



## Assessing the impact of climate change on heat stress on strategic agricultural products in Qazvin province

Hadi Ramezani Etedali<sup>1\*</sup>, Sakine Koohi<sup>2</sup>

1- Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

\*Corresponding Author: [ramezani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

### Keywords:

Heat stress, Crop yields, SSP scenarios, Global climate models

### Received:

12 Jul 2025

### Revised:

08 Aug2025

### Accepted:

10 Aug 2025

### Extended Abstract

#### Introduction

Climate change poses a substantial threat to agricultural productivity, particularly through heat stress, in regions such as Qazvin Province, a key agricultural hub in Iran. This phenomenon affects strategic crops, including wheat, maize, and barley, by altering the temporal patterns of heat stress, its frequency, intensity, and duration, which can disrupt physiological processes and reduce yields. Despite existing studies on temperature impacts, there is a lack of comprehensive regional analyses of heat stress dynamics under modern climate scenarios in semi-arid areas like Qazvin. This research aims to evaluate the temporal patterns of heat stress on these crops and assess its effects on their yields under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, using historical and projected data to inform adaptation strategies that agricultural resilience and food security.

#### Materials and Methods

The study focused on Qazvin Province, utilizing data from the Qazvin synoptic station. Historical maximum daily temperature data from 1997–2014 served as the baseline. Future projections (2025–2099) were derived from five global climate models (GCMs): CNRM-CM6-1, CanESM5, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, and MIROC6,

#### How to cite this article:

Ramezani Etedali, H; & Koohi, K. (2025). Assessing the impact of climate change on heat stress on strategic agricultural products in Qazvin province. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(13), 81-104. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9739.1157>



downscaled via the NEX-GDDP dataset at  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  resolution. An optimized ensemble approach was applied, weighting models based on root mean square error minimization during the baseline period. Heat stress was defined by crop-specific temperature thresholds:  $30^\circ\text{C}$  for wheat,  $35^\circ\text{C}$  for maize, and  $31^\circ\text{C}$  for barley. Frequency, intensity (maximum temperature during stress), and maximum consecutive duration were calculated over crop growing seasons. Yield impacts were estimated using provincial data from the Ministry of Agriculture Jihad. Model performance was evaluated using mean bias error (MBE), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE).

### Results and Discussion

The optimized ensemble model demonstrated superior performance in simulating baseline maximum temperatures, with reduced errors (MBE:  $-0.16^\circ\text{C}$ , MAE:  $3.13^\circ\text{C}$ , RMSE:  $4.04^\circ\text{C}$ ) compared to individual GCMs. It also accurately replicated heat stress frequency for the crops, with RMSE values of 2.6% for wheat, 4.2% for maize, and 2.7% for barley. Under future scenarios, heat stress frequency increased markedly, particularly under SSP5-8.5: for wheat, from 12.8% baseline to over 23% by 2099; for maize, from 37.3% to nearly 100%; and for barley, from 10–14% to over 25%. Intensity rose by up to  $7.3^\circ\text{C}$  for wheat/barley and  $7.6^\circ\text{C}$  for maize under SSP5-8.5, while maximum consecutive duration extended from 27 days (wheat), 22 days (barley), and 23 days (maize) baseline to 51, 49, and 140 days, respectively. These changes led to significant yield reductions: wheat from 4.20 to 3.00 t/ha, barley from 3.80 to 2.18 t/ha, and maize from 37.9 to 33.1 t/ha under SSP5-8.5. Maize emerged as the most vulnerable crop due to its summer growing season overlapping with peak heat. The findings align with global studies, emphasizing the amplified risks in semi-arid regions and the greater impacts under high-emission scenarios, necessitating shifts in planting dates, heat-resistant varieties, and water management.

### Conclusion

This study underscores the escalating heat stress threats to wheat, maize, and barley in Qazvin Province under climate change, with profound implications for yields and regional food security. The projected increases in frequency, intensity, and duration, especially under SSP5-8.5, highlight the urgency of adaptation measures such as developing resilient crop varieties, optimizing planting schedules, and enhancing irrigation efficiency. Policymakers should prioritize integrated strategies for water resource management and infrastructure development to bolster agricultural resilience. Future research could extend to other crops and incorporate socioeconomic analyses to refine policy frameworks for sustainable agriculture amid ongoing climate challenges.



## ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر تنش گرمایی وارد بر محصولات راهبردی کشاورزی در استان قزوین

هادی رضانی اعتدالی<sup>۱\*</sup>، سکینه کوهی<sup>۲</sup>

۱- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
 ۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
 \*نویسنده مسئول: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

### واژه‌های کلیدی:

تنش گرمایی، عملکرد محصولات، سناریوهای SSP، مدل‌های اقلیمی جهانی

### چکیده:

تغییرات اقلیمی، به‌ویژه از طریق ایجاد تنش گرمایی، تهدیدی جدی برای تولیدات کشاورزی در استان قزوین، یکی از قطب‌های کلیدی کشاورزی ایران، به‌شمار می‌رود. این پژوهش با هدف تحلیل الگوهای زمانی تنش گرمایی (شامل: فراوانی، شدت و مدت وقوع) وارد بر محصولات راهبردی گندم، ذرت و جو و ارزیابی تأثیر آن بر عملکرد این محصولات تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شده است. برای این منظور، از داده‌های تاریخی (۱۹۹۷-۲۰۱۴) ایستگاه سینوپتیک قزوین و پیش‌بینی‌های پنج مدل اقلیمی جهانی (CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، HadGEM3-) با رویکرد مدل تلفیقی بهینه‌شده استفاده شد. نتایج نشان داد که طی دوره‌های آتی و به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5، فراوانی تنش گرمایی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که ذرت با نزدیک به ۱۰۰ درصد فراوانی وقوع تنش طی دوره کشت تا سال ۲۰۹۹ آسیب‌پذیرترین محصول به‌شمار می‌رود. براساس نتایج شدت و مدت تنش نیز تحت تأثیر تغییرات اقلیمی افزایش یافته و عملکرد محصولات به‌طور چشمگیری کاهش یافته است (گندم از ۴/۲۰ به ۳/۰۰ تن در هکتار، جو از ۳/۸۰ به ۲/۱۸ تن در هکتار و ذرت از ۳۷/۹ به ۳۳/۱ تن در هکتار). این نتایج ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری نظیر تغییر زمان کاشت و توسعه ارقام مقاوم به گرما را در استان قزوین برجسته می‌کند. برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت منابع آب و توسعه زیرساخت‌ها برای تقویت تاب‌آوری کشاورزی نیز امری ضروری است، زیرا عدم توجه به این موارد می‌تواند امنیت غذایی و ثبات اقتصادی منطقه را به خطر اندازد.

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۴/۲۱

### تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۵/۱۷

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۱۹

**مقدمه:**

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در تولید محصولات کشاورزی در جهان و به‌ویژه ایران تبدیل شده است. چراکه آستانه تحمل گیاهان زراعی و غلات مختلف نسبت به هر یک از متغیرهای اقلیمی محدوده بوده و ایجاد تغییرات قابل توجه در این متغیرها، به صورت مستقیم و غیرمستقیم تولیدات کشاورزی را تحت تاثیر قرار خواهد داد (Mianabadi et al., 2009; Rajabalinejad et al., 2023; Haghghati, 2024; Seif et al., 2024). بنابراین، افزایش میانگین دما، تغییر الگوهای بارش و وقوع تنش‌های گرمایی مکرر، اثرات منفی قابل توجهی بر رشد و عملکرد محصولات زراعی داشته و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (IPCC, 2021). استان قزوین، به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی ایران، نقش اساسی در تولید محصولات راهبردی همچون گندم، ذرت و جو ایفا می‌کند که برای اقتصاد منطقه و کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، افزایش دما و شدت گرفتن تنش‌های گرمایی ناشی از تغییرات اقلیمی می‌تواند تولید این محصولات را در این استان تحت معرض خطر قرار دهد (Fahad et al., 2017; Safari et al., 2025). تنش گرمایی زمانی رخ می‌دهد که دمای محیط از آستانه تحمل گیاهان فراتر رود و این پدیده می‌تواند به کاهش عملکرد، اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز و تنفس، و همچنین افت کیفیت محصول منجر شود. به‌طوری‌که صرف‌نظر از میزان مطلوب نور یا رطوبت مورد نیاز برای گیاه، اگر دمای محیط گیاه از حد اکثر معینی بیشتر شود، رشد گیاه متوقف خواهد شد (Alizadeh, 2011; Azizi & Rahimi-Moghaddam, 2007; Hasanuzzaman et al., 2012; Wahid et al., 2020). تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که حساس‌ترین مراحل رشد گیاهان زراعی نسبت به دما، مراحل گلدهی و پر شدن دانه است که در این دوره‌ها حتی افزایش جزئی دما می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری بر عملکرد نهایی داشته باشد (Zhao et al., 2017). در گندم، حساس‌ترین مراحل رشد نسبت به دماهای بالا، دوره گل‌دهی و پر شدن دانه گزارش شده است.

نتایج مدل‌سازی‌ها و آزمایش‌های مزرعه‌ای نشان داده‌اند که وقوع تنش گرمایی در بازه دمایی بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در این مراحل می‌تواند عملکرد دانه را به‌طور میانگین بین ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش دهد (Asseng et al., 2015). این اثر به‌ویژه در ارقام دیم که به بارندگی وابسته‌اند، شدیدتر است. علاوه بر کاهش عملکرد، گرمای شدید می‌تواند موجب اختلال در گرده‌افشانی و کاهش وزن هزار دانه گردد (Farooq et al., 2011; Fakhri, 2024). ذرت نیز یکی از حساس‌ترین غلات نسبت به گرمای شدید به‌ویژه در دوره گرده‌افشانی است. مطالعات انجام‌شده در ایالات متحده و آسیا نشان داده‌اند که عبور دما از آستانه ۳۵ درجه سانتی‌گراد در این دوره می‌تواند باعث نارسایی در گرده‌افشانی و کاهش تشکیل دانه شود (Lobell et al., 2009; Schlenker & Roberts, 2011). برآوردها نشان می‌دهد که به‌ازای هر روز تنش گرمایی در مرحله گرده‌افشانی، عملکرد ذرت می‌تواند تا ۷ درصد کاهش یابد (Hatfield & Prueger, 2015). در جو نیز گرمای بیش‌ازحد در مراحل گل‌دهی تا رسیدگی دانه اثرات قابل توجهی دارد. یافته‌های آزمایش‌های ژرم‌پلاسما در اروپا و آسیا حاکی از آن است که دماهای بالاتر از ۳۱ درجه سانتی‌گراد می‌توانند شاخص برداشت، وزن دانه و مدت پر شدن دانه را کاهش دهند (Ingvordsen et al., 2015). بسته به ژنوتیپ و شرایط خاک، کاهش عملکرد جو در شرایط تنش گرمایی از ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است (Barnabás et al., 2008). به‌طور کلی حساسیت نسبت به تنش‌های گرمایی به‌ویژه در غلاتی مانند ذرت که دوره رشد آن‌ها با فصل‌های گرم‌سال هم‌پوشانی دارد، بیش از سایر گیاهان زراعی می‌باشد. از سوی دیگر، تأثیرات تنش گرمایی با شدت بیشتری در مناطق خشک و نیمه‌خشک (نظیر ایران) بروز خواهد یافت، چراکه این مناطق علاوه بر دمای بالا، با کمبود منابع آبی نیز مواجه می‌باشند (Lobell et al., 2011). بررسی‌ها در مناطق گرم و خشک جهان نشان داده‌اند که ترکیب هم‌زمان دمای بالا و خشکی خاک، باعث اختلال در تعادل آبی گیاه، کاهش شاخص شاخص سطح برگ و افزایش نرخ تبخیر-تعرق می‌شود، که نهایتاً کاهش عملکرد را به همراه دارد.

