



## Evaluation and Simulation of the Water Footprint of the Saffron Crop in Birjand Plain Using the Scenarios of the 6<sup>th</sup> Climate Change Report

Fariba Niroumand fard<sup>1</sup>, Abbas Khashei Siuki<sup>2\*</sup>, Reza Hashemi<sup>3</sup> and Khalil Ghorbani<sup>4</sup>

### Article type:

Research Article

### Article history:

Submitted: 15 April 2023

Revised: 25 June 2023

Accepted: 30 July 2023

Available Online: 29 October 2023

### How to cite this article:

Niroumand fard, F., Khashei Siuki, A., Hashemi, R., and Ghorbani, Kh. (2023). Evaluation and Simulation of the Water Footprint of the Saffron Crop in Birjand Plain Using the Scenarios of the 6<sup>th</sup> Climate Change Report *Saffron Agronomy & Technology*, 11(3), 301-320.

DOI: 10.22048/jsat.2023.413847.1506

### Abstract

Investigating and identifying the amount of water used for different agricultural products is of particular importance, and considering such evaluations, appropriate solutions can be provided to reduce agricultural water consumption, which is of great importance. The water footprint index as a global index shows the actual amount of water consumed by products based on the conditions and climate of each region. On the other hand, the phenomenon of climate change is one of the most critical environmental challenges that have a significant impact on water resources. Therefore, it is essential and necessary to evaluate this phenomenon to predict its impact on water consumption in the agricultural sector. In this research, the simulation of climate parameters using the MIROCES2L model of the 6th Report of the General Oceanic Atmospheric Circulation under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 in Birjand plain has been done and then using those results to calculate the footprint prediction. The blue water and green water traces of the strategic product of saffron were carried out in the Birjand Plain region. The results of the first part showed that the minimum and maximum temperatures in all three future scenarios (2050-2022) generally increased, and the precipitation parameter increased in autumn and winter and decreased in spring and summer. In the second part, the prediction of saffron crop performance by NIO model showed that under three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in the future (2022-2038) on average 0.13, 0.21 respectively and 0.05 kg/ha has decreased compared to the observation period (2005-2021) and the results showed that with the increase in water demand in the future period, the water footprint, the green water footprint and the total water footprint of the saffron crop under the influence of climate change. In the future period, it has increased by almost two times compared to the observation period. Also, the ratio of blue water consumption to green water in this product has increased in the future under all three scenarios compared to the observation

1 -PhD Candidate in Water Science and Engineering- Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran

2 -Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

3 -Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

4 -Reza Hashemi -Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran



Corresponding author: [abbaskhashei@birjand.ac.ir](mailto:abbaskhashei@birjand.ac.ir)

period from 1.91 to 2.04. Therefore, despite the phenomenon of climate change, increase in temperature, increase in water demand, and finally, increase in the footprint of water consumption in surface and underground water sources in the Birjand plain in the coming years, it is necessary to implement a suitable model of water consumption in the plain and To use appropriate and practical solutions to reduce the water footprint in the study area, the methods of reducing the area under cultivation, less irrigation, changing the cultivation pattern and changing the agricultural calendar should also be proposed and implemented.

**Keywords:** Climate change, Crop yield, Water footprint, NIO, CMIP6.

## مقاله پژوهشی

# بررسی ردپای آب محصول زعفران در دشت بیرجند تحت شرایط تغییر اقلیم

فریبا نیرومندفرد<sup>۱</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۲\*</sup>، سید رضا هاشمی<sup>۳</sup> و خلیل قربانی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۲۶ فروردین ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۴ تیر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۸ مرداد ۱۴۰۲

نیرومندفرد، ف.، خاشعی سیوکی، ع.، هاشمی، س.ر.، و قربانی، خ. (۱۴۰۲). بررسی ردپای آب محصول زعفران در دشت بیرجند تحت شرایط تغییر اقلیم. زراعت و فناوری زعفران، ۱۱(۴)، ۳۲۰-۳۰۱.

## چکیده

بررسی و شناسایی میزان آب واقعی استفاده شده برای محصولات مختلف کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و با در نظر گرفتن چنین ارزیابی‌هایی می‌توان راهکارهای مناسبی جهت کاهش مصرف آب کشاورزی ارائه داد که دارای اهمیت بالایی است. شاخص ردپای آب به عنوان یک شاخص جهانی مقدار واقعی آب مصرفی محصولات را بر اساس شرایط و اقلیم هر منطقه نشان می‌دهد. از طرفی دیگر پدیده تغییر اقلیم از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی است که بر منابع آب تأثیر بسزایی دارد. بنابراین ارزیابی این پدیده نیز جهت پیش‌بینی تأثیر آن بر مصرف آب در بخش کشاورزی امری مهم و ضروری است. در این تحقیق به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل گزارش ششم گردش عمومی جوی اقیانوسی MIROCES2L تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دشت بیرجند پرداخته شده است و سپس با استفاده از نتایج آن محاسبه پیش‌بینی ردپای آب آبی و ردپای آب سبز محصول استراتژیک زعفران در منطقه دشت بیرجند انجام شد. نتایج بخش اول نشان داد که حداقل دما و حداکثر دما در هر سه سناریو در آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۵۰) به طور کلی افزایش یافته است و پارامتر بارش در پاییز و زمستان افزایش و در بهار و تابستان کاهش می‌یابد. در بخش دوم نیز پیش‌بینی عملکرد محصول زعفران توسط مدل NIO نشان داد که تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۳۸) به طور میانگین به ترتیب به میزان ۰/۱۳، ۰/۲۱ و ۰/۰۵ کیلوگرم بر هکتار نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۲۱-۲۰۰۵) کاهش یافته است و در ادامه نتایج نشان داد با افزایش نیاز آبی در دوره آینده، ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب کل محصول زعفران تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره آینده تقریباً به میزان ۲ برابر نسبت به دوره مشاهداتی افزایش داشته است. همچنین نسبت مصرف آب آبی به آب سبز در این محصول در آینده تحت هر سه سناریو نسبت به دوره مشاهداتی از ۱/۹۱ تا ۲/۰۴ افزایش یافته است. بنابراین با وجود پدیده تغییر اقلیم، افزایش دما، افزایش نیاز آبی و در نهایت افزایش ردپای مصرف آب در منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت بیرجند در طی سال‌های آینده، ضروری است تا برای پیاده‌سازی الگوی مناسب مصارف آبی در دشت و به کار گرفتن راهکارهای مناسب و مؤثر جهت کاهش ردپای آب در منطقه مطالعاتی نیز روش‌هایی مبنی بر کاهش سطح زیرکشت، کم‌آبیاری، تغییر الگوی کشت و تغییر تقویم زراعی نیز مطرح و اجرایی شوند.

**کلمات کلیدی:** تغییر اقلیم، زعفران، ردپای آب، دشت بیرجند، CMIP6، NIO.

- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب- منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی بیرجند، بیرجند، ایران
  - ۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی بیرجند، بیرجند، ایران
  - ۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی بیرجند، بیرجند، ایران
  - ۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- \*- نویسنده مسئول: [abbaskhashei@birjand.ac.ir](mailto:abbaskhashei@birjand.ac.ir)

## مقدمه

اجماع نظر در سطح جهانی در بین پژوهشگران اقلیمی بر این است که پدیده گرمایش زمین در حال رخ دادن است و براساس مطالعات گوناگون پارامترهای اقلیمی مختلف، مانند دما و بارش در حال تجربه تغییرات قابل توجه در نقاط مختلف دنیا هستند (Azari et al., 2016). تغییرات آب و هوایی یک پدیده مستند و مورد تایید است که با تغییرات در الگوهای آب و هوایی شناخته می‌شود و به احتمال زیاد ادامه می‌یابد (de Oliveira et al., 2019). درجه حرارت و آب تحت تأثیر تغییر اقلیم نوسان پیدا می‌کند و در ادامه تولید محصولات کشاورزی تحت تأثیر این دو فاکتور قرار می‌گیرد (Babae et al., 2021; Maleki et al., 2019). بنابراین تغییرات آب و هوایی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی را بر پارامترهای اقلیمی داشته باشد و همچنین این تغییرات نیز می‌تواند بر سایر اجزاء یک سیستم مانند منابع آب و خاک تأثیر گذار باشد (Op de Hipt et al., 2018; 2019). امروزه مشکل آب به یکی از بزرگترین بحران‌های اساسی جهان تبدیل شده است و این منبع حیاتی نقش کلیدی خود را در ایجاد زندگی بهتر جهانیان به اثبات رسانده است. رشد سریع جمعیت، توسعه اقتصادی-اجتماعی جوامع، برداشت جهانی از آب شیرین و گسترش سطح آلودگی‌ها از عوامل مهمی هستند که باعث شده بحران آب پیش‌رو باشد (Wang, 2010; Mekonnen & Hoekstra, 2011). منابع آب علاوه بر بخش تولید، نقش تعیین کننده و روزافزونی در رشد اقتصادی کشورها دارد. وابستگی روز افزون به منابع آب، باعث شده است روند رشد و توسعه وابسته به سطح مصرف منابع آبی افزایشی باشد. در این میان کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف کننده منابع آب در جهان نیز است (Mekonnen et al., 2020). بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و تولید مواد غذایی در ایران نقش اساسی و حیاتی را دارد. حدود

