Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Evaluation of water stress index and water poverty in rice production based on the water footprint concept in Iran

Shahla Dehghanpir [1], Ommolbanin Bazrafshan [2*], Hadi Ramezani Etedali [3] Arashk Holisaz [4], Behnam Ababaei [5]

[1] Ph.D. Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
[2] Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
[3] Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
[4] Assistant Professor, Department of Range and Watershed, Faculty of Natural Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[5] Ph.D., Department of Water Science and Engineering, College of Science and Engineering, James Cook University, Townsville, Australia

Extended Abstract

Introduction

One of the most important indicators proposed for water management is the concept of water footprint, which can be used as a useful tool to measure and predict the amount of water consumed in the agricultural sector and the required demand. In addition, water stress and water poverty indicators are among the other widely used indicators to evaluate water scarcity. Iran is an arid and semi-arid country that has faced severe water shortage and this has had adverse effects on the economy, ecosystem functions, and the welfare of the country's people. The agricultural sector is one of the most important and largest consuming sectors of water resources in Iran, so more than 92% of freshwater resources are consumed in this sector, so the knowledge of water resources allocated for the production of agricultural products is important for managers. And the country's policymakers are very important. So, one of the main solutions to reduce water shortage is to reduce water consumption in the agricultural sector. Among agricultural products, rice is one of the most important food products, which feeds more than half of the world's population. Therefore, the purpose of this study is to use the indicators of water footprint, water stress, and water poverty to evaluate the water scarcity of water in rice production in Iran.

Materials and Methods

Among the agricultural products, rice is a valuable food and the most important and widely consumed grain. The study area is the rice-producing provinces. which feeds more than half of the world's population. It accounts for about 19% of the world's dietary energy. After wheat, this product is known as one of the most important food items. The average area under rice cultivation (ha), production (ton), yield (tons/ha) as well as the necessary data and information were collected concerning the water resources available for rice production from the Ministry of Jihad Agriculture and the Water Resources Management Company of Iran. The evaluation of water footprint components, including blue, green, and gray water footprints, is based on the method provided by Hoekstra et al. (2011). The water stress index of rice is calculated as a ratio of the total water footprint in rice production to the total water resources available in the region. The amount of water poverty caused by rice production is defined by the product of the total water footprint in rice production and the value of the rice water stress index. Finally, the amount of export and import of virtual water due to rice production in Iran has been estimated.

Results and Discussion

On average, the total footprint of rice is 3037 m^{-3} t and the total volume resulting from its production is 4313 MCM, with the share of blue, green, and gray water footprints being 91.68, 6.93, and 1.39 %, respectively. The available water resources (AWR) for rice production in the producing provinces are 21,992 MCM, of which 6,872 and 15,210 MCM are related to blue water and green water, respectively. The results of the investigation of the water stress

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

index (RWSI) caused by rice cultivation in Iran, which is the result of dividing the total water footprint in rice production by the available water resources, is on average equal to 0.5 (out of 1.9), which shows Iran is in moderate water stress of rice production. Changes in water stress in rice production on a provincial scale showed that the provinces of Qazvin, Zanjan, Isfahan, North Khorasan, Razavi Khorasan, and Sistan and Baluchistan have water stress with a value between 0.6 and 1.2 are high and very high water stress in rice production, while the provinces of Mazandaran, Guilan, Golestan, Fars, and Khuzestan are in the range of less than 0.3 (low water stress) Also, the water poverty caused by rice production is equal to 1073 MCM in Iran, which is the highest and lowest amount of water poverty in Guilan and Khuzestan provinces (290 and 11 MCM).

Conclusion

Water sustainability in rice production in Iran has been investigated using water stress, water poverty, and water footprint, as well as the amount of exports and imports. Among the components of the water footprint, the highest value is related to the blue water footprint, and the lowest is related to the green water footprint. The high blue water footprint shows that most of the surface water and groundwater is used for rice production, and the low green water footprint shows that the amount of rainfall is not enough for rice cultivation in Iran. According to the results, the amount of gray water footprint in rice production is more than the green water footprint, this issue shows that the low yield of rice in the studied provinces as well as the high consumption of fertilizers and chemical pesticides cause the increase of gray water footprint in rice has been produced. Assessing water scarcity using the water footprint approach can be useful for identifying the risks of high rice production due to the potential of water scarcity.

Keywords: Rice, Water footprint, Water stress index, Water poverty, Water management

Article Type: Research paper

Acknowledgement:

The Ministry of Agriculture Jihad and Iran Water Resources Management Company are thanked for providing the data for this research.

Conflicts of interest:

There is no Conflicts of interest between the authors of this article.

Data availability statement:

The data used in this research are presented in the text of the article.

Authors' contribution:

Shahla Dehghanpir: Idea design, Data collection and processing, Data analysis and interpretation, Manuscript writing; **Ommolbanin Bazrafshan**: Control and supervision, Manuscript editing and review; **Hadi Ramezani Etedali**: Control and supervision, Manuscript editing and review; **Arashk Holisaz**: Control and supervision, Consultation, Manuscript review; **Behnam Ababaei**: Consultation, Manuscript review

*Corresponding Author, E-mail: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

Citation: Dehghanpir, SH., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Holisaz, A., & Ababaei, B. (2024). Evaluation of water stress index and water poverty in rice production based on the water footprint concept in Iran. *Water and Soil Management and Modeling*,4(1), 18-35.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12116.1206

Received: 13 January 2023, Received in revised form: 01 February 2023, Accepted: 02 February 2023, Published online: 02 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 18-35

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

ارزیابی شاخص تنش آبی و فقر آب در تولید محصول برنج با تأکید بر مفهوم ردپای آب در ایران

شهلا دهقانپیر[۱]، ام‌البنین بذرافشان*[۲]، هادی رمضانی اعتدالی[۳]، ارشک حلی‌ساز[۴]، بهنام آبابایی[۵]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکدهٔ علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس، ایران

[۲] دانشیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکدهٔ علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندر عباس، ایران

[۳] دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

[۴] استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۵] دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ علوم و مهندسی، دانشگاه جیمز کوک، تاونزویل، استرالیا

چکیده

برنج یکی از مهم‌ترین غلات در بسیاری از کشورهای دنیا از جمله ایران است که امنیت غذایی و رفاه مردم بدان بستگی دارد. از طرفی به‌دلیل بالا بودن نیاز آبی برنج، کشت این محصول با چالش کمبود آب مواجه شده است. هدف از این مطالعه استفاده از مفهوم ردپای آب، برای محاسبهٔ تنش آبی ناشی از تولید برنج و فقر آب به‌عنوان ابزارهای ارزیابی کمبود آب در استان‌های تولیدکنندهٔ برنج در ایران طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ است. این مطالعه به ارزیابی شاخص تنش آبی در تولید برنج و فقر آبی برمبنای کاربرد مفهوم ردپای آب در کشت برنج طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ پرداخته است. متوسط ردپای کل برنج ۳۰۳۷ مترمکعب در تن و حجم کل ناشی از تولید آن ۴۳۱۳ میلیون مترمکعب است که سهم ردپای آب آبی، سبز و خاکستری به‌ترتیب برابر با ۹۱/۶۸، ۶/۹۳ و ۱/۳۹ درصد است. میزان منابع آب موجود در تولید برنج در استان تولیدکننده، ۲۱۹۹۲ میلیون مترمکعب است که به‌ترتیب ۶۸۷۲ و ۱۵۲۱۰ میلیون مترمکعب آن مربوط به آب آبی و آب سبز است. مقدار شاخص تنش آبی ناشی از کشت برنج در ایران به‌طور متوسط برابر با ۰/۵ (از ۱/۹) است. هم‌چنین، فقر آب ناشی از تولید برنج برابر با ۱۰۷۳ میلیون مترمکعب در ایران است، که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان فقر آبی مربوط به استان‌های گیلان و خوزستان (۲۹۰ و ۱۱ میلیون مترمکعب) قرار دارند. استفاده از مفهوم ردپای آب و شاخص‌های مشتق شده از آن در تولید برنج در هر یک از استان‌ها سبب می‌شود تا با اطلاعات جامع بتوان به ارزیابی تنش آبی در استان‌های تولیدکنندهٔ برنج پرداخت. ازطرفی با توجه به این‌که در این محاسبات ردپای آب و وضعیت منابع آبی در نظر گرفته می‌شود، برای ارزیابی کمبود آب به‌ویژه در بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران بسیار مناسب است.

واژه‌های کلیدی: برنج، ردپای آب، شاخص تنش آبی، فقر آب، مدیریت منابع آب

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

استناد: دهقانپیر، شهلا، بذرافشان، ام‌البنین، رمضانی اعتدالی، هادی، حلی‌ساز، ارشک و آبابایی، بهنام (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص تنش آبی و فقر آب در تولید محصول برنج با تأکید بر مفهوم ردپای آب در ایران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱۸-۳۵.
DOI:10.22098/mmws.2023.12116.1206

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۱۸ تا ۳۵
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

