

**EXTENDED ABSTRACT**

## Impact of climate change on water requirement, water productivity, and rice yield using risk analysis

D. Darikandeh<sup>1</sup>, A. Shahnazari<sup>2\*</sup>, M. Khoshravesh<sup>3</sup> and G. Hoogenboom<sup>4</sup>

*1-PhD student in irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.*

*2\* - Corresponding Author, Faculty of Agriculture, Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (A.shahnazari@Sanru.ac.ir).*

*3-Faculty of Agriculture, Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.*

*4-Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida 32611-0570, US.*

### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 5 August 2022

Revised: 12 October 2022

Accepted: 16 October 2022

*Keywords:*

deficit irrigation, RCP scenarios, downscaling, crop model, DSSAT.

### TO CITE THIS ARTICLE:

Darikandeh, D., Shahnazari, A., Khoshravesh, M., Hoogenboom, G. (2023). 'Impact of climate change on water requirement, water productivity, and rice yield using risk analysis', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(3), pp. 35-55. doi: 10.22055/jise.2022.41556.2036.

### Introduction

Climate change means any specific change in the long-term average weather state that occurs for a given location or for the entire globe (Goudarzi and Koupaei, 2020). Climate change is one of the most critical factors threatening food security, and it is expected to make food and nutrition security more challenging in the future (Carpena et al., 2019). It will affect the agricultural sector by changing the irrigation water requirements, crop yield, and water productivity (Boonwichai et al., 2018; Liu et al., 2019). Rice is the third most important crop in the world, following wheat and maize (Kapela et al., 2020). The occurrence of water shortages and droughts have raised concerns about the sustainability of rice production, including the main rice cultivation production region of Mazandaran in Iran (Yosefian 2018). Most studies have reported that rice production will decrease in the future due to a projected increase in temperature and a projected decrease in precipitation (Basak et al. 2010; Boonwichai et al. 2018; Nasir et al. 2020; Nicolas et al. 2020). Although many farmers, particularly in Iran, feel that permanent flooding conditions for rice farming are inevitable, climate change forces the use of water-saving technologies to ensure the long-term viability of irrigated rice production in paddy fields (Yosefian 2018; Mirfenderski 2022). Accordingly, it is necessary to find new methods for rice cultivation that reduce water use and make optimal use of the available water for irrigation while maintaining yield under climate change. The goal of this study was to examine the water requirement, water productivity, and risk of rice yield for different irrigation levels under various climate change scenarios using a crop simulation model.

### Methodology

#### Experimental site, rice crop, and irrigation treatments

A two-year experiment was conducted from May to August 2015 and 2016 at the Iranian Rice Research Institute (36° 28' N, 52° 27' E; 29.8 m above sea level) in Amol, a city in the Mazandaran

province in northern Iran. Experimental data were collected for the rice cultivar *Hashemi*, which is one of the local cultivars and has the largest area under cultivation in the region during the past few years (Yosefian 2018). Seven irrigation treatments were arranged in the randomized complete block design and were replicated three times. The irrigation treatments included permanent flooding as a control treatment (FI), Partial Root Drying irrigation at a matric potential of -10 kPa (PRD10), Regulated Deficit Irrigation at a matric potential of -10 kPa (RDI10), Partial Root Drying irrigation at a matric potential of -30 kPa (PRD30), Regulated Deficit Irrigation at a matric potential of -30 kPa (RDI30), Partial Root Drying irrigation at a matric potential of -60 kPa (PRD60) and Regulated Deficit Irrigation at a matric potential of -60 kPa (RDI60) (Yosefian 2018).

#### **Meteorological data**

Long-term historical daily weather data from 1984 to 2005, including minimum and maximum temperature, total precipitation, and sunshine hours for the Gharakheil agrometeorological station (36° 27' N, 52° 46' E) located at a distance of 27 km from the experimental field were obtained from the Iran Meteorological Organization.

#### **Generation of climate change scenarios**

The historical dataset from 1984 to 2005 of the Gharakheil agrometeorological station was used as the baseline data for evaluating the Second-Generation Canadian Center for Climate Modelling and Analysis Earth System Model (CanESM2) General Circulation Model (GCM). The early-21<sup>st</sup> century (2026-2047) climate variables under three emission scenarios (RCP 2.6, RCP4.5, and RCP8.5) (Taylor et al., 2009; Moss et al., 2010) were created using CanESM2 based on the baseline daily weather variables. The Statistical Down Scaling Model (SDSM version 4.2.9) was used to downscale the weather variables for the local study area. According to Wilby (1999), SDSM captures the inter-annual variability better than other statistical downscaling approaches, such as weather generators. Ahmadi and Ghermezcheshmeh (2020) reported good performance of the SDSM for climate change studies conducted for some stations in the Mazandaran province in northern Iran.

#### **Calibration and evaluation of CSM-CERES-Rice**

The Cropping System Model (CSM)-CERES-Rice of the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT; www.DSSAT.net) predicts rice growth and development, and final yield and yield components on a uniform land area (Jones et al. 2003; Hoogenboom et al. 2019a, b). The model requires four sets of input data, including (1) daily weather data, i.e., maximum and minimum temperature, total precipitation, total solar radiation; (2) soil surface and profile data, i.e., soil texture, organic matter, total nitrogen, and various others; (3) crop management data, including planting date and plant spacing, irrigation application amounts and dates, fertilizer application amounts, dates, and types, (4) and cultivar coefficients (Hoogenboom et al., 2012). Model calibration was performed by adjusting the cultivar coefficients to reduce the differences between simulated and observed values for the main growth and development stages using the Genotype Coefficient Calculator, GENCALC software embedded in the DSSAT v.4.7.5 software (Hunt et al. 1993). The experimental data from 2015 were used for model calibration, while the data from 2016 were used for independent model evaluation.

#### **Crop Water Requirement (CWR) and Crop Water Productivity (CWP)**

This study assumed that crop management, land use, and soil characteristics would remain the same for the near future. Rice yield and crop water requirement from CSM-CERES-Rice were used to estimate crop water productivity under different irrigation levels which is calculated by:

$$CWP = \frac{Y}{ET_c} \quad (1)$$

Where  $Y$  is the rice yield ( $\text{kg. ha}^{-1}$ ),  $ET_C$  is the total amount of seasonal evapotranspiration (mm) (Boonwichai et al., 2018).

**Risk assessment**

To estimate the risk of rice yield, the simulated historical yield for each year from 1984 to 2005 under different irrigation treatments and also the simulated future yield under different RCPs for each year from 2026-2047 under different irrigation treatments were compared with a critical threshold, calculated as the average yield for 22 years for the baseline period from 1984 to 2005. The risk of rice yield was then defined as the percent of yield below the threshold, representing future yield relative to the historical average yield (Liu et al., 2019). The risk of yield is estimated as follows:

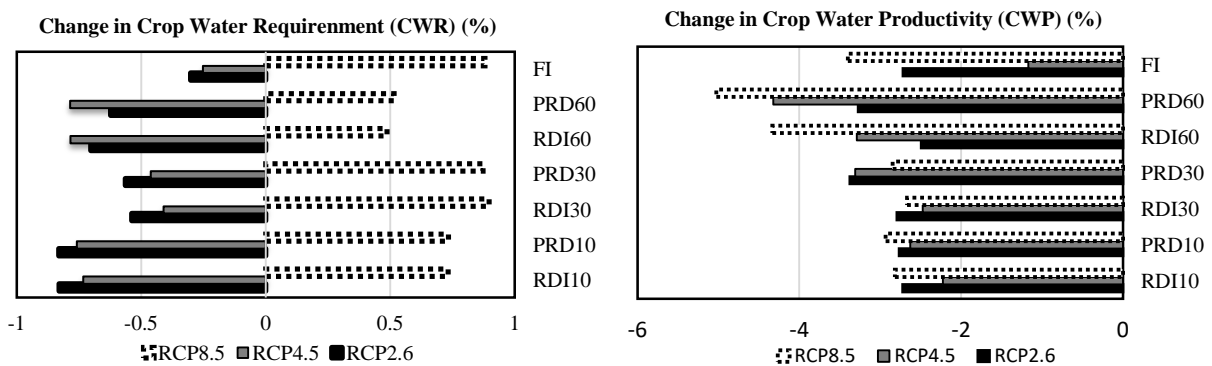
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \times 100\%, \quad M_i = \begin{cases} 1, & Y_i \leq \bar{Y} \\ 0 & Y_i > \bar{Y} \end{cases} \quad (2)$$

R: risk of yield,  $M_i$ : determination factors of yield,  $Y$ : yield ( $\text{kg. ha}^{-1}$ ),  $\bar{Y}$ : 22-year average yield for the baseline period (1984-2005) ( $\text{kg. ha}^{-1}$ )

**Results and Discussion**

**Crop water requirement and crop water productivity under climate change**

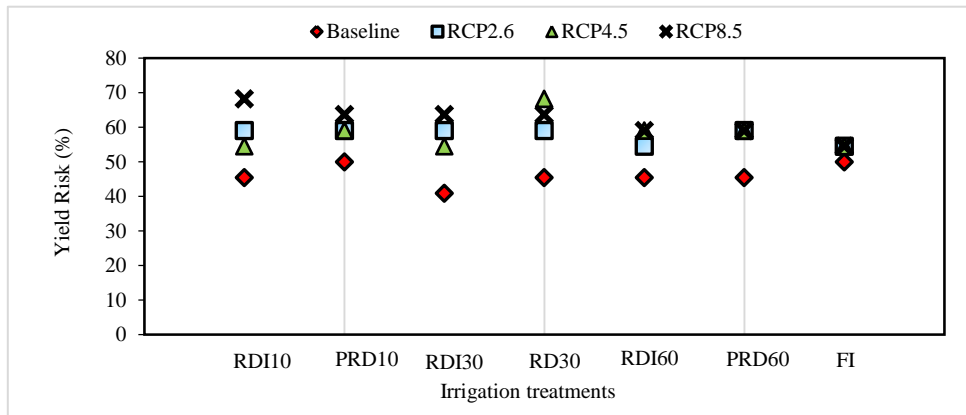
The simulated crop water requirement is projected to decrease for all irrigation treatments except under the RCP8.5 climate scenario Figure (1), which can be due to the nature of the mentioned climate scenario, which is a pessimistic scenario. The results suggest that the average crop water productivity will decrease between -1.17% and -4.4% for all RCP climate scenarios compared to the baseline period (Figure 1). This can be due to the decrease in the length of the growth period simulated using CSM-CERES-Rice, which will also influence the crop water productivity. However, the highest amount of crop water productivity was related to the full irrigation treatment (FI) due to the higher soil moisture than the deficit irrigation treatments (RDI and PRD), obtained between 1.02 and 1.05  $\text{kg.m}^{-3}$ . Boonwichai et al. (2018) showed that the future crop water productivity for rice is expected to decrease due to an increase in temperature and crop water use.



**Fig. 1- Change in Crop Water Requirement (CWR) and Crop Water Productivity (CWP) for Hashemi rice cultivar for different irrigation treatments [(Regulated Deficit Irrigation at -10, -30, -60 kPa (RDI10, RDI30, RDI60), (Partial Root Drying at -10, -30, -60 kPa (PRD10, PRD30, PRD60))] and for different Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) compared to the baseline period (1984-2005)**

### Crop risk yield under climate change

The simulation results for risk assessment of rice yield indicate that the rice yield risk will increase for all RCP climate scenarios compared to the baseline period. For the full irrigation treatment (FI), the risk will increase by only 4.5% compared to the baseline period. In contrast, for all deficit irrigation treatments, the yield risk will increase between 9 and 22.7 % due to the increase in drought stress (Figure 2).



