



Research Paper

Effect of Optimizing Cultivation Pattern of Agricultural Crops on Water Consumption Management Under Virtual Water and Water Footprint Approach

Vahid Esfandiyari¹, Shapour Zarifian^{2*}, Amir Isanezhad³ and Hossein Raheli⁴

¹M.Sc. Alumnus, Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Assoc. Professor, Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Ph.D Alumnus, Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴Professor, Department of Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Article information

Received: February 18, 2023

Revised: May 10, 2023

Accepted: May 20, 2023

Keywords:

System Dynamics

Virtual Water

Water Footprint

Water Scarcity

*Corresponding author:

zarifian@tabrizu.ac.ir



Abstract

The main challenges facing the agricultural sector in Sistan plain include scarcity of water resources, inadequate water rationing, and suboptimal cultivation patterns. Based on this, the main objective of this study was to determine the optimal cultivation pattern of agricultural crops by considering the virtual water and water footprint and assessing the impact on water consumption in this region. To achieve this objective, virtual water indicators and green, blue and gray water footprints of agricultural crops were calculated to quantify water consumption in the Sistan region. Then, considering the virtual water and water footprint, the optimal pattern of plant cultivation was determined using a fuzzy ideal programming model. The optimization model results were tested based on a system dynamics approach in the Vensim PLE8.3.5 software. The results showed that the virtual water content of agricultural products in this region was 2.69 m³/kg. The annual water requirement of agricultural crops was 1019 MCM, of which 62% is met. After optimizing the cultivation pattern, the water requirement reduced to 600 MCM per year, of which 89% is supplied. Additionally, the optimization of cultivation patterns increased water supply to the environmental sector from 138 to 240 MCM per year.

How to cite this paper: Zarifian, S., Esfandiyari, V., Isanezhad, A., & Raheli, H. (2024). Effect of optimizing cultivation pattern of agricultural crops on water consumption management under virtual water and wwater footprint approach. *Environ. Water Eng.*, 10(2), 243-261 <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.385968.1848> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Water is one of the modern society's greatest challenges. The World Economic Forum report identified the water crisis as one of the main threats to humanity. Therefore, scarce freshwater resources should be used optimally and with the highest level of efficiency. The agricultural sector is the largest consumer of freshwater resources, and water management in this sector is essential. One primary way to manage water consumption in agriculture is to reduce the water used in this sector. The concept of virtual water and the water footprint is one of the key ways to reduce water consumption in the agricultural sector. Virtual water is defined as the amount of water needed to produce agricultural products during the production process. The water footprint is usually defined as the total volume of water used to produce one product unit. The concept of virtual water is one of the critical indicators that shows water consumption efficiency in a unit. The virtual water content indicates how many water units are consumed to produce one kilogram of agricultural product. Using the virtual water concept in agricultural cropping patterns can help manage water consumption in dry and semi-dry areas, so one of the goals of this research is to apply the virtual water index of agricultural products in presenting an optimal cultivation pattern.

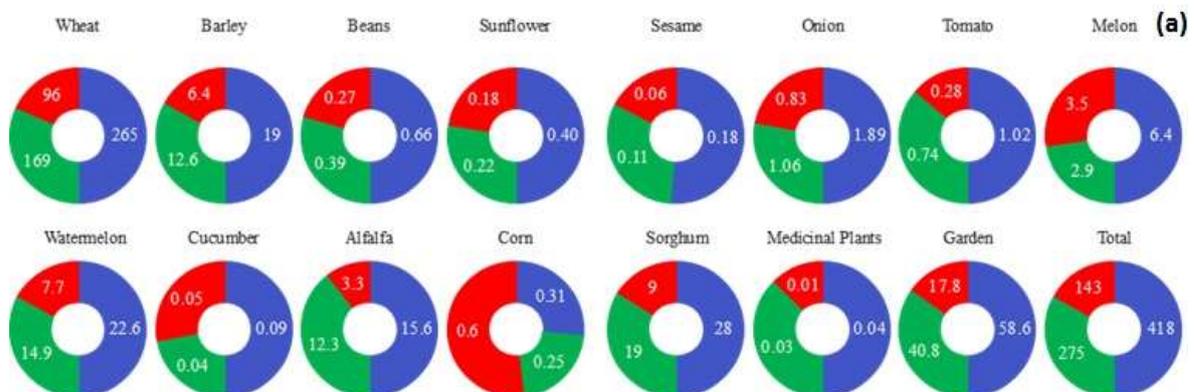
Material and Methods

This study provides an optimal cultivation model. First, the virtual water content and water footprint of the Sistan Plain agricultural crops were

calculated, and then the optimal cultivation planning was presented using the fuzzy goal programming model. Finally, the VENSIM model was used to simulate and investigate the effects of optimal cultivation patterns on water supply and demand.

Results

The findings showed that the average virtual water for agricultural products in Sistan Plain is 2.69 m³/kg. Of this, 69.5% of the water footprint of agricultural production is blue water, 17.71% is grey water, and 12.79% is green water. The water consumption in the agricultural sector of Zabol was 418 MCM, of which 275 MCM is supplied, and 143 MCM is not supplied. In the agricultural sectors of Zahak and Hamoon, the total water demand is 369 and 219 MCM per year, of which 141 and 92 MCM are not supplied, respectively (Fig. 1). A significant part of the water demand in the agricultural sectors of Sistan Plain is not met, and a shift in the agricultural production pattern towards an optimal model compatible with the region's water resources is essential. The unavailability of water resources due to severe constraints is the reason for the unmet demand for agricultural products in Sistan Plain. Among agricultural products, wheat, watermelon, alfalfa, sorghum, and fruit products have the highest water demand due to their larger cultivated area. In Zabol agricultural region, the highest amount of water supply is related to alfalfa (79%); in Zahak, it is medicinal plants (75%); and in Hamoon, it is alfalfa (72%). The most significant water shortage concerns corn, sesame, and watermelon.



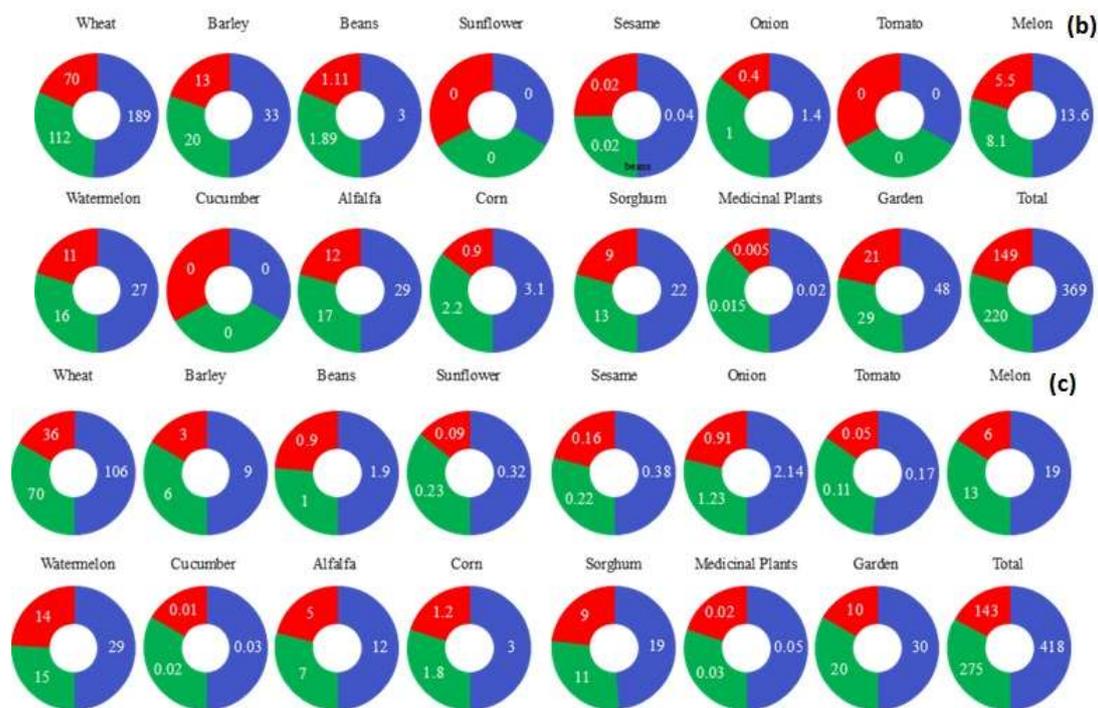


Fig. 1 The current status of water consumption, supplied and unsupplied water (MCM) of Sistan plain agricultural crops in: a) Zabol, b) Zahak, and c) Hamoon

Table 1 The current and optimal cultivated area (ha) of agricultural crops under the virtual water and water footprint approach

Crops	Zabol		Zahak		Hamoon	
	Current status	Optimal status	Current status	Optimal status	Current status	Optimal status
Wheat	39011	32007	26792	6714	15604	1057
Barley	3097	0	5379	463	1467	436
Beans	173	10	784	34	497	16
Sunflower	55	0	0	0	44	0
Sesame	24	1980	5	3703	48	860
Onion	237	0	175	0	285	0
Tomato	95	0	0	0	15	0
Melon	1258	1697	2673	1403	3735	1703
Watermelon	1895	39	2264	0	2431	38
Cucumber	20	7430	0	8936	7	2128
Alfalfa	723	299	1344	673	556	197
Corn	125	0	453	0	438	0
Sorghum	5088	5324	3868	1469	3516	1380
Medicinal Plants	31	7160	13	23358	33	7489
Garden	5331	1215	4545	1544	2727	496

In optimization with the goals of minimizing virtual water consumption and reducing blue and grey water footprints, the cultivation area of crops with the lowest virtual water content was expanded. In contrast, the cultivation area of crops with higher virtual water content was reduced. The largest cultivation area allocated in the optimization model was for medicinal plants. The cultivation area for sesame and sunflower was excluded from all cultivation patterns due to their

high grey water footprint. Cucumbers showed significant growth due to their low virtual water content compared to the current situation (Table 1). Based on the findings, optimizing the cultivation pattern with a virtual water and water footprint approach leads to improved water management in the region's agricultural sector.