۲۷ درصد تولید ناخالص ملی و ۲۲ درصد نیروی کار کشور در ارتباط با بخش کشاورزی است. با توجه به پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی و همچنین عدم مدیریت عرضه و تقاضای منابع آب در کشور به خصوص در مناطق کم آب و خشک، منابع آب را در بخش کشاورزی با مشکلات جدی رو به رو می‌سازد. بنابراین در مناطق خشک و نیمه خشک تولیدات کشاورزی از کشت آبی حاصل می‌گردد (Babazadeh & Saraeetabrizi., 2013). استان خراسان جنوبی از جمله مناطق با اقلیم خشک کشور (با میانگین افت ۴۲۰ میلی‌متر در آبخوان‌ها) محسوب می‌شود که با مشکل کمبود منابع آب همراه است و اهمیت کشت محصولات پایدار نسبت به سایر نقاط بیشتر احساس می‌شود (Jafarzadeh et al., 2015). کشت محصولات پایدار و سازگار با شرایط اقلیمی در هر منطقه همراه با تولید بالا و با کیفیت به بهره‌وری آب استفاده شده کمک می‌کند. از طرفی دیگر، با بروز پدیده تغییر اقلیم، پارامترهای اقلیمی بارش و متوسط درجه حرارت با تغییر در شدت و فراوانی همراه خواهند بود. از جمله عواملی که باعث تهدید منابع آب می‌شوند می‌توان به افزایش سطح زیرکشت، تغییر اقلیم، الگوی کشت نامناسب، پایین بودن راندمان آب و عملکرد محصول و افزایش جمعیت اشاره نمود. امروزه یکی از راه‌های مقابله با کم آبی و تأمین و ذخیره آن به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک ردپای آب می‌باشد (Bazrafshan et al., 2019a). شاخص ردپای آب یک شاخص چندبعدی است که علاوه بر مصرف مستقیم آب شیرین توسط مصرف کننده و تولید کننده، استفاده غیرمستقیم از آب را نیز در نظر می‌گیرد. بنابراین ردپای آب ارتباط بین مصرف از آب و میزان استفاده از آب در تولید محصولات و کالا را مورد بررسی قرار می‌دهد (Ayala et al., 2016). ردپای آب شامل سه بخش آب آبی، آب سبز و آب

هستند که در چشم انداز واکنش اقلیم جهانی استفاده می شود (IPCC, 2001). این مدل ها به صورت سه بعدی هستند و به دلیل وضوح مکانی خروجی مدل های GCMs پایین است استفاده از آنها برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم در مقیاس محلی مناسب نیستند. لذا نیاز است که خروجی این مدل ها برای مطالعات منطقه ای از طریق مدل ها یا روش های مناسب مقیاس کاهی شوند. در فاز پنجم مدل های جفت شده (CMIP5) بیش از ۴۰ مدل وجود دارد که در آن از سناریوهای انتشار به نام نماینده خط سیر غلظت (RCPs) استفاده می شود (Chen & Sun, 2015). این سناریوها براساس مقادیر واداشت تابشی (وات بر مترمربع) شامل ۴ سناریوی گلخانه ای RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 برای چشم انداز متغیر های اقلیمی در آینده می باشند. فاز ششم مدل های جفت شده (CMIP6) شامل سناریوهای سازماندهی شده از مدل های اقلیمی جهانی می باشند که الگوی تکامل یافته ای از مدل های سری پنجم (CMIP5) هستند (Eyring et al., 2016). مدل های سری ششم تغییر اقلیم دارای وضوح بیشتری می باشند و برای چشم انداز تغییر اقلیم از سناریوهای انتشار مشترک اجتماعی و اقتصادی SSP/RCP استفاده می کند (O'Neil et al., 2016). سناریوهای گزارش ششم شامل ۵ گروه هستند که بر شاخص های کمی جمعیت، شهرنشینی، سناریوهای تعمیم یافته، برنامه انرژی، تغییرات کاربری و توسعه اقتصادی منطقه ای و فرامنطقه ای تأکید دارند. از جمله مطالعاتی که در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر ردپای آب پرداختند می توان به تحقیق (Bocchiola et al., 2013) اشاره نمود که تأثیر تغییر اقلیم بر ردپای آب و عملکرد ذرت را بررسی کردند. در این تحقیق از مدل CropSyst و سه سناریوی بدون آبیاری، آبیاری دستی در زمان های ثابت و آبیاری اتوماتیک استفاده کردند و همچنین اثر تغییر اقلیم را با استفاده از ۴ مدل HadCM3, CCSM3, PCM و ECHAM5 بر اساس سناریوی A2 مورد بررسی قرار دادند.

خاکستری است. ردپای آب آبی ناشی از حجم آب آبیاری (آب های سطحی و زیرزمینی) است. ردپای آب سبز حجم آب حاصل از بارش می باشد و ردپای آب خاکستری نیز به حجم آب شیرین که برای رقیق سازی کود شیمیایی در تولید محصولات استفاده می گردد معرفی می شود (Gerhani Nezhad Moshizi et al., 2022). از جمله مطالعاتی که در زمینه شاخص ردپای آب در سال های اخیر توسط متخصصین و محققین مورد بررسی قرار گرفته است می توان به (Hoekstra & Chapagain 2007; Hoekstra & Chapagain 2012; Chico et al., 2013; Bazrafshan et al., 2019b; Aligholinya et al., 2019) اشاره نمود. فولتون و همکاران (Fulton et al., 2019) ردپای آب و ارزش اقتصادی بادام را در ۱۲ منطقه از کالیفرنیا را بررسی کردند. متوسط ردپای آب بادام ۱۰/۲۴ مترمکعب بر کیلوگرم و ارزش اقتصادی ۰/۴۲ دلار بر مترمکعب محاسبه شده بود. هم چنین نتایج نشان داد در مقایسه با ۴۳ محصول کشاورزی دیگر در کالیفرنیا، محصول بادام بالاترین ارزش اقتصادی را در بین آجیل ها و توت ها دارد. رحیمی پور انارکی و همکاران (Rahimipour Anaraki et al., 2020) جهت بهره برداری بهینه از منابع آبی موجود در شهرستان قلعه گنج به ارزیابی آب مجازی و ردپای آب محصولات کشاورزی در طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ پرداختند. نتایج نشان داد غلات و نخیلات بیشترین سطح زیر کشت را در این منطقه در طی دوره آماری مورد نظر را دارند که بیش از نیمی از سطح ۴۸۰۰۰ هکتاری زمین های زیر کشت و بیش از ۶۰ درصد مجموع ردپای آب را شامل می شود در صورتی که عملکرد آنها ضعیف است. در مقابل محصولات ذرت علوفه ای، پیاز و خربزه با ۳۸/۵ درصد از عملکرد محصولات کشاورزی بیشترین مقدار بهره وری آب را به خود اختصاص داده است. تغییرات آب و هوایی پدیده ای است که در الگوی آب و هوایی تغییر ایجاد کرده و در آینده ادامه دارند (de Oliveira et al., 2019). مدل های جهانی اقلیم (GCM)، مدل های معتبری

