر سه عامل و همچنین اثرات تلفیقی آنها بر عملکرد گندم، میزان اثر افزایشی یا کاهش‌ی هر کدام از عوامل در مناطق مختلف مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که به‌منظور 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 نشان‌دهنده میزان یا درصد کاهش عملکرد گندم و اعداد بیشتر از یک نشان‌دهنده میزان یا درصد افزایش عملکرد نسبت به سال پایه می‌باشند.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. اعتبارسنجی مدل اقلیمی

مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده داده‌های اقلیمی به‌صورت میانگینی از مناطق مختلف کشور در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده متغیرهای اقلیمی کشور برای سال پایه (دوره زمانی ۱۳۷۱-۱۴۰۱) و شاخص nRMSE. Figure 1. Observed and simulated values of country climate variables for baseline year (1992-2022) and nRMSE index.

نتایج اعتبارسنجی مدل اقلیمی ریزمقیاس‌نمایی آماری بر اساس شاخص nRMSE نشان داد که مقدار این شاخص برای داده‌های 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 داده‌های تشعشع را با دقت بالاتر و داده‌های بارندگی را با دقت پایین‌تری شبیه‌سازی کرد؛ به طوری که داده‌های تشعشع با اختلاف $\pm 7/55$ درصد و داده‌های بارندگی با اختلاف $\pm 19/67$ درصد نسبت به داده‌های واقعی شبیه‌سازی شدند. به طور کلی نتایج اعتبارسنجی مدل اقلیمی نشان داد که داده‌های اقلیمی با توجه به مقادیر پایین شاخص nRMSE از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برخوردار است.

۲-۳. 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 جوانه‌زنی تا آغاز گلدهی، دمای مورد نیاز (درجه-روز) از پر شدن دانه تا زمان رسیدگی، حساسیت به فتوپریود و بهاره‌سازی، 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 شد (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی برای ارقام مختلف گندم.

Table 2. The calibration results of genetical coefficients for different wheat cultivars.

پارامتر	واحد	حیدری (سردسیر)	ترابی (معتدل)	تیرگان (مرطوب)	مهرگان (گرم)
P1	°C	۲۸۰	۲۸۰	۲۷۰	۲۴۰
P5	°C	۷۹۰	۷۱۰	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	میلی‌گرم دانه در روز	۲/۰	۲/۷	۲/۶ یا ۲/۵	۲/۶
STMMX	گرم	۳/۰	۳/۰	۳/۰	۳/۰

P1: درجه-روز مورد نیاز از شروع جوانه‌زنی تا آغاز گلدهی، P5: درجه روز مورد نیاز از پر شدن دانه تا زمان رسیدگی، PPSEN: حساسیت به فتوپریود، VSEN: حساسیت به بهاره‌سازی، 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.

