

Multi-criteria optimization of planting date using green, blue and gray water footprint indices and crop yield (case study of wheat crop in Dez irrigation network)

Mahkameh Mansouri¹, Esfandiar Fateh^{2*}, Amir Aynehband³, Ali Shahbazi⁴

¹PhD student in Agroecology, Department of Production Engineering and Plant Genetic, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

²Assistant professor department of Production Engineering and Plant Genetic, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

³ professor department of Production Engineering and Plant Genetic, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

⁴Deputy Director of Basic Studies of Water Resources, Khuzestan Water and Power Authority (KWPA), Ahvaz, Iran

Corresponding Author's E-mail: e.fateh@scu.ac.ir

Received: 11 May 2025 Accepted: 17 June 2025
Revised: 29 May 2025 Published: 02 Aug. 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This study aimed to optimize wheat planting dates in the Dez irrigation network, Iran, using the water footprint (WF) index to enhance yield and water use efficiency in an arid region. Conducted during the 2023–2024 cropping season, the research utilized data from 51 wheat farms, covering 93,599 hectares, and 30 years of climatic data from Dezful. Planting dates were categorized into early, mid, and late periods, and a multi-objective optimization model (NSGA-II) was applied to maximize yield and green WF while minimizing blue and gray WFs. Results identified November 28, 2023, as the optimal planting date, achieving a yield of 4451 kg/ha, WF_{blue} of 690 m³/t, WF_{green} of 544 m³/t, and WF_{gray} of 675 m³/t. Early planting proved efficient for water use but increased gray WF, highlighting the need for sustainable practices to mitigate environmental impacts.

Keywords: Planting date, Wheat, Water footprint, Optimization, Dez irrigation

Introduction: Water scarcity poses a critical challenge for sustainable agriculture in arid regions like Iran, where agriculture consumes 93–94% of total water resources (Hoekstra, 2017). The Dez irrigation network, one of Iran's largest systems, faces significant water stress, necessitating efficient management strategies. Optimizing planting dates can enhance crop yield while reducing water use, particularly through the water footprint (WF) index, which quantifies green, blue, and gray water components (Hoekstra, 2003). Recent studies emphasize the role of WF in assessing agricultural sustainability (Bazrafshan et al., 2019). This research aimed to optimize wheat planting dates in the Dez irrigation network to maximize yield and green WF while minimizing blue and gray WFs, addressing the urgent need for water-efficient practices in arid climates.

Methodology: This study was conducted in the 2023–2024 cropping season within the Dez irrigation network, covering a net area of 93,599 hectares across 51 wheat farms. A descriptive-survey method was used, with the sample size determined by Cochran's formula. Climatic data (temperature, humidity, wind speed, sunshine hours, and precipitation) were sourced from the Dezful meteorological station (1993–2023). WF components (WF_{blue}, WF_{green}, WF_{gray}) were calculated using standard equations, incorporating effective rainfall, crop evapotranspiration (ET_c), and nitrogen leaching. ET_c was estimated via the FAO Penman-Monteith equation with locally calibrated crop coefficients (K_c) for wheat. Planting dates were grouped into early (November 6–December 6, 2023), mid (December 7, 2023–January 5, 2024), and late (January 6–February 5, 2024). The NSGA-II genetic algorithm and XGBoost models were employed to optimize planting dates, maximizing yield and WF_{green} while minimizing WF_{blue} and WF_{gray}, constrained within November 1, 2023, to February 1, 2024, with penalty functions ensuring Yield > 4500 kg/ha, WF_{blue} < 1400 m³/t, WF_{green} > 500 m³/t, and WF_{gray} < 500 m³/t.

Results and Discussion: The optimization identified November 28, 2023, as the optimal planting date, achieving a yield of 4451 kg/ha, WFblue of 690 m³/t, WFgreen of 544 m³/t, and WFgray of 675 m³/t. Sensitivity analysis showed that earlier planting (November 9, 2023) reduced yield to 3787 kg/ha (-14.9%) and increased WFblue to 1059 m³/t (+53.5%), WFgreen to 936 m³/t (+71.9%), and WFgray to 739 m³/t (+9.6%), while later planting (December 19, 2023) decreased yield to 3635 kg/ha (-18.3%) and increased WFblue to 950 m³/t (+37.8%), WFgreen to 547 m³/t (+0.5%), and WFgray to 752 m³/t (+11.4%). ANOVA confirmed significant differences in total WF and WFgray across planting groups ($p < 0.01$), with early planting outperforming late planting. Compared to Karandish and Šimůnek (2017), who reported higher WFblue in late planting, this study highlights the innovation of integrating WFgray into planting date optimization, offering a sustainable approach for arid regions where water scarcity and environmental impacts are critical (Bazrafshan et al., 2019). These findings underscore the trade-offs between yield, water use, and environmental impacts, advocating for early planting to balance productivity and sustainability

Conclusion: Optimizing wheat planting dates in the Dez irrigation network significantly enhances yield and water use efficiency. Early planting within November 6 to December 6, 2023, particularly on November 28, is recommended to achieve high yields (4451 kg/ha), balanced blue water use (690 m³/t), and green water use (544 m³/t), despite an increased gray WF (675 m³/t). Sustainable practices, such as high-efficiency fertilizers, are essential to mitigate environmental impacts.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بهینه‌سازی چندمعیاره تاریخ کشت با استفاده از شاخص‌های ردپای آب‌های سبز، آبی و خاکستری و عملکرد محصول (مطالعه موردی محصول گندم در شبکه آبیاری دز)

مهکامه منصوری^۱، اسفندیار فاتح^{۲*}، امیر آینه بند^۳، علی شهبازی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۳ استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۴ معاون مطالعات پایه منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان (KWPA)، اهواز، ایران.