حال حاضر علاوه بر کاهش روند توسعه کشاورزی، باعث ایجاد خسارات و زیان‌هایی در آینده می‌شود. بنابراین نیاز است با استفاده از تدابیر اصولی و معقول، برای عبور از بحران‌های احتمالی در آینده راهکارهایی را در نظر گرفت. با توجه به مطالعات انجام شده تنش‌های روزافزون بر منابع آب شیرین همراه با افزایش تقاضای محصولات کشاورزی و تغییر اقلیم در سراسر جهان مشاهده می‌شود. لذا ضرورت بینشی نو و به کارگیری معیارهای جامعی مانند ردپای آب برای مشخص کردن مقدار واقعی آب مصرفی محصولات کشاورزی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی وجود دارد. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی ردپای آب سبز و ردپای آب آبی محصول زعفران در دشت بیرجند در دوره آماری (۲۰۲۱-۲۰۰۵) به عنوان یکی از محصولات استراتژیک این منطقه از جنبه منابع آب است. همچنین جهت بررسی اثر تغییر اقلیم در آینده بر ردپای آب زعفران از سه سناریوی SSP1-2.6<sup>۳</sup>، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره آماری (۲۰۲۲-۲۰۳۸) استفاده شده است و پیش‌بینی عملکرد زعفران در آینده تحت این سه سناریو توسط مدل NIO<sup>۴</sup> انجام شده است.

### منطقه مورد مطالعه

دشت بیرجند با مساحت ۱۰۴۵ کیلومترمربع، واقع در استان خراسان جنوبی می‌باشد. ارتفاع متوسط این دشت از سطح دریا ۱۴۰۰ متر و در بین دو رشته کوه باقران و شکراب به صورت نوار باریکی در جهت شرقی-غربی امتداد دارد (Zia et al., 2006). دارای طول جغرافیایی ۴۵° ۷۵' تا ۵۰° ۶۰' و عرض جغرافیایی ۱۰° ۳۱' تا ۱۵° ۳۳' است. اقلیم منطقه به روش دومارتن خشک می‌باشد و میانگین دمای سالانه ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد و بارش

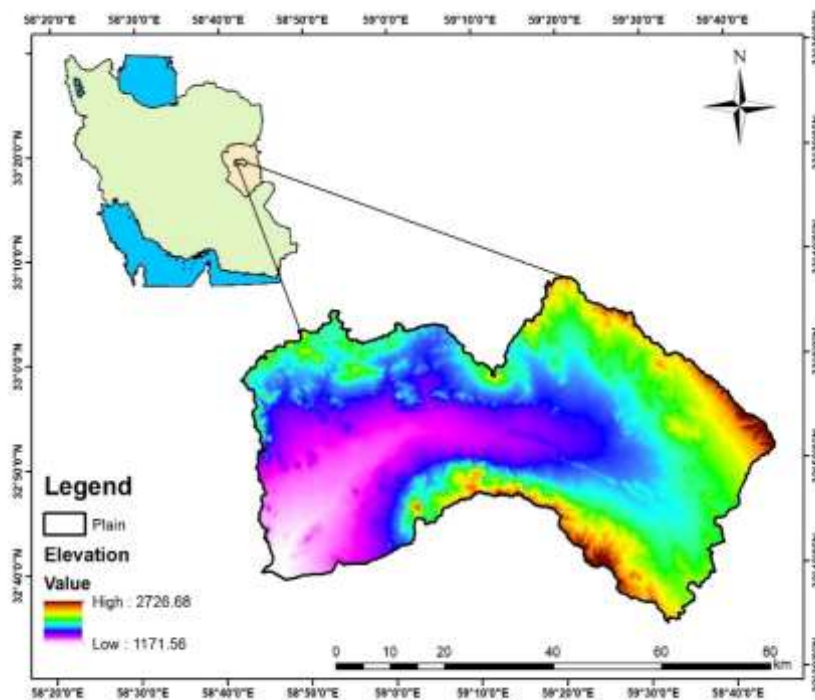
نتایج آن‌ها نشان داد دما در دوره آینده افزایش و بارش کاهش می‌یابد و در نهایت به دلیل افزایش تبخیر-تعرق و نیاز آبی ردپای آب افزایش و عملکرد کاهش خواهد یافت (Mail et al., 2021). در پژوهش خود به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر ردپای آب غلات در هند پرداختند. برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر WF<sup>۱</sup> از سناریوهای RCP4.5<sup>۲</sup> و RCP6<sup>۳</sup> توسط مدل هیبریدی-دلنا استفاده شد. نتایج نشان داد، WF غلات در آینده تحت دو سناریو در محدوده ۳/۲٪ تا ۶/۳٪ تغییر می‌کند (Govere et al., 2022). با استفاده از مدل AquaCrop اثر تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بر عملکرد گندم، آب مصرفی محصول و ردپای آب گندم در زیمباوه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد ردپای آب در اثر تغییر اقلیم در آینده کاهش می‌یابد و عملکرد گندم نیز افزایشی است در حالی که مصرف آب هم به دلیل تغییرات آب و هوایی کاهش می‌یابد. محصول زعفران یکی از کارآمدترین محصولات کشاورزی از جهت مصرف آب است. تولید زعفران در ایران دارای قدمت زیادی است و از دیرباز کشت آن در فلات مرکزی ایران مرسوم بوده است (Khanali et al., 2017). هم‌اکنون ایران از بزرگترین تولیدکننده و صادرکننده زعفران در جهان است که حدود ۹۰ درصد از تولید و سطح زیرکشت زعفران در دنیا به ایران تعلق دارد و درآمد حاصل از صادرات آن، ۴۰ درصد از صادرات غیرنفتی ایران را شامل می‌شود (Baghalian et al., 2010). خراسان با تولید حدود ۹۱ درصد از زعفران جهان در هر سال (Bazrafshan et al., 2019a; Bazrafshan & Moshizi., 2019c)، بازار جهانی زعفران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. محصول زعفران از محصولات صادراتی با ارزش اقتصادی بالا برای مزارع خراسان می‌باشد که ۷ درصد از اراضی زیرکشت خراسان در سال ۲۰۱۷ را به خود اختصاص داده است (MAJ, 2017). کمبود منابع آب در

3- Shared Socioeconomic Pathways  
4- Nonlinear input-output

1-Water footprint  
2- Representative Concentration Pathway

ارتفاعات شمالی منطقه بند دره با ارتفاع ۲۷۸۷ متر به عنوان مرتفع‌ترین نقطه و در خروجی دشت در روستای فدشک با ارتفاع ۱۲۴۰ متر نیز به عنوان پست‌ترین نقطه در این منطقه می‌باشد (Sadeghiyan et al., 2013). موقعیت دشت بیرجند در شکل ۱ نشان داده شده است.

متوسط سالانه ۱۷۱ میلی‌متر و همچنین میانگین تبخیر سالانه در این منطقه ۱۷۴۵/۳۸ میلی‌متر می‌باشد (Jafarzadeh et al., 2015). از نظر پوشش گیاهی شامل سه بخش اصلی نیمه بیابانی و حاشیه کویری، نیمه‌بیابانی و کوهپایه‌ای و کوهستانی می‌باشد (Bahmanyar, 2002). از جهت توپوگرافی شامل



شکل ۱- موقعیت دشت بیرجند  
Figure 1- Location of Birjand plain.

سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ابتدا عملکرد زعفران توسط مدل سری زمانی ورودی-خروجی غیرخطی (Nonlinear input-output) محاسبه شد. جهت تولید داده‌های هواشناسی برای سال‌های آینده از مدل MIROCES2L که از سری مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) استفاده شد. مدل‌های CMIP6<sup>۱</sup> در مقابل مدل‌های CMIP5<sup>۲</sup> دارای تعداد لایه‌های عمودی بهبود یافته است که چشم‌انداز دقیق‌تری در استراتوسفر دارند و تعداد سناریوهای دوره‌های آینده گسترش

## مواد و روش

### داده‌های مورد نیاز

در این تحقیق برای محاسبه نیاز آبی و تبخیر-تعرق محصول زعفران در دشت بیرجند از مدل CropWat8.0 استفاده شده است. بدین منظور از داده‌های هواشناسی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی ایستگاه سینوپتیک بیرجند در طی دوره آماری (۲۰۲۱-۲۰۰۵) استفاده گردید. جهت برآورد ردپای آب در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از سه

CMhyd مقادیر رطوبت را در آینده شبیه سازی نمی کند بنابراین رطوبت نسبی در آینده تحت سه سناریوی اقلیمی از مدل Minitab و با استفاده از روش رگرسیون خطی که بین دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای میانگین با رطوبت نسبی برقرار شده است، محاسبه گردید.