۳-۳. اعتبارسنجی مدل رشد گیاهی

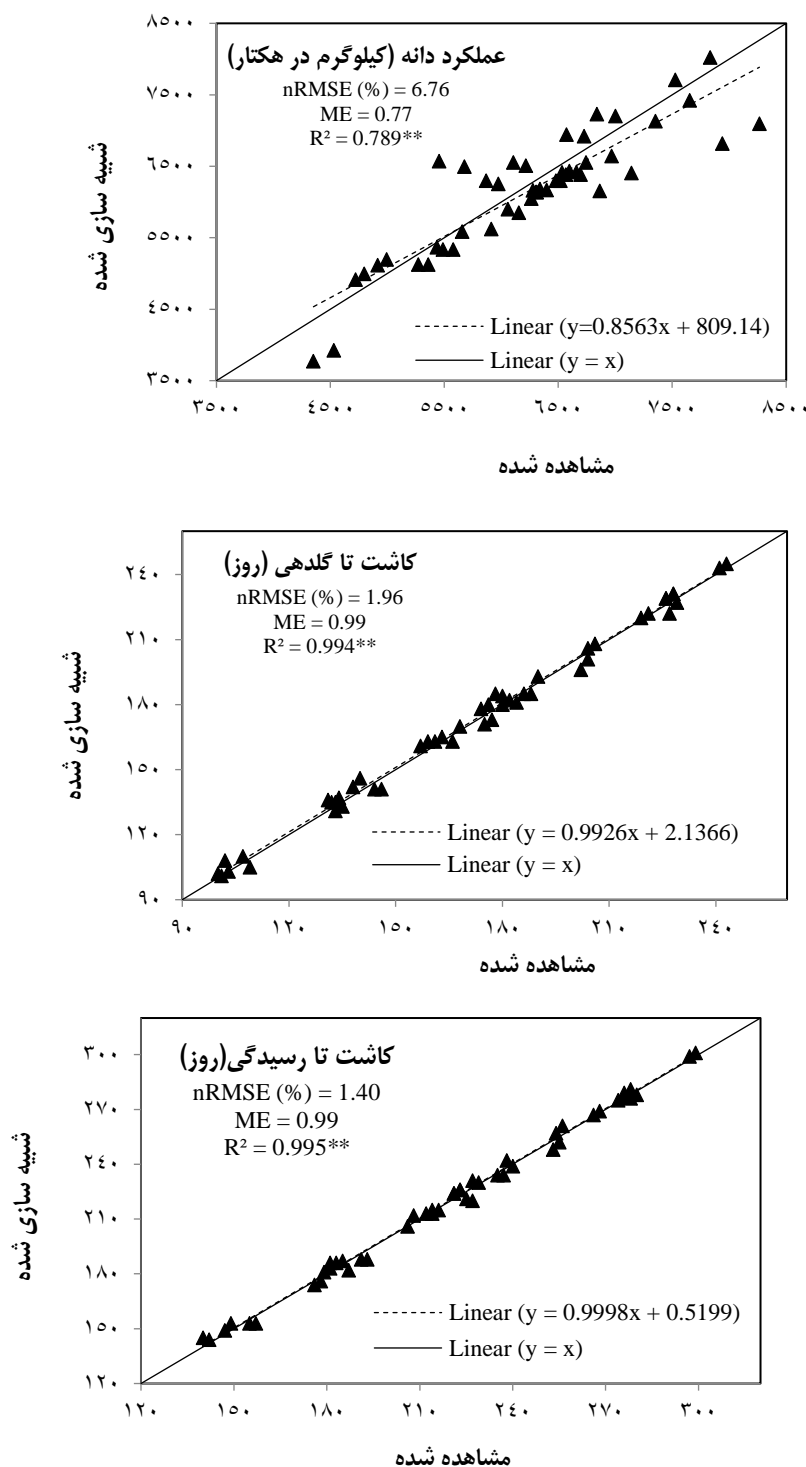
پراکنش داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های مشاهده شده به همراه رگرسیون برازشی و مقادیر nRMSE و ME برای صفات عملکرد دانه، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی گندم در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج اعتبارسنجی مدل رشد گیاهی نشان داد که با توجه به اینکه مقادیر محاسبه شده برای شاخص nRMSE کمتر از ۱۰ و برای شاخص 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).

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).

۳-۴. 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، به‌زراعی و به‌نژادی گندم بوده است. اثر فناوری

از جمله استفاده از ارقام جدید می‌تواند سبب افزایش عملکرد شود. پژوهشگران گزارش کردند که در ارقام جدید سبزشدن 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.



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

Figure 2. The simulated versus observed values of seed yield, planting until flowering and planting until maturity in wheat and also comparison with line 1:1.

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 برازش یافته بین زمان و عملکرد گندم در این دوره زمانی نشان داد که شیب افزایش عملکرد سالانه بین ۲۶/۵ تا ۱۰/۷ کیلوگرم در هکتار (به ترتیب برای مناطق یاسوج و ساری) بوده است (شکل 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.

Table 3. The t-test result for comparing intercept and slope of line 1:1 with the fitted regression between observed and simulated values.

