



"Research Paper"



Assessment and Simulation of the Effects of Climate Change on the Economic Productivity of Crop Water Resources Using Water and Carbon Footprint in Northeastern Iran

Elahe Ahani¹, Saman Ziaee², Hamid Mohammadi³, Mostafa Mardani Najafabadi⁴ and Abbas Mirzaei⁵

1, 2 and 3- PhD Student, Associate Professor and Assistant Professor respectively, Department of Agricultural Economics, Zabol University, Iran

4- Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, (Corresponding author: m.mardani@asnruk.ac.ir)

5- Assistant Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, Khuzestan University of Agricultural Sciences and
Received: 9 December 2023 Accepted: 29 January 2024

Extended Abstract

Introduction and Objective: Increasing temperature, solar radiation, and changes in rainfall patterns are among the most important factors affecting increasing plant water requirement, evapotranspiration and changes in volume and runoff, and soil moisture, which in turn have changed the demand and supply of water in the agricultural sector of northeastern Iran. Therefore, the sum of these cases necessitates awareness of the effects of climate change on agriculture and water resources. Considering the water crisis in Iran and its northeastern catchments, especially the Kashf Roud catchment, which is one of the most critical basins, attention to water productivity in these areas is essential. In this regard, to calculate the amount of water consumed in different growth stages, the water footprint index was used to evaluate the appropriate water used in the agricultural sector in different climates.

Material and Methods: Simulation of basin parameters under climatic scenarios for the period 2040-2021 has been done in WEAP software. After modelling water resources in WEAP software, to define climate change scenarios, the simulation results using the weighted combination of four AOGCM models from the project comparing the coupled models of the sixth phase (CIMP6) under three scenarios SSP1-2.6 (optimistic), SSP3-0.7 (pessimistic) and SSP5-8.5 (very pessimistic) for the baseline period (1993-2012) and future period (2021-2040). The output observations of the sixth report models are under new scenarios (SSPs), which are the trajectories of the common socio-economic sectors, i.e., socially sustainable pathways, and describe different scenarios for future economic development, population and technology, and different concentrations of greenhouse gases. The conceptual framework of the present study was to calculate the economic and physical productivity of crop water resources using water footprint and carbon in climate change conditions. This approach was developed in the Kashf Roud catchment area located in northeastern Iran for 2019-2020.

Results: The results showed that the water requirement of crops increased in all climate scenarios (CMIP6) and its yield decreased. Also, the highest water footprint among selected crops were sugar beet, forage corn, onion, alfalfa, tomato, and cucumber, respectively. The increase in the water footprint index of products in the basin indicated a higher volume of blue water footprint than green water footprint, which indicates increased evapotranspiration and decreased rainfall in the northeast of the country. The results showed that alfalfa (2623.2 m³/t) in a pessimistic scenario had the highest and the lowest water footprint with 502 m³/ton forage with 502 m³/ton. Potatoes, tomatoes, cucumbers, onions, and barley had the highest economic productivity in pessimistic climatic conditions, respectively. This is a sign of decreasing rainfall and increasing temperatures in 2040. Also, the lowest physical productivity in the pessimistic climate was wheat and alfalfa (309.2 and 336.2 k/m³, respectively). In other words, with changing climate conditions and increasing water demand for crops, the index of economic water productivity has been lowered. Among the studied crops, corn had the lowest share in green water footprint (1%) per hectare.

However, the share of this product from blue footprint is estimated to be 14.52%. Also, alfalfa, barley, wheat, and tomato crops (21.85, 20.36, 20.03, and 10.09%) had the highest share and significant amount of green water footprint, respectively. In contrast, the share of the aqueous water footprint of the mentioned products was estimated to be 12.3%, 2.5%, 5.7%, and 11.7%, respectively. The economic productivity index of wheat and alfalfa in the pessimistic scenario was calculated as 9276.3 and 7444.02 Rials per cubic meter. The continuation of drought conditions in the basin has led to a 48 and 56 percent reduction in its productivity. The highest water footprint and carbon footprint were potatoes, sugar beet, onion, cucumber, and corn, respectively. The least of them were wheat, barley, tomatoes, and alfalfa, respectively. According to the concept of water footprint, if less water can be used to produce a particular product, that product is a priority. Therefore, the most suitable product in the discussion of water and carbon footprint is that of wheat.

Conclusion: In this study, water consumption for agricultural products was investigated. The results showed that the share of green water footprint in alfalfa, barley, wheat, and tomato crops was more than 20% of the total water footprint share. In general, due to the consequences of climate change and the upcoming droughts, special attention should be paid to the issue of water scarcity and water resources should be managed appropriately. Also, major changes should be made in crop cultivation patterns so that crops with less water requirement and higher yields appropriate to the climate of each region will replace the other crops. The most important solution is to reduce the water footprint by reducing the demand and consumption of water and in other words, balancing the water supply according to the potential of the region's water resources. One of the practical solutions in water resources management, estimation of plant water requirement and determination of water volume consumed at different stages of production was proposed.

Keywords: Global warming, Hydrological modeling, Tahshehroud catchment



"مقاله پژوهشی"

ارزیابی و شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر بهره‌وری اقتصادی منابع آب محصولات زراعی با استفاده از ردپای آب و کربن در شمال شرق ایران

الهه آهنی^۱، سامان ضیائی^۲، حمید محمدی^۳، مصطفی مردانی نجف‌آبادی^۴ و عباس میرزایی^۵

۱، ۲، ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه زابل، ایران
 ۴- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران،
 (نویسنده مسوول: m.mardani@asnruk.ac.ir)
 ۵- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۹
 صفحه: ۳۴ تا ۵۰

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: افزایش دما، تابش خورشید و تغییر در الگوهای بارش از جمله مهمترین عوامل اثرگذار بر افزایش نیاز آبی گیاهان، تبخیر- تعرق و تغییر در حجم و رواناب‌ها و رطوبت خاک است که این تغییرات به‌نوبه خود میزان تقاضا و عرضه آب را در بخش کشاورزی شمال شرق ایران دستخوش تغییر نموده است. بنابراین، مجموعه این موارد، آگاهی از آثار تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی و منابع آب را ضروری می‌سازد. با در نظر داشتن مسئله بحران آب در ایران و حوضه‌های آبریز شمال شرق آن به‌خصوص حوضه آبریز کشف‌رود که یکی از بحرانی‌ترین حوضه‌ها می‌باشد توجه به بهره‌وری آب در این نواحی امری ضروری است. در این راستا، به‌منظور محاسبه میزان حجم آب مصرف‌شده محصولات کشاورزی در مراحل مختلف رشد، از شاخص ردپای آب با هدف ارزیابی مناسب آب مصرفی در بخش کشاورزی در اقلیم‌های مختلف بهره گرفته شد.

مواد و روش‌ها: شبیه‌سازی پارامترهای حوضه تحت سناریوهای اقلیمی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در نرم‌افزار WEAP صورت گرفت. پس از مدل‌سازی منابع آب در نرم‌افزار WEAP، به‌منظور تعریف سناریوهای تغییر اقلیم، از نتایج شبیه‌سازی با استفاده از ترکیب وزنی چهار مدل AOGCM از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CIMP6) تحت سه سناریو SSP1-2/6 (خوشبینانه)، SSP3-7/0 (بدبینانه) و SSP5-8/5 (خیلی بدبینانه) برای دوره پایه (۲۰۱۲-۱۹۹۳) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد. مشاهدات خروجی مدل‌های گزارش ششم تحت سناریوهای جدید (SSP) هستند، که خطوط سیر بخش‌های مشترک اقتصادی- اجتماعی یا به‌عبارتی مسیرهای پایدار اجتماعی است و در واقع سناریوهای مختلفی برای توسعه اقتصادی، جمعیت و تکنولوژی در آینده و غلظت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای را توصیف می‌کند. چارچوب مفهومی مطالعه حاضر، محاسبه بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی منابع آب محصولات زراعی با استفاده از ردپای آب و کربن در شرایط تغییر اقلیم بود. این رویکرد در حوضه آبریز کشف‌رود واقع در شمال شرق ایران برای ۹۹-۱۳۹۸ توسعه داده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد نیاز آبی محصولات زراعی منطقه در همه سناریوهای اقلیم (CMIP6) افزایش پیدا نمود و مقدار عملکرد آن کاهش یافت. همچنین، بیشترین ردپای آب آبی در بین محصولات منتخب را به‌ترتیب چغندرقد، ذرت علوفه‌ای، پیاز، یونجه، گوجه‌فرنگی و خیار دارا بودند. افزایش شاخص ردپای آب آبی محصولات در حوضه بیانگر حجم بیشتر ردپای آب آبی نسبت به ردپای آب سبز بود که نشان‌دهنده افزایش تبخیر و تعرق و کاهش میزان بارندگی در شمال شرق کشور می‌باشد. نتایج نشان داد محصول یونجه با ۲۶۲۳/۲ مترمکعب بر تن در سناریو بدبینانه بیشترین و ذرت علوفه‌ای با ۵۰۲ مترمکعب بر تن کمترین ردپای آب در تولید محصول به‌خود اختصاص دادند. سب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، خیار، پیاز و جو به‌ترتیب بالاترین بهره‌وری اقتصادی در شرایط اقلیمی بدبینانه دارا بودند. این امر بیانگر کاهش بارندگی و افزایش دما در سال‌های ۲۰۴۰ می‌باشد. همچنین، کمترین میزان بهره‌وری فیزیکی در اقلیم بدبینانه را گندم و یونجه به‌ترتیب با ۳۰۹/۲ و ۳۳۶/۲ کیلو برترمکعب شامل هستند. به‌عبارت‌دیگر، با تغییر شرایط اقلیم و افزایش نیاز آبی محصولات، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب در سطح پایین‌تری قرار گرفت. در بین محصولات مورد بررسی ذرت علوفه‌ای کمترین سهم در ردپای آب سبز (۱ درصد) در هکتار را به‌خود اختصاص داده است. در صورتی‌که سهم این محصول از ردپای آبی ۱۴/۵۲ درصد برآورد شد. همچنین، محصولات یونجه، جو، گندم و گوجه فرنگی به‌ترتیب ۲۱/۸۵، ۲۰/۳۶، ۲۰/۰۳ و ۱۰/۰۹ درصد بیشترین سهم و مقدار قابل‌توجهی از ردپای آب سبز را به‌خود اختصاص دادند. در مقابل سهم ردپای آبی محصولات ذکرشده به‌ترتیب ۱۲/۳، ۲/۵، ۵/۷ و ۱۱/۷ درصد برآورد شد. شاخص بهره‌وری اقتصادی گندم و یونجه در سناریو بدبینانه به‌ترتیب معادل ۹۲۷۶/۳ و ۷۴۴۴/۰۲ ریال بر مترمکعب محاسبه شد. به‌طوری‌که استمرار شرایط خشکسالی در حوضه منجر به کاهش ۴۸ و ۵۶ درصد در بهره‌وری آن شد. بیشترین ردپای آب آبی و کربن به‌ترتیب محصولات سب‌زمینی، چغندرقد، پیاز، خیار و ذرت دارا بودند. کمترین آن را به‌ترتیب گندم، جو، گوجه‌فرنگی و یونجه به‌خود اختصاص دادند. با توجه به مفهوم ردپای آب، چنانچه برای تولید یک محصول خاص مقدار آب کمتری بتوان مصرف کرد، آن محصول در اولویت تولید قرار دارد. بنابراین، مناسب‌ترین محصول در بحث ردپای آب آبی و کربن متعلق به محصول گندم بوده است.