Less water is consumed in the same amount of cultivated land in each agricultural sector. In the Zabol agricultural sector, water demand has

decreased from 417 MCM per year to 336 MCM per year. In the Zahak agricultural sector, water demand has decreased from 369 MCM per year to 200 MCM per year. Water demand in the Hamun agricultural sector has decreased from 232 MCM per year to 64 MCM. The main reason for the decrease in irrigation water demand in these regions is the development of crops with lower water consumption or virtual water content. With the development of an optimized cropping pattern, the water scarcity in the region is significantly reduced, with 81% of the water demand in the agricultural sector of Zabol and 100% of the water demand in the agricultural sectors of Zahak and Hamoon being met. Changing the cropping pattern in the agricultural sector towards optimal products leads to the redistribution of water resources throughout the entire region. The environmental sector, which faces a water shortage of 219 MCM annually, can receive more water after optimizing the current agricultural pattern and assuming the allocation priorities remain constant. Only 38% of the environmental sector's water demand is met. However, after optimization, the water supply in the environmental sector increased to 67% (240 MCM per year).

Conclusions

The main conclusions drawn from the study are as follows: The current crop pattern in Sistan Plain's agricultural sector is not optimal, and there is potential for reducing water consumption through an optimized crop pattern. The concept of virtual water and water footprint is suitable for managing water consumption in the agricultural sector. By optimizing the virtual water approach and reducing blue and grey water footprints, water supply in the Zabol agricultural sector can increase up to 81% and in the Zahak and Hamoon agricultural sectors up to 100%. The optimized crop pattern in the Sistan agricultural sector leads to the redistribution of scarce water resources, reducing a portion of the required water for the environment. In the optimized crop pattern, the water supply for the environment sector increased from 38 to 67%.

Data Availability

The data used (or produced) in this study is presented in the article.

Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط‌زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی بر مدیریت مصرف آب با رویکرد آب مجازی و ردپای آب

وحید اسفندیاری^۱، شاپور ظریفیان^{۲*}، امیر عیسی‌نژاد^۳ و حسین راحلی^۴

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه ترویج و توسعه روستایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲دانشیار، گروه ترویج و توسعه روستایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳دانش آموخته دکترا، گروه ترویج و توسعه روستایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۴استاد، گروه ترویج و توسعه روستایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۱۰/۲۹]	<p>کمبود منابع آب، عدم تخصیص مناسب آب و همچنین الگوی کشت غیر بهینه، از مهم‌ترین مشکلات بخش کشاورزی دشت سیستان در استان سیستان و بلوچستان هستند. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی با در نظر گرفتن آب مجازی و ردپای آب و ارزیابی تأثیر آن بر مصرف آب در این منطقه بود. برای این کار بر اساس نوع و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی شاخص‌های آب مجازی و ردپای آب سبز، آبی و خاکستری برای کمی‌سازی مصرف آب در منطقه سیستان محاسبه شد. سپس با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی الگوی بهینه کشت محصولات با در نظر گرفتن آب مجازی و ردپای آب تعیین شد. نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی تحت رویکرد پویایی سیستم در محیط Vensim PLE8.3.5 آزمایش شد. یافته‌ها نشان داد محتوای آب مجازی محصولات کشاورزی در این منطقه $2/69 \text{ m}^3/\text{kg}$ است. تقاضای آب محصولات کشاورزی 1019 MCM در سال است که ۶۲٪ آن تأمین می‌شود. پس از بهینه‌سازی الگوی کشت، تقاضای آب به 600 MCM در سال کاهش می‌یابد که ۸۹٪ آن تأمین می‌شود. همچنین بهینه‌سازی الگوی کشت باعث افزایش تأمین آب بخش محیط‌زیست از 138 به 240 MCM در سال شد.</p>
تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۲/۲۰]	
تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۲/۳۰]	
واژه‌های کلیدی: آب مجازی پویایی سیستم ردپای آب کمبود آب	
*نویسنده مسئول: zarifian@tabrizu.ac.ir	
	

نحوه استناد به این مقاله:

اسفندیاری، وحید، ظریفیان، شاپور، عیسی‌نژاد، امیر. & راحلی، حسین. (۱۴۰۳). تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی بر مدیریت مصرف آب با رویکرد آب مجازی و ردپای آب. محیط‌زیست و مهندسی آب. 10(2) 243-261
<https://doi.org/10.22034/ewe.2023.385968.1848>



۱- مقدمه

در منطقه سیستان بهینه نیست. (Fathi et al. (2020) با استفاده از برنامه‌ریزی هدف فازی دریافتند الگوی کشت بهینه در دشت فیروزآباد شامل محصولات گندم، جو، ذرت و چغندرقد است که مصرف آب در بخش کشاورزی را کاهش می‌دهد. Ghorbani et al. (2020) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی دریافتند الگوی کشت بهینه توسعه داده شده منجر به کاهش ۴۸٪ مصرف آب در بخش کشاورزی گرگان و افزایش پنج درصدی سود اقتصادی کشاورزان شده است. (Vafabakhsh et al. (2018) گزارش کردند که استفاده از الگوی بهینه کشت توسعه داده شده به‌وسیله برنامه‌ریزی آرمانی، موجب کاهش ۱۱٪ مصرف آب و افزایش سود خالص بخش کشاورزی به ۲۷٪ می‌شود. Shafa et al. (2023) با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی چندهدفه برای توسعه الگوی کشت بهینه دریافتند مصرف آب و تقاضای آب در پس از بهینه‌سازی به ترتیب بهینه‌سازی الگوی کشت ۵۰ و ۲۰٪ کاهش می‌یابد. (Mohammadzadeh et al. (2022) با استفاده از برنامه‌ریزی هدف به بهینه‌سازی الگوی کشت دشت مراغه-بناب پرداختند. یافته‌ها نشان داد الگوی کشت بهینه باعث مصرف آب کمتر شده است. (Daghighi et al. (2017) با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به بهینه‌سازی الگوی کشت دشت ارژن در استان فارس پرداختند. یافته‌ها نشان داد الگوی بهینه کشت به‌طور قابل توجهی بر کاهش مصرف آب مؤثر بوده و درآمد کشاورزان منطقه را افزایش داده است. (Wang et al. (2023) با محاسبه ردپای آب تولید محصولات کشاورزی را در ۳۵۶ شهر کشور چین بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد در سال ۲۰۲۰ کل ردپای آب تولید محصولات کشاورزی MCM ۸۰۶۰۰۰ بود که آب سبز بیشترین سهم را در ردپای آب محصولات کشاورزی دارد. (Nova et al. (2023) به تحلیل ردپای آب محصولات کشاورزی صادراتی کشور شیلی در حوضه‌های اصلی تولیدکننده این محصولات پرداختند. یافته‌ها نشان داد ردپای آب سبز و خاکستری به‌طور قابل توجهی در حوضه‌های جنوب مرکزی افزایش یافته است، در حالی که مصرف آب آبی در حوضه‌های ناحیه مرکزی افزایش یافته است. (Bozorg-Haddad et al. (2023) به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی جهت کاهش کمبود آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل ونسیم پرداختند. یافته‌ها نشان داد اجرای اقدامات سخت‌گیرانه از جمله حذف تأمین آب بخش شرب میانگین سالانه حجم آب دریاچه ارومیه را به MCM ۲۱۰۰۰ تا سال ۲۰۸۰ می‌رساند. (Amini et al. (2020) بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات عمده زراعی در حوضه تلوار استان کردستان را مورد

موضوع آب یکی از چالش‌های اصلی بسیاری از جوامع مدرن امروزی است. در گزارش مجمع جهانی اقتصادی نیز، بحران آب به‌عنوان یکی از خطرات اصلی پیش روی بشریت معرفی شد (World Economic Forum 2020; Isanezhad et al. 2024). از این رو، منابع آب شیرین کمیاب باید به‌صورت بهینه و در بالاترین سطح بهره‌وری مورد استفاده قرار گیرند. از آنجایی که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین است، مدیریت مصرف آب در این بخش ضروری است. یکی از راه‌های اساسی مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی، کمی‌سازی میزان مصرف آب در این بخش است (Qi et al. 2018). در این زمینه، روش‌هایی برای تحلیل و کمی‌سازی مصرف آب و درک بهتر ارتباط بین فعالیت‌های تولیدی کشاورزی و فشار فزاینده بر روی منابع آب شیرین کمیاب توسعه داده شد. این روش‌ها شامل آب مجازی و ردپای آب است. مفهوم آب مجازی برای اولین بار توسط Allan (1992) معرفی شد. آب مجازی به‌عنوان حجم آب مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی در طول فرایندهای تولید تعریف شد (Zhang et al. 2018). ردپای آب معمولاً به‌عنوان کل حجم آب مورد استفاده برای تولید یک واحد محصول است که به سه نوع آب سبز، آب آبی و آب خاکستری تقسیم می‌شود. آب سبز آب حاصل از بارندگی است که در ریشه خاک ذخیره می‌شود. آب آبی به برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی اشاره دارد. فاضلاب شهری و ساختمانی (به استثنای پساب سرویس‌های بهداشتی) به عنوان آب خاکستری شناخته می‌شود. همچنین آب شیرینی که برای رقیق‌سازی کودهای شیمیایی و آلاینده‌ها به کار می‌رود، به عنوان آب خاکستری در نظر گرفته می‌شود (Cao et al. 2011; Hoekstra et al. 2023). مفهوم آب مجازی یکی از شاخص‌های مهم نشان‌دهنده بهره‌وری آب مصرفی است.