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: e.fateh@scu.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

چکیده: بهینه‌سازی تاریخ کاشت گندم در شبکه آبیاری دز با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II و مدل‌های پیش‌بینی XGBoost انجام شد. اهداف این پژوهش شامل بهینه‌کردن عملکرد گندم و ردپای آب سبز و کمینه‌کردن ردپای آب آبی و خاکستری بود. داده‌های مزارع گندم از شبکه دز جمع‌آوری و تحلیل شدند. نتایج اهمیت تاریخ کشت بهینه را برای مدیریت پایدار منابع آب نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت نشان داد که کاشت زودتر (۹ نوامبر ۲۰۲۳، ۱۸ آبان ۱۴۰۲) عملکرد را ۱۴/۹ درصد کاهش داد و به ۳۷۸۷ کیلوگرم بر هکتار رساند؛ درحالی‌که کاشت دیر هنگام (۱۹ دسامبر ۲۰۲۳، ۲۸ آذر ۱۴۰۲) عملکرد را ۱۸/۳ درصد کاهش داد و به ۳۶۳۵ کیلوگرم بر هکتار رساند؛ همچنین، کاشت زودهنگام ردپای آب آبی را ۵۳/۵ درصد افزایش داد (به ۱۰۵۹ مترمکعب بر تن)؛ درحالی‌که کاشت دیر هنگام آن را ۳۷/۸ درصد افزایش داد (به ۹۵۰ مترمکعب بر تن). این یافته‌ها اهمیت انتخاب تاریخ کاشت بهینه را برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تاریخ کاشت، گندم، ردپای آب، بهینه‌سازی، آبیاری دز

۱- مقدمه

تعرق به جو بازمی‌گردد. طبق گزارش‌های مؤسسه تحقیقات مدیریت آب و خاک کشور، مصرف آب در بخش کشاورزی در کشورهای درحال توسعه به حدود ۹۰ درصد می‌رسد؛ درحالی‌که این رقم در ایران بین ۹۳ تا ۹۴ درصد

براساس بیلان منابع آبی در کشور، از متوسط بارش ۲۵۳ میلی‌متر در سال، حدود ۴۱۷ میلیارد مترمکعب آب حاصل می‌شود (Hoekstra, 2017). از این مقدار، حدود ۲۹۶ میلیارد مترمکعب (معادل ۷۱ درصد) به صورت تبخیر و

عوامل مختلفی مانند مدیریت زراعی، اقلیم و عملیات کشاورزی نظیر آبیاری و کوددهی می‌توانند بر ردپای آب تاثیرگذار باشند (Rodriguez et al., 2015; Chukalla et al., 2015). یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش ردپای آب، بهینه‌سازی تاریخ کشت محصولات کشاورزی است. انتخاب تاریخ مناسب کشت می‌تواند علاوه بر افزایش عملکرد، به کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری کمک کند.

کشاورزی یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در کشورهایی با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است. در این کشور، که با بحران آب مواجه است، بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از عوامل کلیدی در مدیریت مصرف آب در کشاورزی، تعیین تاریخ کاشت مناسب برای محصولات زراعی است. گندم؛ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی، در بسیاری از مناطق ایران کشت می‌شود و تاریخ کاشت آن تأثیر زیادی بر مصرف منابع آبی و عملکرد محصول دارد.

شبکه آبیاری دز، یکی از بزرگ‌ترین شبکه‌های آبیاری مدرن در ایران، مساحت وسیعی از اراضی کشاورزی را تحت پوشش دارد. با توجه به محدودیت منابع آبی، بهینه‌سازی تاریخ کاشت گندم در این شبکه می‌تواند نقش مهمی در بهبود مصرف آب و افزایش عملکرد محصول ایفا کند. بنابراین، هدف این تحقیق بررسی و بهینه‌سازی تاریخ‌های کاشت گندم در محدوده شبکه آبیاری دز با استفاده از شاخص ردپای آب و الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II است تا عملکرد و ردپای آب سبز بیشینه و ردپای آب آبی و خاکستری کمینه شود.

۲- روش‌شناسی

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی و بهینه‌سازی اثر تاریخ‌های کشت متداول گندم در محدوده شبکه آبیاری دز با استفاده از شاخص ردپای آب، در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در اراضی این شبکه انجام شد. شبکه آبیاری دز یکی از وسیع‌ترین و قدیمی‌ترین شبکه‌های آبیاری مدرن کشور است. مساحت ناخالص اراضی تحت پوشش این شبکه حدود

گزارش شده است (Aligholnia et al, 2016). این ارقام نشان‌دهنده سوءبرداشت و مصرف غیر بهینه آب در بخش کشاورزی است (Gleick, 2003). به‌گونه‌ای که اگر تنها ۱۰ درصد از مصرف آب در این بخش کاهش یابد، میزان آب ذخیره‌شده معادل مصرف آب در بخش شرب و صنعت خواهد بود.

در راستای حل این بحران، راه‌کارهای مختلفی جهت افزایش کارایی مصرف آب و بهبود بهره‌وری مطرح شده‌اند. یکی از این راه‌کارها، تجارت بین‌المللی محصولات کشاورزی به‌عنوان ابزاری برای بهبود کارایی جهانی مصرف آب است (Dalín et al., 2014). به‌طور کلی، آب مصرفی در فرآیند تولید محصولات کشاورزی به‌عنوان آب مجازی شناخته می‌شود. انتقال این آب مجازی از طریق تجارت محصولات می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی استراتژیک برای افزایش دسترسی به منابع آب در مناطقی با محدودیت آب مورد استفاده قرار گیرد (Mubako, 2011).

در این میان، مفهوم "ردپای آب" به‌عنوان یک روش برای ارزیابی استفاده از آب در سیستم‌های تولید، توسط هوکسترا در سال ۲۰۰۳ معرفی شد. ردپای آب از سه بخش اصلی تشکیل می‌شود: آب آبی (حجم آب مصرفی از منابع قابل استحصال)، آب سبز (سهم بارندگی در تأمین نیاز آبی گیاهان) و آب خاکستری (حجم آب مورد نیاز برای رقیق‌سازی آلودگی‌ها) (Hoekstra & Chapagain, 2007). براساس تحقیقات هوکسترا و هانگ (۲۰۰۵)، شاخص ردپای آب در ایران برای هر نفر در سال به‌طور میانگین ۱۴۵۷ مترمکعب است که نشان‌دهنده وابستگی بالای کشور به منابع آبی داخلی است.

همچنین، نتایج تحقیقات مختلف نشان‌دهنده این است که ردپای آب برای تولید گندم در ایران و دیگر کشورهای خشک و نیمه‌خشک بالاست. برای مثال، تحقیق کاراندیش و سیمونک (۲۰۱۸) نشان داده که در پنج استان ایران، ردپای آب گندم از ظرفیت منابع آبی تجدیدپذیر فراتر رفته است. این موضوع بر لزوم بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی تاکید دارد.