نتیجه‌گیری: در پژوهش حاضر مصرف آب برای محصولات کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد سهم ردپای آب سبز در محصولات یونجه، جو، گندم و گوجه‌فرنگی بالاتر از ۲۰ درصد از سهم کل ردپای آب بود. به‌طور کلی، با توجه به پیامدهای تغییر اقلیم و خشکسالی‌های پیش‌رو می‌بایست به مسئله کمبود آب توجه ویژه‌ای شود و منابع آب به شیوه‌ای صحیح مدیریت گردد. همچنین، در الگوی کشت محصولات تغییرات اساسی لحاظ شود به‌گونه‌ای که کشت محصولات با نیاز آبی کمتر و عملکرد بیشتر متناسب با اقلیم هر منطقه جایگزین سایر محصولات گردد. مهمترین راهکار نیز در راستای کاهش ردپای آبی از طریق کاهش تقاضا و مصارف آب و به‌عبارتی متوازن‌سازی عرضه آب با توجه به پتانسیل‌های منابع آبی منطقه می‌باشد. یکی از راهکارهای عملی نیز در مدیریت منابع آب، برآورد نیاز آبی گیاه و تعیین مقدار حجم آب مصرفی در مراحل مختلف تولید محصول پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبریز کشف‌رود، گرمایش جهانی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی

مقدمه

نقش مهم و به‌سزای بر بخش کشاورزی و امنیت غذایی جوامع برجای گذاشته است (Emamzadeh et al., 2016). با توجه به تأثیرات گسترده و متقابل آن با بخش‌های مختلف تولیدی، عوامل محیط‌زیستی و جوامع انسانی، امروزه از تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهمترین چالش‌های محیط‌زیستی قرن

یکی از مهمترین مسائل روز دنیا که طی دهه‌های اخیر در بخش کشاورزی نمود یافته و باعث محدودیت محصولات زراعی شده است، تغییرات اقلیم می‌باشد (Kalbali et al., 2021). پدیده تغییر اقلیم یکی از مهمترین اثرات است که

برجای گذارد (Abedi & Soltani, 2016). بنابراین، کشاورزان مهمترین گروهی هستند که به‌دلیل نوسانات دمایی حاصل از تغيير اقليم بیشترین خسارت را در جریان تولید محصولات کشاورزی متحمل می‌شوند.

رشد جمعیت همسو با توسعه اقتصادی- اجتماعی باعث شده منابع آب شیرین در معرض تهدید قرار گیرد. مهمترین راهکار برای مقابله با چالش‌های گذشته، کاهش سطح مصرف آب در بخش کشاورزی و رسیدن آن به سطح پایدار می‌باشد، که این امر از طریق توسعه روش‌های کارآمد و جدید امکان‌پذیر است (Mardani Najafabadi et al., 2019). کم‌شدن حجم نزولات آسمانی، بهره‌وری آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و از طرفی سبب افت شدید سطوح آب در آبخوان شده است که این موضوع در بخش کشاورزی اصلاح الگوی کشت را ضروری کرده است (Safaei et al., 2021). آب استفاده‌شده در فرآیند تولید یک کالا، آب مجازی نامیده می‌شود. آب مجازی و ردپای آب معمولاً به‌صورت مترادف به‌کار گرفته می‌شوند، در حالی که دارای تفاوت‌های قابل توجهی می‌باشند. اگر هدف از محاسبه ردپای آب، تنها محاسبه آب به‌کار گرفته‌شده برای تولید محصول باشد، می‌توان از محتوی آب مجازی یک محصول به‌جای ردپای آب صحبت کرد. اما مفهوم ردپای آب کاربرد گسترده‌ای دارد (Montaseri et al., 2016; Piri & Mobaraki, 2021).

مفهوم آب مجازی برای نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط آلن در سال ۲۰۰۵ مطرح گردید (Mardani Najafabadi et al., 2019). تعیین الگوی کشت مبتنی بر آب مجازی، راه‌حل مناسبی برای بحران آب به‌ویژه در مناطق کم‌آب و دارای آب و هوای خشک است. بنابراین، می‌توان به‌جای تولید محصولات پرمصرف آب، محصولاتی با آب مصرفی کمتر را تولید کرد و از فشار بیش از حد بر منابع آبی موجود کاست (Layani & Bakhshoodeh, 2022; Mardani Najafabadi et al., 2019).

با توجه به بیابان آب شمال شرق کشور، به‌طور متوسط ۷۵ درصد از منابع آبی در بخش کشاورزی استفاده می‌شود که بررسی اجزای مختلف ردپای آب مجازی و تعیین سهم هر یک از اجزا در بخش کشاورزی، کمک شایانی به درک بهتر از شرایط کنونی و بهبود منابع آبی موجود به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود. منابع آبی در سطح حوضه آبریز کشف‌رود شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. بزرگترین منبع آب سطحی رودخانه کشف‌رود است. به‌طور کلی، مصرف منابع سطحی ۱۸/۰۲ درصد و زیرزمینی ۸۲ درصد می‌باشد. بخش غالب نیازها در حوضه از طریق سفره آب‌های زیرزمینی تأمین می‌گردد که در میان بخش‌های مختلف مصرف‌کننده، بخش کشاورزی بیشترین سهم را دارا می‌باشد (Ahani et al., 2023). شایان ذکر است منابع آب سطحی این محدوده شامل رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و مسیل‌ها بوده که عمدتاً دارای رژیم برفی- بارانی است. در حال حاضر، جریان‌ات دائم (پایه) این رودخانه‌ها عمدتاً به شاخه اصلی رودخانه (کشف‌رود) نمی‌رسند و در اراضی آبخور واقع شده و در حوضه آبریز همان رودخانه‌ها به مصرف کشاورزی رسیده و

ببست و یکم یاد می‌شود که پیامدهای جدی اقتصادی به‌دنبال دارد (Eslami et al., 2019; Rezaei Zaman et al., 2016).

یکی از تبعات مهم ناشی از تغيير اقليم طی دوره‌های اخیر در کره زمین، افزایش فشار فعالیت‌های بی‌حدوحصر بشر بر محیط‌زیست است (Nikmehr & Zibaei, 2020; Safaei et al., 2021). شواهد موجود حاکی از تأثیر فعالیت‌های انسانی بر اقليم از آغاز انقلاب صنعتی در قرن نوزدهم غلظت دی‌اکسیدکربن را تا حدود ۵۰ درصد افزایش داده است. این پدیده منابع آبی هر منطقه را در طول زمان دست‌خوش تغيير قرار داده است (Emamzadeh et al., 2016; Schlenker & Lobell, 2010). افزایش میانگین دمای جهانی آشکارترین پیامد افزایش CO₂ در سطح جهانی است. در سال‌های اخیر غلظت گازهای گلخانه‌ای و به‌ویژه دی‌اکسیدکربن افزایش یافته است که علاوه بر تغيير در پارامترهای هواشناسی، فعالیت‌های کشاورزی را نیز به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت‌تأثیر قرار داده است (Esteve et al., 2016; Madani, 2015; al., 2015). از جمله مهمترین اثرات، تغییراتی است که در میزان عملکرد و بهره‌وری آب کشاورزی مشاهده می‌شود. بنابراین، با توجه به اهمیت آب به‌عنوان یک نهاده اساسی در کشاورزی، تأثیرپذیری نیاز آبیاری محصولات مختلف نیز از تغيير اقليم بایستی مورد توجه قرار گیرد (Ababaei & Ramezani Etemadi, 2014).

بخش کشاورزی مهمترین بخش تولیدکننده مواد غذایی با مصرف ۷۰ درصد از مجموع کل منابع آب شیرین جهان به‌عنوان بزرگترین مصرف‌کننده آب به‌حساب می‌آید (Masood et al., 2022). افزایش دما، مصرف بیش از حد آب در گیاهان، کاهش نزولات آسمانی و عدم تغذیه صحیح آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی از دیگر عواملی هستند که منجر به بهره‌برداری بیش از حد منابع آب شده است (Daneshgar et al., 2021; Mardani Najafabadi et al., 2019). پیش‌بینی‌ها در این راستا حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰ مسئله مدیریت منابع آب، اصلی‌ترین موضوع مورد بحث در کشورهای مختلف جهان به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران خواهد بود (Fabiani et al., 2020; Safaei et al., 2021). بنابراین، مدیریت منابع آب به‌خصوص در بخش کشاورزی در این مناطق از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد.

مطابق مطالعات انجام‌شده، ایران تا سال ۲۰۲۵ به لیست کشورهایی که با وضعیت کمبود آب مواجه‌اند افزوده خواهد شد.

شرایط اقلیمی ایران به‌گونه‌ای است که بخش کشاورزی آن برای تولید موادغذایی به‌شدت به آبیاری وابسته است (Emamzadeh et al., 2016). این وابستگی به حدی است که با وجود سطح نسبتاً یکسان اراضی زیرکشت دیم و فاریاب کشور حدود ۹۰ درصد فرآورده‌های کشاورزی از زراعت آبی حاصل می‌شود. در چنین شرایطی تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده خشکسالی و ترسالی می‌تواند تأثیرات منفی یا مثبت زیادی بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت‌غذایی ایران

درصد از کل حجم ردپای آب در تولید گردوی کشور یعنی معادل ۱۴۰۳ میلیون مترمکعب در سال به صورت تجارت آب مجازی از کشور صادر می شود (Bazrafshan et al., 2020). پیری و مبارکی (۲۰۲۱) طی پژوهشی ردپای آب و بهره‌وری آب محصولات سیب‌زمینی، چغندر قند، گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد سیب‌زمینی با ۲۹۴۵ مترمکعب بر تن در شهر اهواز با اقلیم گرم و مرطوب بالاترین ردپای آب و چغندر قند با ۹۰۶ مترمکعب بر تن در اقلیم سرد و خشک مشهد کمترین ردپای آب را دارا بود. همچنین، کمترین مقدار بهره‌وری مصرف آب ۲/۱ کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار نیز متعلق به سیب‌زمینی در اقلیم اهواز بود. کمترین آب مجازی و بیشترین بهره‌وری مصرف آب برای گیاهان مورد مطالعه در اقلیم همدان به دست آمد (Piri & Mobaraki, 2021). فو و همکاران (۲۰۱۸) آب مجازی در غلات را در چین محاسبه نمودند. نتایج نشان داد جهت تولید غلات در چین ۱/۲۹۳ مترمکعب بر کیلوگرم آب مجازی مصرف شده است (Fu et al., 2018). ارسین و هواکسترا (۲۰۱۴) در پژوهشی توسعه سناریو ردپای آب تا سال ۲۰۵۰ را براساس تعدادی از محرک‌ها از جمله رشد جمعیت، رشد اقتصادی، الگوی تولید-تجاری، الگوی مصرف و توسعه فن‌آوری برای کل جهان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که کاهش ردپای آب انسان حتی با افزایش جمعیت در شرایطی که الگوی مصرف تغییر یابد امکان‌پذیر است (Ercin & Hoekstra, 2014). ژنو و هواکسترا (۲۰۱۷) اثرات اقدامات مدیریت مختلف کشاورزی از جمله راندمان آبیاری، بهره‌وری مصرف آب و ردپای آب آبی و سبز را برای محصول گندم زمستانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد کم‌آبیاری بیشترین تأثیر را در افزایش راندمان مصرف آب آبی داشته است. بدین ترتیب که راندمان آبیاری ۵ درصد افزایش و ردپای آب آبی ۳۸ درصد کاهش یافته است (Zhuo & Hoekstra, 2017).