**Fig. 2- Rice yield risk for different irrigation treatments [Regulated Deficit Irrigation at -10, -30, -60 kPa (RDI10, RDI30, RDI60), Partial Root Drying at -10, -30, -60 kPa (PRD10, PRD30, PRD60)] and for different Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) compared to the baseline period (Baseline)**

### Conclusions

The simulation results show that the risk of rice yield for all climate scenarios is higher for the deficit irrigation compared to the full irrigation scenarios. An increase in the rice yield risk results in a decrease in the water productivity of the crop in the near future. The results of this study indicate that if the management methods remain the same in this region, in the near future, the yield for the *Hashemi* cultivar will decrease. It will, therefore, be necessary to develop new irrigation management strategies and cultivars that are more resistant to drought stress to adapt to climate change.

### Acknowledgment

The authors would like to thank Dr. Mostafa Yosefian for providing the field data obtained from the implementation of his research project at Amol Rice Research Institute, the National Sciences Foundation for providing financial support for this project, and the overall support provided by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

### References

- 1- Ahmadi M, & Ghermezcheshmeh B.,2020. Evaluation of error and uncertainty in downscaling SDSM and ANN. *Watershed Engineering and Management (IJWMSE)*, 12(1), 340-350. doi: 10.22092/ijwmse.2019.108294.1226
- 2- Basak, J.K., Ali, M.A., Islam, M.N. and Rashid, M.A., 2010. Assessment of the effect of climate change on boro rice production in Bangladesh using DSSAT model. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 38(2), pp.95-108.

- 3- Boonwichai S, Shrestha S, Babel MS, Weesakul S and Datta A.,2018. Climate change impacts on irrigation water requirements, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *J. Clean. Prod.* 198:1157-1164. doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.146.
- 4- Carpena, F., 2019. How do droughts impact household food consumption and nutritional intake? A study of rural India. *World Dev.* 122, 349e369. Doi:10.1016/j.worlddev.2019.06.005.
- 5- Goudarzi, M., and Koupaei, J., 2020. Effects of climate change on water requirement and irrigation water requirement in irrigated areas, case study: Najaf Abad Plain. *Promotional Journal of Water Conservation and Productivity.* 1(1), 23-30. (In Persian).
- 6- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Traore, P.C. and Boote, K.J., 2012. Experiments and data for model evaluation and application. *Improving soil fertility recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*, pp.9-18.
- 7- Hoogenboom G, CH Porter, KJ Boote, V Shelia, PW Wilkens, U Singh, JW White, S Asseng, JI Lizaso, LP Moreno, W Pavan, R Ogoshi, LA Hunt, GY Tsuji, JW Jones., 2019 a. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: p.173-216 [K.J. Boote, editor] *Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture*. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom doi:10.19103/AS.2019.0061.10.
- 8- Hoogenboom G, CH Porter, V Shelia, KJ Boote, U Singh, JW White, LA Hunt, R Ogoshi, JI Lizaso, J Koo, S Asseng, A Singels, LP Moreno, JW Jones.,2019 b. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5* (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
- 9- Hunt, L.A., Pararajasingham, S., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Imamura, D.T. and Ogoshi, R.M., 1993. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy Journal*, 85(5), pp.1090-1094. Doi: 10.2134/agronj1993.00021962008500050025x.
- 10- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), pp.235-265. Doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
- 11- Kapela K., Sikorska A., Niewęglowski M., Krasnodębska E., Zarzecka K., and Gugala M.,2020. The impact of nitrogen fertilization and the use of bio stimulants on the yield of two maize varieties (*Zea mays* L.) cultivated for grain. *Agronomy*, 10, (9), 1408, doi:10.3390/agronomy10091408.
- 12- Liu J, Yao W, Peng ZH, Fu Y, Fan X and Wang H., 2019. Risk assessment of possible impacts of climate change and irrigation on wheat yield and quality. *agricultural sciences & agronomy*. doi: 10.20944/preprints201912.0352.v1
- 13- Mirfenderski R, Darzi-Naftchali A, Karandish, F.,2022. Climate-resilient agricultural water management to alleviate negative impacts of global warming in rice production systems. *Theor Appl Climatol* 147, 409–422. doi:10.1007/s00704-021-03813-8.
- 14- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ.,2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747–756. doi: 10.1038/nature08823
- 15- Nasir IR, Rasul F, Ahmad A, Asghar HN, Hoogenboom G.,2020. Climate change impacts and adaptations for fine, coarse, and hybrid rice using CERES-Rice. *Environ. Sci. Pollut. Res* 27:9454–9464. doi:10.1007/s11356-019-07080-z.
- 16- Nicolas F, Migliaccio K W, Hoogenboom, G, Rathinasabapathi, B R, Eisenstadt, W R., 2020. Assessing the potential impact of climate change on rice yield in the Artibonite valley of Haiti using the CSM-CERES-

- RICE model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)* 63(5): 1385-1400. DOI:10.13031/trans.13868.
- 17- Taylor, K.E., 2012. A summary of the CMIP5 experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 4, p.1.
- 18- Wilby RL.,1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Prog Phys Geogr.*23(3):329–357. doi:10.1177/030913339902300302.
- 19- Yosefian, M., 2018. Study the effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water productivity, methane gas emissions and some physiological characteristics of Hashemi cultivar. Ph.D. thesis of irrigation and drainage engineering. *Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University*, Iran.100p. (In Persian).



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## تأثیرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی برنج، بهره‌وری آب، و عملکرد برنج با استفاده از آنالیز ریسک

درسا دریکنده<sup>۱</sup>، علی شاهنظری<sup>۲</sup>، مجتبی خوش‌روش<sup>۳</sup> و گریت هوگنوم<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.  
 ۲- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران (A.shahnazari@Sanru.ac.ir)  
 ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.  
 ۴- استاد گروه مهندسی کشاورزی و زیست‌شناسی، دانشگاه فلوریدا، گینزویل، آمریکا.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۰

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

### چکیده

مطالعه حاضر، با هدف بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی، بهره‌وری آب و ریسک عملکرد برنج رقم هاشمی، تحت سه سناریوی انتشار خوش‌بینانه، بینابینی و بدبینانه گازهای گلخانه‌ای شامل: RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 صورت گرفت. تیمارهای اجرا شده در مزرعه شامل: دو روش کم‌آبیاری تنظیم‌شده (آبیاری تمام جویچه‌ها) و خشکی بخشی ریشه (آبیاری یک در میان جویچه‌ها) هر یک با سه سطح سطح تنش خشکی ۱۰، ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال (PRD10، RDI10، PRD30، RDI30، PRD60، RDI60) و تیمار آبیاری کرتی با مدیریت غرقاب دائم (FI) بود. از مدل گیاهی CERES-Rice برای شبیه‌سازی رشد و توسعه برنج و از مدل گردش عمومی CanESM2 برای پیش‌نگری تغییر اقلیم آینده نزدیک (۲۰۴۷-۲۰۲۶) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) استفاده شد. تغییرات نیاز آبی حاکی از آن بود که میانگین نیاز آبی برنج برای همه تیمارهای آبیاری در همه سناریوهای RCP به جز سناریوی بدبینانه RCP8.5 در آینده نزدیک کاهش خواهد یافت. به دلیل کاهش طول دوره رشد، میزان بهره‌وری آب نسبت به دوره پایه در سناریوهای RCP کاهش نشان داد. با این حال، بیشترین میزان بهره‌وری آب گیاه به تیمار آبیاری FI اختصاص داشت که به دلیل رطوبت زیاد خاک در مقایسه با تیمارهای کم‌آبیاری بود. ارزیابی ریسک عملکرد نشان داد که درصد ریسک عملکرد برنج نسبت به میانگین دوره پایه افزایش خواهد یافت. به گونه‌ای که ریسک کاهش ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد برنج در تیمار آبیاری سنتی FI، تحت سناریوهای پایه (Baseline)، RCP4.5، RCP8.5 و RCP2.6 به ترتیب ۱۳ درصد، ۲۰ درصد، ۲۱ درصد و ۳۱ درصد برآورد گردید. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که در صورت ثابت ماندن روش‌های مدیریتی در مزرعه، احتمالاً در آینده نزدیک، عملکرد برنج هاشمی کاهش می‌یابد و باید به دنبال بهینه‌سازی روش‌های مدیریتی و کشت ارقام مقاوم‌تر به تنش‌های آبی بود.

کلید واژه‌ها: کم‌آبیاری، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، ریزمقیاس‌سازی، مدل گیاهی، DSSAT.

### مقدمه

برنج با سطح زیر کشت حدود ۵۵۰ هزار هکتار از نظر اهمیت دومین غله مهم خوراکی بعد از گندم در ایران می‌باشد (Rezaei et al., 2015). میانگین عملکرد شلتوک برنج در ایران ۴۳۳۶ کیلوگرم بر هکتار می‌باشد (Gholizadeh, et al., 2014). پیش‌بینی می‌شود نیاز کشور به برنج در آینده نزدیک معادل چهار میلیون تن خواهد بود (Wailes and Chavez, 2012). خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید برنج در جهان است که در سال‌های اخیر با تغییر شرایط اقلیمی، این معضل تشدید شده است (Prasad et al., 2012). برنج در گروه گیاهان سه‌کرنه (C3) جای دارد که در آن افزایش غلظت CO<sub>2</sub> باعث افزایش فرایند فتوسنتز و کاهش تعرق می‌شود که هر دو عامل باعث سرعت بخشیدن به رشد می‌شود، اما افزایش غلظت CO<sub>2</sub> که بیشترین سهم را در گرم شدن کره زمین دارد اگر از حدی بیشتر گردد، دیگر اثری سودمند بر رشد گیاه نخواهد داشت (Motha and Baier, 2005). آثار تغییر اقلیم بر نیاز آبی، بهره‌وری آب و عملکرد برنج؛ بسته به رقم مورد نظر، ساز و کار فتوسنتزی آن و

تغییر اقلیم یعنی هر تغییر مشخص در وضعیت میانگین آب و هوایی طولانی‌مدت که در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی رخ دهد. بر پایه گزارش‌های هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم، متوسط دمای سطح زمین از سال ۱۸۶۱ حدود ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته‌است و پیش‌بینی‌ها افزایش دو تا چهار درجه‌ای را برای ۱۰۰ سال آینده نشان می‌دهند. این افزایش دما تأثیر زیادی بر چرخه آب‌شناسی دارد که با تغییر شدت بارش همراه خواهد شد (Goudarzi and Koupaei, 2020). در عصر حاضر، تغییر اقلیم به‌عنوان مهم‌ترین تهدید برای توسعه پایدار، کشاورزی و امنیت غذایی مطرح است (Mohammadi et al., 2015). پدیده تغییر اقلیم با تغییر در نیاز آبی آبیاری گیاهان زراعی، عملکرد محصولات و بهره‌وری آب می‌تواند بخش کشاورزی را در دوره‌های آینده تحت تأثیر قرار دهد (Liu et al., 2019; Boonwichai et al., 2018). گیاه

در سناریوهای تغییر اقلیم به کار گرفته شده برای پیش‌بینی تأثیرات تغییر اقلیم است.

برنج نسبت به گیاهان زراعی آبی، بیشترین سطح زیرکشت را داشته و راندمان آبیاری آن نسبت به دیگر غلات کمتر است. به طوری که آب مصرفی برای تولید یک کیلوگرم برنج بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ لیتر متغیر بوده که کم و بیش سه برابر بیشتر از گندم است (Mahajan et al., 2008). مقدار آب مورد نیاز در تمام مراحل رشد یکسان نبوده، بلکه در زمان خوشه‌دهی و گل‌دهی، آب نقش اساسی در رشد گیاه دارد (Asadi, 2005). با توجه به تنوع زیاد شرایط محیطی و ارقام مختلف برنج، یک روش استاندارد برای آبیاری وجود ندارد (Yosefian, 2018).