### فرضیات مدل CMhyd

۱- برای مقیاس گاهی با استفاده از مدل CMhyd نیاز است تا داده های مشاهداتی و تاریخی بین ۲۰ تا ۳۰ سال با هم همپوشانی داشته باشند. اگر دوره همپوشانی کمتر از ۱۰ سال باشند نتایج آن قابل اعتماد نخواهد بود.

۲- در فرآیند مقیاس گاهی بارش و دما با استفاده از این نرم افزار لازم است به این نکته توجه شود، از آنجا که تقویم برخی از مدل های گردش ۳۶۵ روزه بوده و سال کبیسه را در نظر نمی گیرند، لذا در سال های کبیسه در فایل متنی ایجاد شده برای بارش و دمای مدل در مقابل روز ۲۹ فوریه عدد -۹۹ درج شود.

۳- برای مطالعات رخداد های شدید (Extreme event) اقلیمی توصیه می شود از روش های Precipitation Local Distribution Mapping و Power Transform Intensity استفاده شود، در حالیکه برای مطالعات در مقیاس کلان و مرتبط با میانگین های اقلیمی، روش Delta Change عموماً مناسب است. در عین حال انتخاب روش مقیاس گاهی از طریق مقیاس گاهی داده های مدل در دوره هیستوریکال امکان پذیر است.

قابل توجهی دارند (Su et al., 2021, Gupta et al., 2020). بنابراین داده های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش برای ایستگاه بیرجند در سری زمانی روزانه آینده توسط مدل MIROCES2L تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سایت <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=form> این مدل در جدول ۱ آورده شده است. جهت ریزمقیاس نمایی این داده ها نیز در این تحقیق از مدل ۳ Cmhyd استفاده شد. این مدل دارای ۸ روش مختلف مقیاس گاهی برای داده های دما و بارش است که برخی از این روش ها برای ریزمقیاس نمایی پارامترهای دما و برخی برای ریزمقیاس نمایی پارامترهای بارش می باشد. با توجه به هدف از تحقیق باید به انتخاب روش ریزمقیاس گاهی توسط این مدل دقت نمود. این مدل از سه نوع داده تشکیل می شود که شامل داده های دیده بانی، داده های دوره گذشته مدل اقلیمی (هیستوریکال) و داده های سناریوی (آینده) است. داده ها به دو فرمت NetCDF<sup>۱</sup> و متنی ASCII<sup>۲</sup> می باشند و این مدل داده ها را تا سطح ایستگاه ریزمقیاس می کند. در این تحقیق ریزمقیاس نمایی داده ها براساس فرمت ASCII و به صورت روزانه و با انتخاب روش Linear Scaling انجام شد. داده های هیستوریکال از سال های ۱۹۹۰-۲۰۱۴ می باشد و خروجی شبیه سازی شده پارامترهای هواشناسی در طی دوره آینده تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای سال های ۲۰۲۲-۲۰۵۰ در نظر گرفته شده است. پس از ریزمقیاس نمایی داده های هواشناسی برای محاسبه نیاز آبی و تبخیر-تعرق محصول زعفران در آینده توسط مدل CropWat8.0 جهت محاسبه ردپای زعفران نیاز است تا داده های رطوبت نسبی منطقه مطالعاتی نیز در سال های آینده همراه با دیگر داده های هواشناسی ریزمقیاس شده به عنوان ورودی به مدل CropWat8.0 داده شود. از آنجایی که نرم افزار



جدول ۱- مشخصات مدل انتخاب شده از مدل های CMIP6  
Table 1- Specifications of selected models from CMIP6 models

مدل Model	نام مؤسس Name of the founder	سناریوهای شبیه سازی Simulation scenarios	وضوح افقی Horizontal resolution
MIROC-ES2L	مدل برای تحقیقات میان رشته‌ای در مورد آب و هوا ژاپن (MIROC), Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), Japan	SSP1-2.6 SSP2-4.5 SSP5-8.5	۲۵۰ کیلومتر (Km) 250

## نیاز آبی و ردپای آب

با توجه به اینکه کشاورزی عمده‌ترین بخش مصرف‌کننده آب است بنابراین تولیدات این بخش دارای ردپای آب قابل توجهی می‌باشد. این شاخص یک شاخص جامع شامل مجموع مقادیر آبی به صورت مستقیم (نیاز آبی گیاه) و به صورت غیرمستقیم برای تولید نهایی محصول است. لذا در ارزیابی ردپای آب محصول باید هر دو بخش مصرف مستقیم و غیرمستقیم مورد محاسبه قرار گیرد. ابتدا برای محاسبه نیاز آبی گیاهان برآورد مقدار دقیق تبخیر-تعرق مرجع ضروری است. با محاسبه دقیق مقدار تبخیر-تعرق روزانه و در متداد آن محاسبه دقیق نیاز آبی گیاهان شرایط را برای طراحی مناسب تأسیسات آبیاری فراهم نموده و در کنار کاهش هزینه‌های اجرا، امکان ارائه برنامه مناسب و بهینه بهره‌برداری از منابع آب بخش آبیاری و کشاورزی را مهیا می‌کند. در این تحقیق به منظور تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع از نرم افزار CropWat8.0 استفاده شده است. پارامترهای ورودی به مدل شامل داده‌های میانگین دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی است. مشخصات مربوط به گیاهان و خاک نیز از مقادیر پیشنهادی فائو به عنوان پیش فرض در مدل لحاظ شده، استفاده گردید (FAO, 2010). نرم افزار CropWat8.0 با استفاده از روش فائو پنمن-مانتیت که مورد تأیید کمیته بین المللی سازمان خواربار جهانی<sup>۳</sup> (ICID) و جامعه مهندسی شهری آمریکا<sup>۴</sup>

(FAO) است، به محاسبه تبخیر-تعرق می‌پردازد. رابطه ۱

معادله فائو پنمن-مانتیت را نشان می‌دهد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

در این رابطه  $ET_0$ : تبخیر-تعرق مرجع بر حسب  $[mm \text{ day}^{-1}]$ ; تابش خالص در سطح پوشش گیاهی بر حسب  $T$ :  $[M] m^{-2} \text{ day}^{-1}$ ; متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب  $[0C]$ ;  $U_2$  متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب  $[m s^{-1}]$ ;  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری بر حسب  $[kpa]$ ;  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار بر حسب  $[kpa \text{ } 0C^{-1}]$ ;  $\gamma$ : ضریب سایکرومتری بر حسب  $[kpa \text{ } 0C^{-1}]$  و  $G$ ، شار گرما به داخل خاک بر حسب  $[MJ m^{-2} \text{ day}^{-1}]$  می‌باشد. شاخص ردپای آب (WF) شامل مجموع آب آبی، آب سبز و آب خاکستری است که در این تحقیق ردپای آب خاکستری در نظر گرفته نشده است. رابطه ۲ و ۳ بیانگر شاخص فقر آبی است (Chapagain et al., 2006).

$$WF = \sum WF_i \quad (2)$$

$$WF = WF_{blue} + WF_{green} \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳،  $WF_i$  ردپای آب کل محصول  $i$  می‌باشد.  $WF_{blue}$  بیانگر ردپای آب آبی است که شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود.  $WF_{green}$  ردپای آب سبز است که شامل

3- International Commission on Irrigation and Drainage  
4- Food and Agricultural Organization

1- Network Common Data Form  
2- American Standard Code for Information Interchange

حجمی از آب باران مؤثر است که به شکل رطوبت در خاک ذخیره می‌گردد. در رابطه ۳ ردپای آب واحدی از محصول است که بیانگر حجم آب در جرم محصول می‌باشد و بر حسب  $m^3 \cdot ton^{-1}$  است. لذا از حاصل تقسیم ردپای آب محصول بر مقدار عملکرد آن محصول استفاده می‌گردد که در رابطه ۴ آورده شده است (Montaseri et al., 2015).

$$WF = \frac{WFi}{Y} \quad (4)$$

هر جزء ردپای آب آبی و ردپای آب سبز از طریق روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند.

$$WFi_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (5)$$

$$WFi_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (6)$$

در روابط ۵ و ۶ به ترتیب  $CWU_{blue}$  و  $CWU_{green}$ ، بیانگر جزء آب آبی و جزء آب سبز محصول بر حسب  $(m^3 \cdot ton^{-1})$  است. همچنین  $Y$  عملکرد گیاهان زراعی بر حسب  $(ton \cdot ha^{-1})$  می‌باشد. برای محاسبه اجزاء مصرف آب محصول (CWU) آبی و سبز از روابط ۷ و ۸ استفاده شده است که از طریق مجموع تبخیر-تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه بدست می‌آید.