استفادهٔ بهینه و پایدار از منابع آب، زمینه‌ساز حفظ توسعهٔ اجتماعی و اقتصادی و تقاضا برای مدیریت محیط زیست است. بخش کشاورزی بیش‌ترین مقدار آب را مصرف می‌کند و تقاضای آب در این بخش روند روبه رشد قابل ملاحظه‌ای را در جهان نشان داده است و ۹۰ درصد از مصرف جهانی آب را شامل می‌شود (Hoekstra et al., 2011). حتی اگر آب یک منبع پایدار باشد، دسترسی به آن از نظر زمانی و مکانی متفاوت است و شکاف بین تقاضای روبه رشد و منابع آب محدود در حال افزایش است (Elliott et al., 2014; Abdollahzadeh Kahrizi et al., 2022). افزایش تقاضای آب به‌ویژه در رابطه با تولید محصولات کشاورزی منجر به افزایش رقابت آب شیرین شده است؛ که این افزایش رقابت منجر به افزایش نگرانی در رابطه با کمبود آب ناشی از تولید محصولات کشاورزی شده است (Gerbens-Leenes et al., 2012). بنابراین، بهبود بهره‌وری آب کشاورزی و کاهش تنش آبی ناشی از تولیدات کشاورزی، اقدام مهمی برای بهبود بهره‌برداری پایدار از منابع آبی منطقه است (Hoekstra and Mekonnen, 2012). از دیرباز ارزیابی رابطهٔ بین تولید محصولات کشاورزی و منابع آب، نگرانی گسترده‌ای در سطح جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته است (Wang et al., 2015; Cao et al., 2014). بر همین اساس امروزه سعی می‌شود با استفاده از شاخص‌ها و روش‌های مختلفی مانند مفهوم ردپای آب، بهره‌وری آب، نسبت بحرانی آب، شاخص تنش آبی و فقر آب به بررسی رابطهٔ بین تولیدات کشاورزی و منابع آب در دسترس منطقه‌ای پرداخته شود.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که به‌منظور کاهش کمبود منابع آب پیشنهاد شده است، مفهوم ردپای آب است. ردپای آب به‌عنوان یک شاخص مناسب برای بررسی منابع آب شیرین و آگاهی بیش‌تر جهت استفادهٔ پایدار از منابع آبی، به‌صورت گسترده استفاده می‌شود. هم‌چنین، این شاخص به‌عنوان یک ابزار مفید برای اندازه‌گیری و پیش‌بینی میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی می‌تواند استفاده شود و تقاضای مورد نیاز را برآورده سازد. ردپای آب تولید محصولات زراعی، مقدار کل آب شیرینی است که در طول فرآیند رشد محصول استفاده می‌شود و شامل ردپاهای آبی، سبز و خاکستری است (Zhai et al., 2019). مطالعات زیادی در داخل و خارج از کشور به برآورد ردپای آب محصولات کشاورزی پرداخته‌اند (Hoekstra and Chapagain 2007; Bazrafshan et al., 2019; Ramezani Etedali et al., 2019; Fu et al, 2019; Bazrafshan and Dehghanpir, 2020; Vafaei et al., 2020; Zhai et al, 2019).

شاخص تنش آبی یکی دیگر از شاخص‌های پرکاربرد برای ارزیابی کمبود آب است. این شاخص اولین‌بار توسط Falkenmark (1989) مطرح شده و برابر با نسبت مصرف آب به مقدار منابع آب در دسترس است (Falkenmark, 2001). یکی دیگر از شاخص‌های مورد استفاده برای بررسی وضعیت منابع آبی موجود در یک منطقه، فقر آب است که اولین‌بار توسط Sullivan (2002) در رابطه با کمبود آب مطرح شده است. شاخص مذکور برابر با حاصل‌ضرب کل ردپای آب در بخش کشاورزی در منابع آب موجود در یک منطقه است. پژوهش‌گران زیادی با استفاده از این دو شاخص و با توجه به ردپای آب و منابع آبی در دسترس منطقه‌ای به ارزیابی کمبود آب در زمینهٔ تولید محصولات کشاورزی پرداخته‌اند که به Cao et al. (2017, 2018)، Liu et al. (2017) و Mengran et al. (2019) می‌توان اشاره نمود.

ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که با کمبود شدید آب روبه‌رو است و این امر بر اقتصاد، عملکردهای زیست‌بوم و رفاه مردم کشور تأثیر نامساعد و در برخی موارد جبران‌ناپذیری دارد. شرایط خاص توپوگرافی و اقلیمی ایران منجر به توزیع نامطلوب زمانی و مکانی بارش‌ها شده است که تولید پایدار محصولات زراعی را با مشکلات جدی روبه‌رو ساخته است. هم‌چنین، بخش کشاورزی یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین بخش‌های مصرف‌کنندهٔ منابع آب در ایران است. به‌طوری که بیش از ۹۰ درصد منابع آب شیرین در این بخش مصرف می‌شود. بنابراین، آگاهی از منابع آبی اختصاص یافته برای تولید محصولات کشاورزی، برای مدیران و سیاست‌گذاران کشور بسیار مهم است. از این‌رو یکی از راه‌کارهای اصلی برای کاهش کمبود آب، کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی است (Madani, 2014).

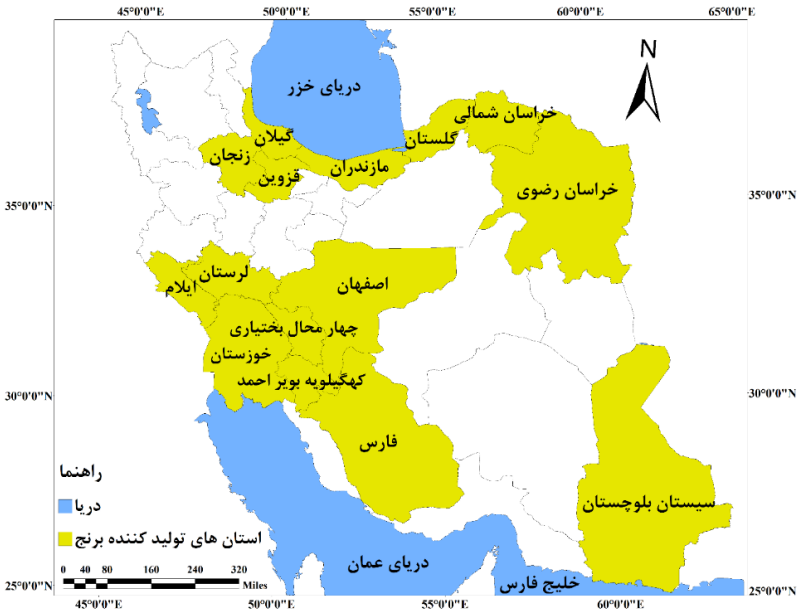
در بین محصولات کشاورزی، برنج به‌عنوان یکی از محصولات غذایی مهم و پیش‌رو در جهان است که بیش از نیمی از جمعیت جهان را تغذیه می‌کند و حدود ۱۹ درصد از انرژی رژیم غذایی جهان را تشکیل می‌دهد (Silalertruksa et al., 2017). این محصول بعد از گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مادهٔ غذایی شناخته شده است (Bagamba et al., 2012). هم‌چنین، به‌عنوان محصول راهبردی برای کشورهای در حال توسعه از جمله ایران است و نقش مهمی در امنیت غذایی دارد (Ebrahimi Mahmoudi et al., 2021). با توجه به پژوهش‌های انجام شده، تاکنون پژوهشی مشابه روش پیشنهاد شده در رابطه با تحلیل شاخص‌های کمبود آب بر اساس ردپای آب، فقر آب و تنش آبی در رابطه با محصول برنج در ایران انجام نشده است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، استفاده از مفهوم ردپای آب، برای محاسبهٔ

تنش آبی ناشی از تولید برنج و فقر آب به‌عنوان ابزارهای ارزیابی کمبود آب در استان‌های تولیدکنندهٔ برنج در ایران طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ است.

۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- منطقهٔ مورد مطالعه

ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک با توپوگرافی و آب و هوایی متنوع است. متوسط بارندگی سالانهٔ ایران ۲۵۰ میلی‌متر (کم‌تر از یک سوم میانگین جهانی) است که بیش‌تر مناطق کشور کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال بارندگی دارند. با وجود کمبود بارش در کشور، امروزه با مشکلات بی‌سابقه آب مواجه شده است (Madani, 2016). در بین محصولات کشاورزی کشور، برنج یک مادهٔ غذایی ارزشمند و پرمصرف به‌شمار می‌آید. بنابراین، منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش شامل استان‌های تولیدکنندهٔ برنج (ایلام، لرستان، زنجان، گیلان، قزوین، مازندران، گلستان، خراسان شمالی، خراسان رضوی، اصفهان، خوزستان، چهار محال بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، فارس و سیستان و بلوچستان) است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان‌های تولیدکنندهٔ برنج در ایران

Figure 1- Geographical location of rice-producing provinces in Iran

۲- ۲- داده و اطلاعات

متوسط مقادیر سطح زیرکشت (هکتار)، میزان تولید (تُن) و عملکرد (تن در هکتار)، تاریخ کاشت و برداشت، طول دورهٔ رشد و میزان مصرف کود (کیلوگرم در هکتار) در محصول برنج در استان‌های تولیدکننده طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در جدول ۱ نشان داده شده است (MAJ, 2021). هم‌چنین، داده‌ها و اطلاعات لازم در رابطه با منابع آب موجود در هر یک از استان‌های مورد مطالعه شامل میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف، منابع آب در دسترس وکل منابع آب موجود سطحی و زیرزمینی از بولتن منابع آب ایران جمع‌آوری شده است (IWR, 2021). با توجه به جدول ۱ استان‌های شمالی (مازندران، گیلان و گلستان) و خوزستان و فارس دارای بیش‌ترین سطح زیرکشت در رابطه با تولید برنج هستند و استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی دارای کم‌ترین سطح زیرکشت هستند. هم‌چنین، در بین استان‌های مورد مطالعه، استان مازندران دارای بالاترین میزان تولید در کشور است و استان‌های ایلام، لرستان، زنجان، چهار محال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، سیستان و بلوچستان، اصفهان، قزوین، خراسان رضوی و خراسان شمالی دارای کم‌ترین میزان تولید برنج است. متوسط عملکرد برنج ۴/۱۳ تن در هکتار است که بیش‌ترین عملکرد مربوط به استان‌های مازندران و فارس با مقدار ۴/۹۳ تن در هکتار و کم‌ترین میزان عملکرد مربوط به استان زنجان با مقدار ۳/۴۱ تن در هکتار است (جدول ۱).

