

Comparison of The Outcomes of the CMIP5 And CMIP6 Reports on the Trends of Climatic Parameters Affecting Almond Growth: A Case Study in Birjand County

Mehdi Asadi ¹

1. Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, E-mail: Asadi.m@cfu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	In this study, we aimed to predict the trends of climatic parameters affecting almond growth from 2021 to 2100. We utilized the IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M models from the CMIP5 report, as well as the GFDL-ESM4 and IPSL-CM6A-LR models from the CMIP6 report. These models were selected based on their high coefficient of determination (r^2) with temperature and precipitation data from the Birjand station, outperforming the other 10 models. Kendall's rank correlation test results revealed that the average, maximum, and minimum temperatures exhibited an increase of over 3 degrees Celsius, while precipitation showed a decreasing trend. These findings suggest a prevalence of dry conditions during the study period from 2021 to 2100. Furthermore, the climate models showed that the RMSE (Root Mean Square Error) and MAD (Mean Absolute Deviation) values for temperature in all the examined models were below 1.322. The GFDL-ESM2M model displayed the lowest RMSE and MAD values, with numerical values of 1.023 and 0.997, respectively. However, all models' RMSE and MAD values for precipitation were above 10. Overall, the CMIP6 models (RMSE for temperature and precipitation: 1.156 and 14.463, MAD for temperature and precipitation: 1.139 and 12.583) performed better in predicting temperature and precipitation in the study area, exhibiting lower mean errors compared to the CMIP5 models. The only exception was the MAD value for precipitation 11.703 (RMSE for temperature and precipitation: 1.172 and 13.479, MAD for temperature and precipitation: 1.140 and 11.703). Finally, due to the increase in minimum and maximum temperatures and decrease in precipitation, the future conditions of the crops are facing a challenge.
Article history: Received: 17 May 2024 Revised: 20 April 2023 Accepted: 29 Juiy 2024 Published: 29 August 2025	
Keywords: Almond, Birjand, Climate Change, CMIP5, CMIP6.	
Cite this article: Asadi , M. (2025). Comparison of the Outcomes of the CMIP5 and CMIP6 Reports on the Trends of Climatic Parameters Affecting Almond Growth: A Case Study in Birjand County. <i>Journal of Geography and Planning</i> , 30 (92), 21-36. http://doi.org/10.22034/gp.2024.61686.3262	
	
© The Author(s). DOI: http://doi.org/10.22034/gp.2024.61686.3262	Publisher: University of Tabriz.

Introduction

The agricultural sector and food security are susceptible to weather conditions, making them vulnerable to climate change. Agricultural productivity and the quality of farming products affect weather patterns. Climate change can influence crop performance, rainfall patterns, evaporation rates, and water demand in agriculture. Almond cultivation is prevalent in regions with favorable climatic conditions due to the adaptability of almond trees to their environment. Numerous studies have examined the effects of climate change on agriculture, including studies by Di Lena et al. (2018), Gul et al. (2020), Meza et al. (2023), Granco et al. (2023), and Jha et al. (2023). Considering the significance of this topic and the existing research, this study aims to assess the effects of climate change on almond growth in Birjand County, located in South Khorasan province, using models from the CMIP5 and CMIP6 reports.

Materials and Methods

This study utilized data on the climatic and ecological requirements of almond trees, including the minimum tolerable temperature during different growth stages (bud development to flowering, flowering to fruiting, and fruiting to fruit growth), as well as the chilling requirement, cold temperature, and maximum tolerable temperature during these growth stages. The CMIP5 report was employed, specifically the IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M models, with consideration of the RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios, to evaluate the impact of climate change on future almond production. The CMIP6 report was also utilized, especially the GFDL-ESM4 and IPSL-CM6A-LR models, under the SSP1.2.6, SSP3.7.0, and SSP5.8.5 scenarios.

Results

To assess the trends of climatic parameters impacting almond growth, the CMIP5 report models IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M, as well as the CMIP6 report models GFDL-ESM4 and IPSL-CM6A-LR, were selected. Initially, we identified the top 10 models with the highest coefficient of determination (r^2) for temperature in Birjand. From them, we selected two models from CMIP5 and two models from CMIP6 with the highest coefficient of determination for further analysis.

The trend of precipitation and temperature changes in the observed and modeled periods based on the CMIP5 report scenarios

Table 8 demonstrates that the IPSL-CM5A-LR model increased mean, minimum, and maximum temperatures in all three scenarios compared to the observed period. The greatest increases were observed in the RCP 8.5 scenario, with values of 30.6, 37.3, and 23.4 for the mean, maximum, and minimum temperatures, respectively. The growing degree days index also showed the highest increase in the RCP 8.5 scenario, with a value of 3005.9. Additionally, the percentage of frost days and the duration of the frost period increased.

The trend of precipitation and temperature changes in the observed and modeled periods based on the CMIP6 report scenarios

The assessment of simulation accuracy in the CMIP6 report scenarios utilized RMSE and MAD indicators (Table 11). The examined models showed that the RMSE and MAD values for temperature were all below 1.322 in the examined models, with the GFDL-ESM2M model exhibiting the lowest RMSE and MAD values of 1.023 and 0.997, respectively, indicating high simulation accuracy. However, the models performed poorly in evaluating the precipitation parameter, as indicated by RMSE and MAD values exceeding 10 across all models. Overall, the CMIP6 models (RMSE for temperature and precipitation: 1.156 and 14.463, MAD for temperature and precipitation: 1.139 and 12.583) provided more accurate predictions of temperature and precipitation in the study area with lower mean errors compared to the CMIP5 models, except for the MAD of precipitation, which had a value of 11.703 (RMSE for temperature and precipitation: 1.172 and 13.479, MAD for temperature and precipitation: 1.140 and 11.703).

Conclusion

The study examined the phenological stages of almonds and found that bud formation occurred between the 18th of March and the 25th of March during the observed period. However, based on the IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M scenarios in the CMIP5 report, the bud formation dates ranged from the 7th to the 15th of March and the 9th of March to the 19th of March, respectively. Similarly, based on the IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M scenarios in the CMIP6 report, the bud formation dates ranged from the 9th to the 19th of March and the 8th of March to the 18th of March, respectively. These findings indicate an accelerated fulfillment of the almond tree's heat requirement in the Birjand region and an increased temperature, which can impact the plant's growth stages and water requirements. The results from the IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M models in CMIP5, as well as the IPSL-CM6A-LR and GFDL-ESM4 models in CMIP6, all indicate an increasing trend in

average, minimum, and maximum temperatures, along with a decreasing trend in annual precipitation. Furthermore, the study examined temperature and precipitation indices during the almond growth period to investigate the impacts of climate change on the climatic parameters affecting almonds. The IPSL-CM5A-LR model showed an increase in mean, minimum, and maximum temperatures in all three scenarios compared to the observed period. The RCP 8.5 scenario showed the utmost increase in all three indicators, with the growing degree days index experiencing the highest rise. The percentage of frost days and the duration of the frost period also increased, posing risks to almond growth during the growth period.

مقایسه برون‌داد گزارش‌های CMIP5 و CMIP6 بر روند پارامترهای آب‌وهوایی مؤثر بر رشد بادام (مطالعه موردی: شهرستان بیرجند)

مهدی اسدی^۱

۱. استادیار، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. رایانامه: Asadi.m@cfu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱ کلیدواژه‌ها: بادام، بیرجند، تغییر اقلیم، CMIP5، CMIP6	در این پژوهش سعی شد با استفاده از مدل‌های IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M مربوط به گزارش CMIP5 و مدل‌های IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 مربوط به گزارش CMIP6 که از بین ۱۰ مدل که بیشترین ضریب تبیین (r^2) با داده‌های دما و بارش ایستگاه بیرجند داشتند به پیش‌نگری روند پارامترهای آب و هوایی مؤثر بر رشد محصول بادام برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ پرداخته شود. نتایج بررسی‌های حاصل از خروجی‌های آزمون من - کندال بیانگر آن بود که میانگین، بیشینه و کمینه دما دارای روند افزایشی بالای ۳ درجه سانتی‌گراد بوده و همچنین میزان بارش دارای روند کاهشی می‌باشد که نشان از حاکمیت شرایط خشکی در دوره مطالعاتی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ است. همچنین نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی بیانگر آن بود که مقادیر RMSE و MAD مربوط به دما در تمامی مدل‌های مورد بررسی زیر ۱/۳۲۲ بوده و کمترین میزان RMSE و MAD مربوط به مدل GFDL-ESM2M به ترتیب با مقادیر عددی ۱/۰۳۳ و ۰/۹۹۷ می‌باشد. همچنین مقادیر RMSE و MAD در تمامی مدل‌ها بالای ۱۰ می‌باشد. به‌طور کلی مدل‌های مربوط به CMIP6 (RMSE دما و بارش به ترتیب ۱/۱۵۶ و ۱۴/۴۶۳، MAD دما و بارش به ترتیب ۱/۱۳۹ و ۱۲/۵۸۳) نسبت به مدل‌های مربوط به CMIP5 (به‌جز MAD مربوط به بارش با مقدار ۱۱/۷۰۳، RMSE دما و بارش به ترتیب ۱/۱۷۲ و ۱۳/۴۷۹، MAD دما و بارش به ترتیب ۱/۱۴۰ و ۱۱/۷۰۳) با خطای میانگین کمتری به پیش‌بینی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه پرداختند. در نهایت با توجه به افزایش دمای کمینه و بیشینه و کاهش بارش شرایط محصول در دوران آینده با چالش مواجهه بود.

استناد: اسدی، مهدی (۱۴۰۴). مقایسه برون‌داد گزارش‌های CMIP5 و CMIP6 بر روند پارامترهای آب‌وهوایی مؤثر بر رشد بادام (مطالعه موردی: شهرستان

بیرجند). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۲)، ۱-۲۰.