حسابداری آب براساس دو شاخص ردپای فیزیکی و ردپای اقتصادی محصولات امکان‌پذیر است. حسابداری آب شامل بخش‌های مختلفی از جمله حسابداری محیط‌زیستی-اقتصادی، حسابداری با اهداف عمومی، حسابداری مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب و حسابداری ردپای آب می‌باشد (Al-Saidi & Elagib, 2017; Lee et al., 2020). روش حسابداری ردپای آب با تأکید بر محصولات و میزان آب مصرفی در فرآیند تولید در سطح منطقه‌ای، کشوری و بین‌المللی کاربرد دارد. بررسی مطالعات در راستای مدیریت منابع آب بیانگر نگرانی‌های بسیار جدی متخصصین منابع آب از افزایش تقاضا و تنش‌های روزافزون منابع آب شیرین در نقاط مختلف دنیا در اثر تغییر اقلیم بوده و ضرورت نگرش جدید و استفاده از معیار جامع و کارآمد ردپای آب را جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه و پایدار مصرف آب در بخش کشاورزی بیان می‌کند (Montaseri et al., 2016).

افزایش روبه‌رشد تقاضای آب شیرین در جهان برای مصارف مختلف کشاورزی، شرب و صنعت، منابع محدود آب را در معرض خطر جدی، استحصال بیشتر از حدود پایدار،

در نهایت تنها جریانات سیلابی به شاخه اصلی رودخانه می‌رسند. این امر عمدتاً به دلیل تغییر کاربری اراضی حاشیه رودخانه‌ها از کشت غلات به باغات در طی سالیان گذشته است. همچنین، اغلب سیلاب‌ها نیز با توجه به امکانات موجود غیرقابل بهره‌برداری برای زارعین است.

براساس مطالعه صفایی و همکاران (۲۰۲۱) حجم آب تجدیدشونده استان خراسان رضوی در سال ۱۴۰۰ به طور متوسط ۱۱/۹ میلیارد مترمکعب برآورد گردید؛ که از این میزان، ۳/۹ میلیارد مترمکعب آن را حجم آب‌های سطحی و ۸ میلیارد مترمکعب آن زیرزمینی به خود اختصاص داده است. سالیانه به طور متوسط ۹/۷ میلیارد مترمکعب آب زیرزمینی از آبخوان‌های محدوده استخراج و به مصارف مختلف عمدتاً کشاورزی می‌رسد (Safaei et al., 2021).

مفاهیم ردپای آب و بهره‌وری آن مؤثرترین ابزارها در تحلیل مسائل مرتبط با مدیریت منابع آب است. ردپای آب برای تمامی کالاها تولیدی (کشاورزی و صنعت) و خدماتی قابل بحث است که از سه جزء تشکیل شده است. ردپای آب آبی اشاره به مقدار آبی دارد که به منظور تولید یک محصول یا کالا در زنجیره تأمین مصرف می‌شود (Al-Saidi & Elagib, 2017; Li et al., 2019). ردپای آب سبز به حجم آب مصرفی حاصل از بارش و ردپای آب خاکستری که برای زودن آلودگی از آن مصرف می‌شود. ردپای کربن در حقیقت مقیاسی از مقدار کل خروجی دی‌اکسید کربن و متان مربوط به یک فعالیت معین یا در نظر گرفتن همه منابع در محدوده زمانی و مکانی آن فعالیت می‌باشد. در نهایت، ردپای اکولوژیکی استفاده از زمین و طبیعت می‌باشد (Piri & Mobaraki, 2021). به طور کلی ردپاهای اکولوژیکی، کربن و آب در حالت‌های کلی معیارهای کمی هستند که بیانگر اهمیت جوامع به محیط‌زیست و تأکید افراد به منابع محدود آب شیرین در جهان است. اجزای مختلف ردپای آب و تعیین سهم هر یک از آن‌ها در بخش کشاورزی کمک شایانی به درک شرایط کنونی و بهبود منابع آبی موجود به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک خواهد نمود (Ercin & Hoekstra, 2014).

در ایران شاخص ردپای آب به ازای هر نفر ۱۴۵۷ مترمکعب در سال، خودکفایی آبی کشور ۹۳/۶ درصد و وابستگی به منابع آب ۶/۴ درصد است. میزان ردپای آب سبز برای کشاورزی و مراتع ۱۹۰ میلی‌متر از مجموع ۴۱۰ میلی‌متر آب سبز کل محاسبه گردید. ردپای آب را می‌توان از طریق افزایش عملکرد محصول و به‌کارگیری سیستم‌های آبیاری نوین کاهش داد (Montaseri et al., 2016).

خلیلی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی مدیریت منابع آب استان قم را براساس ردپای آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد سهم ردپای آب آبی در استان بیشتر از ردپای آب سبز و خاکستری بود (Khalili et al., 2019). بذرافشان و همکاران (۲۰۲۰) توزیع زمانی و مکانی آب مجازی را برای گردو در ایران انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد متوسط حجم کل ردپای آب در محصول گردوی فاریاب ۱۴۹۳ میلیون مترمکعب در سال است که حدود ۹۴

کربن برای مدیریت بهتر منابع آب در اثر تغییرات اقلیم انجام شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی مشهد در غرب حوضه قره‌قوم و در شمال استان خراسان رضوی با کشیدگی شمال غربی- جنوب شرقی در حدفاصل ارتفاعات بینالود در جنوب غرب و غرب ارتفاعات کپه‌داغ (هزار مسجد) در شرق و شمال شرق و در محدوده به طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳ دقیقه شمالی واقع شده است. مهم‌ترین رودخانه آن کشف‌رود می‌باشد. طول تقریبی این رودخانه ۱۷۴ کیلومتر، دارای آورد متوسط سالانه ۲۸/۸ میلیون مترمکعب در محل ایستگاه اولنگ‌اسدی واقع در خروجی محدوده مطالعاتی بوده و پس از طی مسافتی معادل ۳۰۰ کیلومتر در محلی به نام پل خاتون در شرق حوضه آبریز قره‌قوم به هریرود می‌ریزد. در شکل (۱) محدوده مطالعاتی مشهد به‌عنوان حوضه انتخابی برای پژوهش حاضر نشان داده شد.

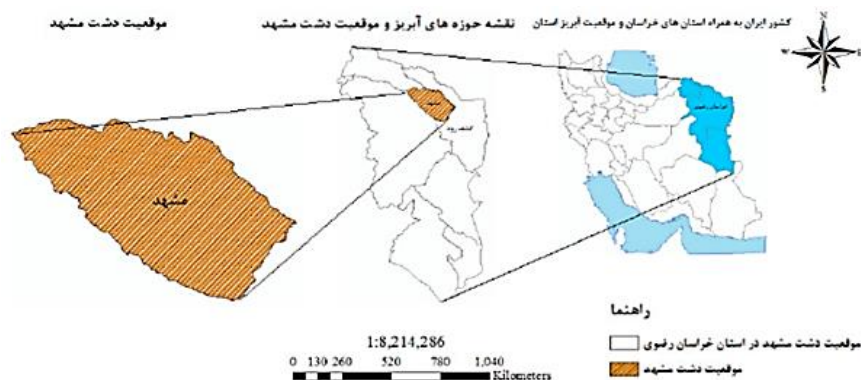
براساس آخرین مطالعات بیلان منابع آب (۱۳۶۴-۱۳۹۹) میانگین بارش ۳۰ ساله در سطح محدوده مطالعاتی مشهد، ۲۷۰۲/۲۷۴ میلی‌متر است. همچنین، متوسط درجه حرارت سالانه از بخش‌های شمالی و جنوبی به‌سمت مرکز دشت افزایش می‌یابد. متوسط سالانه درجه حرارت روزانه در ارتفاعات محدوده ۱۰/۳ و در دشت ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (Report in Kashfaroud Basin, 2009).

چارچوب مفهومی اثرات تغییر اقلیم

شکل (۲) درک کلی مفهوم اجزای ردپای آب و مفاهیم بنیادین مربوط به این موضوع را به‌وضوح به نمایش می‌گذارد. اثرات تغییر اقلیم با استفاده از ترکیب وزنی چهار مدل AOGCM^۱ از پروژه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)^۲ تحت سه سناریو SSP1-2/6^۳، SSP3-7/0 و SSP5-8/5 انجام شد.

کاهش و آلودگی قرار داده است. لذا حفاظت، توسعه پایدار منابع آب و استفاده بهینه از منابع آب دارای اولویت بسیار بالایی برای متخصصین صنعت آب دنیا است (Ahani et al., 2023). از سوی دیگر، بیش از ۷۰ درصد تقاضا از منابع آب شیرین در دنیا به آب کشاورزی اختصاص داشته و به‌دلیل مصرف بسیار زیاد آب در کشاورزی، شناسایی و مدیریت اثرات بخش کشاورزی بر منابع آب توجه و ضرورت بیشتری را از طرف متخصصین این حوزه به‌خود اختصاص داده است. همچنین، پژوهشگران معتقد هستند که افزایش جمعیت، رشد اقتصادی، تقاضای روبه رشد برای محصولات کشاورزی و تغییر اقلیم و همچنین تغییر شرایط اجتماعی اقتصادی تقاضا برای آب کشاورزی را در آینده افزایش داده و فشار و تنش‌های سنگینی به منابع آب وارد نموده و مخاطرات جدی را برای امنیت غذایی آینده و توسعه پایدار محیط‌زیست فراهم خواهد نمود. همچنین، میزان آب مصرفی پایه و ردپای آب هر محصول در هر منطقه تحت تأثیر اقلیم آن منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی مردم، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب در آن منطقه متغیر است، لذا نیاز به مفهومی است که بتوان با آن نیاز آب واقعی هر محصول را محاسبه نمود.

بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه آب مجازی و ردپای آب نشان داد که در ایران پژوهش‌های مختلف محدود به یک محصول خاص و یا یک منطقه بوده که نمی‌توان داده‌های دقیق در مورد چگونگی استفاده از منابع آب را به سیاست‌گذاران ارائه داد. تنها تعداد معدودی از مطالعات وجود دارد که بیش از یک محصول و تنوع فضایی آب و هوا، خاک و مدیریت را در نظر گرفته‌اند. همچنین، در پژوهش مورد بررسی علاوه بر ردپای آب، شاخص بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب برای محصولات منتخب محاسبه شد که تاکنون چنین مطالعاتی برای محصولات در نواحی که با بحران آبی مواجه‌اند، انجام نشده است. لذا، پژوهش حاضر با هدف شناسایی جریان‌های آب مجازی، اصلاح سیاست‌های تجاری و بهره‌وری اقتصادی منابع آب محصولات زراعی حوضه آبریز کشف‌رود واقع در شمال شرق ایران با استفاده از ردپای آب و



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Location of study area

مدلسازی اثرات تغییر اقلیم در بخش کشاورزی و اجزای ردپای آب و کربن

در این مرحله از مطالعه اثرات تغییر شرایط آب و هوایی بر میزان عملکرد و نیاز آبی محصولات زراعی و در نهایت ردپای آب در تولید محصول طی سه گام مدل سازی شد.

گام اول: حوضه آبریز مورد مطالعه در نرم افزار ویپ مدل سازی شد. سپس اطلاعات کشاورزی، اقلیمی، خاک شناسی و هیدرولوژی منطقه بر حسب نیاز وارد نرم افزار شد. اطلاعات مورد نیاز در این بخش از گزارش های سازمان آب منطقه ای استان خراسان رضوی، سازمان جهاد کشاورزی و سازمان هواشناسی (برای برخی از متغیرها از جمله حداکثر و حداقل دما و بارش، رطوبت، سرعت باد، جریان های ورودی آب، حجم آب ذخیره شده در سد کارده به صورت سری زمانی ماهانه - بر حسب داده های موجود و مورد نیاز و برخی دیگر از متغیرها از جمله ضرایب گیاهی، سطح زیرکشت، راندمان، حجم آب تقاضا شده در بخش شهری و صنعتی به صورت نرخ متوسط) در سال زراعی ۹۷-۹۸ جمع آوری گردید.

