Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 85-94

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of water footprint components for dominant crops in Dezful plain

Z. Naderi[1], A. M. Akhoond-Ali[2*] and M. Ghomeshi

1- Ph. D Of Water Resources Management ,Faculty Of Water Science and Engineering ,Shahid Chamran University Of Ahvaz,Ahvaz,Iran.
2- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (aliakh@scu.ac.ir)*
3- Professor Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 February 2020
Revised: 15 December 2020
Accepted: 03 January 2021
Available online: 05 May 2026

Keywords: Pollution level, Sustainability Assessment, Green Waterfootprint.

TO CITE THIS ARTICLE:

Naderi, Z., Akhondali, A., Ghomeshi, M. 2026. 'Investigation of water footprint components for dominant crops in Dezful plain', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 85-94. doi: 10.22055/jise.2021.31806.1896.

Abstract

This research assesses the water resource consumption of agricultural products in the Dezful Plain, emphasizing the critical role of the Water Footprint (WF) index for optimal resource allocation in Iran, where agriculture dominates water usage. Based on the findings from Table (1), the study evaluated the WF of major crops, revealing an annual consumption of 31.97 million cubic meters. This total comprises 46.2% blue water, 50.2% green water, and 3.67% grey water. While the 1.17 million cubic meters of annual grey water discharge re-enters the hydrological cycle, the associated water quality degradation poses a significant challenge for planning. Nonetheless, an assessment of environmental sustainability using the Water Pollution Level (WPL) index indicates that the region remains sustainable despite the production of grey water. This highlights the necessity of considering water quality impacts alongside quantity in comprehensive water resource management.

Table 1 - Average values persent water footprint components of products from 2006 to 2016

crop	%wf(green)	%wf(blue)	%wf(gray)
Wheat	40.35	53.01	6.64
Maize	6.66	89.5	3.84
Sugar beet	30.32	68.06	1.02
Clover	62.84	35.65	1.5
Rapeseed	95.13	2.42	2.46
Alfalfa	38.88	59.61	1.5

Introduction

Given Iran's location within the global arid and semi-arid belt, as well as the low level of application of modern systems in the agricultural sector, and considering that a 25 percent reduction in the global water footprint of products results in a 39 percent saving in water reserves, two factors—the use of modern irrigation systems in agriculture and the methods of planting, cultivating, and harvesting—are identified as the primary criteria for determining and reducing the water footprint of each product in any given region (Cao, 2014). The current status of surface and

groundwater exploitation has steered conditions toward a state where most plains in the country have been declared as 'prohibited' or 'restricted' by the Ministry of Energy, and the issuance of new exploitation permits for them has been banned (Seydan, 2001). Existing evidence indicates a critical state of water resources.

Methodology

In this study, five major crops cultivated in the study area including wheat, sugar beet, rapeseed, alfalfa and maize were studied and their water footprints were calculated. The water footprint of a product comes from the combination of three components: blue water, green water, and gray water CropWat 8.0 software was used to calculate evapotranspiration and water requirement of plants in the study area.

Results and Discusspn

The study showed that of the 31.97 million cubic meters of water consumed during the year for the cultivation of selected crops, 46.2% belonged to the blue component, 50.2% to the green component, and 3.67% to the gray component. Regarding the gray component of 1.17 million cubic meters per year, it can be said that although this volume of water comes back to the region's water cycle, the decline in water quality is a major issue that must be addressed in macro planning.

Conclusions

The results indicate an increase in the amount of water footprint and significant green water in the plain. Large-scale planning in agriculture and crop production, using environmental and climatic potentials of the region, has attempted to conserve and conserve valuable water resources in the area. Let's see a smart and sustainable development in the region.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Zeinab Naderi Writing the article, conclusion, and analysis of results.
Second Author: Ali Mohamad Akhondali Reviewing and controlling results.
Third Author: Mehdi Ghomeshi, drafting the initial version of the manuscript.

Acknowledgment

This research has no acknowledgments.

References

1- Seydan, H. 2001 'Export water or water supply to dry areas', *Journal of Khorasan*, 2, pp. 41–51.

2- Cao, X., Wu, P., Wang, Y. and Zhao, X. 2014 'Water footprint of grain product in irrigated farmland of China', *Water Resources Management*, 28, pp. 2213–2227. https://doi.org/10.10۰۷/s11269-014-0619-3.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی ۱، بهار ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۹۴-۸۵

بررسی اجزاء ردپای آب برای محصولات غالب در دشت دزفول

زینب نادری[۱]، علی محمد آخوندعلی[۲*] و مهدی قمشی[۳]