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.61686.3262>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

هر چند آب‌وهوا تقریباً اکثر بخش‌های اقتصادی را تا اندازه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما بخش کشاورزی و امنیت غذایی حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین بخش می‌باشد (شه‌باز و همکاران^۱، ۲۰۱۹: ۱۸۴؛ آکورا و همکاران^۲، ۲۰۱۹: ۱۴۲)، چراکه محصولات کشاورزی وابستگی زیادی به منابع اقلیمی دارند. به‌طوری‌که کمیت و کیفیت بالای محصولات کشاورزی با شرایط آب‌وهوایی در ارتباط می‌باشد (بابائیان و کوهی، ۱۳۹۱: ۹۵۳؛ پویان‌فر و همکاران^۳، ۱۴۰۱: ۴۶). پدیده تغییر اقلیم می‌تواند با تغییر در میزان تبخیر و تعرق گیاهان و مدت، شدت و زمان بارش‌ها، عملکرد محصولات همچنین تقاضای آب در بخش کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد (شیرزاد و همکاران^۴، ۱۴۰۱: ۱۷۱). به همین علت در بین محصولات کشاورزی، بادام به دلیل قابلیت سازش بالای آن با محیط، کاشت این محصول در مناطق جغرافیایی که دارای شرایط آب‌وهوایی متناسب هستند متداول شده است (شاهیوندی و همکاران^۵، ۱۳۹۱: ۱۹۶). این محصول یکی از مهم‌ترین و اقتصادی‌ترین دانه‌های روغنی در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری است که بیشتر به منظور تولید روغن و پروتئین کشت می‌شود (شارما و بانگارتار^۶، ۲۰۰۶: ۳۴۷؛ اکرم و همکاران^۷، ۲۰۱۸: ۱۳۲۵). در همین راستا پژوهش‌های زیادی در داخل و خارج از کشور انجام شده که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌گردد. دی لینا و همکاران^۸ (۲۰۱۸) در یک مطالعه موردی در ایتالیا به ارزیابی تأثیر تغییرات احتمالی اقلیمی در گسترش سطح زیر کشت مزرعه بادام پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که با توجه به کاهش دما در بهار و در زمان شکوفه دهی بادام احتمال یخبندان و سرمازدگی‌های دیررس بدون تغییر باقی خواهند ماند و شرایط متعادل‌تری حکم‌فرما خواهد بود. گول و همکاران^۹ (۲۰۲۰) برای شبیه‌سازی تأثیر تغییرات آب‌وهوا بر عملکرد ارقام مختلف گندم در شرایط مختلف زیست‌محیطی از الگوی رشد محصول استفاده نمودند. پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان‌دهنده این بود که دمای حداکثر از ۲/۳۳ تا ۲/۹۳ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل از ۲/۱۶ تا ۳/۱۳ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 افزایش خواهد داشت. مزایا^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از دو سناریو (SSP 5-8.5 و SSP1-2.6) آب و هوایی CMIP6 به بررسی تغییرات دمایی پنج محصول سیب، گیلان، بادام، زیتون و انگور در بازه آماری ۱۹۹۱ الی ۲۱۰۰ پرداختند. نتایج حاکی از تغییر قابل توجهی در ساختار تولید جهانی محصولات مذکور است. همچنین با تغییرات آب و هوا مکان‌های مناسب دمایی به سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر تغییر می‌یابد. کارانکو^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از CIMP6 به بررسی تغییرات آب‌وهوایی بادام، مرکبات، پسته و گردو در کالیفرنیا پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که مناطق مناسب کشت بادام، مرکبات و گردو در طی ۲۰ سال آینده به دلیل تغییرات اقلیمی تغییر قابل توجهی خواهند داشت و این تغییر تا پایان قرن حتی بیشتر نیز ادامه خواهد داشت که نشان‌دهنده از دست دادن بالقوه ۹۴ درصد از مساحت مناسب فعلی است. نتایج برای پسته نشان‌دهنده تغییر در توزیع فضایی منطقه مناسب کشت محصول است، اما پیش‌بینی می‌شود که سطح کل منطقه مناسب کشت نزدیک به مناسب منطقه مناسب کشت فعلی باقی بماند. جا^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۳) به مقایسه مدل‌های گزارش CMIP5 و CMIP6 در تأثیر تغییرات آب و هوایی بر روی آفات محصولات گردو و بادام در ایالت کالیفرنیا پرداختند. نتایج بیانگر این بود که تاریخ وقوع آفات تا ۲۸ روز زودتر اتفاق افتد و طول دوره رشد تا ۱۹ روز کوتاه شود. مهر آذر و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی دشت هشتگرد با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM گزارش ارزیابی پنجم IPCC پرداختند. پردازش سناریوهای اقلیم نشان داد که درجه حرارت سالانه به‌طور متوسط در دوره آتی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0

1. Shahbaz et al

2. Akcura et al

3. Sharma & Bhatnagar-Mathur

4. Akram

5. Di Lena et al

6. Gul et al

7. Meza

8. Granco

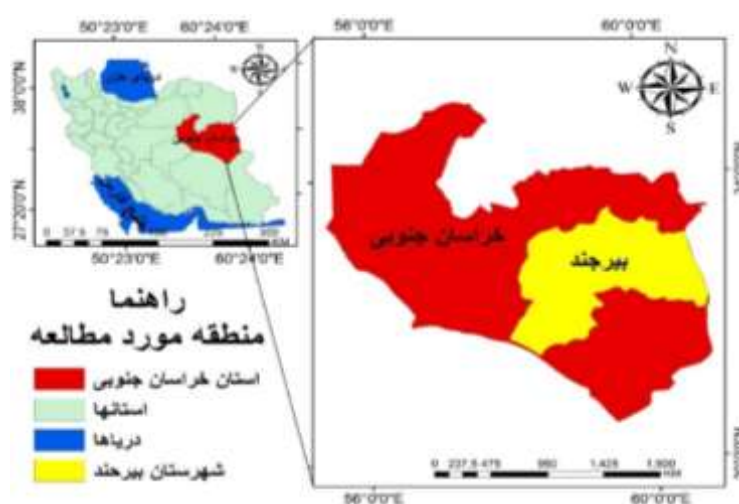
9. Jha

و RCP8.5 به ترتیب ۱/۳۴، ۱/۶۹، ۱/۵۲ و ۱/۸۱ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. زینلی مبارکه و همکاران (۱۳۹۸) در استان خراسان رضوی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و راهکارهای سازگاری به آن بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم آبی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که در سناریوی CC میانگین عملکرد در تمامی شهرستان‌ها، ۴/۹۱ درصد در RCP4.5 و ۴/۷۷ درصد در RCP8.5 افزایش خواهد یافت. سبحانی و همکاران (۱۴۰۲) در ایستگاه‌های ارومیه و سمیرم به بررسی اثر نوسانات آب و هوایی بر میزان عملکرد سیب درختی پرداختند. نتایج بیانگر این بود که میزان عملکرد آینده در ایستگاه ارومیه تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب عملکرد ۳/۷، ۲/۲ تن در هکتار و در ایستگاه سمیرم به ترتیب عملکرد ۴/۱، ۳ تن در هکتار کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به مباحث بیان شده و پیشینه پژوهش، هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گزارش CMIP5 و CMIP6 بر روند پارامترهای آب و هوایی مؤثر بر رشد محصول بادام در شهرستان بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی می‌باشد. همچنین از آنجایی بیشتر پژوهش‌های قبلی تنها با استفاده از یک گزارش IPCC (گزارش پنجم یا ششم) به بررسی عملکرد محصول پرداخته بودند در این پژوهش بر آن شدیم تا از طریق مقایسه مدل‌های مختلف گزارش‌های IPCC به بررسی روند پارامترهای آب و هوایی مؤثر بر رشد محصول بادام بپردازیم تا صحت سنجی مقادیر پیش‌بینی برای آینده به‌درستی صورت پذیرد.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهرستان بیرجند در شرق کشور ایران و در استان خراسان جنوبی بین مدارات ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این شهرستان از شمال به شهرستان قائنات و از شمال غرب به شهرستان سرایان، از غرب به استان یزد، از جنوب غرب به استان کرمان از جنوب شرق به شهرستان نهبندان، از شرق به شهرستان سربیشه و از شمال شرق به شهرستان در میان محدود شده است (شکل ۱). شهرستان بیرجند با وسعت حدود ۲۰۰۳۳ کیلومترمربع معادل ۲۱ درصد بعد از شهرستان نهبندان بیشترین مساحت استان را به خود اختصاص داده است (عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۹).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده و روش کار

در این پژوهش از داده‌های نیازمندی‌های اقلیمی و اکولوژیکی درخت بادام شامل: حداقل دمای قابل تحمل در زمستان در مراحل رشد تا شکفتن جوانه، شکفتن جوانه تا گل دادن و گل دادن تا رشد میوه، نیاز سرمایی بادام، سرما و حداکثر دمای قابل تحمل در تابستان در مراحل رشد تا شکفتن جوانه، شکفتن جوانه تا گل دادن و گل دادن تا رشد میوه استفاده شد. همچنین برای ارزیابی

اثرات تغییرات اقلیمی بر روی محصول بادام در دوره آینده از گزارش CMIP5 با استفاده مدل‌های IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 و گزارش CMIP6 با استفاده از مدل‌های GFDL-ESM4 و IPSL-CM6A-LR تحت سناریوهای SSP1.2.6 و SSP3.7.0 و SSP5.8.5 استفاده گردید.