گام دوم: از مدل کالیبره شده برای ارزیابی اثرات سناریوهای اقلیمی بر میزان عملکرد و نیاز آبی محصولات بهره گرفته شد.

گام سوم: با استفاده از نتایج مربوط به نیاز آبی و عملکرد در سناریوهای مختلف اقلیمی، شاخص های ردپای آب، اجزای ردپای آب محصول، شاخص بهره وری اقتصادی و فیزیکی آب برآورد گردید. سپس ردپای کربن به عنوان ملاک انتشار گازهای گلخانه ای مورد ارزیابی قرار گرفت (Ababai & Ramazani, 2014).

مدلسازی هیدرولوژیکی و شبیه سازی اثرات تغییر اقلیم

شبیه سازی هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از مدل برنامه ریزی و مدل های مدیریت منابع آب انجام شد. مدل WEAP^۱ یک ابزار برنامه ریزی منابع آب است که بر اصل توازن آب استوار است و زیرحوضه های مختلف، گره های تقاضای آب، زیرساخت ها، جریان های آب و کانال های انتقال آب را نشان می دهد. در این مدل مؤلفه های چرخه هیدرولوژیکی به وسیله شبیه سازی فرایندهای بارش - رواناب در سطح حوضه با استفاده از سری های زمانی داده های آب و هوایی محاسبه می شود (Ahani et al., 2023). بنابراین، هر واحد زیرحوضه به کلاس های کاربری زمین مختلف تقسیم و توازن آب تحت شرایط آب و هوایی آن زیرحوضه محاسبه می شود. MABIA یکی از ماژول های موجود در مدل WEAP است که برای شبیه سازی فرایندهای هیدرولوژیک مانند تبخیر و تعرق، رواناب، نفوذ و آبیاری بکار گرفته می شود. این روش که توسط جبلون و سهلی در مؤسسه ملی کشاورزی تونس ارائه شده است، با استفاده از اطلاعات مختلف زراعی، هیدرولوژیکی و هواشناسی، عملکرد و نیاز آبی محصولات

زراعی شبیه سازی می شود. فرآیند کار این ماژول شامل مراحل زیر است:

۱- محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان در ماژول MABIA تبخیر و تعرق گیاهان با استفاده از مدل فانو- پنمن- مانتیث^۲ که توسط (Allen et al., 2005) محاسبه شد. برای محاسبه تبخیر و تعرق اطلاعات هواشناسی دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد در ارتفاع دو متری و ساعات آفتابی روزانه مورد نیاز است (Kalbali et al., 2021).

۲- محاسبه ظرفیت آب در دسترس ظرفیت آب در دسترس با استفاده از داده های مربوط به ظرفیت نگهداری آب خاک در نقطه اشباع با توجه به نوع بافت خاک منطقه، ظرفیت مزرعه و پژمردگی گیاه محاسبه شد.

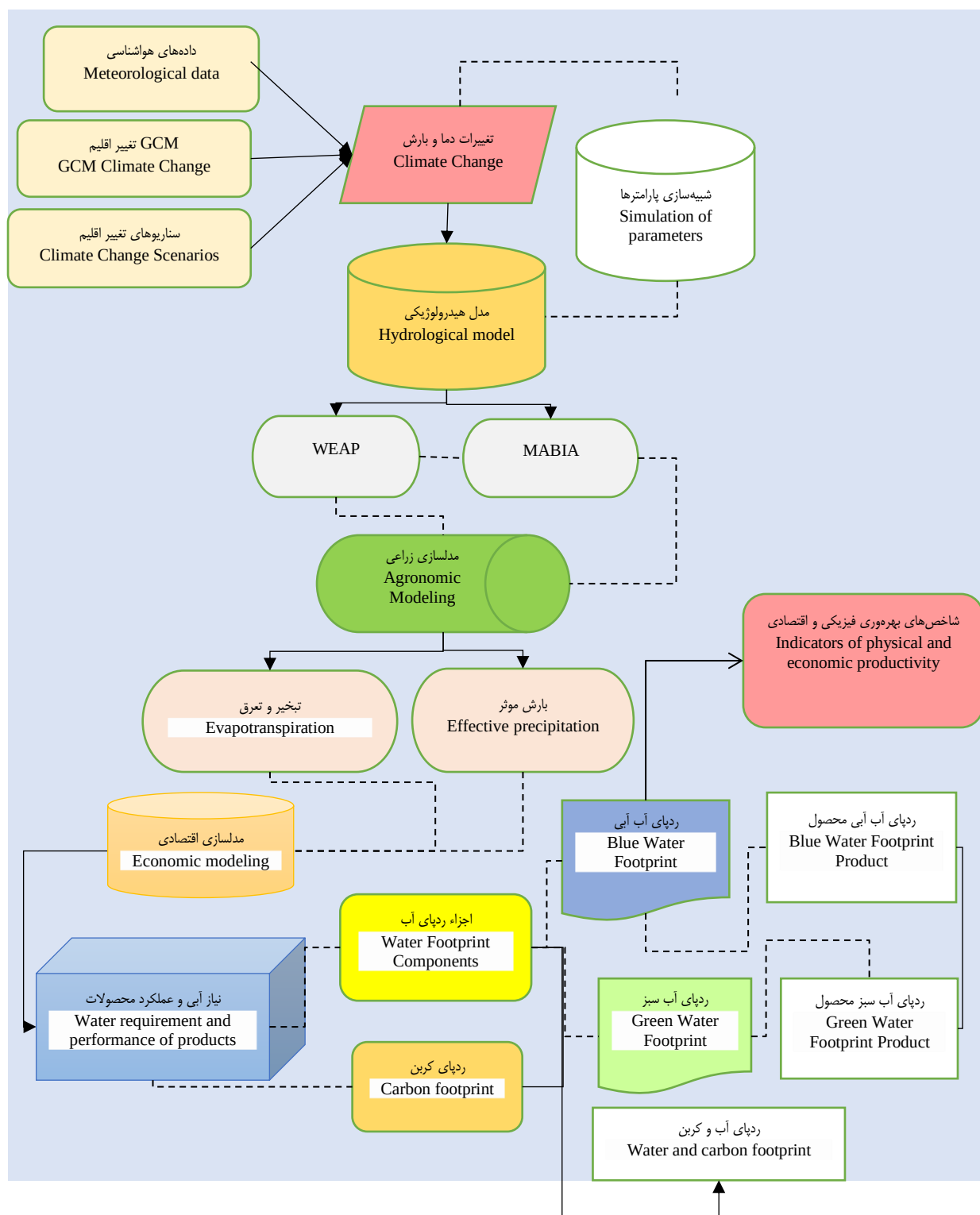
۳- تخمین میزان آب آبیاری میزان آب آبیاری مورد نیاز محصولات کشاورزی هر منطقه از طریق برنامه زمان بندی آبیاری و عمق آبیاری مدلسازی شد.

در ماژول MABIA شبیه سازی عملکرد محصولات زراعی با استفاده از رابطه (۱) انجام شد.

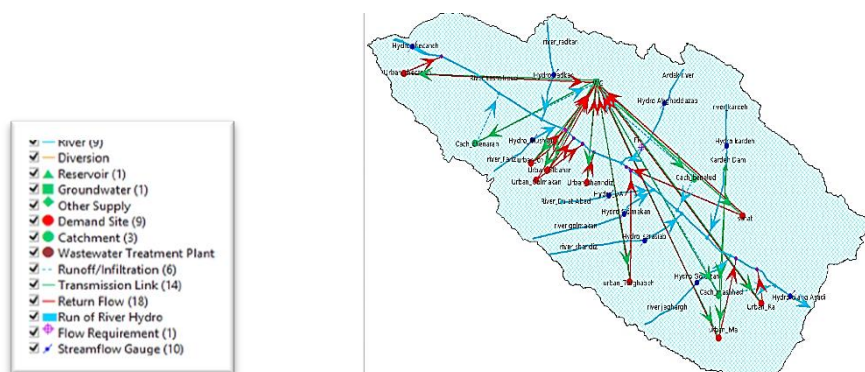
$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Y_a عملکرد واقعی محصول، Y_m عملکرد حداکثر، K_y فاکتور واکنش - عملکرد، ET_a تبخیر و تعرق واقعی و ET_c تبخیر و تعرق در شرایط مشابه واقعی ولی بدون محدودیت آبی می باشد (Kalbali et al., 2021; Ahani et al., 2023).

روش MABIA موجود در نرم افزار WEAP ابزاری مناسب جهت شبیه سازی این گونه متغیرها می باشد. مزیت اصلی WEAP در رویکرد یکپارچه سازی سیستم های آبی و جهت گیری آن، در راستای سیاست ها است. WEAP در معادلات خود، مسائل مربوط به نیاز (الگوی مصرف آب، راندمان تجهیزات، استفاده مجدد، هزینه ها و تخصیص) را همگام با مسائل مربوط به منابع (جریان های سطحی، آب های زیرزمینی، مخازن و انتقال های آب) لحاظ کرده است (Safaei et al., 2021). در نرم افزار WEAP از ابزار PEST به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد. این ابزار به کاربر این امکان را می دهد که به طور خودکار فرآیند مقایسه خروجی مدل با داده های مشاهداتی و اصطلاح پارامترهای مدل در جهت افزایش دقت کالیبراسیون مدل را انجام دهد. شماتیک سیستم منابع آب حوضه شامل سه گره تقاضای بخش کشاورزی، یک گره تقاضای بخش صنعت و ۹ گره تقاضای شهری در شکل (۳) نشان داده شد.



شکل ۲- چارچوب مدل‌سازی اجزای ردپای آب و کربن (مأخذ: یافته‌های تحقیق)
Figure 2. Framework for modeling components of water and carbon footprint (Source: research findings)



شکل ۳- شماتیک سیستم منابع آب محدوده مطالعاتی
Figure 3. Schematic of the water resources system of the study area

شایان ذکر است که برون داد مدل های فاز ششم تغییر اقلیم به تازگی انتشار یافته و در دسترس قرار گرفته اند. در این فاز از تلفیق واداشت گازهای گلخانه ای و خط سیرهای اجتماعی- اقتصادی جهت سناریوها استفاده شده است. بنابراین، این مطالعه تغییرات آینده دما و بارش روی حوضه آبریز کشف رود را با توجه به برون داد مدل های فاز ششم مورد بررسی داد.

رد پای آب سبز ($WF_{Green,Irr}$) و آب آبی ($WF_{Blue,Irr}$) برای محصولات زراعی حوضه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی با به کارگیری چارچوب پیشنهادی (Ababaei & Ramezani Etemadi., 2014) در رابطه (۲) و (۳) بیان شد.

$$WF_{Blue,Irr} = IR = 10 * IE * GI \quad (2)$$

$$WF_{Green,Irr} = 10 * P_{eff} = 10 * (ET_c - IR) \quad (3)$$

براساس رابطه (۲)، نیاز ناخالص آبیاری (GI) برحسب میلی متر، P_{eff} بارندگی مؤثر و راندمان متوسط آبیاری (IE) در منطقه با استفاده از نرم افزار NETWAT به دست آمد. نیاز خالص آبیاری (IR) برحسب میلی متر) از حاصل ضرب نیاز ناخالص آبیاری در راندمان متوسط آبیاری بر حسب میلی متر محاسبه شد. رد پای آب سبز محصول^۳ و رد پای آب آبی محصول^۴ براساس تقسیم آب مصرفی سبز و آب آبی بر مقدار محصول تولیدی محاسبه شد.