فرض صفر (a=0, b=1)	مقدار t		شیب (b)		عرض از مبدا (a)		صفات
	t _b	t _a	انحراف معیار	ضریب	انحراف معیار	ضریب	
قبول	۱/۹۱۱	۱/۹۶۷	-۰/۰۷۵	-۰/۸۵۶۳	۴۱۱/۴۳	۸۰۹/۱۴	عملکرد دانه
قبول	-۰/۶۳۷	۱/۰۳۴	-۰/۰۱۲	-۰/۹۹۲۶	-۰/۰۶۶	۲/۱۳۶۶	کاشت تا گلدهی
قبول	-۰/۰۱۸	-۰/۲۲۲	-۰/۰۱۰	-۰/۹۹۹۸	۲/۳۴۶	-۰/۵۱۹۹	کاشت تا رسیدگی

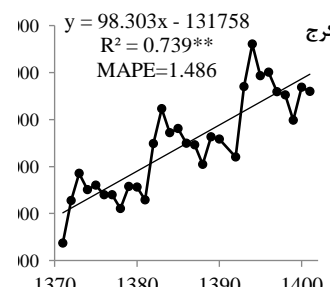
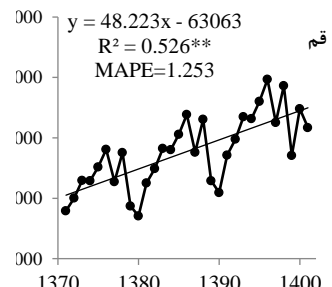
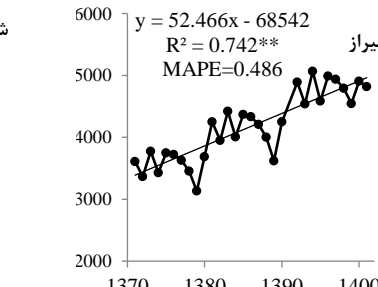
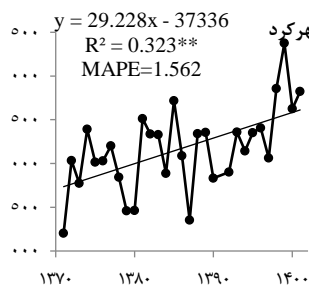
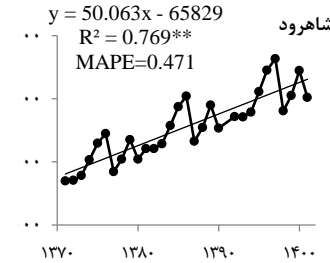
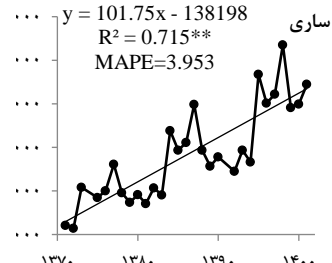
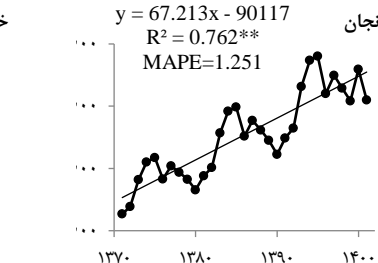
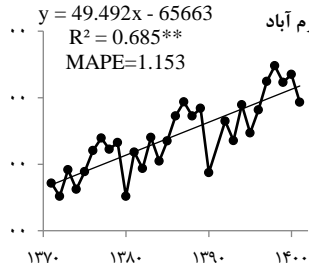
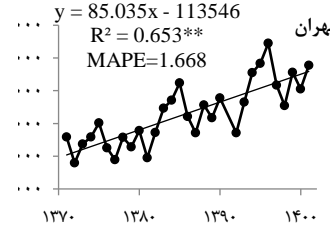
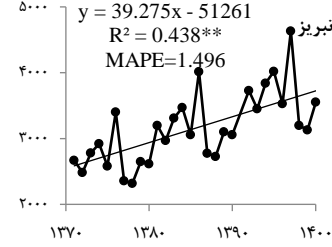
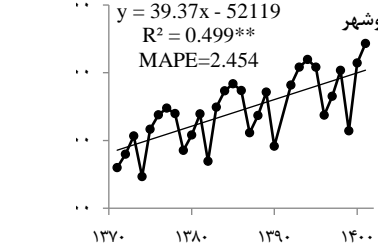
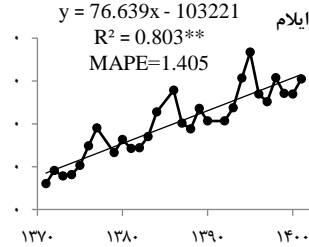
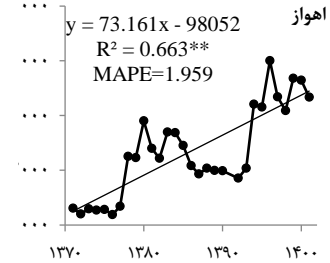
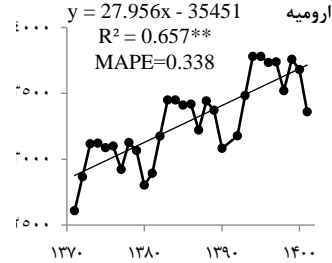
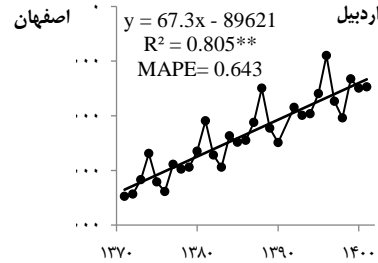
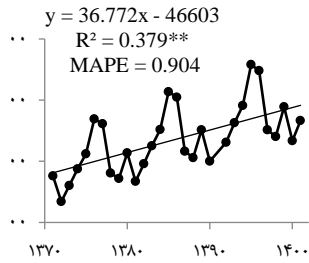
مقادیر تغییر عملکرد نسبی برای سال پایه ($Y_r(t0)$) در مناطق مختلف کشور از ۱/۰۰۷ تا ۱/۰۲۴ متغیر بود که کمترین مقدار مربوط به یزد و بیشترین مقدار مربوط به ساری بود (جدول ۴). در این میان مناطق ایلام، اهواز، زنجان و کرج بعد از ساری از لحاظ تغییر عملکرد نسبی در سال پایه در رتبه‌های بعدی قرار داشتند. مناطق ارومیه، اصفهان، شهرکرد و یاسوج نیز از تغییر عملکرد نسبی پایینی در مقایسه با سال پایه برخوردار بودند (جدول ۴).