(*Support System for Agrotechnology Transfer*) در ۳۰ منطقه مختلف جهان به انجام رسید، اثرات تنش گرمایی به‌ویژه در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه برجسته شد. نتایج نشان داد که به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما، عملکرد گندم به‌طور متوسط ۶ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین نتایج این مطالعه بر ضرورت تدوین راهبردهای سازگار با گرمایش جهانی تأکید دارد. اینگوردسن و همکاران (Ingvordsen et al., 2015) اثرات تنش گرمایی بر جو را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با آزمایش ۱۶۷ ژنوتیپ جو بهاره تحت دماهای بالا مشخص شد که تنش گرمایی می‌تواند عملکرد دانه را تا ۵۶ درصد کاهش دهد. این مطالعه به شناسایی نشانگرهای ژنتیکی برای تولید اولیه تحت شرایط تغییرات اقلیمی پرداخته و بر اهمیت پرورش ارقام مقاوم به گرما تأکید نموده است. فهاد و همکاران (Fahad et al., 2017) تغییرات دما و بارش را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بررسی نموده و نشان دادند که تنش گرمایی می‌تواند تولید محصولات زراعی را به خطر اندازد. این تحقیق با تمرکز بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان به تنش گرمایی، بر ضرورت انجام اقدامات محلی برای مقابله با این تنش تأکید نموده است. آقامیر و همکاران (Aghamir et al., 2021) در تحقیقی با بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر فنولوژی و عملکرد گندم در استان کردستان نشان دادند که در شرایط افزایش همزمان دما و غلظت دی‌اکسید کربن، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش، افزایش در عملکرد دانه گندم نسبت به دوره پایه رخ داده است. همچنین دیهیم‌فرد و همکاران (Deihimfard et al., 2023) با بررسی تاثیر تنش گرمایی بر عملکرد دانه گندم در اقلیم‌های مختلف ایران نشان دادند که در صورت وقوع تنش گرمایی میانگین عملکرد دانه از ۳/۳ به ۲/۹ تن در هکتار کاهش خواهد یافت. همچنین این محققین نشان دادند که با برنامه‌ریزی مناسب برای تاریخ کاشت، رقم و رطوبت اولیه خاک براساس شرایط اقلیمی می‌توان تاثیر ناشی از تنش گرمایی را کاهش داد. حاجی‌رحیمی و همکاران (Haji-Rahimi et

(Azizi & Rahimi-Moghaddam, 2020).

با توجه به پیش‌بینی‌های اخیر مدل‌های اقلیمی، انتظار می‌رود که فراوانی وقوع موج‌های گرمایی تا پایان قرن حاضر افزایش قابل‌توجهی یابد (Perkins-Kirkpatrick & Lewis, 2020). بر پایه گزارش ششم IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) در صورت عدم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، میانگین دمای جهانی ممکن است تا پایان قرن بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد که پیامدهای گسترده‌ای برای بخش کشاورزی در پی خواهد داشت. افزون بر این، مطالعات مبتنی بر مدل‌سازی اقلیمی در ایران نشان داده‌اند که در سناریوهای بدبینانه نظیر SSP5-8.5، استان‌هایی نظیر قزوین با افزایش طول دوره‌های گرمایی شدید و افزایش دفعات عبور دما از آستانه‌های بحرانی مواجه خواهند شد (Abbasi-Alikamar, 2017). این تغییرات نه تنها عملکرد محصولات را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه موجب ناپایداری سامانه تولید و افزایش خطرات اقتصادی در بخش کشاورزی خواهند شد. از این رو، بررسی دقیق تنش گرمایی برای مدیریت بهینه منابع و کاهش خسارات احتمالی ضروری به نظر می‌رسد و این موضوع در دهه‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، اسچلنکر و رابرت (Schlenker & Robert, 2009) با تحلیل داده‌های تاریخی عملکرد ذرت در ایالات متحده طی چند دهه، به ارزیابی رابطه غیرخطی بین دما و بازده محصول پرداختند. محققان با استفاده از مدل‌های رگرسیونی نشان دادند که دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور قابل‌توجهی عملکرد ذرت را کاهش خواهد داد و این اثر در دماهای بالاتر تشدید می‌شود. این مطالعه نشان داد که آستانه‌های دمایی بحرانی برای ذرت به‌طور خاص در مراحل گرده‌افشانی و تشکیل دانه از تأثیرات شدیدی برخوردار است. اسنگ و همکاران (Asseng et al., 2015) تأثیر افزایش دما را بر عملکرد جهانی گندم مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه که مبتنی بر داده‌های هواشناسی گسترده و مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول شامل APSIM (*Agricultural Production Systems sIMulator*) و DSSAT (*Decision*

جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی و در ارتفاع تقریبی ۱۲۷۸ متر از سطح دریا واقع شده است. مطابق طبقه‌بندی دومارتن، اقلیم قزوین در محدوده نیمه‌خشک سرد قرار دارد که با بارش‌های نسبتاً محدود در فصل‌های سرد و تابستان‌هایی گرم و خشک مشخص می‌شود (Khalili et al., 2022; Rahimi et al., 2013). این نکته لازم به‌ذکر است که از داده‌های دمای بیشینه ثبت شده در این ایستگاه در مقیاس روزانه و طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای استفاده شده است.

### داده‌های اقلیمی

برای ارزیابی الگوهای تنش گرمایی در دوره‌های زمانی مختلف، از داده‌های بیشینه دمای روزانه پنج مدل منتخب از مجموعه داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده NEX-GDDP (*NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*) استفاده شد. این پایگاه داده که توسط آزمایشگاه جت پیشران ناسا (NASA-JPL) توسعه یافته، داده‌های اقلیمی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) با استفاده از روش آماری *BCSD (Bias-Correction Spatial Disaggregation)* تا تفکیک مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه و مقیاس زمانی روزانه ریزمقیاس‌نموده و به‌صورت رایگان در دسترس قرار داده است (Thrasher et al., 2012). خروجی‌های این مجموعه در سامانه گوگل ارث‌انجین<sup>۱</sup> GEE برای دوره تاریخی ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ و از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی اقلیمی در دسترس قرار دارد. اطلاعات مورد نیاز در این پژوهش شامل بیشینه دمای روزانه، در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ برای دوره پایه و دوره آتی ۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ با کدنویسی در سامانه GEE دریافت شده است. مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش شامل: CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 هستند (جدول ۱) که تحت دو سناریوی مسیری‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) استخراج شدند:

1. Google Earth Engine

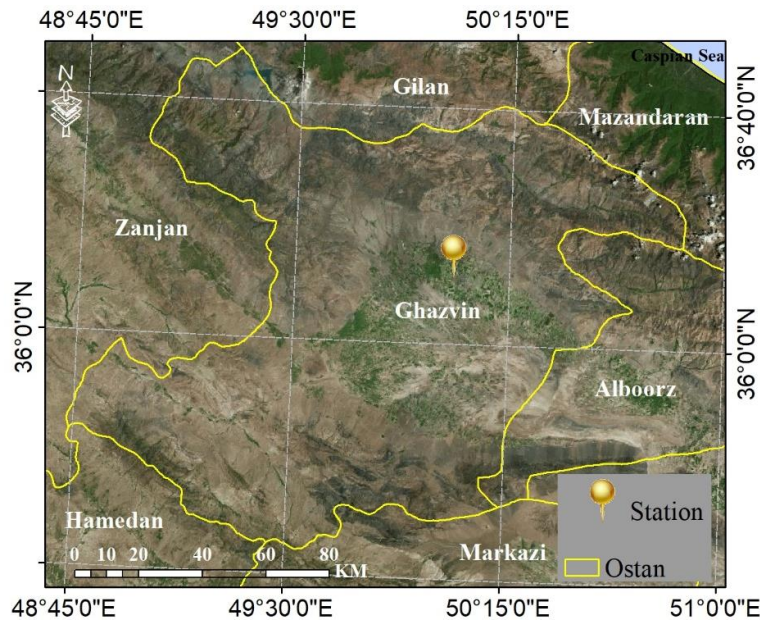
در مطالعه‌ای با بررسی تأثیرات کوتاه‌مدت و بلندمدت شاخص‌های تغییر اقلیم بر تولید غلات در ایران به این نتیجه رسیدند که افزایش دما و انتشار دی‌اکسید کربن هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت تأثیر منفی و معنی‌دار بر تولید غلات در ایران داشته است.

مرور مطالعات پیشین، گویای تأثیر چشم‌گیر تنش گرمایی بر عملکرد غلات و ضرورت افزایش شناخت نسبت به این پدیده اقلیمی است. با وجود پیشرفت‌های حاصل در زمینه ارزیابی آثار تنش گرمایی بر محصولات کشاورزی، بررسی‌های موجود عمدتاً بر تحلیل تأثیر دما بر عملکرد متمرکز بوده و به ابعاد زمانی تنش، از جمله فراوانی، شدت و مدت وقوع آن، به‌ویژه در مقیاس منطقه‌ای، کمتر پرداخته‌اند. در این میان، استان قزوین به‌عنوان یکی از مناطق مستعد کشاورزی در اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور، تاکنون از منظر تحلیل جامع و کمی این مؤلفه‌ها تحت سناریوهای نوین تغییر اقلیم به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که شناخت دقیق الگوهای زمانی و شدت تنش گرمایی، می‌تواند نقشی کلیدی در تدوین راهبردهای سازگاری اقلیمی، مدیریت پایدار منابع و ارتقاء تاب‌آوری سامانه‌های زراعی ایفا نماید. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، تحلیل و ارزیابی الگوهای زمانی تنش گرمایی شامل فراوانی، شدت و مدت وقوع این پدیده بر محصولات راهبردی گندم، ذرت و جو در استان قزوین، و مقایسه تغییرات آن‌ها در دوره‌های مختلف آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم گزارش ششم IPCC، نسبت به دوره پایه می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مورد مطالعه

این پژوهش با تمرکز بر ایستگاه سینوپتیک قزوین، واقع در بخش مرکزی استان قزوین، انجام شده است. استان قزوین با مساحتی بالغ بر ۱۵۸۲۰ کیلومتر مربع و از جمله استان‌های مهم در تولید محصولات کشاورزی کشور محسوب می‌شود. ایستگاه سینوپتیک قزوین به‌عنوان مرجع هواشناسی منطقه، در مختصات



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه سینوپتیک قزوین

Fig 1. Geographical location of the study area and Qazvin synoptic station

نسبت به مقادیر مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

علاوه بر این خروجی هر مدل اقلیمی به صورت منفرد نسبت به داده‌های مشاهداتی با استفاده از روش نگاشت چندک<sup>۲</sup> مورد تصحیح آریبی قرار گرفته است. در این روش تابع توزیع تجمعی (CDF: Cumulative Distribution Function) خروجی مدل‌ها با استفاده از یک تابع انتقال تجربی با تابع توزیع تجمعی مقادیر مشاهداتی مطابقت داده خواهد شد. طی روش نگاشت چندک مقادیر داده‌های مربوط به چندک‌های مختلف از خروجی مدل‌های اقلیمی جایگزین چندک متناظر از داده‌های مشاهداتی می‌شود. در نهایت عملکرد مدل‌های اقلیمی به صورت منفرد (که مورد تصحیح آریبی نیز قرار گرفته‌اند) نسبت به عملکرد مدل ادغام شده مبتنی بر ضرایب بهینه در شبیه‌سازی دمای بیشینه طی دوره پایه مورد مقایسه قرار گرفته است. در نهایت از خروجی‌های مدل برتر برای شبیه‌سازی تغییرات دمای بیشینه در دوره آتی بهره برده شده است.