محاسبه بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی اجزای ردپای آب آبی و آب سبز

جهت بررسی حسابداری آب از اجزای رد پای فیزیکی و اقتصادی آب استفاده شد. بهره‌وری فیزیکی آب آبی در رابطه (۴) ارائه شد (Piri & Mobaraki., 2021).

$$PWP_{Blue,Irr} = \frac{Y_{Crops}}{WF_{Blue,Irr} * 1000} \quad (4)$$

$PWP_{Blue,Irr}$ بهره‌وری فیزیکی رد پای آب آبی برحسب (کیلوگرم/ متر مکعب)، Y_{Crops} عملکرد محصولات بر حسب کیلوگرم در هکتار و $WF_{Blue,Irr}$ حجم آب مصرف شده در هکتار بدون در نظر گرفتن بارندگی (مترمکعب) می باشد.

شبیه سازی پارامترهای حوضه تحت سناریوهای اقلیمی برای دوره ۲۰۱۳-۲۰۴۰ صورت گرفته است. به منظور کالبره کردن مدل طراحی شده در نرم افزار، از داده های هیدرولوژی و کشاورزی حوضه آبریز کشف رود طی سال های ۲۰۲۱-۲۰۱۳ استفاده شده است. پس از مدل سازی منابع آب در نرم افزار ویپ، به منظور تعریف سناریوهای تغییر اقلیم، از نتایج شبیه سازی تغییر اقلیم با استفاده از ترکیب وزنی چهار مدل AOGCM از پروژه مقایسه مدل های جفت شده فاز ششم (CIMP6) تحت سه سناریو SSP1-2/6 (خوشبینانه)، SSP3-7/0 (بدبینانه) و SSP5-8/5 (خیلی بدبینانه) برای دوره پایه (۲۰۱۲-۱۹۹۳) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پرداخته شد.

هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۱ هر چند سال یکبار، گزارش هایی را از وضعیت اقلیم، اثرات، سازگاری با این پدیده و کاهش آسیب پذیری ها در مقیاس جهانی و منطقه ای ارائه می دهد. در هر کدام از این گزارش ها، مدل های اقلیمی (GCM)^۲ تحت یک سری سناریوهای انتشار، شبیه سازی هایی را از مؤلفه های اقلیم در دوره تاریخی و آینده (سناریو) ارائه می دهند (Sarabi et al., 2020; Ahani et al., 2023). فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده (CMIP6) الگوی تکامل و ویژگی های سازگاری فاز پنجم را ادامه می دهد و شامل سناریوهای جدید سازماندهی شده از مدل سازی اقلیمی جهانی است که برای شناخت مکانیسم های مختلف آب و هوا طراحی شده است. سناریوهای گزارش ششم شامل ۵ زیرگروه اصلی به شاخص های کمی از جمله جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی، منطقه ای و فرامنطقه ای و سناریوهای تعمیم یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب پذیری) برنامه انرژی و تغییرات کاربری اراضی تأکید دارد. مشاهدات خروجی مدل های گزارش ششم تحت سناریوهای جدید (SSP) هستند، که خطوط سیر بخش های مشترک اقتصادی- اجتماعی یا به عبارتی مسیرهای پایدار اجتماعی است و در واقع سناریوهای مختلفی برای توسعه اقتصادی، جمعیت و تکنولوژی در آینده و غلظت های مختلف گازهای گلخانه ای را توصیف می کند (Sarabi et al., 2020).

کل خروجی دی‌اکسیدکربن و متان حاصل از جمعیت یک بخش یا فعالیت تولیدی با در نظر گرفتن همه منابع و ذخایر در محدوده زمانی و مکانی آن جمعیت یا فعالیت تولیدی می‌باشد. مقدار کربن منتشرشده در بخش کشاورزی براساس رابطه (۸) محاسبه شد.

$$CE_{CO_2} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{Ceuf.Fa \sum_{k=1}^k A + Cep.Pa \sum_{k=1}^k A + Ceaf.Afa \sum_{k=1}^k A + Ced.Da \sum_{k=1}^k A}{\sum_{k=1}^k Y \cdot \sum_{k=1}^k A} \right) \quad (8)$$

ردپای کربن محصولات در هر هکتار برحسب (مترمکعب/میلیون تن) از طریق نسبت نتایج روابط (۷) و (۸) بر نتایج رابطه (۸) از طریق رابطه (۹) و (۱۰) محقق شد.

$$WF_{(CO_2)}(Blue) = \frac{WF_{(Crop)}(Blue)}{CE_{CO_2}} \quad (9)$$

$$WF_{(CO_2)}(Green) = \frac{WF_{(Crop)}(Green)}{CE_{CO_2}} \quad (10)$$

براساس روابط (۹) و (۱۰)، $WF_{(CO_2)}(Blue)$ و $WF_{(CO_2)}(Green)$ به‌ترتیب ردپای آب آبی کربن حاصل از تولید محصول^۲ و ردپای آب سبز کربن حاصل از تولید محصول^۳، CE_{CO_2} مقدار کربن منتشرشده در بخش کشاورزی، $WF_{(Crop)}(Blue)$ و $WF_{(Crop)}(Green)$ ردپاهای آب آبی و آب سبز محصولات مورد بررسی می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبات و تجزیه و تحلیل اجزای ردپاهای آب و کربن حاصل از تولید محصولات در بخش نتایج و بحث ارائه شد.

نتایج و بحث

مقدار بارش در فصل بهار در حوضه آبریز برای تمام سناریوها بین ۴/۲۸ تا ۶/۹۵ درصد افزایش پیدا کرده است. مقدار بارش برای فصول تابستان و پاییز برای تمام سناریوها نیز کاهش یافته است. مقدار کاهش برای فصل تابستان بین ۱۰/۶۷ و ۲۱/۸۱ درصد و برای فصل پاییز بین ۱/۳۶ تا ۳/۴ درصد بوده است (جدول ۱).

جدول ۱- تغییرات فصلی بارش در دوره پایه و تحت سناریوهای مختلف در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بر حسب میلی‌متر

Table 1. Seasonal changes in precipitation in the base period and under different scenarios in the period 2040-2021 in millimeters

Observed	SSP5-8.5	SSP3-7.0	SSP1-2.6	فصل season
142.32	147.25	141.24	142.66	زمستان Winter
83.02	88.79	86.57	86.82	بهار Spring
8.62	7.7	7.14	6.74	تابستان Summer
64.49	63.61	62.3	62.63	پاییز Autumn

Source: research findings

منبع: نتایج تحقیق

مطابق نتایج جدول (۲)، متوسط عملکرد محصولات زراعی حوضه تحت سناریوهای اقلیمی کاهش یافته است. بیشترین کاهش عملکرد در سناریو خیلی بدبینانه را محصول جو و یونجه با ۲۵/۷ و ۲۵/۶ درصد اختصاص یافته است. میانگین

پس از محاسبه بهره‌وری فیزیکی ردپای آب آبی، بهره‌وری اقتصادی آب آبی از طریق رابطه (۵) محاسبه گردید.

$$EWP_{Blue,Irr} = \frac{NB}{WF_{Blue,Irr}} \quad (5)$$

$EWP_{Blue,Irr}$ نشان‌دهنده بهره‌وری اقتصادی ردپای آب آبی (کیلوگرم/ مترمکعب)، NB سود خالص محصول بر حسب میلیون ریال بر تن در هر هکتار است که از طریق تفاضل بین سود حاصل از فروش و هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت هر محصول محاسبه می‌شود و $WF_{Blue,Irr}$ حجم آب مصرف‌شده در هکتار بدون در نظر گرفتن بارندگی (مترمکعب) می‌باشد. به‌عبارتی، ردپای آب آبی محصولات تولیدی به آب آبیاری (سطحی و زیرزمینی) مرتبط بوده و از طریق نیاز آبیاری در سطح زیرکشت واقعی در هر سال محاسبه می‌شود.

ردپای آب آبی و آب سبز برای محصولات مورد بررسی در هر واحد از وزن محصول برحسب (مترمکعب/ تن) براساس رابطه (۶) و (۷) محاسبه شد (Piri & Mobaraki., 2021).

$$WF_{(Crop)}(Blue) = \frac{WF_{Blue,Irr}}{Y(Crops)} \quad (6)$$

$$WF_{(Crop)}(Green) = \frac{WF_{Green,Irr}}{Y(Crops)} \quad (7)$$

$WF_{(Crop)}(Blue)$ و $WF_{(Crop)}(Green)$ به‌ترتیب ردپای آب آبی و آب سبز محصولات مورد بررسی برحسب (مترمکعب/تن)، $Y(Crop)$ عملکرد محصول برحسب (تن)، $WF_{Blue,Irr}$ و $WF_{Green,Irr}$ به‌ترتیب ردپاهای آب آبی و آب سبز می‌باشد.

ردپای کربن^۱ به‌عنوان یکی از تأثیرات عمده محیط‌زیستی با استفاده از مطالعات (Fan et al., 2021) از مجموع CO_2 منتشر شده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، کود، سم، الکتریسیته، مصرف رول‌های نایلونی و میزان آبیاری در سطح زیرکشت هر محصول ضرب در میزان ضریب محتوای کربن از مصرف هر نهاده بخش کشاورزی بر میزان عملکرد هر محصول محاسبه شد. ردپای کربن در واقع مقیاسی از مقدار

همچنین، طی دوره پیش‌بینی‌شده میانگین دمای حداکثر سالانه در دوره پایه ۱۸/۶۶ درجه سانتی‌گراد و در سناریوهای خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه به‌ترتیب معادل ۱۷/۶، ۱۹/۶ و ۹۵/۶ سانتی‌گراد افزایش دما صورت گرفته است.

1- Carbon Footprint

3- Green Water Footprint of Carbon from Crops

2- Blue Water Footprint of Carbon from Crops

عملکرد یونجه ۱۰/۳۳ تن در هکتار در سال پایه بوده است، که با تغییر شرایط آب و هوایی (سناریو بدبینانه) ۸/۵ تن در هکتار کاهش یافته است. عملکرد دو محصول پیاز و سیبزمینی در سناریو خوشبینانه (به ترتیب ۴۰/۳۸ و ۲۷) تن در هکتار نسبت به حالت پایه (۴۰/۶۴ و ۲۷/۱۳) تن در هکتار کاهش ناچیزی برابر ۰/۶۴ درصد داشته است. بنابراین، الگوی

جدول ۲- تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر متوسط عملکرد محصولات زراعی محدوده مطالعاتی (تن-هکتار)

Table 2 . Effect of climate change scenarios on average yield of crops of the study area (ton-ha)

محصول Crop	عملکرد محصولات در سال شبیه‌سازی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ Yield of products in simulation year 2021-2040 (t/ha)	اقلیم خوشبینانه SSP1-2/6	درصد تغییر Change percentage	اقلیم میانه SSP3-7/0	درصد تغییر Change percentage	اقلیم بدبینانه SSP5-8/5	درصد تغییر Change percentage
گندم Wheat	3.33	3.26	-1.8	3.20	-4.2	3.02	-9.3
جو Barley	3.08	2.86	-4.38	2.66	-13.4	2.28	-25.7
ذرت علوفه‌ای Maize	49.27	47.76	-3.07	43	-13	41.88	-15
خیار Cucumber	20.14	19.08	-5.26	18.5	-9	18	-12.8
پیاز Onion	40.64	40.38	-0.64	38.5	-5.5	37.5	-7.7
سیبزمینی Potato	27.13	27	-0.64	25.2	-7.14	23	-15.5
چغندر قند Sugar beet	26.24	25.56	-3	23	-13	22.7	-13.5
گوچه فرنگی Tomato	33.52	33	-1.56	33	-2.08	31.3	-6.6
یونجه Alfalfa	10.33	10	-7.3	8.5	-19	7.7	-25.6

Source: Research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

افزایش نیاز آبی در شرایط تغییر اقلیم از یک‌سو و کاهش آب در دسترس از سوی دیگر موجب شده بخشی از تقاضای آب مورد نیاز گیاهان تأمین نشده و تنش آبی بین محصولات ایجاد شود. به دنبال افزایش تنش آبی، عملکرد محصولات مختلف در حوضه آبریز نیز کاهش یافته است. بنابراین، افزایش نیاز ناخالص آبی محصولات زراعی به دنبال افزایش تغییرات دما در طول دوره رشد محصول و افزایش تبخیر و تعرق تحت شرایط اقلیمی در نواحی شمال شرقی ایران دور از انتظار نیست.

