Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Agricultural Market and Economics,Vol. 1, No 2, Autumn and winter 2024 p: 34-50

CC BY NC

"Research Paper"

OPEN ACCESS

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 Ahani[1], Saman Ziaee[2], Hamid Mohammadi[3], Mostafa Mardani Najafabadi[4] and Abbas Mirzaei[5]

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@asnrukh.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 m^3/t) in a pessimistic scenario had the highest and the lowest water footprint with 502 m^3/ton forage with 502 m^3/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/m^3 ،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

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]

[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

OPEN ACCESS

"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 و 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@asnrukh.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 ۲۰۴۰-۲۰۲۱ 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 چغندرقند، 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. سیب‌زمینی، 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 برمترمکعب 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 قابل‌توجه‌ای از ردپای آب سبز را به‌خود اختصاص دادند. در مقابل سهم ردپای آب 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. به‌طوری که استمرار شرایط خشکسالی در حوضه منجر به کاهش ۴۸ و ۵۶ درصد در بهره‌وری آن شد. بیشترین ردپای آب آبی و کربن به‌ترتیب محصولات سیب‌زمینی، چغندرقند، 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 آب 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

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 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

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

بیست 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 تغییر اقلیم طی دوره‌های اخیر در کره زمین، افزایش فشار فعالیت‌های بی حدوحصر بشر بر محیط‌زیست است (Nikmehr & Zibaeii, 2020; Safaee *et al.*, 2021). شواهد موجود حاکی از تأثیر فعالیت‌های انسانی بر اقلیم 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 تغییر قرار داده است (Emamzadeh *et al.*, 2016; Schlenker & Lobell, 2010). افزایش میانگین دمای جهانی آشکارترین پیامد افزایش CO_2 در سطح جهانی است. در سال‌های اخیر غلظت گازهای گلخانه‌ای و به‌ویژه دی‌اکسیدکربن افزایش یافته است که علاوه بر تغییر در پارامترهای هواشناسی، فعالیت‌های کشاورزی را نیز به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت‌تأثیر قرار داده است (Esteve et al., 2015; Madani., 2016). 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 تغییر اقلیم 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; Safaee *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 برجای گذارد (Abedi & Soltani, 2016). بنابراین، کشاورزان مهمترین گروهی هستند که به‌دلیل نوسانات دمایی حاصل از تغییر اقلیم 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 (Safaee *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 حالی‌که دارای تفاوت‌های قابل‌توجهی 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 بیلان 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. به‌طورکلی، 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) این‌رودخانه‌ها عمدتاً به شاخه اصلی رودخانه (کشف‌رود) نمی‌رسند و در اراضی آبخور واقع شده و در حوضه آبریز همان رودخانه‌ها به مصرف کشاورزی رسیده و

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

در نهایت تنها جریانات سیلابی به شاخه اصلی رودخانه می‌رسند. این امر عمدتاً به‌دلیل 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 به‌طور 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 به‌خود اختصاص داده است. سالیانه به‌طور متوسط ۹/۷ میلیارد مترمکعب آب زیرزمینی از آبخوان‌های محدوده استخراج و به مصارف مختلف عمدتاً کشاورزیمی‌رسد(Safaee *et al.*, 2021).

مفاهیم ردپای آب و بهره‌وری آن مؤثرترین ابزارها در تحلیل مسائل مرتبط با مدیریت منابع آب است. ردپای آب برای تمامی کالاهای تولیدی (کشاورزی و صنعت) و خدماتی قابل‌بحث است که از سه جزء تشکیل شده است. ردپای آب آبی اشاره به مقدار آبی دارد که به‌منظور 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 زدودن آلودگی از آن مصرف می‌شود. ردپای کربن در حقیقت مقیاسی از مقدار کل خروجی دی‌اکسیدکربن و متان مربوط به یک فعالیت معین با 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). به‌طور کلی ردپاهای اکولوژیکی، کربن و آب در حالت‌های کلی معیارهای کمّی 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 به‌خصوص 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 درصد از کل حجم ردپای آب در تولید گردوی کشور یعنی معادل ۱۴۰۳ میلیون مترمکعب در سال به‌صورت تجارت آب مجازی از کشور صادر می‌شود (Bazrafshan *et al.*, 2020). پیری و مبارکی (۲۰۲۱) طی پژوهشی ردپای آب و بهره‌وری آب محصولات سیب‌زمینی، چغندرقند، 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 چغندرقند 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 موردمطالعه در اقلیم همدان به‌دست 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 یابند امکان‌پذیر است (Ercin & Hoekstra, 2014). ژئو و هواکسترا (۲۰۱۷) اثرات اقدامات مدیریت مختلف کشاورزی از جمله راندمان آبیاری، بهره‌وری مصرف آب و دریای 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 بین لمللی مدیریت آب و حسابداری ردپای آب می‌باشد (Al-Saidi & Elagib, 2017; Lee *et al.*, 2020). روش حسابداری ردپای آب با تأاکید بر محصولات و میزان آب مصرفی در فرآیند تولید در سطح منطقه‌ای، کشوری و بین المللی 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،