هنگام بهینه‌سازی الگوی کشت، اغلب اهداف متعددی مانند به حداکثر رساندن عملکرد محصول، به حداقل رساندن هزینه‌های ورودی و کاهش اثرات محیط‌زیستی باید در نظر گرفته شود. برنامه‌نویسی هدف فازی یک ابزار تصمیم‌گیری قدرتمند برای بهینه‌سازی الگوی کشت است؛ زیرا می‌تواند چندین هدف را به‌طور هم‌زمان بهینه کرده و بهترین سازش را در میان آنها به دست آورد. پژوهش‌های متعددی از برنامه‌ریزی ریاضی برای ارائه الگوی کشت بهینه استفاده کرده‌اند. (Ramroudi et al. (2023) با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی چندهدفه به تخصیص بهینه آب آبیاری بین محصولات گندم، جو، جالیز و سورگوم در منطقه سیستان پرداختند. یافته‌ها نشان داد الگوی کشت و تخصیص آب



پژوهش در این است که از مفاهیم آب مجازی و ردپای آب برای کمی‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی استفاده شده است. این روش برای مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند مؤثر باشد و به افزایش بهره‌وری آب و کاهش مصرف آب در این مناطق کمک کند. هدف از این پژوهش تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی با در نظر گرفتن آب مجازی و ردپای آب و ارزیابی تأثیر آن بر مصرف آب با استفاده از رویکرد پویایی سیستم بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پژوهش، شامل مناطق شمالی دشت سیستان از جمله بخش کشاورزی شهرستان‌های زابل، زهک و هامون است (شکل ۱). تولیدات کشاورزی منطقه محصولات زراعی و باغی بوده که ۹۸٪ مربوط به محصولات زراعی و ۲٪ نیز مربوط به محصولات باغی است. مهم‌ترین محصولات کشاورزی منطقه عبارت‌اند از گندم، جو، محصولات جالیزی مانند خربزه و هندوانه، محصولات صیفی و علوفه دامی است. منطقه سیستان از نظر اقلیمی در مناطق خشک و بیابانی قرار دارد. منابع آب منطقه سیستان وابسته به رودخانه هیرمند است. این رودخانه از خاک افغانستان وارد مرز شرقی ایران شده و تنها منبع تأمین آب منطقه سیستان محسوب می‌شود.

بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که محصول سیب‌زمینی دارای بهره‌وری فیزیکی بالا به میزان $3/46 \text{ kg/m}^3$ و محصول گندم کمترین بهره‌وری فیزیکی به میزان $0/43 \text{ kg/m}^3$ را دارا است. با وجود عملکرد فیزیکی پایین گندم، بخش زیادی از آب مصرفی در محصول گندم، آب سبز است. حال آن‌که سیب‌زمینی کم‌ترین مقدار آب سبز را مصرف می‌کند. همچنین، از لحاظ بهره‌وری اقتصادی محصولات گندم، جو و سیب‌زمینی بیش‌ترین سود خالص اقتصادی را دارند و میزان سطح اراضی تحت کشت تطابق مناسبی با بهره‌وری اقتصادی دارد. (Ding et al (2019) مصرف آب آبی، سبز و خاکستری برای تولید محصول را در منطقه هیلونگ‌جیانگ^۱ چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تفاوت‌های منطقه‌ای در کمیت و نوع ردپای آب در ۱۳ محصول وجود دارد، مناطق با مقادیر بالای ردپای آب خاکستری، در جنوب غربی، جنوبی و مرکزی هیلونگ‌جیانگ قرار دارند که نشان می‌دهد این مناطق تقاضای آب بیش‌تری برای احیای محیط زیست دارند.

پژوهش‌های متعددی به تعیین الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی با استفاده از روش برنامه‌ریزی هدف پرداخته‌اند که نشان‌دهنده اهمیت و کاربرد این روش در توسعه الگوی کشت بهینه است. حال آنکه علی‌رغم توجه فراوان پژوهش‌های قبلی به موضوع الگوی بهینه کشت با هدف مدیریت مصرف آب، مطالعاتی که با استفاده از شاخص ردپای آب سبز، ردپای آب آبی، ردپای آب خاکستری و محتوای آب مجازی محصولات کشاورزی به توسعه الگوی کشت بهینه پرداخته باشند، محدود می‌باشند. نوآوری این



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه دشت سیستان واقع در استان سیستان و بلوچستان، ایران

Fig. 1 The study area of Sistan & Baluchistan province, Iran

¹Heilongjiang

۲-۲- آب مجازی و ردپای آب

برای محاسبه ردپای آب ابتدا باید میزان مصرف آب آبی و سبز محاسبه شود. به منظور محاسبه شاخص‌های مصرف آب آبی^۱ (CWU_{Blue}) و مصرف آب سبز^۲ (CWU_{Green}) برحسب m³/ha، از روابط (۱ و ۲) استفاده شد (Hekmatnia et al. 2020; Ding et al. 2019):

$$CWU_{Blue} = IR_{Irr} = 10 \times IE_{Irr} \times GI_{Irr} \quad (1)$$

$$CWU_{Green} = 10 \times P_{eff} = 10 \times (ET_c - IR_{Irr}) \quad (2)$$

که، IR_{Irr} نیاز خالص آبیاری^۳ (mm)، IE_{Irr} راندمان آبیاری^۴ (mm)، GI_{Irr} نیاز ناخالص آبیاری^۵ mm، P_{eff} جمع میزان بارندگی مؤثر^۶ در طول دوره رشد گیاه (mm) که از اختلاف بین جمع تبخیر و تعرق واقعی محصول (ET_c) و نیاز خالص آبیاری به دست می‌آید.

هکتار از زمین زراعی (AR)، کسر آیشویی (α)، حداکثر غلظت قابل قبول مواد آلوده‌کننده (C_{Max}) و غلظت طبیعی مواد آلوده‌کننده (C_{nat}) محاسبه می‌شود (Cao et al. 2023):

$$WF_{Green} = CWU_{Green} / Y \quad (3)$$

$$WF_{Blue} = CWU_{Blue} / Y \quad (4)$$

$$WF_{Gray} = (a \times AR)(C_{max} - C_{nat}) / Y \quad (5)$$

برآورد حجم آب مجازی مصرف شده (VWC) برحسب (m³/kg) با استفاده از رابطه (۶) به دست آمد (Hekmatnia et al. 2020):

$$VWC = CWR / Y \quad (6)$$

که، CWR نیاز آبی محصول و Y متوسط عملکرد آن محصول است.

۲-۳- مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی

تابع هدف برای مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی الگوهای بهینه کشت محصولات کشاورزی با در نظر گرفتن آب مجازی، ردپای آب سبز، ردپای آب خاکستری و ردپای آب آبی به صورت رابطه (۷) و (۸) است.

$$\text{Minimize } \sum(W_i \times d_i) + \sum(V_j \times e_j) + \sum(G_k \times f_k) + \sum(B_t \times h_t) \quad (7)$$

$$\sum(a_m \times x_m) \leq A, \sum(c_m \times x_m) \leq C \quad (8)$$

می‌باشد (Hekmatnia et al. 2020; Soltani et al. 2011; Dai et al. 2021).

در تابع هدف آرمانی فازی، چهار هدف آرمانی در نظر گرفته شد که شامل حداقل‌سازی مصرف آب مجازی، حداکثرسازی ردپای آب سبز، حداقل‌سازی ردپای آب خاکستری و حداقل‌سازی ردپای آب آبی در کل محصولات کشاورزی منطقه مورد مطالعه هستند. محدودیت‌های اعمال شده نیز شامل مساحت اراضی کشاورزی و منابع آب در دسترس می‌باشند.