سناریوهای واداشت تابشی

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود^۱ AR5 از سناریوهای جدید RCP^۲ به‌عنوان نماینده‌های خطوط خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوی جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6 و RCP 8.5 می‌باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. به‌طور کلی در مدل‌های اجرا شده برای پنجمین گزارش ارزیابی (AR5) IPCC، سناریوهای RCP جایگزین سناریوهای SRES شدند (ون ورون و همکاران^۳، ۲۰۱۱: ۱۳). سناریوهای RCP نشان‌دهنده محرکه‌های تابشی هستند و در میان آن‌ها سناریوی RCP 2.6 سناریوهای انتشار و محرکه‌های تابشی کم (تقریباً با سناریوهای B1 یا B2 مطابقت دارند) و سناریوی RCP 8.5 محرکه‌های تابشی و سناریوهای انتشار زیاد (تقریباً با سناریوهای A1 یا A2) را نشان می‌دهند. همچنین سناریوهای RCP 4.5 و RCP 6.0 حالت متوسط دارند (مارنگو و همکاران^۴، ۲۰۱۴: ۲۶).

سناریوهای خط سیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs^۵)

سناریوهای مختلف SSP به‌کاررفته در CMIP6 تغییرات اقتصادی – اجتماعی جهان را تا سال ۲۱۰۰ پیش‌نگری می‌کنند. پنج سناریو اصلی با علامت‌های اختصاری SSP1 2.6، SSP2 4.5، SSP3 6.0، SSP4 7 و SSP5 8.5 در CMIP6 به کار رفته‌اند (شهابی آباد^۶ و همکاران، ۲۰۲۳: ۳). در نام‌گذاری سناریوهای جدید از الگوی SSPx-y استفاده خواهد شد. در این الگو x نشان‌دهنده گروه SSP و y نشان‌دهنده واداشت تابشی (W/m^2) در سال ۲۱۰۰ است. از زمان توافق پاریس سناریوی انتشار کربن موردتوجه بیشتری قرار گرفت. بنابراین اهمیت سناریوهای گروه اول SSP بر اساس مفاد توافق‌نامه پاریس است (حاجت^۷ و همکاران، ۲۰۲۳: ۲۸۴). در این پژوهش از سناریوهای SSP1 2.6، SSP2 4.5 و SSP5 8.5 برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر روی محصول بادام در دوره آینده مورد استفاده قرار گرفتند.

آزمون من – کندال^۸ و تخمین گر شیب سن^۹

آزمون من – کندال ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) بسط و توسعه یافت (سرانو و همکاران^{۱۰}، ۱۹۹۹: ۸۶) و کاربرد آن توسط سازمان جهانی هواشناسی توصیه گردید (میتچل و همکاران^{۱۱}، ۱۹۹۶: ۱۷). از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره نمود. از دیگر مزیت‌های این روش می‌توان به اثرپذیری ناچیز آن از مقادیر فرین که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند اشاره نمود (پارتل و کایا^{۱۲}، ۲۰۰۶: ۲۰۱۶). فرض صفر این آزمون مبین تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری زمانی است و پذیرش فرض یک، دال بر وجود روند در سری داده‌هاست.

1 . Fifth Assessment Report AR5

2 . Representative Concentration Pathways

3 . Van Vuuren et al

4 . Marengo et al

5 . Shared Socioeconomic Pathways

6 . Sahabi-Abed

7 . Hajat

8 . Mann-Kendall

9 . Sen Slope

10 . Serrano et al

11 . Mitchell et al

12 . Partal & Kahya

همچنین تخمین گر شیب سن مانند روش من - کندال بر اساس مفهوم تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بنا نهاده شده است که اندازه روند بر اساس این روش برآورد می‌شود (سن، ۱۹۶۸؛ ۱۳۷۹؛ اسدی و کرمی، ۲۰۲۱: ۴). در این روش شیب بین هر جفت داده در سری زمانی محاسبه شده و میانه سری شیب‌های به دست آمده استخراج می‌گردد (برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد روش من - کندال و شیب سن به پژوهش آلاشان^۱ (۲۰۲۰) مراجعه گردد).

درجه در روز رشد

یک درجه - روز عبارت است از متوسط دمای روزانه بالاتر از دمای پایه (کمالی و بازیگر، ۱۳۸۷: ۱۱۵). از آنجاکه شروع مرحله رشد فعال بادام زمانی آغاز می‌شود که میانگین دمای روزانه از مقدار آستانه ۷ درجه سانتی‌گراد تجاوز نماید. لذا در این تحقیق برای محاسبه GDD یا درجه روز رشد دمای پایه ۷ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد: فرمول محاسبه GDD به شرح رابطه ۱ است:

$$\text{GDD} = \sum_a^b \left\{ \left[\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right] - T_b \right\} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق، GDD درجه روز رشد (حرارت تجمعی)، $T_{\max}$ و $T_{\min}$ درجه حرارت‌های حداکثر و حداقل روزانه (برحسب درجه سانتی‌گراد)، T_b دمای مبنا (در اینجا ۷ درجه سانتی‌گراد)، a و b تاریخ شروع و پایان مرحله فنولوژیکی است (کرمی و اسدی، ۲۰۱۷: ۲۷۳).

نتایج

برای بررسی روند پارامترهایی آب و هوایی مؤثر بر رشد محصول بادام ابتدا مدل‌های IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M از گزارش CMIP5 و مدل‌های IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 از گزارش CMIP6 انتخاب گردید. نحوه انتخاب مدل‌ها به این گونه بود که ابتدا از بین تمامی مدل‌های موجود ۱۰ مدل که بیشترین ضریب تبیین (r^2) را با پارامتر دمای بیرجند داشتند انتخاب شده و سپس بین آن‌ها ۲ مدل از گزارش فاز پنجم و دو مدل از گزارش فاز ششم که بیشترین ضریب تبیین را داشتند انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱).

جدول ۱. انتخاب برترین مدل از بین مدل‌های دارای بیشترین ضریب تبیین (r^2) با دمای بیرجند

CMIP5					
FGOALS-s2	MPI-ESM-LR	GFDL-ESM2M	IPSL-CM5A-LR	NorESM1-M	مدل
۰/۷۰	۰/۸۷	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۸۴	ضریب تبیین دما (r^2)
۰/۶۹	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۷۵	ضریب تبیین بارش (r^2)
CMIP6					
FGOALS-f3-L	MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	IPSL-CM6A-LR	NorESM2-MM	مدل
۰/۷۲	۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۸۶	ضریب تبیین دما (r^2)
۰/۷۰	۰/۸۴	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۷۸	ضریب تبیین بارش (r^2)

در ادامه برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی محصول بادام ابتدا لازم بود تا مراحل فنولوژیکی رشد محصول استخراج شود. لذا برای این کار ابتدا نیازهای حرارتی یا همان درجه در روز محصول بادام در مراحل رشد به صورت مرحله‌ای و تجمعی در هر سال استخراج گردید (جدول ۲). بر این اساس گیاه بادام برای رسیدن به مرحله میوه دهی باید ۳۲۶۳/۷ درجه سانتی‌گراد

به‌صورت تجمعی در طول دوره رشد انرژی گرمایی دریافت نمایند و برای تشکیل جوانه فقط به $37/2$ درجه سانتی‌گراد حرارت نیاز دارد.

جدول ۲. نیازهای حرارتی بادام در مراحل مختلف رشد

ردیف	مراحل فنولوژی	واحد حرارتی تجمعی
۱	تشکیل جوانه	$37/2$
۲	شکفتن جوانه	$95/6$
۳	گلدهی	$283/4$
۴	رشد میوه	$2347/8$
۵	رسیدن میوه	$3263/7$

سپس با استفاده از نرم‌افزار SMADA و توزیع احتمال پیرسون ۲ که بهترین خط برازش می‌باشد تاریخ‌های آغاز فنولوژی محصول بادام با احتمال ۹۵ درصد در دوره‌های مشاهداتی و مدل شده مانند RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای گزارش CMIP5 و SSP1.2.6 و SSP3.7.0 و SSP5.8.5 برای گزارش CMIP6 استخراج گردید. جداول (۳ و ۴) به ترتیب نشان‌دهنده تاریخ‌های آغاز فنولوژی محصول بادام در ایستگاه بیرجند در دوره‌های مختلف موردبررسی بر اساس سناریوهای مدل‌های گزارش CMIP5 و CMIP6 می‌باشد. با توجه به جداول مذکور تشکیل جوانه در دوره مشاهداتی از ۲۸ اسفند آغاز و تا ۵ فروردین آماده می‌یابد اما این موضوع بر اساس سناریو IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M در گزارش CMIP5 به ترتیب به تاریخ ۱۷ تا ۲۵ اسفند و تاریخ ۱۹ اسفند تا ۲۹ اسفند و همچنین بر اساس سناریو IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M در گزارش CMIP6 به ترتیب به تاریخ ۱۹ اسفند تا ۲۹ اسفند و ۱۸ اسفند تا ۲۸ اسفند مربوط می‌شود همین اتفاق برای سایر مراحل فنولوژی درخت بادام که اطلاعات آن در جداول مذکور آورده شده است نیز بدون استثنا تکرار می‌گردد که نشان از تأمین سریع‌تر نیاز گرمایی درخت بادام در منطقه بیرجند و افزایش دما منطقه مورد مطالعه می‌باشد که می‌تواند مراحل رشد گیاه و نیاز آبی آن را تحت تأثیر قرار دهد.