SSP2-4.5، که نشان‌دهنده سناریویی با چالش‌های متوسط در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سازگاری است، و SSP5-8.5، که آینده‌ای با مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و انتشارات شدید گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد (O'Neill et al., 2017). به منظور افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت ناشی از تفاوت در ساختار دینامیکی مدل‌های GCM، از رویکرد تلفیق وزنی مدل‌ها استفاده شد و عملکرد خروجی مدل‌های اقلیمی پس از تلفیق نسبت به مدل‌های منفرد در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) مورد مقایسه قرار گرفت. وزن‌های اختصاص یافته به هر مدل بر اساس کارایی آن‌ها در بازتولید مقادیر مشاهداتی در دوره پایه تعیین گردید. در این فرآیند، تابع هدف شامل کمینه‌سازی مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین خروجی هر مدل و داده‌های ایستگاه برای متغیر دمای بیشینه روزانه تعریف شد. بهینه‌سازی ضرایب هر مدل نیز با بهره‌گیری از الگوریتم تکاملی<sup>۱</sup> و با استفاده از ابزار Solver در محیط نرم‌افزار Excel انجام شده است (Mohan & Bhaskaran, 2019). پس از بهینه‌سازی ضرایب هر یک از مدل‌های اقلیمی در دوره پایه، خروجی ۵ مدل اقلیمی براساس ضرایب بهینه تلفیق شده و میزان خطای خروجی اقلیمی در دوره پایه

## 2. Quantile Mapping

## 1. Evolutionary Algorithm

جدول ۱. مدل‌های گردش عمومی جو مورد استفاده در این مطالعه

Table 1. GCMs used in this study

تفکیک مکانی NEX- GDDP Spatial resolution of the NEX-GDDP (Long×Lat)	تفکیک مکانی مدل اصلی Spatial resolution of the original model (Long×Lat)	مرکز توسعه دهنده Developer Center	GCM
0.25 × 0.25	0.50 × 0.50	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی_فرانسه National Center for Meteorological Research_France	CNRM-CM6-1
0.25 × 0.25	2.812 × 2.789	مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوا، محیط زیست و تغییر اقلیم_کانادا Centre for Climate, Environment and Climate Change Modelling and Analysis_Canada	CanESM5
0.25 × 0.25	1.25 × 1.00	اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States of America	GFDL-ESM4
0.25 × 0.25	1.88 × 1.25	مرکز هواشناسی Hadley Weather Center	HadGEM3- GC31-LL
0.25 × 0.25	1.41 × 1.40	موسسه تحقیقات اتمسفر و اقیانوس - ژاپن Institute for Atmospheric and Oceanic Research - Japan	MIROC6

### تنش گرمایی

در این پژوهش، از آستانه‌های دمایی بحرانی گزارش شده در مطالعات بین‌المللی برای هر محصول به‌عنوان مبنای شناسایی وقوع تنش گرمایی استفاده شده است. بدین ترتیب مبتنی بر اطلاعات پژوهش‌های جهانی و شرایط اقلیمی ایران، در گندم آستانه دمایی بحرانی ۳۰ درجه سانتی‌گراد، برای ذرت حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد و برای جو ۳۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است (Azizi & Rahimi-Moghaddam, 2020; Bager, 2020; Bannayan et al., 2004; Mianabadi et al., 2009; Safari et al., 2025; Teixeira et al., 2013; Zhao et al., 2017). سپس وقوع دمای بیشینه روزانه بیش از مقادیر فوق به عنوان تنش گرمایی در نظر گرفته شده است. باتوجه به وقوع یا عدم وقوع تنش گرمایی در هر روز، فراوانی وقوع تنش گرمایی، شدت تنش گرمایی و بیشینه طول مدت تداوم تنش در دوره کشت هر محصول مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### عملکرد گندم، ذرت و جو در استان قزوین

برای بررسی میزان عملکرد هر محصول تحت تاثیر وقوع شرایط تنش گرمایی، اطلاعات مربوط به

متوسط سطح برداشت، میزان تولید و عملکرد گندم، ذرت و جو در استان قزوین و طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۷) به تفکیک نوع کشت از اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استخراج و مدنظر قرار گرفته است. این نکته لازم به‌ذکر است که مطابق آمار دریافتی از جهاد کشاورزی، طی دوره پایه کشت غالب ذرت در این استان آبی بوده است و کشت دیم وجود نداشته است. در گام بعد، از استانداردهای ارائه شده توسط محققین (که پس از بررسی ارتباط بین میزان عملکرد محصولات و دمای بیشینه ارائه شده است)، استفاده شد. بررسی مطالعات حاکی از آن است که در اقلیم‌های سرد و نیمه‌خشک همچون استان قزوین، افزایش هر یک درجه‌ی سانتی‌گراد دمای هوا منجر به کاهش در حدود ۰/۸۹ تن بر هکتار در عملکرد ذرت علوفه‌ای (Safari et al., 2025)، افزایش و کاهش در حدود ۰/۳۰ و ۰/۵۰ تن بر هکتار به‌ترتیب در عملکرد گندم آبی و دیم (AbbasiAlikamar, 2017; Shahbazi et al., 2024) شده و ۱۱/۴۳ درصد کاهش در عملکرد جو (Shahvardi, 2023) را در پی خواهد داشت. بدین ترتیب میزان تغییرات در عملکرد هر محصول تحت تاثیر تنش گرمایی، براساس اختلاف دمای بیشینه تحت

گندم و جواز آبان تا خرداد و برای ذرت از خرداد تا شهریور در نظر گرفته شده است.

سناریوهای اقلیمی نسبت به متوسط دمای بیشینه در دوره پایه و ضرایب کاهش/افزایش عملکرد محصولات محاسبه شده است. در این مطالعه فصل کشت برای

جدول ۲. متوسط سطح برداشت، میزان تولید و عملکرد گندم، ذرت و جو طی دوره پایه

Table 2. Average harvest level, production rate and yield of wheat, maize and barley during the base period

دیم		آبی		نوع کشت	
Rainfed		Irrigated		Type of cultivation	
جو	گندم	جو	ذرت	گندم	غلات
Barley	Wheat	Barley	Maize	Wheat	Cereals
9039.0	76441.7	25731.0	21334.8	63016.0	سطح برداشت_هکتار Harvested Area_ha
6230.3	53957.3	79129.8	807906.0	221585.1	میزان تولید_تن Production Rate_tons
0.7	0.7	3.1	37.9	3.5	عملکرد_تن برهکتار Yield_tons/ha
0.3	0.5	0.7	1.0	0.5	سهم نوع کشت نسبت به سطح برداشت Crop Type Share to Harvested Area

خطای ارزیابی (MBE: Mean Bias Error) به منظور بررسی تمایل سیستماتیک مدل‌ها در بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مقادیر واقعی مورد استفاده قرار گرفته است. علامت مثبت این شاخص بیانگر تمایل مدل به تولید مقادیر بیشتر از حد واقعی و علامت منفی نشان‌دهنده کم‌نمایی مقادیر توسط مدل است. محاسبه هر یک از شاخص‌های فوق با استفاده از روابط (۱) تا (۳) امکان‌پذیر است.

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

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{N} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N} \quad (3)$$

### شاخص‌های ارزیابی

به‌منظور سنجش میزان دقت مدل‌های اقلیمی و داده‌های ادغام‌شده نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴)، مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری رایج و معتبر مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص‌ها امکان ارزیابی جنبه‌های مختلف خطا و همبستگی میان داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی را فراهم می‌سازند. شاخص میانگین قدر مطلق خطا (MAE: Mean Absolute Error) به‌عنوان معیاری ساده و قابل‌فهم برای ارزیابی میزان انحراف کلی پیش‌بینی‌ها از مشاهدات استفاده شد. در مقابل، برای تشخیص حساسیت مدل به خطاهای بزرگ، از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Square Error) بهره گرفته شد. این شاخص با بزرگ‌نمایی انحرافات شدید از طریق مربع‌سازی خطاها، در شناسایی ضعف مدل در بازتولید مقادیر حدی مانند دماهای بسیار بالا، کارایی بالایی دارد. میانگین

می‌باشد. پیش از بررسی عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی دمای بیشینه، در جدول ۳ ضرایب بهینه هر مدل اقلیمی در توسعه مدل ادغامی ارائه شده است. براساس نتایج مدل CNRM-CM6-1 با ضریب ۰/۲۳ بیشترین سهم را در توسعه مدل ادغامی داشته است. پس از آن، مدل MIROC6 با ضریب ۰/۲۲ و مدل HadGEM3-GC31-LL با ۰/۲۱ در رده‌های بعدی قرار دارند. این ضرایب نشان می‌دهد که مدل‌هایی که در شبیه‌سازی پارامتر هدف عملکرد نسبتاً بهتری داشته‌اند، سهم بالاتری در توسعه مدل Ensemble کسب کرده‌اند. در مقابل، مدل GFDL-ESM4 با ضریب ۰/۱۴، کمترین وزن را در توسعه مدل ادغامی به خود اختصاص داده است که مطابق شکل ۲ هم‌راستا با بیشترین MAE و RMSE ثبت شده برای این مدل می‌باشد.

جدول ۳. ضرایب مدل‌های اقلیمی پس از بهینه‌سازی برای توسعه مدل چندگانه

**Table 3. Climate model coefficients after optimization for multiple model development**

CNRM-CM6-1	CanESM5	GFDL-ESM4	HadGEM3-GC31-LL	MIROC6	GCMs
0.23	0.20	0.14	0.22	0.21	ضریب مدل اقلیمی Model coefficient

بین ۴/۱۳ تا ۵/۰۷ متغیر است. کاهش مقدار MAE در مدل Ensemble، گواهی بر توانایی این مدل در کاهش انحراف مطلق پیش‌بینی‌ها نسبت به داده‌های مشاهده‌ای است. به‌ویژه مدل GFDL-ESM با MAE برابر با ۵/۰۷، بیشترین خطا را در بین مدل‌های منفرد نشان داده است که می‌تواند ناشی از ساختار دینامیکی خاص این مدل در شبیه‌سازی تغییرات دمای بیشینه در منطقه مورد مطالعه باشد. علاوه بر این، شاخص RMSE که از حساسیت بیشتری نسبت به خطاهای بزرگ برخوردار است، برای مدل ادغامی برابر با ۴/۰۴ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده، در حالی که این شاخص برای مدل‌های منفرد در محدوده بین ۷/۰۳ تا ۷/۲۸ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. کاهش RMSE در مدل چندگانه گویای این موضوع است که استفاده از روش بهینه‌سازی ضرایب برای تلفیق مدل‌های اقلیمی، نه تنها منجر به کاهش خطاهای کوچک، بلکه موجب کاهش چشمگیری در خطاهای بزرگ نیز شده است.