در دزفول طی ۲۰۲۳-۱۹۹۳) کالیبره شد. کالیبراسیون با مقایسه داده‌های مزرعه‌ای و مدل CROPWAT انجام شد تا خطای پیش‌بینی ETC به کمتر از ۵٪ برسد. (معادله (۶):

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.3u_2)} \quad (6)$$

که در آن:

(Rn): تابش خالص (MJm²day⁻¹)

(G): شار گرمای خاک (MJm²day⁻¹)

(γ): ثابت روان‌پذیری (kPa°C⁻¹)

(T): دمای هوا (°C)

(u₂): سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (ms⁻¹)

(e_s و e_a): اختلاف فشار بخار اشباع و واقعی (kPa)

(Δ): شیب منحنی فشار بخار (kPa°C⁻¹)

ضریب گیاهی (Kc): مقادیر ضریب گیاهی برای مراحل مختلف رشد گیاهان زراعی، توسط سازمان جهانی خواربار کشاورزی فائو در نشریه شماره ۵۶ ارائه شده است. باین‌حال، این مقادیر براساس داده‌های محلی، شامل تاریخ‌های کاشت و برداشت، و پارامترهای اقلیمی منطقه برای گیاه گندم در دوره آماری ۳۰ ساله، اصلاح و تعدیل شدند.

در این مطالعه، ۵۱ مزرعه در محدوده شبکه آبیاری دز بررسی شدند. تاریخ‌های کاشت این مزارع در سه بازه زمانی دسته‌بندی شدند:

کاشت زود هنگام: ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر

کاشت تأخیری: ۱۶ آذر تا ۱۵ دی

کاشت دیر هنگام: ۱۶ دی تا ۱۵ بهمن

خلاصه‌ای از آمار کشت برخی مزارع در [جدول ۳](#) ارائه شده است.

۲-۴- مراحل رشد

مراحل رشد گندم با پایش میدانی، شمارش نمونه‌ها و تطبیق با Growing Degree Days (GDD) تعیین شد

$$GDD = \sum \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \quad (7)$$

$$WF_{Green} = \frac{P_e \times 10}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{Blue} = \frac{ET_c \times P_e \times 10}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{gray} = \left(\alpha \times \frac{NAR}{C_{max} - C_{Nat}} \right) \times \frac{1}{Y} \quad (4)$$

که در آن:

WF_{Green}: رد پای آب سبز (m³ton⁻¹)

WF_{Blue}: رد پای آب آبی (m³ton⁻¹)

WF_{gray}: رد پای آب خاکستری (m³ton⁻¹)

(P_e): بارندگی مؤثر (mm)

(ET_c): تبخیر و تعرق گیاه (mm)

(Y): عملکرد محصول (تن بر هکتار)

(α): درصد تلفات کودی نیتروژن

(NAR): نرخ کاربرد نیتروژن (kg ha⁻¹)

(C_{max}): غلظت بحرانی نیتروژن (kgm⁻³)

(C_{Nat}): غلظت طبیعی نیتروژن در آب (kgm⁻³)

فاکتور ۱۰: تبدیل واحد از میلی‌متر به مترمکعب در ۱۰ هکتار

۲-۳- محاسبه ETC

تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_c = E_{to} \times K_c \quad (5)$$

که در آن: K_c ضریب گیاهی، E_{to} تبخیر و تعرق گیاه مرجع است و برای محاسبه آن از معادله فائو پنمن-مانتیت است (Allen et al., 1998) استفاده شد مقادیر (K_c) برای مراحل مختلف رشد گندم (ابتدایی: ۰/۷، میانی: ۱/۱۵ و پایانی: ۰/۴) براساس نشریه FAO-56 تعیین و با داده‌های محلی (دمای روزانه، طول فصل رشد، و مراحل فنولوژیکی گندم

جدول ۳ خلاصه آمار کشت برخی از مزارع منتخب در تحقیق حاضر

Table 3 Summary of cultivation information of some selected farms in the present study

Farm	Planting date (dd.mm.yy)	Planting date (dd.mm.yy)	Planting Type	Stages				Total
				Germ.	Veg.	Flower.	Ripen	
				Duration(day)				
1	18.1.24	17.5.24	Late	12	24	54	30	120
2	14.12.23	17.5.24	Mid	16	30	70	39	155
3	15.12.23	20.5.24	Mid	16	31	71	39	157
4	14.1.24	20.5.24	Late	13	25	57	32	127
5	19.11.23	17.5.24	Early	18	36	81	45	180
6	14.12.23	8.5.24	Mid	15	29	66	36	146
7	22.12.23	19.5.24	Mid	15	30	67	37	149
8	19.1.24	24.5.24	Late	12	25	57	32	126
9	14.12.23	8.5.24	Mid	15	29	66	37	146
10	13.1.24	19.5.24	Late	13	25	57	32	127
11	14.12.23	7.5.24	Mid	15	29	65	36	145
12	19.11.23	9.5.24	Early	17	35	77	43	172
13	14.12.23	7.5.24	Mid	15	29	65	36	145
14	27.1.24	12.5.24	Late	11	20	48	27	106
15	14.12.23	13.5.24	Mid	15	30	68	38	151
16	19.11.23	12.5.24	Early	17	35	79	44	175
17	14.1.24	19.5.24	Late	12	25	57	32	126
18	14.12.23	13.5.24	Mid	15	30	68	38	151
19	16.1.24	18.5.24	Late	12	25	55	31	123
20	22.12.23	19.5.24	Mid	15	30	67	37	149
21	19.11.23	10.5.24	Early	17	35	78	43	173
22	14.12.23	14.5.24	Mid	15	30	68	39	152
23	14.12.23	14.5.24	Mid	15	30	68	38	152
24	27.1.24	21.5.24	Late	12	23	51	29	115

می‌کند. در این مطالعه، یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای شناسایی تاریخ کاشت مناسب طراحی شد که بتواند عملکرد گندم و ردپای آب سبز را بیشینه کرده و ردپای آب آبی را کمینه کند. مسئله بهینه‌سازی به صورت یک مدل چندهدفه با اهداف زیر تعریف شد:

Maximize: Yield=f (P.Date)

Maximize: WFgreen=g (P.Date)

Minimize: WFblue=h (P.Date)

Minimize: WFgray=i (P.Date)

که در آن P. Date تاریخ کاشت و f، g، h و i توابع

که در آن:

T_{max} : دمای بیشینه روزانه

T_{min} : دمای کمینه روزانه

T_{base} : دمای پایه یا آستانه‌ای که زیر آن رشد گیاه متوقف

می‌شود.