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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

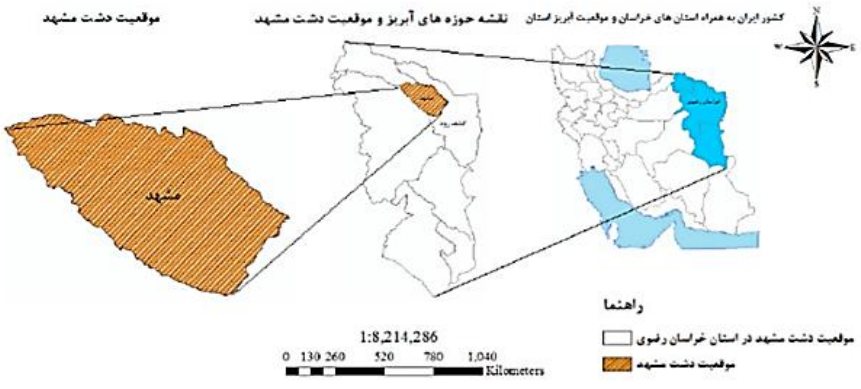
مواد و روش‌ها

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 و 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، ۲۷۴/۲۷۰۲ 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[1] از پروژه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)[2] تحت سه سناریو SSP1-2/6[3]، SSP3-7/0 و SSP5-8/5 انجام شد.



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

1- Atmosphere-Ocean General Circulation Model
2- Coupled Model Intercomparing Project Phase 6
3- Shared Socioeconomic Pathways

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم دربخش 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 مدل‌سازی شد.

گام اول: حوضه آبریز مورد مطالعه در نرم‌افزار ویپ مدل‌سازی شد. سپس اطلاعات کشاورزی، اقلیمی، خاک شناسی و هیدرولوژی منطقه بر حسب نیاز وارد نرم‌افزار شد. اطلاعات مورد نیاز در این بخش از گزارش‌های سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، سازمان جهاد کشاورزی و سازمان هواشناسی (برای برخی از متغیرها از جمله حداکثر و حداقل دما و بارش، رطوبت، سرعت باد، جریان‌هایی ورودی آب، حجم آب ذخیره‌شده در سد کارده به‌صورت سری‌زمانی ماهانه –برحسب داده‌های موجود و مورد نیاز و برخی دیگر از متغیرها از جمله ضرایب گیاهی، سطح زیرکشت، راندمان، حجم آب تقاضاشده در بخش شهری و صنعتی به‌صورت نرخ متوسط) در سال زراعی ۹۸–۹۷ جمع‌آوری گردید.

گام دوم: از مدل کالیبره‌شده 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، شاخص‌های ردپای آب، اجزای ردپای آب محصول، شاخص بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب برآورد گردید. سپس ردپای کربن به‌عنوان ملاک انتشارگازهای گلخانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت (Ababai & Ramazani, 2014).

مدلسازی هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی اثرات تغییراقلیم

شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی و مدل‌های مدیریت منابع آب انجام شد. مدل WEAP[1] یک ابزار برنامه‌ریزی منابع آب است که بر اصل توازن آب استوار است و زیرحوضه‌های مختلف، گره‌های تقاضای آب، زیرساخت‌ها، جریان‌های آب و کانال‌های انتقال آب را نشان می‌دهد. در این مدل مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی به‌وسیله شبیه‌سازی فرآیندهای بارش– رواناب در سطح حوضه با استفاده از سری‌های زمانی داده‌های آب و هوایی محاسبه می‌شود (Ahani *et al.*, 2023). بنابراین، هر واحد زیرحوضه به کلاس‌های کاربری زمین مختلف تقسیم و توازن آب تحت شرایط آب و هوایی آن زیرحوضه محاسبه می‌شود. MABIA یکی از ماژول‌های موجود در مدل WEAP است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک مانند تبخیر و تعرق، رواناب، نفوذ و آبیاری بکار گرفته می‌شود. 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 شبیه‌سازی می‌شود. 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 فائو– پنمن– مانتیث[2] 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 داده‌های 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 آب‌آبیاری مورد نیاز محصولات کشاورزی هر منطقه از طریق برنامه زمان‌بندی آبیاری و عمق آبیاری مدلسازی شد.