نیاز آبی محصولات در سناریوهای مختلف و درصد اختلاف آن‌ها نسبت به سال پایه در جدول (۳) ارائه شد. با اعمال سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییر اقلیم میانگین نیاز آبی محصولات زراعی مورد بررسی در حوضه آبریز طی سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت. بیشترین تأثیر را سناریو بدبینانه بر نیاز آبی نسبت به سناریو خوشبینانه و میانه داشته است. بیشترین تأثیر تغییر اقلیم بر نیازخالص آبی محصولات را سیبزمینی (۶۴/۸ درصد) و سپس پیاز (۵۹/۳۷ درصد) در سناریو بدبینانه دارا است. نیاز آبی محصولات در دوره ۲۰۱۲-۲۰۴۰ در سناریو بدبینانه و میانه افزایش یافته است.

جدول ۳- تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر متوسط نیاز آبی محصولات زراعی محدوده مطالعاتی (مترمکعب-هکتار)

Table 3. Effect of climate change scenarios on average water needs Crops Range of studies (mcm-ha)

محصول Crop	نیاز آبی محصولات در سال شبیه‌سازی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ Water Requirements of products in simulation year 2021-2040	اقلیم خوشبینانه SSP1-2/6	درصد تغییر Change percentage	اقلیم میانه SSP3-7/0	درصد تغییر Change percentage	اقلیم بدبینانه SSP5-8/5	درصد تغییر Change percentage
گندم Wheat	6149.01	6320.06	2.79	6578.01	6.9	7444.8	2107.8
جو Barley	2681	2788.4	3.9	3378.37	25.9	3432	27.9
ذرت علوفه‌ای Maize	15688	16452	4.86	20433.5	30.24	21022	33.9
خیار Cucumber	12699	14780.01	16.38	15667	23.3	16814.42	32.40
پیاز Onion	14054	17366.02	23.56	21936.01	56.07	22400.03	59.37
سیبزمینی Potato	13195	19885.2	50.7	21022.03	59.31	21750.03	64.8
چغندر قند Sugar beet	17597	19514.8	10.8	21022	19.46	23763	35.04
گوچه فرنگی Tomato	12640	14498	14.7	15538	22.9	18280	66.4
یونجه Alfalfa	13269	17366	30.87	20198.3	52.2	20198.3	52.2

Source: research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

يونجه، گوجه‌فرنگي و خیار به‌ترتيب با ۱۵، ۱۴، ۱۳ و ۱۲ هزار متر مکعب در هکتار در اولويت‌های بعدی قرار گرفتند. همچنين، ردپای آب برای محصول گندم و جو نیز به‌ترتيب برابر ۷۳۵۹ و ۳۹۱۱ مترمکعب در هکتار می‌باشد.

به‌منظور صرفه‌جویی و جلوگیری از هدررفت آب و افزایش راندمان مصرف آب، اجزای ردپای آب به‌طور مثال ردپای آب آبی و آب سبز برای محصولات مختلف در جدول (۴) نشان داده شد. مجموع بیشترین ردپای آب با حدود ۱۸ هزار مترمکعب متعلق به محصول چغندرقد، ذرت علوفه‌ای، پیاز،

جدول ۴- شبیه‌سازی اجزای ردپای آب در محصولات منتخب آبی محدوده مطالعاتی

Table 4. Simulation of water footprint components in selected water products of the study area

مجموع کل Total	ردپای سبز Green Footprint	ردپای آبی Blue Footprint	محصول Crop
7359.01	1210	6149.01	گندم Wheat
3911	1230	2681	جو Barley
15768	80	15688	ذرت علوفه‌ای Maize
12969	270	12699	خیار Cucumber
14584	530	14054	پیاز Onion
13545	350	13195	سیب‌زمینی Potato
18037	440	17597	چغندرقد Sugar beet
13250	610	12640	گوجه‌فرنگی Tomato
14589	1320	13269	یونجه Alfalfa

Source: Research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

(۴) سهم هر یک از اجزای ردپای کل محصولات نشان داده شد.

در ادامه سهم ردپای آب در تولید هر هکتار از محصولات حوضه با راندمان آبیاری ۴۵ درصد محاسبه شد. مطابق شکل

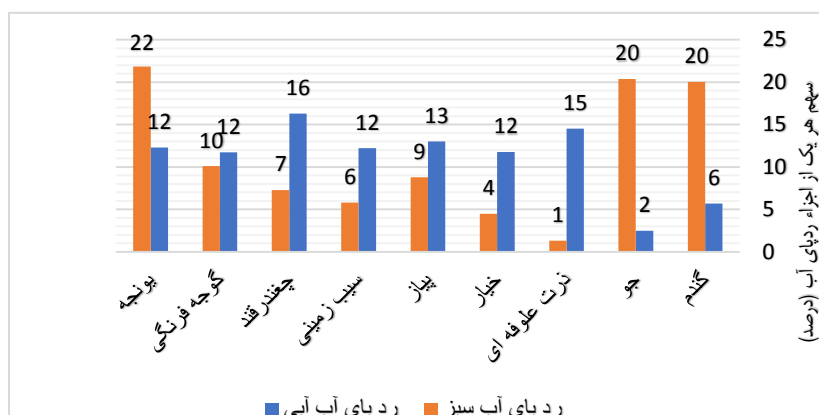


Figure 4- سهم هر یک از اجزای ردپای آب محصولات زراعی محدوده مطالعاتی (مترمکعب بر هکتار) (منبع: یافته‌های تحقیق).
Share each component of the water footprint of crops of the study area (mcm/ha) (Source: research findings)

سهم ردپای آب سبز نیز در محصولات یونجه، جو، گندم و گوجه‌فرنگی بالاتر از ۲۰ درصد و سهم ردپای آب آبی ۱۲ تا ۱۶ درصد برآورد شده است. اجزای ردپای آب محصولات زراعی حوضه در اراضی آبی در جدول ۵ ارائه شد. محصول گندم دارای ردپای آب آبی برابر ۱۸۴۶/۵ مترمکعب بر تن نسبت به سایر محصولات بیشتر بود. کمترین ردپای آب سبز به محصولات ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی، پیاز، خیار، چغندرقد و گوجه‌فرنگی به‌ترتيب معادل ۱۳، ۱۳/۰۴، ۱۳/۴، ۱۶/۸ و ۱۸/۲ مترمکعب بر تن اختصاص یافت

مطابق شکل (۴) ذرت علوفه‌ای کمترین سهم در ردپای آب سبز (۱ درصد) در تولید هر هکتار را به‌خود اختصاص داد. در صورتی‌که سهم این محصول از ردپای آبی معادل ۱۴/۵۲ درصد از کل ردپای آب برآورد شد. همچنین محصولات یونجه، جو، گندم و گوجه‌فرنگی به‌ترتيب ۲۱/۸۵، ۲۰/۳۶، ۲۰/۳ و ۱۰/۰۹ درصد بیشترین سهم و مقدار قابل‌توجهی از ردپای آب سبز را به‌خود اختصاص دادند. در مقابل سهم ردپای آب آبی محصولات ذکرشده به‌ترتيب ۱۲/۳، ۲/۵، ۵/۷ و ۱۱/۷ درصد محاسبه گردید.

جدول ۵- شبیه‌سازی اجزاء ردپای آب در محصولات منتخب محدوده مطالعاتی ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (مترمکعب - تن)

محصول Crop	ردپای آبی Blue Footprint	ردپای سبز Green Footprint	جمع کل Total
گندم Wheat	1846.5	363.4	2209.9
جو Barley	870.4	399.4	1269.8
ذرت علوفه‌ای Maize	318.4	1.7	320.1
خیار Cucumber	630.5	13.4	643.9
پیاز Onion	346	13.04	359.04
سیب‌زمینی Potato	486.3	13	499.3
چغندر قند Sugar beet	671	16.8	687.8
گوچه فرنگی Tomato	377.08	18.2	395.3
یونجه Alfalfa	1284.5	127.8	1412.3

Source: Research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

۲۵۷۸/۷ مترمکعب بر تن در سناریوهای اقلیمی افزایش یافته است. لذا، بیشترین سهم آب را در الگوی کشت حوضه آبریز کشف‌رود در حالت معمول و بدون لحاظ تغییر شرایط اقلیمی گندم دارا بود. بیشترین مقدار شاخص ردپای آب در سناریو اقلیمی بدبینانه علاوه بر گندم، در سایر محصولات یونجه، جو، چغندر قند و سیب‌زمینی محاسبه شد.

نتایج ارزیابی ردپای آب محصولات زراعی محدوده مطالعاتی در جدول (۶) در سناریوهای (خوشبینانه، میانه و بدبینانه) ارائه شد. نتایج نشان داد محصول یونجه با ۲۶۲۳/۲ مترمکعب بر تن در سناریو بدبینانه بیشترین و ذرت علوفه‌ای با ۵۰۲ مترمکعب بر تن کمترین ردپای آب در تولید محصول به‌خود اختصاص دادند. در جدول (۵)، مجموع ردپای آب گندم

جدول ۶- اثر تغییر اقلیم بر ردپاهای آب محصولات زراعی (مترمکعب- تن)

محصول Crop	سال شبیه‌سازی ۲۰۴۰ Simulation Year 2021-2040	اقلیم خوشبینانه SSP1-2/6	اقلیم میانه SSP3-7/0	اقلیم بدبینانه SSP5-8/5
گندم Wheat	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	1846.5 363.4	2055.7 113.5	2465.2 113.5
جو Barley	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	870.4 399.4	1270.06 150.15	1505.3 175.17
ذرت علوفه‌ای Maize	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	318.4 1.7	475.20 0.039	502 0.040
خیار Cucumber	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	630.5 13.4	846.9 0.724	934.13 0.744
پیاز Onion	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	346 13.04	569.8 0.338	597.3 0.347
سیب‌زمینی Potato	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	486.3 13	834.2 0.515	945.7 0.565
چغندر قند Sugar beet	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	671 16.8	914 0.730	1046.9 0.740
گوچه فرنگی Tomato	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	377.08 18.2	457 0.55	584.02 0.581
یونجه Alfalfa	ردپای آب آبی Blue Footprint ردپای آب سبز Green Footprint	1284.5 127.8	2376.3 15.03	2623.2 16.5

Source: Research findings

منبع: یافته‌های تحقیق

همچنين، کمترین میزان بهره‌وری فیزیکی در اقليم بدینانه را گندم و یونجه به‌ترتیب با $309/2$ و $336/2$ کیلو بر مترمکعب شامل هستند. به‌عبارت‌دیگر، با تغییر شرایط اقليم و افزایش نیاز آبی محصولات، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب در سطح پایین‌تری قرار گرفت. شاخص بهره‌وری اقتصادی گندم و یونجه در سناریو بدینانه به‌ترتیب معادل $9276/3$ و $7444/02$ ریال بر مترمکعب محاسبه شد. به‌طوری که استمرار شرایط خشکسالی در حوضه منجر به کاهش 48 و 56 درصد در بهره‌وری آن شد.