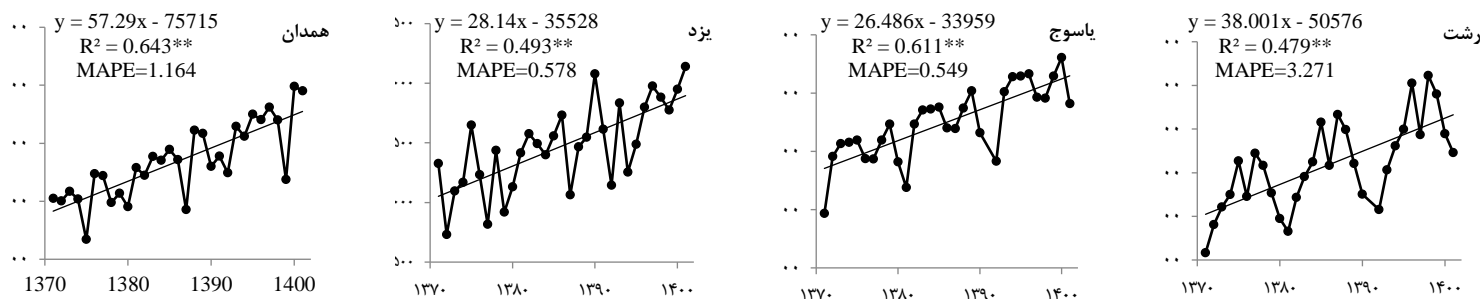
جدول ۴. مقادیر تغییر عملکرد نسبی گندم برای سال پایه (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱) در مناطق مختلف کشور.

Table 4. The values of relative wheat yield change for baseline year (1992-2022) in different regions of country.

منطقه	$Y_r(t0)$	منطقه	$Y_r(t0)$	منطقه	$Y_r(t0)$
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	خرم‌آباد	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 یک 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 (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؛ به طوری که 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؛ به طوری 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 ۳. روند افزایش عملکرد گندم از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ در مناطق مختلف کشور.

Figure 3. The trend of wheat yield increasing in different regions of country from 1992 to 2022.