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

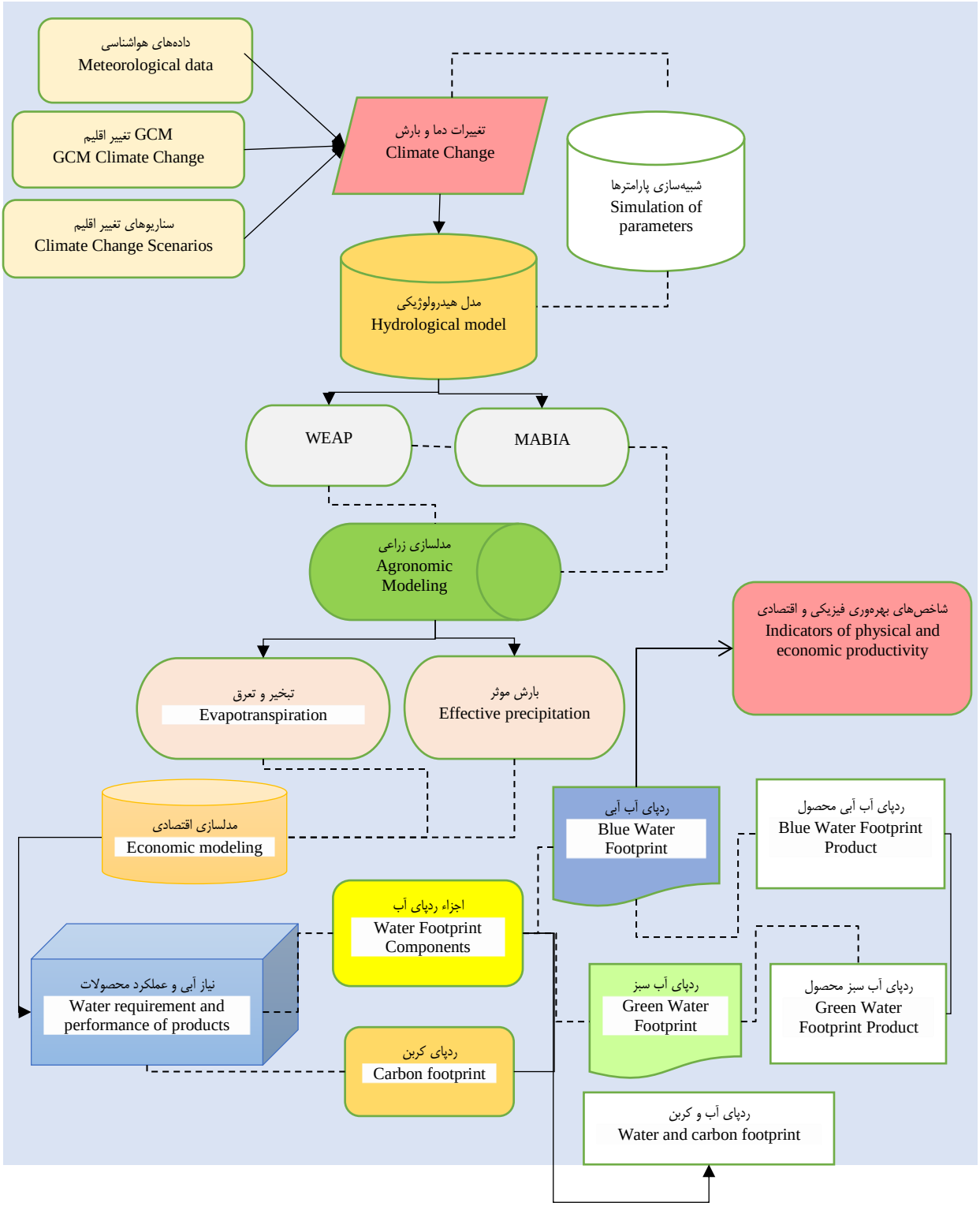
$$1-\frac{Y_a}{Y_m}=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_c}\right) \qquad (۱)$$