اگرچه بسیاری از کشاورزان بر این عقیده‌اند که آبیاری برنج به شیوه غرقاب دائم، امری اجتناب‌ناپذیر است؛ اما تأثیرات بالقوه تغییر اقلیم بر نیاز آبی، بهره‌وری آب و عملکرد برنج؛ استفاده از شیوه‌های کم آبیاری را برای تولید پایدار برنج ضروری کرده‌است. در این راستا، چالش اصلی در مطالعه حاضر این است که استان شمالی مازندران که به دلیل اقلیم گرم و مرطوبش، مناسب و مستعد کشت برنج است؛ در آینده نزدیک تا چه اندازه تحت تأثیرات سو پدیده تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت. از این رو مطالعه‌ای مبتنی بر شبیه‌سازی انجام شد تا به بررسی این موضوع بپردازد که نیاز آبی، بهره‌وری آب و ریسک عملکرد برنج در سطوح مختلف آبیاری نسبت به تغییرات آب و هوایی در آینده نزدیک چگونه خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

### توصیف موقعیت مطالعاتی و طرح آزمایشی

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات برنج - معاونت مازندران (آمل) با طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۷ دقیقه و ۵۳ ثانیه شرقی و با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه و ۳۴ ثانیه شمالی و با ارتفاع ۲۹/۸ متر از سطح دریا طی دو سال زراعی پیاپی (بهار و تابستان ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵) اجرا شد. مجموع بارش طی فصل رشد گیاه برنج در سال‌های میلادی ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۹۹/۶ و ۱۱۳/۲ میلی‌متر بود. در حالی که میانگین دمای بیشینه طی فصل رشد گیاه برنج در سال‌های میلادی ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۳۱/۴۸ و ۳۱/۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای کمینه در سال‌های نام برده به ترتیب ۲۲/۰۴ و ۲۱/۸ درجه سانتی‌گراد بود.

طرح آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد و رقم برنج کشت شده هاشمی بود که دارای بیشترین سطح زیر کشت طی چند سال اخیر بوده است (Yosefian, 2018). از داده‌ها و نتایج این طرح برای مطالعات شبیه‌سازی استفاده شد. تیمارهای آبیاری در این آزمایش مزرعه‌ای که توسط Yosefian (2018) اجرا شد، شامل:

منطقه جغرافیایی محل، متغیر بوده و اظهار نظر کلی در مورد پاسخ این گیاه به تغییر اقلیم مستلزم مطالعات میدانی است.

Acharjee et al. (2017) اثرات تغییر اقلیم را در دو دوره ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر روی برنج رقم بورو در شمال غربی بنگلادش با استفاده از مدل CROPWAT برآورد نمودند. بررسی آن‌ها نشان داد تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه با توجه به افزایش دما افزایش می‌یابد. نیاز آبی برنج رقم بورو تا سال ۲۰۵۰ به مقدار ۵/۶ درصد و ۹/۱ درصد به ترتیب تحت سناریوی بینابینی و بدبینانه RCP4.5 و RCP8.5 کاهش می‌یابد. هم‌چنین تا سال ۲۰۸۰ نیاز آبی برنج رقم بورو ۳/۸ درصد و ۶/۱۷ درصد به ترتیب تحت سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 کاهش می‌یابد.

Islam et al. (2018) متغیرهای هواشناسی را در بنگلادش با استفاده از مدل‌های عمومی جوی HADCM3، FGOAL و IPCM4 تحت سناریوی بینابینی A1B تولید کرده تا نیاز آبیاری برنج رقم پادی را بررسی کنند. نتایج آن‌ها نشان داد میانگین نرخ تغییرات نیاز آبیاری در مقایسه با دوره پایه ۳/۰۱- تا ۱۱/۱۶ درصد می‌باشد که خروجی‌های به دست آمده می‌تواند به عنوان داده‌های پایه در توسعه مدیریت منابع آب کشاورزی استفاده شود.

Arshad et al. (2019) با استفاده از ابزار ریزمقیاس‌نمایی SDSM در منطقه پنجاب و با به‌کارگیری مدل عمومی جوی HADCM3 تحت سناریوهای اقلیمی بدبینانه A2 و خوشبینانه B2 به شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۹۹ پرداختند. نتایج نشان داد دمای بیشینه، کمینه و سرعت باد افزایش می‌یابد. خروجی ریزمقیاس‌نمایی‌ها، به عنوان داده‌های ورودی مدل CROPWAT استفاده شد تا میزان نیاز آبیاری دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) و دوره‌های آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰-۲۰۸۰) به دست آید. نتایج آن‌ها نشان داد که نیاز آبیاری برنج در سناریوهای یاد شده روندی صعودی خواهد داشت.

Devkota et al. (2013) اثر تغییر اقلیم را بر فنولوژی و عملکرد گیاه برنج در نواحی مرکزی آسیا با استفاده از مدل زراعی ORIZA2000 و آزمایش مزرعه‌ای در فصل رشد برنج در ازبکستان شبیه‌سازی کردند. دما و غلظت دی‌اکسیدکربن بر اساس سناریوهای خوشبینانه B1 و بدبینانه A1F1 برای دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ مشخص گردید. نتایج نشان داد که تاریخ جوانه‌زنی در ارقام بررسی شده به مدت ۱۰ روز تأخیر داشته است که موجب کاهش عملکرد برنج می‌شود.

Schoups et al. (2008) تحقیقاتی را بر کشاورزی آبی در بخش غربی کالیفرنیا و با استفاده از خروجی‌های دو مدل گردش عمومی جو PCM و HadCM3 بر اساس سناریوهای اقلیمی بدبینانه A1 و A2، هم‌چنین سناریوی خوشبینانه B1 انجام دادند. بر اساس نتایج این تحقیق تا پایان قرن ۲۱ شاهد کاهش ۱۳ درصدی تا افزایش سه درصدی نیاز آبی خواهیم بود که این دامنه وسیع تغییرات به دلیل فرضیات مختلف استفاده شده



وضعیت اشباع، عدد ۱۰ تا ۳۰ در تانسومتر (مکش ۱۰- تا ۳۰- کیلوپاسکال) معادل با رطوبت در حد ظرفیت زراعی خاک (FC) است. عدد ۶۰ تا ۷۰ در تانسومتر (مکش ۶۰- تا ۷۰- کیلوپاسکال) معادل با تنش آبی شدید در گیاه برنج لحاظ گردید. عملیات انتقال نشا به زمین اصلی در ۲۴ ام ماه می در سال ۲۰۱۵ و ۲۷ ام ماه می در سال ۲۰۱۶ انجام شد. بر اساس آنالیز خاک انجام شده در آزمایشگاه آب و خاک موسسه تحقیقات برنج، کود اوره به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم و کودهای فسفر و پتاسیم به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در مزرعه مصرف شد. ۷۰ درصد اوره به صورت پایه و ۳۰ درصد آن در زمان تشکیل خوشه مصرف گردید. کود فسفر کامل به صورت پایه و کود پتاس نیز، ۵۰ درصد به صورت پایه و ۵۰ درصد آن در زمان تشکیل خوشه به شکل سرک مصرف گردید. کود پایه پیش از ایجاد فارو در خاک، مخلوط شده و کود سرک پیش از انجام آبیاری داخل جوی‌ها پاشیده شد (Yosefian, 2018).

#### داده‌های هواشناسی

نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به مزرعه آزمایشی که از داده‌های طولانی‌مدت آب و هوایی برخوردار بود ایستگاه هواشناسی کشاورزی قراخیل در ۲۷ کیلومتری مزرعه آزمایشی با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی بود. داده‌های مشاهداتی طولانی‌مدت دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) از ایستگاه مورد نظر شامل: داده‌های روزانه بارش، بیشینه دما، کمینه دما و تعداد ساعات آفتابی بود که برای مطالعه مورد نظر استفاده شد. از داده‌های هواشناسی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به ترتیب برای واسنجی و ارزیابی مدل شبیه‌ساز گیاهی DSSAT- CERES-Rice استفاده شد.

#### مدل گردش عمومی (GCM)

در این تحقیق از خروجی مدل CanESM2 که چهارمین نسل از مدل‌های آب‌وهوایی است و توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوایی کانادا و زیر نظر سازمان محیط‌زیست این کشور، توسعه یافته؛ استفاده شده است. در این مدل کل سطح زمین به صورت ۱۲۸×۶۴ سلول، شبکه‌بندی شده است که ویژگی‌های آن در جدول (۱) ارائه شده است.

هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) در تدوین گزارش پنجم ارزیابی (AR5) خود از سناریوهای انتشار RCP به‌عنوان نماینده های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوهای انتشار مورد استفاده در مطالعه حاضر که شامل: RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 می‌باشند و بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام گذاری شده‌اند؛ به شرح زیر می‌باشند.

سناریوی انتشار RCP2.6: سناریوی خوشبینانه RCP2.6 توسط تیم مدل‌سازی IMAGE طراحی شده که در آن واداشت

FI: غرقاب دائم در زمین گل‌خراب به‌عنوان تیمار شاهد؛ PRD10: آبیاری یک در میان جویچه‌ها هنگام رسیدن عدد تانسومتر به ۱۰ کیلوپاسکال؛ RDI10: آبیاری تمام جویچه‌ها هنگام رسیدن عدد تانسومتر به ۱۰ کیلوپاسکال؛ RDI30: آبیاری تمام جویچه‌ها هنگام رسیدن عدد تانسومتر به ۳۰؛ PRD30: آبیاری یک در میان جویچه‌ها هنگام رسیدن عدد تانسومتر به ۳۰ کیلوپاسکال؛ RDI60: آبیاری تمام جویچه‌ها هنگام رسیدن عدد تانسومتر به ۶۰ کیلوپاسکال؛ PRD60: آبیاری یک در میان جویچه‌ها هنگام رسیدن عدد تانسومتر به ۶۰ کیلوپاسکال.

تیمارهای کم‌آبیاری RDI و PRD در کشت به روش جوی پشته و تیمار آبیاری سنتی FI در کشت به روش کرتی در مزرعه اجرا شدند. کشت جوی پشته‌ای برای هر تیمار شامل هفت فارو با انتهای مسدود بود. ارتفاع پشته‌ها از کف جویچه ۱۵ سانتی‌متر و عرض جویچه‌ها از یکدیگر ۳۰ سانتی‌متر و عرض قسمت بالای پشته، پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Yosefian, 2018).

تیمارهای آبیاری RDI10 و PRD10 با حجم کل آب مصرفی ۶۵۸۸/۳ و ۵۶۳۵ مترمکعب بر هکتار، هر دو روز در میان در ماه جون و هر یک روز در میان در ماه جولای اجرا شد. تیمارهای آبیاری RDI30 و PRD30 با حجم کل آب مصرفی ۵۸۸۱/۷ و ۵۰۲۵ مترمکعب بر هکتار هر چهار روز در میان در ماه جون و هر دو روز در میان در ماه جولای اجرا شد. تیمارهای آبیاری RDI60 و PRD60 با حجم کل آب مصرفی ۵۲۸۱ و ۴۷۳۱/۷ مترمکعب بر هکتار یک بار در هفته در ماه جون و هر چهار روز در میان در ماه جولای اجرا شد. تیمار آبیاری سنتی FI با حجم کل آب مصرفی ۸۲۷۰ مترمکعب بر هکتار یک بار در هفته در ماه جون و دو بار در هفته در ماه جولای با ارتفاع آب معادل پنج سانتی‌متر در هر بار آبیاری اجرا شد (Yosefian, 2018).

با توجه به ابعاد جوی پشته و پس از اندازه‌گیری اولیه، حجم آب قابل ذخیره در هر یک از ابعاد جویچه‌ها، حدود ۱۰۰ لیتر محاسبه شد که این عدد به‌عنوان مبنای حجم آب مورد استفاده برای هر یک از جوی‌ها در هر آبیاری در نظر گرفته شد. هم‌چنین در زمین پادل شده (برای آبیاری سنتی) حجم آب مورد نیاز برای آماده‌سازی زمین، در ابتدای فصل توسط کنتور اندازه‌گیری شد. کل حجم آب مصرفی در کرت‌های آزمایشی براساس مجموع بارش مؤثر و حجم آب آبیاری به‌دست آمد.