جدول ۳. تاریخ‌های آغاز فنولوژی محصول بادام در بیرجند بر اساس سناریوهای گزارش CMIP5

سناریو	مراحل فنولوژی	مشاهداتی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	تشکیل جوانه	۲۸ اسفند – ۵ فروردین	۲۲ اسفند – ۲۵ اسفند	۲۱ اسفند – ۲۷ اسفند	۱۷ اسفند – ۲۵ اسفند
	شکفتن جوانه	۶ فروردین – ۲۲ فروردین	۲۶ اسفند – ۱۴ فروردین	۲۷ اسفند – ۱۳ فروردین	۲۳ اسفند – ۹ فروردین
	گلدهی	۲۳ فروردین – ۶ اردیبهشت	۱۵ فروردین – ۲۷ فروردین	۱۵ فروردین – ۲۹ فروردین	۱۰ فروردین – ۲۶ فروردین
	رشد میوه	۷ اردیبهشت – ۱۵ مرداد	۲۸ فروردین – ۲۶ تیر	۲۵ فروردین – ۲۶ تیر	۲۳ فروردین – ۲۴ تیر
	رسیدن میوه	۱۶ مرداد – ۲۷ شهریور	۲۷ تیر – ۹ مرداد	۲۵ تیر – ۸ مرداد	۲۲ تیر – ۱۱ مرداد
GFDL-ESM2M	تشکیل جوانه	۲۸ اسفند – ۵ فروردین	۲۳ اسفند – ۳ فروردین	۲۲ اسفند – ۵ فروردین	۱۹ اسفند – ۲۹ اسفند
	شکفتن جوانه	۶ فروردین – ۲۲ فروردین	۳ فروردین – ۱۸ فروردین	۴ فروردین – ۲۲ فروردین	۱ فروردین – ۱۷ فروردین
	گلدهی	۲۳ فروردین – ۶ اردیبهشت	۱۹ فروردین – ۵ اردیبهشت	۲۲ فروردین – ۶ اردیبهشت	۲۰ فروردین – ۵ اردیبهشت
	رشد میوه	۷ اردیبهشت – ۱۵ مرداد	۳۰ فروردین – ۱۷ مرداد	۸ اردیبهشت – ۱۹ مرداد	۵ اردیبهشت – ۹ مرداد
	رسیدن میوه	۱۶ مرداد – ۲۷ شهریور	۲ مرداد – ۱۷ شهریور	۵ مرداد – ۲۵ شهریور	۲۸ تیر – ۱۳ شهریور

جدول ۴. تاریخ‌های آغاز فنولوژی محصول بادام در بیرجند بر اساس سناریوهای گزارش CMIP6

سناریو	مراحل فنولوژی	مشاهداتی	SSP1.2.6	SSP3.7.0	SSP5.8.5
IPSL-CM6A-LR	تشکیل جوانه	۲۸ اسفند - ۵ فروردین	۲۳ اسفند - ۴ فروردین	۲۴ اسفند - ۷ فروردین	۱۹ اسفند - ۲۹ اسفند
	شکفتن جوانه	۶ فروردین - ۲۲ فروردین	۵ فروردین - ۱۸ فروردین	۸ فروردین - ۲۳ فروردین	۲۹ اسفند - ۱۷ فروردین
	گلدهی	۲۳ فروردین - ۶ اردیبهشت	۱۶ فروردین - ۳ اردیبهشت	۲۱ فروردین - ۴ اردیبهشت	۱۱ فروردین - ۲۹ فروردین
	رشد میوه	۷ اردیبهشت - ۱۵ مرداد	۲۸ فروردین - ۲۷ تیر	۵ اردیبهشت - ۱۳ مرداد	۲۸ فروردین - ۲۴ تیر
	رسیدن میوه	۱۶ مرداد - ۲۷ شهریور	۱۱ مرداد - ۲۹ شهریور	۱۵ مرداد - ۲۳ شهریور	۱ مرداد - ۷ شهریور
GFDL-ESM4	تشکیل جوانه	۲۸ اسفند - ۵ فروردین	۲۳ اسفند - ۱ فروردین	۲۷ اسفند - ۴ فروردین	۱۸ اسفند - ۲۸ اسفند
	شکفتن جوانه	۶ فروردین - ۲۲ فروردین	۲ فروردین - ۱۸ فروردین	۷ فروردین - ۲۱ فروردین	۲۸ اسفند - ۱۴ فروردین
	گلدهی	۲۳ فروردین - ۶ اردیبهشت	۲۰ فروردین - ۵ اردیبهشت	۲۲ فروردین - ۸ اردیبهشت	۱۴ فروردین - ۱ اردیبهشت
	رشد میوه	۷ اردیبهشت - ۱۵ مرداد	۳ اردیبهشت - ۹ مرداد	۶ اردیبهشت - ۱۳ مرداد	۳۰ فروردین - ۲ مرداد
	رسیدن میوه	۱۶ مرداد - ۲۷ شهریور	۱۲ مرداد - ۱۸ شهریور	۱۵ مرداد - ۲۶ شهریور	۱ مرداد - ۵ شهریور

سپس برای ارزیابی روند پارامترهای اقلیمی (دما و بارش) در مراحل مختلف رشد محصول بادام در دوره مشاهداتی از روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند در اقلیم‌شناسی مانند آزمون من - کندال و تخمین گر شیب سن استفاده گردید که نتایج آن در جداول (۵ و ۶) ارائه شده است.

بر اساس جدول (۵) میانگین، پیشینه و کمینه دمای فصل رشد در سطح ۹۹ درصد به ترتیب با مقادیر ۲۸/۳، ۳۵/۱۸ و ۲۰/۰۲ درجه سانتی‌گراد مثبت و معنادار می‌باشد. که نتایج آن با پژوهش باعقیده و همکاران (۱۳۹۶) در یک راستا می‌باشد. در این جدول شاخص درجه روز رشد که برای بررسی تغییرات درجه در روز استفاده شده میانگین ۳۰۰۲/۸ را با روند ۲/۵۲ و شیب ۸/۸۵ نشان می‌دهد که بیانگر پتانسیل یا روند حرارتی مثبت منطقه برای کشت بادام می‌باشد. با توجه به مباحث بیان شده می‌توان چنین برداشت نمود که دمای شهرستان بیرجند در دوره رشد بادام در حال افزایش می‌باشد.

جدول ۵. خروجی‌های آزمون من - کندال و تخمین گر شیب سن برای دما در بیرجند در دوره مشاهداتی

شاخص‌های دما	Mean	SD	Q	Z
میانگین دما	۲۱/۲۴	۱/۸۵	۰/۰۷	۴/۳۱
میانگین دمای حداقل	۱۳/۷۵	۱/۲۴	۰/۱۴	۳/۶۵
میانگین دمای حداکثر	۲۹/۱۴	۱/۱۶	۰/۰۴	۳/۰۹
میانگین دمای فصل رشد	۲۸/۳	۱/۲۵	۰/۰۳	۳/۸۲
پیشینه‌ی دمای فصل رشد	۳۵/۱۸	۱/۶۳	۰/۰۳	۳/۶۴
کمینه‌ی دمای فصل رشد	۲۰/۰۲	۱/۶۵	۰/۰۷	۴/۲۹
شاخص درجه روز رشد	۳۰۰۲/۸	۲۰۱/۴	۸/۸۵	۳/۵۲
طول دوره‌ی بدون یخبندان	۲۳۴	۳۰/۲۵	۰/۴۸	۰/۹۶

همچنین در بررسی شاخص‌های بارش مشخص گردید که میزان بارش هم در دوره رشد محصول و هم در مجموع سالانه به‌جز مرحله ششم (زمان پس از برداشت) که دارای روند افزایشی (۰/۸۹) می‌باشد دارای روند کاهش بوده است که بیانگر کم بود

باران و حاکمیت شرایط خشکی در منطقه است (جدول ۶). بر این اساس بیشترین روند کاهشی بارش با مقدار ۲/۸۵- در مرحله شکفتن جوانه (مرحله دوم) و بیشترین روند افزایشی بارش در مرحله ششم یا زمان پس از برداشت با مقدار ۰/۸۹ می‌باشد جایی که نیاز چندانی به بارش نبوده و احتمالاً در آینده یا به عبارتی در ۳۰ سال آینده بتواند خسارات جبران‌ناپذیری را به محصول وارد آورد چراکه اکثراً در دوره پس از برداشت محصول نیاز به آبیاری و بارش نمی‌باشد.

جدول ۶. خروجی‌های آزمون من - کندال و تخمین گر شیب سن برای بارش در بیرجند در دوره مشاهداتی

شاخص‌های بارش	Mean	SD	Q	Z
مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)	۱۶۸/۵	۳۹/۲	-۲/۸۹	-۲/۳۶
بارش فصل رشد	۵۴/۶	۳۸/۹	-۲/۷۴	-۲/۴۱
مرحله‌ی اول: تشکیل جوانه	۴/۳	۶/۹	-۰/۰۱	-۱/۷۸
مرحله‌ی دوم: شکفتن جوانه	۱۵/۰۴	۱۲/۱	-۱/۵۹	-۲/۸۵
مرحله‌ی سوم: گلدهی	۵۲/۳۶	۲۵/۰۲	-۰/۷۸	-۱/۲۳
مرحله‌ی چهارم: رشد میوه	۱/۵۴	۲/۷	-۰/۳۲	-۱/۹۸
مرحله‌ی پنجم: رسیدن میوه	۱/۳۱	۳/۹	-۰/۶۴	-۱/۰۱
مرحله‌ی ششم: زمان پس از برداشت	۱۹/۶	۱۶/۶	-۱/۵۸	۰/۸۹
مرحله‌ی هفتم: دوره‌ی خواب	۷۴/۴	۴۷/۶	-۱/۶۹	-۰/۹۴

روند تغییرات بارش و دما در دوره‌های مشاهده‌ای و مدل شده بر اساس سناریوهای گزارش CMIP5