جدول ۱- اطلاعات گیاهی، سطح زیرکشت، میزان تولید و عملکرد محصول برنج در ایران طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

Table 1- Information related to the cultivated area, production, and yield of rice in Iran during the statistical period of 2008 to 2019

استان	سطح زیرکشت (هکتار)	تولید (تن)	عملکرد (تن در هکتار)	بارش مؤثر (میلی‌متر)	تبخیر–تعرق گیاهی (میلی‌متر)	نیاز آبی (میلی‌متر)
مازندران	217921.7	1073637	4.93	46.50	441.50	395.00
گیلان	186406.7	758923.7	4.07	46.34	488.00	441.67
گلستان	58335.08	272723.3	4.68	20.00	515.67	495.67
ایلام	2285.31	10641.25	4.66	0.00	891.50	891.50
لرستان	4352.87	16674.00	3.83	0.00	769.25	769.25
زنجان	2509.37	8556.33	3.41	0.00	856.75	856.75
چهار محال و بختیاری	3236.90	12170.00	3.76	0.00	698.40	698.40
کهگیلویه و بویراحمد	4798.87	21018.92	4.38	2.25	1181.25	1179.00
سیستان و بلوچستان	2164.18	7837.83	3.62	0.00	1067.45	1067.45
خوزستان	63443	261827.25	4.13	2.36	964.45	962.02
اصفهان	7093.38	33739.67	4.76	0.00	691.50	691.50
قزوین	2632.44	9465.25	3.60	0.00	855.00	855.00
فارس	26001.82	128029.88	4.93	0.37	803.59	803.22
خراسان رضوی	1994.67	7087.58	3.55	15.30	985.98	970.67
خراسان شمالی	1737.17	6345.17	3.65	23.40	949.25	925.85
مجموع	584913.46	2628677.13	-	-	-	-
بیش‌ترین	217921.70	1073637	4.93	234.11	1181.25	1179
کم‌ترین	1737.17	6345.17	3.41	0.00	441.5	395
متوسط	38994.23	175445.14	4.13	33.72	810.64	776.92

۲ - ۳- ردپای آب

ارزیابی ردپای آب بر اساس روش ارائه شده توسط (Hoekstra et al., 2011) انجام شده است. ردپای آب از سه جزء شامل ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری تشکیل شده است. ردپای آب آبی به‌عنوان حجمی از آب‌های سطحی و زیرزمینی تعریف و در طول فرآیند تولید محصول استفاده می‌شود. ردپای آب سبز به مصرف منابع آب سبز (آب باران) اشاره دارد. ردپای آب خاکستری به‌عنوان حجمی از آب شیرین تعریف می‌شود که برای رقیق‌سازی کودها و سمومی که در فرآیند تولید محصول استفاده شده‌اند مورد نیاز است (Hoekstra et al., 2011).

در مطالعهٔ حاضر، ردپای آب محصول برنج برای استان‌های تولیدکنندهٔ واقع در ایران طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ ارزیابی شده است. نحوهٔ محاسبهٔ اجزاء ردپای آب شامل ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری به‌ترتیب در رابطه‌های (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده است (Hoekstra and Hung, 2005; Hoekstra et al., 2011). در این روابط P_e مجموع بارندگی مؤثر در طول دورهٔ رشد گیاه (میلی‌متر) که با استفاده از روش USDA-SCS (Fu et al., 2019) برآورد شد. ET_c تبخیر–تعرق گیاه (میلی‌متر)، Y عملکرد هر محصول (تن در هکتار)، a درصد تلفات کودهای نیتروژن که در شرایط آبی ۱۰ درصد و در شرایط دیم پنج درصد در نظر گرفته می‌شود (Chapagain et al., 2006). NAR نرخ مصرف کود برای هر گیاه (کیلوگرم در هکتار)، C_{MAX} غلظت بحرانی نیتروژن (کیلوگرم در مترمکعب)، C_{NAT} غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده (کیلوگرم در مترمکعب) است، در محاسبهٔ ردپای آب خاکستری، تنها از کود نیتروژن استفاده شده است. در ادامه محاسبهٔ ردپای آب از در نرم‌افزار اکسل انجام شد.

$$WF_{blue} = \frac{(ET_c - P_e) * 10}{Y} \quad (۱)$$

$$WF_{Green} = \frac{P_e * 10}{Y} \quad (۲)$$

$$WF_{Grey} = \frac{a * NAR}{C_{MAX} - C_{NAT}} * \frac{1}{Y} \quad (۳)$$

۲- ٤- شاخص تنش آبی

در این پژوهش کمبود آب منطقه‌ای کشاورزی با WSI اندازه گیری شد. روش شناخته شده برای محاسبهٔ WSI، نسبت استفاده از منابع آب (مصرف آب در بخش‌های مختلف) به میزان منابع آب موجود است (Raskin et al., 1997). در رابطهٔ (۴)، WU و AWR به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ مصرف آب و منابع آب موجود (مترمکعب) هستند.

$$WSI = \frac{WU}{AWR} \quad (۴)$$

۲-۵- شاخص تنش آبی برنج[1]

RWSI در یک منطقه به‌عنوان نسبت کل AWF به AWR در طول یک دورهٔ معین تعریف می‌شود (رابطهٔ ۵)، که در آن AWF کل ردپای آب برنج و AWR کل منابع آب مصرفی برنج است و شامل منابع آب آبی (منابع آب سطحی و زیرزمینی) (AWR_{blue}) و منابع آب سبز (منابع آب باران) (AWR_{green}) ست که با استفاده از رابطه‌های (۶) تا (۸) محاسبه می‌شوند (Raskin et al., 1997; Falkenmark et al., 1989). با توجه به رابطهٔ (۶) AWU و WUبه‌ترتیب نشان‌دهندهٔ منابع آب مصرفی برای تولید برنج و کل منابع آب مصرف شده در بخش کشاورزی هستند. AWR_{green} به میزان بارش مؤثر سالانه اشاره دارد (رابطهٔ ۹) که در آن A مساحت اراضی قابل کشت برای تولید برنج (مترمربع) و P_e بارش مؤثر سالانهٔ منطقه‌ای (میلی‌متر) است (FAO, 2010).

$$RWSI = \frac{AWF}{AWR} \quad (۵)$$

$$AWR = AWR_{blue} + AWR_{green} \quad (۶)$$

$$AWR_{blue} = AWR * \frac{AWU}{WU} \quad (۷)$$

$$AWR_{blue} = AWR * \frac{AWU}{WU} \quad (۸)$$

$$P_e = \begin{cases} P * \left(\frac{4.17 - 0.02 * P}{4.17}\right), P < 83 \\ (41.7 + 0.1 * P), \quad P \geq 83 \end{cases} \quad (۹)$$

تنش آبی برنج به پنج گروه بر اساس طبقه‌بندی پیشنهاد شده توسط (Pfister et al., 2009) تقسیم‌بندی می‌شود: که در جدول ۲ نشان داده شده است (Pfister et al., 2009).

جدول۲- طبقه‌بندی شاخص تنش آبی و تنش آبی ناشی از تولید برنج (Pfister et al., 2009)

Table 2- Water stress index (WSI) and rice water stress index (RWSI) Classification (Pfister et al., 2009)

دسته‌بندی	RWSI	WSI
بدون تنش آبی	0 – 0.15	0 - 0.15
تنش آبی پایین	0.16 – 0.3	0.16 – 0.3
تنش آبی متوسط	0.31 – 0.6	0.31 – 0.6
تنش آبی بالا	0.61 – 1.2	0.61 – 0.8
تنش آبی بسیار بالا	1.21 – 1.9	0.81 – 0.9
تنش آبی بحرانی	>1.9	> 0.91

۲-٦- فقر آب

فقر آب از ضرب کل ردپای آب (AWF) در شاخص تنش آبی برنج (RWSI) به‌دست می‌آید (رابطهٔ ۱۰؛ Hanafiah et al., 2019).

$$\text{Water Deprivation} = AWF * RWSI \quad (۱۰)$$

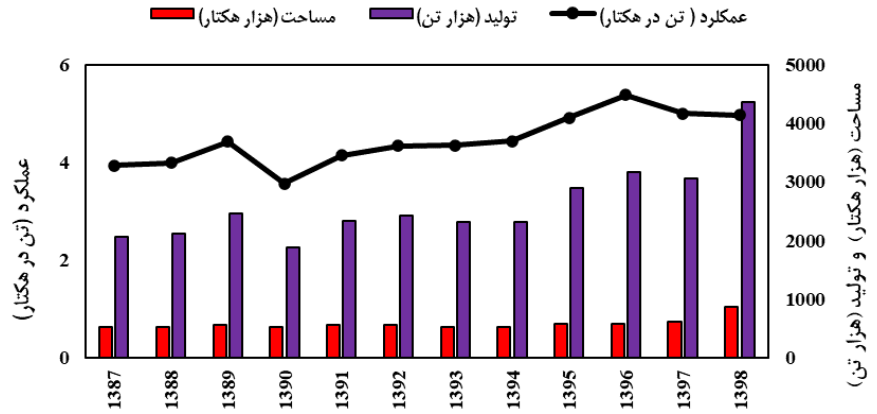
۳- نتایج و بحث

۳- ۱- تغییرات تولید، عملکرد و سطح زیرکشت

سطح زیرکشت سالانه، عملکرد محصول و کل تولید برنج در ایران برای دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ به‌طور متوسط به‌ترتیب برابر با ۵۸۲/۲۸ هزار هکتار، ۲۶۱۹/۲۱ هزار تن و ۴/۴۶ تن در هکتار است. شکل ۲ نشان می‌دهد سطح زیرکشت برنج در ایران دورهٔ آماری مورد مطالعه با شیب ملایم از ۵۲۳/۶۹ هزار هکتار در سال ۱۳۸۷ به ۸۷۸/۵۶ هزار هکتار در سال ۱۳۹۸ افزایش یافته است. هم‌چنین، نتایج مربوط به تولید برنج در سطح کشور نشان می‌دهد که در طول دورهٔ آماری مورد مطالعه با توجه به افزایش سطح زیرکشت، مقدار تولید محصول هم افزایش یافته است؛ به‌طوری که از مقدار ۲۰۶۰/۳۰ هزار تن در سال ۱۳۸۷ به مقدار ۴۳۶۳/۴۴ هزار تن در سال ۱۳۹۸ رسیده است و یک روند کاملاً افزایشی با تغییراتی جزئی داشته است. در طول دورهٔ مورد مطالعه، عملکرد محصول برنج از ۳/۹۳ تن در هکتار در سال ۱۳۸۷ به ۴/۹۷ تن در هکتار افزایش یافته که در طول ۱۲ سال ۲۶ درصد افزایش داشته است. بیش از ۷۰ درصد شلتوک تولید شده به استان‌های مازندران و گیلان تعلق دارد. بر اساس گزارش MAJ (2021) این استان‌ها چندسالی است به ارقام پرمحصول برنج (واریتهٔ شیرودی و فجر) روی آورده که تحولی شگرف در تولید برنج در شمال ایران ایجاد کرده و دارای کیفیت قابل‌قبولی است.