مقدار مصرف آب در تیمارهای مختلف با کنتور حجمی اندازه گرفته شد و با توجه به میزان بارش طی دوره رشد کل، آب مصرفی برای هر تیمار محاسبه شد. به‌منظور تعیین زمان آبیاری با استفاده از دستگاه تانسومتر که در داخل پشته‌ها (عمق ۱۰ سانتی‌متر) نصب شده است، پس از رسیدن رطوبت به محدوده مورد نظر آبیاری صورت پذیرفت (Yosefian, 2018). بر اساس بررسی‌های صورت گرفته توسط Alizadeh (1999)، عدد صفر تا ۱۰ در تانسومتر (مکش صفر تا ۱۰- کیلوپاسکال) به‌عنوان

تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر متر مربع ثابت می‌ماند.

RCP8.5 با استفاده از مدل گردش عمومی CanESM2 بر اساس متغیرهای اقلیمی روزانه دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) تولید شدند. برای بررسی اختلاف معنی‌داری بین داده‌های بارش، دمای بیشینه و کمینه در دوره پایه نسبت به دوره آینده از آزمون مقایسه میانگین t-test استفاده شد.

عملکرد SDSM طی دوره واسنجی و ارزیابی با استفاده از دو معیار درصد اریبی PBIASE و ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد NRMSE ارزیابی شد که به ترتیب توسط روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (1)$$

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

$$NRMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{O}_i} \times 100 \quad (2)$$

n: تعداد مشاهدات؛  $S_i$ : متغیر شبیه‌سازی شده در زمان i ام؛  $O_i$ : متغیر مشاهداتی در زمان i ام؛  $\bar{O}_i$ : میانگین متغیر شبیه‌سازی شده در زمان i ام

مقادیر PBIAS کوچک‌تر از  $\pm 10$ ، بین  $\pm 10$  و  $\pm 15$ ، بین  $\pm 15$  و  $\pm 25$ ، بزرگ‌تر از  $\pm 25$ ، به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب، خوب، رضایت‌بخش، نامطلوب می‌باشند (Moriyas et al., 2007; Thiemi et al., 2013).

مقادیر NRMSE بین صفر تا ۱۰ درصد، بین ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد، بین ۲۰ درصد تا ۳۰ درصد و بزرگ‌تر از ۳۰ درصد به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد عالی، خوب، مناسب و ضعیف می‌باشند (Soler et al., 2007).

داده‌های روزانه ریزمقیاس شده آب و هوایی هم برای دوره زمانی پایه و آینده به صورت سری‌های زمانی مصنوعی به عنوان ورودی در مدل CERES-Rice برای مطالعه تأثیرات اقلیم بر عملکرد برنج استفاده شدند.

تابشی در اواسط قرن به حدود ۳/۱ وات بر متر مربع رسیده، سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. سناریوی انتشار RCP4.5: سناریوی بینابینی RCP4.5 توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی شده است و در آن واداشت سناریوی انتشار RCP8.5: سناریوی بدبینانه RCP8.5 توسط گروه مدل‌سازی MESSAGE طراحی شده است که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد.

### تولید سناریوهای تغییر اقلیم

سلول‌های محاسباتی مدل‌های گردش عمومی (GCMs) بزرگ‌تر از وسعت منطقه مطالعاتی می‌باشند که برای رفع این مشکل، لازم است خروجی GCMs، پیش از استفاده در مطالعه‌های ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، ریزمقیاس شوند (Ashraf et al., 2014). در این مطالعه از نرم‌افزار SDSM v4.2.9 برای ریزمقیاس کردن خروجی‌های مدل گردش عمومی CanESM2 استفاده شد. طبق پژوهش‌های انجام شده، ریزمقیاس‌سازی آماری با SDSM به عنوان بهترین ترکیب حاصل از مولد تصادفی آب و هوا و روش‌های رگرسیون چندگانه خطی شناخته شده است (Khan et al., 2006).

این نرم‌افزار قادر به دریافت داده‌های ایستگاه اقلیمی از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ می‌باشد و عملیات ریزمقیاس‌سازی را بر اساس سناریوهای انتشار (RCP) خروجی مدل CanESM2 برای بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ انجام می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین مراحل ریزمقیاس‌نمایی، انتخاب متغیرهای غالبی است که به طور قابل‌قبولی بتواند تغییرات و ویژگی‌های پارامترهای ایستگاهی مورد نظر را توصیف کند؛ که این متغیرها باید از متغیرهای مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) انتخاب شود. متغیرهای NCEP شامل ۲۶ متغیر اتمسفری است که دارای بیشترین میزان ضریب همبستگی جزئی و کمترین مقدار P-value می‌باشد و به عنوان متغیرهای غالب برای پیش‌بینی پارامترهای دما و بارش وارد معادله رگرسیونی نرم‌افزار SDSM می‌شوند (Wilby., 2003).

در این مطالعه، متغیرهای اقلیمی در دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۷) در سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و

### جدول ۱- ویژگی مدل گردش عمومی استفاده شده در مطالعه

Table 1- GCM feature to project the future climate in this study

General Circulation Model (GCM)	Representative Concentration Pathway (RCP)	Resolution (latitude × longitude)	Modeling center	Reference
CanESM2	RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5	2.79° × 2.81°	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Chylek et al. (2011)

### مدل شبیه‌ساز رشد گیاهی

نرم‌افزار DSSAT شامل مجموعه‌ای از مدل‌های گیاهی مختلف است که با رویکرد سیستمی برای تحقیقات کشاورزی توسعه یافته است. مدل‌های گیاهی مختلف که در واقع به‌عنوان زیرمجموعه‌ای در نرم‌افزار DSSAT ارائه شده‌اند، برای شبیه‌سازی پاسخ محصول به تغییر اقلیم نیز به کار برده شده‌اند (Jones et al., 2003). در این مطالعه برای شبیه‌سازی روزانه مراحل رشد و توسعه گیاه برنج از مرحله کاشت تا برداشت از مدل زراعی برنج (CERES-Rice) واقع در نسخه ۴/۷ مدل DSSAT استفاده شد (Hoogenboom et al., 2019; Jones et al., 2003). داده‌های ورودی مدل شامل: (۱) داده‌های روزانه آب و هوا (بارش، بیشینه و کمینه دما، تشعشع خورشیدی)، (۲) داده‌های خاک (بافت خاک، مواد آلی، نیتروژن کل و ...)، (۳) داده‌های مدیریت زراعی (تاریخ کاشت، تاریخ آبیاری، مقدار آبیاری، تاریخ کوددهی، مقدار کوددهی و ...)، (۴) ضرایب ژنوتیپ مربوط به رقم گیاهی مورد نظر. در این مطالعه، تشعشع خورشیدی روزانه بر اساس ساعات آفتابی در هر روز و با استفاده از معادله آنگستروم - پرسکات تخمین زده شد (Prescott, 1940). فازهای توسعه برنج در مدل CERES-Rice بر اساس درجه روز رشد (GDD) کنترل می‌شوند. مراحل اصلی رشد و توسعه گیاه برنج شامل: جوانه‌زنی، خوشه‌دهی، گل‌دهی، پر شدن دانه، بلوغ فیزیولوژیکی و برداشت می‌باشد (Nicolas et al., 2020; Yan, et al., 2006). در مدل (CERES-Rice)، بیشترین میزان تولید زمانی اتفاق می‌افتد که دما بین دماهای پایه و دمای بهینه باشد (Guo et al., 2019). Gao et al. (1992) کمترین دمای لازم برای جوانه زدن برنج را ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفتند. مدل شبیه‌ساز گیاهی CERES-Rice واقع در برنامه نرم‌افزاری DSSAT از دو روش برای شبیه‌سازی تبخیر-تعرق مرجع (ET<sub>0</sub>) استفاده می‌کند که شامل: (۱) روش فائو ۵۶ (داده‌های مورد نیاز: تشعشع خورشیدی، بیشینه و کمینه دما، سرعت باد و رطوبت نسبی) (Allen et al., 1998)، (۲) روش پرینستلی - تیلور (داده‌های مورد نیاز: تشعشع خورشیدی، بیشینه و کمینه دما، Priestley and Taylor, 1972). اطلاعات آب و هوایی با دریافت تنها اطلاعات روزانه بارش، تشعشع خورشیدی، بیشینه و کمینه دما با استفاده از ابزار Weather man در برنامه نرم‌افزاری DSSAT انجام‌پذیر است. در این مطالعه، فرض بر این است که در آینده نزدیک، عملیات زراعی در مزرعه آزمایشی دستخوش تغییر نخواهد شد و خاک مزرعه نیز همگن و یکنواخت خواهد بود و تنها عامل تغییرکننده، شرایط آب و هوایی است.

### واسنجی و ارزیابی مدل شبیه‌ساز گیاهی

واسنجی مدل بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه آزمایشی در سال ۲۰۱۵ و برای تیمار آبیاری سنتی (FI) که فاقد هرگونه تنش آبی بود، انجام شد. واسنجی مدل با تنظیم ضرایب

ژنتیکی به‌منظور کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده طی مراحل اصلی رشد و توسعه برنج با استفاده از روش GENCALC که در نرم‌افزار DSSAT تعبیه شده، اجرا شد. GENCALC، ضرایب یک ژنوتیپ را با اجرای پیوسته مدل گیاهی در محدوده تقریبی ضرایب مربوطه تخمین می‌زند (Buddhagoon et al., 2018; et al., 1993). ضرایب در محدوده تقریبی به‌طور خودکار تغییر داده می‌شوند تا زمانی که مقادیر شبیه‌سازی شده با مشاهداتی بر هم منطبق یا به‌هم نزدیک شوند (Hunt et al., 1993). از داده‌های آزمایشی به‌دست آمده در سال ۲۰۱۶ برای ارزیابی مستقل مدل استفاده شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل از معیار درصد انحراف (d) و ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) استفاده شد که به ترتیب در روابط (۳) و (۴) نشان داده شده است.

$$d = \left[ \frac{S_i - O_i}{O_i} \right] \times 100 \quad (3)$$

d: درصد انحراف می‌باشد که درصد پایین‌تر انحراف نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی‌ها می‌باشد (Araya et al., 2017).

$$R^2 = \frac{\sum S_i \times O_i - \sum S_i \times \sum O_i}{\sqrt{\sum S_i^2 - (\sum S_i)^2} \times \sqrt{\sum O_i^2 - (\sum O_i)^2}} \quad (4)$$

S<sub>i</sub>: مقدار شبیه‌سازی شده؛ O<sub>i</sub>: مقدار مشاهداتی  
مقادیر R<sup>2</sup> بین ۰/۷۵ و یک، بین ۰/۷۵ و ۰/۶۵، بین ۰/۶۵ و ۰/۵، کوچکتر از ۰/۵، به‌ترتیب در گروه عملکرد بسیار خوب، خوب، رضایت‌بخش، نامطلوب قرار دارند (Moriasi et al., 2007; Thiemi et al., 2013).