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

روش MABIA موجود در نرم‌افزار WEAP ابزاری مناسب جهت شبیه‌سازی این گونه متغیرها می‌باشد. مزیت اصلی WEAP در رویکرد یکپارچه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن، در راستای سیاست‌ها است. WEAP در معادلات خود، مسائل مربوط به نیاز (الگوی مصرف آب، راندمان تجهیزات، استفاده مجدد، هزینه‌ها و تخصیص) را همگام با مسائل مربوط به منابع (جریان‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، مخازن و انتقال‌های آب) لحاظ کرده است (Safaee *et al.*, 2021). در نرم‌افزار WEAP از ابزار PEST به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد. این ابزار به کاربر این امکان را می‌دهد که به‌طور خودکار فرآیند مقایسه خروجی مدل با داده‌های 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.

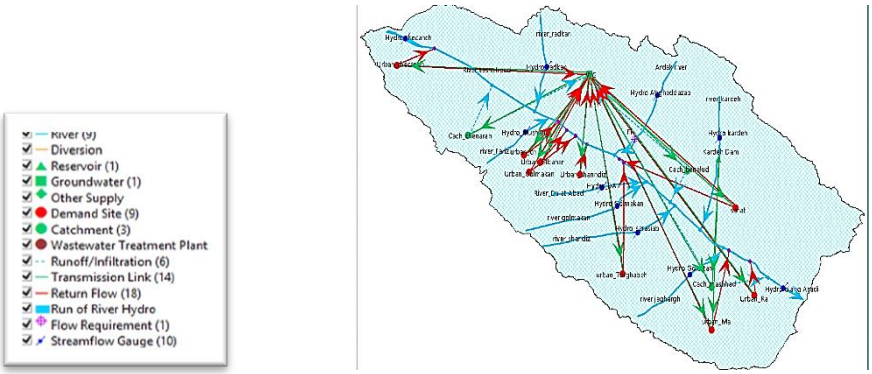
1- Water Evaluation & Planning
2- FAO Penman Monteith

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]



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)

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]



شکل۳- شماتیک سیستم منابع آب محدوده مطالعاتی
Figure 3. Schematic of the water resources system of the study area

شبیه‌سازی پارامترهای حوضه تحت سناریوهای اقلیمی برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۳ صورت گرفته است. به‌منظور کالیبره‌کردن مدل طراحی‌شده در نرم‌افزار، از داده‌های هیدرولوژی و کشاورزی حوضه آبریز کشف‌رود طی سال‌های ۲۰۲۱ - ۲۰۱۳ استفاده شده است. پس از مدل‌سازی منابع آب در نرم‌افزار ویپ، به‌منظور تعریف سناریوهای تغییر اقلیم، از نتایج شبیه‌سازی تغییر اقلیم 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.

هیئت بین‌الدول تغییراقلیم (IPCC)[1] هر چند سال یکبار، گزارش‌هایی را از وضعیت اقلیم، اثرات، سازگاری با این پدیده و کاهش آسیب‌پذیری‌ها در مقیاس جهانی و منطقه‌ای ارائه می‌دهد. در هر کدام از این گزارش‌ها، مدل‌های اقلیمی (GCM)[2] تحت یکسری سناریوهای انتشار، شبیه‌سازی‌هایی را از مؤلفه‌های اقلیم در دوره تاریخی و آینده (سناریو) ارائه می‌دهند (Sarabi *et al.*, 2020; Ahani *et al.*, 2023). فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده (CMIP6) الگوی تکامل و ویژگی‌های سازگاری فاز پنجم را ادامه می‌دهد و شامل سناریوهای جدید سازماندهی‌شده از مدل‌سازی اقلیمی جهانی است که برای شناخت مکانیسم‌های مختلف آب‌وهوا طراحی شده است. سناریوهای گزارش ششم شامل ۵ زیرگروه اصلی به شاخص‌های کمّی از جمله جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی، منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و سناریوهای تعمیم‌یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری) برنامه انرژی و تغییرات کاربری اراضی تأکید دارد. 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 (Sarabi *et al.*, 2020).

شایان ذکر است که برونداد مدل‌های فاز ششم تغییر اقلیم به تازگی انتشار یافته و در دسترس قرار گرفته‌اند. در این فاز از تلفیق واداشت گازهای گلخانه‌ای و خط سیرهای اجتماعی- اقتصادی جهت سناریوها استفاده شده است. بنابراین، این مطالعه تغییرات آینده دما و بارش روی حوضه آبریز کشف‌رود را باتوجه به برونداد مدل‌های فاز ششم مورد بررسی داد.