بالاترین عملکرد محصول مختص استان اصفهان، فارس و مازندارن و کم‌ترین آن مربوط به استان‌های قزوین، زنجان و سیستان و بلوچستان است (جدول ۱). نکته قابل‌توجه در ایران تنوع زیاد واریته‌های شلتوک است که در تغییر عملکرد بدون تأثیر نبود است. به‌طوری‌که در هر سه استان نام‌برده واریته‌های متفاوت دارای عملکردهای بالا هستند (Rezaei et al., 2021). مازندران و گیلان بزرگ‌ترین تولیدکنندهٔ برنج در ایران هستند که دارای بیش‌ترین سطح زیرکشت هستند و ۷۰ درصد از سطح زیرکشت و تولید را در ایران به خود اختصاص داده‌اند.

[1] Rice water stress index (RWSI)



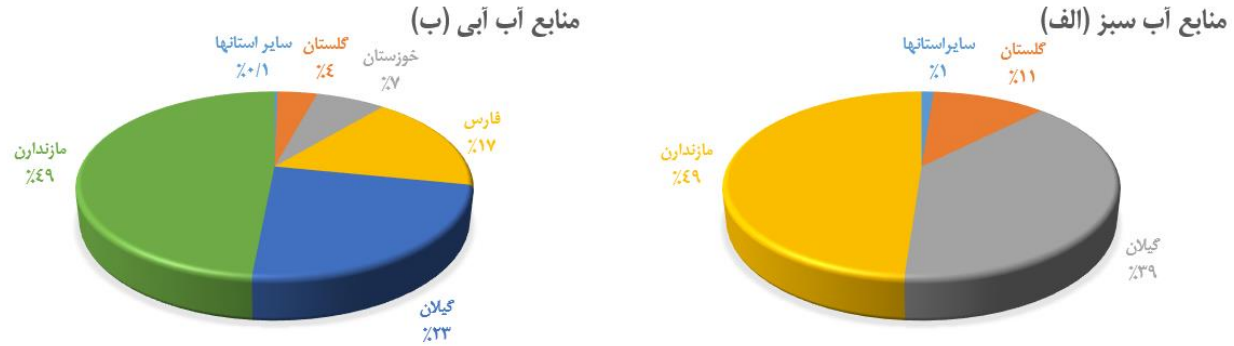
شکل ۲- متوسط سطح زیرکشت، تولید و عملکرد برنج در ایران طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

Figure 2- The average cultivated area, production, and yield of rice in Iran during the statistical period of 2008 to 2019

۳-۲- کل منابع آبی در دسترس و منابع آب مصرفی برنج

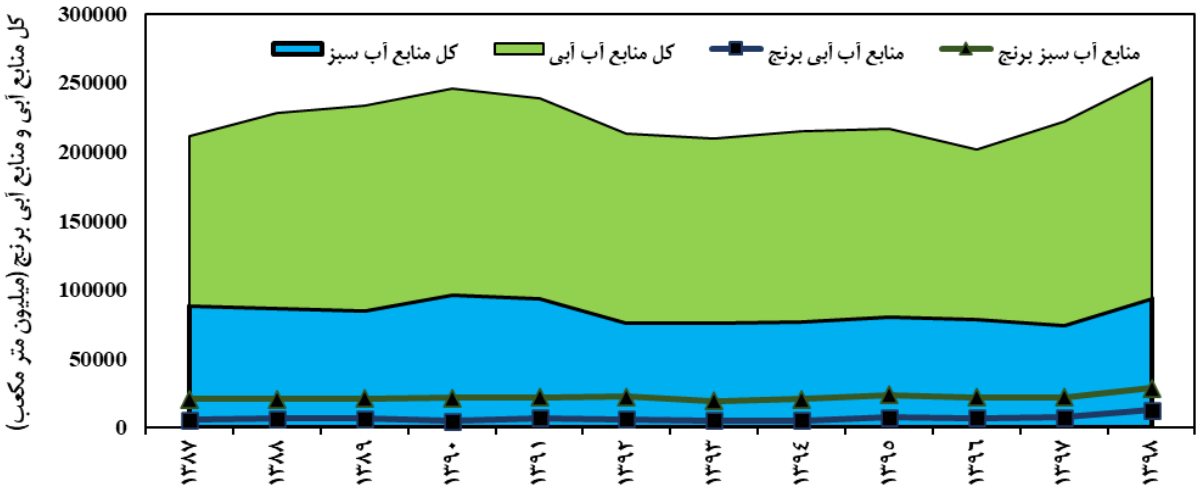
منابع آبی در دسترس سبز و آبی در استان‌های تولیدکنندهٔ برنج در شکل ۳ ارائه شده است. بیش‌ترین منابع آب سبز (شکل ۳-الف) مربوط به استان‌های شمالی است و سایر استان‌ها از کل منابع آب سبز موجود (۱۵۲۱۰ میلیون مترمکعب)، ۴۹ درصد آن مربوط به استان مازندران، ۳۹ درصد آن استان گیلان و ۱۲ درصد آن مربوط به سایر استان‌هاست. این استان‌ها بالاترین میزان بارش را در کشور در دورهٔ رشد برنج دارند. بر اساس شکل ۳-ب، از کل منابع آب آبی برای کشت برنج (۶۸۷۲ میلیون مترمکعب)، بیش‌ترین سهم مربوط به استان‌های مازندران (۴۹ درصد)، گیلان (۲۳ درصد)، فارس (۱۷ درصد)، خوزستان (۷ درصد) و سهم کمی (۴/۰۱ درصد) مربوط به سایر استان‌هاست.

شکل ۴ تغییرات زمانی منابع آبی در دسترس در بخش کشاورزی و منابع آب در دسترس برای تولید برنج را (سبز و آبی) در ایران در دورهٔ ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. مجموع کل منابع آبی در دسترس طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ به‌طور متوسط ۲۲۴۱۰۱ میلیون مترمکعب بوده که منابع آب آبی ۸۳۸۶۴ میلیون مترمکعب و منابع آب سبز برابر با ۱۴۰۲۳۷ میلیون مترمکعب است. تغییرات مربوط به منابع آب در دسترس برای تولید برنج نشان می‌دهد که مقدار متوسط کل منابع آب برابر با ۲۱۹۹۲ میلیون مترمکعب است که ۶۷۸۲ میلیون مترمکعب مربوط به منابع آب آبی و ۱۵۲۱۰ میلیون مترمکعب مربوط به منابع آب سبز است. براین اساس، از کل منابع آب موجود در کشور، از منابع آب سبز حدود ۱۰ درصد و از منابع آب آبی حدود هشت درصد برای تولید برنج استفاده می‌شود.



شکل ۳- منابع آب آبی و سبز در دسترس برای تولید برنج در ایران طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

Figure 3- Available green and blue water resources for agriculture for rice production in Iran during the statistical period 2008 to 2019



شکل ٤- منابع آب در دسترس کشاورزی و منابع آب در دسترس برای تولید برنج در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

Figure 4- Available water resources for agriculture and available water resources for rice production in Iran during the statistical period 2008 to 2019

۳- ۳- ردپای آب در تولید برنج در مقیاس ملی و منطقه

بر اساس نتایج، متوسط ردپای آب کل در تولید برنج در ایران ۳۰۳۷ مترمکعب بر تن است که به‌ترتیب حداکثر و حداقل آن مربوط به استان مازندارن (۱۵۶۰ مترمکعب بر تن) و استان زنجان (۴۹۵۰/۹۶ مترمکعب بر تن) است (جدول ۲).

جدول ۲- متوسط اجزاء ردپای آب محصول برنج در مقیاس استانی و ملی

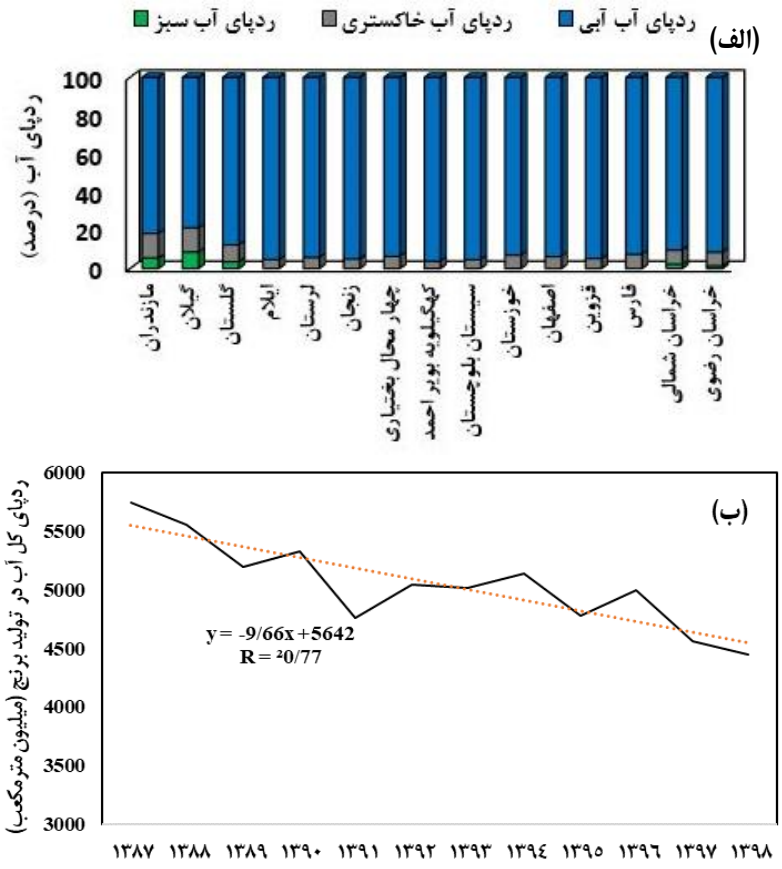
Table 3- The average components of the water footprint in irrigated rice cultivation at the provincial and national scale