۲-۴- مدل سیستم دینامیک (پویا)

در این پژوهش برای شبیه‌سازی تأثیر تغییر الگوی کشت از وضعیت فعلی به وضعیت بهینه بر سامانه کشاورزی منطقه، از مدل‌سازی سیستم استفاده شد. در مدل‌سازی سیستم

ردپای آب سبز^۷ (WF_{Green}) در رابطه (۳) و ردپای آب آبی^۸ (W_{Blue}) در رابطه (۴) بر حسب m³/kg از تقسیم مقدار آب مصرفی آبی و مقدار آب مصرفی سبز بر مقدار محصول تولیدی (Y) محاسبه می‌شود. ردپای آب خاکستری (WF_{Gray}) در رابطه (۵) به وسیله مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در هر

که، W_i وزن مربوط به هدف حداقل‌سازی مصرف آب مجازی؛ d_i انحراف از هدف حداقل‌سازی مصرف آب مجازی؛ V_j وزن مربوط به هدف حداکثرسازی ردپای آب سبز؛ e_j انحراف از هدف حداکثرسازی ردپای آب سبز؛ G_k وزن مربوط به هدف حداقل‌سازی ردپای آب خاکستری؛ f_k انحراف از هدف حداقل‌سازی ردپای آب خاکستری؛ B_t وزن مربوط به هدف حداقل‌سازی ردپای آب آبی و h_t انحراف از هدف حداقل‌سازی ردپای آب آبی است. هم‌چنین، a_m مساحت مورد نیاز برای کشت محصول m؛ x_m متغیر تصمیم برای سطح زیر کشت محصول m؛ c_m نیاز آبی محصول در واحد سطح؛ A محدودیت زمین موجود در دسترس و C کل منابع آب موجود در دسترس

⁵Gross Irrigation Requirements

⁶Effective Precipitation

⁷Water Footprint Green

⁸Water Footprint Blue

¹Crop Water Use Blue

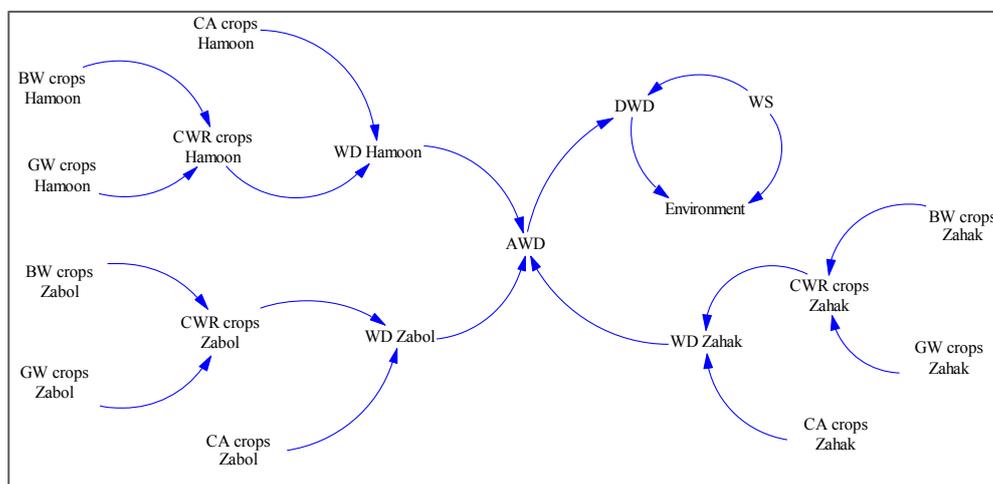
²Crop Water Use Green

³Net Irrigation Requirements

⁴Irrigation Efficiency

- دینامیک، متغیرها و روابط بین آن‌ها به عنوان فرضیه دینامیک به صورت نمودار علت و معلولی^۱ ترسیم می‌شود. برای این کار ابتدا روابط بین متغیرها در قالب گزاره‌های توصیفی مشخص شده و سپس به صورت روابط ریاضی تعریف شده و وارد نرم‌افزار ونسیم شدند. این نرم افزار به منظور شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی کارکرد سیستم‌ها با استفاده از الگوریتم‌های تخصیص منابع در شرایط واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های زمانی مربوط به هر یک از متغیرهای روابط (۹) تا (۱۳) مطابق شکل (۲) نیز وارد نرم‌افزار شد. بنابراین نمودار علت و معلولی ترسیم شده شامل جهت روابط بین متغیرها، روابط ریاضی بین آن‌ها و مقادیر عددی هر یک متغیرها در طول زمان می‌باشد (Isanezhad et al. 2024). گزاره‌های توصیفی روابط بین متغیرها شامل موارد ذیل هستند.
 - عرضه آب (WS)^۹ تحت تأثیر خطوط جریان انتقال آب و میزان آب تخصیص داده شده است که در هر سال مقدار ثابتی است.
 - میزان تأمین آب بخش کشاورزی (DWD)^{۱۰} در رابطه شماره (۱۲) تحت تأثیر تقاضای آب کشاورزی (AWD) در رابطه (۱۰) و عرضه آب (WS) است.
 - تأمین آب بخش محیط‌زیست (EN)^{۱۱} در رابطه (۱۳) تحت تأثیر عرضه آب (WS) و تأمین آب بخش کشاورزی (DWD) است (Kobuliev et al. 2021; Song et al. 2019).
- روابط ریاضی بین متغیرهای نمودار علت و معلولی را می‌توان به صورت رابطه‌های (۹) الی (۱۳) نشان داد (Song et al. 2019; Wang et al. 2022):

- تقاضای آب (WD)^۲ تحت تأثیر نیاز آبی هر محصول (CWR)^۳ و سطح زیر کشت (CA)^۴ است.
 - تقاضای آب کشاورزی (AWD)^۵ حاصل ضرب تقاضای آب محصولات کشت شده در منطقه (WD) و راندمان آبیاری (IE)^۶ است.
 - نیاز آبی هر محصول حاصل جمع تقاضای آبیاری یا آب آبی (BW)^۷ و بارش مؤثر یا آب سبز (GW)^۸ است.
- $$WD = \sum(CWR \times CA) \quad (9)$$
- $$AWD = WD \times IE \quad (10)$$
- $$CWR = BW + GW \quad (11)$$
- $$DWD = WS - AWD \quad (12)$$
- $$EN = WS - DWD \quad (13)$$



شکل ۲- ساختار مدل‌سازی شده علت و معلولی (CLD) بخش کشاورزی دشت سیستان

Fig. 2 The causal loop diagram (CLD) modeled structure of the agricultural sector of the Sistan Plain

⁷Blue Water

⁸Green Water

⁹Water Supply

¹⁰Delivered Water Demand

¹¹Environment

¹Causal Loop Diagram (CLD)

²Water Demand

³Crop Water Requirement

⁴Cultivated Area

⁵Agricultural Water Demand

⁶Irrigation Efficiency

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- آب مجازی

در شکل (۳) آب مجازی محصولات کشاورزی ارائه شده است. یافته‌ها نشان داد متوسط آب مجازی برای تولید محصولات کشاورزی در کل دشت سیستان $2/69 \text{ m}^3/\text{kg}$ است. اگر میزان آب مجازی محصولات کشاورزی بیشتر از $1 \text{ m}^3/\text{kg}$ باشد جزو محصولات پرمصرف آب طبقه‌بندی می‌شود (Hekmatnia et al. 2020). بر اساس این نظریه، تولید محصولات کشاورزی در منطقه سیستان بیش‌تر از استاندارد آب مصرف می‌کند. در بین محصولات کشت شده بیش‌ترین میزان محتوای آب مجازی مربوط به محصولات کنجد، آفتاب‌گردان، حبوبات و گندم است. کم‌ترین میزان محتوای آب مجازی مربوط به سورگوم، پیاز و ذرت است. (Akhavan et al. (2023 در بررسی محتوای آب مجازی محصولات کشاورزی دشت مغان دریافتند محصول ذرت ($0/3 \text{ m}^3/\text{kg}$) کم‌ترین محتوای آب مجازی را در بین محصولات کشاورزی این منطقه دارند. این مقایسه نشان می‌دهد اگرچه شرایط اقلیمی دشت سیستان و دشت مغان باهم متفاوت است؛ اما محصول ذرت به دلیل داشتن عملکرد بالا در هر هکتار زمین کشت شده، کم‌ترین محتوای آب مجازی را در بین الگوی زراعی هر دو منطقه دارد. در تحقیقی دیگر Hekmatnia et al. (2020) دریافتند متوسط آب مجازی محصولات کشاورزی در منطقه سیستان $2/35 \text{ m}^3/\text{kg}$ است که با نتایج این پژوهش مطابقت ندارد. آن‌ها برای بررسی محتوای آب مجازی الگوی زراعی سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ را مورد مطالعه قرار دادند که به دلیل تفاوت در عملکرد محصولات، تفاوت در میزان تبخیر و تعرق، تفاوت در جهت و سرعت باد و تفاوت در ساعات آفتابی در روز، بین سال‌های این مطالعه با این تحقیق نتایج متفاوت است. همچنین تفاوت‌های عمده تحقیق حاضر با پژوهش Hekmatnia et al. (2020) در بررسی محتوای آب مجازی محصولات کشاورزی برای آخرین سال زراعی در دشت سیستان ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و در محاسبه ردپای آب‌های سبز، آبی و خاکستری محصولات کشاورزی است. (Arefinia and Ahmadaali, (2020 میانگین ۲۰ ساله‌ای از آب مجازی محصولات کشاورزی ایران منتشر کردند که ذرت و پیاز جزو محصولات با کم‌ترین محتوای آب مجازی و گندم جزو محصول با بیشترین محتوای آب مجازی بود که هم‌سو با یافته‌های این پژوهش است.