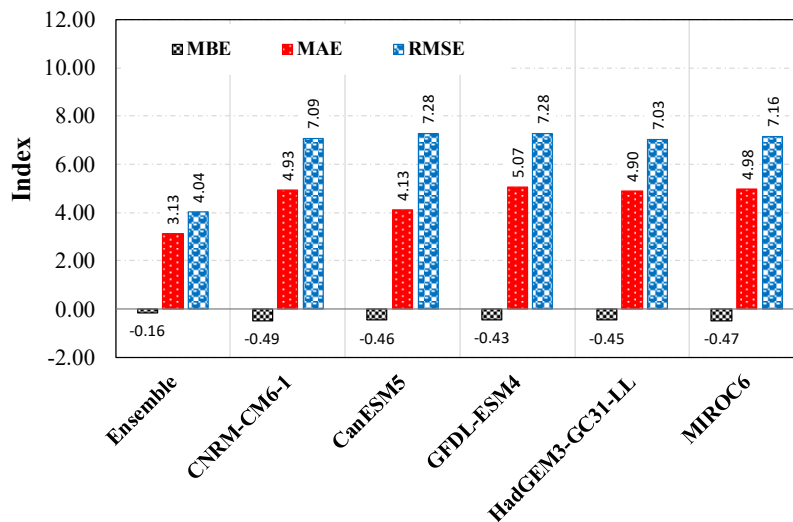
در روابط ۱ تا ۳ نمادهای به‌کار رفته شامل Si: مقادیر داده‌های اقلیمی، Oi: مقادیر مشاهداتی، N: تعداد داده‌ها است.

### نتایج و بحث

#### ارزیابی عملکرد خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی دمای بیشینه

در این بخش، عملکرد مدل‌های اقلیمی منفرد و مدل چندگانه حاصل از ادغام آن‌ها پس از بهینه‌سازی ضرایب به‌منظور شبیه‌سازی دمای بیشینه روزانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۲ شامل سه شاخص آماری MAE، MBE و RMSE برای مدل‌های اقلیمی CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 و همچنین مدل ادغامی (Ensemble)

براساس نتایج، مقدار شاخص MBE برای مدل ترکیبی (Ensemble) برابر با ۰/۱۶- است که نسبت به تمامی مدل‌های منفرد دارای کمترین میزان اریبی نسبت به مقادیر مشاهداتی بوده و حاکی از برآورد نسبتاً بدون اریبی داده‌ها توسط مدل ترکیبی می‌باشد. در حالی که مدل‌های منفرد مانند CNRM-CM، CanESM5، HadGEM3، GFDL-ESM و MIROC6 پس از تصحیح اریبی به ترتیب دارای بایاس‌های ۰/۴۹-، ۰/۴۶-، ۰/۴۳-، ۰/۴۵- و ۰/۴۷- در شبیه‌سازی دمای بیشینه می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل‌های منفرد به‌طور سیستماتیک تمایل به کم‌برآوردی در تخمین دمای بیشینه داشته‌اند، در حالی که مدل ترکیبی با میانگین‌گیری وزنی از خطاها، توانسته است مقدار نزدیک‌تری به واقعیت را ارائه دهد. شاخص MAE که بیانگر میانگین قدر مطلق خطاها است نیز برای مدل Ensemble برابر با ۳/۱۳ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده است، در حالی که مقدار آن برای مدل‌های منفرد



شکل ۲. مقادیر شاخص‌های آماری MBE، MAE و RMSE نسبت به مقادیر مشاهداتی در شبیه‌سازی دمای بیشینه روزانه (درجه سانتی‌گراد)

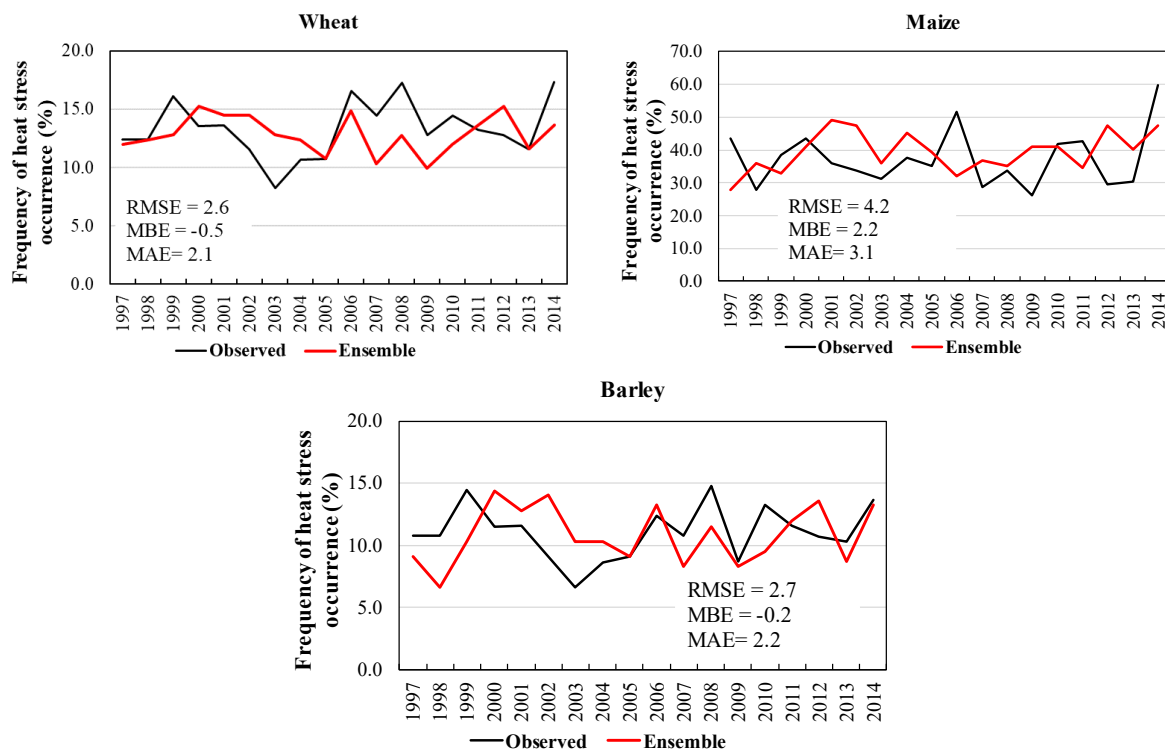
Fig 2. The values of statistical indices MBE, MAE, and RMSE relative to the maximum temperature observed in daily time step ( $^{\circ}$  C)

آماری و بهبود قابلیت اطمینان خروجی‌های اقلیمی برای استفاده در تحلیل‌های ثانویه نظیر ارزیابی تنش گرمایی در سامانه‌های زراعی محسوب می‌شود. بر این اساس، در مراحل بعدی تحقیق حاضر، از داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی چندگانه برای ارزیابی تغییرات فراوانی وقوع تنش گرمایی تحت سناریوهای اقلیمی استفاده خواهد شد.

### ارزیابی عملکرد خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی تنش گرمایی

در این بخش، به منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل اقلیمی چندگانه توسعه یافته (ادغام شده با ضرایب بهینه) در شبیه‌سازی فراوانی وقوع تنش گرمایی، مقادیر حاصل از این مدل با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴) برای سه محصول زراعی اصلی شامل گندم، ذرت و جو مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج در قالب درصد وقوع تنش گرمایی برای هر سال و هر محصول، به همراه شاخص‌های آماری خطا شامل MBE، MAE، RMSE در شکل ۳ ارائه شده است.

از نتایج فوق می‌توان چنین استنباط نمود که مدل چندگانه توسعه یافته با استفاده از ضرایب بهینه، نسبت به مدل‌های اقلیمی منفرد عملکرد بهتری در شبیه‌سازی دمای بیشینه روزانه از خود نشان داده است. نتایج این تحقیق با مطالعات مشابه که نشان داده‌اند ادغام مدل‌های اقلیمی منجر به کاهش خطا و عدم قطعیت در عملکرد مدل‌های اقلیمی خواهد شد، هم‌راستا می‌باشد (Koochi & Ramezani, 2022; Mohan & Bhaskaran, 2019; Ramezani, 2023). این موضوع از نظر تحلیل‌های اقلیمی و همچنین کاربردهای مرتبط با کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که برآورد دقیق دمای بیشینه روزانه به‌عنوان یکی از سنج‌های کلیدی در شناسایی و تحلیل فراوانی، شدت و مدت وقوع تنش‌های گرمایی اثرگذار بر محصولات زراعی از جمله گندم، جو و ذرت محسوب می‌شود. بنابراین، کاهش خطا در شبیه‌سازی این متغیر می‌تواند منجر به دقت بیشتر در ارزیابی‌های مرتبط با تاب‌آوری و حساسیت گیاهان به دماهای بحرانی شده و در طراحی راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی مؤثر واقع شود. در نتیجه، استفاده از رویکرد ادغام مدل‌های اقلیمی با بهینه‌سازی ضرایب، روشی مؤثر در کاهش خطاهای



شکل ۳. عملکرد مدل اقلیمی در شبیه‌سازی تنش گرمایی وارد بر گندم، ذرت و جو در دوره پایه

Fig 3. Performance of the climate model in simulating heat stress on wheat, maize, and barley in the historical period