در این بخش روند تغییرات پارامترهای بارش و دما تحت سناریوهای واداشت تابشی با داده‌های دوره‌ی مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌های IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M نشانگر آن است که پارامترهای دمای میانگین، حداقل و حداکثر دارای روند افزایشی و پارامتر بارش سالانه نیز دارای روند کاهشی بوده است. در مدل IPSL-CM5A-LR این روند برای میانگین دما (میانگین دمای دوره مشاهداتی ۲۲/۱۳) در RCP 2.6 ۰/۲۹ درجه سانتی‌گراد، در RCP 4.5 ۱/۱۲ درجه سانتی‌گراد و در RCP 8.5 ۲/۳۸ درجه سانتی‌گراد، برای دمای حداقل (دمای حداقل دوره مشاهداتی ۱۳/۵۲) در RCP 2.6 ۰/۱۲ درجه سانتی‌گراد، در RCP 4.5 ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد و در RCP 8.5 ۱/۶۴ درجه سانتی‌گراد و برای دمای حداکثر (دمای حداکثر دوره مشاهداتی ۳۰/۷۴) در RCP 2.6 ۰/۶۳ درجه سانتی‌گراد، در RCP 4.5 ۱/۲۸ درجه سانتی‌گراد و در RCP 8.5 ۳/۱۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین پارامتر بارش نیز با مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی (۱۶۸/۵ میلی‌متر) در RCP 2.6 ۶/۲ میلی‌متر، در RCP 4.5 ۷/۷ میلی‌متر و در نهایت در RCP 8.5 ۲۱/۳ میلی‌متر کاهش داشته است (جدول ۷).

در مدل GFDL-ESM2M این روند برای میانگین دما (میانگین دمای دوره مشاهداتی ۲۲/۱۳) در RCP 2.6 ۰/۸ درجه سانتی‌گراد کاهش، در RCP 4.5 ۰/۲۴ درجه سانتی‌گراد و در RCP 8.5 ۱/۳۸ درجه سانتی‌گراد افزایش، برای دمای حداقل (دمای حداقل دوره مشاهداتی ۱۳/۵۲) در RCP 2.6 ۰/۵ درجه سانتی‌گراد، در RCP 4.5 ۰/۷۵ درجه سانتی‌گراد و در RCP 8.5 ۲/۴۴ درجه سانتی‌گراد و برای دمای حداکثر (دمای حداکثر دوره مشاهداتی ۳۰/۷۴) در RCP 2.6 ۰/۹ درجه سانتی‌گراد، در RCP 4.5 ۱/۷۴ درجه سانتی‌گراد و در RCP 8.5 ۲/۳۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین پارامتر بارش نیز با مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی (۱۶۸/۵ میلی‌متر) در RCP 2.6 ۵/۶۹ میلی‌متر، در RCP 4.5 ۸/۴۹ میلی‌متر و در نهایت در RCP 8.5 ۲۰/۸۴ میلی‌متر کاهش داشته است (جدول ۷). نتایج این بخش با پژوهش یعقوب زاده و رضانی (۱۳۹۸) که به ارزیابی مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم در برآورد دما و بارش ایستگاه بیرجند پرداخته بودند تطابق و همخوانی بالایی دارد.

جدول ۷. شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای گزارش CMIP5 برای دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰

مدل	پارامتر	دوره ۱۹۷۵-۲۰۲۰	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
IPSL-CM5A-LR	میانگین دما	۲۲/۱۳	۲۲/۴۲	۲۳/۲۵	۲۴/۵۱
	دمای حداقل	۱۳/۵۲	۱۳/۶۴	۱۴/۴۹	۱۵/۱۶
	دمای حداکثر	۳۰/۷۴	۳۱/۳۷	۳۲/۰۲	۳۳/۸۷
	مجموع بارش سالانه	۱۶۸/۵	۱۶۲/۳	۱۶۰/۸	۱۴۷/۲
مدل	پارامتر	دوره ۱۹۷۵-۲۰۲۰	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
GFDL-ESM2M	میانگین دما	۲۲/۱۳	۲۱/۳۳	۲۲/۳۷	۲۳/۵۱
	دمای حداقل	۱۳/۵۲	۱۴/۰۲	۱۴/۲۷	۱۵/۹۶
	دمای حداکثر	۳۰/۷۴	۳۱/۶۴	۳۲/۴۸	۳۳/۰۷
	مجموع بارش سالانه	۱۶۸/۵	۱۶۲/۸۱	۱۶۰/۰۱	۱۴۷/۶۶

از آنجاکه در پژوهش حاضر سعی شده است که تأثیرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی مؤثر بر بادام مورد بررسی قرار بگیرد، لذا در ادامه به محاسبه شاخص‌های دما و بارش در طول دوره رشد بادام پرداخته شد. با توجه به جدول (۸) در بررسی شاخص‌های دمایی برای مدل IPSL-CM5A-LR مشخص شد که میانگین، کمینه و بیشینه دما در هر ۳ سناریو نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است که بر این اساس بیشترین افزایش در هر سه شاخص میانگین، بیشینه و کمینه دما به ترتیب با مقادیر عددی ۳۰/۶، ۳۷/۳ و ۲۳/۴ مربوط به سناریوی RCP 8.5 بوده است. شاخص درجه روز رشد نیز در RCP 8.5 بیشترین مقدار افزایش را به مقدار ۳۰۵/۹ نسبت به دوره مشاهداتی داشته است. درصد روزهای یخبندان به همراه طول دوره‌ی یخبندان افزایش یافته است که می‌تواند رشد محصول را با مخاطره روبه‌رو کند چرا که در دوره رشد قرار دارد. همچنین در بررسی پارامترهای مربوط به بارش مشخص گردید که میزان بارش به‌جز در مرحله گلدهی در سایر مراحل با کاهش مواجه خواهد بود که می‌تواند تهدیدی جدی در تأمین نیاز آب محصول به شمار آید. همچنین در مدل GFDL-ESM2M مشخص گردید که بیشترین افزایش در هر سه شاخص میانگین، بیشینه و کمینه دما به ترتیب با مقادیر عددی ۳۱/۸، ۳۷/۸ و ۲۴ مربوط به سناریوی RCP 8.5 بوده است. شاخص درجه روز رشد نیز در RCP 8.5 بیشترین مقدار افزایش را به مقدار ۳۰۷ نسبت به دوره مشاهداتی داشته است.

جدول ۸. میانگین متغیرهای اقلیمی دما و بارش در طول فصل رشد محصول بادام بر اساس دوره مشاهداتی و پیش‌بینی شده بر اساس

سناریوهای گزارش CMIP5

مدل	شاخص‌های دما	دوره مشاهداتی	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
IPSL-CM5A-LR	میانگین دمای فصل رشد	۲۸/۳	۲۸/۴	۲۹/۱	۳۰/۶
	پیشینه‌ی دمای فصل رشد	۳۵/۱۸	۳۵/۷۴	۳۶/۹۸	۳۷/۳
	کمینه‌ی دمای فصل رشد	۲۰/۰۲	۲۰/۵۴	۲۱/۹۸	۲۳/۴
	شاخص درجه روز رشد	۳۰۰۲/۸	۳۰۰۳/۱	۳۰۰۴/۲	۳۰۰۵/۹
	طول دوره‌ی بدون یخبندان	۲۳۴	۲۳۵	۲۳۶	۲۳۸
	شاخص‌های بارش	دوره مشاهداتی	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
	مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)	۱۶۸/۵	۱۶۸/۳۲	۱۶۷/۱	۱۶۶/۲
	بارش فصل رشد	۵۴/۶	۵۴/۱۴	۵۴/۰۳	۵۳/۲۳
	مرحله‌ی اول: تشکیل جوانه	۴/۳	۴/۱	۳/۹۷	۳/۰۲
	مرحله‌ی دوم: شکفتن جوانه	۱۵/۰۴	۱۴/۸۸	۱۴/۳۲	۱۳/۷۸
	مرحله‌ی سوم: گلدهی	۵۲/۳۶	۵۲/۷۰	۵۲/۴۲	۵۲/۱۴
	مرحله‌ی چهارم: رشد میوه	۱/۵۴	۱/۳۴	۱/۰۱	۰/۷۱
	مرحله‌ی پنجم: رسیدن میوه	۱/۳۱	۱/۱۹	۰/۹۸	۰/۵۲
مدل	شاخص‌های دما	دوره مشاهداتی	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5

۳۱/۸	۲۹/۹	۲۸/۵	۲۸/۳	میانگین دمای فصل رشد	GFDL-ESM2M
۳۷/۸	۳۶/۱	۳۵/۷۴	۳۵/۱۸	پیشینه‌ی دمای فصل رشد	
۲۴	۲۱/۹۸	۲۰/۵۴	۲۰/۰۲	کمینه‌ی دمای فصل رشد	
۳۰۰۷	۳۰۰۴/۸	۳۰۰۳/۱	۳۰۰۲/۸	شاخص درجه روز رشد	
۲۳۷	۲۳۵	۲۳۴	۲۳۴	طول دوره‌ی بدون یخبندان	
RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 2.6	دوره مشاهده‌ای	شاخص‌های بارش	
۱۶۴/۸	۱۶۷/۴۶	۱۶۸/۱	۱۶۸/۵	مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)	
۵۲/۱۱	۵۳/۸۹	۵۴/۰۶	۵۴/۶	بارش فصل رشد	
۲/۷	۳/۹	۴/۱	۴/۳	مرحله‌ی اول: تشکیل جوانه	
۱۲/۶۲	۱۳/۹۰	۱۴/۵۴	۱۵/۰۴	مرحله‌ی دوم: شکفتن جوانه	
۴۹/۲۶	۵۱/۷۳	۵۲/۰۲	۵۲/۳۶	مرحله‌ی سوم: گلدهی	
۰/۸۳	۱/۰۲	۱/۲۵	۱/۵۴	مرحله‌ی چهارم: رشد میوه	
۰/۴۷	۰/۹۱	۱/۱۱	۱/۳۱	مرحله‌ی پنجم: رسیدن میوه	