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{blue} \quad (7)$$

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} \quad (8)$$

در روابط ۷ و ۸،  $ET_{blue}$  بیانگر تبخیر-تعرق آب آبی ناشی از آب آبیاری است و بر حسب  $(mm \cdot year^{-1})$  می‌باشد. همچنین  $ET_{green}$  نیز نشان دهنده تبخیر-تعرق آب سبز حاصل از آب باران مورد استفاده گیاه است که بر حسب  $(mm \cdot year^{-1})$  است. وجود عدد ۱۰ در معادله بیانگر تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین بر حسب  $(m^3 \cdot ha^{-1})$  نیز می‌باشد. عبارت lag در این روابط معرف طول دوره رشد در واحد روز است. لذا مفهوم مجموع داده‌های تبخیر-تعرق در طول دوره رشد، مجموع تبخیر-تعرق روزانه گیاه از روز اول کاشت گیاه تا روز برداشت آن می‌باشد.

### مدل سری زمانی ورودی-خروجی غیرخطی (NIO)

مدل سری زمانی ورودی-خروجی شباهت زیادی با مدل خودرگرسیون غیرخطی (NARX) دارد. در سری زمانی NIO مقادیر ورودی به مدل از مقادیر گذشته سری زمانی استفاده می‌کند و خروجی مدل بدون در نظر گرفتن مقادیر گذشته برای پیش‌بینی به مدل داده می‌شود اما در مدل NARX برای پیش‌بینی، برای هر دو سری ورودی و خروجی از مقادیر گذشته آن‌ها استفاده می‌شود. لذا سری زمانی ورودی-خروجی شامل سری زمانی ورودی  $X(t)$  و یک سری خروجی (هدف)  $Y(t)$  است. پیش‌بینی مقادیر  $Y(t)$  با توجه به مقادیر گذشته سری زمانی  $X(t)$  و بدون در نظر گرفتن مقادیر گذشته  $Y(t)$  بدست می‌آید. رابطه کلی شبکه NIO در رابطه ۹ آورده شده است (Omolaye & Badmos, 2017).

$$Y(t) = f(X(t-1) \dots X(t-d)) \quad (9)$$

در رابطه فوق برای این تحقیق جهت محاسبه عملکرد محصول زعفران در آینده تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 سری ورودی مدل NIO شامل داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین و بارش می‌باشد و پارامتر عملکرد محصول زعفران نیز به عنوان سری خروجی (هدف) در نظر گرفته شده است. محاسبات مربوط به این بخش از تحقیق در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

### معیارهای ارزیابی مدل‌ها

جهت ارزیابی مدل اقلیمی گزارش ششم MIROCES2L در پیش‌بینی پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش از

مقادیر پیش‌بینی توسط مدل، مقادیر مشاهداتی، میانگین داده‌های پیش‌بینی شده، میانگین داده‌های مشاهداتی و تعداد داده‌های ورودی است. همچنین Sim و obs به ترتیب نشان دهنده مقادیر پیش‌بینی مدل و مشاهداتی می‌باشند.  $\sigma$  انحراف معیار،  $\mu$  میانگین و  $r$  همبستگی خطی بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده است.

### نتایج و بحث

#### تغییرات پارامترهای بارش و دما در آینده

نتایج این تحقیق در دو بخش انجام شده است که بخش اول مربوط به پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی براساس مدل CMhyd و مقایسه آن با داده‌های دوره مشاهداتی است و بخش دوم نتایج ردپای آب محصول زعفران در دوره مشاهداتی و آینده تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می‌باشد. نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل در دوره مشاهداتی نشان داد که مدل توانسته است تغییرات آب و هوایی را در منطقه مطالعاتی به خوبی پیش‌بینی کند که این نتایج در جدول ۲ آورده شده است. نتایج خروجی پارامترهای شبیه‌سازی شده بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل توسط مدل MIROCES2L تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۲) در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.

سه معیار ضریب همبستگی<sup>۱</sup> (R)، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و کلینگ-گوپتا<sup>۳</sup> (KGE) استفاده شد که در روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل NIO در شبیه‌سازی محصول زعفران از معیارهای ضریب تعیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف<sup>۵</sup> (NSE) نیز استفاده گردید. این سه معیار در روابط ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. معیار RMSE بیانگر ارزیابی دقت پیش‌بینی یک مدل با داده‌های مشاهداتی است (Raziei & Sotoudeh, 2017). از معیار KGE جهت ارزیابی شباهت داده‌های پیش‌بینی و مشاهداتی استفاده می‌گردد. هر چه مقدار این معیار برای مقادیر خروجی به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده خطای کمتر در داده‌ها است (Gupta et al., 2009). مقدار ضریب نش-ساتکلیف NSE بین منفی بی‌نهایت تا یک می‌باشد. بهترین حالت این معیار مقدار یک است و مقادیر منفی نشان‌دهنده این است که مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر شبیه‌سازی شده بهتر می‌باشد (Rajaei et al., 2019).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$KGE = 1 - \quad (12)$$

$$\sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\left[ [\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]^{0.5} \right]^2} \quad (14)$$

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right]$$

در روابط ۱۰ تا ۱۲،  $X_i$ ،  $Y_i$ ،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  به ترتیب بیانگر

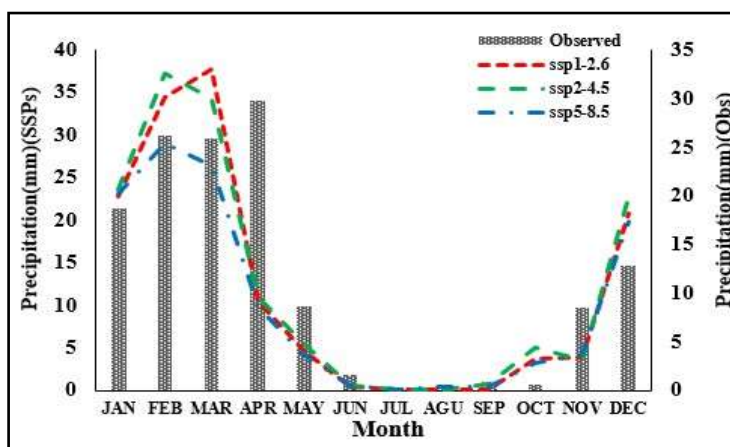
4- coefficient of determination  
5- Nash-Sutcliffe efficiency

1- Regression  
2- Root-mean-square deviation  
3- Kling-Gupta Efficiency

جدول ۲- نتایج معیارهای ارزیابی مدل MIROCES2L در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴

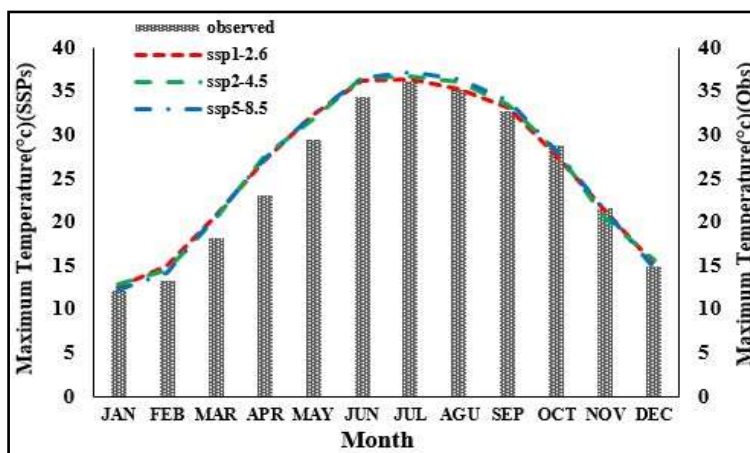
Table 2- The results of the evaluation criteria of the MIROCES2L model in the period of 1990-2014