۲-۵- مدل‌سازی و بهینه‌سازی تاریخ کشت براساس

شاخص ردپای آب با نرم‌افزار R:

انتخاب تاریخ کاشت مناسب برای گندم نقش کلیدی در

بهبود عملکرد محصول و مدیریت پایدار منابع آب ایفا

مدل‌سازی با XGBoost

چهار مدل XGBoost برای پیش‌بینی عملکرد، ردپای آب آبی، و ردپای آب سبز آموزش داده شدند. ویژگی‌های ورودی شامل روز سال، باران مؤثر، مدت‌زمان رشد، ماه، سال، روز، و مقادیر ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری بودند. مدل‌ها با استفاده از ۲۰۰ دور آموزشی بهینه شدند.

بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA-II

برای بهینه‌سازی تاریخ کاشت در بازه ۱۰ آبان تا ۱۲ بهمن ۱۴۰۲ (۱ نوامبر ۲۰۲۳ تا ۱ فوریه ۲۰۲۴) اجرا شد.

استخراج جبهه پارتو و نقاط بهینه: جبهه پارتو شامل مجموعه‌ای از نقاط بهینه تولید شد که تعادل بین اهداف را نشان می‌داد. معیارهای بهینه ($Yield > 4500$ ، $WFblue < 1400$ ، $WFgreen > 500$ ، $WFgray < 500$) برای انتخاب نقاط بهینه اعمال شد، اما در صورت عدم وجود نقاط مطابق با معیارها، ۵ نقطه با کمترین فاصله از مقادیر ایده‌آل ($Yield = 5200$ ، $WFblue = 1300$ ، $WFgreen = 650$) برگزیده شدند و سرانجام یکی از اهداف به‌عنوان برترین هدف انتخاب شد.

۳- نتایج و بحث

برای بررسی تفاوت‌های آماری بین تاریخ‌های مختلف کاشت گندم (کاشت زودهنگام، کاشت تأخیری، کاشت دیرهنگام) از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد. این تحلیل به‌منظور ارزیابی این موضوع انجام گرفت که آیا تفاوت‌های مشاهده‌شده در ردپای آب میان این گروه‌ها از نظر آماری معنی‌دار است یا خیر. در ادامه، نتایج تحلیل برای هر یک از اجزای ردپای آب (سبز، آبی، خاکستری) و کل به‌تفصیل ارائه می‌شود.

۳-۱- ردپای آب سبز:

نتایج آزمون ANOVA نشان داد که تفاوت در مصرف آب سبز بین تاریخ‌های مختلف کاشت در سطح ۵ درصد معنی‌دار است ($P=0/018$) (جدول ۴). این یافته بیانگر آن است که احتمال وقوع تصادفی این تفاوت‌ها بسیار کم بوده

پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های XGBoost هستند.

متغیر تصمیم، تاریخ کاشت، به‌صورت پیوسته در بازه زمانی ۱۵ آبان تا ۱۵ بهمن تعریف شد. این بازه براساس الگوهای رایج کشت گندم در شبکه آبیاری دز انتخاب گردید.

برای بهینه‌سازی تاریخ کاشت گندم در شبکه آبیاری دز، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II و مدل‌های پیش‌بینی XGBoost استفاده شد. برای بهینه‌سازی تاریخ کاشت، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II استفاده شد. تنظیمات الگوریتم شامل اندازه جمعیت ۱۰۰، تعداد نسل ۲۰۰، نرخ تقاطع ۰.۹، و نرخ جهش ۰/۱ بود. مدل‌های XGBoost برای پیش‌بینی عملکرد، WFblue، WFgreen، و WFgray با ۲۰۰ دور آموزشی و نرخ یادگیری ۰/۰۱ بهینه شدند. اهداف این بهینه‌سازی شامل بیشینه کردن عملکرد گندم و ردپای آب سبز و کمینه کردن ردپای آب آبی بود. مراحل انجام کار به شرح زیر بود:

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های مزارع گندم از شبکه آبیاری دز شامل تاریخ کاشت، تاریخ برداشت، باران مؤثر، عملکرد، ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری جمع‌آوری شد. داده‌ها از یک پرونجا اکسل به‌صورت دستی بارگذاری شدند و فقط مزارع گندم برای تحلیل انتخاب شدند. متغیرهای اضافی مانند روز سال (DOY) و مدت‌زمان رشد (CropDuration) محاسبه و به داده‌ها اضافه شدند. گروه‌بندی تاریخ کاشت (کاشت زودهنگام، تأخیری، کاشت دیرهنگام) از فایل اکسل استخراج شد، که براساس بازه‌های استاندارد منطقه شامل کاشت زودهنگام (۶ نوامبر تا ۶ دسامبر ۲۰۲۳، ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر ۱۴۰۲)، کاشت تأخیری (۷ دسامبر ۲۰۲۳ تا ۵ ژانویه ۲۰۲۴، ۱۶ آذر تا ۱۵ دی ۱۴۰۲)، و کاشت دیرهنگام (۶ ژانویه تا ۵ فوریه ۲۰۲۴، ۱۶ دی تا ۱۶ بهمن ۱۴۰۲) تعریف شده بود.

تحلیل آماری اولیه

برای بررسی اهمیت ردپای آب سبز، آبی و خاکستری در گروه‌های مختلف کاشت، تحلیل واریانس انجام شد.

جدول ۴ تجزیه واریانس ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و کل در گندم

Table 4 Analysis of variance of green, blue, gray and total water footprints in wheat

Variable	Source	df	Sum of Squares (SS)	Mean Squares (MS)	F-value	Pr (>F)
WFgreen	Between Groups	2	197080.9	98540.5	7.22	0.0018*
WFgreen	Within Groups	48	654922.6	13644.2	-	-
WFgreen	Total	50	852003.5	-	-	-
WFblue	Between Groups	2	2282982	1141491	21.03	2.76e-07**
WFblue	Within Groups	48	2605343	54278.0	-	-
WFblue	Total	50	4888325	-	-	-
WFgray	Between Groups	2	162996.8	81498.4	6.26	0.003*
WFgray	Within Groups	48	625372.6	13028.6	-	-
WFgray	Total	50	788369.4	-	-	-
WFTotal	Between Groups	2	3675397	1837698	8.88	0.0005**
WFTotal	Within Groups	48	9932386	206924.7	-	-
WFTotal	Total	50	13607783	-	-	-

**Signification in 0.01, * Signification in 0.05

است. این نتایج نشان می‌دهد که تاریخ کاشت می‌تواند بهینه‌سازی مصرف آب سبز را تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۲- ردپای آب آبی

نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن است که تفاوت در ردپای آب آبی بین تاریخ‌های کاشت در سطح ۱ درصد بسیار معنی‌دار است (جدول ۴). این نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه تاریخ کاشت بر مصرف آب آبی است. مقایسه میانگین‌ها با آزمون Tukey (جدول ۶) نشان داد که گروه کاشت دیرهنگام به‌طور معنی‌داری رد پای آبی بیشتری نسبت به کاشت زودهنگام (۵۰۳/۴۰۵ مترمکعب بر تن)، و کاشت تأخیری (۴۶۲/۲۸۲ مترمکعب بر تن) داشته است. اما بین گروه‌های کاشت تأخیری و کاشت زودهنگام تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. میانگین رد پای آبی در گروه کاشت دیرهنگام ۱۰۸۹ مترمکعب بر تن و در گروه کاشت زودهنگام ۵۸۵ مترمکعب بر تن بود (جدول ۹). این اختلاف به دلیل تبخیر و تعرق بالاتر و کاهش بارندگی در دوره است.