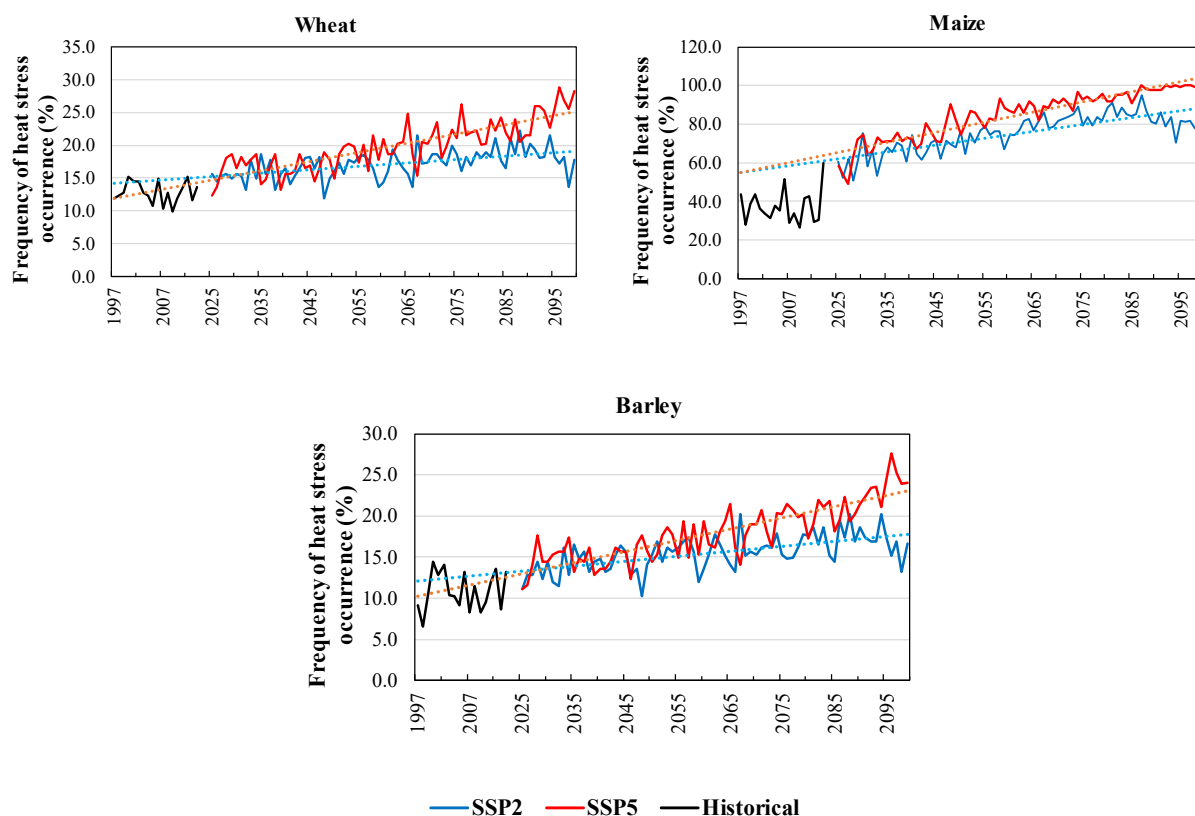
است. چنانکه مقدار RMSE برابر با ۲/۷ درصد و MAE برابر با ۲/۲ درصد است که در مقایسه با گندم تفاوت قابل توجهی ندارد. مقدار MBE نیز برابر با ۰/۲- درصد بوده که نشان‌دهنده نبود انحراف قابل توجه بین داده‌های مدل و مشاهداتی است. بنابراین نتایج حاکی از آن است که مدل اقلیمی ادغام‌شده، در شبیه‌سازی فراوانی وقوع تنش گرمایی در محصولاتی نظیر گندم و جو و ذرت با خطایی در محدوده ۵٪± عملکرد قابل قبولی داشته است. مقادیر پایین RMSE و MAE، و همچنین MBE نزدیک به صفر در این محصولات، بیانگر دقت مناسب مدل در بازسازی فراوانی وقوع تنش حرارتی‌های واقع بر محصولات مذکور می‌باشد. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که تحلیل‌های آتی در خصوص اثرات تغییر اقلیم بر تولید این محصولات و تدوین راهکارهای سازگاری، مبتنی بر همین خروجی‌های شبیه‌سازی شده خواهد بود. بنابراین مشخص است که مدل اقلیمی چندگانه توسعه‌یافته، می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل اعتماد

نتایج فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر گندم حاکی از آن است که مدل اقلیمی چندگانه توانسته به‌طور نسبی تخمین قابل قبولی از فراوانی وقوع تنش گرمایی ارائه دهد، به‌طوری‌که مقدار شاخص RMSE برابر با ۲/۶ درصد، MAE برابر با ۲/۱ درصد و MBE برابر با ۰/۵- درصد تخمین زده شده است که همگی حاکی از انحراف اندک مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی می‌باشند. بنابراین، مدل اقلیمی چندگانه در شبیه‌سازی روند تغییرات فراوانی وقوع تنش گرمایی گندم عملکرد قابل قبولی داشته و از خطای سیستماتیک بسیار کمی برخوردار است. در ذرت، مقدار RMSE برابر با ۴/۲ درصد و MAE برابر با ۳/۱ درصد برآورد شده که در مقایسه با گندم و جو بیانگر خطای بیشتر مدل در شبیه‌سازی فراوانی وقوع تنش گرمایی می‌باشد. مقدار MBE برای ذرت ۲/۲ درصد تخمین زده شده که نشان‌دهنده تمایل مدل به بیش‌برآورد نسبت به داده‌های مشاهداتی است. در رابطه با جو، مدل عملکرد نسبتاً مناسبی در شبیه‌سازی فراوانی وقوع تنش گرمایی داشته

وقوع تنش گرمایی در محصولات کشاورزی گندم، ذرت و جو، مقادیر فراوانی تنش حرارتی طی دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۹۹) تحت دو سناریو اقلیمی SSP2-4.5 (میان‌ه) و SSP5-8.5 (شدید) مورد بررسی قرار گرفته و روند تغییرات فراوانی وقوع تنش گرمایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای تحلیل‌های آینده‌نگر در حوزه اثرات اقلیمی بر کشاورزی مورد استفاده قرار بگیرد.

**بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تنش گرمایی و عملکرد محصولات زراعی**  
به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آبی بر فراوانی



شکل ۴. تغییرات تنش گرمایی وارد بر گندم، ذرت و جو تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

**Fig 4. Changes in heat stress on wheat, maize, and barley under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios**

و پیوسته تنش گرمایی وارد بر گندم، به‌ویژه در سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 می‌باشد. به‌طور مشخص، از دهه ۲۰۴۰ به بعد، روند افزایش در وقوع تنش گرمایی برای گندم، در هر دو سناریو ملموس‌تر است، اما از دهه ۲۰۷۰، شکاف بین دو سناریوی اقلیمی بیشتر شده است. این تفاوت بیانگر نقش قابل توجه سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای در شدت و فراوانی تنش گرمایی طی دوره‌های آبی است.

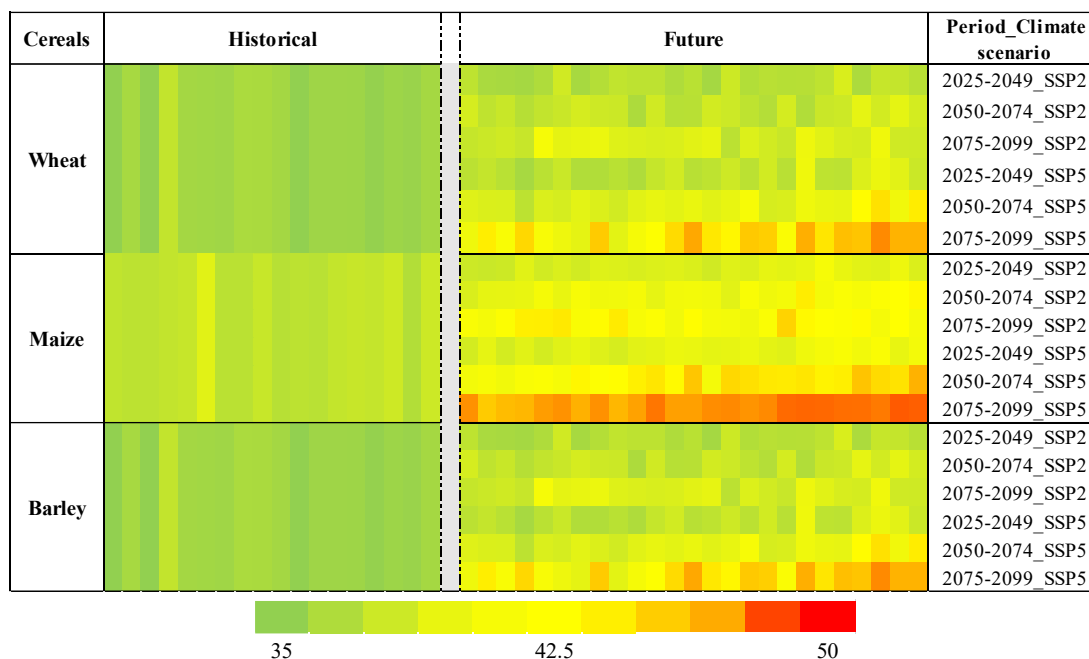
ذرت، به‌عنوان محصولی حساس به گرمای شدید در مراحل بحرانی رشد، در دوره پایه میانگین فراوانی وقوع تنش گرمایی حدود ۳۷/۳ درصد را تجربه نموده است. این مقدار در دوره آینده با افزایش چشم‌گیری

تحلیل‌ها بر اساس میانگین‌های سالانه در فصل کشت هر غله تنظیم شده است. براساس نتایج، در دوره پایه، میانگین فراوانی وقوع تنش گرمایی برای گندم در حدود ۱۲/۸ درصد گزارش شده است. در دوره آینده، بر اساس سناریوی SSP2-4.5، مقدار این شاخص به‌طور میانگین به حدود ۱۵/۸ درصد در دوره اول (۲۰۲۵-۲۰۴۹)، ۱۷/۲ درصد در دوره دوم (۲۰۵۰-۲۰۷۴) و تا بیش از ۱۸ درصد در دوره پایانی قرن (۲۰۷۵-۲۰۹۹) افزایش می‌یابد. درحالی‌که تحت سناریوی SSP5-8.5، این مقدار در دهه‌های آبی از حدود ۱۶/۵ درصد آغاز شده و به مقادیری بالاتر از ۲۳ درصد تا دوره سوم می‌رسد. این روند نشان‌دهنده افزایش تدریجی

مقاومت نسبی، افزایش پیوسته‌ای در فراوانی تنش وجود دارد که در پایان قرن به بیش از دو برابر مقدار پایه افزایش یافته است. در جو، روند افزایشی معتدلی در وقوع تنش گرمایی در دوره آینده نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود، اما این نکته لازم به‌ذکر است که در صورت عدم تطابق پذیری مناسب با تغییرات تنش گرمایی، عملکرد این محصول با کاهش مواجه خواهد شد. بنابراین نتایج حاکی از اهمیت توجه به راهبردهای سازگاری نظیر تغییر تاریخ کاشت، اصلاح ژنتیکی ارقام مقاوم، بهبود مدیریت آبیاری، و تغییر الگوی کشت به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر می‌باشد. در همین رابطه پیشنهادهایی از جمله آغاز فصل کشت گندم و جو به‌ترتیب در دهه ابتدایی مهر و دهه آخر شهریور، همچنین کشت ذرت در اردیبهشت می‌تواند منجر به عدم هم‌پوشانی دوره‌های بحرانی رشد با تنش‌های گرمایی شود. این نکته لازم به‌ذکر است که تعیین تاریخ دقیق پیشنهادی، نیازمند تحلیل تفصیلی هم‌پوشانی دوره‌های بحرانی رشد گیاه (مانند گرده‌افشانی، تشکیل دانه و ...) با دوره‌های وقوع دماهای بحرانی در سناریوهای اقلیمی مختلف می‌باشد. علاوه‌براین، تفاوت بارز بین سناریوهای دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهانی، نقشی اساسی در کنترل شدت آثار گرمایش جهانی بر کشاورزی خواهد داشت.