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

$$WF_{Blue,Irr} = IR = 10 * IE * GI \quad (۲)$$

$$WF_{Green,Irr} = 10 * P_{eff} = 10 * (ET_c - IR) \quad (۳)$$

براساس رابطه (۲)، نیاز ناخالص آبیاری (GI برحسب میلی‌متر)، P_{eff} بارندگی مؤثر و راندمان متوسط آبیاری (IE) در منطقه با استفاده از نرم‌افزار NETWAT به‌دست آمد. نیاز خالص آبیاری (IR برحسب میلی‌متر) از حاصل‌ضرب نیاز ناخالص آبیاری در راندمان متوسط آبیاری بر حسب میلی‌متر محاسبه شد. ردپای آب سبز محصول[3] و ردپای آب آبی محصول[4] براساس تقسیم آب مصرفی سبز و آب آبی بر مقدار محصول تولیدی محاسبه شد.

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

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

$$PWP_{Blue,Irr} = \frac{Y_{Crops}}{WF_{Blue\,Irr} * 1000} \quad (۴)$$

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

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- General Circulation Models
3- Crop Green Water Footprint
4- Crop Blue Water Footprint

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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

$$EWP_{Blue,Irr} = \frac{NB}{WF_{Blue,Irr}} \qquad (۵)$$

$EWP_{Blue,Irr}$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).

$$WF_{(Crop)}(Blue) = \frac{WF_{Blue,Irr}}{Y(Crops)} \qquad (۶)$$

$$WF_{(Crop)}(Green) = \frac{WF_{Green,Irr}}{Y(Crops)} \qquad (۷)$$

$WF_{(Crop)}(Blue)$ 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[1] 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 بخش‌کشاورزی بر میزان عملکرد هر محصول محاسبه شد. ردپای کربن در واقع مقیاسی از 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 بخش‌کشاورزی براساس رابطه (۸) محاسبه شد.

$$CE_{co2} \sum_{i=1}^{I} \frac{\begin{pmatrix} Ceuf\ .\ Fa \sum_{k=1}^{k} A + Cep.\,Pa \sum_{k=1}^{k} A + \\ Ceaf.\,Afa \sum_{k=1}^{k} A + Ced.\,Da \sum_{k=1}^{k} A + \\ Cei.\,Eia.\,\theta_i \sum_{k=1}^{k} A \end{pmatrix}}{\sum_{k=1}^{k} Y \cdot \sum_{k=1}^{k} A} \qquad (۸)$$

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.

$$WF_{(Co2)}(Blue) = \frac{WF_{(Crop)}(Blue)}{CE_{co2}} \qquad (۹)$$

$$WF_{(Co2)}(Green) = \frac{WF_{(Crop)}(Green)}{CE_{co2}} \qquad (۱۰)$$

براساس روابط (۹) و (۱۰)، $WF_{(Co2)}(Blue)$ و $WF_{(Co2)}(Green)$ به‌ترتیب ردپای آب آبی کربن حاصل از تولید محصول[2] و ردپای آب سبز کربن حاصل از تولید محصول[3]، CE_{co2} 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 ۲۰۴۰-۲۰۲۱ بر حسب میلی‌متر

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

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

منبع: نتایج تحقیق

Source: research findings

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

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

1- Carbon Footprint
2- Blue Water Footprint of Carbon from Crops
3- Green Water Footprint of Carbon from Crops

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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 (به‌ترتیب 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 توزیع بارش و دما در طول دوره رشد این محصولات به‌گونه‌ای است که، مقدار بارندگی نیاز آبی گیاه را تأمین نموده و نتیجه آن، عملکرد این محصول کاهش چندانی نیافته است. به‌طور کلی، تغییر اقلیم یک عامل مهم در فرآیند تولید محصولات زراعی در سطح حوضه آبریز کشف‌رود بوده و علاوه بر عملکرد، درآمد کشاورزان را نیز تحت تأثیر قرار داد.

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)

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

منبع: یافته‌های تحقیق
Source: Research findings

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 ۲۰۴۰-۲۰۱۳ 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 ۲۰۴۰-۲۰۱۲ در سناریو بدبینانه و میانه افزایش یافته است. 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. به‌دنبال افزایش تنش آبی، عملکرد محصولات مختلف در حوضه آبریز نیز کاهش یافته است. بنابراین، افزایش نیاز ناخالص آبی محصولات زراعی به‌دنبال 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.