جدول ۵ مقایسه میانگین توکی برای ردپای آب سبز

Table 5 Tukey mean comparison for green water footprint

Comparison.	diff	lwr	upr	p adj
Early-Late	118	15	220	0.02*
Mid-Late	-16.2	-120	83	0.92
Early-Mid	-134	-228	-40	0.00

**Signification in 0.01, *Signification in 0.05

و تاریخ کاشت تأثیر قابل‌توجهی بر میزان آب سبز مصرفی داشته است. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون Tukey (جدول ۵) نشان داد که گروه کاشت زودهنگام به‌طور میانگین ۱۱۷/۸۳ مترمکعب بر تن آب سبز بیشتری نسبت به گروه کاشت دیرهنگام مصرف کرده است (P=۰/۰۲۱۲)، که احتمالاً به دلیل بهره‌مندی از بارندگی بیشتر در ابتدای فصل رشد است.

همچنین، گروه کشت دیرهنگام نسبت به کشت زودهنگام ۱۳۴/۰۲ مترمکعب بر تن آب سبز کمتری مصرف کرده است (P=۰/۰۰۳۳)، اما بین گروه‌های کشت دیرهنگام و کشت خیلی دیر تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (P=۰/۹۲۴). با توجه به بازه اطمینان، تفاوت واقعی میانگین ردپای آب سبز بین گروه‌های کشت دیرهنگام و کشت دیرهنگام ۱۴/۹۶ تا ۲۲۰/۶۹ مترمکعب بر تن است. این نتایج نشان می‌دهد که تاریخ کاشت می‌تواند بهینه‌سازی مصرف آب سبز را تحت تأثیر قرار دهد.

مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی (جدول ۲) نشان داد که گروه کاشت زودهنگام به‌طور میانگین ۱۱۷/۸۳ مترمکعب بر تن آب سبز بیشتری نسبت به گروه کاشت دیرهنگام مصرف کرده است (P=۰/۰۲۱) که احتمالاً به دلیل بهره‌مندی از بارندگی بیشتر در ابتدای فصل رشد است. با توجه به بازه اطمینان ۹۹ درصد، تفاوت واقعی میانگین ردپای آب سبز بین گروه‌های کاشت تأخیری و کاشت زودهنگام بین ۱۴/۹۸ تا ۲۲۰/۶۹ مترمکعب بر تن

۳-۶- بهینه یابی تاریخ کشت گندم براساس شاخص

ردپای آب با استفاده مدل برنامه ریزی ریاضی

بهبودسازی تاریخ کاشت گندم با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II و مدل های پیش بینی XGBoost انجام شد. هدف این بهینه سازی بیشینه کردن عملکرد گندم (Yield) و ردپای آب سبز و کمینه کردن ردپای آب آبی بود.

عملکرد (Yield): ۴۴۵۱ کیلوگرم بر هکتار

ردپای آب سبز (WFgreen): ۵۴۴ مترمکعب بر تن

ردپای آب آبی (Wfblue): ۶۹۰ مترمکعب بر تن

ردپای آب خاکستری (WFgray): ۶۷۵/۰ مترمکعب بر تن

جدول ۶ مقایسه میانگین (آزمون Tukey's HSD) برای ردپای آب آبی

Table 6 Average comparison (Tukeys HSD test) for Wfblue

Comparison	diff	lwr	upr	p adj
Early-Late	-503	-708	-298.3	**9.8E-07
Mid-Late	-462	-670	-255	**6.44E-06
Mid-Early	41	-146	228	0.856454

**Signification in 0.01

جدول ۷ مقایسه میانگین آزمون توکی برای ردپای آب خاکستری

Table 7 Average comparison (Tukeys HSD test) for Wfgray

Comparison	diff	lwr	upr	p adj
Early-Late	-197	-320	-74.2	0.0**
Mid-Late	-217	-341	-92.79	0.0**
Mid-Early	-20	-132	92.15	0.90

**Signification in 0.01

جدول ۸ مقایسه میانگین آزمون توکی برای ردپای آب کل

Table 8 Tukey test means comparison for total water footprint

Comparison	diff	lwr	upr	p adj
Early-Late	-583	-958	-208	0.00**
Mid-Late	-695	-1074	-316	0.00**
Mid-Early	-112.4	-455	230.	0.708

**Signification in 0.01

با توجه به کمبود منابع آبی، بهینه سازی تاریخ کاشت برای کاهش ردپای آبی ضروری به نظر می رسد (Allen et al., 2011).

۳-۳- ردپای آب خاکستری

ردپای آب خاکستری به عنوان شاخصی برای ارزیابی اثرات زیست محیطی کودهای شیمیایی استفاده می شود (Hoekstra, 2017; Hoekstra & Chapagain, 2008). نتایج ANOVA نشان داد که تاریخ کاشت تأثیر معنی داری بر ردپای آب خاکستری دارد (**جدول ۴**). آزمون Tukey (**جدول ۷**) حاکی از آن است که گروه کاشت دیرهنگام ردپای آب خاکستری بیشتری نسبت به کاشت زودهنگام (۱۹۶/۸۹۵ مترمکعب بر تن) و کاشت تأخیری (۲۱۶/۷۷۸ مترمکعب بر تن)، داشته است. اما بین کاشت زودهنگام و کاشت تأخیری تفاوت معنی داری مشاهده نشد.