در این بخش از تحقیق، شدت تنش گرمایی وارد بر گندم، ذرت و جو طی دوره‌های پایه و آینده و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفته است و نمودار ماتریسی تغییرات سالانه شدت تنش گرمایی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همراه است. در سناریوی اقلیمی SSP2-4.5، مقدار تنش از حدود ۶۰ درصد در دهه ۲۰۲۰ به بیش از ۸۰ درصد در دهه ۲۰۷۰ افزایش خواهد یافت. همچنین تحت سناریوی SSP5-8.5، این شاخص پس از سال ۲۰۹۰ در اکثر سال‌های نیمه دوم قرن به آستانه ۱۰۰ درصد می‌رسد. به‌ویژه در سال‌های ۲۰۸۵ تا ۲۰۹۹، ۲۰ درصد وقوع تنش گرمایی در اکثر سال‌ها تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 در حدود یا برابر با ۱۰۰ درصد گزارش شده است، که بیانگر این است که در کل فصل رشد، ذرت تقریباً به‌طور کامل تحت شرایط تنش حرارتی قرار خواهد گرفت. این نتایج نشان‌دهنده‌ی یک چالش جدی برای پایداری تولید ذرت در آینده خواهد بود و لزوم تغییر در الگوی کشت یا بهره‌گیری از ارقام مقاوم نسبت به تنش‌های حرارتی را گوشزد می‌نماید. با توجه به نتایج، در دوره پایه، فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر جو در حدود ۱۰/۰ تا ۱۴/۰ درصد بوده است. در دوره آینده و تحت سناریوی SSP2-4.5، این مقدار به حدود ۲۰/۰ تا ۲۳/۰ درصد و تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 به بیش از ۲۴/۰ درصد در دهه‌های میانی و پایانی قرن می‌رسد. هرچند نسبت به ذرت و گندم شدت افزایش در وقوع تنش‌های گرمایی وارد بر جو کمتر است، اما روند افزایش پیوسته و خطی به‌نظر می‌رسد، که نشان‌دهنده تأثیرپذیری جو از گرمایش جهانی در سطح قابل‌توجهی می‌باشد. بر اساس سناریوی SSP5-8.5، در سال‌های پایانی قرن، مقادیر تنش به بیش از ۲۵/۰ درصد نیز رسیده است، که نسبت به دوره پایه رشدی در حدود دو برابر را نشان می‌دهد. این موضوع به‌ویژه در مناطقی که کشت جو با منابع آبی محدود و تاریخ کشت سنتی همراه است، می‌تواند تأثیر مخربی بر عملکرد نهایی محصول داشته باشد. به‌طور کلی، مقایسه فراوانی وقوع تنش گرمایی بین دوره پایه و آینده تحت سناریوهای مختلف نشان‌دهنده‌ی وجود روند صعودی و نگران‌کننده برای هر سه محصول مورد بررسی می‌باشد. در این میان ذرت آسیب‌پذیرترین محصول نسبت به تنش گرمایی بوده و تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌طور کامل در معرض تنش قرار خواهد گرفت. برای گندم با وجود



شکل ۵. تغییرات شدت تنش گرمایی وارد بر گندم، ذرت و جو تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 (درجه سانتی‌گراد)  
**Fig 5. Changes in the intensity of heat stress on wheat, maize, and barley under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios (° C)**

در دوره پایه، میانگین بیشینه دمایی که موجب وقوع تنش گرمایی شده، برای گندم حدود ۳۵/۹ درجه سانتی‌گراد، برای ذرت ۳۸/۳ درجه سانتی‌گراد و برای جو نیز نزدیک به ۳۵/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. براساس، ذرت در مقایسه با گندم و جو در دوره پایه در معرض بیشینه دمایی بالاتری قرار داشته است، که از نظر فیزیولوژیکی با نیاز حرارتی بالاتر این گیاه در مرحله رشد و گلدهی نیز هم‌راستا است. در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۹۹)، هر سه محصول با افزایش قابل توجه در شدت دمایی تنش گرمایی مواجه می‌باشند که این افزایش تحت سناریوی SSP5-8.5 بسیار شدیدتر از SSP2-4.5 است. برای گندم، میانگین شدت تنش در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ تحت SSP2-4.5 به حدود ۳۷/۷ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با دوره پایه حدود ۱/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش دارد، در حالی که تحت SSP5-8.5 این رقم به حدود ۳۸/۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است (افزایش حدود ۲/۶ درجه سانتی‌گراد). براساس نتایج با گذر زمان، این افزایش بیشتر می‌شود، به طوری که در بازه ۲۰۷۵-۲۰۹۹ میانگین شدت تنش برای گندم در SSP2-4.5 به حدود ۴۰/۰ درجه سانتی‌گراد و در SSP5-8.5 به حدود ۴۳/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است، به عبارتی نسبت به دوره پایه افزایشی معادل ۴/۱ و ۷/۳ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاده است. باتوجه به یکسان بودن فصل کشت در گندم و جو، روند تغییرات در شدت تنش گرمایی این محصول نیز همانند گندم می‌باشد. در ذرت، که در دوره پایه شدت تنش بالاتری داشته، روند مشابهی اما با شدت بیشتر در تغییرات شدت تنش گرمایی مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹، شدت تنش گرمایی تحت سناریوی SSP2-4.5 حدود ۴۰/۲ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 حدود ۴۰/۸ درجه سانتی‌گراد است، که نسبت به میانگین پایه (۳۸/۳ درجه سانتی‌گراد) افزایشی در حدود ۱/۹ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در شدت تنش گرمایی اتفاق افتاده است. در دوره سوم (۲۰۷۵-۲۰۹۹)، این اعداد به ترتیب در SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به حدود ۴۲/۴ و ۴۵/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. بنابراین، مشخص است که تحت سناریوی SSP5-8.5، میزان افزایش در بیشینه دمای تنش گرمایی وارد بر ذرت به حدود ۷/۶ درجه سانتی‌گراد نیز رسیده است، که نسبت به گندم بیشتر می‌باشد. این موضوع به‌ویژه

در دوره پایه، میانگین بیشینه دمایی که موجب وقوع تنش گرمایی شده، برای گندم حدود ۳۵/۹ درجه سانتی‌گراد، برای ذرت ۳۸/۳ درجه سانتی‌گراد و برای جو نیز نزدیک به ۳۵/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. براساس، ذرت در مقایسه با گندم و جو در دوره پایه در معرض بیشینه دمایی بالاتری قرار داشته است، که از نظر فیزیولوژیکی با نیاز حرارتی بالاتر این گیاه در مرحله رشد و گلدهی نیز هم‌راستا است. در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۹۹)، هر سه محصول با افزایش قابل توجه در شدت دمایی تنش گرمایی مواجه می‌باشند که این افزایش تحت سناریوی SSP5-8.5 بسیار شدیدتر از SSP2-4.5 است. برای گندم، میانگین شدت تنش در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ تحت SSP2-4.5 به حدود ۳۷/۷ درجه سانتی‌گراد است که در مقایسه با دوره پایه حدود ۱/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش دارد، در حالی که تحت SSP5-8.5 این رقم به حدود ۳۸/۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است (افزایش حدود ۲/۶ درجه سانتی‌گراد). براساس نتایج با گذر زمان، این افزایش بیشتر می‌شود، به طوری که در بازه ۲۰۷۵-۲۰۹۹ میانگین شدت تنش برای گندم در SSP2-4.5 به حدود ۴۰/۰ درجه سانتی‌گراد و در SSP5-8.5 به حدود ۴۳/۲ درجه سانتی‌گراد

مقیاسی نگران‌کننده بالا خواهد بود؛ به طوری که در صورت عدم اتخاذ تدابیر سازگارانه و اصلاح راهبردهای کشت، امنیت غذایی استان تهدید خواهد شد. در این بخش روند تغییرات در بیشینه تعداد روزهای متوالی وقوع تنش گرمایی برای سه محصول زراعی گندم، ذرت و جو، در سه دوره زمانی آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹، ۲۰۲۴-۲۰۵۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۵) و تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۴).

برای ذرت که نسبت به گرما در مرحله گلدهی بسیار حساس است، نگران‌کننده بوده و می‌تواند کاهش شدید عملکرد را به دنبال داشته باشد. مقایسه بین غلات مختلف حاکی از آن است که شدت تنش گرمایی برای ذرت هم‌اکنون بالاترین مقدار است و نرخ افزایش تنش گرمایی وارد بر این محصول در دوره آینده، به ویژه تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، سریع‌تر و پرشتاب‌تر می‌باشد. بنابراین مشخص است که تغییرات اقلیمی نه تنها احتمال وقوع تنش گرمایی را افزایش می‌دهد، بلکه شدت آن را نیز در

جدول ۴. بیشینه طول مدت تداوم تنش گرمایی وارد بر گندم، ذرت و جو تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 (روز)

**Table 4. Maximum duration of heat stress on wheat, maize and barley under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios (days)**

گندم Wheat		جو Barley		ذرت Maize		غلات Cereals
27		22		23		Historical
SSP2	SSP5	SSP2	SSP5	SSP2	SSP5	Climate Scenarios
34	36	29	33	62	71	2025-2049
38	43	34	39	86	98	2050-2074
41	51	38	49	93	140	2075-2099

روز به صورت متوالی تحت تنش گرمایی قرار خواهد گرفت که به معنای افزایش چشمگیر ۵۱ و ۸۲ درصدی در مقایسه با دوره پایه است. این روند افزایشی بیانگر آن است که حتی در ماه‌های سردتر سال که کشت گندم انجام می‌شود، فرکانس رخداد دماهای بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور نگران‌کننده‌ای افزایش خواهد یافت، و این می‌تواند موجب اختلال در پرشدن دانه، کاهش وزن هزار دانه، و تسریع رسیدگی فیزیولوژیکی شود.