### نیاز آبی گیاه (CWR) و بهره‌وری آب گیاه (CWP)

در فرضیه این مطالعه، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک و عملیات مدیریت زراعی در آینده نزدیک ثابت در نظر گرفته شده است. عملکرد برنج و نیاز آبی گیاه در همه تیمارهای آبیاری و برای همه سناریوهای اقلیمی RCP با استفاده از مدل CSM-CERES-Rice شبیه‌سازی شد و سپس بهره‌وری آب گیاه برنج با استفاده از رابطه (۵) در همه تیمارهای آبیاری و سناریوهای اقلیمی محاسبه شد. (Boonwichai et al., 2018)

$$CWP = \frac{Y}{ETC} \quad (5)$$

Y: عملکرد برنج بر حسب کیلوگرم بر هکتار؛ ETC: مقدار کل تبخیر-تعرق فصلی از زمان نشاکاری تا برداشت برنج بر حسب مترمکعب بر هکتار

### ارزیابی ریسک عملکرد

برای تخمین ریسک عملکرد برنج، عملکرد شبیه‌سازی تاریخی برنج در هر سال از ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۵ در تیمارهای آبیاری

هواشناسی ایستگاه مورد نظر در دوره زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۰ انجام شد. پس از اجرای واسنجی و ارزیابی، داده‌های روزانه هواشناسی برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر محدوده مطالعاتی ریزمقیاس شدند. در جدول (۲) پیش‌بینی کننده‌های اقلیمی که تأثیر معنی‌داری بر پیش‌بینی شونده‌ها دارند، نشان داده شدند. بر طبق جدول (۲)، پیداست که پیش‌بینی‌کننده اقلیمی p500gl دارای همبستگی خوبی با پیش‌بینی‌شونده دما است (r-value بیشتر از ۰/۷۵ می‌باشد). همچنین پیش‌بینی‌کننده اقلیمی tempgl دارای همبستگی معنی‌داری با پیش‌بینی‌شونده بیشینه دماست (r-value بیشتر از ۰/۲۵ می‌باشد). این در حالی است که برای بارش به دلیل ماهیت نوسانی بودن، ضریب هم بستگی جزئی مقدار بسیار کمتری به دست آمد. واسنجی و ارزیابی SDSM بر اساس بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده نشان می‌دهد که مدل می‌تواند متغیرهای اقلیمی بارش و دما (متغیرهای پیش‌بینی‌شونده) را در محدوده مطالعاتی به خوبی تطابق بسیار زیادی با مقادیر بیشینه و کمینه دمای ماهانه مشاهداتی دارد (PBIAS بین صفر تا ۱۰ درصد و NRMSE بین صفر تا ۱۰ درصد). همین‌طور، مدل مقادیر بارش ماهانه را به میزان خوبی شبیه‌سازی می‌کند. (PBIAS بین ۱۰ درصد تا ۱۵ درصد و NRMSE بین ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد) جدول (۳). نتایج شبیه‌سازی بارش اندکی ضعیف‌تر از نتایج شبیه‌سازی دما به دست آمد. این نتایج را می‌توان با نتایج به دست آمده از مطالعه‌های Charles et al. (2013) و Shrestha et al. (2014) مقایسه کرد که بیان داشتند شبیه‌سازی بارش به دلیل محرک‌های تأثیرگذار بسیاری مانند موقعیت مکانی، ارتفاع، پستی و بلندی چالش برانگیز می‌باشد.

مختلف و همچنین عملکرد شبیه‌سازی آینده در سناریوهای اقلیمی RCP برای هر سال از ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۷ و در تیمارهای آبیاری مختلف با یک حد آستانه بحرانی مقایسه شد. میانگین شبیه‌سازی ۲۲ ساله عملکرد برنج طی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) به عنوان آستانه بحرانی در نظر گرفته شد. ریسک عملکرد در واقع درصد عملکرد در شرایطی است که کمتر از درصد میانگین عملکرد پایه باشد (Liu et al., 2019). ریسک عملکرد، با توجه به رابطه (۶) تخمین زده شد (Liu et al., 2019).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \times 100\% , \quad (6)$$

$$M_i = \begin{cases} 1, & Y_i \leq \bar{Y} \\ 0 & Y_i > \bar{Y} \end{cases}$$

R: ریسک عملکرد برنج به درصد؛  $M_i$ : فاکتور تعیین عملکرد؛  $Y_i$ : عملکرد بر حسب کیلوگرم بر هکتار؛  $\bar{Y}$ : میانگین شبیه‌سازی ۲۲ ساله عملکرد برنج طی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۴) بر حسب کیلوگرم بر هکتار توزیع احتمال تجمعی (CDF) بر سری عملکرد برنج (کیلوگرم بر هکتار) با تنظیم سری داده‌های عملکرد شبیه‌سازی شده از کمترین به بیشترین و سپس محاسبه فراوانی واقعی برای سری‌های عملکرد (بر حسب درصد) با استفاده از نرم افزار Excel برازش داده شد.

### نتایج و بحث

**واسنجی و ارزیابی روش ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM**  
واسنجی روش ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM با استفاده از داده‌های روزانه دما و بارش ایستگاه هواشناسی کشاورزی قراخیل برای دوره زمانی ۱۹۹۹-۱۹۸۴ و ارزیابی آن برای داده‌های روزانه

جدول ۲- متغیرهای پیش‌بینی کننده پس از عملیات غربال‌گری به همراه متغیرهای پیش‌بینی شونده متناظر با آن

Table 2- Summary of selected predictor variables and their respective predictands for the Gharakheil agrometeorological station

Predictand	Predictor-variables	Partial r-value	Partial p-value
Maximum temperature	Air temperature at 2 m (tempgl)	0.33	0
Minimum temperature	500 hpa Geopotential (p500gl)	0.78	0
Precipitation	1000 hpa Relative velocity of wind (p1-zgl)	0.07	0.01

جدول ۳- عملکرد SDSM طی دوره واسنجی و ارزیابی

Table 3- SDSM model performance during the calibration and evaluation period

Period	Predictands	NRMSE	PBIAS
		(%)	(%)
Calibration (1984-1999)	Maximum temperature	1.36	1.11
	Minimum temperature	1.97	1.52
	Precipitation	12.26	9.11
Evaluation (2000-2005)	Maximum temperature	1.51	1.18
	Minimum temperature	1.90	1.58
	Precipitation	8.17	6.21

جدول ۴- تغییرات دمای بیشینه و کمینه در سناریوهای RCP برای ایستگاه هواشناسی کشاورزی قراخیل  
**Table 4- Change in maximum and minimum temperatures under RCPs for Gharakheil agrometeorological station**

	Baseline (1984-2005)	+RCP2.6	+RCP4.5	+RCP8.5
Maximum Temperature (°C)	21.18	21.52	21.58	21.61
Change (%) *	-	+0.34	+0.4	+0.43
Minimum Temperature (°C)	12.35	12.75	12.76	12.79
Change (%) *	-	+0.4	+0.41	+0.44

\* RCP scenarios are projections for 2026-2047.

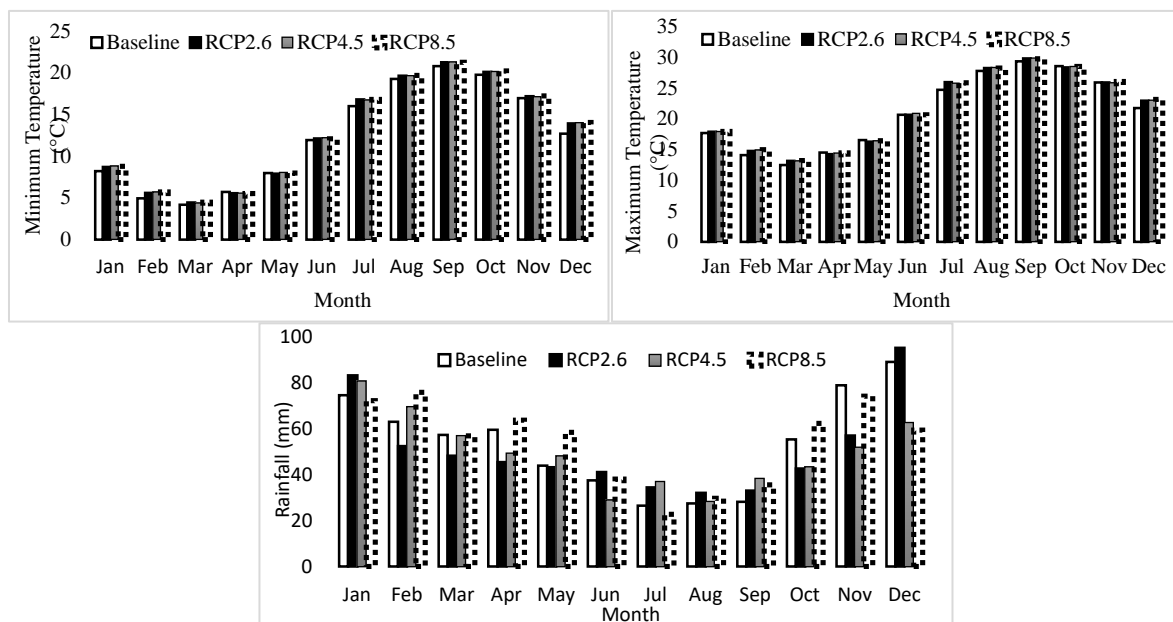
\* Changes are provided relative to the baseline from 1984-2005.

جدول ۵- تغییرات بارش در سناریوهای RCP برای ایستگاه هواشناسی کشاورزی قراخیل  
**Table 5- Change in rainfall under RCPs for Gharakheil agrometeorological station**

	Baseline (1984-2005)	+RCP2.6	+RCP4.5	+RCP8.5
Precipitation (mm)	656.43	619.96	607.35	663.49
Change (%) *	-	-5.55	-7.47	+1.07

\* RCP scenarios are projections for 2026-2047

\* Changes are provided relative to the baseline from 1984-2005.



**Fig. 1- Baseline from 1984 to 2005 and projected monthly climate for Maximum temperature (a) Minimum temperature (b) precipitation (c) for the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the period from 2026 to 2047**

شکل ۱- میانگین ماهانه آب و هوای پیش‌بینی شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده RCP در مقایسه با دوره پایه Baseline برای (a) بیشینه دما (b) کمینه دما (c) بارش

نشان داد که میانگین سالانه بارش دارای نوسانات اقلیمی است؛ به طوری که میانگین سالانه بارش تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب ۵/۵۵ درصد و ۷/۴۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش و تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5، ۱/۰۷ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. تغییرات سالانه پیش‌بینی شده دماهای بیشینه و کمینه و بارش در دوره آینده نزدیک تحت سناریوهای تغییر اقلیم در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. همچنین روند ماهانه دما و بارش در آینده نزدیک نسبت به دوره پایه نیز در شکل (۱) (a, b, c) نشان داده شده است.

#### آشکار سازی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی

نتایج پیش‌بینی‌های اقلیمی دما در محدوده مطالعاتی نشان داد که میانگین سالانه دما در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۷) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵) افزایش می‌یابد. میانگین سالانه دمای بیشینه به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۴ و ۰/۴۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالانه دمای کمینه به ترتیب ۰/۴، ۰/۴۱ و ۰/۴۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 روند افزایشی خواهد داشت. همچنین، مقدار افزایش میانگین سالانه دما تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از دو سناریوی دیگر می‌باشد. پیش‌بینی‌های بارش در محدوده مطالعاتی

روش GENCALC و روش سعی و خطا و سپس مقایسه داده-های شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده تخمین زده شدند (Darikandeh et al., 2022). هشت ضریب ژنتیکی واسنجی شده که شامل پارامترهای مربوط به فاز رویشی و فاز زایشی برنج رقم هاشمی می‌باشند در جدول (۶) نشان داده شده اند.

مقدار PBIAS برای پارامتر گل‌دهی طی دوره‌های واسنجی و ارزیابی ۶/۵۲ درصد و ۱۸/۶۰ درصد به دست آمد که به ترتیب نشان دهنده توانمندی بسیار خوب و رضایت بخش مدل CERES-Rice در شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاهی می‌باشد. PBIAS برای پارامتر بلوغ فیزیولوژیکی طی دوره‌های واسنجی و ارزیابی به ترتیب ۰ و ۵/۴۳ درصد به دست آمد که حاکی از توانمندی بسیار خوب مدل می‌باشد. هم‌چنین، PBIAS برای پارامتر عملکرد محصول طی دوره‌های واسنجی و ارزیابی به ترتیب ۱۶/۸ درصد و ۲۴ درصد به دست آمد که توانمندی مدل را در محدوده رضایت‌بخشی نشان می‌دهد (جدول ۷).