۳-۴- ردپای آب کل (WFTotal):

نتایج ANOVA نشان داد که تفاوت در ردپای آب کل بین گروه های کاشت در سطح ۱ درصد معنی دار است (**جدول ۴**). آزمون Tukey (**جدول ۸**) نشان داد که گروه کاشت خیلی دیر ردپای آب کل بیشتری نسبت به کاشت زودهنگام (۵۸۲/۵۹۹ مترمکعب بر تن) و کاشت دیرهنگام (۶۹۵/۰۶۴ مترمکعب بر تن) داشته است، اما بین کاشت زودهنگام و دیرهنگام تفاوت معنی داری وجود نداشت.

۳-۵-۳- روند تغییرات ردپای آب

گروه کاشت دیرهنگام بیشترین ردپای آب آبی و کمترین ردپای آب سبز را نشان داد، در حالی که گروه کاشت زودهنگام برعکس بود (نمودار ۱). این تفاوت به دلیل بارندگی بیشتر در ابتدای فصل رشد است. کمترین ردپای آب خاکستری در گروه کاشت زودهنگام مشاهده شد، که ممکن است به دلیل دوره رشد طولانی تر و مصرف بهینه تر کود باشد. پراکنش بارندگی در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ نشان داد که بارشها در ابتدا و انتهای فصل رشد بیشتر بوده و ممکن است کشاورزان را به پس کاشت ترغیب کرده باشد (نمودار ۲).

این نقطه به‌عنوان تاریخ پایه برای تحلیل حساسیت انتخاب شد تا تأثیر تغییرات تاریخ کاشت بررسی شود. اگرچه این نتایج با معیارهای ایده‌آل (WFgray, Yield > 4500 kg/ha) $500 \text{ m}^3/\text{t}$ کاملاً مطابقت ندارند، این نقطه به دلیل محدودیت‌های اقلیمی (بارندگی محدود) و خاک (نیترژن بالا) به‌عنوان بهترین تعادل بین اهداف انتخاب شد. جبهه پارتو نشان داد که دستیابی به $500 \text{ m}^3/\text{t}$ WFgray بدون کاهش شدید عملکرد ممکن نبود.

۷-۳- تحلیل حساسیت تاریخ کاشت:

تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر تغییرات تاریخ کاشت در بازه‌های ± 5 ، ± 10 ، ± 15 ، و ± 20 روز نسبت به تاریخ پایه ۲۸ نوامبر ۲۰۲۳ انجام شد (جدول ۱۰). نتایج نشان داد که کاشت زود هنگام‌تر در بازه ± 20 روز (۲۸ نوامبر ۲۰۲۳، ۱۸ آبان ۱۴۰۲) عملکرد را ۱۴/۹۱ درصد کاهش داد و به ۳۷۸۷/۴ کیلوگرم بر هکتار رساند، در حالی که کاشت دیر هنگام در همین بازه (۱۹ دسامبر ۲۰۲۳، ۲۸ آذر ۱۴۰۲) عملکرد را ۱۸/۳۲ درصد کاهش داد و به ۳۶۳۵/۳ کیلوگرم بر هکتار رساند. همچنین، کاشت زود هنگام مصرف آب آبی را ۵۳/۵۳ درصد افزایش داد (به ۱۰۵۸/۸ مترمکعب بر تن) نسبت به تاریخ پایه (۶۸۹/۷ مترمکعب بر تن)، در حالی که کاشت دیر هنگام مصرف آب را ۳۷/۷۹ درصد افزایش داد (۹۵۰/۳ مترمکعب بر تن). رد پای آب سبز در کاشت زود هنگام به ۹۳۵/۹ درصد مترمکعب بر تن (۷۱/۹۲ درصد افزایش) و در کاشت دیر هنگام به ۵۴۷/۱ مترمکعب بر تن (۰/۵ درصد افزایش) رسید. رد پای آب خاکستری در کاشت زود هنگام به ۷۳۹/۳ مترمکعب بر تن (۹/۵۶ درصد افزایش) و در کاشت دیر هنگام به ۷۵۱/۷ مترمکعب بر تن (۱۱/۳۹ درصد افزایش) رسید. نتایج تحلیل حساسیت در بازه‌های کوچک‌تر (± 5 ، ± 10 ، و ± 15 روز) نشان داد که تغییرات عملکرد و رد پای آب کمتر است. به‌عنوان مثال، در بازه ± 5 روز، کاشت زود هنگام‌تر (۲۴ نوامبر ۲۰۲۳) عملکرد را ۲/۱۶ درصد کاهش داد، اما رد پای آب تغییر نکرد، در حالی که کاشت دیر هنگام (۴ دسامبر ۲۰۲۳) عملکرد را ۱۵/۱۱ درصد کاهش داد و رد پای آب را به‌شدت افزایش داد.

جدول ۹ میانگین هر یک از ردپاهای آب براساس تاریخ کشت در گندم

Table 9 Average of each water footprint based on planting date in wheat

Type	Sample No.	WFGreen m ³ /ton	WFGray m ³ /ton	WFblue m ³ /ton	TWF m ³ /ton
Early	19	643	567	585	1786
Mid	18	500	547	626	1673
Late	13	515	764	1089	2368

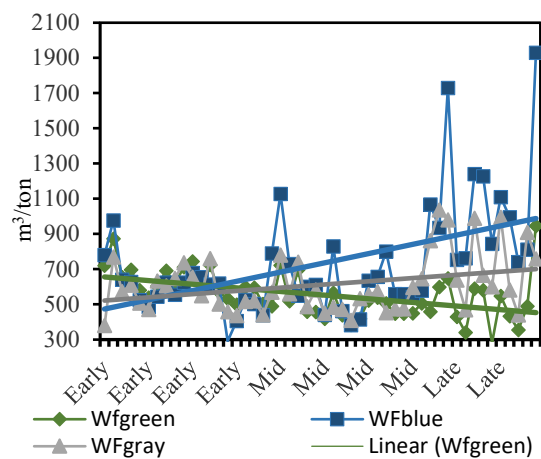


Fig. 2 Trends in changes in green, blue, and gray water footprints over the history of different crops

شکل ۲ روند تغییرات رد پای آب سبز، آبی و خاکستری در تاریخ کشت‌های مختلف در تاریخ کشت‌های مختلف

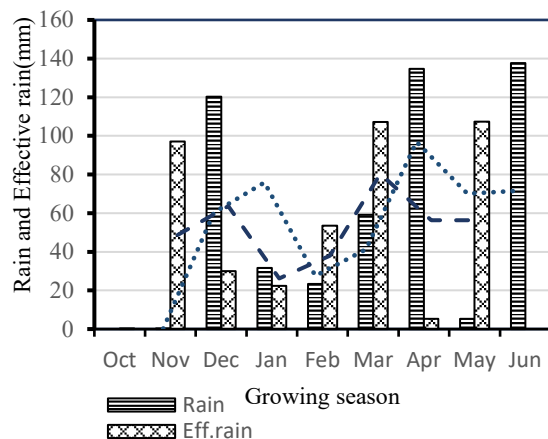


Fig. 3 Rainfall distribution during the wheat growing season in the year 2023-2024