روند تغییرات بارش و دما در دوره‌های مشاهده‌ای و مدل شده بر اساس سناریوهای گزارش CMIP6

در این بخش روند تغییرات پارامترهای بارش و دما تحت سناریوهای خط سیر مشترک اجتماعی - اقتصادی با داده‌های دوره‌ی مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌های IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 بیانگر آن است که پارامتر بارش دارای روند کاهشی و پارامترهای دمای حداقل و دمای حداکثر دارای روند افزایشی بوده‌اند. این روند بر اساس نتایج حاصل از مدل IPSL-CM6A-LR در سناریو SSP5.8.5 در میانگین دما ۲/۳۵ درجه سانتی‌گراد، در دمای حداقل ۱/۸۲ درجه سانتی‌گراد و در دمای حداکثر ۲/۸۹ درجه سانتی‌گراد و بر اساس نتایج حاصل از مدل GFDL-ESM4 در سناریو SSP5.8.5 در میانگین دما ۲/۳۶ درجه سانتی‌گراد، در دمای حداقل ۲/۴۳ درجه سانتی‌گراد و در دمای حداکثر ۲/۸ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دوره مشاهداتی افزایش داشته است. همچنین مجموع بارش سالانه حاصل از مدل IPSL-CM6A-LR در SSP5.8.5 ۱۴۵/۷ میلی‌متر بوده که در مقایسه با دوره مشاهداتی ۲۲/۸ میلی‌متر و مجموع بارش سالانه حاصل از مدل GFDL-ESM4 در SSP5.8.5 ۱۴۶/۱ میلی‌متر بوده که در مقایسه با دوره مشاهداتی ۲۲/۴ میلی‌متر برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ کاهش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که میزان کاهش بارش برای مدل IPSL-CM6A-LR به ترتیب در SSP های SSP3.7.0 و SSP1.2.6 به ترتیب حدود ۹/۲ و ۹/۶ میلی‌متر و برای مدل GFDL-ESM4 به ترتیب حدود ۷/۸ و ۶/۷ میلی‌متر می‌باشد (جدول ۹).

جدول ۹. شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای گزارش CMIP6 برای دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰

مدل	پارامتر	دوره ۲۰۲۰-۱۹۷۵	SSP1.2.6	SSP3.7.0	SSP5.8.5
IPSL-CM6A-LR	میانگین دما	۲۲/۱۳	۲۲/۱۲	۲۳/۱۳	۲۴/۴۸
	دمای حداقل	۱۳/۵۲	۱۴/۰۳	۱۴/۲۲	۱۵/۳۴
	دمای حداکثر	۳۰/۷۴	۳۰/۸۷	۳۱/۰۵	۳۳/۶۳
	مجموع بارش سالانه	۱۶۸/۵	۱۶۱/۹	۱۵۹/۳	۱۴۵/۷
مدل	پارامتر	دوره ۲۰۲۰-۱۹۷۵	SSP1.2.6	SSP3.7.0	SSP5.8.5
GFDL-ESM4	میانگین دما	۲۲/۱۳	۲۲/۱۶	۲۳/۸۴	۲۴/۴۹
	دمای حداقل	۱۳/۵۲	۱۴/۲۱	۱۴/۷۰	۱۵/۹۵
	دمای حداکثر	۳۰/۷۴	۳۰/۹۹	۳۱/۰۹	۳۳/۵۴
	مجموع بارش سالانه	۱۶۸/۵	۱۶۱/۸	۱۶۰/۷	۱۴۶/۱

در ادامه شاخص‌های دما و بارش در طول دوره رشد بادام بر اساس سناریوهای گزارش CMIP6 برای شهرستان بیرجند نیز محاسبه گردید. لذا با توجه به جدول (۱۰) در بررسی شاخص‌های دمایی مشخص شد که میانگین، کمینه و بیشینه دما در هر ۳ سناریو نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است که بر این اساس بیشترین افزایش در هر سه شاخص میانگین، بیشینه و کمینه دما با توجه به مدل IPSL-CM6A-LR به ترتیب با مقادیر عددی ۳۰/۱۱، ۳۷/۵۱ و ۲۲/۸۳ و مدل GFDL-ESM4 به ترتیب با مقادیر عددی ۲۹/۴۱، ۳۷/۳۸ و ۲۲/۷۵ مربوط به سناریوی SSP5.8.5 بوده است. در هر دو مدل IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 شاخص درجه روز رشد نیز در سناریوی SSP5.8.5 به ترتیب بیشترین مقدار افزایش را به مقدار ۳۰۰۶/۳۶ و ۳۰۰۸/۲۵ نسبت به دوره مشاهداتی داشته است. درصد روزهای یخبندان به همراه طول دوره‌ی یخبندان به‌مانند مدل‌های مورد بررسی در CMIP5 افزایش‌یافته است که می‌تواند رشد محصول را با مخاطره روبه‌رو کند چرا که در دوره رشد قرار دارد. همچنین در بررسی پارامترهای مربوط به بارش در هر دو مدل IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 مشخص گردید که میزان بارش به‌جز در تمام مراحل رشد با کاهش مواجه خواهد بود که می‌تواند تهدیدی جدی هم در تأمین نیاز آب و هم کیفیت محصول به شمار می‌آید و صدمات جبران‌ناپذیری را به محصول وارد خواهد آورد.

جدول ۱۰. میانگین متغیرهای اقلیم دما و بارش در طول فصل رشد محصول بادام بر اساس دوره مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده بر اساس

سناریوهای گزارش CMIP6

مدل	شاخص‌های دما	دوره مشاهداتی	SSP1.2.6	SSP3.7.0	SSP5.8.5
IPSL-CM6A-LR	میانگین دمای فصل رشد	۲۸/۳	۲۸/۱۶	۲۸/۵۹	۳۰/۱۱
	پیشینه‌ی دمای فصل رشد	۳۵/۱۸	۳۵/۳۳	۳۵/۸۴	۳۷/۵۱
	کمینه‌ی دمای فصل رشد	۲۰/۰۲	۲۰/۱۴	۲۰/۶۶	۲۲/۸۳
	شاخص درجه روز رشد	۳۰۰۲/۸	۳۰۰۳/۱۲	۳۰۰۴/۴۷	۳۰۰۶/۳۶
	طول دوره‌ی بدون یخبندان	۲۳۴	۲۳۵	۲۳۶	۲۳۷
	شاخص‌های بارش				
	مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)	۱۶۸/۵	۱۶۸/۲	۱۶۷/۹۴	۱۶۴/۸
	بارش فصل رشد	۵۴/۶	۵۴/۳۲	۵۴/۷۵	۵۱/۲۳
	مرحله‌ی اول: تشکیل جوانه	۴/۳	۳/۹۷	۳/۸۸	۲/۹۱
	مرحله‌ی دوم: شکفتن جوانه	۱۵/۰۴	۱۴/۸۸	۱۳	۱۲/۹۲
	مرحله‌ی سوم: گلدهی	۵۲/۳۶	۵۲/۲۴	۵۲/۰۴	۵۱/۱۲
	مرحله‌ی چهارم: رشد میوه	۱/۵۴	۱/۴۷	۱/۰۷	۰/۸۹
	مرحله‌ی پنجم: رسیدن میوه	۱/۳۱	۱/۱۴	۰/۹۶	۰/۶۷
مدل	شاخص‌های دما	دوره مشاهداتی	SSP1.2.6	SSP3.7.0	SSP5.8.5
GFDL-ESM4	میانگین دمای فصل رشد	۲۸/۳	۲۸/۵۹	۲۸/۸۷	۲۹/۴۱
	پیشینه‌ی دمای فصل رشد	۳۵/۱۸	۳۵/۸۹	۳۶/۰۴	۳۷/۳۸
	کمینه‌ی دمای فصل رشد	۲۰/۰۲	۲۰/۴۱	۲۰/۹۷	۲۲/۷۵
	شاخص درجه روز رشد	۳۰۰۲/۸	۳۰۰۳/۶	۳۰۰۴/۴	۳۰۰۸/۲۵
	طول دوره‌ی بدون یخبندان	۲۳۴	۲۳۶	۲۳۷	۲۳۸
	شاخص‌های بارش				
	مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)	۱۶۸/۵	۱۶۷/۵	۱۶۶/۰۶	۱۶۵/۳
	بارش فصل رشد	۵۴/۶	۵۴/۳۴	۵۴/۰۷	۵۳/۱۱
	مرحله‌ی اول: تشکیل جوانه	۴/۳	۴/۱۸	۴/۰۷	۳/۴۲
	مرحله‌ی دوم: شکفتن جوانه	۱۵/۰۴	۱۴/۱۱	۱۳/۷۴	۱۲/۱۷
	مرحله‌ی سوم: گلدهی	۵۲/۳۶	۵۲/۳۰	۵۱/۸۱	۵۰/۳۱
	مرحله‌ی چهارم: رشد میوه	۱/۵۴	۱/۴۷	۱/۰۴	۰/۸۹
	مرحله‌ی پنجم: رسیدن میوه	۱/۳۱	۱/۲۴	۱/۰۴	۰/۵۶

به‌منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل‌های مذکور در جدول (۱۱) از شاخص‌های RMSE و MAD استفاده گردید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مقادیر RMSE و MAD مربوط به دما در تمامی مدل‌های مورد بررسی زیر ۱/۳۲۲ بوده و کمترین میزان RMSE و MAD مربوط به مدل GFDL-ESM2M به ترتیب با مقادیر عددی ۱/۰۲۳ و ۰/۹۹۷ می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی است. همچنین قابل‌ذکر است که مدل‌های مورد بررسی در ارزیابی پارامتر بارش زیاد خوب عمل نکرده و مقادیر RMSE و MAD در تمامی مدل‌ها بالای ۱۰ می‌باشد. به‌طور کلی مدل‌های مربوط به CMIP6 (RMSE دما و بارش به ترتیب ۱/۱۵۶ و ۱۴/۴۶۳، MAD دما و بارش به ترتیب ۱/۱۳۹ و ۱۲/۵۸۳) نسبت به مدل‌های مربوط به CMIP5 (RMSE دما و بارش به ترتیب ۱/۱۷۲ و ۱۳/۴۷۹، MAD دما و بارش به ترتیب ۱/۱۴۰ و ۱۱/۷۰۳) با خطای میانگین کمتری به پیش‌بینی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه پرداختند.