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. aliakh@scu.ac.ir

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

منابع آب هر کشور در چهار بخش صنعت ،کشاورزی، شرب و محیط زیست مصرف می‌شود. باتوجه به این‌که عمده مصرف منابع آب در کشور در بخش کشاورزی صورت می‌گیرد لذا ارزیابی مقدار آب واقعی مورد استفاده محصولات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. برآورد میزان آب واقعی محصولات کشاورزی از طرق شاخص‌های متفاوتی صورت می‌گیرد و لازم است شاخص‌های مؤثرتری در تخصیص بهینه منابع آب در نظر گرفته شوند که ازجمله مؤثرترین آن‌ها می‌تواند شاخص ردپای آب باشد. در این تحقیق برای ارزیابی وضعیت محصولات کشاورزی از نظر آب مصرفی از دیدگاه شاخص ردپای آب (WF) برای عمده محصولات غالب کشت شده در دشت دزفول استفاده گردید. در این مطالعه مشخص گردید از ۳۱/۹۷ میلیون مترمکعب آب که در طول سال برای کشت محصولات انتخابی مصرف می‌شود ٤٦/۲ درصد مربوط به جزء آبی، ۵۰/۲ درصد مربوط به جزء سبز و ۳/٦۷ درصد مربوط به جزء خاکستری است. در خصوص جزء خاکستری که معادل ۱/۱۷ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد می‌توان گفت که اگرچه این مقدار آب به چرخه آبی منطقه برمی‌گردد لیکن کاهش کیفیت آب مسأله بسیار مهمی است که باید در برنامه‌ریزی‌های کلان مورد توجه قرار گیرد. با وجود تولید ۱/۱۷ میلیون مترمکعب آب خاکستری، بررسی پایداری محیط زیستی منطقه از لحاظ سطح آلودگی نشان داد که منطقه مورد بررسی با توجه به شاخص WPL (پایداری ردپای آب خاکستری با استفاده از سطح آلودگی آب) در سطح پایداری قرار دارد.

کلید واژه‌ها: سطح آلودگی، ارزیابی پایداری ، آب خاکستری.

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین مواد غذایی، آب و اهمیت منابع آب را بسیار تعیین کننده نموده است. توزیع غیر یکنواخت مکانی و زمانی آب و تلاش کشور در تأمین امنیت غذایی اهمیت و ضرورت پرداختن به رویکردهایی است که استفاده بهینه از منابع آب را مد نظر قرار دهد. بخش کشاورزی به‌عنوان مهمترین عامل آلاینده منابع آب به‌شمار می‌رود برآوردهای جهانی نشان می‌دهد سالانه ۴۵۰ کیلومترمکعب آب آلوده وارد منابع آبی می‌شود که برای رقیق‌سازی این مقدار به‌گونه‌ایی که بتوان دوباره از آب استفاده کرد، به ۶۰۰۰ کیلومترمکعب معادل ۶۶/۶ درصد کل آب‌های شیرین سالانه کره زمین نیاز است. ۸۰ درصد از زمین‌های کشاورزی در جهان زیر کشت دیم می‌باشد. آب سبز ناشی از بارش در کشاورزی منبع تولید بیش از ۶۰ درصد غذای جهان است. ایران یکی از این کشورهایی است که با افزایش تولیدات کشاورزی از طریق توسعه اراضی کشاورزی با محدودیت‌های جدی تأمین آب مواجه است. بنابراین اطلاع از نیاز آبی و مقدار واقعی آب مصرفی محصولات کشاورزی به‌منظور هرگونه برنامه‌ریزی دقیق و کارامد در مدیریت پایدار منابع آب و رسیدن به تعادل آبی متناسب با منابع موجود، ضروری است. اما با توجه به‌اینکه میزان آب مصرفی و ردپای آب هر محصول تحت تأثیر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، لذا نیاز به شاخصی است که به‌توان با آن نیاز واقعی هر محصول را مورد ارزیابی قرار داد. یکی از جدیدترین شاخص‌های مؤثر در بحث مدیریت پایدار منابع آب، شاخص ردپای آب (water footprint) می‌باشد که توسط Hoekstra (2011) معرفی گردید. این مفهوم پس از انجام اصلاحاتی در روش‌های برآورد و محاسبه، در مجموعه‌ای از انتشارات مؤسسه IHE یونسکو به‌عنوان یک شاخص قابل اتکا معرفی شد. همچنین در گزارشی از سوی همان مؤسسه، مفاهیم و روش‌های محاسبه این شاخص در سطوح مختلف به همراه اعداد و ارقام محاسبه شده آن برای کشورهای مختلف منتشر گردید. از سوی دیگر همکاری بین مؤسسات راهبر جهانی در این زمینه، منتهی به تأسیس شبکه ردپای آب در سال ۲۰۰۸ شده است که هدف آن هماهنگ کردن تلاش‌ها برای توسعه بیشتر و انتشار دانش در مورد مفاهیم، روش‌ها و ابزارهای مرتبط با این شاخص است. شاخص ردپای آب نیز همانند سایر شاخص‌ها، سبب پیدایش مفاهیم متفاوتی همراه با خود شده است. مفاهیم برگرفته از شاخص ردپای آب عمدتاً مفاهیمی مدیریتی در حوضه

DOI: 10.22055/jise.2021.31806.1896

منابع و مصارف آب، هستند بدین معنی که این مفاهیم را می‌توان برای برنامه‌ریزی‌های منابع و مصارف آب در یک کشور یا محدوده جغرافیایی، به‌کار بست. ابزارهای تعریف شده به کمک این شاخص، می‌توانند از طریق کنترل جابه‌جایی‌های آب در سطح بین‌المللی چه به‌صورت حقیقی و چه به‌صورت مجازی و یا از طریق ایجاد تغییراتی در الگوی مصارف افراد یک جامعه میزان آب مصرفی آن جامعه را با رعایت اصول توسعه پایدار، تا حد ممکن کاهش دهند.