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)

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

منبع: یافته‌های تحقیق
Source: research findings

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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 چغندرقند، ذرت علوفه‌ای، پیاز، یونجه، گوجه‌فرنگی و خیار به‌ترتیب با ۱۵، ۱۴، ۱۴، ۱۳ و ۱۲ هزار متر مکعب در هکتار در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین، ردپای آب برای محصول گندم و جو نیز به‌ترتیب برابر ۷۳۵۹ و ۳۹۱۱ مترمکعب در هکتار می‌باشد.

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

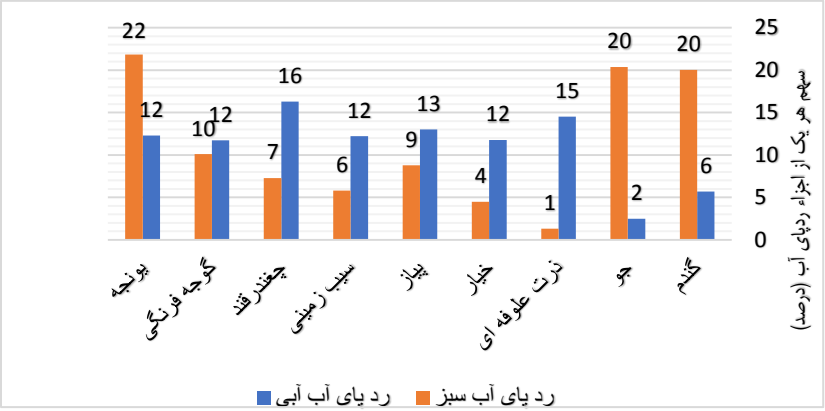
Table 4. Simulation of water footprint components in selected water products of the study area

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

منبع: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

در ادامه سهم ردپای آب در تولید هر هکتار از محصولات حوضه با راندمان آبیاری ۴۵ درصد محاسبه شد. مطابق شکل (۴) سهم هر یک از اجزا در ردپای کل محصولات نشان داده شد.



شکل ۴- سهم هر یک از اجزای ردپای آب محصولات زراعی محدوده مطالعاتی (مترمکعب بر هکتار) (منبع: یافته‌های تحقیق).

Figure 4. Share each component of the water footprint of crops of the study area (mcm/ha) (Source: research findings)

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 گوجه فرنگی به‌ترتیب ۲۱/۸۵، ۲۰/۳۶، ۲۰/۰۳ و ۱۰/۰۹ درصد بیشترین سهم و مقدار قابل‌توجه‌ای از ردپای آب سبز را به‌خود اختصاص دادند. در مقابل سهم ردپای آب آبی محصولات ذکرشده به‌ترتیب ۱۲/۳، ۲/۵، ۵/۷ و ۱۱/۷ درصد محاسبه گردید.

سهم ردپای آب سبز نیز در محصولات یونجه، جو، گندم و گوجه فرنگی 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، چغندرقند و گوجه فرنگی به‌ترتیب معادل ۱/۷، ۱۳، ۱۳/۰۴، ۱۳/۴، ۱۶/۸ و ۱۸/۲ مترمکعب بر تن اختصاص یافت

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]

[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

جدول ۵- شبیه‌سازی اجزاء ردپای آب در محصولات منتخب محدوده مطالعاتی۲۰۴۰- ۲۰۲۱ (مترمکعب - تن)
Table 5. Simulation of water footprint components in selected products of the study area 2021-2040 (mcm - ton)

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
چغندرقند Sugar beet	671	16.8	687.8
گوجه فرنگی Tomato	377.08	18.2	395.3
یونجه Alfalfa	1284.5	127.8	1412.3

منبع: یافته‌های تحقیق Source: Research findings

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 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، چغندرقند و سیب‌زمینی محاسبه شد.