ایستگاه Station	پارامتر Parameter	معیارهای ارزیابی Evaluation criteria		
		R	RMSE (mm,°c)	KGE
بیرجند Birjand	بارش Precipitation	0.56	17.14	0.56
	دمای حداکثر Maximum temperature	0.95	2.58	0.95
	دمای حداقل Minimum temperature	0.96	2.01	0.96



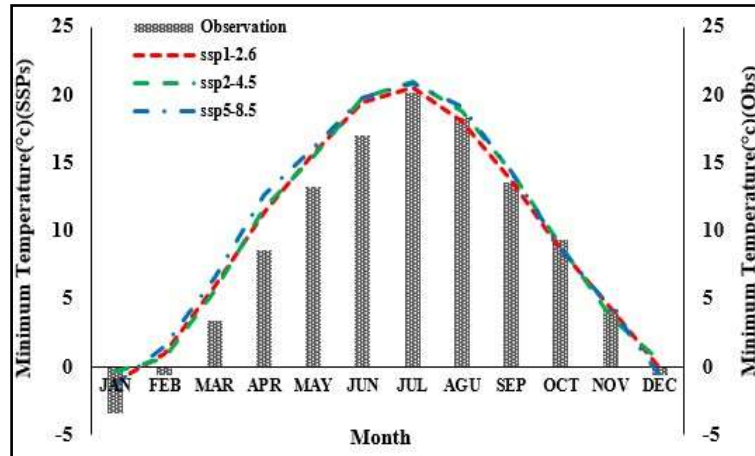
شکل ۲- مقایسه تغییرات میانگین بارش ماهانه دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۲۰۲۱) و آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰)

Figure 2- Comparison of changes in average monthly rainfall during the observation period (2005-2021) and the future (2022-2038).



شکل ۳- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه دمای حداکثر دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۲۰۲۱) و آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰)

Figure 3- Comparison of changes in the average monthly temperature of the maximum observation period (2005-2021) and the future (2022-2038).



شکل ۴- مقایسه تغییرات میانگین ماهانه دمای حداقل دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۲۰۲۱) و آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰)

Figure 4- Comparison of changes in the average monthly temperature of the minimum observation period (2005-2021) and the future (2022-2038).

درجه حرارت به ترتیب تحت سناریوی SSP2-4.5 به میزان ۰/۸ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوی SSP1-2.6 به میزان ۰/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

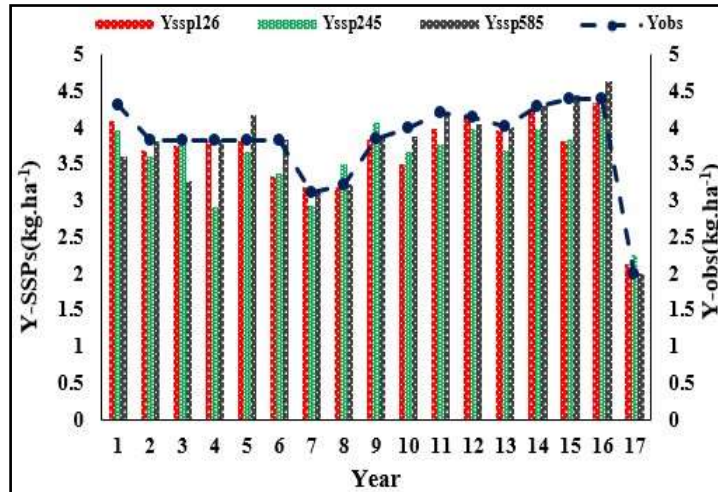
#### پیش‌بینی عملکرد و ردپای محصول زعفران

در این تحقیق پارامتر رطوبت نسبی در آینده تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با استفاده از مدل Minitab و از طریق رابطه رگرسیون خطی که بین رطوبت نسبی و پارامترهای هواشناسی در دوره مشاهداتی بدست آمد نیز محاسبه شده است. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر نیاز آبی و تبخیر-تعرق محصول زعفران که در آینده طی دوره (۲۰۳۸-۲۰۲۱) تحت سه سناریوی اقلیمی محاسبه شده است، مقادیر ردپای آب سبز، آبی آبی و ردپای آب کل زعفران که بیانگر حجم آب مصرفی به ازای وزن واحد محصول (بر حسب مترمکعب در تن) می‌باشد محاسبه گردید. جهت محاسبه ردپای آب محصول زعفران در آینده تحت سه سناریوی اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق ابتدا نیاز به پیش‌بینی مقادیر عملکرد زعفران تحت سناریوی اقلیمی مدنظر این تحقیق می‌باشد. بدین منظور با استفاده از مدل سری زمانی ورودی-خروجی غیرخطی (NIO)

در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ میزان تغییرات پارامترهای بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۲۰۲۱) نشان داده شده است. تغییرات دمای حداکثر و دمای حداقل پیش‌بینی شده توسط مدل نشان می‌دهد که این دو پارامتر در آینده دارای روند افزایشی است. پارامتر بارش پیش‌بینی شده نیز به طور کلی در فصل‌های پاییز و زمستان دارای روند افزایشی است و در فصل‌های بهار و تابستان کاهش می‌یابد. در شکل ۲ تغییرات پارامتر بارش در آینده تحت سه سناریو نشان می‌دهد که بیشترین افزایش بارش در آینده نسبت به دوره مشاهداتی در ماه فوریه تحت SSP2-4.5 به میزان ۷/۴ میلی‌متر می‌باشد و همچنین بیشترین کاهش بارش نسبت به دوره مشاهداتی تحت سناریوی SSP2-4.5 در ماه ژوئیه به میزان ۰/۰۷ میلی‌متر است. با توجه به شکل ۳ تغییرات دمای حداکثر به طور کلی در تمامی ماه‌ها افزایشی است که بیشترین افزایش درجه حرارت در ماه ژوئیه تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۱ درجه سانتی‌گراد و کمترین افزایش درجه حرارت تحت سناریوی SSP1-2.6 به میزان ۰/۲ درجه سانتی‌گراد در ماه ژوئیه رخ داده است. براساس شکل ۴ برای دمای حداقل مشاهده می‌شود که بیشترین و کمترین افزایش

افزایش داشته است. مقدار ردپای آب سبز زعفران ۳۴ الی ۳۶ درصد آب مصرفی آن را شامل می‌شود. نتایج این بخش با نتایج تحقیق (Montaseri et al., 2015) مشابه می‌باشد. در شکل ۶ نسبت ردپای آب آبی به ردپای آب سبز محصول زعفران در طی دوره مشاهداتی و آینده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که محصول زعفران از نظر نوع مصرف آب، هم از آب ناشی از بارندگی و هم از آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده می‌کند. با توجه به شکل نسبت آب آبی به سبز در تمامی دوره‌ها بیشتر است. مشاهده می‌شود نسبت آب آبی به آب سبز در محصول زعفران از ۱/۹۱ در دوره مشاهداتی تا ۲/۱۷ در دوره آینده افزایش یافته است. بیشترین افزایش نسبت آب آبی به آب سبز در دوره آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP2-4.5 رخ داده است. لذا بر اساس نتایج حاصل از نیاز آبی و ردپای آب در آینده، می‌توان نتیجه گرفت که وقوع تغییر اقلیم همراه با افزایش دمای حداقل و دمای حداکثر و همچنین روند افزایشی و کاهش بارش در برخی از فصل‌ها در آینده در دشت بیرجند باعث ناپایداری آب آبی و استفاده بیشتر از آن خواهد شد و دلیل آن مصرف بیش از حد منابع آب سطحی و زیرزمینی به واسطه افزایش مصرف آب آبی (ردپای آب) که اکثراً ناشی از تغییرات نیاز آبی محصول در بخش کشاورزی در اثر افزایش درجه حرارت دما و نیز کاهش بارندگی‌ها در منطقه است. بنابراین کاهش و ایجاد تعادل در مصرف آب با توجه به میزان پتانسیل منابع آب موجود در منطقه مطالعاتی یکی از مهم‌ترین راهکارها است. از جمله روش‌هایی که باعث کاهش ردپای آب در دشت بیرجند می‌شود می‌توان به روش‌های کم آبیاری، کاهش سطح زیرکشت، تغییر تقویم زراعی و تغییر در الگوی کشت اشاره نمود.