شاخص ردپای آب نشان‌دهنده مقدار مصرف آب در تولید محصولات بوده که از سه بخش تشکیل شده است: مصارف از آب‌های سطحی و زیرزمینی که به‌منظور آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، آب مصرفی که به شکل رطوبت حاصل از بارش در پروفیل خاک ذخیره شده و حجم آب شیرین که جهت رفع آلودگی آب مورد نیاز است که به ترتیب آب آبی (Blue water footprint) ، آب سبز (Green water footprint) و آب خاکستری (Gray water footprint) تعریف شده است (Hokstra and Chapagin,2011).

ردپای آب هر محصول به‌صورت نسبت کل آب مورد استفاده در سطح مزرعه (مترمکعب) به میزان تولید همان محصول (تن) محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده شدت آب مصرفی محصولات مختلف می‌باشد (Hokstra and Chapagin, 2011). تاکنون مطالعه‌های متعددی در زمینه بررسی ردپای آب محصولات کشاورزی صورت گرفته است از جمله Mekonnen et al (2011) که ردپای آب محصولات زراعی را در مقیاس جهانی برای بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ مورد مطالعه و بررسی قرار دادند نتایج این پژوهش که برای ۱۲۶ محصول صورت گرفت نشان داد که ردپای آب این محصولات در طی دوره افزایش یافته است. Lu (2016) در تحقیقی به بررسی ۳۵ ساله تغییرات ردپای آب غلات در شمال چین پرداختند نتایج آن‌ها شیب صعودی این محصولات در دوره آماری مورد بررسی را نشان داد. Zhuo et al (2016) ردپای آب سبز آبی و خاکستری را برای حوضه رودخانه زرد در چین را طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مجموع ردپای آب سبز و آبی به‌علت بهبود بازده محصولات کاهش یافته است. در تحقیقی توسط Ababaei و Ramezani (2017) ردپای آب سه محصول ذرت ،گندم و جو در ایران مطالعه شد. نتایج نشان داد افزایش تولید به‌صورت دیم سبب کاهش در گسترش کشت آبی در مناطق مواجه با کمبود آب می‌شود. با توجه به پیشینه ارائه شده و اینکه بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب می‌باشد لذا بررسی ردپای آب در این بخش اهمیت ویژه‌ای دارد و ضروری است تا اطلاعاتی در زمینه مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب و همچنین آلودگی ایجاد شده توسط محصولات کشت شده جمع‌آوری گردد تا مدیریت آب به شکل صحیح عملی گردد.

با توجه به قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهانی و همچنین پایین بودن سطح کاربرد سیستم های مدرن در بخش کشاورزی، و با توجه به این‌که ۲۵ درصد کاهش ردپای محصولات دنیا باعث ذخیره ۳۹ درصد ذخایر آب مصرفی می‌شود، دو عامل استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی و نحوه کاشت، داشت و برداشت به‌عنوان معیارهای اصلی در میزان ردپای آب هر محصول در هر منطقه و کاهش آن معرفی شده است (Cao,2014). وضعیت کنونی بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیر زمینی شرایط را به سمتی هدایت کرده است که اکثر دشت‌ها در کشور توسط وزارت نیرو به‌عنوان دشت‌های ممنوعه اعلام و صدور مجوزهای جدید بهره‌برداری از آن‌ها ممنوع شده است (Seydan, 2001). شواهد موجود حاکی از بحرانی بودن وضعیت منابع می‌باشد. این مسأله ضرورت توجه بیشتر به موضوع مدیریت آب و استفاده بهتر از آن را می‌طلبد. در خصوص بیان جزییات اهداف این تحقیق می‌توان چنین بیان داشت که با استفاده از شاخص ردپای آب مشخص شد که محصولات عمده مورد کشت در دشت دزفول هر کدام چه میزان آب مصرف کرده است و به ازای تولید آن چه میزان آب کیفیت مطلوب خود را از دست داده است، سپس ارزیابی محیط زیستی از لحاظ پایداری شاخص ردپای آب صورت گرفت. با توجه به اهمیت شاخص ردپای آب در بحث مدیریت منابع آب به‌خصوص در بخش کشاورزی برای نخستین بار ارزیابی پایداری محیط زیستی ردپای خاکستری آب مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای بررسی ردپای آب محصولات زراعی در دشت دزفول، پنج محصول عمده مورد کشت در محدوده مورد مطالعه شامل، گندم، چغندرقند، شبدر، کلزا، یونجه و ذرت دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و ردپای آب آن‌ها محاسبه گردید. سپس با استفاده از شاخص WPL پایداری محیط زیستی ردپای خاکستری محصولات انتخابی در دشت دزفول محاسبه گردید.