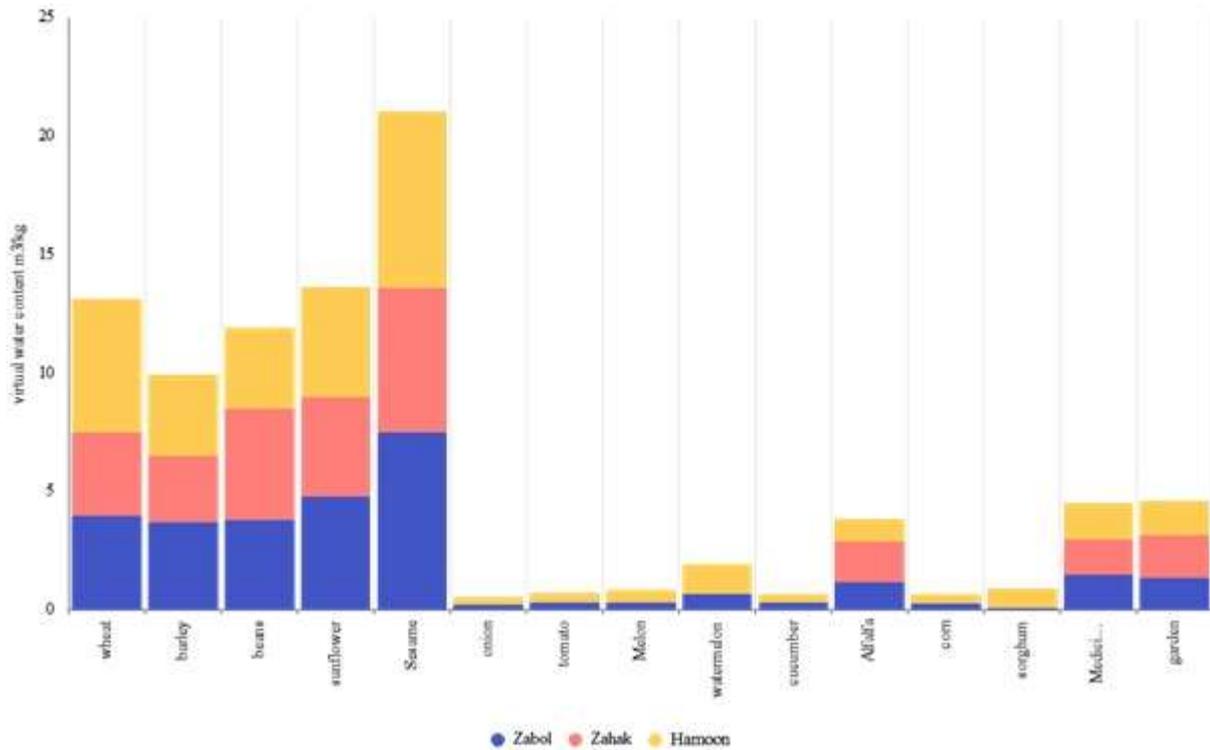
دوره زمانی برای مدل‌سازی بر اساس اطلاعات در دسترس از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۹ در نظر گرفته شده است. نمودار علت و معلولی بر اساس فرضیات زیر توسعه داده شده است:

- (۱) تغییر اقلیم ثابت فرض شده است.
- (۲) الگوی کشت بر اساس الگوی کشت بهینه شبیه‌سازی می‌شود.
- (۳) نیاز آبیاری محصولات کشاورزی با توجه به ثابت فرض شدن شرایط اقلیمی، ثابت فرض شده است.
- (۴) مقدار منابع آب موجود در طول زمان ثابت فرض شده است.
- (۵) نرخ رشد جمعیت بر اساس نرخ رشد فعلی در نظر گرفته شده است.

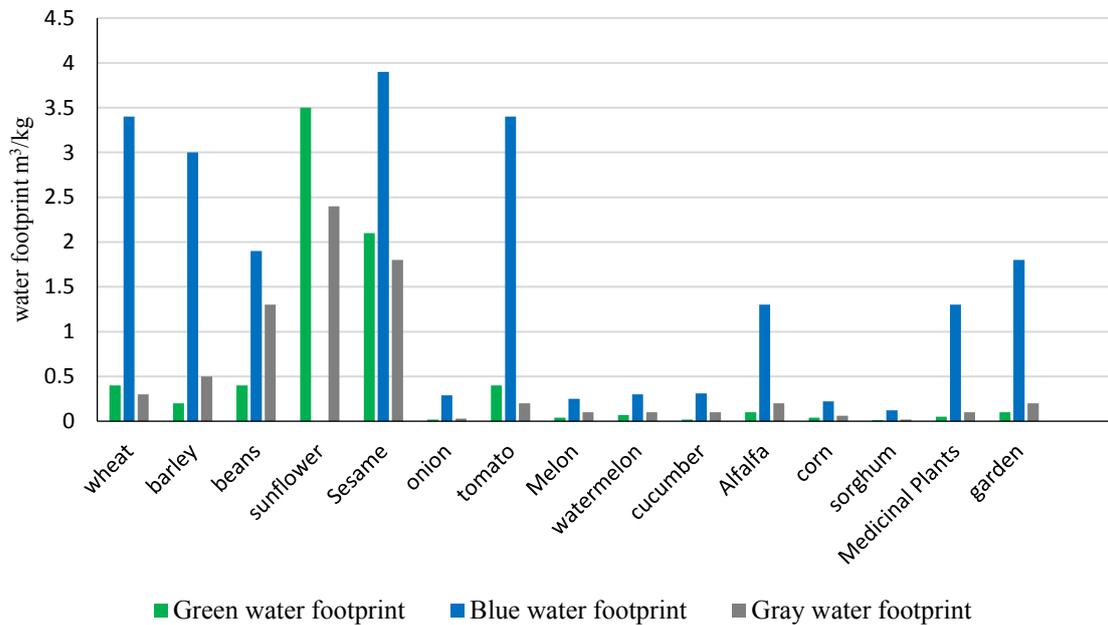
در شکل (۲) ابتدا تقاضای آب (WD) کل محدوده مورد مطالعه به تفکیک مناطق کشاورزی سه شهرستان هامون، زابل و زهک بر اساس نیاز آبی کشاورزی و سطح زیر کشت محاسبه و سپس مقادیر به دست آمده به عنوان تقاضای آب کشاورزی (AWD) تجمیع شد. میزان تأمین آب کشاورزی نیز بر اساس عرضه و تقاضای آب کشاورزی و همچنین کسری آب مورد نیاز بخش زیست‌محیطی تعیین گردید. متغیرها و روابط ریاضی بین آن‌ها در در محیط Vensim PLE8.3.5 انجام شد. برای تعریف روابط بین متغیرها از روابط ریاضی (۹) تا (۱۳) استفاده شد.

۲-۵- داده‌ها

در این پژوهش برای محاسبات مربوط به آب مجازی و ردپای آب از داده‌های عملکرد، نیاز آبی، تعداد ساعت آفتابی در روز، جهت و سرعت باد، تبخیر و تعرق، میزان رطوبت، مقدار بارندگی مؤثر و مقدار کودهای شیمیایی استفاده شده در تولید محصولات کشاورزی استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز این بخش از سازمان هواشناسی استان سیستان و بلوچستان و مرکز جهاد کشاورزی شهرستان زابل به دست آمد. اطلاعات مربوط به میزان منابع آب موجود شامل حجم آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی و تعداد چاه‌های کشاورزی سهم بخش کشاورزی از مصرف منابع آب سطحی منطقه از شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان دریافت شدند.



شکل ۳- محتوای آب مجازی محصولات کشاورزی (m³/kg)
 Fig. 3 virtual water content of agricultural products (m³/kg)



شکل ۴- ردپای آب سبز، آبی و خاکستری محصولات کشاورزی (m³/kg)
 Fig. 4 Green, blue and gray water footprint of agricultural products (m³/kg)

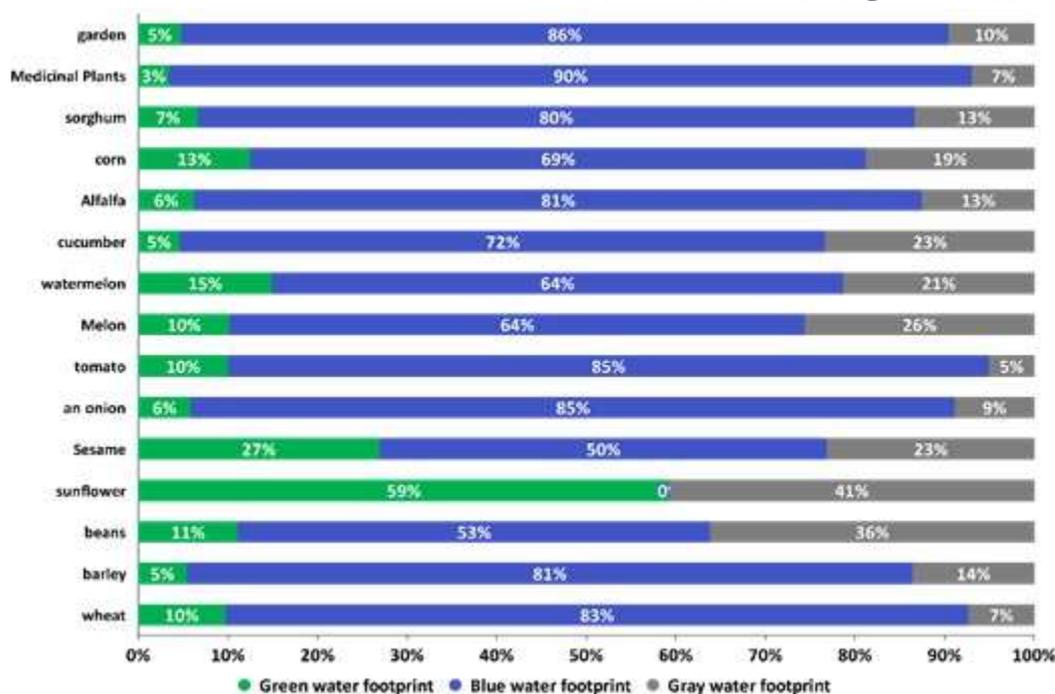
محصولات کشاورزی دشت سیستان دارد. ۶۹/۵٪ از ردپای آب تولید محصولات کشاورزی آب آبی، ۱۷/۷۱٪ آب خاکستری و ۱۲/۷۹٪ آب سبز است. آب سبز کمترین سهم را در ردپای آب تولید محصولات کشاورزی دارد (شکل ۵)؛ زیرا آب و هوای این

۲-۳- ردپای آب

در شکل (۴) متوسط ردپای آب سبز، آبی و خاکستری ناشی از تولید محصولات کشاورزی در دشت سیستان ارائه شده است. آب آبی بیشترین سهم را در کل ردپای آب تولید

محصولات کشاورزی می‌شود که می‌تواند موجب تغییر در تولیدات، رژیم غذایی و تجارت محصولات کشاورزی شود (Qi et al. 2018). همچنین یافته‌های مربوط به ردپای آب، اثرات زیست‌محیطی آب خاکستری موجود در محصولات کشاورزی را برجسته می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد آفتاب‌گردان، حبوبات، کنجد و خربزه بیشترین ردپای آب خاکستری را در بین محصولات کشاورزی دشت سیستان دارند.