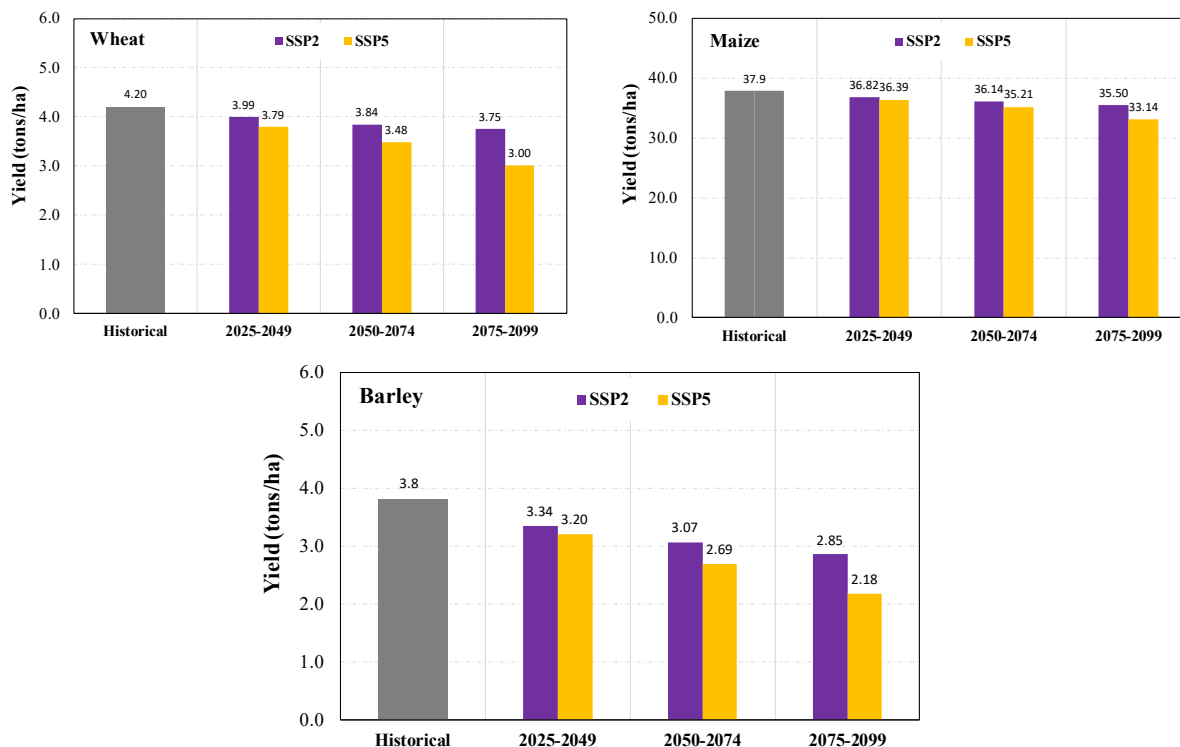
برای جو که مانند گندم در فصل سردتر سال رشد می‌کند ولی مرز تنش گرمایی آن کمی بالاتر (۳۱ درجه سانتی‌گراد) تعریف شده، در دوره پایه، به‌طور متوسط بیشینه تعداد روزهایی که به‌طور متوالی دما بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد است ۲۲ روز می‌باشد. این عدد در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ به ۲۹ و ۳۳ روز تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش یافته است.

این بررسی با در نظر گرفتن مرزهای تعریف شده برای تنش گرمایی (۳۰ درجه سانتی‌گراد برای گندم، ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای ذرت و ۳۱ درجه سانتی‌گراد برای جو) و تقویم کشت هر محصول انجام گرفته است. در گندم، متوسط روزهایی که در آن دما از آستانه‌ی ۳۰ درجه سانتی‌گراد عبور نموده، در دوره پایه برابر با ۲۷ روز است. این عدد در سناریوی SSP2-4.5 در دوره‌ی ۲۰۲۵-۲۰۴۹ به ۳۴ روز و در SSP5-8.5 به ۳۶ روز افزایش یافته است، که به ترتیب معادل افزایش ۲۵ درصدی و ۳۳ درصدی نسبت به وضعیت دوره پایه می‌باشد. در دوره‌ی میانی (۲۰۷۴-۲۰۵۰)، این افزایش به ۳۸ روز در SSP2-4.5 و ۴۳ روز در SSP5-8.5 رسیده است (حدود ۴۰ تا ۵۹ درصد بیش از مقدار پایه). در افق دور (۲۰۷۵-۲۰۹۹) و تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 گندم به‌طور میانگین در بدترین شرایط به ترتیب ۴۱ و ۵۱

وابسته می‌باشد. در واقع، ذرت که در گرم‌ترین بازه سال کشت می‌شود، بیشترین افزایش روزهای تنش را تجربه خواهد نمود، در حالی که گندم، با وجود کشت در ماه‌های سردتر، به تدریج با گرمای زودرس در بهار مواجه خواهد شد. برای مواجهه مؤثر با آینده اقلیمی، توصیه می‌شود که اتخاذ راهکارهای تفکیک‌شده بر اساس نوع محصول، منطقه اقلیمی و زمان کشت مدنظر قرار بگیرد. به‌ویژه، بازنگری جدی در تقویم‌های زراعی، انتقال دوره کشت به بازه‌های کم‌خطرتر و استفاده هدفمند از اطلاعات اقلیمی پیش‌بینی شده در مقیاس محلی، می‌تواند به‌عنوان گام‌های عملی برای کاهش اثرات مخرب ناشی از وقوع تنش گرمایی مدنظر قرار بگیرد. همچنین با توجه به نتایج، ضرورت تغییر از مدیریت سنتی زراعت به سوی کشاورزی مبتنی بر اقلیم‌پایدار بیش از پیش احساس می‌شود.

بررسی تأثیر وقوع تنش گرمایی بر عملکرد سه محصول راهبردی گندم، جو و ذرت در استان قزوین (شکل ۶) نشان می‌دهد که تداوم روند افزایش دمای بیشینه، می‌تواند به‌طور معنی‌داری موجب کاهش عملکرد این محصولات طی دهه‌های آتی شود. بر پایه داده‌های ارائه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی، میزان عملکرد محصولات در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) در حدود ۴/۲۰ تن در هکتار برای گندم، ۳/۸ تن در هکتار برای جو و ۳۷/۹ تن در هکتار برای ذرت علوفه‌ای ثبت شده است. مقایسه این مقادیر با برآوردهای آتی تحت تاثیر سناریوهای اقلیمی حاکی از آن است که عملکرد همه محصولات در طول زمان و با پیشروی به سمت آینده، به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5، روند کاهشی معناداری خواهد داشت.

در دوره میانی، این مقدار به ۳۴ و ۳۹ روز (معادل افزایش ۵۷ تا ۸۰ درصد نسبت به پایه) و در بلندمدت (۲۰۷۵-۲۰۹۹)، به‌طور میانگین بیشینه تعداد روزهایی که به صورت متوالی جو تحت تنش گرمایی قرار دارد، ۳۸ و ۴۹ روز از فصل رشد خواهد بود. این روند صعودی، به‌ویژه در سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، نشان‌دهنده آن است که کشت جو نیز در استان قزوین در آینده با چالش‌های جدی روبه‌رو خواهد شد و احتمال کاهش عملکرد، کیفیت دانه و حتی اقتصادی نبودن کشت در برخی مناطق وجود دارد. براساس نتایج مشخص است که شرایط برای ذرت، به‌عنوان یک محصول تابستانه که در ماه‌های گرم‌تر سال کشت می‌شود و از آستانه‌ی تنش بالاتری (۳۵ درجه سانتی‌گراد) برخوردار است، به‌مراتب بحرانی‌تر می‌باشد. به‌طوری‌که در دوره پایه به‌طور متوسط بیشترین تعداد روزی که این محصول طی دوره کشت، تحت تنش گرمایی قرار داشته ۲۳ روز بوده است. در حالی‌که در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب با افزایشی در حدود ۱۷۰ تا ۲۱۰ درصدی به ۶۲ و ۷۱ روز رسیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد روزهایی که ذرت به صورت متوالی تحت تنش گرمایی قرار خواهد داشت، در دوره سوم آینده و تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ۹۳ و ۱۴۰ روز افزایش یافته است. چنین افزایشی می‌تواند عملکرد ذرت را به‌شدت کاهش دهد، به‌ویژه آن‌که این محصول در مراحل حساسی مانند گرده‌افشانی و تلقیح از آسیب‌پذیری بسیار بالایی نسبت به دماهای بالا برخوردار است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که روند افزایشی در تعداد روزهای با تنش گرمایی متوالی، در همه محصولات مشهود و هشداردهنده می‌باشد، اما شدت و نرخ این افزایش در بین محصولات متفاوت است. بیشترین افزایش نسبی در دوره‌های آینده مربوط به ذرت و سپس گندم است، در حالی‌که جو با افزایش تدریجی اما مداوم روبه‌رو می‌باشد. این نکته لازم به‌ذکر است که شدت و نرخ رشد تنش، نه‌تنها تابع شرایط اقلیمی، بلکه به‌طور محسوس به زمان کشت، فصل رشد و آستانه دمایی هر محصول نیز



شکل ۶- تغییرات عملکرد گندم، ذرت (آبی) و جو در استان قزوین تحت تاثیر تنش گرمایی تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Fig 6. Changes in wheat, maize (irrigated) and barley yields in Qazvin province under the influence of heat stress under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios

با افزایش دما عملکرد بهتری در محصول گندم وجود داشته باشد، اما کاهش قابل توجه در کشت دیم منجر به کاهش کلی عملکرد متوسط گندم در استان شده است، که ناشی از سهم قابل توجه کشت دیم در منطقه می باشد. بررسی تغییرات در عملکرد جو در سطح استان قزوین نیز حاکی از وجود روند کاهش می باشد، به طوری که تحت سناریوی SSP2-4.5 میزان عملکرد جو از ۳/۸۰ تن در هکتار در دوره پایه به ۳/۳۴، ۳/۰۷ و ۲/۸۵ در دوره های زمانی آینده کاهش یافته است. تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 این کاهش محسوس تر است (کاهش بیش از ۴۰ درصد نسبت به عملکرد در دوره پایه) و میزان عملکرد به ترتیب به ۳/۲۰، ۲/۶۹ و نهایتاً ۲/۱۸ تن در هکتار رسیده است. در ذرت علوفه ای، علی رغم آنکه کاهش عملکرد در سناریوهای اقلیمی مشخص است، اما شدت آن نسبت به دو محصول دیگر کمتر می باشد. عملکرد این محصول از ۳۷/۹ تن در هکتار در دوره پایه در سناریوی SSP2-4.5 به ۳۶/۸۲، ۳۶/۱۴ و ۳۵/۵۰

بر اساس برآوردهای انجام شده، عملکرد گندم تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 از ۴/۲۰ در دوره پایه به ۳/۹۹ تن در هکتار در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ و سپس به ۳/۷۵ تن در هکتار در افق زمانی ۲۰۷۵-۲۰۹۹ کاهش یافته است. این کاهش در عملکرد گندم در سناریوی SSP5-8.5 از شدت بیشتری برخوردار است به طوری که عملکرد گندم تحت سه دوره آینده به ترتیب به ۳/۴۸، ۳/۷۹ و نهایتاً ۳/۰۰ تن در هکتار کاهش یافته است. کاهش عملکرد در این محصول مطابق یافته های پژوهش هایی از جمله عباسی علی کمر (AbbasiAlikamar, 2017) و شهبازی و همکاران (Shahbazi et al., 2024)، با افزایش هر یک درجه سانتی گراد در دمای بیشینه، حدود ۰/۳ تن در هکتار برای گندم آبی و ۰/۵ تن در هکتار برای گندم دیم کاهش عملکرد برآورد شده است. تحلیل روند تغییرات در عملکرد گندم نشان می دهد که تنش گرمایی ناشی از افزایش دمای بیشینه، به ویژه در کشت دیم، عامل اصلی کاهش عملکرد این محصول است. اگرچه در کشت آبی ممکن است