محدوده مطالعاتی دزفول – اندیمشک گسترده‌ترین محدوده مطالعاتی حوضه آبریزکارون بزرگ با وسعت ۵۸۰۹/۷۵ کیلومترمربع می‌باشد که در قسمت جنوب‌غربی حوضه واقع شده است این محدوده تحت پوشش سازمان آب و برق خوزستان قرار دارد. ۲۰۴۴/۰۱ کیلومتر مربع از وسعت این محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. محدوده دزفول اندیمشک شامل دو آبخوان پشمینه‌زار و دزفول می‌باشد. وسعت محدوده دزفول ۴۴۸۶/۰۶ کیلومترمربع شامل ۱۷۷۵/۳۶ کیلومترمربع دشت و ۲۷۱۰/۷۲ کیلومترمربع ارتفاعات می‌باشد. ایستگاه سینوپتیک دزفول که یکی از قدیمی‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی کشور محسوب می‌شود به‌عنوان ایستگاه معرف در دشت انتخاب شده است. ایستگاه سینوپتیک دزفول در سال ۱۳۳۹ تاسیس شده و دارای ۵۱ سال آمار دما، ۵۱ سال آمار بارندگی و نه سال آمار تبخیر است. در شکل (۱) سطح زیر کشت محصولات انتخابی در دشت دزفول در دوره ۱۰ساله (۲۰۱۶-۲۰۰۶) آورده شده است.

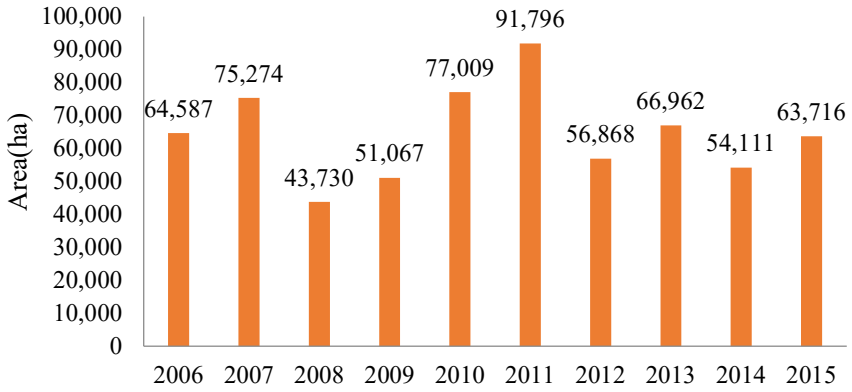


Fig. 1- Area under cultivation of selected crops in Dezful Plain from 2006 to 2016
شکل ۱- سطح زیر کشت محصولات انتخابی در دشت دزفول از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۶

در انجام مطالعه، از روش ارزیابی ردپای آب برای محاسبه اجزای ردپای آب محصولات کشاورزی استفاده شد. بدین منظور، اطلاعات کشاورزی استان از طریق آمارنامه ارائه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی مورد بررسی قرارگرفت.

در این تحقیق از نرم‌افزار CropWat 8.0 به‌منظور محاسبه تبخیر تعرق و نیاز آبی گیاهان در محدوده مورد مطالعه استفاده گردید. داده‌های مورد نیاز برای محاسبه تبخیر و تعرق شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارندگی در مقیاس ماهانه از سازمان هواشناسی استخراج و به نرم‌افزار معرفی گردید.

به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از روش فائوپنمن مونتیث که در رابطه (۱) ارائه شده است، استفاده گردید.

$$ET_O = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \qquad (۱)$$

که در آن:

ET_O تبخیر تعرق مرجع ($mm day^{-1}$)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJT: m^{-2} day^{-1}$) متوسط دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m\ s^{-1}$)، (es-ea) کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)، γ ضریب رطوبتی ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($MJ\ m^{-2} day^{-1}$) می‌باشند.

روش فائو پنمن مانتیث روشی استاندارد برای محاسبه گیاه مرجع است، زیرا این روش قابل کاربرد در همه فصول و اقلیم‌های متفاوت است و نتایج آن دارای دقت زیادی نسبت به روش‌های فیزیکی از قبیل لایسیمتر و تشت تبخیر کلاس a می‌باشد. در این روش، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مناطق خشک یک درصد کمتر از مقادیر واقعی و در مناطق مرطوب چهار درصد بیشتر از مقادیر واقعی تبخیر تعرق برآورد می‌شود (Alizadeh, 2003). با توجه به این‌که استان خوزستان در منطقه نیمه خشک واقع شده است، می توان گفت مقادیر برآوردی روش فائو پنمن مانتیث در استان خوزستان در حدود یک تا دو درصد بیشتر از واقعیت می‌باشد.

مقدار خطای به نسبت پایین این روش در برآوردهای روزانه کاملاً قابل چشم‌پوشی است و در برآورد تبخیر و تعرق ماهانه نیز بسیار به تبخیر و تعرق واقعی منطقه نزدیک است.

در نشریه شماره ۵۶ فائو، این روش به‌عنوان بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقایسه با دیگر روش‌ها پیشنهاد شده است (Sumner and Jacobs, 2005).

داده‌های مربوط به مشخصات گیاهی شامل طول دوره رشد، ارتفاع گیاه، عملکرد محصولات، عمق ریشه و ضریب گیاهی از آمارنامه‌های کشاورزی، سند ملی کشور و آمارنامه‌های سازمان خواروبار جهانی (FAO) استخراج و مورد استفاده قرار گرفت.