جدول ۱۱. مقایسه مقادیر RMSE برای مقادیر میانگین دما و بارش بر اساس سناریوهای مورد بررسی

MAD		RMSE			
بارش	دما	بارش	دما		
۱۱/۷۳۳	۱/۲۸۴	۱۳/۵۵۸	۱/۳۲۲	IPSL-CM5A-LR	CMIP5
۱۱/۶۷۳	۰/۹۹۷	۱۳/۴۰۱	۱/۰۲۳	GFDL-ESM2M	
۱۱/۷۰۳	۱/۱۴۰	۱۳/۴۷۹	۱/۱۷۲	میانگین	
۱۲/۸۶۷	۱/۰۷۸	۱۴/۶۹۷	۱/۰۷۹	IPSL-CM6A-LR	CMIP6
۱۲/۳۰۰	۱/۲۰۰	۱۴/۲۳۰	۱/۲۳۳	GFDL-ESM4	
۱۲/۵۸۳	۱/۱۳۹	۱۴/۴۶۳	۱/۱۵۶	میانگین	

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های حاصل از خروجی‌های آزمون من - کندال بیانگر آن بود که میانگین، بیشینه و کمینه دما دارای روند افزایشی بالای ۳ درجه سانتی‌گراد بوده و همچنین میزان بارش نیز به‌جز مرحله‌ی ششم: زمان پس از برداشت با روند ۰/۸۹ در سایر مراحل چه در حالت مجموع بارش سالانه و چه در حالت مجموع بارش فصل رشد در حال کاهش می‌باشد یعنی روند نزولی به خود گرفته است که نشان از حاکمیت شرایط خشکی در دوره مطالعاتی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ می‌باشد. در بررسی مراحل فنولوژی بادام مشخص گردید که تشکیل جوانه در دوره مشاهداتی از ۲۸ اسفند آغاز و تا ۵ فروردین آماده می‌یابد اما این موضوع بر اساس سناریو IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M در گزارش CMIP5 به ترتیب به تاریخ ۱۷ تا ۲۵ اسفند و تاریخ ۱۹ اسفند تا ۲۹ اسفند و همچنین بر اساس سناریو IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M در گزارش CMIP6 به ترتیب به تاریخ ۱۹ اسفند تا ۲۹ اسفند و ۱۸ اسفند تا ۲۸ اسفند مربوط می‌شود که نشان از تأمین سریع‌تر نیاز گرمایی درخت بادام در منطقه بیرجند و افزایش دما منطقه مورد مطالعه می‌باشد که می‌تواند مراحل رشد گیاه و نیاز آبی آن را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج حاصل از مدل‌های IPSL-CM5A-LR و GFDL-ESM2M در CMIP5 و مدل‌های IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 در CMIP6 تماماً نشانگر آن است که پارامترهای دمای میانگین حداقل و حداکثر دارای روند افزایشی و پارامتر بارش سالانه نیز دارای روند کاهشی بوده است. همچنین به‌منظور بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی مؤثر بر بادام، شاخص‌های دما و بارش در طول دوره رشد بادام نیز مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی شاخص‌های دمای برای مدل IPSL-CM5A-LR مشخص شد که میانگین، کمینه و بیشینه دما در هر ۳ سناریو نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است که بر این اساس بیشترین افزایش در هر سه شاخص میانگین، بیشینه و کمینه دما به ترتیب با مقادیر عددی ۳۰/۶، ۳۷/۳ و ۲۳/۴ مربوط به سناریوی RCP 8.5 بوده است. شاخص درجه روز رشد نیز در RCP 8.5 بیشترین مقدار افزایش را به مقدار ۳۰۰۵/۹ نسبت به دوره مشاهداتی داشته است. درصد روزهای یخبندان به همراه طول دوره‌ی یخبندان افزایش یافته است که می‌تواند رشد محصول را با مخاطره روبه‌رو کند چرا که در دوره رشد قرار دارد. در بررسی پارامترهای مربوط به بارش مشخص گردید که میزان بارش به‌جز در مرحله گلدهی در سایر مراحل با کاهش مواجه خواهد بود که می‌تواند تهدیدی جدی در تأمین نیاز آب محصول به شمار

آید. همچنین در مدل GFDL-ESM2M مشخص گردید که بیشترین افزایش در هر سه شاخص میانگین، بیشینه و کمینه دما به ترتیب با مقادیر عددی ۳۱/۸، ۳۷/۸ و ۲۴ مربوط به سناریوی RCP 8.5 بوده است. شاخص درجه روز رشد نیز در RCP 8.5 بیشترین مقدار افزایش را به مقدار ۳۰۰۷ نسبت به دوره مشاهداتی داشته است. در ادامه شاخص‌های دما و بارش در طول دوره رشد بادام بر اساس سناریوهای گزارش CMIP6 برای شهرستان بیرجند نیز محاسبه گردید. در بررسی شاخص‌های دمایی مشخص شد که میانگین، کمینه و بیشینه دما در هر ۳ سناریو نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است که بر این اساس بیشترین افزایش در هر سه شاخص میانگین، بیشینه و کمینه دما با توجه به مدل IPSL-CM6A-LR به ترتیب با مقادیر عددی ۳۰/۱۱، ۳۷/۵۱ و ۲۲/۸۳ و مدل GFDL-ESM4 به ترتیب با مقادیر عددی ۲۹/۴۱، ۳۷/۳۸ و ۲۲/۷۵ مربوط به سناریوی SSP5.8.5 بوده است. در هر دو مدل IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 شاخص درجه روز رشد نیز در سناریوی SSP5.8.5 به ترتیب بیشترین مقدار افزایش را به مقدار ۳۰۰۶/۳۶ و ۳۰۰۸/۲۵ نسبت به دوره مشاهداتی داشته است. درصد روزهای یخبندان به همراه طول دوره‌ی یخبندان به‌مانند مدل‌های مورد بررسی در گزارش CMIP5 افزایش یافته است که می‌تواند رشد محصول را با مخاطره روبه‌رو کند چرا که در دوره رشد قرار دارد. همچنین در بررسی پارامترهای مربوط به بارش در هر دو مدل IPSL-CM6A-LR و GFDL-ESM4 مشخص گردید که میزان بارش به‌جز در تمام مراحل رشد با کاهش مواجه خواهد بود که می‌تواند تهدیدی جدی هم در تأمین نیاز آب و هم کیفیت محصول به شمار می‌آید و صدمات جبران‌ناپذیری را به محصول وارد خواهد آورد. همچنین در بررسی مقادیر خطا در روش‌های مورد بررسی مشخص گردید که مقادیر RMSE و MAD مربوط به دما در تمامی مدل‌های مورد بررسی زیر ۱/۳۲۲ بوده و کمترین میزان RMSE و MAD مربوط به مدل GFDL-ESM2M به ترتیب با مقادیر عددی ۱/۰۲۳ و ۰/۹۹۷ می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی است. همچنین قابل‌ذکر است که مدل‌های مورد بررسی در ارزیابی پارامتر بارش زیاد خوب عمل نکرده و مقادیر RMSE و MAD در تمامی مدل‌ها بالای ۱۰ می‌باشد. به‌طورکلی مدل‌های مربوط به CMIP6 (RMSE دما و بارش به ترتیب ۱/۱۵۶ و ۱۴/۴۶۳، MAD دما و بارش به ترتیب ۱/۱۳۹ و ۱۲/۵۸۳) نسبت به مدل‌های مربوط به CMIP5 (به‌جز MAD مربوط به بارش با مقدار ۱۱/۷۰۳ و RMSE دما و بارش به ترتیب ۱/۱۷۲ و ۱۳/۴۷۹، MAD دما و بارش به ترتیب ۱/۱۴۰ و ۱۱/۷۰۳) با خطای میانگین کمتری به پیش‌بینی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه پرداختند. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های جوادی و همکاران (۱۳۹۳) که به بررسی عملکرد بادام در سبزوار و باعقیده و همکاران (۱۳۹۶) که به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر محصول پسته پرداخته بودند همخوانی و تطابق بلایی دارد.