استان	مترمکعب بر تن				درصد		
	ردپای آب آبی	ردپای آب سبز	ردپای آب خاکستری	ردپای آب کل	ردپای آب آبی	ردپای آب سبز	ردپای آب خاکستری
مازندران	1273.85	86.15	200	1518	81.66	5.52	12.82
گیلان	1555.43	171.53	250	1976.19	78.68	8.68	12.65
گلستان	1691.17	69.04	168.94	1929.15	87.66	3.58	8.76
ایلام	3479.99	0.00	173.36	3673.15	95.28	0.00	4.72
لرستان	3559.98	0.00	218.88	3778.86	94.21	0.00	5.79
زنجان	4702.68	0.00	248.28	4950.96	94.99	0.00	5.01
چهار محال بختیاری	2970.32	0.00	201.36	3171.68	93.65	0.00	6.35
کهگیلویه بویراحمد	4604.50	5.86	176.28	4786.63	96.19	0.12	3.68
سیستان بلوچستان	4322.39	0.00	208.37	453.76	95.40	0.00	4.60
خوزستان	3677.47	3.65	270.71	3951.84	93.06	0.09	6.85
اصفهان	2332.29	0.00	155.76	2488.73	93.74	0.00	6.26
قزوین	3918.61	0.00	217.18	4135.78	94.75	0.00	5.25
فارس	2652.32	0.54	212.05	2864.91	92.58	0.02	7.40
خراسان شمالی	2527.2	68.5	204.15	2799.3	90.3	2.5	7.2
خراسان رضوی	2784.8	43.2	215.65	3043.5	91.5	1.4	7.0
کم‌ترین	1273.85	0.00	155.76	1560	69.82	0.00	3.68
بیش‌ترین	4702.68	639.17	270.71	4950.96	96.19	22.86	12.82
میانگین	3006.78	94.47	208.07	3034.6	89.34	3.69	6.97

به‌طوری که ردپای آب سبز بین کم‌ترین مقدار صفر مترمکعب بر تن در استان‌های ایلام، لرستان، زنجان، چهارمحال و بختیاری، سیستان و بلوچستان، اصفهان و قزوین تا بیش‌ترین مقدار ۶۳۹/۱۷ مترمکعب در تن در استان خراسان شمالی و بعد از آن با مقدار ۴۴۱/۰۵ مترمکعب بر تن در استان خراسان رضوی متغیر است (شکل ۵-الف). بیش‌ترین مقدار ردپای آب آبی با مقادیر

۴۷۰۲/۶۸، ۴۶۰۴/۵۰ و ۴۳۲۲/۳۹ مترمکعب در تن به‌ترتیب مربوط به استان‌های زنجان، کهگیلویه و بویراحمد و سیستان و بلوچستان است. هم‌چنین، کم‌ترین مقدار ردپای آب آبی هم مربوط به استان‌های شمالی کشور مازندران، گیلان و گلستان با مقادیر۱۲۷۳/۸۵، ۱۵۵۵/۴۳ و ۱۶۹۱/۱۷ مترمکعب بر تن است (شکل ۵-ب). در ردپای آب خاکستری هم به‌ترتیب استان‌های اصفهان ۱۵۵/۷۶ و گلستان ۱۶۸/۹۴ مترمکعب بر تن دارای کم‌ترین ردپای آب خاکستری در کشور هستند. در حالی‌که بیش‌ترین مقدا ردپای آب خاکستری مربوط استان خوزستان با مقدار ۲۷۰/۷۱ مترمکعب بر تن است. به‌طورکلی متوسط ردپای آب خاکستری در ایران برابر با ۲۰۸/۰۷ مترمکعب بر تن است (شکل ۳-پ). نتایج مطالعهٔ حاضر نشان داد که از کل ردپای آب سهم ردپای آب آبی، سبز و خاکستری به‌ترتیب برابر با ۹۱/۶۸، ۶/۹۳ و ۱/۳۹ درصد است (شکل ۶).

بر اساس گزارش Hoekstra and Chapagain (2011) متوسط ردپای برنج در مقیاس ملی در ایران ۳۱۰۰ مترمکعب بر تن بوده است. در حالی‌که در این پژوهش، ۲۹۹۷ مترمکعب بر تن برآورد شد. مهم‌ترین دلیل تفاوت مقادیر برآورد شده ردپا در پژوهش حاضر، جزئی‌تر بودن مقیاس مورد بررسی است. تفاوت بین نیاز آبی، بارش موثر و تبخیر-تعرق گیاهی درهر منطقه نشان‌دهندهٔ تغییرات قابل‌توجهی در میزان ردپا است و این وضعیت، ضرورت استفاده از مقیاس‌های کوچک‌تر برای ارزیابی را اثبات می‌کند. منطقی است که داده‌های برآورد شده درسطح دشت در هر استان، دارای دقت بیش‌تری از برآوردها در مقیاس ملی است. از طرفی انواع مفروضات در مورد داده‌های ورودی و مدل‌سازی ردپای آب بر میزان ردپای آب سبز نیز مؤثر است. برآورد آب آبی با داده‌های آبیاری حقیقی، سبب برآورد دقیق‌تری از ردپای آب خواهد شد. لذا در مطالعات منطقه‌ای علی‌رغم مطالعات ملی، برآورد پارامترهای مختلف، از اعتبار بالاتر و عدم قطعیت کم‌تری برخوردارند.



شکل ٦- سهم اجزاء ردپای آب (الف) و تغییرات زمانی ردپای آب در محصول برنج در مقیاس استانی و ملی (ب)

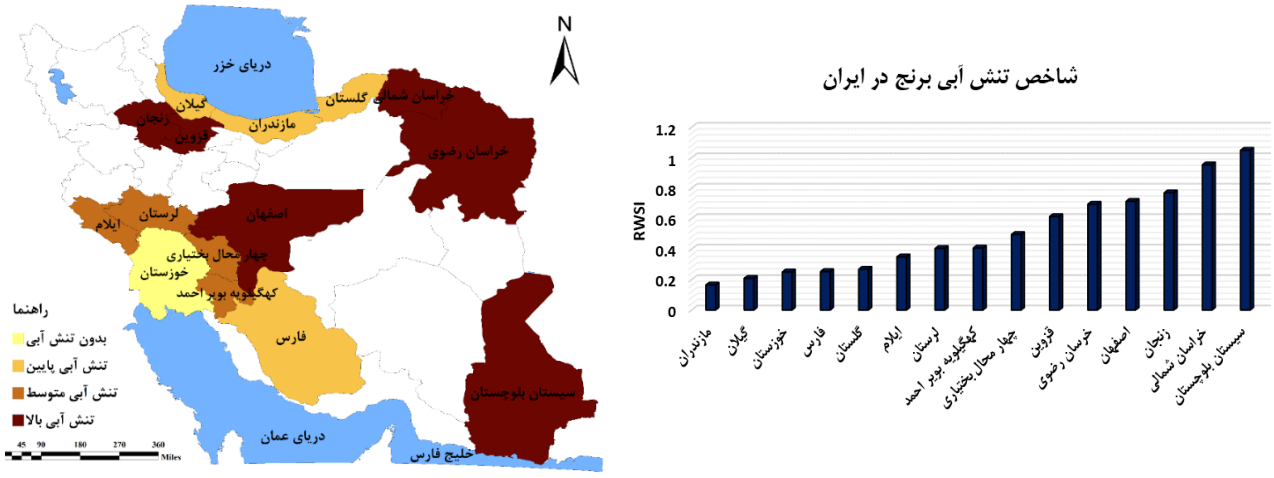
Figure 6 -The share of water footprint components (a) and time changes of water footprint in rice production at the provincial and national scale

نکتهٔ جالب توجه، مقایسهٔ مقدار ردپای آب در تولید برنج در ایران (۳۰۳۷ مترمکعب بر تن) در مقایسه با هند (۲۳۵۷مترمکعب برتن) (Uma Govi and Shvakumar, 2021) بزرگ‌ترین تولیدکنندهٔ برنج در دنیاست. با این تفاوت که در هند، بیش از ۵۳ درصد ردپای آب را آب سبز تشکیل می‌دهد در حالی‌که در ایران این مقدار تنها ۶/۹۳ درصد است. همان‌طور که قبلا گفته شد، بیش از ۸۰ درصد تولید و سطح زیرکشت برنج در ایران به شمال (گلستان، گیلان و مازندران) تعلق دارد که این منطقه دارای بیش‌ترین میزان بارش (۶۰۰ میلی‌متر تا ۲۱۰۰) در ایران است. اگر چه نسبت بارش در دورهٔ رشد برنج نسبت به کل سال بسیار کم‌تر است، اما تغییر دورهٔ کشت جهت استفاده حداکثری از بارش مؤثر، به‌طور مؤثری می‌تواند سهم آب سبز را در مقایسه با سایر اجزای ردپای آب افزایش دهد.

بالاترین سهم ردپای آب (۹۱ درصد) در تولید برنج مربوط به آب آبی است. استفاده از ژنوتیپ‌های مقاوم به کم آبی، استفاده از روش‌های نوین آبیاری تحت عنوان خشکه‌کاری برنج که در حال حاضر به‌جای کشت غرقابی برنج استفاده می‌شود، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش ردپای آب در برنج باشد. به‌طور عمده این روش سبب کاهش نفوذ عمقی و جانبی آب در خاک و کاهش میزان تبخیر، می‌شود (Shekhawat et al., 2020). این روش نیز در خوزستان (Gilani et al., 2019) و اصفهان (Ramazani and Dehgani et al., 2021) به‌صورت پایلوت انجام شده است.

۳-٤- شاخص تنش آبی در بخش کشاورزی و تنش آبی در تولید برنج در ایران

از آن‌جایی‌که تنش آبی برنج بر اساس نسبت بین مقدار کل ردپای آب در تولید برنج به مقدار منابع آب در دسترس منطقه‌ای تعریف شده است بنابراین، دسترسی کم‌تر به منابع آب در هر استان موجب بالا رفتن مقدار تنش آبی خواهد شد. شکل ۷-الف تغییرات تنش آبی ناشی از تولید برنج در استان تولیدکنندهٔ برنج را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، محدودهٔ تغییرات شاخص RWSI از ۰/۱۶ در استان مازندران تا ۱/۳۲ در استان سیستان و بلوچستان متغیر است. شاخص تنش آبی کشاورزی در استان لرستان، زنجان، قزوین، خراسان شمالی، خراسان رضوی، اصفهان، خوزستان، فارس و سیستان و بلوچستان زیاد و بالاتر از ۰/۶ است که نشان می‌دهد این مناطق با تنش آبی بسیار بالا در تولید محصولات کشاورزی مواجه هستند (شکل ۷-ب). در حالی‌که استان‌های مازندران، گیلان، گلستان، فارس و خوزستان از نظر شاخص تنش آبی در محدودهٔ کم‌تر از ۰/۳ قرار دارند که نشان‌دهندهٔ سطح پایین تنش آبی در تولید برنج است. با توجه به شکل (۷-ب) مقدار متوسط شاخص تنش آبی برنج در طول دورهٔ آماری برابر با ۰/۵ است که مطابق با طبقه‌بندی (جدول ۲) در کلاس با تنش آبی متوسط و رو به بالا مواجه بوده است.