منطقه گرم و خشک است و میزان بارش مؤثر برای تولیدات کشاورزی نسبتاً ناچیز است. بیش‌ترین سهم آب آبی استفاده شده برای تولیدات کشاورزی در کل ردپای آب مربوط به گیاهان دارویی، محصولات باغی، گوجه، پیاز و گندم است. از نظر حجمی بیش‌ترین ردپای آب آبی مربوط به کنجد، گندم و گوجه‌فرنگی است. آفتاب‌گردان بیش‌ترین ردپای آب سبز را دارد (شکل ۴). یافته‌های مربوط به ردپای آب از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا باعث آگاهی از اجزای محتوای آب مجازی



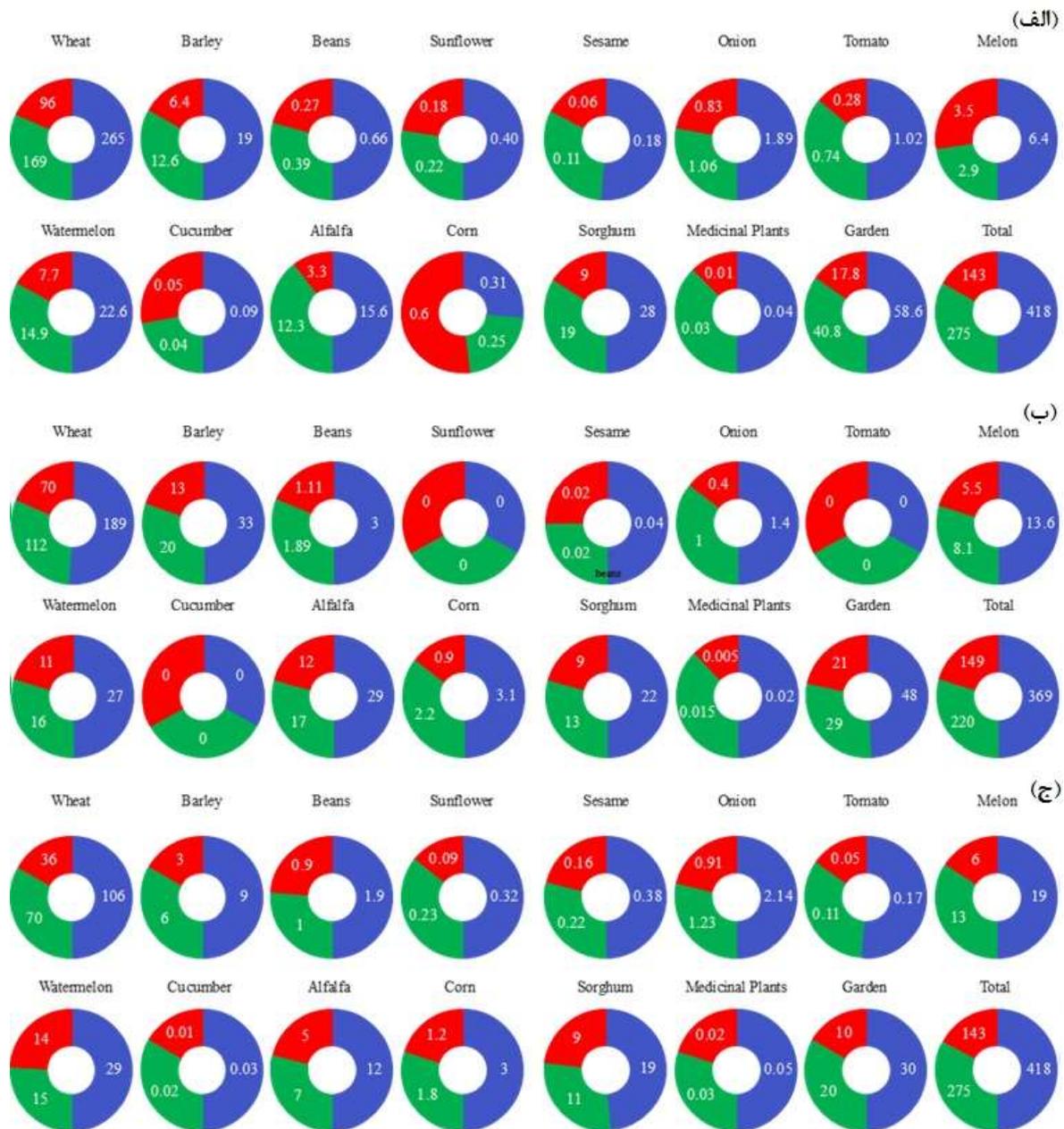
شکل ۵- متوسط ردپای آب سبز، آبی و خاکستری تولید محصولات کشاورزی

Fig. 5 The average of green, blue and gray water footprint of agricultural crop

ضروری است. عدم تأمین تقاضای آب محصولات کشاورزی به دلیل محدودیت شدید منابع آب در دشت سیستان است. عدم تأمین تقاضای آبی موجب کاهش عملکرد و در نتیجه کاهش درآمد کشاورزان منطقه می‌شود. مخازن چاه نیمه و رودخانه هیرمند منبع اصلی منبع تأمین آب در بخش کشاورزی این منطقه است. با توجه به اینکه رودخانه هیرمند از کشور افغانستان سرچشمه می‌گیرد، تأمین آب بخش کشاورزی دشت سیستان، هرساله با چالش‌های اساسی و عدم اطمینان مواجه می‌شود. دولت افغانستان با احداث سد و بندهای انحرافی در مسیر رودخانه هیرمند، موجب کاهش آورد آب از رودخانه هیرمند شده است. در بین محصولات کشاورزی گندم، هندوانه، یونجه، سورگوم و محصولات باغی به دلیل سطح زیر کشت بیش‌تر، تقاضای آب بیش‌تری دارند (شکل ۶).

۳-۳- تقاضای آب

در شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی مصرف آب محصولات کشاورزی بخش‌های کشاورزی دشت سیستان ارائه شده است. مصرف آب در بخش کشاورزی زابل ۴۱۸ MCM است که از این مقدار ۲۷۵ MCM آن تأمین شده و ۱۴۳ MCM تأمین نمی‌شود. در بخش کشاورزی زهک و هامون به ترتیب کل تقاضای آب ۳۶۹ و ۲۱۹ MCM در سال است که ۱۴۱ و ۹۲ MCM آن تأمین نمی‌شود. بنابراین به تناسب سطح کل زیر کشت هر منطقه، بخش‌های سه‌گانه زابل، زهک و هامون به ترتیب با ۳۴/۲، ۳۸/۲ و ۴۲٪ کمبود آب مواجه هستند. لذا بخش عمده‌ای از تقاضای آب بخش‌های کشاورزی دشت سیستان تأمین نمی‌شود و تغییر ساختار زراعی محصولات کشاورزی به سمت الگوی بهینه متناسب با محدودیت منابع آب منطقه



شکل ۶- شرایط کنونی مصرف آب، آب تأمین شده و تأمین نشده (بر حسب MCM) محصولات کشاورزی سه شهرستان‌های دشت سیستان: الف- زابل، ب- زهک، و ج- هامون

Fig. 6 The current status of water consumption, supplied and unsupplied water (MCM) of agricultural crops in counties of Sistan plain: a) Zabol, b) Zahak, and c) Hamoon

مربوط به کنجد به میزان ۵۰٪ است. همچنین در شکل (۷-ج) در شهرستان زهک نیز بیش‌ترین میزان تأمین آب مربوط به گیاهان دارویی به میزان ۷۲٪ است و بیش‌ترین کمبود آب نیز مربوط به هندوانه به میزان ۴۸٪ است.