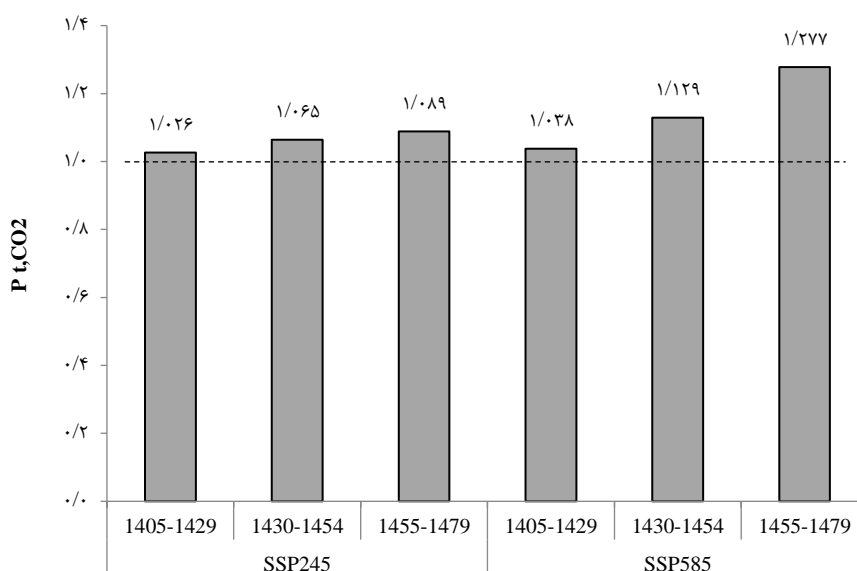
جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی اثر پیشرفت فناوری بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585.

Table 5. Simulation results of technological advancement effect on wheat yield under two scenarios of SSP245 and SSP585 in different regions of country.

سناریوها						منطقه
SSP585			SSP245			
۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹	۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹	
۱/۰۱	۱/۱۶	۱/۱۲	۱/۱۴	1.23	1.14	اردبیل
۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۱۶	۱/۰۷	۱/۱۲	۱/۰۷	ارومیه
۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۷	۱/۱۲	۱/۰۷	اصفهان
۱/۰۲	۱/۲۰	۱/۱۵	۱/۱۸	۱/۳۰	۱/۱۸	ایلام
۱/۰۲	۱/۱۸	۱/۱۳	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۱۶	اهواز
۱/۰۱	۱/۱۴	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۱۳	بوشهر
۱/۰۱	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۱۰	۱/۱۷	۱/۱۰	تبریز
۱/۰۲	۱/۱۷	۱/۱۲	۱/۱۵	۱/۳۴	۱/۱۵	تهران
۱/۰۲	۱/۲۶	۱/۱۹	۱/۳۳	۱/۳۸	۱/۳۳	ساری
۱/۰۱	۱/۱۳	۱/۰۹	۱/۱۱	۱/۱۹	۱/۱۲	شاهرود
۱/۰۱	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۱۷	۱/۱۰	شیراز
۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۰۷	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۰۸	شهرکرد
۱/۰۲	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۶	۱/۲۷	۱/۱۷	زنجان
۱/۰۱	۱/۱۴	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۲۰	۱/۱۲	رشت
۱/۰۱	۱/۱۵	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۲۲	۱/۱۳	خرم‌آباد
۱/۰۱	۱/۱۲	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۱۷	۱/۱۱	قم
۱/۰۲	۱/۱۸	۱/۱۳	۱/۱۶	۱/۲۶	۱/۱۶	کرج
۱/۰۱	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۱۰	۱/۱۶	۱/۱۰	کرمان
۱/۰۲	۱/۱۷	۱/۱۳	۱/۱۵	۱/۲۵	۱/۱۶	کرمانشاه
۱/۰۱	۱/۱۰	۱/۰۸	۱/۰۹	۱/۱۵	۱/۰۹	گرگان
۱/۰۱	۱/۱۰	۱/۰۷	۱/۰۹	۱/۱۴	۱/۰۹	مشهد
۱/۰۱	۱/۱۴	۱/۱۰	۱/۱۲	۱/۲۰	۱/۱۳	همدان
۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۱۷	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۰۸	یاسوج
۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۷	۱/۱۱	۱/۰۷	یزد
۱/۰۱۳	۱/۱۳۷	۱/۱۰۱	۱/۱۲۰	۱/۱۹۹	۱/۱۲۳	
		۱/۰۸۴			۱/۱۴۷	میانه