محاسبات ردپای آب

برای درک بهتر ارتباط بین فعالیت‌های تولیدی بشری و فشار رو به رشد در منابع آب شیرین جهان، رد پای آب (Water Footprint) و سپس ارزیابی ردپای آب (Water Footprint Assessment) برای اندازه گیری میزان مصرف آب و ظرفیت جذب آلودگی در سرتاسر زنجیره ارزش محصول و ارزیابی پایداری آن در محیط داخلی و جهانی توسعه داده شده است. افزایش استفاده از آب و مواد غذایی نه تنها بر آب‌های اطراف تأثیر می‌گذارد، بلکه از دیدگاه جهانی نیز پیامدهای محیط زیستی دارد. روش‌های متعددی برای ارزیابی این تأثیرات محیط زیستی از دیدگاه‌های مختلف استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از: ارزیابی چرخه حیات (LCA- Life Cycle Assessment)، ردپای اکولوژیک (EF- Ecological Footprint) و ارزیابی ردپای آب (Water Footprint Assessment) (Aldaya 2010). ردپای آب شاخصی است برای نشان دادن حجمی از آب که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای فرآیندهای تولید یک محصول یا ارایه هرگونه خدمات استفاده می‌شود. این عدد شامل آب مصرف شده در طی زنجیره تولید یک محصول خواهد بود. این شاخص به‌صورت مترمکعب برای هر واحد

 DOI: 10.22055/jise.2021.31806.1896

ازمحصول بیان و ارایه می‌گردد. ردپای آب یک محصول از حاصل جمع سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری است (رابطه ۲):

$$WF_i = WF_{i\,green} + WF_{i\,blue} + WF_{i\,grey} \qquad (۲)$$

که در آن:

WF_i ردپای آب کل محصول (m^3ton^{-1})، $WF_{i\,green}$ ردپای آب سبز محصول i (m^3ton^{-1})، می‌باشد که شامل حجمی از آب باران مؤثر است که به‌صورت رطوبت در خاک ذخیره می‌شود. $WF_{i\,blue}$ ردپای آب آبی محصول i است که برای آب مورد استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی محاسبه می‌گردد. $WF_{i\,grey}$ نیز به‌عنوان آب خاکستری محصول i (m^3ton^{-1})، تعریف می‌شود و به حجم آبی اطلاق می‌گردد که برای از بین بردن ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ردپای آب هر جز نیز طبق روابط (۳) تا (۵) به‌دست می‌آید:

$$WF_{i\,green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \qquad (۳)$$

$$WF_{i\,blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \qquad (۴)$$

$$WF_{i\,grey} = \frac{(\alpha^* AR)(C_{max} - C_{nat})}{Y} \qquad (۵)$$

که در روابط (۳) تا (۵):

CWU_{blue} و CWU_{green} به ترتیب جزء آب آبی و جزء آب سبز محصول (m^3ha^{-1}) می‌باشند که طبق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند. مقدار جزء خاکستری ردپای آب (WF gray) نیز توسط مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در هر هکتار از زمین زراعی (AR)، کسر آبشویی یا درصد تلفات کودهای نیتروژن (α) و غلظت بحرانی (Cmax) و غلظت طبیعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده (Cnat) و در نهایت عملکرد محصول (Y) به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است آلاینده‌ها به‌طور کلی از آلودگی‌های (نیتروژن، فسفر و...) و همچنین آفت‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها ایجاد می‌شوند که در این تحقیق آلودگی ناشی از کودهای نیتراته مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که ذکر شد جزء آب خاکستری حجم آبی است که طی فرآیند تولید محصول آلوده شده و کیفیت اولیه خود را از دست می‌دهد این آب‌ها وارد سیستم‌های طبیعی آبی می‌شود. میزان آب مورد نیاز که بتوان کیفیت آب‌های آلوده را به سطح استاندارد رساند حجم آب خاکستری می‌باشد. در این مطالعه حجم ردپای آب خاکستری با به‌کارگیری چارچوب Hokstra (2007& 2008) محاسبه شده است. بنا بر نظر آژانس حفاظت محیط زیست a ایالات متحده آمریکا (USEPA) و با توجه به پژوهش Chapagain (2009) حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی ده میلی‌گرم بر لیتر توصیه شده است. اجزاء مصرف آب محصول (CWU) سبز و آبی نیز از مجموع تبخیر تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به‌صورت رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند.

$$CWU_{green} = 10^* \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} \qquad (۶)$$

$$CWU_{blue} = 10^* \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \qquad (۷)$$

که در آن:

ET_{green} نشان دهنده تبخیر تعرق آب سبز (تبخیر تعرق ناشی از آب باران مورد استفاده گیاه) و ET_{blue} نشان دهنده تبخیر تعرق آب آبی (تبخیر تعرق ناشی از آب آبیاری مورد استفاده گیاه) بر حسب ($mm\ year^{-1}$) می‌باشند. عدد ده نیز به‌منظور تبدیل عمق آب در میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین ($m^3\ ha^{-1}$) می‌باشد. در روابط (۶ و ۷) lgp طول دوره رشد بر حسب روز می‌باشد. جزء آبی مورد استفاده گیاه (CWU_{blue}) که از رابطه (۷) به‌دست می‌آید، مقدار آبی که به‌صورت مستقیم (نیاز آبی) از طریق آبیاری مورد استفاده گیاه است را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات ذکر شده، جهت محاسبه جزء آبی واقعی در تولید محصولات رابطه (۸) را به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$CWU_{blue} = WAg + \sum_{i=1}^{n} WAi \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، WAg مقدار آب مستقیم مصرفی (بر اساس نیاز آبی) و WAi مقدار آبی است که به‌صورت غیرمستقیم (آبشویی، راندمان‌های کمتر، جلوگیری از سرمازدگی و...) برحسب ($m^3\ ha^{-1}$) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور محاسبه تبخیر- تعرق روزانه نیز از رابطه (۹) استفاده گردید (Allen et al,1998).

$$ET = Ks[t] * Kc[t] * ETo[t] \qquad (۹)$$

که در آن:

Kc[t] ضریب گیاهی و Ks[t] عامل بدون بعد کاهش تعرق که وابسته به آب قابل دسترس در خاک می‌باشد. ET0 [t] نیز تبخیر- تعرق گیاه مرجع می‌باشد. Ks[t] تابع روزانه حداکثر مقدار واقعی رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک می‌باشد که به‌صورت رابطه ده قابل محاسبه است.

$$Ks[t] = \begin{cases} \dfrac{S[t]}{(1-p) * S_{max}[t]}, S[t] < (1-p) * S_{max}[t] \\ \text{other wise} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

$S_{max}[t]$ حداکثر رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک در شرایط ظرفیت زراعی زمین و p نسبتی از S_{max} بوده که در آن یک محصول می‌تواند آب مورد نیاز خود را بدون تنش از منطقه

ریشه جذب نماید، می‌باشد.ردپای آب در حوضه آبریز نیاز به برآورده شدن معیارهای خاصی دارد تا پایدار شود. در این تحقیق پایداری از نظر زیست محیطی ارزیابی می‌گردد که از نظر سطح آلودگی آب (WPL) بیان می‌شوند. طبق تعریف، ردپای آب در یک حوضه رودخانه، زمانی از نظر محیط زیستی پایدار است که نیازهای آب محیط‌زیستی به هم بخورد. (Hokstra 2011).

پایداری WF خاکستری با استفاده از سطح آلودگی آب (WPL) به‌عنوان یک شاخص، ارزیابی می‌شود. طبق تعریف، سطح آلودگی آب (WPL) نسبت WF خاکستری کل در حوضه آبریز به رواناب واقعی آبریز است. این اندازه گیری به‌صورت زیر می‌باشد:

$$WPL = \frac{WF_{grey}}{Ract} \qquad (۱۱)$$

که WF_{grey} مقدار کل WF خاکستری در حوضه است و Ract روان‌آب واقعی منطقه آبریز است. هنگامی که WPL حوضه N100 درصد است، حوضه به‌عنوان نقطه‌ی حساس WF در نظر گرفته می‌شود، نشان‌دهنده این موضوع است که WF خاکستری در حوضه ناپایدار است. برای ارزیابی سطح پایداری WF خاکستری در حوضه آبریز، از معیارهای پایداری WF خاکستری زیر استفاده شده است:

$WPL \leq 100\%$, WF خاکستری ناپایدار است.

$50\% \leq WPL \leq 100\%$، WF خاکستری تهدیدی برای آینده محیط زیست است.

$25\% \leq WPL \leq 50\%$, WF خاکستری در محدوده پایدار قرار دارد.

$10\% \leq WPL \leq 25\%$، WF خاکستری پایدار است.

$WPL \leq 10\%$, WF خاکستری هیچ تاثیر منفی بر محیط زیست ندارد (Hoekstra,2011).