در شکل (۷-الف) در مناطق کشاورزی شهرستان زابل بیش‌ترین میزان تأمین آب مربوط به یونجه به میزان ۷۹٪ و بیش‌ترین کمبود آب نیز مربوط به ذرت به میزان ۷۰٪ است. در شکل (۷-ب) در شهرستان هامون بیش‌ترین میزان تأمین آب مربوط به یونجه به میزان ۷۲٪ و بیش‌ترین کمبود آب نیز



شکل ۷ - وضعیت فعلی تأمین و عدم تأمین تقاضای آب محصولات کشاورزی دشت سیستان: الف- زابل، ب- زهک، ج- هامون
 Fig. 7 The current situation of the percentage of supply and unmet water demand for agricultural crops in the Sistan plain: a) Zbol, b) Zahak, and c) Hamoon

۳-۴- بهینه‌سازی

سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین سطح زیر کشت کنگد و آفتاب‌گردان به دلیل ردپای آب خاکستری بالا از تمام الگوهای کشت حذف شد. خیار به دلیل داشتن محتوای آب مجازی کم، رشد قابل توجهی نسبت به وضعیت فعلی داشت. در نتایج بهینه‌سازی ما کشت گندم از الگوی کشت به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. این نتیجه با یافته‌های Mekonnen and Hoekstra (2020) مطابقت دارد. Mekonnen and Hoekstra (2020) دریافتند حدود ۲۷٪ از ناپایداری جهانی ردپای آب آبی مربوط به محصول گندم است.

در بهینه‌سازی با اهداف حداقل‌سازی مصرف آب مجازی و کاهش ردپای آب آبی و خاکستری عمدتاً سطح زیر کشت محصولاتی که کمترین محتوای آب مجازی را دارند توسعه یافت و محصولاتی که بیشتری محتوای آب مجازی را دارند سطح زیر کشت آن‌ها کاهش یافت (جدول ۱). بیشترین سطح زیر کشت اختصاص‌یافته در مدل بهینه‌سازی مربوط به گیاهان دارویی است. گیاهان دارویی به دلیل داشتن محتوای آب مجازی و نیاز آبی ناچیز در مقابل سایر محصولات، بیشترین

جدول ۱- سطح زیر کشت فعلی و بهینه محصولات کشاورزی (ha) تحت رویکرد آب مجازی و ردپای آب

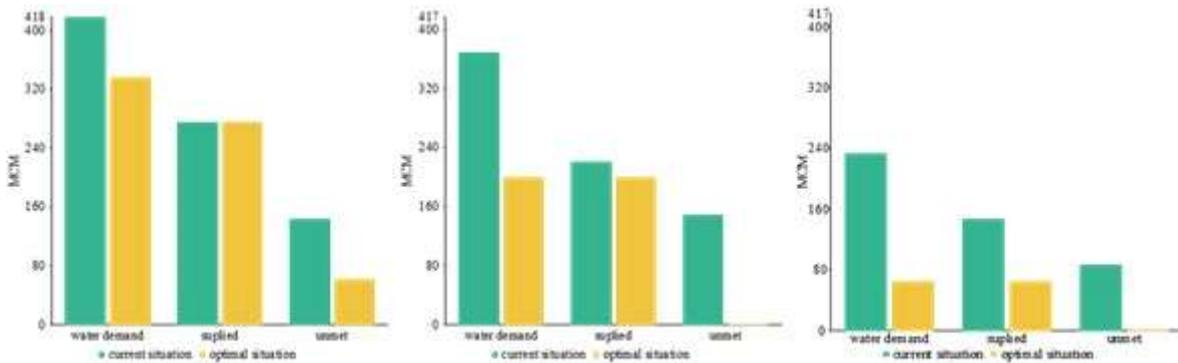
Table 1 The current and optimal cultivated area (ha) of agricultural crops under the virtual water and water footprint approach

Crops	Zabol		Zahak		Hamoon	
	Current Status	Optimal Status	Current Status	Optimal Status	Current Status	Optimal Status
Wheat	39011	32007	26792	6714	15604	1057
Barley	3097	0	5379	463	1467	436
Beans	173	10	784	34	497	16
Sunflower	55	0	0	0	44	0
Sesame	24	1980	5	3703	48	860
Onion	237	0	175	0	285	0
Tomato	95	0	0	0	15	0
Melon	1258	1697	2673	1403	3735	1703
Watermelon	1895	39	2264	0	2431	38
Cucumber	20	7430	0	8936	7	2128
Alfalfa	723	299	1344	673	556	197
Corn	125	0	453	0	438	0
Sorghum	5088	5324	3868	1469	3516	1380
Medicinal Plants	31	7160	13	23358	33	7489
Garden	5331	1215	4545	1544	2727	496

۳-۵- تأثیر بر مصرف آب

۲۰۰ MCM/yr رسیده است. در بخش کشاورزی هامون تقاضای آب از ۲۳۲ MCM در سال به ۶۴ کاهش یافته است. علت اصلی کاهش تقاضای آبیاری در بخش کشاورزی این مناطق، توسعه کشت محصولاتی با مصرف آب کم‌تر و یا محتوای آب مجازی کم‌تر است. این یافته‌ها نشان می‌دهد مفهوم آب مجازی می‌تواند به استفاده پایدار از منابع آب شیرین کمک کند. زیرا محصولاتی با میزان محتوای آب مجازی کم‌تر، بهره‌وری مصرف آب بالایی به‌ازای هر کیلوگرم محصول تولیدی دارند که می‌تواند به افزایش بازده اقتصادی کشاورزی منطقه کمک کند.

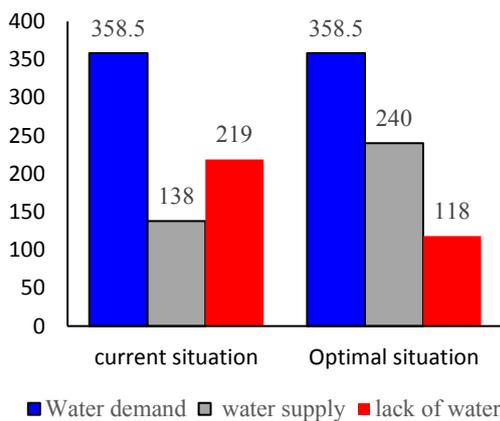
در شکل (۸) نتایج حاصل از تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت بر میزان مصرف آب و تقاضای آب تأمین شده در منطقه ارائه شده است. بر اساس یافته‌ها مشخص شد بهینه‌سازی الگوی کشت با رویکرد آب مجازی و ردپای آب منجر به بهبود مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی منطقه می‌شود. یعنی در همان مقدار زمین‌های کشت شده در هر بخش کشاورزی، مقدار آب کمتری مصرف می‌شود. در بخش کشاورزی زابل تقاضای آب از ۴۱۷ به ۳۳۶ MCM/yr کاهش می‌یابد. در بخش کشاورزی زهک تقاضای آب از ۳۶۹ به



شکل ۸- شبیه‌سازی الگوی کشت بهینه و مقایسه با وضعیت فعلی عرضه و تقاضای آب (MCM)

Fig. 8 Simulation of the optimal cultivation pattern and comparison with the current situation of water supply and demand (MCM)

بخش محیط‌زیست شده و به پایداری بوم‌سازگان منطقه کمک می‌کند. همچنین استفاده از الگوی بهینه کشت موجب کاهش اثرات محیط‌زیستی تولیدات کشاورزی می‌شود. Qi et al. (2018) در نتایجی همسو با این مطالعه دریافتند که الگوی بهینه کشت محصولات کشاورزی از طریق کاهش استفاده از نهاده‌های کشاورزی از جمله کود و سم به پایداری محیط‌زیستی کمک می‌کند.



شکل ۱۰- تأمین و عدم تأمین آب بخش محیط‌زیست
Fig. 10 Supply and non-supply of water in the environment sector

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت سیستان تحت رویکرد آب مجازی و ردپای آب است. برای این منظور از مدل بهینه‌سازی آرمانی فازی استفاده و نتایج مدل بهینه‌سازی در مدل ونسیم شبیه‌سازی شد. مهم‌ترین نتیجه‌گیری حاصل از پژوهش به شرح زیر است:

۱- در وضعیت فعلی بخش کشاورزی دچار مشکل کمبود فیزیکی آب است و مقدار تقاضای آبیاری محصولات کشاورزی

همچنین با توسعه الگوی کشت بهینه، میزان کمبود آب در منطقه به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و ۸۱٪ از تقاضای آب بخش کشاورزی زابل و ۱۰۰٪ بخش‌های کشاورزی زهک و هامون تأمین می‌شود. یافته‌های Daghighi et al. (2017) نشان داد بهینه‌سازی الگوی کشت در دشت ارزقان با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی خطی باعث می‌شود کمبود آب سالانه از ۲۳۶ به ۲۰ MCM/yr کاهش می‌یابد. Zare et al. (2014) دریافتند بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از برنامه‌ریزی خطی باعث ذخیره ۱۱/۲٪ از کل آب موجود در اراضی زراعی کرمانشاه می‌شود. این مقایسه با یافته‌های سایر محققان نشان می‌دهد که با استفاده از الگوی بهینه کشت، می‌توان مصرف آب در بخش کشاورزی را (به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب) مدیریت کرد.