مقدار NRMSE برای پارامتر بلوغ فیزیولوژیکی طی دوره‌های واسنجی و ارزیابی ۶/۵۰ درصد و ۱۸/۶۰ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده به‌ترتیب توانمندی عالی و خوب مدل CERES-Rice می‌باشد. NRMSE برای پارامتر بلوغ فیزیولوژیکی طی دوره‌های واسنجی و ارزیابی به ترتیب صفر و ۵/۴۰ درصد به دست آمد که حاکی از توانمندی بسیار خوب مدل می‌باشد. هم‌چنین، NRMSE برای پارامتر عملکرد طی دوره‌های واسنجی و ارزیابی به ترتیب ۱۷/۳۰ درصد و ۲۵/۹۰ درصد به دست آمد که نشان داد توانمندی مدل برای شبیه‌سازی در محدوده مناسبی قرار دارد (جدول ۷).

مقدار d برای پارامترهای گل‌دهی، بلوغ فیزیولوژیکی و عملکرد، درصد کمی را نشان داد که نشان‌دهنده درصد انحراف کم داده‌های مشاهداتی از شبیه‌سازی است (جدول ۷).

مطالعه‌های انجام شده توسط Darand و Hamidi (2021) نشان داد که بیشینه و کمینه دمای سراسر ایران در آینده (۲۱۰۰-۲۰۰۶) نسبت به دوره پایه (۲۱۰۰-۱۹۷۹) روندی افزایشی خواهد داشت. دمای کمینه به‌ترتیب ۰/۳۵، ۰/۶ و یک درجه سانتی‌گراد تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 افزایش خواهد یافت. همین‌طور، دمای بیشینه بیش از یک درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.

تحقیقات مختلف نشان داد که هم‌بستگی بسیار نزدیکی بین دمای کمینه و عملکرد برنج وجود دارد. Peng et al. (2004) طی مطالعه‌ای در فیلیپین نشان دادند به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش در دمای حداقل در طول فصل رشد برنج، عملکرد دانه برنج ۱۰ درصد کاهش می‌یابد؛ در حالی که اثر بیشینه دما بر عملکرد ناچیز بوده و افزایش درجه حرارت در شب همراه با گرم شدن کره زمین سبب کاهش عملکرد محصول برنج می‌شود. Rao et al. (2014)، ۴۴۱ تا ۸۵۹ کیلوگرم در هکتار کاهش عملکرد برنج به ازای هر درجه افزایش دمای کمینه در بخشی از هند را گزارش کردند. Nagarajan et al. (2010) نشان دادند که دماهای شبانه بیش از ۲۲ درجه سانتی‌گراد بر عملکرد و کیفیت برنج تأثیر منفی دارد. Lotfirad et al. (2021) گزارش کرده‌اند که بارش در بخش‌های مرکزی ایران طی دوره آینده نزدیک نسبت به دوره پایه، تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 هم افزایشی و هم کاهش می‌باشد. طول و عرض جغرافیایی و پستی و بلندی‌های سطح، متغیرهایی هستند که بر نوسانات بارش تأثیرگذار می‌باشند (Boonwichai et al., 2018).

#### واسنجی و ارزیابی مدل شبیه‌ساز گیاهی

مدل بر اساس داده‌های آزمایشی جمع‌آوری شده در فصل رشد برنج (ماه می تا ماه آگوست سال ۲۰۱۵) واسنجی شد. ارزیابی مدل به‌طور مستقل براساس داده‌های آزمایشی جمع‌آوری شده در سال ۲۰۱۶ انجام شد. ضرایب ژنتیکی برنج رقم هاشمی با ترکیب

جدول ۶- ضرایب ژنتیکی تنظیم شده برای برنج رقم هاشمی

Table 6- Genetic coefficients for the rice cultivar Hashemi

Genetic coefficient	Description	Range of values	Calibrated values
P1	Basic vegetative phase of the plant	100-880	100
P2R	Photoperiod sensitivity in panicle initiation	5-300	36.20
P5	Grain filling duration	150-850	695.00
P2O	Critical photoperiod of development occurring at a maximum rate	10-13	12.50
G1	Potential spikelet number coefficient	37-77.8	77.80
G2	Single grain weight	0.01-0.03	0.03
G3	Tillering coefficient	0.53-1.30	1.16
G4	Temperature tolerant coefficient	0.7-1.25	1.00

جدول ۷- معیارهای تکوینی برازش مدل CERES-Rice در دوره های واسنجی و ارزیابی برای برنج رقم هاشمی  
Table 7- Calibration and Evaluation goodness of fit indicators of CERES-Rice model for the cultivar (Hashemi)

		Period	Year	NRMSE			
				(%)	d (%)	PBAIS (%)	
Anthesis (day)	Sim.	46	Calibration	2015	6.50	6.50	6.52
	Obs.	49					
	Sim.	43	Evaluation	2016	18.60	18.60	18.60
	Obs.	51					
Physiological maturity (day)	Sim.	95	Calibration	2015	0	0	0
	Obs.	95					
	Sim.	92	Evaluation	2016	5.40	3.20	5.43
	Obs.	97					
Yield (ton/ha)	Sim.	3.71	Calibration	2015	17.30	-16.80	16.80
	Obs.	3.14					
	Sim.	3.76	Evaluation	2016	25.90	-24.40	24.00
	Obs.	2.84					

نزدیک (۲۰۴۷-۲۰۲۶)، کمترین میزان کاهش عملکرد در تیمار آبیاری سنتی FI با ۱/۴ درصد کاهش و بیشترین کاهش عملکرد در تیمار کم آبیاری PRD60 با پنج درصد کاهش رخ خواهد داد. با توجه به شکل (۳) در تیمارهای کم آبیاری PRD60 و RDI60 به دلیل تنش رطوبتی شدید خاک عملکرد کمتری در مقایسه با سایر تیمارهای آبیاری مشاهده شد. تیمار FI به دلیل شرایط رطوبتی غرقاب دائم، تیمارهای PRD30 و RDI30 به دلیل تنش رطوبتی در حد ظرفیت زراعی و تیمارهای RDI10 و PRD10 به دلیل تنش رطوبتی در وضعیت اشباع، کاهش عملکرد کمتری را در همه سناریوهای RCP نسبت به تیمارهای PRD60 و RDI60 نشان دادند. همچنین با نگاهی به شکل (۳) می توان دریافت که عملکرد شبیه سازی برنج در تیمارهای کم آبیاری PRD اندکی بیشتر از تیمارهای کم آبیاری RDI است. اگرچه در تیمارهای کم آبیاری RDI تمامی پشته ها آبیاری می شود (مرطوب شدن هر دو طرف ریشه) و حجم آب مصرفی در مقایسه با تیمار کم آبیاری PRD که پشته ها یک در میان آبیاری می شوند (مرطوب نگه داشتن یک طرف ریشه و خشک باقی ماندن طرف دیگر ریشه) کمتر است؛ اما به دلیل آن که بر اساس نتایج شبیه سازی با مدل CERES-Rice جذب بالقوه آب ریشه در PRD اندکی بیشتر از RDI به دست آمد، شاهد عملکرد بیشتری در تیمارهای کم آبیاری PRD نسبت به RDI بودیم. با توجه به عدم تفاوت معنی داری بین میانگین بارش و دمای دوره آینده با پایه، کاهش عملکرد در آینده نزدیک، چندان متاثر از تغییرات اقلیمی نخواهد بود بلکه بیشتر تحت تأثیر کم آبیاری می باشد.

#### تأثیر تغییر اقلیم بر ریسک عملکرد

بررسی های انجام شده بر ارزیابی ریسک عملکرد حاکی از آن است که درصد ریسک عملکرد برنج در آینده در همه سناریوهای اقلیمی RCP نسبت به میانگین دوره پایه افزایش خواهد یافت. در تیمار آبیاری سنتی FI ریسک عملکرد برنج در آینده، تنها ۴/۵

#### تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی گیاه (CWR) و بهره وری آب گیاه (CWP)

چشم انداز تغییر اقلیم بر نیاز آبی برنج نشان داد که در آینده نزدیک، نیاز آبی برنج در همه تیمارهای آبیاری و در همه سناریوهای اقلیمی RCP به جز RCP8.5 کاهش خواهد یافت. افزایش نیاز آبی برنج در سناریوی RCP8.5 می تواند به دلیل ماهیت سناریوی مورد نظر باشد که سناریوی بدبینانه است. همان طور که از شکل (۲) پیداست، میزان بهره وری آب برای برنج رقم هاشمی در آینده نزدیک (سناریوهای RCP) نسبت به دوره پایه (Baseline) به میزان بسیار ناچیزی کاهش خواهد یافت. به دلیل کاهش طول دوره رشد که بر اساس شبیه سازی با مدل CERES-Rice به دست آمد، میزان بهره وری آب برای برنج رقم هاشمی نسبت به دوره پایه در سناریوهای مختلف RCP بین بازه ۱/۱۷- تا ۴/۴- درصد کاهش خواهد یافت. با این حال، بیشترین میزان بهره وری آب گیاه مربوط به تیمار آبیاری FI به دلیل رطوبت زیاد خاک در مقایسه با تیمارهای کم آبیاری بود که بین ۱/۰۲ تا ۱/۰۵ کیلوگرم برنج بر مترمکعب آب به دست آمد. (شکل ۲).

Kassam و Doorenbos (1979) گزارش کردند که بهره وری آب گیاه برنج در محدوده بین ۰/۷ تا ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر می کند که نتایج به دست آمده از این مطالعه نیز گواه این مدعاست. آن ها همچنین اظهار داشتند که عوامل بسیاری مانند موقعیت مکانی شالیزار، رقم برنج و مدیریت زراعی بر میزان بهره وری آب گیاه برنج دخیل می باشد. Boonwichai et al. (2018) نشان دادند که بهره وری آب گیاه برنج در آینده به دلیل افزایش دما و افزایش مصرف آب گیاه افزایش می یابد.

#### تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد

همان طور که از شکل (۳) پیداست، عملکرد برنج در همه تیمارهای آبیاری در دوره آینده (سناریوهای RCP) نسبت به دوره پایه (Baseline) اندکی کاهش می یابد. به طوری که در آینده

۳۱ درصد برآورد گردید. هم‌چنین به ازای ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش عملکرد برنج در تیمار کم‌آبیاری PRD60 با بیشترین تنش آبی، ریسک عملکرد در مقایسه با تیمار آبیاری سنتی FI به‌مراتب بیشتر بوده به‌طوری که ریسک عملکرد تحت سناریوهای پایه (Baseline)، RCP4.5، RCP8.5 و RCP2.6 به‌ترتیب ۲۰ درصد ، ۲۲ درصد ، ۳۱ درصد و ۳۹ درصد برآورد گردید. ارقام به‌دست آمده، همگی نشان‌دهنده افزایش ریسک کاهش عملکرد برنج رقم هاشمی در محدوده مطالعاتی در آینده نسبت به میانگین دوره پایه می‌باشد.