اما تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5، فراوانی وقوع تنش گرمایی تا پایان قرن، به ۱۸/۰ درصد برای گندم، نزدیک به ۱۰۰/۰ درصد برای ذرت و بیش از ۲۵/۰ درصد برای جو افزایش خواهد یافت. شدت تنش گرمایی نیز، که با حداکثر دما در دوره‌های تنش اندازه‌گیری می‌شود، به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5 افزایش قابل توجهی یافته است؛ به طوری که شدت تنش گرمایی برای گندم و جو تا ۷/۳ و برای ذرت تا ۷/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. همچنین، مدت زمان روزهای متوالی تنش گرمایی به‌ویژه برای ذرت به شکل چشمگیری افزایش یافته و تحت سناریوی SSP5-8.5 ممکن است به ۱۴۰ روز متوالی برای ذرت نیز برسد. این تغییرات منجر به کاهش قابل توجه عملکرد محصولات شده است، به طوری که عملکرد گندم از ۴/۲۰ به ۳/۱۰۰ (تن در هکتار)، جو از ۳/۸۰ به ۲/۱۸ (تن در هکتار) و ذرت از ۳۷/۹ به ۳۳/۱۴ (تن در هکتار) تحت سناریوی SSP5-8.5 کاهش یافته است. بنابراین نتایج حاکی از اهمیت توجه به مدیریت کشاورزی برای کاهش تاثیرات ناشی از تنش گرمایی بر گندم، جو و ذرت می‌باشد. به طوری که این نتایج ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری همچون استفاده از ارقام مقاوم به گرما، تغییر الگوهای کشت، و بهبود روش‌های آبیاری را برجسته می‌نماید. به‌عنوان مثال، تغییر زمان کاشت گندم به دوره‌های خنک‌تر سال و یا استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌تواند به کاهش اثرات ناشی از تنش گرمایی کمک نماید. علاوه بر این، لازم است تا سیاست‌گذاران منطقه‌ای به تدوین برنامه‌های جامعی با هدف تقویت تاب‌آوری بخش کشاورزی از جمله ارائه مشوق‌هایی برای کشاورزان به منظور استفاده از فناوری‌های نوین و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های کشاورزی در این استان مبادرت بورزند. با توجه به نتایج این مطالعه، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی بر ارزیابی عملی راهبردهای سازگاری و همچنین گسترش انجام چنین تحقیقاتی به سایر محصولات کشاورزی مانند حبوبات، محصولات باغی یا علوفه‌ای و مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت متمرکز شوند. در نهایت، تلفیق این یافته‌ها با داده‌های اقتصادی و اجتماعی، همچون هزینه‌های

تن در هکتار کاهش می‌یابد، درحالی‌که در سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب مقادیر ۳۶/۳۹، ۳۵/۲۱ و ۳۳/۱۴ تن در هکتار به عنوان عملکرد ذرت علوفه‌ای در دوره‌های آتی گزارش شده است. بنابراین مشخص است که گندم و جو، بیشترین میزان آسیب‌پذیری را در برابر افزایش دمای بیشینه و وقوع تنش‌های گرمایی نشان داده‌اند، درحالی‌که ذرت علوفه‌ای مقاومت نسبی بیشتری نسبت به تنش‌های گرمایی داشته است. به‌طور کلی می‌توان چنین عنوان نمود که پیامدهای کاهش عملکرد برای کشاورزی و منابع آب در استان قزوین قابل توجه است. کاهش عملکرد محصولات دیم، به‌ویژه گندم و جو، می‌تواند امنیت غذایی را تهدید نماید، درحالی‌که افزایش نیاز آبی ذرت در کشت آبی فشار بر منابع آب محدود منطقه را تشدید خواهد نمود. این موضوع با توجه به گزارش‌هایی مبنی بر کاهش بارش و افزایش دما در ایران تا سال ۲۰۵۰ اهمیت بیشتری خواهد یافت. بنابراین، توسعه ارقام مقاوم به گرما، بهبود کارایی آبیاری و تنوع‌بخشی به محصولات کشاورزی را می‌توان به عنوان راهکارهای پیشنهادی برای کاهش اثرات منفی ناشی از تغییرات اقلیمی در استان قزوین نام برد.

### نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی جهان معاصر، اثرات قابل توجهی بر سامانه‌های کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بر جای گذاشته است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل تغییرات فراوانی، شدت و مدت تنش گرمایی و تاثیر آن بر عملکرد گندم، ذرت و جو در آینده و تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در استان قزوین انجام شده است تا پایه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و مدیریت منابع در این منطقه فراهم آورد. نتایج نشان داد که تنش گرمایی برای هر سه محصول به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت و ذرت از بیشترین آسیب‌پذیری نسبت به این پدیده برخوردار است. در دوره پایه، فراوانی تنش گرمایی برای گندم ۱۲/۸ درصد، برای ذرت ۳۷/۳ درصد و برای جو ۱۰/۰ درصد می‌باشد.

- Bager, E. V. A. (2020). *Assesment of effect of terminal heat stress on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare L.*) genotypes in Moghan*. MSc dissertation. University of Mohaghegh Ardabili. Iran. [In Persian]. <https://ganj.irandoc.ac.ir/viewer/>
- Bannayan, M., Hoogenboon, G., & Crout, N. M. J. (2004). Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. *Ecological Modelling*, 180(2–3), 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.022>
- Barnabás, B., Jäger, K., & Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment*, 31(1), 11–38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>
- Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., & Collins, B. (2023). An optimal combination of sowing date and cultivar could mitigate the impact of simultaneous heat and drought on rainfed wheat in arid regions. *European Journal of Agronomy*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126848>
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., ... & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in plant science*, 8, 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- Fakhri, M. (2024). Investigating the Condition of Iran's Temperature Changes Compared to the Past Long-Term Climatic Standard
- اجرای راهبردهای سازگاری و تأثیر آنها بر درآمد کشاورزان، می‌تواند به تدوین سیاست‌های مؤثرتر کمک نموده و زمینه را برای مدیریت پایدار منابع کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی فراهم آورد.
- مراجع
- AbbasiAlikamar, R. (2017). *Investigation on temperature sensitivity of some species and predicting phonological variation in transition to climatic change*. PhD dissertation. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. [In Persian]. <https://ganj.irandoc.ac.ir/viewer/b3ceedb6a621214cc47ddae4331e58ed>
- Aghamir, F., Soufizadeh, S., & Soheili, A. (2021). Simulation of the effect of climate change on phenology and yield of dryland wheat in Kurdistan province. *Advanced Environmental Sciences*, 19(1), 143–160. [In Persian]. <https://doi.org/10.52547/envs.2021.1020>
- Alizadeh, A. (2011). *Agricultural climate and meteorology*. Astan Quds Razavi, Imam Reza University. [In Persian]. <http://www.adinehbook.com/product/6005650204/>
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., & Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Azizi, K., & Rahimi-Moghaddam, S. (2020). Simulating the risk of heat stress on grain maize production under arid and semi-arid conditions. *Environmental Sciences*, 18(3), 85–105. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/envs.18.3.85>

- Ingvordsen, C. H., Backes, G., Lyngkjær, M. F., Peltonen-Sainio, P., Jahoor, A., Mikkelsen, T. N., & Jørgensen, R. B. (2015). Genome-wide association study of production and stability traits in barley cultivated under future climate scenarios. *Molecular Breeding*, 35(3), 84. <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0283-8>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Khalili, A., Bazrafshan, J., & Cheraghizadeh, M. (2022). A Comparative study on climate maps of Iran in extended de Martonne classification and application of the method for world climate zoning. *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1), 3–16. [In Persian]. <https://doi.org/10.22125/agmj.2022.156309>
- King, A. B., Shellie, K. C., Tarkalson, D. D., Levin, A. D., Sharma, V., & Bjorneberg, D. L. (2020). Data-driven models for canopy temperature-based irrigation scheduling. *Transactions of the ASABE*, 63(5), 1579–1592. <https://doi.org/10.13031/trans.13901>
- Koohi, S., & Ramezani Etedali, H. (2022). Future meteorological drought conditions of southwestern Iran based on the NEX-GDDP climate dataset. *Journal of Arid Land*, 15(4), 377-392. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0097-1>
- Lobell, D., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Period. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(3), 17-32. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062>
- Farooq, M., Bramley, H., Palta, J., Siddique, J. A., & Siddique, K. H. (2011). Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(6), 491–507. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.615687>.
- Haghighati, B. (2024). Evaluation of tolerance to drought in the end of growing season in wheat cultivars and identification of high-yielding genotypes. *Journal of Drought and Climate change Research*. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8494.1087>
- Haji-Rahimi, M., Sharaifi, F., & Asaadi, M. A. (2024). The Impact of Climate Change on Cereal Production and Food Security in Iran-In Persian. *Climate Change Research*, 5(20), 65–78. [In Persian]. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.472319.1238>
- Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., da Silva, J. A. T., & Fujita, M. (2012). Plant Response and Tolerance to Abiotic Oxidative Stress: Antioxidant Defense Is a Key Factor. In *Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2220-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2220-0_8)
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>.

- Rajasivaranjan, T., Anandhi, A., Patel, N. R., Irannezhad, M., Srinivas, C. V., Veluswamy, K., ... & Raja, P. (2022). Integrated use of regional weather forecasting and crop modeling for water stress assessment on rice yield. *Scientific Reports*, 12(1), 16985.. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19750-z>
- Ramezani Etedali, H., Koohi, S., & Partovi, Z. (2023). Evaluation of Ensemble Climate Model development methods based on CMIP5 to investigate the potential of water harvesting from air humidity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1609–1625. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364087.669553>
- Safari, F., Etedali, H. R., Kaviani, A., & Khosravi, L. (2025). Investigating the Trend of Temperature Changes and Evaluating the Relationship Between Temperature with Yield and Biomass (Case Study: Forage Maize in Qazvin). *Journal of Water and Soil Science*, 28(4). [In Persian]. <https://doi.org/10.47176/jwss.28.4.50625>.
- Seif, Z., Etemad, V. and Javanmiri pour, M. (2024). Effect of Drought and Salinity Stress on Chlorophyll and Carotenoid Content in Russian Olive Leaves (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(3), 33-48. [In Persian]. <https://doi:10.22077/jdcr.2024.7645.1069>.
- Schlenker, W., & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37),
- Mianabadi, A., Mousavi-Baygi, M., Sanaeinejad, H., & Nezami, A. (2009). Studying and mapping of heat stress affecting on crops in Khorasan Razavi using GIS. *Journal of Water and Soil*, 23(2), 104–114. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1733>
- Mohan, S., & Bhaskaran, P. K. (2019). Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. *Climate Dynamics*, no. 9-10 (2019): 5415-5435. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04874-2>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global environmental change*, 42, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11(3357). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M., & Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 112(3–4), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0741-8>.
- Rajabalinejad, A., Nozari, N., & Badr, B. R. (2023). The effect of climate change on agricultural production in Iran. *Brazilian Journal of Biology*, 83, e277383. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.277383>

- [org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011)
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), 9326–9333. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>.
- 15594–15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Shahbazi, A., Abedini, S., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., & Noori, O. (2024). Determining the Optimal Flowering Time in Rainfed Wheat Under Simultaneous Heat and Drought Stresses in Some Regions of Iran as Predicted by APSIM-Wheat Model. *Environmental Sciences*, 22(4), 643–658. [In Persian]. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Shahvardi, M. (2023). *Seed pretreatment method with Benamide and Algabon biostimulants on improving heat stress during germination and growth of heat-loving (canola and green beans) and cold-loving (lettuce and barley) plants*. MSc dissertation. Shahrekord University. Iran. [In Persian]. <https://ganj.irandoc.ac.ir/viewer/a378c79f102ac25f99c8e421c1ab9bbc>.
- Teixeira, E., Fischer, G., Van Velthuizen, H. T., Walter, C., & Ewert, F. (2013). Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.002>.
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309–3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199–223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>