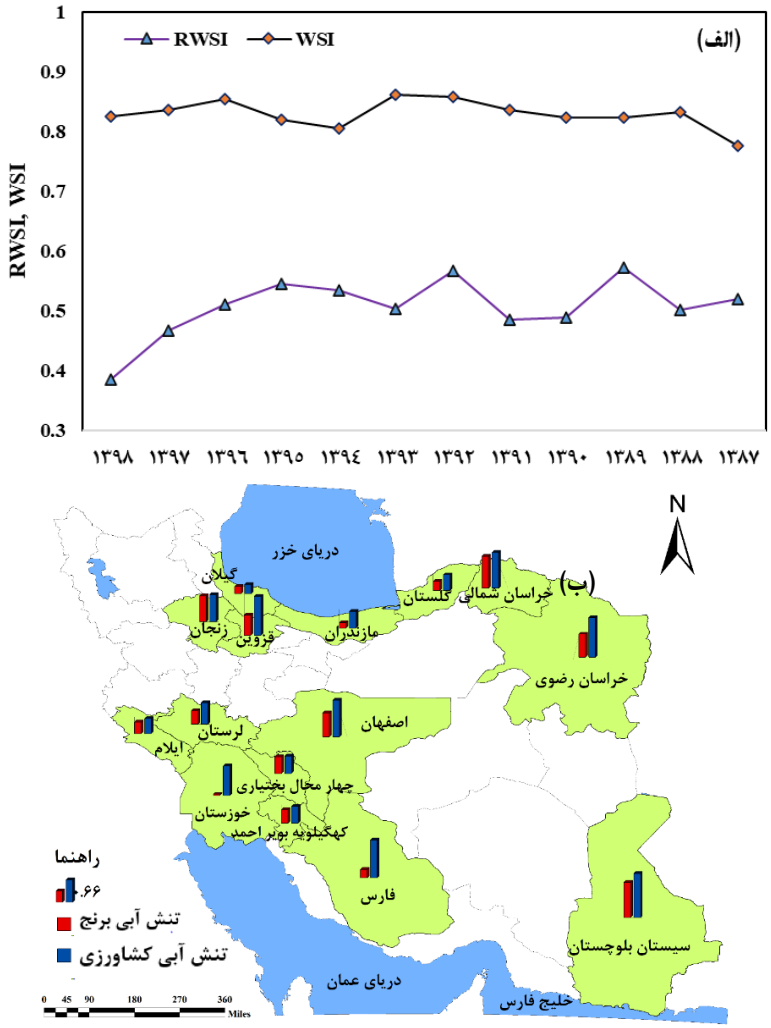
(الف) (ب)

شکل ۷- تغییرات شاخص تنش آبی برنج در استان‌ها (الف) و در سطح ایران (ب) طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

Figure 7- Changes of the rice water stress index in the provinces (a) and in Iran (b) during the statistical period of 2017 to 2018

شکل ۸ تغییرات مکانی WSI (تنش آبی در بخش کشاورزی) و RWSI (تنش آبی در تولید برنج) را در دورهٔ مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۸–الف، تغییرات RWSI همواره پائین‌تر از WSI است. چرا که از کل منابع آبی کشور، تنها بخشی از آن در استان‌های مورد بررسی صرف تولید برنج می‌شود و بقیه صرف تولید سایر محصولات کشاورزی می‌شود. تغییرات زمانی دو شاخص روند قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد. بر اساس نتایج، متوسط WSI در ایران در بخش کشاورزی در استان‌های مورد بررسی ۰/۹۲ برآورد شد که در مقایسه با RWSI در ایران (۰/۵) نشان می‌دهد، در این استان‌ها ۴۲ درصد تنش آبی توسط تولید سایر محصولات کشاورزی بر منابع آبی وارد می‌شود. شکل ۸–ب نیز مقایسهٔ دو شاخص مورد بررسی را در استان‌ها نشان می‌دهد.

سهم مصرف آب در تولید برنج نسبت به سایر محصولات در این شکل مشهود است. به‌عنوان نمونه، در استان مازندران، WSI و RWSI به‌ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۱۶ است. علیرغم سهم بالای مازندران در تولید برنج در کشور، نسبت تنش آبی ناشی از برنج به تنش آبی در بخش کشاورزی، ۲۶ درصد است و ۷۴ درصد مابقی به محصولات مانند گندم، مرکبات، دانه‌های روغنی و سایر محصولات غالب منطقه است. در خصوص خوزستان، گیلان و فارس نیز به همین صورت است. در مقابل، در استان‌هایی نظیر خراسان شمالی، زنجان، اصفهان و سیستان و بلوچستان، دو شاخص به‌هم نزدیک‌ترند. لذا بر اساس نتایج می‌توان استنباط کرد، در این استان‌ها، کشت برنج نقش مهمی در تنش آبی در بخش کشاورزی را ایفا می‌کند.



شکل ۸– تغییرات مکانی (الف) و زمانی (ب) شاخص تنش آبی کشاورزی و تنش آبی برنج در مقیاس استانی و ملی

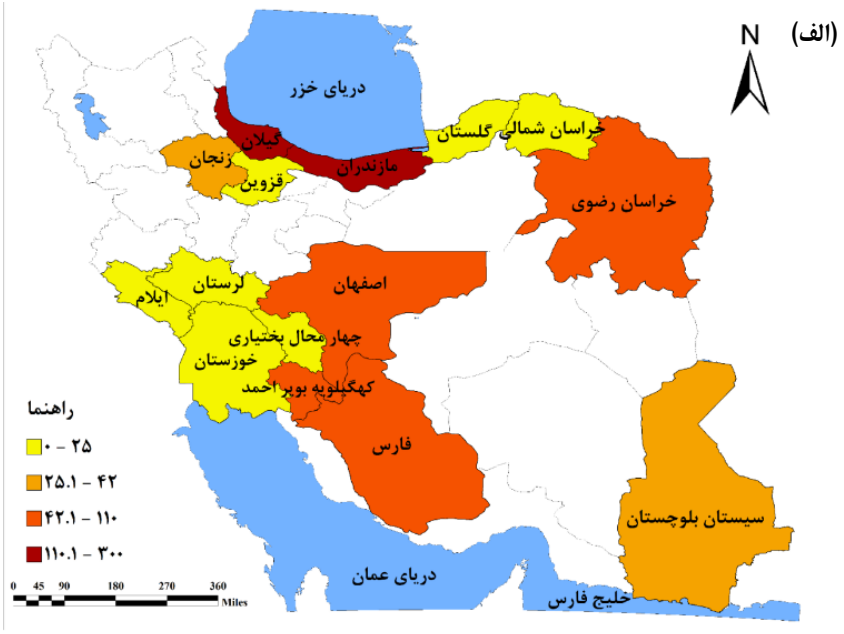
Figure 8 - Spatial (a) and temporal (b) changes of agricultural water stress index and rice water stress at provincial and national scale

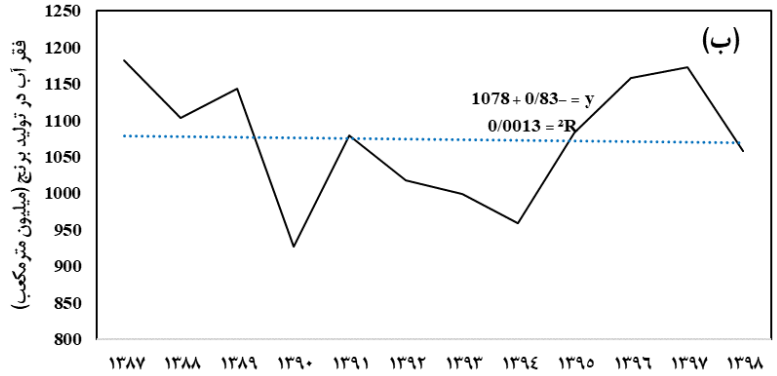
۳-۵- فقر آب در تولید برنج

بر اساس نتایج حاصل طی دورهٔ آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ برای استان‌های تولیدکنندهٔ برنج، کل محرومیت از آب در تولید برنج به طور متوسط در استان‌های مورد مطالعه ۱۰۷۳ میلیون مترمکعب است. با توجه به نتایج کم‌ترین مقدار فقر آب به‌دست آمده برای استان خوزستان با مقدار ۱۱ میلیون مترمکعب، ایلام ۱۴/۶۵ و خراسان رضوی ۱۴/۷۴ است و بیش‌ترین مقدار فقر آب مربوط به استان گیلان با مقدار ۲۹۰/۲۴ میلیون مترمکعب و مازندران با مقدار فقر آبی ۲۶۴/۹۰ میلیون مترمکعب است. در واقع با توجه به نتایج استان‌های واقع در شمال کشور (مازندران، گیلان و گلستان) دارای بالاترین میزان فقر آب در تولید برنج در بین استان‌ها مورد مطالعه هستند چرا که استان‌های واقع در شمال کشور، برنج بسیار بیش‌تری از سایر استان‌ها تولید می‌کنند و با توجه به داشتن مقدار تولید و عملکرد بیش‌تر، بیش‌ترین میزان فقر آب را هم دارند (شکل ۹-الف).

شکل ۹-ب تغییرات زمانی فقر آب در تولید برنج در ایران را نشان می‌دهد. تغییرات چندانی در روند فقر آب مشاهده نمی‌شود. سال‌هایی که فقر آب بیش‌تر شده، می‌تواند به‌دلیل کاهش عملکرد و افزایش نیاز آبی ناشی از خشکسالی و هرگونه تنشی در این زمینه باشد.