شکل ۳ پراکنش بارندگی در طول فصل کشت گندم در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳

جدول ۱۰ تحلیل حساسیت تاریخ کاشت بهینه گندم در شبکه آبیاری دز
 Table 10 Sensitivity analysis of optimal wheat planting date in the Dez network

Renge	Date	Yield (kg/ha)		WFblue (m ³ /t)		WFgreen (m ³ /t)		WFgray (m ³ /t)	
		Yield	Change (%)	WFblue	Change (%)	WFgreen	Change (%)	WFgray	Change (%)
-20	Nov 9, 2023	3787	-14.9	1059	53.5	936	71.9	739	9.6
-15	Nov 14, 2023	4449	0.0	564	-18.2	522	-4.1	627	-7.1
-10	Nov 19, 2023	4180	-6.1	564	-18.2	535	-1.7	627	-7.1
-5	Nov 24, 2023	4355	-2.2	690	0.0	544	0.0	675	0.0
Base Date	Nov 28, 2023	4451	0.0	690	0.0	544	0.0	675	0.0
+5	Dec 4, 2023	3778	-15.1	1059	53.5	944	73.3	778	15.3
+10	Dec 9, 2023	3778	-15.1	1059	53.5	944	73.3	778	15.3
+15	Dec 14, 2023	4440	-0.2	645	-6.5	530	-2.7	676	0.1
+20	Dec 19, 2023	3635	-18.3	950	37.8	547	0.5	752	11.4

افزایش می‌دهد، که اهمیت رعایت دقیق تاریخ کاشت بهینه را برای مدیریت پایدار منابع آب و بهره‌وری محصول برجسته می‌کند. با این حال، افزایش ردپای آب خاکستری (۶۷۵ مترمکعب بر تن) نیاز به شیوه‌های پایدار مانند کودهای کارآمد را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ضروری می‌سازد.

۵- پیشنهادها

به نظر می‌رسد کاشت زود هنگام ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر تعادل بهتری بین عملکرد محصول و مصرف آب شبکه آبیاری دز ایجاد می‌کند. تاریخ ۲۸ آبان ۱۴۰۲ به عنوان مرجع پیشنهاد می‌شود. به هر حال، با توجه به افزایش ردپای آب خاکستری در کاشت زود هنگام، استفاده از کودهای با کارایی بالا ضروری است.

در این پژوهش، خاک و ارقام گندم در مزارع شبکه دز یکنواخت در نظر گرفته شد؛ اما تنوع خاک (مانند بافت یا ظرفیت نگهداری آب) و ارقام گندم (با نیازهای آبی متفاوت) می‌توانند بر عملکرد و ردپای آب اثرگذارند. همچنین، تغییرات اقلیمی سالانه ممکن است تاریخ کاشت بهینه را تغییر دهد؛ از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی اثر این عوامل بررسی شود.

در بازه ± 15 روز، کاشت زود هنگام تر (۱۴ نوامبر ۲۰۲۳) کمترین تأثیر را بر عملکرد داشت (۰/۰۳ درصد کاهش) و مصرف آب آبی و ردپای آب خاکستری را به ترتیب ۱۸/۱۷ و ۷/۰۶ درصد کاهش داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاشت زود هنگام تر در بازه‌های محدود می‌تواند تعادل بهتری بین اهداف برقرار کند، اما کاشت دیر هنگام به‌طور کلی برای عملکرد و مدیریت منابع آبی مناسب نیست. تاریخ پیشنهادی ۲۸ نوامبر ۲۰۲۳ (در بازه کاشت زود هنگام) به عنوان مرجع، تعادل مناسبی بین اهداف ارائه داد.

۴- نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی تاریخ کاشت گندم در "شبکه آبیاری دز" نشان داد که کاشت زود هنگام در بازه ۱۵ آبان تا ۱۵ آذر ۱۴۰۲ (۶ نوامبر تا ۶ دسامبر ۲۰۲۳)؛ به‌ویژه در ۷ آذر (۲۸ نوامبر)، با عملکرد ۴۴۵۱ کیلوگرم بر هکتار، ردپای آب آبی ۶۹۰ مترمکعب بر تن، و ردپای آب سبز ۵۴۴ مترمکعب بر تن، تعادل مطلوبی بین بهره‌وری و مصرف آب ایجاد می‌کند. تحلیل حساسیت نشان داد که انحراف از تاریخ بهینه، مانند کاشت زود هنگام تر در ۱۸ آبان (۹ نوامبر) یا دیر هنگام در ۲۸ آذر (۱۹ دسامبر)، به ترتیب عملکرد را ۱۴/۹ و ۱۸/۳ درصد کاهش می‌دهد و ردپای آب آبی را تا ۵۳/۵ درصد

6- List of symbols

C_{max} (kgm ⁻³)	Maximum concentration of nitrogen in water, typically used in water quality studies.
C_{nat} (kgm ⁻³)	Natural concentration of nitrogen in water, representing baseline levels without human influence.
D	Permissible error amount
ET_0	Reference evapotranspiration for a reference crop, calculated using standard methods (e.g., Penman-Monteith).
ET_c	Crop evapotranspiration, adjusted for specific crop characteristics.
es (kPa)	Saturation vapor pressure of air, used in evapotranspiration models.
ea (kPa)	Actual vapor pressure of air, reflecting current humidity conditions.
G (MJm ² day ⁻¹)	Soil heat flux, a component in surface energy balance calculations.
N	Population size
N	Sample size
NAR (kg ha ⁻¹)	Nitrogen application rate
P	Proportion of a trait in the population
pe	Effective precipitation
Q	Proportion of individuals without the trait
Rn (MJm ² day ⁻¹)	Net radiation
T (°C)	Mean air temperature.
T_{max} (°C)	Maximum daily air temperature.
T_{min} (°C)	Minimum daily air temperature.
T_{base} (°C)	Base or threshold temperature
U_2 (ms ⁻¹)	Wind speed
Y (tonha ⁻¹)	Yield
$Ger.$	Germination
$Flowe.$	Flowering
$Ripen.$	Ripening
$Veg.$	Vegetative growth
WF_{Blue} (m ³ ton ⁻¹)	Blue water footprint
WF_{Gray} (m ³ ton ⁻¹)	Gray water footprint
WF_{Green} (m ³ ton ⁻¹)	Green water footprint
Z	Standard normal variable
α (%)	Nitrogen fertilizer loss percentage
γ (kPa°C ⁻¹)	Psychrometric constant
Δ (kPa°C ⁻¹)	Slope of the vapor pressure curve

Acknowledgments

We are sincerely grateful to Mr. Naser Behmaneshfar, Deputy Director of Engineering and Technology of the North Region Exploitation Company, for his valuable guidance and advice. We also acknowledge Shahid Chamran University of Ahvaz and Khuzestan Water and Electricity Organization for providing significant resources and support.