۳-۵. اثرات دی‌اکسیدکربن

میزان اثر افزایش دی‌اکسیدکربن در آینده بر عملکرد گندم در سناریوها و دوره‌های زمانی آینده در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که افزایش دی‌اکسیدکربن منجر به افزایش عملکرد گندم در آینده خواهد شد؛ به طوری که افزایش عملکرد ناشی از افزایش CO_2 بسته به سال و سناریو نسبت به سال پایه از ۲/۶ تا ۲۷/۸ درصد متغیر خواهد بود (شکل ۴). با توجه به اینکه افزایش غلظت CO_2 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 دی‌اکسیدکربن قابل انتظار بود. بیشترین افزایش عملکرد ناشی از افزایش CO_2 در سناریوی SSP585 در دوره زمانی ۱۴۵۵-۱۴۷۹ و کمترین آن در سناریوی SSP245 در دوره زمانی ۱۴۰۵-۱۴۲۹ خواهد بود (شکل ۴). شیب افزایش عملکرد در سناریوی SSP585 به دلیل افزایش بیشتر غلظت دی‌اکسیدکربن در این سناریو (جدول ۱) نسبت به سناریو SSP245 در تمام دوره‌های زمانی آینده بیشتر بود (شکل ۴).



شکل ۴. شبیه‌سازی اثر دی‌اکسیدکربن بر عملکرد گندم تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585.
Figure 4. Simulation of CO_2 effect on wheat yield under two scenarios of SSP245 and SSP585.

۳-۶. 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 سه 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 (۱۴۵۵-۱۴۷۹) با ۸۶ درصد کاهش عملکرد نسبت به سال پایه و کمترین اثر تغییر اقلیم نیز مربوط به شهر اردبیل با کاهش سه درصدی عملکرد در سناریوی SSP245 و دوره زمانی اول (۱۴۰۵-۱۴۲۹) 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 می‌شود. پژوهشگران دیگر نیز بیان کردند که اثرات منفی تغییر اقلیم در مناطق گرم‌وخشک 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 دو درجه سانتی‌گراد در آینده می‌تواند منجر به کاهش میانگین نه 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 صورتی که 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، به طوری که میانگین کاهش عملکرد گندم در سناریوی SSP245 نسبت به سال پایه معادل ۲۹/۳ درصد و در سناریوی SSP585 برابر با ۴۶/۴ درصد شبیه سازی شد (جدول ۶). بررسی ها 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. شبیه سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585.

Table 6. Simulation of climate change effect on wheat yield under two scenarios of SSP245 and SSP585 in different regions of country.

سناریوها						منطقه
SSP585			SSP245			
۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹	۱۴۵۵-۱۴۷۹	۱۴۳۰-۱۴۵۴	۱۴۰۵-۱۴۲۹	
۰/۳۶	۰/۶۲	۰/۹۵	۰/۶۹	۰/۸۸	۰/۹۷	اردبیل
۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۸۷	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۹۰	ارومیه
۰/۱۹	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۸۴	اصفهان
۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۷۹	۰/۴۲	۰/۶۷	۰/۸۷	ایلام
۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۶۹	۰/۳۸	۰/۵۶	۰/۸۸	اهواز
۰/۱۶	۰/۴۰	۰/۸۴	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۸۹	بوشهر
۰/۲۸	۰/۵۲	۰/۸۸	۰/۴۹	۰/۶۴	۰/۹۲	تبریز
۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۴۵	۰/۷۲	۰/۸۹	تهران
۰/۱۸	۰/۳۸	۰/۸۷	۰/۴۵	۰/۶۴	۰/۹۰	ساری
۰/۲۱	۰/۶۷	۰/۸۵	۰/۵۶	۰/۷۳	۰/۹۰	شاهرود
۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۸۴	۰/۴۳	۰/۶۶	۰/۸۵	شیراز
۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۹۴	۰/۶۴	۰/۸۴	۰/۹۶	شهرکرد
۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۸۶	۰/۶۱	۰/۸۲	۰/۹۱	زنجان
۰/۲۲	۰/۴۳	۰/۸۲	۰/۵۱	۰/۶۸	۰/۸۸	رشت
۰/۳۶	۰/۶۷	۰/۹۲	۰/۵۹	۰/۷۱	۰/۹۴	خرم آباد
۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۷۴	۰/۸۴	قم
۰/۳۲	۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۵۰	۰/۷۵	۰/۹۰	کرج
۰/۱۸	۰/۴۶	۰/۸۲	۰/۵۹	۰/۷۳	۰/۸۵	کرمان
۰/۱۸	۰/۵۳	۰/۷۹	۰/۴۳	۰/۶۳	۰/۸۹	کرمانشاه
۰/۳۴	۰/۵۹	۰/۸۴	۰/۶۴	۰/۷۹	۰/۸۸	گرگان
۰/۲۱	۰/۶۴	۰/۸۶	۰/۵۱	۰/۶۸	۰/۸۷	مشهد
۰/۳۱	۰/۵۴	۰/۸۷	۰/۶۱	۰/۸۵	۰/۹۰	همدان
۰/۱۹	۰/۵۷	۰/۸۹	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۹۳	یاسوج
۰/۲۵	۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۶۲	۰/۷۶	۰/۹۱	یزد
۰/۲۴۲	۰/۵۱۵	۰/۸۵۲	۰/۵۱۸	۰/۷۰۹	۰/۸۹۵	میانگین
	۰/۵۳۶			۰/۷۰۷		