درصد افزایش نسبت به دوره پایه خواهد داشت؛ در حالی که در همه تیمارهای کم‌آبیاری ریسک عملکرد با افزایش تنش آبی بیشتر شده و بین ۹ تا ۲۲٪ درصد افزایش خواهد داشت (شکل ۴). به‌منظور بررسی دقیق‌تر، اختلاف عملکرد شبیه‌سازی دانه نسبت به مقدار میانگین شبیه‌سازی عملکرد دوره پایه در قالب توزیع احتمال تجمعی برای کلیه تیمارهای آبیاری و سناریوهای اقلیمی به‌دست آمد (شکل ۵). به‌عنوان نمونه، به ازای ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار کاهش محصول برنج در تیمار آبیاری سنتی FI، ریسک عملکرد تحت سناریوهای پایه (Baseline)، RCP4.5، RCP8.5 و RCP2.6 به ترتیب ۱۳ درصد، ۲۰ درصد ، ۲۱ درصد و

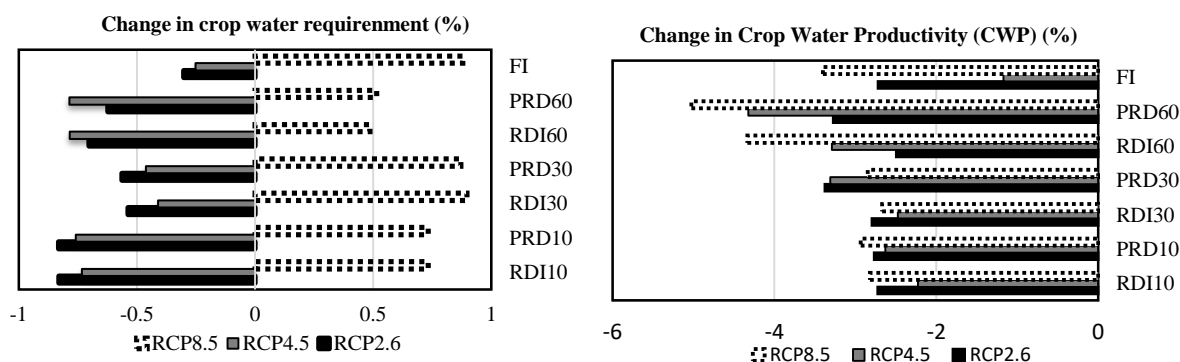


Fig. 2- Change in Crop Water Requirement (CWR) and Crop Water Productivity (CWP) for Hashemi rice cultivar for different irrigation treatments [(Regulated Deficit Irrigation at -10, -30, -60 kPa (RDI10, RDI30, RDI60), (Partial Root Drying at -10, -30, -60 kPa (PRD10, PRD30, PRD60))] and for different Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) compared to the baseline period (1984-2005)

شکل ۲- تغییر در نیاز آبی گیاه (CWR) و بهره‌وری آب گیاه (CWP) و بهره‌وری آب گیاه (CWP) برنج رقم هاشمی برای تیمارهای مختلف آبیاری [کم آبیاری تنظیم شده در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (RDI10، RDI30، RDI60)، (آبیاری ناقص ریشه در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (PRD10، PRD30، PRD60))] و برای سناریوهای انتشار مختلف (RCP8.5، RCP4.5، RCP2.6) در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵)

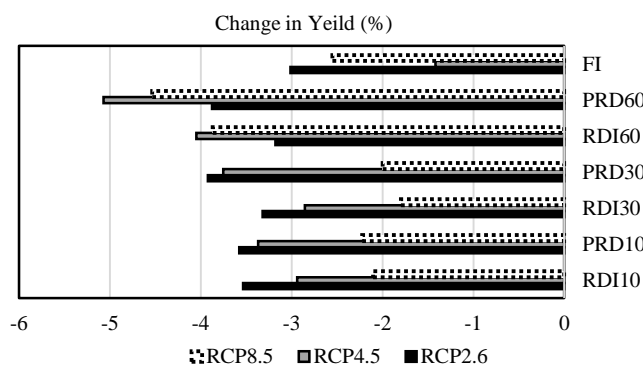


Fig. 3- Change in yield for different irrigation treatments [(Regulated Deficit Irrigation at -10, -30, -60 kPa (RDI10, RDI30, RDI60), (Partial Root Drying at -10, -30, -60 kPa (PRD10, PRD30, PRD60))] and for different Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) compared to the baseline period (1984-2005)

شکل ۳- تغییر عملکرد برنج برای [کم آبیاری تنظیم شده در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (RDI10، RDI30، RDI60)، (آبیاری ناقص ریشه در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (PRD10، PRD30، PRD60))] و برای سناریوهای انتشار مختلف (RCP8.5، RCP4.5، RCP2.6) در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۴-۲۰۰۵)



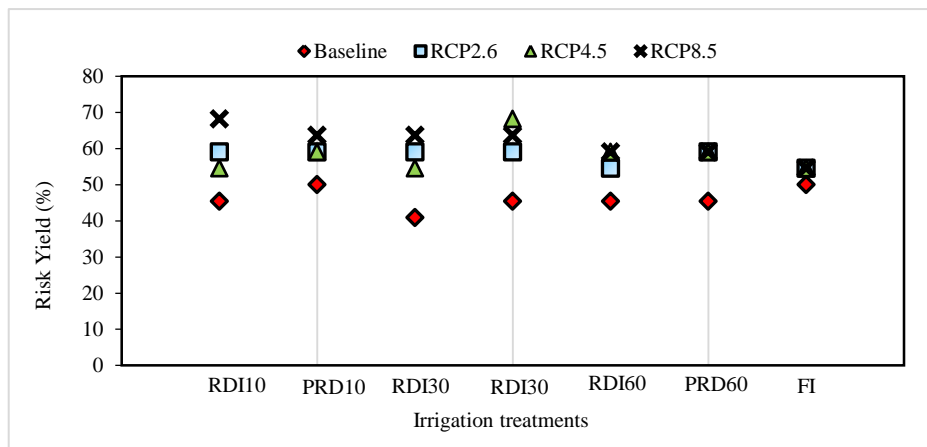
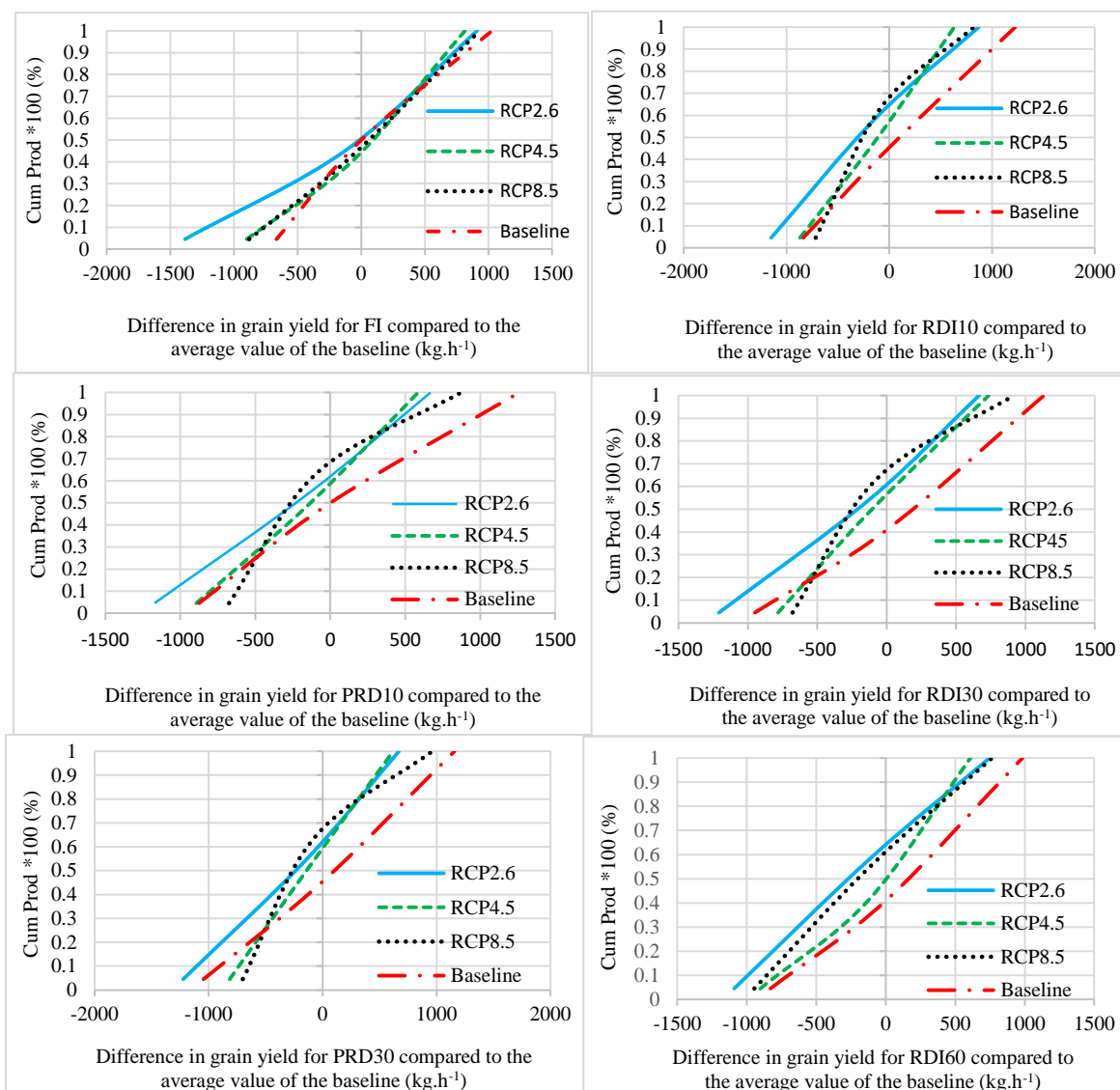
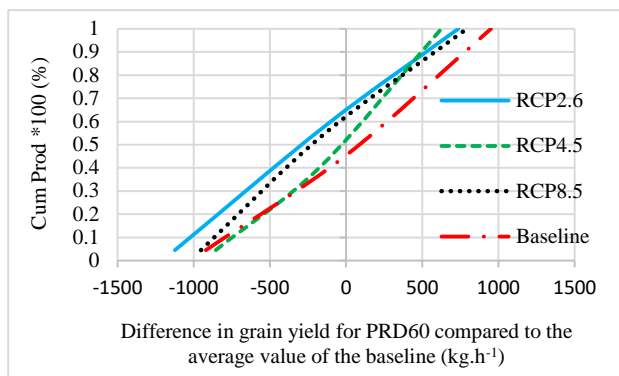


Fig. 4- Rice yield risk for different irrigation treatments [Regulated Deficit Irrigation at -10, -30, -60 kPa (RDI10, RDI30, RDI60), Partial Root Drying at -10, -30, -60 kPa (PRD10, PRD30, PRD60)] and for different Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) compared to the baseline period (Baseline)

شکل ۴- ریسک عملکرد برنج رقم هاشمی برای تیمارهای مختلف آبیاری [کم آبیاری تنظیم شده در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (RDI10، RDI30، RDI60)، آبیاری ناقص ریشه در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (PRD10، PRD30، PRD60)] و برای سناریوهای انتشار مختلف (RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5) در مقایسه با دوره پایه (Baseline)





**Fig. 5- Cumulative Distribution Function (CDF) of grain yield difference compared to the average value of the baseline for [Regulated Deficit Irrigation at -10, -30, -60 kPa (RDI10, RDI30, RDI60), Partial Root Drying at -10, -30, -60 kPa (PRD10, PRD30, PRD60)] and for different Representative Concentration Pathways (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5**

شکل ۵- توزیع احتمال جمعیتی اختلاف عملکرد دانه نسبت به مقدار میانگین دوره پایه برای تیمارهای مختلف آبیاری (کم آبیاری تنظیم شده در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (RDI10، RDI30، RDI60)، (آبیاری ناقص ریشه در پتانسیل‌های ماتریک -۱۰، -۳۰، -۶۰ کیلوپاسکال (PRD10، PRD30، PRD60)) و برای سناریوهای انتشار مختلف (RCP8.5، RCP4.5، RCP2.6)

پیشنهاد برای آینده این مطالعه استفاده از مدل‌های اقلیمی سری جدید CMIP6 با سناریوهای جدید انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP به دلیل پیچیدگی سیستم آب و هوایی واقعی است. استفاده از این مدل‌ها کمک می‌کند تا عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌ها در پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده که از تفاوت در ساختار مدل ناشی می‌شوند، ساده گردند. همین‌طور، برای تعیین بهترین راهکار مدیریت زراعی با توجه به اقلیم آینده، تحلیل اقتصادی با استفاده از مدل CERES-Rice توصیه می‌گردد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر مصطفی یوسفیان به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های مزرعه‌ای حاصل از اجرای طرح تحقیقاتی در موسسه تحقیقات برنج آمل، صندوق حمایت از پژوهشگران برای تامین مالی پروژه و حمایت کلی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، قدردانی می‌کنند.