Credit Authorship Contribution Statement

M. Mansouri: Data Collection, Writing - Original Draft

E. Fateh: Supervision, Methodology, Writing - Review & Editing

A. Ayneband (deceased): Conceptualization

A. Shahbazi: Advisory, Investigation, Data Curation

Funding

No formal contracts or grants were involved. This research was supported through friendly collaboration with the Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, and the Khuzestan Water and Power Authority (KWPA).

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author, Dr. Esfandiar Fateh, upon reasonable request, subject to institutional and ethical guidelines.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Aligholinia T, Ghorbali Kh, Rezaei H, Ghornani Nasr Abad Gh. (2021). Optimization of Crop Pattern Based on Water Footprint Index in Different Climates of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*.52(7),1875-1887. [Doi:10.22059/ijswr.2020.300709.668574](https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.300709.668574). (In Persian)
- Allen RG, Pereira LS, Howell TA, Jensen ME. (2011). Evapotranspiration Information Reporting: I. Factors Governing Measurement Accuracy. *Agricultural Water Management*. 98(6), 899-920. [Doi: 10.1016/j.agwat.2010.12.015](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015)
- Bazrafshan O, Etedali HR, Moshizi ZGN, Shamili M. (2019). Virtual Water Trade and Water Footprint Accounting of Saffron Production in Iran. *Agricultural Water Management*. 213, 368-374. [Doi: 10.1016/j.agwat.2018.10.034](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.034)
- Chukalla AD, Krol MS, Hoekstra AY. (2015). Green and Blue Water Footprint Reduction in Irrigated

- Agriculture: Effect of Irrigation Techniques, Irrigation Strategies and Mulching. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19(12), 4877-4891. [Doi:10.5194/hess-19-4877-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-4877-2015)
- Dalin C, Hanasaki N, Qiu H, Mauzerall DL, Rodriguez-Iturbe I. (2014). Water Resources Transfer through Chinese Interprovincial and Foreign Food Trade. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 111(27), 9774-9779. [Doi:10.1073/pnas.1404749111](https://doi.org/10.1073/pnas.1404749111)
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 6(2), 182-197. [Doi:10.1109/4235.996017](https://doi.org/10.1109/4235.996017)
- Gleick PH. (2003). Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century. *Science*. 302(5650), 1524-1528. [Doi:10.1126/science.1089967](https://doi.org/10.1126/science.1089967)
- Hoekstra AY, Chapagain AK. (2007). Water Footprints of Nations: Water Use by People as a Function of Their Consumption Pattern. *Water Resources Management*. 21(1), 35-48. [Doi:10.1007/s11269-006-9039-x](https://doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x)
- Hoekstra AY, Hung PQ. (2005). Globalization 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](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004)
- Hoekstra AY. (2017). Water Footprint Assessment: Evolvement of a New Research Field. *Water Resources Management*. 31(10), 3061-3081. [Doi:10.1007/s11269-017-1618-5](https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5)
- Karandish F, Šimůnek J. (2017). Two-Dimensional Modeling of Nitrogen and Water Dynamics for Various N-Managed Water-Saving Irrigation Strategies Using HYDRUS. *Agricultural Water Management*. 193, 174-190. [Doi: 10.1016/j.agwat.2017.07.023](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.023)
- Liu J, Yang H. (2010). Spatially Explicit Assessment of Global Consumptive Water Uses in Cropland: Green and Blue Water. *Journal of Hydrology*. 384(3-4), 187-197. [Doi:10.1016/j.jhydrol.2009.11.024](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.024)
- Mekonnen MM, Hoekstra AY. (2014). Water Footprint Benchmarks for Crop Production: A First Global Assessment. *Water Resources Management*. 28(11), 3843-3857. [Doi:10.1007/s11269-014-0657-4](https://doi.org/10.1007/s11269-014-0657-4)
- Qi JY, Yang ST, Xue JF, Liu CX, Du TQ, Hao JP, Cui FZ. (2018). Response of Carbon Footprint of Spring Maize Production to Cultivation Patterns in the Loess Plateau, China. *Journal of Cleaner Production*. 187, 525-536. [Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.184](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.184)
- Qi W, Li H, Zhang Q, Zhang K. (2018). Water Footprint of Crop Production in Beijing, China: A Spatial-Temporal Assessment. *Journal of Cleaner Production*. 172, 1741-1750. [Doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.027](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.027)
- Rodriguez CI, de Galarreta VR, Kruse EE. (2015). Analysis of Water Footprint of Potato Production in the Pampean Region of Argentina. *Journal of Cleaner Production*. 90, 91-96. [Doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.071](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.071)
- Sun B, Zhang L, Yang L, Zhang F, Norse D, Zhu Z. (2012). Agricultural Non-Point Source Pollution in China: Causes and Mitigation Measures. *Ambio*. 41(4), 370-379. [Doi:10.1007/s13280-012-0249-6](https://doi.org/10.1007/s13280-012-0249-6)
- Yang H, Wang L, Abbaspour KC, Zehnder AJB. (2013). Virtual Water Trade: An Assessment of Water Use Efficiency in the International Food Trade. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17(10), 4067-4077. [Doi:10.5194/hess-17-4067-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-4067-2013)
- Zhang Y, Zhang J, Tang G, Chen M, Wang L. (2016). Virtual Water Flows in the International Trade of Agricultural Products of China. *Science of the Total Environment*. 557-558, 1-11. [Doi:10.1016/j.scitotenv.2016](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016)
- Zhao X, Liu J, Liu Q, Tillotson MR, Guan D, Hubacek K. (2015). Physical and Virtual Water Transfers for Regional Water Stress Alleviation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 112(4), 1031-1035. [Doi:10.1073/pnas.1404130112](https://doi.org/10.1073/pnas.1404130112)