نتایج و بحث

با توجه به جدول شماره (۱) و نتایج به‌دست آمده از جدول (۲) در محصولات مورد بررسی، کلزا میزان ردپای کل آب بیشتری نسبت به دیگر محصولات دارد ($۱۱۳۲\ m^3ha^{-1}$). پس از آن ذرت دانه‌ای و گندم با (m^3ton^{-1}) (۹۱۷/۳ ۸۵۲/۸) از دیگر محصولات ردپای آب بیشتری دارند. چغندر قند با (m^3ton^{-1}) ۱۲۴/۴ ردپای کل آب کمتری نسبت به کل محصولات مورد بررسی دارد. با بررسی محاسبات ردپای آب محصولات انتخابی طی ۱۰ سال گذشته در گندم، ذرت دانه‌ای و کلزا شاهد کاهش در میزان کل ردپای آب و در چغندرقند، شبدر و یونجه با توجه به نتایج افزایش در میزان ردپای کل مشاهده می‌شود که این مساله با توسعه سطح زیر کشت این محصول در طی ده سال گذشته دور از انتظار نیست و با توجه به شرایط خشک‌سالی حاکم بر این ده سال، کاهش جزء آب سبز کلیه محصولات مشاهده می‌شود و این مساله حاکی از فشار بر منابع آب سطحی و زیر زمینی در طی این ده سال و روند افزایشی جزء آبی می‌باشد. مقایسه مقادیر جهانی ارایه شده در جدول (۳) و مقادیر متوسط آب محصولات به‌دست آمده در جدول (۲) نشان می‌دهد که ردپای کل آب گندم وذرت دانه‌ای و کلزا نسبت به مقادیر جهانی آن به‌ترتیب ۵۳ درصد، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد کمتر است و مقادیر ردپای آب چغندرقند و یونجه با مقادیر متوسط جهانی آن‌ها برابر است. با توجه به موقعیت خاص محدوده مطالعاتی و اهمیت کودها و سمومی که در فرآیند تولید هر محصول استفاده می‌شود و خروج پساب حاصله از آن که به منابع آب سطحی و زیر زمینی وارد می‌شود و با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۲) گندم، ذرت و شبدر به‌ترتیب با (m^3ton^{-1}) ۵۶/۶، ۳۵/۳ و ۲۷/۸ بالاترین میزان ردپای آب خاکستری را در محدوده مورد مطالعه ایجاد می‌کنند. نتایج حاصل از بررسی ردپای آب خاکستری لزوم استفاده از روش‌های کاراتر در خصوص استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری با هدف افزایش راندمان مصرف آب را روشن می‌سازد. با بررسی نتایج به‌دست آمده از جدول (۴) در بین محصولات یونجه، چغندرقند و گندم به‌ترتیب بیشترین درصد سهم جزء آبی را در ردپای کل آب مصرفی را دارا می‌باشند و شبدر با ۹۵/۱ درصد بیشترین جزء سبز را در بین محصولات مورد بررسی دارد. ضمناً گندم با ۱۸/۸ درصد بالاترین درصد جزء خاکستری را دارد که این مساله با توجه به سطح زیر کشت عمده این محصول، ضرورت بررسی جوانب ناشی از این میزان مصرف آب در جزء خاکستری را حایز اهمیت می‌نماید. این مسأله لزوم نگاه جامع مدیریتی در بحث بهینه سازی الگوی کشت و ضرورت تجهیز و مدرن‌سازی شبکه آبیاری برای افزایش بهره‌وری و مصرف آب را هرچه بیشتر پررنگ‌تر می‌نماید. در خصوص میزان ردپای آب خاکستری (m^3ton^{-1}) (۵۶/۶ و ۳۵/۳) دو محصول مهم و استراتژیک گندم و ذرت با توجه به جدول (۲) در محدوده‌ی طرح با میزان ردپای خاکستری این دو محصول در استان خوزستان (m^3ton^{-1}) (۷۷۱ و ۶۴۶) Gorgin (2016) مشاهده می‌شود که این دو محصول به‌ترتیب ۷/۵ درصد و ۵/۵ درصد از میزان کل آب خاکستری گندم و ذرت در استان را تشکیل می‌دهند. با توجه به بررسی ردپای خاکستری آب میزان، متوسط حجم آب خاکستری کل محصولات ۱/۱۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد و با توجه به میزان رواناب تولیدی در دشت دزفول که بنا بر گزارش مطالعه‌های بیلان آب محدوده مطالعاتی دزفول – اندیمشک معادل ۹۱/۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد سطح آلودگی آب WPL کمتر از ۱۰ درصد است و هیچ تأثیر منفی بر پایداری محیط‌زیستی محدوده دشت ندارد.

 DOI: 10.22055/jise.2021.31806.1896

جدول۱-سطح کشت سالیانه محصولات از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table 1- Annual cultivation area of crops from 2006 to 2016

Crop	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015	2016
Wheat	38,076	55,781	30,825	41,558	52,802	58,011	31,906	35,461	33,125	43,000
Maize	25,619	18,543	11,220	8,033	22,595	31,007	23,182	25,585	17,122	14,596
Sugar beet	43	0	0	0	0	0	0	972	1,724	2,180
Clover			114	16	747	1,246	1,396	1,473	1,573	1,378
Rapeseed	849	950	1,307	1,460	865	1,459	330	3,242	550	2,515
Alfalfa	0		264	0	0	74	55	230	18	48

جدول۲- مقادیر متوسط اجزای ردپای آب محصولات از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table 2- Average amounts of water footprint components of products (m^3/ton) from 2006 to 2016

Crop	Wf(Green)	WF(Blue)	WF(Gray)	WF(Total)
Wheat	344.1	452	56.6	852.8
Maize	61.1	820.9	35.3	917.3
Sugar beet	38.5	84.6	1.3	124.4
Clover	126.6	71.8	3	201.5
Rapeseed	1076.9	27.4	27.8	1132.1
Alfalfa	96.8	148.3	3.7	248.8

جدول۳- مقادیر متوسط جهانی اجزای ردپای آب محصولات

Table 3- Global average water footprint of crops(m^3/ton)

Crop	Wf(Green)	WF(Blue)	WF(Gray)	WF(Total)
Wheat	1277	342	207	1826
Maize	947	81	194	1222
Sugar beet	82	26	25	133
Clover	*	*	*	*
Rapeseed	1703	231	336	2270
Fodder crops	207	27	20	254

جدول٤- مقادیر متوسط درصد اجزای ردپای آب محصولات از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table4 - Average values persent watefootprint components of products from 2006 to 2016