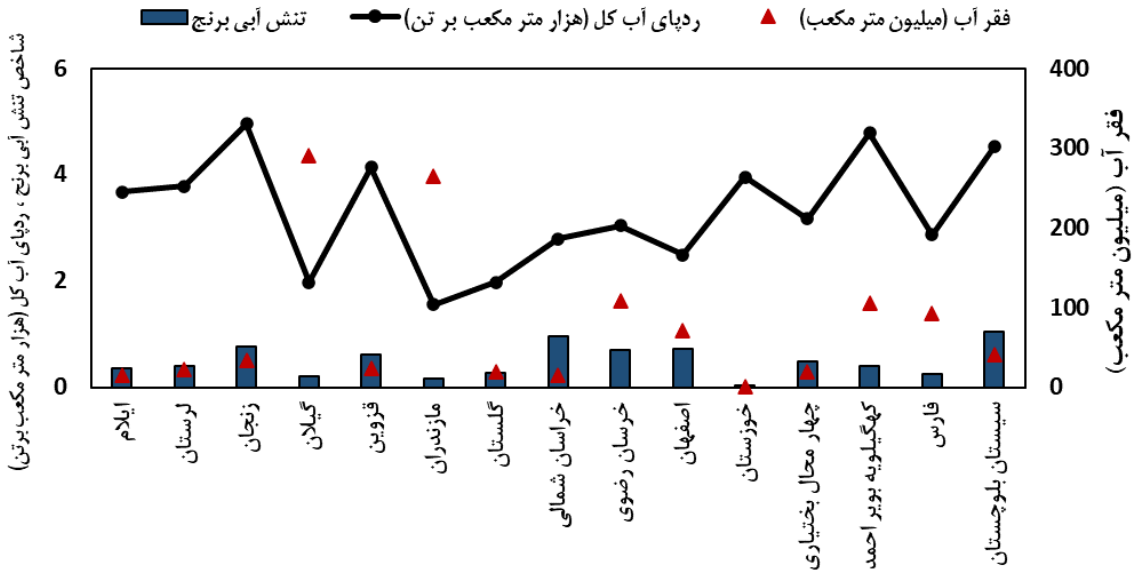
مقایسهٔ شاخص تنش آبی، فقر آب و میزان کل ردپای آب برای محصول برنج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل استان‌های شمالی کشور (مازندران، گیلان و گلستان) که در اولویت اول کشت برنج قرار دارند کم‌ترین حجم ردپای آب را به خود اختصاص داده‌اند. در واقع این استان‌ها به‌دلیل داشتن بالاترین میزان دسترسی به منابع آب در سطح پایین تنش آبی قرار دارند. از طرفی در استان‌های مازندران و گیلان با وجود بارندگی زیاد و سهم آب سبز بیش‌تر و بالا بودن میزان تولید در این استان ها موجب بالا رفتن متوسط حجم اجزاء ردپای آب در تولید این محصول شده است که در نتیجه این دو استان بیش‌ترین میزان فقر آبی را در تولید برنج به خود اختصاص داده‌اند. استان‌های مانند سیستان و بلوچستان، اصفهان، خراسان شمالی، قزوین و زنجان که بالاترین میزان کل ردپای آب به‌ویژه ردپای آب آبی را در تولید برنج به خود اختصاص داده‌اند و به‌دلیل دسترسی کم‌تر به منابع آب و داشتن میزان بارندگی کم‌تر از نظر شاخص تنش آبی در سطح تنش آبی بالا قرار دارند. در کل بیش‌ترین میزان فقر آب مربوط به استان‌های مازندران، گیلان و گلستان است که بیش ترین میزان تولید برنج را دارند. نتایج Cao et al. (2017) در چین نیز مؤید همین مطلب است که با افزایش دسترسی به آب، فقر آب نیز افزایش می‌یابد. چرا که انگیزه برای تولید افزایش و حجم ردپای ناشی از افزایش تولید نیز افزایش می‌یابد.





شکل ۹- توزیع مکانی (الف) و زمانی (ب) فقر آب برنج در مقیاس استانی و ملی طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

Figure 9- Spatial (a) and temporal (b) distribution of water poverty on provincial and national scale during 2008–2019



شکل ۱۰- تغییرات ردپای آب و شاخص‌های تنش آبی و فقر آب در تولید برنج در ایران

Figure 10- Changes in **the water footprint and indicators of water stress and water poverty of rice crop in Iran**

٤- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی وضعیت منابع آب ناشی از تولید برنج در ایران با استفاده از شاخص‌های تنش آبی و فقر آب با دیدگاه ردپای آب پرداخته است. نتایج نشان داد که برای تولید برنج در ایران در بین اجزاء ردپای آب، بیش‌ترین مقدار مربوط به ردپای آب آبی و کم‌ترین مربوط به ردپای آب سبز است. ردپای آب آبی بالا نشان می‌دهد که بیش‌تر آب‌های سطحی و زیرزمینی برای تولید برنج مصرف می‌شوند و پایین بودن ردپای آب سبز نشان می‌دهد که میزان بارندگی با توجه به کشورهایی مثل هند و پاکستان که بیش از ۶۰ درصد سهم ردپا را آب سبز به خود اختصاص می‌دهد، برای کشت برنج در ایران کافی نیست و منابع آب سبز (بارش مؤثر) کم‌تری برای تولید برنج در ایران استفاده می‌شود. هم‌چنین، بالا بودن تنش آبی و ردپای آب برنج در ایران نشان‌دهندهٔ وابستگی زیاد به منابع آب آبی (آب‌های زیرزمینی و سطحی) در تولید برنج است. نکتهٔ قابل توجه بعدی، بالابودن سهم ردپای آب خاکستری در تولید برنج نسبت به سهم ردپای آب سبز است این مسأله نشان می‌دهد که پایین بودن عملکرد برنج در استان‌های مورد مطالعه و مصرف بالای کودها و سموم شیمیایی باعث بالا رفتن ردپای آب خاکستری در تولید برنج شده است.

نتایج حاصل از تنش آبی ناشی از تولید برنج در ایران نشان داد که مقدار متوسط این شاخص در بین استان‌های مورد مطالعه برابر با ۰/۵ است که نشان‌دهندهٔ وضعیت تنش آبی متوسط است. به‌غیر از استان‌های واقع در شمال کشور و استان فارس و خوزستان، سایر استان‌های تولیدکنندهٔ برنج با تنش آبی متوسط و

بالا مواجه هستند. بالا بودن ردپای آب و پائین بودن عملکرد یکی از مهم‌ترین دلایل تنش بالای آبی است. بالا بودن مقدار منابع آبی در دسترس منطقه‌ای برای تولید برنج نسبت به کل ردپای آب محصول باعث پایین بودن تنش آبی در استان‌ها واقع در شمال کشور شده است اما از طرفی بالا بودن مقدار تولید برنج موجب افزایش مصرف واقعی آب این محصول و در نتیجه بالا بودن مقدار کل ردپای آب در استان‌های واقع در شمال کشور شده است که در نتیجه باعث بالا رفتن فقر آبی در این استان‌ها شده است. فقر آب در استان‌های شمالی کشور نشان‌دهندهٔ مصرف بالای آب توسط کشت برنج است.

ارزیابی کمبود آب با استفاده از رویکرد ردپای آب می‌تواند برای شناسایی خطرات ناشی از تولید بالای برنج با توجه به پتانسیل فقر آب مفید باشد. با توجه به این‌که وابستگی و مصرف زیاد آب آبی نسبت به آب سبز باعث افزایش کمبود آب در رابطه با تولید محصول برنج شده است بنابراین باید به تغییر در الگوی تخصیص منابع آب بر اساس وضعیت منابع آبی و شاخص‌های کمبود آب پرداخت. از طرفی، در حال حاضر بحران آب به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی در ایران، توجه کافی نمی‌شود و نبود برنامه مدون و کارکردِ بخشی سازمان‌های مختلف در زمینهٔ آب باعث بدترشدن وضعیت منابع آبی در ایران شده است. طی ۲۰ سال گذشته، سیاست وزارت جهاد کشاورزی در ایران، خودکفایی تولید محصولات استراتژیک (گندم، ذرت، برنج، شکر و دانه‌های روغنی) بوده و هیچ‌گاه تولید، توسعه و یا توقف کشت و صادرات و واردات محصولات کشاورزی با دیدگاه ردپای آب نبوده است. اگر چه وزارت جهاد کشاورزی در ایران طی پنج سال گذشته به‌دنبال توقف کشت برنج در بیش‌تر استان‌ها بوده اما به‌دلیل عدم برنامهٔ مدون جهت کشت جایگزین، این برنامه نیز تاکنون موفقیت چندانی نداشته است. لذا به‌طور جدی می‌توان گفت تاکنون هیچ برنامه‌ای برای حفاظت از منابع آب در کشت محصولات راهبردی در ایران وجود ندارد. لذا کاربرد این شاخص‌ها در برنامه‌ریزی صحیح کشت محصولات کشاورزی با وجود همهٔ محدودیت‌ها و چالش‌ها می‌تواند مفید واقع شود. با توجه به محدودیت آب و خاک در ایران، این شاخص‌ها اطلاعات مفیدی را برای اولویت‌بندی کشت محصول در مناطق مستعد ارائه می‌کند. در نهایت پیشنهاد می‌شود که دیدگاه حاضر برای تخصیص منابع آب کشاورزی و سیاست‌گذاری توقف و یا توسعهٔ کشت در مقیاس استانی و ملی وارد شود.

استفاده از مفهوم ردپای آب و شاخص‌های مشتق شده از آن و بررسی وضعیت تبادلات آب بین منطقه‌ای و فقر آب در هر یک از استان‌های تولیدکنندهٔ برنج باعث شده با اطلاعات جامع‌تری به ارزیابی کمبود آب در رابطه با تولید این محصول در ایران پرداخته شود. در نهایت، پیشنهاد می‌شود پژوهش فوق با هدف بهینه‌سازی سطح زیرکشت با در نظر گرفتن امنیت آب و غذایی در استان‌های تولیدکنندهٔ برنج صورت پذیرد تا استان‌هایی با اولویت بالاتر مشخص شود. از طرفی در حال حاضر کاربرد رویکرد هم‌بست با دیدگاه مدیریت آب، غذا و انرژی می‌تواند در جهت بهینه‌سازی سطح زیرکشت این محصول ایدهٔ بعدی در ادامه این پژوهش باشد.