### نتیجه‌گیری

تحلیل چگونگی واکنش برنج به‌عنوان محصولی با مصرف آب زیاد در برابر تغییرات اقلیمی ضروری به‌نظر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی با مدل GCM نشان داد که بارش روندی نوسانی و دما روندی افزایشی در مقایسه با دوره پایه دارد. ریسک عملکرد برنج برای همه سناریوهای اقلیمی در تیمارهای کم‌آبیاری بیشتر از تیمار آبیاری سنتی به‌دست آمد. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند بسته به شرایط محلی، اطلاعات مفیدی را برای تدوین راهکارهایی

به‌منظور افزایش عملکرد برنج در آینده ارائه دهد. تغییر زمان کاشت، تغییر زمان کوددهی، مطالعه امکان‌سنجی کاشت ارقام با طول دوره رشد کوتاه‌تر و بررسی استفاده از ارقام مقاوم‌تر به تنش‌های آبی می‌تواند از راهکارهای مفید و کم‌هزینه در ارتقای تولید برنج آینده در منطقه باشد.

### References

- 1- Acharjee T. K. Ludwig F. van Halsema G. Hellegers P and Supit I, 2017. Future changes in water requirements of Boro rice in the face of climate change in North-West Bangladesh *Agricultural water Management*, 194, 172-183. Doi:10.1016/j.agwat.2017.09.008.
- 2- Alizadeh, A., 1999. *The relationship between water, soil and plant*. University of Emam Reza. (In Persian).
- 3- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper* No. 56. FAO, Rome
- 4- Araya A, Kisekka I, Gowda PH, Prasad PVV., 2017. Evaluation of water-limited cropping systems in a semi-arid climate using DSSAT-CSM. *Agri. Syst* 150:86-90. Doi: 10.1016/j.agry.2016.10.007.

- 5- Arshad A, Zhang Z, Zhang W and Gujree I., 2019. Long-term perspective changes in crop irrigation requirement caused by climate and agriculture land use changes in rechna doab, pakistan. *Water*, 11(8), 1567. Doi: 10.3390/w11081567.
- 6- Asadi, M., 2005. Introducing a new rice irrigation method in China. *Dryness and drought promotional Scientific Quarterly in Agriculture*. (21), 13-17. (In Persian)
- 7- Ashraf, B., Alizadeh, A., Musavi, M. and Banayan M., 2014. Evaluation of temperature and precipitation data simulated by individual and group execution of five AOGCM models for the northeastern region of Iran. *Journal of Water and Soil*. 28 (2), 253-266. (In Persian)
- 8- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M.S., Weesakul, S. and Datta, A., 2018. Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 198, pp.1157-1164. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.146.
- 9- Buddhaboon, C., Jintrawet, A. and Hoogenboom, G., 2018. Methodology to estimate rice genetic coefficients for the CSM-CERES-Rice model using GENCALC and GLUE genetic coefficient estimators. *The Journal of Agricultural Science*, 156(4), pp.482-492. 156 (4):1-11. DOI:10.1017/S0021859618000527.
- 10- Charles A, Bertrand T, Elodie F and Harry H., 2013. Analog downscaling of seasonal rainfall forecasts in the Murray Darling basin. *Mon. Weather Rev.* 141: 1099–1117. doi: 10.1175/MWR-D-12-00098.1.
- 11- Chylek, P., Li, J., Dubey, M.K., Wang, M. and Lesins, G.J.A.C., 2011. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian earth system model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11(8), pp.22893-22907. Doi: 10.5194/acpd-11-22893-2011.
- 12- Darand, M. and Hamidi, S., 2021. Projected changes in Iran temperature based on different scenarios RCP. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(28), pp.85-106. (In Persian).
- 13- Darikandeh, D., Shahnazari, A., Khoshravesh, M., Hoogenboom, G., 2022. Evaluating rice yield and adaptation strategies under climate change based on the CSM-CERES-Rice model: a case study for northern Iran. *Theor Appl Climatol* . doi: 10.1007/s00704-022-04188-0.
- 14- Devkota, K.P., Manschadi, A.M., Devkota, M., Lamers, J.P.A., Ruzibaev, E., Egamberdiev, O., Amiri, E. and Vlek, P.L.G., 2013. Simulating the impact of climate change on rice phenology and grain yield in irrigated drylands of Central Asia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), pp.2033-2050. Doi: 10.1175/JAMC-D-12-0182.1.
- 15- Doorenbos J and Kassam A. H., 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper, 33, 257. Easterling W. E, 2007. Climate change and the adequacy of food and timber in the 21st century. *Proceedings of National Academy of Sciences* 104: 19679.
- 16- Gao L, Jin Z, Huang Y and Zhang L., 1992. Rice clock model: a computer model to simulate rice development, *Agricultural and Forest Meteorology*. 60.1–2: 1–16. Doi:10.1016/0168-1923(92)90071-B.
- 17- Gholizadeh, H., Ebadzadeh, H., Hatami, F., and Hosseinpour, R., 2014. Statistics of crops. Ministry of Agriculture. Economic planning deputy. *Information and Communication Technology Center*. (In Persian).
- 18- Goudarzi, M., and Koupaei, J., 2020. Effects of climate change on water requirement and irrigation water requirement in irrigated areas, case study: Najaf Abad Plain. *Promotional Journal of Water Conservation and Productivity*. 1(1), 23-30. (In Persian).
- 19- Guo Y, Wu W, Du M, Liu X, Wang J and Bryant C R., 2019. Modeling climate change impacts on rice growth and yield under global warming of 1.5°C and 2.0°C in the Pearl River delta, China. *Atmosphere* 10 (10): 567. doi: 10.3390/atmos10100567.

- 20- Hoogenboom G, CH Porter, V Shelia, KJ Boote, U Singh, JW White, LA Hunt, R Ogoshi, JI Lizaso, J Koo, S Asseng, A Singels, LP Moreno and JW Jones.,2019. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
- 21-Hunt, L.A., Pararajasingham, S., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Imamura, D.T. and Ogoshi, R.M., 1993. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy Journal*, 85(5), pp.1090-1094. Doi: 10.2134/agronj1993.00021962008500050025x.
- 22- Islam A. T. Shen S. H. and Yang S. B.,2018. Predicting design water requirement of winter paddy under climate change condition using frequency analysis in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 195, 58-70. Doi: 10.1016/j.agwat.2017.10.003.
- 23-Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), pp.235-265. Doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
- 24- Khan M. S, Coulibaly P and Dibike Y,2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319 (1), 357-382. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.035.
- 25- Liu J, Yao W, Peng ZH, Fu Y, Fan X and Wang H., 2019. Risk assessment of possible impacts of climate change and irrigation on wheat yield and quality. *Agricultural Sciences & Agronomy*. doi: 10.20944/preprints201912.0352.v1.
- 26- Lotfirad, M., Adib, A., Salehpoor, J., Ashrafzadeh, A. and Kisi, O., 2021. Simulation of the impact of climate change on runoff and drought in an arid and semiarid basin (the Hablehroud, Iran). *Applied Water Science*, 11, pp.1-24.doi:10.1007/s13201-021-01494-2.
- 27- Mahajan, G., Bharaj, T.S. and Timsina, J., 2009. Yield and water productivity of rice as affected by time of transplanting in Punjab, India. *Agricultural Water Management*, 96(3), pp.525-532.Doi: 10.1016/j.agwat.2008.09.027
- 28- Mohammadi, H., Rabbani, F., and Mazaheri, D., 2015. Simulating the effect of climate change on rice plant phenology under Different irrigation managements in the Caspian region: Rasht station. *Journal of Geographical Sciences Applied Research*. 15 (38), 187-205. (In Persian).
- 29-Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp.885-900.
- 30-Motha, R.P. and Baier, W., 2005. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America. *Climatic Change*, 70(1-2), pp.137-164.
- 31- Nagarajan S, Jagadish S.V.K, Hariprasad A.S, Thomar A.K., Anand A., Pal M and Aggarwal P.K., 2010. Local climate affects growth, yield and grain qual/ity of aromatic and nonaromatic rice in northwestern. *Indian Agriculture Ecosystems & Environment*, 138: 274–281. Doi: 10.1016/j.agee.2010.05.012.
- 32- Nicolas F, Migliaccio K W, Hoogenboom G, Rathinasabapathi B R and Eisenstadt W R.,2020. Assessing the potential impact of climate change on rice yield in the Artibonite valley of Haiti using the CSM-CERES-RICE model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)* 63 (5): 1385-1400. DOI:10.13031/trans.13868.
- 33- Peng S.B., J.L. Huang J.E. Sheehy R.C. Laza R.M. Vesperas X.H. Zhong G.S. Centeno G.S. Khush and K.G. Cassman., 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, U.S.A. 101, 9971–9975.doi: 10.1073/pnas.0403720101.

- 34- Prasad S, Singh M. P, and Yadav R. K., 2012. Physio-chemical changes in rice varieties under drought stress condition. *Plant Archives*, 12:63-66.
- 35- Prescott J., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of The Royal Society of South Australia*. 64 (1): 114–118.
- 36- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), pp.81-92. doi:10.1175/1520-0493(1972)100<0081: OTAOSH>2.3.CO;2
- 37- Rao B.B., Santhibhushan Chowdary P., Sandeep V.M., Rao V.U.M and Venkateswarlu B., 2014. Rising minimum temperature trends over India in recent decades: Implications for agricultural production. *Global and Planetary Change* 117: 1–8. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.03.001.
- 38- Rezaei, M., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M. and Vazifedoust, M., 2015. Large-scale Simulation of Rice yield and Water Productivity Using CERES-Rice Model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(2), pp.283-291.. (In Persian).
- 39- Schoups G, Maurer E.P and Hopmans G.W., 2008. Climate change impacts on water demand and salinity in California's irrigated agriculture. *American Geophysical Union*, Fall Meeting.
- 40- Shrestha, S., Deb, P. and Bui, T.T.T., 2016. Adaptation strategies for rice cultivation under climate change in Central Vietnam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21, pp.15-37. DOI 10.1007/s11027-014-9567-2.
- 41- Soler, C.M.T., Sentelhas, P.C. and Hoogenboom, G., 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27(2-4), pp.165-177. doi: 10.1016/j.eja.2007.03.002.
- 42- Thiemig V, Rojas R, Zambrano-Bigiarini M and De Roo A., 2013. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *J. Hydrol* 499: 324–338. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.012
- 43- Wailes E.J and Chavez E.C., 2012. World Rice Outlook. International Rice Baseline with Deterministic and Stochastic Projections, 2012-2021. University of Arkansas Department of Agricultural Economics and Agribusiness, *Division of Agriculture Staff*. 81 pp.
- 44- Wilby R. L, Tomlinson O. J and Dawson C. W., 2003. Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. *Climate Research*, 23, pp 183–194. doi:10.3354/cr023183.
- 45- Yan, D., Zhu, Y., Wang, S. and Cao, W., 2006. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice. *Plant Production Science*, 9(2), pp.93-105.. doi: 10.1626/pp.9.93.
- 46- Yosefian, M., 2018. Study the effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water productivity, methane gas emissions and some physiological characteristics of Hashemi cultivar. Ph.D. thesis of irrigation and drainage engineering. *Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University*, Iran. 100p. (In Persian).