Crop	%WF(Green)	%WF(Blue)	%WF(Gray)
Wheat	40.35	53.01	6.64
Maize	6.66	89.5	3.84
Sugar beet	30.32	68.06	1.02
Clover	62.84	35.65	1.5
Rapeseed	95.13	2.42	2.46
Alfalfa	38.88	59.61	1.5

نتیجه‌گیری

میزان آب مصرفی و ردپای آب هر محصول در هر منطقه تحت تأثیر اقلیم آن منطقه، میزان تولیدات، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب در آن منطقه است، لذا نیاز به شاخص‌هایی است که بتوان با آن میزان واقعی هر محصول را محاسبه نمود و بهترین الگوی کشت و تولیدی را در سیاست کار خود به‌منظور حفظ منابع آبی و افزایش بهره‌وری آب داشت. در این مطالعه برای ارزیابی وضعیت محصولات غالب از نظر آبیاری به ازای محصول تولیدی و عملکرد، از ردپای آب (WF) استفاده گردید.

ردپای آب محصولات در دو جزء آب آبی (WF blue) و آب سبز (WF green) محاسبه شد. نتایج نشان داد که ردپای کل آب گندم و ذرت دانه ای و کلزا نسبت به مقادیر جهانی آن به‌ترتیب ۵۳ درصد، ۲۵ درصد۵۰ درصد کمتر است و مقادیر ردپای آب چغندرقند و یونجه با مقادیر متوسط جهانی آن‌ها برابر است. در خصوص میزان ردپای آب خاکستری ($m^3 ton^{-1}$) (۵۶.۶ و ۳۵.۳) دو محصول گندم و ذرت در محدوده ی طرح ۷.۵ درصد و ۵.۵ درصد از میزان کل آب خاکستری گندم و ذرت در استان را تشکیل می‌دهند.

در این مطالعه مشخص گردید از ۳۱.۹۷ میلیون مترمکعب آب که در طول سال برای کشت محصولات انتخابی مصرف میشود ۴۶/۲ درصد مربوط به جزء آبی ۵۰/۲ درصد مربوط به جزء سبز و ۳/۶۷ درصد مربوط به جزء خاکستری است. در خصوص جزء

خاکستری که معادل ۱/۱۷ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد می‌توان گفت که هرچند این حجم آب به چرخه آبی منطقه بر می‌گردد لیکن کاهش کیفیت آب مسأله بسیار مهمی است که باید در برنامه ریزی های کلان مورد توجه قرار گیرد.

نتایج نشان داد سطح آلودگی آب WPL کمتر از ۱۰ درصد است و هیچ تأثیر منفی بر پایداری زیست محیطی محدوده دشت ندارد که با توجه به اهمیت و جایگاه ویژه دشت دزفول در تأمین امنیت غذایی استان نکته حائز اهمیتی می‌باشد. با توجه به سهم ۵۰ درصدی جز سبز در تأمین آب مورد نیاز محصولات مورد بررسی، توجه ویژه و هرچه بیشتر به کشت دیم در این منطقه می‌تواند راهکار مفیدی برای کاهش ردپای آب محصولات باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: زینب نادری، نگارش مقاله، تجزیه و تحلیل داده‌ها

نویسنده دوم: علی محمد آخوندعلی، بررسی نتایج.

نویسنده سوم: مهدی قمشی: نگارش اولیه مقاله.

تقدیر و تشکر

این پژوهش فاقد تقدیر و تشکر است.

Refrences

1- Ababaei, B. and Etedali, H.R., 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management*, *179*, pp.401-411.https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.016.

2- Aldaya, M.M., Martínez-Santos, P. and Llamas, M.R., 2010. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, *24*(5), pp.941-958. DOI 10.1007/s11269-009-9480-8.

3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, *56*(97), p.e156.

4- Alizadeh, A. 2003. *Principles of Applied Hydrology*. 17th edn. Mashhad: Imam Reza University Press. (In Persian).

5- Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y., 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, *70*(4), pp.749-758. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012.

6- Gorgin, P.F., Ramezani, E.H. and Ababaei, B. 2016 'Estimation of grey water footprint in the production of important crops at provincial and national scales', *in Proceedings of the Second National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, Isfahan*. (In Persian).

7- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K., 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, *21*(1), pp.35-48.

8- Hoekstra, A.Y., 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.

9- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K., 2011. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. John Wiley & Sons.

10- Lu, Y., Zhang, X., Chen, S., Shao, L. and Sun, H., 2016. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, *116*, pp.71-79. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.008.

11- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(5), pp.1577-1600.

12- Seydan, H. 2001 'Export water or water supply to dry areas', *Journal of Khorasan*, 2, pp. 41–51.

13- Sumner, D.M. and Jacobs, J.M. 2005 'Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration', *Journal of Hydrology*, 308(1–4), pp. 81–104. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.023.

14- Cao, X., Wu, P., Wang, Y. and Zhao, X. 2014 'Water footprint of grain product in irrigated farmland of China', *Water Resources Management*, 28, pp. 2213–2227. https://doi.org/10.10۰۷/s11269-014-0619-3.

15- Zhuo, L., Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. and Wada, Y. 2016 'Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009)', *Advances in Water Resources*, 87, pp. 29–41. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.11.002.