سپاسگزاری

از وزارت جهاد کشاورزی و شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل تأمین داده‌های پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با انجام و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

شهلا دهقانپیر: طراحی ایده، جمع‌آوری و پردازش داده‌ها، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، نگارش مقاله؛ **ام‌البنین بذرافشان:** کنترل و نظارت، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **هادی رمضانی اعتدالی:** کنترل و نظارت، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **ارشک حلی‌ساز:** کنترل و نظارت، مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ **بهنام آبابایی:** مشاوره، بازبینی متن مقاله.

منابع

ابراهیمی محمودی، حسین، پیشوایی، میر سامان، و تیموری، ابراهیم (۱۴۰۰). یک مدل برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای برای آمایش کشت برنج تحت شرایط عدم قطعیت پویا (مورد مطالعه: ایران). چشم‌انداز مدیریت صنعتی. ۱۱(۴۲)، ۱۴۵-۱۷۶. https://doi.org/10.52547/jimp.11.2.145

رضایی، گلناز، خالدیان، محمدرضا، کاوسی کلاشمی، محمد، و رضایی، مجتبی (۱۴۰۰). ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب در استان‌های عمده تولیدکننده برنج در ایران. *آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۳)*، ۶۳۴-۶۴۴. dor:20.1001.1.20087942.1400.15.3.13.7

عبداله‌زاده کهریزی، رحیم، کوکبی‌نژاد مقدم، امیرحسین، معروفی‌نیا، ادریس (۱۴۰۲). بررسی آب مجازی و شاخص بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات زراعی دشت پلدشت. مدل‌سازی و

مدیریت آب و خاک، ۳(۱)، ۵۴-۶۷. doi: 10.22098/ MMWS.2022.11090.1100

بولتن شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، (۱۴۰۰).

بولتن کشاورزی ایران. وزارت جهاد کشاورزی، انتشارات جهاد کشاورزی، تهران، (۱۴۰۰).

وفایی، کامبیز، بذرافشان، ام‌البنین، رمضانی اعتدالی، هادی (۱۳۹۹) تغییرات زمانی و مکانی ردپای اکولوژیکی تجارت آب مجازی در محصول بادام فاریاب و دیم در ایران. *علوم آب و خاک*، ۲۴(۲)، ۲۸۷-۳۰۲. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3933-fa.html

References

Abdollahzadeh Kahrizi, R., Kokabinezhad Moghaddam, A.H., & Merufinia, E. (2022). Investigating virtual water content and physical and economic water productivity indicators in crops (Case study: Moghan irrigation network, Ardabil province). *Water and Soil Management and Modeling*, *3*(1), 54–68. doi: 10.22098/MMWS.2022.11090.1100. [In Persian]

Bagamba, F., Bashaasha, B., Claessens, L., Antle, J., & Economics, R. (2012). Assessing climate change impacts and adaptation strategies for smallholder agricultural systems in Uganda. In: *Assessing Climate Change Impacts and Adaptation Strategies for Smallholder Agricultural Systems in Uganda*, *20*(2), 303–316. http://www.bioline.org.br/pdf?cs12047

Bazrafshan, O., & Dehghanpir, S.H. (2020). Application of water footprint, virtual water trade and water footprint economic value of citrus fruit productions in Hormozgan Province, Iran. *Sustainable Water Resources Management*, *6*(6), 1-10. doi: 10.1007/s40899-020-00473-w

Bazrafshan, O., Zamani, H., Etedali, H.R., & Dehghanpir, S. (2019). Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. *Scientia Horticulturae*, *250*, 344-351. doi: 10.1016/j.scienta.2019.02.069

Cao, X.C., Mengyang, W., Xiangping, G., Yalian, Z., Yan, G., Nan, W., & Weiguang, W. (2017). Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of the Total Environment*, *609*, 587-597. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.191

Cao, X.C., Wu, P.T., Wang, Y.B., & Zhao, X.N. (2014). Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18*(8),3165-3178. doi: 10.5194/hess-18-3165-2014

Cao, X., Huang, X., Huang, H., Liu, J., Guo, X., Wang, W., & She, D. (2018). Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: A study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, *95*, 444-454. doi:10.1016/j.ecolind.2018.07.059

Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, *60*(1), 186-203. doi: 10.1016/j.ecolecon.2005.11.027

Ebrahimi Mahmoudi, H., Pishvaei, M.S., & Teymouri, E. (2021). A two-stage model for rice cultivation preparation considering dynamic uncertainty: A case study in Iran. *Industrial Management Perspective*. *11*(42), 145- 176. doi:10.52547/jimp.11.2.145. [In Persian]

Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., Glotter, M., Flörke, M., Wada, Y., Best, N., Eisner, S., Fekete, B., Folberth, C., Foster, I., Gosling, S., Haddeland , I., Khabarov, N., Ludwig, F., Masaki, Y., Olin, S., Rosenzweig, C., Ruane, A., Satoh, Y., Schmid, E., Stacke, T., Tang, Q., & Wisser, D. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences. *USA* 2014, 111, 3239–3244. doi:10.1073/pnas.1222474110

Falkenmark, M. (2001). The greatest water problem: the inability to link environmental security, water security and food security. *International Journal of Water Resources Development*, *17*(4), 539-554. doi:10.1080/07900620120094073

Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro- scale water scarcity requires micro- scale approaches: Aspects of vulnerability in semi- arid development. Natural resources forum a nations sustainable development journal. 13(4), 258–267. doi: 10.1111/j.14778947.1989.tb00348.x

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). Bioenergy and Food Security. *The BEFS Analytical Framework. FAO:*Rome,Italy.https://www.fao.org/3/i1544e/i1544e00.htm

Fu, H., Chen, Y., Yang, X., Di, J., Xu, M., & Zhang, B. (2019). Water resource potential for large-scale sweet sorghum production as bioenergy feedstock in Northern China. *Science of The Total Environment*, *653*, 758-764. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.402

Gerbens-Leenes, P.W., Mekonnen, M.M., & Hoekstra, A.Y. (2012). The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry*, *1*, 25-36. doi: 10.1016/j.wri.2013.03.001

Gilani, A., Absalan, S., Jalali, S., & Behbahani, L. (2019). The effect of sprinkler irrigation on grain yield, yield components and water use efficiency of rice cultivars under drill-seed cultivation in Khuzestan. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(2),63-73. doi: 10.22055/jise.2017.19659.1409

Hanafiah, M.M., Ghazali, N.F., Harun, S.N., Abdulaali, H., AbdulHasan, M.J., & Kamarudin, M.K.A. (2019). Assessing water scarcity in Malaysia: a case study of rice production. *Desalination and Water Treatment*, *149*, 274-287. doi: 10.5004/dwt.2019.23841

Hoekstra, A.Y., & Chapagain, A.K. (2007). The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecological Economics*, *64*(1), 143-151. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.023

Hoekstra, A.Y., & Hung, P.Q. (2005). Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, *15*(1), 45-56. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004

Hoekstra, A.Y., & Mekonnen, M.M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(9), 3232-3237. doi: 10.1073/pnas.1109936109

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., & Mekonnen, M.M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. *Routledge*. doi: 10.4324/9781849775526

IWR, (2021). Iran Water Resources Management Company, Tehran [In Persian].

Liu, J., Yang, H., Gosling, S.N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., & Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, *5*(6), 545-559. doi:10.1002/2016EF000518

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, *4*(4), 315-328. https://link.springer.com/article/10.1007/s13412-014-0182-z

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socioeconomic drought: challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, *49*(6), 997-1016. doi: 10.1080/00210862.2016.1259286

MAJ, (2021). Iran Agriculture Bulletin. Ministry of Agriculture Jihad, Agriculture Jihad Press, Tehran [In Persian],

Mengran, F., Bin, G., Weijiao, W., Juan, W., Lihua, Z., & Jianlin, W. (2019). Comprehensive assessment of water footprints and water scarcity pressure for main crops in Shandong Province, China. *Sustainability*, *11*(7), 1856. doi: 10.3390/su11071856

Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, *43*(11), 4098-4104. doi: 10.1021/es802423e

Ramazani, A., & Dehghani, M. (2021). Application of trickle irrigation (T-tape) in dry direct-seeded rice (Case study of Lenjan region of Isfahan). Iranian Water Researches Journal, 15(2), 119-127. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10773.html?lang=en

Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F., & Ababaei, B. (2019). Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*, *68*(4),765-777. doi: 10.1002/ird.2362

Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G., & Strzepek, K. (1997). Water futures: assessment of long-range patterns and problems. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Stockholm Environment Institute . https://www.sei.org/publications/water-futures-assessment-long-range-patterns-problems-2/

Rezaei, G., Khaledian, M., Kavoosi-Kalashami, M., & Rezaei, M. (2021). Comparison of water productivity indices and virtual water in major rice producing provinces in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(3), 634-644. dor: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.13.7 [In Persian]

Shekhawat, K., Rathore, S.S., & Chauhan, B.S. (2020). Weed management in dry direct-seeded rice: A review on challenges and opportunities forsustainable rice production. *Agronomy*, *10*(9), 1264. https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1264

Silalertruksa, T., Gheewala, S.H., Mungkung, R., Nilsalab, P., Lecksiwilai, N., & Sawaengsak, W. (2017). Implications of water use and water scarcity footprint for sustainable rice cultivation. *Sustainability*, *9*, 2283. doi: 10.3390/su9122283

Sullivan, C. (2002). Calculating a water poverty index. *World development*, *30*(7), 1195-1210. doi: 10.1016/S0305-750X(02)00035-9

Vafaei, K., Bazrafshan, O., & Ramezanietedali, H. (2020). Spatial and temporal changes of ecological water footprint and virtual water

trade in irrigated and rain-fed almond production at Iran. Journal of water and Soil Science, 24(2), 287–302. [In Persian]. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3933-fa.html

Uma Gowri, M., & Shivakumar, K.M. (2021) . India rice export and virtual water trade. *Journal of Applied and Natural Science*, *13*(SI), 43-46. doi:10.31018/jans.v13iSI.2775

Wang, Y.B., Wu, P.T., Engel, B.A., & Sun, S.K. (2015). Comparison of volumetric and stress-weighted water footprint of grain products in China. *Ecological Indicators*, *48*, 324-333. doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.014

Zhai, Y., Shen, X., Quan, T., Ma, X., Zhang, R., Ji, C., & Hong, J. (2019). Impact-oriented water footprint assessment of wheat production in China. *Science of the Total Environment*, *689*, 90-98. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.262