مقادیر عملکرد زعفران در آینده طی سال‌های (۲۰۳۸-۲۰۲۲) پیش‌بینی گردید. جهت ارزیابی مقادیر عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل از معیارهای ارزیابی  $R^2$ ، RMSE و NSE استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل توانسته است پیش‌بینی خوبی داشته باشد. نتایج حاصل از پیش‌بینی عملکرد زعفران در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد زعفران در آینده تحت تأثیر سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به طور میانگین به ترتیب به میزان ۰/۱۳، ۰/۲۱ و ۰/۰۵ کیلوگرم بر هکتار نسبت به دوره مشاهداتی کاهش داشته است. لذا نتایج حاصل از پیش‌بینی عملکرد محصول زعفران در آینده بیانگر این است که در اثر تغییر اقلیم و افزایش دما و تبخیر-تعرق نیاز آبی افزایش یافته است. در جدول ۴ مقادیر محاسبه شده ردپای آب محصول زعفران آورده شده است. محصول زعفران در منطقه خراسان جنوبی جزء محصولات است که بیشترین سطح زیرکشت را دارد. این محصول دارای طول دوره رشد طولانی است و دوره رشد آن بیشتر در ماه‌های مرطوب و پر بارش سال یعنی ماه‌های اکتبر تا اوایل آوریل می‌باشد. بنابراین ردپای آب زعفران بیشتر تحت تأثیر بارندگی‌های سالانه است و میزان افزایش یا کاهش بارش می‌تواند اثر قابل توجهی را در ردپای آب زعفران داشته باشد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که مقادیر نیاز آبی، ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، ردپای آب کل و در نهایت مقادیر نسبی محصول زعفران در دوره آینده (۲۰۳۸-۲۰۲۲) نسبت به دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۰۵) تحت تأثیر تغییر اقلیم و سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایشی است. مشاهده می‌شود نیاز آبی زعفران از میزان ۱۲۸/۵۷ میلی متر در دوره مشاهداتی به میزان ۲۴۳/۱۶ میلی متر در دوره آینده



شکل ۵- پیش بینی عملکرد محصول زعفران توسط مدل NIO تحت تأثیر سناریوهای SSPs در آینده نسبت به دوره پایه

Figure 5- Prediction of saffron crop yield by NIO model under the influence of SSPs scenarios in the future compared to the base period.

جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد مدل NIO در پیش بینی عملکرد محصول زعفران

Table 3- Results of NIO model performance evaluation in predicting saffron crop yield

محصول Crop	سناریوها Scenarios	آزمایش Train			اعتبارسنجی Validation			آزمون Test			همه All		
		R <sup>2</sup>	RMSE (kg.ha <sup>-1</sup> )	NSE	R <sup>2</sup>	RMSE (kg.ha <sup>-1</sup> )	NSE	R <sup>2</sup>	RMSE (kg.ha <sup>-1</sup> )	NSE	R <sup>2</sup>	RMSE (kg.ha <sup>-1</sup> )	NSE
زعفران Saffron	SSP1-2.6	0.71	0.23	0.76	0.94	0.03	0.89	0.95	0.34	0.86	0.88	0.24	0.80
	SSP2-4.5	0.65	0.39	0.61	0.70	0.27	0.63	0.96	0.36	0.82	0.75	0.36	0.66
	SSP5-8.5	0.63	0.29	0.60	0.84	0.06	0.75	0.98	0.13	0.98	0.84	0.24	0.83

جدول ۴- مقادیر ردپای آب زعفران در دوره پایه و تحت سناریوهای اقلیمی آینده

Table 4- Water footprint values of saffron in the base period and under future climate scenarios

محصول Crop	سناریوها Scenarios	نیاز آبی محصول Crop water requirement (mm.year <sup>-1</sup> )	ردپای آب آبی Blue WF (m <sup>3</sup> .ton <sup>-1</sup> )	ردپای آب سبز Green WF (m <sup>3</sup> .ton <sup>-1</sup> )	ردپای آب کل Total WF (m <sup>3</sup> .ton <sup>-1</sup> )	ردپای آب آبی Blue WF (%)	ردپای آب سبز Green WF (%)	نسبت ردپای آب آبی به ردپای آب سبز Ratio of blue WF to green WF (%)
زعفران Saffron	Observed	128.57	359772.5	237587.7	597360.1	85.05	41.94	1.91
	SSP1-2.6	239.14	657194.1	365637	1022831.09	64.77	35.22	2.04
	SSP2-4.5	243.12	694684.9	348228.3	1042913	65.91	34.08	2.17
	SSP5-8.5	243.16	674343.9	345671.3	1020015.1	65.43	34.56	2.01



شکل ۶- میزان ردپای آب سبز، ردپای آب آبی و ردپای آب کل زعفران در آینده (۲۰۲۲-۲۰۳۸) نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۲۰۲۱)  
 Figure 6- Green water footprint, blue water footprint, and total water footprint of saffron in the future (2022-2038) compared to the observation period (2005-2021).

### نتیجه گیری

نهایت داده‌های ریزمقیاس شده مدل CMhyd برای ورود به مدل CropWat8.0 استفاده شد. مقادیر ساعات آفتابی و سرعت باد برای دوره آینده مشابه دوره مشاهداتی در نظر گرفته شد و مقادیر رطوبت نسبی با استفاده از مدل Minintab و روش رگرسیون خطی بین داده‌های هواشناسی و رطوبت نسبی در دوره مشاهداتی مورد محاسبه قرار گرفت. عملکرد محصول زعفران در آینده توسط مدل سر زمانی ورودی-خروجی غیرخطی تحت سه سناریوی اقلیمی آینده پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که میزان عملکرد زعفران در دشت بیرجند در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۳۸) در هر سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی در اثر افزایش دما و تغییرات افزایشی و کاهش بارش، کاهش یافته است. در ادامه افزایش نیاز آبی در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی، ردپای آب آبی و ردپای آب سبز و ردپای کل محصول زعفران در دشت بیرجند تحت تغییر اقلیم در دوره آینده تقریباً به میزان ۲ برابر نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است. به گونه‌ای که نتایج نشان داد نسبت میزان مصرف آب آبی به آب سبز در محصول زعفران در هر سه سناریو در آینده نسبت به دوره مشاهداتی از ۱/۹۱ تا ۲/۰۴ افزایش یافت. لذا با وجود تغییر اقلیم، افزایش دما، افزایش

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر تغییر اقلیم بر ردپای آب محصول زعفران در دشت بیرجند است. ابتدا با استفاده از مدل MIROCES2L از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم و تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 داده‌های هواشناسی دانلود شدند و سپس با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی CMhyd و از طریق روش Linear Scaling داده‌ها در طی دوره آماری آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) ریزمقیاس شدند. نتایج حاصل از این بخش نشان داد که پارامترهای دمای حداقل و دمای حداکثر به طور کلی در تمام ماه‌های سال در آینده نسبت به دوره مشاهداتی دارای روند افزایشی است و پارامتر بارش در فصل‌های پاییز و زمستان افزایش و در فصل‌های بهار و تابستان روندی کاهشی دارد. در بخش دوم این تحقیق جهت محاسبه و ارزیابی ردپای آب محصول زعفران ابتدا برای محاسبه تبخیر-تعرق از مدل CropWat8.0 استفاده گردید. برای این منظور از داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد استفاده شد. برای محاسبه نیاز آبی و تبخیر-تعرق در آینده از خروجی مدل MIROCES2L و در



اجرای شوند. همچنین جهت بالابردن راندمان آبیاری با بهبود سیستم‌های آبیاری و جایگزینی سیستم‌های تحت فشار به جای سیستم‌های سنتی، می‌توان باعث کاهش ردپای آب محصولات در دشت مورد مطالعه شد؛ زیرا پدیده تغییر اقلیم، پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است و از طریق بالابردن راندمان آبیاری و مدیریت بهینه آب و آبیاری می‌توان ردپای آب محصولات را کاهش داد.