شاخص بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی مصرف آب برای محصولات منتخب در جدول (۷) در سناریوهای مختلف اقليم شبیه‌سازی شد. سبب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، خیار، پیاز و جو به‌ترتیب بالاترین بهره‌وری اقتصادی در شرایط اقليمي بدینانه دارا بودند. در سناریوهای اقليمي شاخص بهره‌وری اقتصادی آب برای تمامی محصولات، در مقایسه با شرایط پایه کاهش یافته است. این امر بیانگر کاهش بارندگی و افزایش دما در سال‌های 2040 می‌باشد.

جدول ۷- مقایسه تغییرات بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی محصولات در سناریوهای اقليم

Table 7. Comparison of changes in physical and economic productivity of products in climate scenarios

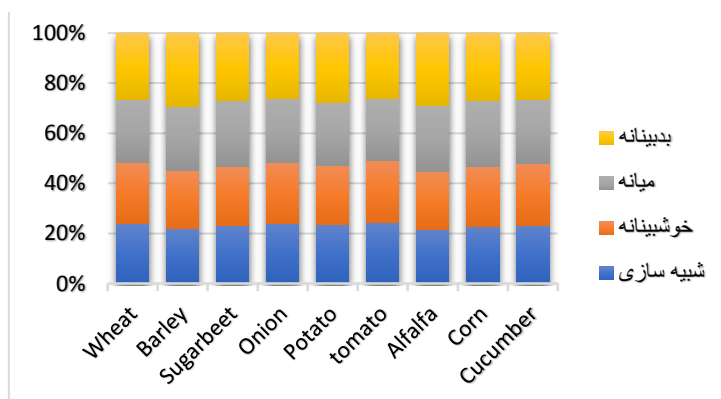
محصول Crop	شاخص‌های بهره‌وری Productivity Indicators	سال پایه Current	اقليم خوشبینانه SSP1-2/6	درصد تغییر Change percentage	اقليم میانه SSP3-7/0	درصد تغییر Change percentage	اقليم بدبینانه SSP5-8/5	درصد تغییر Change percentage
گندم Wheat	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	17895 596.6	11253.6 375.12	-37	10633.6 354.5	-40	9276.3 309.2	-48
جو Barley	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	33040.11 1148.8	29539.8 1027	-10	22704 789.5	-31	19182.5 667	-41
ذرت علوفه‌ای Maize	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	12985.9 1341.06	12002 2903.3	-7	8683.7 2100.5	-33	8236 1992.3	-36
خیار Cucumber	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	34479.1 1586.5	28065.8 1291.4	-18	25562.2 1176.2	-25	22719.7 1045.4	-34
پیاز Onion	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	30594.3 2891.1	24600.11 2325.4	-19	18554.3 1753.9	-39	17727.9 1675.8	-42
سبب‌زمینی Potato	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	41910.5 2056.6	27629.7 1355.8	-34	24427.3 119.7	-41	21507.07 1055.4	-48
چغندر قند Sugar beet	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	16436.9 1491.5	14440.3 1310.3	-12	11992.5 1088.2	-27	10523.8 594.9	-35
گوجه فرنگی Tomato	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	36729.25 2652.4	31523.5 2276.4	-14	29258.4 2112.8	-20	23705.3 1711.8	-35
یونجه Alfalfa	اقتصادی Economic فیزیکی Physical	17241.12 778.5	12212.5 551.5	-29	9226.04 416.6	-46	7444.02 336.2	-56

بهره‌وری اقتصادی (ریال/ مترمکعب) و بهره‌وری فیزیکی (کیلو/ متر مکعب) (منبع: یافته‌های تحقیق)

Economic productivity (rials/m3) and physical productivity (kilo/m3) (Source: Research findings)

ردپای کربن معیاری مهم در ارزیابی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از فعالیت‌های تولیدی و محصولات مختلف است. ارزیابی ردپای کربن و کاهش تشعشعات گازهای گلخانه‌ای از جمله مقیاس‌هایی است که هر تولیدکننده یا کشاورز باید آن‌ها را در فعالیت تولیدی مورد توجه قرار دهد. طبق شکل (۵)، بیشترین مقدار شاخص ردپای کربن در سناریو میانه را چغندر قند، پیاز، گوجه فرنگی، خیار و ذرت علوفه‌ای و کمترین مقدار آن به محصولات جو، یونجه و سبب‌زمینی اختصاص یافت.

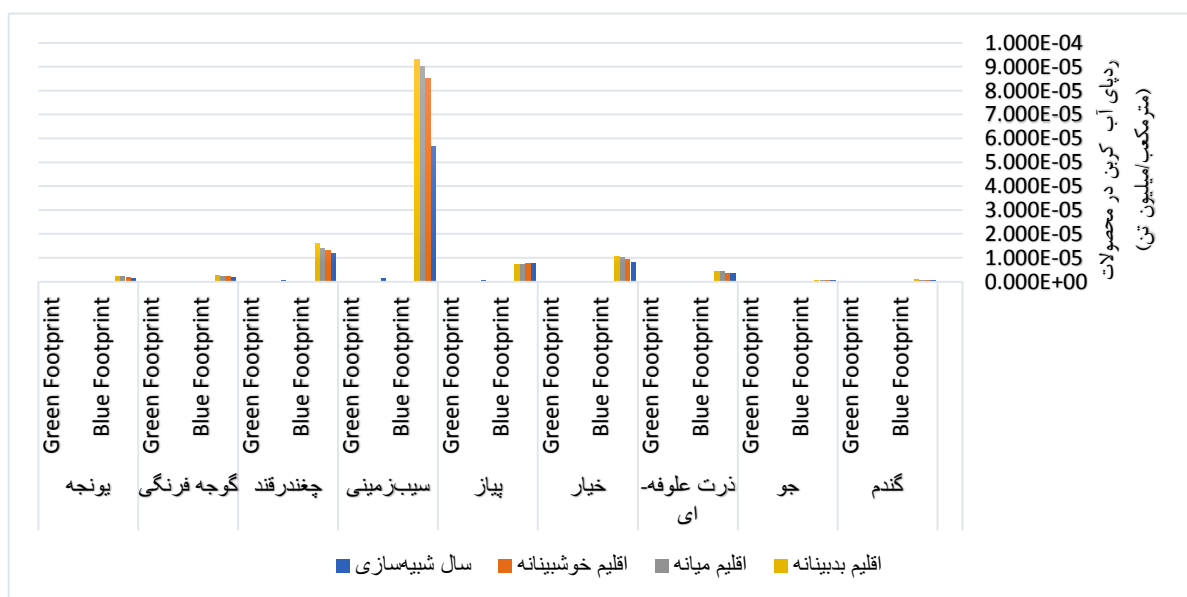
با توجه به اینکه انرژی نیز سهم به‌سزایی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، مصرف سوخت‌های فسیلی رتبه اول تولید انرژی را به‌خود اختصاص داد. براساس گزارش کنوانسیون تغییر اقليم، ایران در سال 2017 از نظر تولید گاز دی اکسیدکربن در رتبه هفتم دنیا بود. بنابراین، با به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در راستای کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن و همچنین کمی کردن میزان انتشار با استفاده از شاخص ردپای کربن می‌توان به کاهش اثرات تغییر اقليم کمک کرد.



شکل ۵- اثرات تغییر اقلیم بر ردپای کربن (منبع: یافته‌های تحقیق)
Figure 5. Effects of climate change on carbon footprint (Source: Research findings)

بنابراین، گندم مناسب‌ترین محصول در بحث ردپای آب‌آبی و کربن می‌باشد. با توجه به بررسی ردپاهای آب هر چقدر توانایی نگهداری آب در خاک افزایش یابد و یا از طریق اقداماتی عملکرد محصول افزایش یابد، ردپای آب محصول نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد. به عبارتی، در سناریوهای مختلف اقلیمی ردپای آب کربن منتشر شده در ازای هر واحد از محصول نیز افزایش یافت.

در شکل (۶) ردپای آب آبی و آب سبز کربن برای محصولات مورد مطالعه نشان داده شد. بنابراین محصولات سیب‌زمینی، چغندر، پیاز، خیار و ذرت به ترتیب بیشترین ردپای آب آبی و آب سبز کربن و محصولات گندم، جو، گوجه فرنگی و یونجه به ترتیب کمترین ردپای آب آبی و آب سبز کربن را به خود اختصاص دادند. با توجه به مفهوم ردپای آب، چنانچه برای تولید یک محصول خاص مقدار آب کمتری بتوان مصرف کرد، آن محصول در اولویت تولید قرار دارد.



(Source: Research findings)

وضعیت منابع آب و شرایط هوایی و نحوه کاشت محصولات متفاوت بوده است. بنابراین، لزوم مدیریت کشت این محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران امری ضروری و لازم بوده که همواره بایستی مورد توجه مدیران امر قرار گیرد. به‌طور کلی نیاز خالص آبی عمده محصولات حوضه با تغییر شرایط آب و هوایی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی به دلیل منطبق بودن دوره رشد آن‌ها با فصل بارش مطابق مطالعات (Layani & Bakhshoodeh, 2022; Safaee et al., 2021) بیشتر پیش‌بینی شده و نیاز به آبیاری بیشتری خواهد بود. در اکثر مطالعات مختلف افزایش تقاضای آبیاری بیش از ۱۰ درصد به‌عنوان مرز مواجه‌شدن سیستم

در مجموع میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای محصولاتی که نیاز آبی کمتری و یا از مدیریت مزرعه مناسب تری بهره‌مند هستند، مقدار ردپای آب بهینه‌تر دارد. کشاورزی به‌عنوان مهمترین بخش مصرف‌کننده آب در جهان سبب استفاده فشرده از منابع آب و تأثیر مستقیم بر کیفیت و کمیت آب شده است. از این‌رو، شاخصی برای مدیریت پایدار منابع آب با عنوان ردپای آب ارائه شد. در پژوهش حاضر به بررسی ردپای آب محصولات زراعی در حوضه آبریز کشف‌رود در راستای مدیریت بهینه منابع آب پرداخته شد. نتایج نشان داد که مقدار آب مصرفی واقعی محصولات در دو جزء آب آبی و آب سبز به‌علت نوع اقلیم،

ردپای آب محصول پیشنهاد گردید. همچنین، می‌توان با استفاده از سیستم‌های آبیاری کارآمد، کاهش تبخیر و تعرق، استفاده مؤثر از بارش، بهینه‌سازی سطح زیرکشت و انتخاب محصولات زراعی با عملکرد بالا ردپای آب محصولات را به حداقل مقدار رساند (Piri & Montaseri *et al.*, 2016; Mobaraki, 2021; Daneshgar *et al.*, 2021). مهمترین هدف از بهره‌برداری از آب سبز، تولید محصولات دیم است. در سال‌های اخیر با ظهور مفهوم آب مجازی و درک نقش تجارت موادغذایی در توزیع دوباره منابع آب و شناسایی استعداد مناطق در تولید محصولات با شاخص‌های کمی جدید، مدیریت آب سبز آسان‌تر شده است. لذا، در کنار بهبود راندمان آبیاری، استفاده از ردپای آب می‌تواند به بهره‌برداری بهینه از آن کمک نماید. در مجموع می‌توان از ردپای آب در سیاست‌گذاری در منابع آب، سیاست‌گذاری‌های مرتبط با بخش کشاورزی، سیاست‌گذاری‌های بخش محیط‌زیست و طرح الگوی تبادلات ملی و درون مرزی تولیدات صنعتی و کشاورزی استفاده کرد.

