Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Crop Production

Print ISSN: 2008- 739x
Online ISSN: 2008- 7403

Iranian Society of Agronomy and Plant Breeding Sciences

Comparison of water footprint in various irrigated and rainfed wheat agro-ecosystems from Iran

Sajjad Rahimi-Moghaddam[1], Reza Deihimfard[2*], Ali Gholami Zali[3]

[1]Assistant Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: rahimi.s@lu.ac.ir

[2]Associate Professor, Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: deihim@sbu.ac.ir

[3]PhD Graduated in Agronomy, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: ali.gholamiiut@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2022/08/16
Revised: 2023/01/12
Accepted: 2023/01/27

Keywords:
APSIM model
Blue water
Grain yield
Green water
Moisture stress

ABSTRACT

Background and objectives: A proper understanding of crop yield and corresponding water consumption is important to reach the sustainable agriculture. Water footprint (WF) is one of the indicators for describing water consumption and water use efficiency so that its accurate estimation in different climates and cropping systems (i.e. rainfed and irrigated) could be effective in managing water resources. WF consists of four components included green water, blue water, gray water, and white water. The magnitude of WF and its components is notably affected by deferent factors such as soil type, climate, and water management practices. Accordingly, the current study aimed to assess water footprint and its components in various irrigated and rainfed wheat agro-ecosystems of Iran.

Materials and methods: In the current study, water footprints and its components (blue, green, gray, and white waters) were simulated for irrigated and rainfed wheat agro-ecosystems in six locations in Iran (Ardebil, Hamedan, Sanandaj, Tabriz, Urmia, and Zanjan) during the 37-year period (1980-2016) using APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) crop model. To do this, four inputs for the crop model including crop characteristics (i.e. genetic coefficients), climatic data (i.e. maximum and minimum temperatures, rainfall, and solar radiation), soil characteristics (i.e. soil water content at wilting point and field capacity, saturation water content and bulk density), and management practices (i.e. sowing date, nitrogen fertilizer, irrigation, and etc.) were gathered to run the crop model. Outputs from the model were used to estimate WF components. The outputs included grain yield, cumulative net irrigation, and evapotranspiration in irrigated and rainfed systems, respectively.

Results: The results showed that grain yield and total WF were 2.4 t ha^{-1} and 1498 m^3 t^{-1} for rainfed, and 5.7 t ha^{-1} and 1393 m^3 t^{-1} for irrigated systems. The magnitude of WF was not only associated with type of cropping system (i.e. irrigated and rainfed) but also strongly region-dependent. Shifting from rainfed wheat cultivation to irrigated one increased WF of +15.2, +14.6, +28.1 % for Tabriz, Urmia, and Zanjan and decreased WF of -5.94, -9.03, and -9.12 % for Ardebil, Hamedan, and Sanandaj, respectively. In irrigated wheat systems, the shrare of green, blue, gray, and white waters in total WF simulated by

32.3, 24.2, 20.9, and 22.6 %, respectively. However, in rainfed wheat systems, the shrare of green and gray waters in total WF estimated by 90.3 and 9.60 %, respectively.

Conclusion: The findings of the current research showed that shifting from irrigated to rainfed cultivation of wheat in some areas of northwestern Iran (i.e. Ardebil, Hamedan, and Sanandaj) could lead to a significant reduction in blue water consumption (less irrigation) and subsequently increase sustainability in these areas.

Cite this article: Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Gholami Zali, A. 2023. Comparison of water footprint in various irrigated and rainfed wheat agro-ecosystems from Iran. *Crop Production Journal*, 16 (2), 43-60.

© The Authors.
DOI: 10.22069/ejcp.2023.20453.2525
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

تولید گیاهان زراعی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۷۳۹x
شاپا الکترونیکی: ۲۰۰۸-۷۴۰۳

مقایسه ردّپای آب در بوم‌نظام‌های مختلف گندم دیم با گندم آبی در کشور

سجاد رحیمی‌مقدم[۱]، رضا دیهیم‌فرد[۲]*، علی غلامی‌زالی[۳]

[۱]استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، رایانامه: rahimi.s@lu.ac.ir
[۲]دانشیار، گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، رایانامه: deihim@sbu.ac.ir
[۳]دانش‌آموخته دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، رایانامه: ali.gholamiiut@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

واژه‌های کلیدی:
آب آبی
آب سبز
تنش رطوبتی
عملکرد دانه
مدل APSIM.