جدول ۶- اثر تغییر اقلیم بر ردپاهای آب محصولات زراعی (مترمکعب- تن)
Table 6. Effect of climate change on crop water footprints (mcm-Ton)

محصول Crop		سال شبیه‌سازی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ 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	1846.5	1393	2055.7	2465.2
	ردپای آب سبز Green Footprint	363.4	111.4	113.5	113.5
جو Barley	ردپای آب آبی Blue Footprint	870.4	975	1270.06	1505.3
	ردپای آب سبز Green Footprint	399.4	139.6	150.15	175.17
ذرت علوفه‌ای Maize	ردپای آب آبی Blue Footprint	318.4	344.5	475.20	502
	ردپای آب سبز Green Footprint	1.7	0.035	0.039	0.040
خیار Cucumber	ردپای آب آبی Blue Footprint	630.5	774.6	846.9	934.13
	ردپای آب سبز Green Footprint	13.4	0.702	0.724	0.744
پیاز Onion	ردپای آب آبی Blue Footprint	346	430.03	569.8	597.3
	ردپای آب سبز Green Footprint	13.04	0.322	0.338	0.347
سیب‌زمینی Potato	ردپای آب آبی Blue Footprint	486.3	736.5	834.2	945.7
	ردپای آب سبز Green Footprint	13	0.481	0.515	0.565
چغندرقند Sugar beet	ردپای آب آبی Blue Footprint	671	763.5	914	1046.9
	ردپای آب سبز Green Footprint	16.8	0.657	0.730	0.740
گوجه فرنگی Tomato	ردپای آب آبی Blue Footprint	377.08	439.3	457	584.02
	ردپای آب سبز Green Footprint	18.2	0.55	0.55	0.581
یونجه Alfalfa	ردپای آب آبی Blue Footprint	1284.5	1736.6	2376.3	2623.2
	ردپای آب سبز Green Footprint	127.8	12.78	15.03	16.5

منبع: یافته‌های تحقیق Source: Research findings

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

شاخص بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی مصرف آب برای محصولات منتخب در جدول (۷) در سناریوهای مختلف اقلیم شبیه‌سازی شد. سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، خیار، پیاز و جو به‌ترتیب بالاترین بهره‌وری اقتصادی در شرایط اقلیمی بدبینانه دارا بودند. در سناریوهای اقلیمی 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 ۲۰۴۰ می‌باشد.

همچنین، کمترین میزان بهره‌وری فیزیکی در اقلیم بدبینانه را گندم و یونجه به‌ترتیب با ۳۰۹/۲ و ۳۳۶/۲ کیلوبرمترمکعب شامل هستند. به‌عبارت‌دیگر، با تغییر شرایط اقلیم و افزایش نیاز آبی محصولات، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب در سطح پایین‌تری قرار گرفت. شاخص بهره‌وری اقتصادی گندم و یونجه در سناریو بدبینانه به‌ترتیب معادل ۹۲۷۶/۳ و ۷۴۴۴/۰۲ ریال بر مترمکعب محاسبه شد. به‌طوری که استمرار شرایط خشکسالی در حوضه منجر به کاهش ۴۸ و ۵۶ درصد در بهره‌وری آن شد.

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

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

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

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

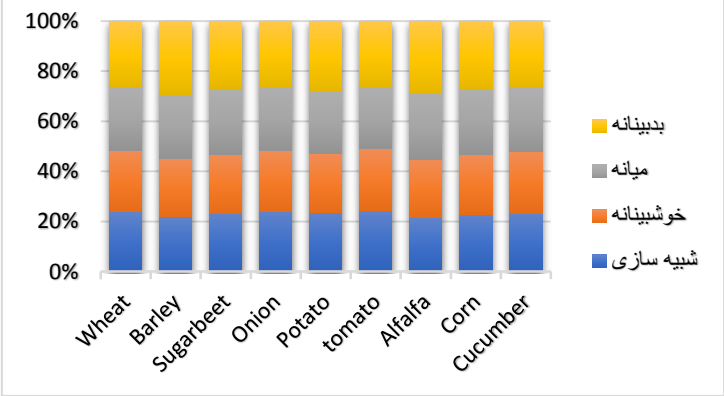
Economic productivity (rials/m3) and physical productivity (kilo/m3) (Source: Research findings)

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 اقلیم، ایران در سال ۲۰۱۷ 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 کمّی‌کردن میزان انتشار با استفاده از شاخص ردپای کربن می‌توان به کاهش اثرات تغییر اقلیم کمک کرد.

ردپای کربن معیاری مهم در ارزیابی میزان انتشارگازهای گلخانه‌ای حاصل از فعالیت‌های تولیدی و محصولات مختلف است. ارزیابی ردپای کربن و کاهش تشعشات 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 چغندرقند، پیاز، گوجه فرنگی، خیار و ذرت علوفه‌ای و کمترین مقدار آن به محصولات جو، یونجه و سیب‌زمینی اختصاص یافت.