۳-۶- تأثیر بر محیط‌زیست

یافته‌های این پژوهش نشان داد، تغییر الگوی کشت بخش کشاورزی به سمت محصولات بهینه منجر به باز توزیع منابع آب در کل منطقه می‌شود. بخش محیط‌زیست که سالانه با کمبود آب ۲۱۹ MCM مواجه است، پس از بهینه‌سازی الگوی زراعی فعلی و با فرض ثابت بودن اولویت‌های تخصیص، آب بیشتری می‌تواند دریافت کند (شکل ۱۰). در وضعیت فعلی ۳۸٪ از تقاضای آب بخش محیط‌زیست تأمین می‌شود. پس از بهینه‌سازی میزان تأمین آب در بخش محیط‌زیست به ۶۷٪ (۲۴۰ MCM در سال) افزایش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که یکی از راه‌های حل بحران محیط‌زیست و ریزگردها در منطقه سیستان، استفاده از الگوی کشت بهینه و پایدار در بخش کشاورزی است. الگوی کشت بهینه با کاهش میزان مصرف آب در بخش کشاورزی باعث انتقال آب بیش‌تری به

بر اساس یافته‌های پژوهش پیشنهاد می‌شود، سطح زیر کشت محصولاتی با محتوای آب مجازی و ردپای آب آبی بالا کاهش یافته و ما به‌زای آن، کشت محصولات جایگزین با محتوای آب مجازی و ردپای آب آبی کم توسعه یابد. توسعه کشت گیاهان دارویی می‌تواند کمبود فیزیکی آب در بخش کشاورزی منطقه مورد مطالعه را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. همچنین مفهوم آب مجازی و ردپای آب از طریق کارشناسان ترویج و آموزش سازمان جهاد کشاورزی به کشاورزان آموزش داده شود. برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود اثرات واردات آب مجازی بین حوضه‌ای بر کمبود فیزیکی آب در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده (یا تولید شده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Allan, J. A. (1992). The Strategic Importance of Water Resources. *Philosophical Transactions: Phys. Sci. Eng.*, 341(1661). DOI: [10.1098/rsta.2010.0303](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0303)
- Akhavan, K., Kheiry, M., Abbasi, S., daneshfaraz, R., & Kalateh, F. (2023). Evaluation of Hydraulic Performance and Operation of Sluice and Neyrpic Modules in Water Distribution Canals (Case Study: Moghan Irrigation Network, Ardabil). *Irrig. Water Eng.*, 13(3), 1-22. DOI: [10.22098/mmws.2023.11899.1186](https://doi.org/10.22098/mmws.2023.11899.1186)
- Amini, A., Porhemmat, J., & Sedri, H. (2020). Investigating the physical and economic efficiency of water in major crops in the Talvar Watershed, Kurdistan, Iran. *Watershed Eng. Manage.*, 12(2), 481-491. DOI: [10.22092/ijwmse.2019.123085.1534](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.123085.1534) [In Persian].
- Arefinia, A., & Ahmadaali, K. (2020). Investigating the impacts of latitude on virtual water content of major crops in the eastern provinces of Iran. *J. Water Soil Resour. Conserv.*, 10(1), 113-128.
- Bozorg-Haddad, O., Dehghan, P., Zolghadr-Asli, B., Singh, V. P., Chu, X., & Loáiciga, H. A. (2022). System dynamics modeling of lake water management under climate change. *Sci. Report.*, 12(1), 5828. DOI: [10.1038/s41598-022-09212-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-09212-x)
- Cao, X., Bao, Y., Li, Y., Li, J., & Wu, M. (2023). Unravelling the effects of crop blue, green and grey virtual water flows on regional agricultural water footprint and scarcity. *Agri. Water Manage.*, 278. DOI: [10.1016/j.agwat.2023.108165](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108165)
- Daghighi, A., Nahvi, A., & Kim, U. (2017). Optimal cultivation pattern to increase revenue and reduce water use: application of linear programming to arjan plain in fars province. *Agri.*, 7(9), 73. DOI: [10.3390/agriculture7090073](https://doi.org/10.3390/agriculture7090073)
- Dai, C., Qin, X. S., & Lu, W. T. (2021). A fuzzy fractional programming model for optimizing water footprint of crop planting and trading in the Hai River Basin, China, *J. Clean. Product.*, 278. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.123196](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123196)

- Ding, X., Wang, S., & Chen, B. (2019). The blue, green and grey water consumption for crop production in heilongjiang, *Energy Procedia*, 158, 3908-3914. DOI: [10.1016/j.egypro.2019.01.853](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.853).
- Fathi, F., & Zibaei, M. (2020). Optimal crop pattern management in firozabad plain according to water and soil sustainability by applying fuzzy mathematical programming. *J. Agri. Sci. Sustain. Product.*, 30(3), 331-345. DOI: [20.1001.1.24764310.1399.30.3.19.4](https://doi.org/20.1001.1.24764310.1399.30.3.19.4)
- Ghorbani, K., Meftah Halaghi, M., Keramatzadeh, A., & Salarijazi, M. (2020). Crop pattern optimization by using Goal programming (case study: Gharesoo basin). *J. Water Soil Conserv.*, 27(1), 163-180. DOI: [10.22069/jwsc.2020.16875.3223](https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16875.3223)
- Hekmatnia, M., Hosseini, S. M., & safdari, M. (2020). Water resource management of the agricultural sector in Sistan and Baluchestan Province: a virtual water perspective. *Irrig. Water Eng.*, 11(1), 137-149. DOI: [10.22125/iwe.2020.114958](https://doi.org/10.22125/iwe.2020.114958)
- Hekmatnia, M., hosseini, S. M., & safdari, M. (2020). Water use assessment of date in Sistan and Balouchestan Province based on the concept of virtual water. *Iran. J. Soil Water Res.*, 51(2), 513-524. DOI: [10.22059/ijswr.2019.289422.668322](https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.289422.668322)
- Hekmatnia, M., Safdari, M., Ahmadi, A., & Monibi, H. (2022). National savings in freshwater consumption in Iran by virtual water imports (a case study on cereals). *Water Environ. J.*, 36(4), 656-666. DOI: [10.1111/wej.12805](https://doi.org/10.1111/wej.12805)
- Hekmatnia, M., Safdari, M., Hosseini, S. M., & Sardar Shahraki, A. (2021). Agricultural water use management of Sistan region under virtual water approach using WEAP Model. *Environ. Water Eng.*, 7(3), 465-476. DOI: [10.22034/jewe.2021.270472.1506](https://doi.org/10.22034/jewe.2021.270472.1506)
- Hoekstra, A., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual setting the global standard. *Routledge publication; 1st edition*
- Isanezhad, A., Zarifian, S., raheli, H & Pourmasoumi Langarudi, S. (2024). Participatory system dynamics modeling for groundwater resources management (study area of Marand Plain, Iran). *Water Soil Manage. Model.*, 4(1), 262-284. [In Persian]. DOI: [10.22098/mmws.2023.12372.1232](https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12372.1232)
- Kobuliev, M., Liu, T., Kobuliev, Z., Chen, X., Gulakhmadov, A., & Bao, A. (2021). Effect of future climate change on the water footprint of major crops in southern Tajikistan, *Region. Sustain.*, 2(1), 60-72. DOI: [10.1016/j.regsus.2021.01.004](https://doi.org/10.1016/j.regsus.2021.01.004).
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2020). Sustainability of the blue water footprint of crops. *Adv. Water Resour.*, 143, 103679. DOI: [10.1016/j.advwatres.2020.103679](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103679)
- Mohammadzadeh, A., Vafabakhsh, J., Mahdavi Damghani, A., & Deihimfard, R. (2022). Optimal land allocation to crop production in different decision priorities and water availability scenarios: East Azerbaijan province of Iran. *Arch. Agronom. Soil Sci.*, 68(5), 597-614. DOI: [10.1080/03650340.2020.1843637](https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1843637)
- Novoa, V., Rojas, O., Ahumada-Rudolph, R., Arumí, J. L., Munizaga, J., de la Barrera, F., & Rojas, C. (2023). Water footprint and virtual water flows from the Global South: Foundations for sustainable agriculture in periods of drought. *Sci. Total Environ.*, 161526. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.161526](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161526)
- Qi, J. Y., Yang, S. T., Xue, J. F., Liu, C. X., Du, T. Q., Hao, J. P., & Cui, F. Z. (2018). Response of carbon footprint of spring maize production to cultivation patterns in the Loess Plateau, China. *J. Clean. Product.*, 187, 525-536. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.02.184](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.184)
- Ramroudi, M., Rezaee asl, M., ahmadpour borazjani, M., & Marzban, Z. (2023). Assessing of cropping pattern in the Sistan region with emphasis on optimal water distribution. *J. Agri. Sci. Sustain. Product.*, 32(4), 269-284. DOI: [10.22034/saps.2022.49251.2779](https://doi.org/10.22034/saps.2022.49251.2779)
- Shafa, N. S., Babazadeh, H., Aghayari, F., & Saremi, A. (2023). Multi-objective planning for optimal exploitation of surface and groundwater resources through development of an optimized cropping pattern and artificial recharge system. *Ain Shams Eng. J.*, 14(2), 101847. DOI: [10.1016/j.asej.2022.101847](https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101847)

- Song, J.-H., Her, Y., Jun, S. M., Hwang, S., Park, J., & Kang, M.-S. (2019). Lessons from assessing uncertainty in agricultural water supply estimation for sustainable rice production. *Agronom.*, 9(10), 662. DOI: [10.3390/agronomy9100662](https://doi.org/10.3390/agronomy9100662)
- Vafabakhsh, J., Mohammadzade, A., Bazargan, K., & Navidi, M. N. (2018). Comparative study of cropping pattern and land suitability of major horticultural and field crops in the Urmia Lake Basin. *J. Agroecol.*, 11(3), 755-805. DOI: [10.22067/jag.v11i3.83152](https://doi.org/10.22067/jag.v11i3.83152)
- World Economic Forum. (2020). Global Competitiveness Report Special Edition 2020: How Countries are Performing on the Road to Recovery.
- Zhang, Y., Zhang, J.-H., Tian, Q., Liu, Z.-H., & Zhang, H.-L. (2018). Virtual water trade of agricultural products: a new perspective to explore the belt and road. *Sci. Total Environ.*, 622–623:988–996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.351>