۳-۷. اثرات تلفیقی

شکل ۵ اثرات تلفیقی تغییر اقلیم، دی اکسید کربن و پیشرفت فناوری بر عملکرد گندم مناطق مختلف کشور در سناریوها و دوره های زمانی مختلف را در مقایسه با سال پایه (خط نقطه چین) نشان می دهد. 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 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 ۵). 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). باین‌حال، روند افزایش دما و رویدادهای شدید آب‌وهوایی در طول فصل رشد که ناشی از تغییرات آب‌وهوایی است، عملکرد محصول را در بسیاری از مناطق کاهش می‌دهد (Guo et al., 2022).

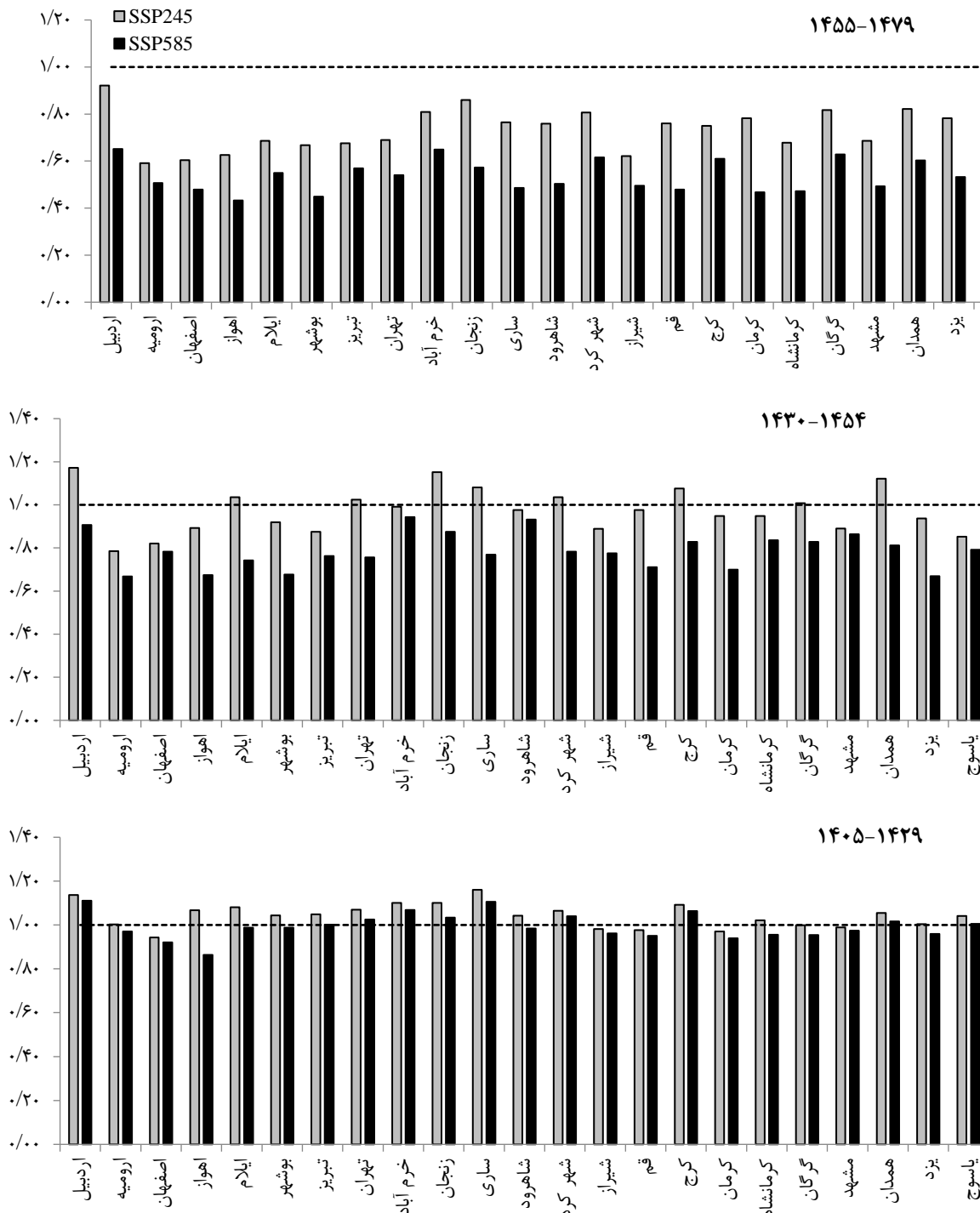
برآیند اثرات افزایشی پیشرفت فناوری و تاثیرات تغییر اقلیم ممکن است برای مناطق و محصولات مختلف متفاوت باشد و پیشرفت فناوری می‌تواند اثرات منفی تغییر اقلیم را جبران و یا حتی در نهایت باعث افزایش بیشتری نیز شود. نتایج مطالعه بررسی اثرات تلفیقی افزایش CO₂ و پیشرفت فناوری در شرایط تغییر اقلیم آینده بر عملکرد گندم، 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 هشت درصدی عملکرد نسبت به سال پایه مشاهده شد (شکل ۵). 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 ۵).