منابع

- بابائیان ایمان؛ کوهی منصوره. (۱۳۹۱). ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی، نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶ (۴): ۹۶۷-۹۵۳.
- باعقیده محمد؛ عسگری الهه؛ کاشکی عبدالرضا. (۱۳۹۶). ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر روند و ساختار پارامترهای آب‌وهوایی مؤثر بر تولید پسته مطالعه‌ی موردی: سبزوار، فصلنامه مناطق خشک، ۲۹ (۸): ۱۷-۳۲.
- پویان فر ناصر؛ مظفری غلامعلی؛ امیدوار کمال؛ مزیدی احمد. (۱۴۰۱). روند تغییرات نیاز سرمایی گیاه پسته و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل SDSM (مطالعه موردی: یزد)، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶ (۸۰): ۴۶-۶۰.
- جوادی زهرا؛ قالهری فلاح؛ انتظاری علیرضا. (۱۳۹۳). نقش پارامترهای آب‌وهوایی بر عملکرد محصول بادام مطالعه موردی: سبزوار، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۸ (۵): ۱۴۱-۱۲۶.
- زینلی مبارکه زهرا؛ دیهیم‌فرد رضا؛ کامبوزیا جعفر. (۱۳۹۸). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و راهکارهای سازگاری به آن بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم آبی (*Triticum aestivum*) مطالعه موردی استان خراسان رضوی، مجله پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۶ (۳): ۸۷-۷۱.
- سبحانی بهروز؛ احمدیان مینو؛ جهانبخش سعید. (۱۴۰۲). بررسی اثر نوسانات آب و هوایی بر میزان عملکرد سیب‌درختی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های ارومیه و سمیرم)، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۷ (۸۵): ۱۲۳-۱۳۱.
- شاهپوندی مسلم؛ خالدی شهریار؛ شکیب‌علیرضا؛ باقر بابک. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی ذرت دانه‌ای در استان لرستان با استفاده از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۹ (۱۳): ۲۱۴-۱۹۵.
- شیرزاد منیر؛ فیضی هاجر؛ رضایی بنفشه مجید. (۱۴۰۱). شبیه‌سازی تبخیر تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از روش هوش مصنوعی و مقایسه آن با روش‌های تجربی (مطالعه موردی: آذربایجان شرقی)، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶ (۸۰): ۱۷۱-۱۸۳.
- عبداللهی علی‌اصغر؛ قاسمی مسلم؛ مرادی مهدی. (۱۳۹۹). سنجش و ارزیابی توان‌های گردشگری شهرستان بیرجند، فصلنامه گردشگری شهری، ۳ (۷): ۹۵-۱۰۵.
- کمالی غلامعلی؛ سعید بازگیر. (۱۳۸۷). پیش‌بینی عملکرد گندم دیم با استفاده از شاخص‌های هواشناسی کشاورزی در برخی مناطق غرب کشور، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۲ (۱۵): ۱۲۱-۱۱۳.
- مهرآذر آیدا؛ مساح بوانی علیرضا؛ مشعل محمود؛ رحیمی‌خوب حدیثه. (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی دشت هشتگرد با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های AOGCM گزارش ارزیابی پنجم IPCC، علوم و مهندسی آبیاری، ۴۱ (۳): ۴۵-۵۹.
- یعقوب‌زاده مصطفی؛ رضانی یوسف. (۱۳۹۸). ارزیابی مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم در برآورد دما و بارش ایستگاه بیرجند، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۳۷ (۱۰): ۸۷-۱۰۰.
- Abdollahi, A. A., Ghasemi, M., & Moradi, M. (2020). Assessing and evaluating the tourism potential of Birjand city. *Urban tourism*, 7(3), 95-105. (In Persian).
- Akcura, M., Turan, V., Kokten, K., & Kaplan, M. (2019). Fatty acid and some micro element compositions of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba*) genotype seeds growing under Mediterranean climate. *Industrial crops and products*, 128, 140-146.
- Akram, N. A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2018). Peanut (*Arachis hypogaea* L.): A prospective legume crop to offer multiple health benefits under changing climate. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 17(5), 1325-1338.
- Alashan, S. (2020). Combination of modified Mann-Kendall method and Şen innovative trend analysis. *Engineering Reports*, 2(3), e12131.
- Asadi, M., & Karami, M. (2021). Modeling of relative humidity trends in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-11.
- Baaghdeh, M., Asgari, E., & Kashki, A. (2017). Evaluating the Consequences of Climate Change on the Process and Structure of Climate Parameters Affecting Pistachio Production (Case study: Sabzevar). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 8(29), 17-32. (In Persian).
- Babaeian, I., & Kouhi, M. (2012). Agroclimatic Indices Assessment over Some Selected Weather Stations of Khorasan Razavi Province Under Climate Change Scenarios. *Water and Soil*, 26(4), 953-967. (In Persian).

- Di Lena, B., Farinelli, D., Palliotti, A., Poni, S., DeJong, T. M., & Tombesi, S. (2018). Impact of climate change on the possible expansion of almond cultivation area pole-ward: a case study of Abruzzo, Italy. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 93(2), 209-215.
- Granco, G., He, H., Lentz, B., Voong, J., Reeve, A., & Vega, E. (2023). Mid-and End-of-the-Century Estimation of Agricultural Suitability of California's Specialty Crops. *Land*, 12(10), 1907.
- Gul, F., Ahmed, I., Ashfaq, M., Jan, D., Fahad, S., Li, X., ... & Shah, S. A. (2020). Use of crop growth model to simulate the impact of climate change on yield of various wheat cultivars under different agro-environmental conditions in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-14.
- Hajat, S., Proestos, Y., Araya-Lopez, J. L., Economou, T., & Lelieveld, J. (2023). Current and future trends in heat-related mortality in the MENA region: a health impact assessment with bias-adjusted statistically downscaled CMIP6 (SSP-based) data and Bayesian inference. *The Lancet Planetary Health*, 7(4), e282-e290.
- Hammad, H. M., Ashraf, M., Abbas, F., Bakhat, H. F., Qaisrani, S. A., Mubeen, M., ... & Awais, M. (2019). Environmental factors affecting the frequency of road traffic accidents: a case study of sub-urban area of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11674-11685.
- Javadi, Z., Fallah-Ghalhari, G., & Entezari, A. (2014). The role of climatic parameters on yield of almond Case Study: Sabzevar. *Journal of Climate Research*, 1393(17), 125-141. (In Persian).
- Jha, P. K., Zhang, N., Rijal, J. P., Parker, L. E., Ostoja, S., & Pathak, T. B. (2024). Climate change impacts on insect pests for high value specialty crops in California. *Science of The Total Environment*, 906, 167605.
- Kamali, Gh., Bazegir, S. (2008). Prediction of dry wheat yield using agricultural meteorological indicators in some western regions of the country, *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 2(15): 113-121. (In Persian).
- Karami, M., & Asadi, M. (2017). The phenological stages of apple tree in the North Eastern of Iran. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 6(03), 269.
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Torres, R. R., Giarolla, A., Alves, L. M., & Lyra, A. (2014). Climate change in central and South America: Recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture. *Working Paper*, No 73.
- Mehrazar, A., Massah Bavani, A., Mashal, M., & Rahimikhoob, H. (2018). Assessment of Climate Change Impacts on Agriculture of the Hashtgerd Plain with Emphasis of AR5 Models Uncertainty. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(3), 45-59. (In Persian).
- Meza, F., Darbyshire, R., Farrell, A., Lakso, A., Lawson, J., Meinke, H., ... & Stockle, C. (2023). Assessing temperature-based adaptation limits to climate change of temperate perennial fruit crops. *Global Change Biology*, 29(9), 2557-2571.
- Mitchell, J. M., Dzerdzeevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W. L., Lamb, H. H., Rao, K. N., & Wallen, C. C. (1966). Climate change, WMO technical note no. 79, *world meteorological Organization*, 79 pp. Geneva. Switzerland.
- Partal, T., & Kahya, E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(9), 2011-2026.
- Pouyanfar, N., Mozafari, G. A., Omidvar, K., & Mazidi, A. (2022). Trend of changes in pistachio plant chilling need and its prediction using SDSM model (Case study: Yazd). *Journal of Geography and Planning*, 26(80), 60-45. (In Persian).
- Sahabi-Abed, S., Ayugi, B. O., & Selmane, A. N. E. I. (2023). Spatiotemporal projections of extreme precipitation over Algeria based on CMIP6 global climate models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-18.
- Saidi Shahyoundi, M., Khalidi, SH., Shakiba, A. & Mirbagheri, B. (2013). Agricultural climate zoning of grain corn in Lorestan province using geographic information system techniques. *The Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, (13)29: 195-214. (In Persian).
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- Serrano, A., Mateos, V. L., & Garcia, J. A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90.
- Shahbaz, A. K., Ramzani, P. M. A., Saeed, R., Turan, V., Iqbal, M., Lewińska, K. & Rahman, M. U. (2019). Effects of biochar and zeolite soil amendments with foliar proline spray on nickel immobilization, nutritional quality, and nickel concentrations in wheat. *Ecotoxicology and environmental safety*, 173, 182-191.
- Sharma, K. K., & Bhatnagar-Mathur, P. (2006). Peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Agrobacterium Protocols*, 347-358.

- Shirzad, M., Feyzi, H., & Rezaei Banafsheh, M. (2022). Simulations reference evapotranspiration using artificial intelligence and comparison with experimental methods (Case Study: East Azerbaijan). *Journal of Geography and Planning*, 26(80), 183-171. (In Persian).
- Sobhani, B., Ahmadyan, M., & Jahanbakhsh, S. (2023). Investigating the effect of climate fluctuations on apple yield (case study: Semiram and Urmia station). *Journal of Geography and Planning*, 27(85), 123-131. (In Persian).
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109, 5-31.
- Yaghoobzadeh, M., & rahmani, Y. (2020). Evaluation models and scenarios of the climate change Fifth Report in estimation temperature and precipitation of Birjand Station. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 87-100. (In Persian).
- Zeinali Mobarakeh, Z., & Kambouzia, J. (2019). Evaluation of climate change effects and adaptation strategies on grain yield and water use efficiency of irrigated wheat (*Triticum aestivum*): A cae study in Khorasan Razavi province. *Journal of Plant Production Research*, 26(3), 71-87. (In Persian).