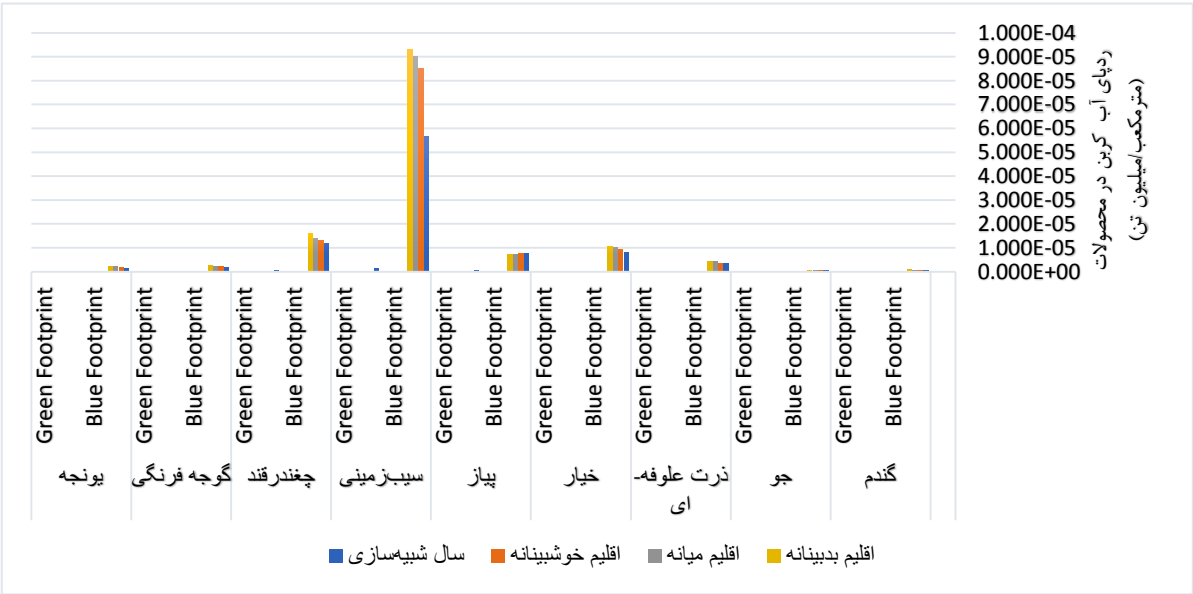
[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]

[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]



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

در شکل (۶) ردپای آب آبی و آب سبز کربن برای محصولات مورد مطالعه نشان داده شد. بنابراین محصولات سیب‌زمینی، چغندرقند، پیاز، خیار و ذرت به‌ترتیب بیشترین ردپای آب آبی و آب سبز کربن و محصولات گندم، جو، گوجه فرنگی و یونجه به‌ترتیب کمترین ردپای آب آبی و آب سبز کربن را 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، 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. به‌عبارتی، در سناریوهای مختلف اقلیمی ردپای آب کربن منتشر شده در ازای هر واحد از محصول نیز افزایش یافت.



(Source: Research findings)

در مجموع میزان انتشارگازهای 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، 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 منطبق‌بودن 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 آب‌آبیاری بیش از ۱۰ درصد به‌عنوان مرز مواجه‌شدن سیستم

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]
[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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 ۲۰۴۰-۲۰۲۱ 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) الگوی‌کشت 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 نظرداشتن 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 چغندرقند 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 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 (Montaseri *et al.*, 2016; Piri & 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 کمّی 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 (Safaee *et al.*, 2021; Daneshgar *et al.*, 2021). همچنین با مدیریت صحیح تولید، راندمان آبیاری، مدیریت صحیح مصرف آب در بخش کشاورزی، کم‌آبیاری و افزایش بهروری 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 نظرداشتن مسئله بیلان 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 محصولاتی 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 شایان‌توجهی 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

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]

[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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 مهندسین سازمان آب منطقه‌ای، جهاد کشاورزی، اداره منابع طبیعی و آبخیزداری، شرکت‌های هیدروتک توس و طوس آب استان خراسان رضوی به‌دلیل در اختیار قراردادن اطلاعات تکمیلی مورد نیاز و بسیار زیادی که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

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.

Kalbali, 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.

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]

[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]

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.apmrv.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

Safaee, 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.

[Downloaded from ame.sanru.ac.ir on 2024-05-06]

[DOI: 10.61186/ame.1.2.34]