در مطالعه بررسی شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در آینده تحت شرایط تغییر اقلیم و پیشرفت فناوری در برزیل، نتایج شبیه‌سازی رشد گیاهان نشان داد که عملکرد سویا تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند، درحالی‌که 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). باتوجه به نتایج به نظر می‌رسد پیشرفت فناوری و دی‌اکسیدکربن در دوره‌های زمانی اول و دوم پتانسیل جبران اثرات منفی تغییر اقلیم را به‌ویژه 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 دی‌اکسیدکربن غالب گشته و منجر به کاهش عملکرد گندم مخصوصاً در مناطق گرم‌وخشک خواهد شد.

۴. 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 تشدید 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. به‌عبارت 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. به‌طور 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 زیست‌محیطی 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 به‌ویژه در مناطق گرمسیری و خشک کشور اشاره کرد که در مطالعات بایستی مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۵. اثرات تلفیقی (تغییر اقلیم، دی‌اکسید کربن و پیشرفت فناوری) بر عملکرد گندم در سناریوهای اقلیمی و دوره‌های زمانی مختلف. Figure 5. Integrated effects (climate change, CO₂ and technological advancement) on wheat yield under different climate scenarios and time periods.

۵. 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).
- Abraham, S., & Dollison, M. (2019). Climate change, agriculture, and adaptations: Policy recommendations for conservation agriculture. *Climate and Society*, 1(1), 1-16.
- Ahmadi, M., Lashkari, H., Keykhosravi, G., & 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 Journal of Genetics and Plant Breeding*, 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., Lifferring, 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 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*, 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, Z., Jin, Z., 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 106-129.
- Huopo, C., Jianqi, S., Wenqing, L., & 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 Persian).
- 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 Persian).
- 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), 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), 18. (In Persian).
- 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 Persian).
- 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 Persian).
- 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. *Global Environmental 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 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, pp. 79-98.
- Shayanmehr, S., Rastegari Henneberry, S., Sabouhi Sabouni, M., & 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 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. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 178-187.