نیاز آبی و همچنین افزایش ردپای آب و در ادامه آن تشدید و وضعیت مصرف آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت بیرجند در طی سال‌های آینده، لذا ضروری است تا برای پیاده سازی الگوی مناسب مصارف آبی در دشت و به کار گرفتن راه کارهای مناسب و مؤثر جهت کاهش ردپای آب در منطقه مطالعاتی نیز روش‌هایی مبنی بر کاهش سطح زیرکشت، کم آبیاری، تغییر الگوی کشت و تغییر تقویم زراعی نیز مطرح و

## منابع

- Aligholinya, T., Sheibany, H., Mohamadi, O., & Hesam, M. (2019). Comparison and evaluation of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran. *Iran-Water Resources Research*, 15(3), 234-245. <https://doi.org/10.20.1001.1.17352347.1398.15.3.18.9>.
- Azari, M., Moradi, H.R., Saghafian, B., & Faramarzi, M. (2016). Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the North of Iran. *Hydrological Sciences*, 61(1), 123-133. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.967695>.
- Ayala, L.M., van Eupen, M., Zhang, G., Pérez-Soba, M., Martorano, L.G., Lisboa, L.S., & Beltrao, N.E. (2016). Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 569, 1159-1173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.191>.
- Babaei, M., Maroufpoor, S., Jalali, M., Zarei, M., & Elbeltagi, A. (2021). Artificial intelligence approach to estimating rice yield. *Irrigation and Drainage*, 70(4), 732-742. <https://doi.org/10.1002/ird.2566>.
- Bahmanyar, M. (2002). Birjand Negin Kavir. Tehran University Publications, Tehran, Iran. pp. 254. [In Persian].
- Bazrafshan, O., Etedali, H.R., Moshizi, Z.G.N., & Shamili, M. (2019a). Virtual water trade and water footprint accounting of Saffron production in Iran. *Agricultural Water Management*, 213, 368-374. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.034>.
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Etedali, H.R., & Dehghanpir, S. (2019b). Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. *Scientia Horticulturae*, 250, 344-351. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.069>.
- Babazadeh, H., & Saraeetabrizi, M. (2013). Calibration of SWAP model for simulating crop yield, biological yield and soybean water use efficiency. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4), 83-96. <https://doi.org/10.1001.1.25885952.1391.35.4.9>.
- Baghalian, K., Sheshtamand, M.S., & Jamshidi, A.H. (2010). Genetic variation and heritability of agro-morphological and phytochemical traits in Iranian saffron (*Crocus sativus* L.) populations. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.12.010>.
- Bazrafshan, O., & Moshizi, Z.G.N. (2019c). Assessment of water use efficiency and water footprint of saffron production in Iran. *Saffron Agronomy and Technology*, 7(4), 505-519. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22048/jsat.2019.141824.1311>.

- Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A. (2013). Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, 116, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.009>.
- Chen, H., & Sun, J. (2015). Assessing model performance of climate extremes in China: an intercomparison between CMIP5 and CMIP3. *Climatic Change*, 129, 197-211. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1319-5>.
- Chico, D., Aldaya, M.M., & Garrido, A. (2013). A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products. *Journal of Cleaner Production*, 57, 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.001>.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60(1), 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>.
- De Oliveira, V.A., de Mello, C.R., Beskow, S., Viola, M.R., & Srinivasan, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering*, 133, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>.
- Fulton, J., Norton, M., & Shilling, F. (2019). Water-indexed benefits and impacts of California almonds. *Ecological Indicators*, 96, 711-717. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.063>.
- FAO. (2010). 'CROPWAT 8.0 model', FAO, Rome, [www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html).
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
- Gerkani Nezhad Moshizi, Z., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Esmailpour, Y., & Collins, B. (2022). The effect of past climate change on the water footprint trend in saffron at homogeneous agroclimatic regions of Khorasan. *Journal of Saffron Research*, 10(2), 295-311. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22077/jsr.2022.5742.1199>.
- Govere, S., Nyamangara, J., & Nyakatawa, E.Z. (2022). Beneficial effect of climate change on wheat yield and water footprints in the Middle-Manayame sub-catchment, Zimbabwe. *Journal of Water and Climate Change*, 13(8), 2895. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.038>.
- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M.K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21<sup>st</sup> century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590(1), 125422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422>.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., & Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M., Chapagain, A.K., Mathews, R.E., & Richter, B.D. (2012). Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS One*, 7(2), e32688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032688>.
- Hoekstra, A.Y., & Chapagain, A.K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Integrated Assessment of Water Resources and Global Change: A north-south analysis*, 35-48.

- [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3).
- IPCC. (2001). Climate change, Impacts Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/doi.org/10.1002/joc.775>.
- Jafarzadeh, A., Khashei-Siuki, A., & Shahidi, A. (2015). Modeling of climate change effects on saffron water requirement in south Khorasan province by GIS. *Journal of Saffron Research*, 3(2), 163-174. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22077/jsr.2015.292>.
- Khanali, M., Shahvaroghi Farahani, S., Shojaei, H., & Elhami, B. (2017). Life cycle environmental impacts of saffron production in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 4812-4821. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8228-2>.
- Mail Santosh, S., Shrsath Paresh, B., & Islam, A. (2021). A high-resolution assessment of climate change impact on water footprints of cereal production in India. *Scientific Reports*, 11, (8715). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88223-6>.
- Mekonnen, M.M., & Gerbens-Leenes, W. 2020. The water footprint of global food production. *Water*, 12(10), 2696. <https://doi.org/10.3390/w12102696>.
- Maleki, F., Kazemi, H., Siahmargue, A., & Kamkar, B. (2019). Investigation of climatic factors of Azadshahr township (Golestan province) in order to development of saffron cropping. *Journal of Saffron Research*, 7(1), 123-143. (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.22077/jsr.2018.1420.1056>.
- Montaseri, M., Rasouli Majd, N., Behmanesh, J., & Rezaie, H. (2015). Evaluation of agricultural crops water footprint with application of climate change in Urmia lake basin. *Journal of Water and Soil*, 30(4), 1075-1089. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i4.45420>.
- Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-763-2011>.
- Op de Hipt, F., Diekkruiger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., & Rode, M. (2018). Modeling the impact of climate change on water resources and soil erosion in a tropical catchment in Burkina Faso, West Africa, *CATENA*, 163, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.023>.
- Op de Hipt, F., Diekkruiger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M., & Naschen, K. (2019). Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN, *Science of Total Environment*, 653, 431-445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.351>.
- Omolaye, O.P., & Badmos, T.A. (2017). Predictive Comparative Analysis of NARX and NIO Time Series Prediction. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(9), 155-165.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., & van Vuuren, D.P. (2017). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-82. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- Rahimipour Anaraki, M.R., Mohammadi, A., Rafieian, M., Arjmandi, R., & Karimi, S. (2020). Evaluation of virtual water and water footprint of crop production (Case study: Qaleganj County). *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 11(41), 77-92.
- Rajaei, T., Ebrahimi, H., & Nourani, V. (2019). A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling. *Journal of Hydrology*, 572, 336-351. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.037>.
- Raziei, T., & Sotoudeh, F. (2017). Investigation of the accuracy of the European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) in forecasting observed precipitation in different

- climates of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(1), 133-147. <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2017.57958>.
- Sadeghiyan, A., Vagheiy, Y., & Mohammadzadeh, M. (2013). Spatial-temporal prediction of groundwater level in Birjand region using Kriging method. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 24(1), 94-100. [In Persian]. [https://www.wwjournal.ir/article\\_2343.html?lang=en](https://www.wwjournal.ir/article_2343.html?lang=en).
- Su, B., Huang, J., Mondal, S.K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., & Li, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105375>.
- Wang, X.Y. (2010). Irrigation water use efficiency of farmers and its determinants: Evidence from a survey in northwestern China. *Agricultural Sciences in China*, 9(9), 1326-1337. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60223-6](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60223-6).
- Zia, H., Lashkaripour, G.H., & Rostami Barani, H.R. (2006). Geoelectric Study Artificial recharge Flood Distribution in the Birjand for Detection of hydrogeological conditions. Tenth Symposium of Geological Society of Iran, Tarbiat Modarres University. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=form>. [In Persian].