در بخش سوم با در نظر داشتن مسئله بحران آب در ایران و حوضه‌های آبریز شمال شرق آن به‌خصوص حوضه آبریز کشف‌رود که یکی از بحرانی‌ترین حوضه‌ها از نظر بارندگی و سفره‌های آب زیرزمینی است، توجه به بهره‌وری آب در این نواحی امری ضروری است (Safaei *et al.*, 2021; Daneshgar *et al.*, 2021). همچنین با مدیریت صحیح تولید، راندمان آبیاری، مدیریت صحیح مصرف آب در بخش کشاورزی، کم‌آبایی و افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌توان اثر تغییرات فاکتورهای اقلیمی و کاهش بارندگی در کشور را جبران نمود و با تغییر و تعدیل الگوهای کشت می‌توان به حفظ محیط‌زیست، توسعه پایدار کشاورزی، خودکفایی و حفظ امنیت غذایی دست یافت.

بهره‌وری اقتصادی نهاده آب در شرایط تغییر اقلیم برای تمامی محصولات کاهش یافت. لذا، انجام مطالعه در تمام مناطقی که با این پدیده مواجه‌اند می‌تواند کمک شایانی به منظور کنترل و مدیریت پایدار منابع آبی و دستیابی به الگوی کشت بهینه کند. با در نظر داشتن مسئله بیابان منفی آب در حوضه مورد مطالعه، مهمترین پیشنهاد این است که براساس مطالعات آب مجازی و ارزش‌گذاری اقتصادی آب، محصولات دارای آب مجازی زیاد را به استان وارد کرده و صادرات محصولات با آب مجازی کم را محدود کرد. این امر علاوه بر اینکه به مدیریت هرچه بهتر منابع آب کمک خواهد نمود، به همین منظور باید تعادل بین صادرات و واردات محصولات را با در نظر گرفتن منافع اقتصادی و محیط‌زیستی برقرار کرد. بنابراین، انجام پژوهش حاضر در سطح کشور و در تمام حوضه‌های آبریز که از لحاظ منابع آب محدودند، می‌تواند کمک شایان توجهی به‌منظور کنترل و مدیریت پایدار منابع آبی و دستیابی به الگوی کشت بهینه را به‌دنبال داشته باشد.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر از رساله دوره دکتری تخصصی اقتصاد کشاورزی مصوب در دانشگاه زابل استخراج شد. نویسندگان

کشاورزی با تنش معرفی شد. لذا، با توجه به مبنا قراردادن این مرز، می‌توان نتیجه گرفت که محصولات زراعی مورد بررسی در حوضه در شرایط اقلیمی پیش‌بینی‌شده برای سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ با تنش شدید نیاز آبی مواجه خواهند بود. لذا، انجام مطالعات و اقدامات تطبیقی با تغییر اقلیم برای این محصولات و منطقه مورد بررسی اجتناب‌ناپذیر است. مطابق نتایج (Piri & Mobaraki, 2021) بیشترین تغییر در عملکرد محصول بر اثر شرایط اقلیمی مربوط به محصولات یونجه و جو بوده است. بنابراین، ضروری است که سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان با اجرای سیاست تنظیم بازار مانع از کمبود تولید محصولات و افزایش قیمت آن‌ها شوند. همچنین، با پیش‌بینی های دقیق تغییرات اقلیمی، مانع از نوسانات تولید محصولات راهبردی شوند.

در راستای حداقل‌سازی ردپای کربن و آسیب آن بر محیط‌زیست، بایستی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی که اثرات محیط‌زیستی بالایی دارند از جمله چغندر قند، پیاز، گوجه فرنگی، خیار و ذرت علوفه‌ای کاسته شود و یا کاشت این محصولات با ملاحظات و رعایت حداقل‌های محیط-زیستی انجام شود. مطابق نتایج (Daneshgar *et al.*, 2021; Mardani Najafabadi *et al.*, 2019; Layani & Bakhshoodeh, 2022) الگوی کشت محصولات به‌سمت تولید محصولاتی با اثر محیط‌زیستی کمتر از جمله گندم، جو، یونجه و ذرت علوفه‌ای تغییر داده شود. لذا، اصلاح الگوی کشت با در نظر داشتن اثرات محیط‌زیستی علاوه بر افزایش بهره‌وری در مصرف نهاده‌ها، می‌توان ظرفیت‌های تولید بخش کشاورزی را به حداکثر رساند و در عین حال از آسیب‌ها و پیامدهای مخرب ناشی از تولید محصول جلوگیری به‌عمل آورد.

همان‌طور که ملاحظه گردید تفکیک نتایج مطالعه در سه بخش پیش‌بینی وضعیت هواشناسی، پیش‌بینی ردپای آب محصولات کشاورزی و در نهایت محاسبه شاخص بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب برای محصولات بود. مطابق مطالعه (Sarabi *et al.*, 2020) نتایج بخش اول نشان داد میزان بارندگی سالانه در سال‌های آتی دارای تغییرات مشابه در تمام نقاط حوضه با روند افزایشی و کاهشی همراه بود. این در حالی است که میزان افزایش دما در سراسر نقاط حوضه نمود یافته و بیانگر افزایش مقدار تبخیر و تعرق در ماه‌های گرم سال در سال‌های آتی بوده که در نتیجه آن، افزایش نیاز آبی گیاهان و در نتیجه تغییر الگوی مصرف آب کشاورزی خواهد بود. در بخش دوم محاسبه اجزای ردپای آب محصولات بیانگر این بود چغندر قند به‌طور متوسط با ۱۸ هزار مترمکعب بیشترین

و ذرت علوفه‌ای، پیاز، یونجه، گوجه‌فرنگی و خیار به‌ترتیب با ۱۵، ۱۴، ۱۴، ۱۳ و ۱۲ هزار مترمکعب مطابق با نتایج (Piri & Montaseri *et al.*, 2016 & Mobaraki, 2021) کمترین ردپای آب را به‌خود اختصاص دادند. به‌عبارتی، این محصولات ردپای آب و کربن کمتری دارند و در اولویت کاشت قرار گرفتند. با توجه به کارایی بالا و مسائل محیط‌زیستی، جوانب فنی نیز از قبیل فناوری مورد استفاده در کشاورزی و مدیریت مزرعه به‌عنوان مهمترین عامل در افزایش بهره‌وری و کاهش

بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از حمایت های مادی و معنوی دانشگاه‌های زابل و علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، همکاری اساتید راهنما، مشاورین و مهندسين سازمان آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، اداره منابع

منابع

- Ababaei, B., & Ramezani Etemadi, H. (2014). Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agriculture Water Management*, 179, 401–411. (In Persian).
- Ababai, B., & Etedali Ramazani, H. (2014). Estimation of water footprint components in wheat production in Iran. *Water and Soil*, 29(6), 1458-1468. (In Persian).
- Abedi, Z., & Soltani, P. (2016). Reducing the carbon footprint is an effective tool to deal with the unusual effects of climate change (by examining industry, agriculture, and construction separately). The 4th International Conference on Environmental Planning and Management. (In Persian).
- Ahani, E., Ziaee, S., Mohammadi, H., Mardani Najafabadi, M., & Mirzaee, A. (2023). Proposing the structure of a multi-objective mathematical programming model with water-food-energy nexus approach for crop production. *Journal of Agricultural Economics & Development*, 37(1), 83–102. (In Persian). <https://doi.org/http://doi.org/10.22067/jead.2022.77691.1147>
- Al-Saidi, M., & Elagib, N. A. (2017). Towards understanding the integrative approach of the water, energy, and food nexus. *Science of The Total Environment*, 574, 1131–1139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.046>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 2-13.
- Bazrafshan, Z., Ramezani Etedali, H., A., & Bazrafshan, A. (2020). Temporal and spatial distribution of water footprint components and virtual water trade in walnut products in Iran. *Echo Hydrology*, 7(3), 583–593. (In Persian).
- Daneshgar, H., Bagheri, M., Mardani Najafabadi, M., Alijani, F., & yavari, G. (2021). Effects of climate change on hydrological and economic conditions of Bushkan plain farmers. *Agricultural Economics Research*, 13(2), 259-280. (In Persian).
- Emamzadeh, S. M., Forghani, M. A., Karnema, A., & Darbandi, S. (2016). Determining an optimum pattern of mixed planting from organic and non-organic crops about economic and environmental indicators: A case study of cucumber in Kerman, Iran. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 207–214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.001>
- Ercin, A. E., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*, 64, 71–82.
- Eslami, Z., Janatrostami S., & Ashrafzadeh A. (2019). Application of modeling in management of water, energy, and food nexus. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(2), 1–8. (In Persian).
- Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T. E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*, 120, 49–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017>
- Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water energy food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science & Policy*, 104, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.008>
- Fu, Y., Zhao, J., Wang, C., Peng, W., & Wang, Q., & Zhang, C. (2018). The virtual water flow of crops between intraregional and interregional in mainland China. *Agricultural Water Management*, 208, 204–213.
- Kalballi, E., Ziaee, S., Najafabadi, M. M., & Zakerinia, M. (2021). Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124067>
- Khalili, T., Saraei, M., Babazadeh, H., & Ramezani Etedali., H. (2019). Water resources management of crops in Qom province using water footprint concept. *Ecology*, 6(4), 1109–1119.
- Layani, G., & Bakhshoodeh, M. (2022). Effects of climate change on the agricultural sector in the Kheirabad River Basin: Application of WEAP Software. *Agricultural Economics Research*, 13(4), 208–223. <https://doi.org/10.30495/JAE.2021.21701.2030> (In Persian).
- Lee, S. H., Choi, J. Y., Hur, S. O., Taniguchi, M., Masuhara, N., Kim, K. S., Hyun, S., Choi, E., Sung, J., & Yoo, S. H. (2020). Food-centric interlinkages in agricultural food-energy-water nexus under climate change and irrigation management. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105099. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105099>
- Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Ji, Y., Liu, D., Zhang, C., & Li, T. (2019). An optimal modeling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. *Science of The Total Environment*, 651, 1416–1434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.291>
- Madani, K., Agha Kouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: Challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997–1016.

- Mardani Najafabadi, M., Ziaee, S., Nikouei, A., & Ahmadpour Borazjani, M. (2019). Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173, 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.02.006>
- Masood, S., Khurshid, N., Haider, M., Khurshid, J., & Khokhar, A. M. (2022). Trade potential of Pakistan with the south Asian Countries: A gravity model approach. *Asia Pacific Management Review*. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2022.02.001>
- Montaseri, M., Rasouli Majd, N., Behmanesh, J., & Rezaei, H. (2016). 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).
- Nikmehr, S., & Zibaeii, M. (2020). Assessing the effects of climate change on hydrological and economic conditions of south Karkheh sub-basin. *Agricultural Economics And Development*, 34(1), 63–79. <https://doi.org/10.22067/JEAD2.V33I4.84531> (In Persian).
- Piri, H., & Mobaraki, M. (2021). Investigating water footprints and water consumption efficiency of crops of potatoes, sugar beets, tomatoes, and forage corn in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(6), 103–120. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18398.3399>
- Report in Kashfaroud Basin. (2009). Tous Water Engineers Company, integrated management of water resources.
- Rezaei Zaman, M., Morid, S., & Delavar, M. (2016). Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. *Agricultural Systems*, 147, 98–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.06.001>
- Safaei, V., Pourmohamad, Y., & Davari, K. (2021). Integrated approach of water, energy, and food in water resources management (Case study: Mashhad catchment). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(5), 1708–1721. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1399.14.5.18.9>
- Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarin, A. (2020). Investigating the effects of future climate change on temperature and precipitation (Case study: Torgh dam watershed). *Journal of Meteorology and Climate Science*, 3(1), 63-83. (In Persian).
- Schlenker, W., & Lobell, D. B. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014010>
- Zhuo, L., & Hoekstra, A. Y. (2017). The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency, and green and blue water footprint. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 4, 185-194.