چکیده

سابقه و هدف: درک صحیح از عملکرد گیاهان زراعی و نیاز آبی آن‌ها برای رسیدن به کشاورزی پایدار مهم می‌باشد. ردّپای آب یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده کارایی مصرف آب است که برآورد میزان دقیق آن در اقلیم‌های و سیستم‌های زراعی مختلف (دیم و آبی) می‌تواند در مدیریت منابع آب موثر باشد. ردّپای آب از چهار مولفه شامل آب سبز، آب آبی، آب خاکستری و آب سفید تشکیل شده است. مقدار ردّپای آب به طور قابل توجهی تحت تاثیر فاکتورهای مختلف شامل خاک، اقلیم و روش‌های مدیریتی قرار می‌گیرد. بر این اساس، مطالعه حاضر بر روی بررسی ردپای آب و اجزای آن در بوم نظام‌های گندم مختلف دیم و آبی در ایران تمرکز دارد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق ردّپای آب (در برگیرنده آب آبی، سبز، سفید و خاکستری) در بوم‌نظام‌های گندم آبی و دیم غرب کشور در شش منطقه‌ی اردبیل، همدان، سنندج، تبریز، ارومیه و زنجان در یک دوره ۳۷ ساله (۲۰۱۶-۱۹۸۰) با استفاده از مدل APSIM شبیه‌سازی شد. برای انجام این کار، چهار ورودی برای اجرای مدل APSIM شامل ویژگی‌های محصول زراعی (ضرایب ژنتیکی)، داده‌های اقلیمی (بیشینه و کمینه دما، بارش و تشعشع روزانه)، ویژگی‌های خاکی (ظرفیت آب خاک در نقطه پژمردگی، ظرفیت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه، ظرفیت آب خاک در نقطه اشباع، وزن مخصوص ظاهری خاک)، روش‌های مدیریتی (تاریخ کاشت، کود نیتروژن، آبیاری و غیره) جمع‌آوری شدند. خروجی‌های مدل برای تخمین ردپای آب مورد استفاده قرار گرفتند. این خروجی‌ها شامل عملکرد دانه، آبیاری خالص تجمعی، و تبخیر و تعرق در سیستم‌های آبی و دیم بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ردّپای آب کل در دو شرایط دیم و آبی به‌ترتیب با متوسط عملکرد دانه ۲/۴۰ و ۵/۷۱ تن در هکتار برابر با ۱۴۹۸ و ۱۳۹۳ متر مکعب بر تن بود. مقدار ردّپای آب در تولید گندم علاوه بر سیستم کشت (آبی یا دیم) به شدت تابع منطقه بود به‌طوری که درصد تغییرات آن در شرایط دیم نسبت به آبی در مناطق تبریز (۱۵/۲+)، ارومیه (۱۴/۶+) و زنجان (۲۸/۱+) مثبت و در مناطق اردبیل (۵/۹۴-)، همدان (۹/۰۳-) و سنندج (۹/۱۲-) منفی بود. در سیستم‌های آبی آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به‌ترتیب سهم ۳۲/۳، ۲۴/۲، ۲۰/۹ و ۲۲/۶ درصدی، درحالی که در شرایط دیم آب سبز و خاکستری به‌ترتیب سهم ۹۰/۳ و ۹/۶ درصدی در ردّپای آب را داشتند.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که احتمالا تغییر نگرش از کشت گندم آبی به دیم در مناطقی از غرب کشور (اردبیل، همدان و سنندج) می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در نیاز آب آبی

(آبیاری کم‌تر) شود.

استناد: رحیمی‌مقدم، س.، دیهیم‌فرد، ر.، غلامی‌زالی، ع.. (۱٤۰۲). مقایسه ردپای آب در بوم‌نظام‌های مختلف گندم دیم با گندم آبی در کشور. مجله *تولید گیاهان زراعی*، ۱٦ (۲)، ٦۰-٤۳.

DOI: 10.22069/ejcp.2023.20453.2525

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

© نویسندگان.

مقدمه

افزایش تقاضای آب به دلیل افزایش تبخیر و تعرق محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در پاسخ به افزایش دما و تشدید کمبود آب به‌ویژه در ماه‌های بهار و تابستان، از جمله پیامدهای تغییر اقلیم بر منابع آبی (ردّپای آب) در کشاورزی است (۱، ۲). ردّپای آب یکی از شاخص‌های مورد توجه مدیریت منابع آب شیرین در دو دهه اخیر است (۳) که به‌عنوان مجموع آب مصرف شده در طی فرآیند زنجیره تولید یک محصول به ازای یک واحد تولید تعریف می‌شود. این شاخص مشتمل بر چهار جزء آب سبز (بارندگی مؤثر)، آبی (نیاز خالص آبیاری)، خاکستری (برای رقیق‌سازی کودهای شیمیایی) و سفید (تلفات آبیاری) است (٤، ٥، ٦). آب سبز صرفاً به میزان بارندگی مؤثر و نیازهای تبخیر - تعرق محصول بستگی دارد (در بوم‌نظام‌های دیم)، در حالی که استفاده از آب آبی به تبخیر و تعرق محصول، در دسترس بودن آب سبز و تأمین آب آبیاری بستگی دارد (در بوم‌نظام‌های آبی). آب خاکستری حجم آب شیرین مورد نیاز برای رقیق کردن کودها و سموم دفع آفات مورد استفاده در فرآیند تولید است و به عنوان آب آلوده شده طی فرآیند تولید شناخته می‌شود (۳، ۵) در حالی که آب سفید بخشی از آب آبیاری است که از لایه‌های خاک عبور می‌کند و از طریق نفوذ عمیق (Deep percolation) بدون کمک به رقیق شدن کودها و سموم دفع می‌شود و به عنوان تلفات آب در بوم نظام‌های آبی از آن یاد می‌شود (۷).

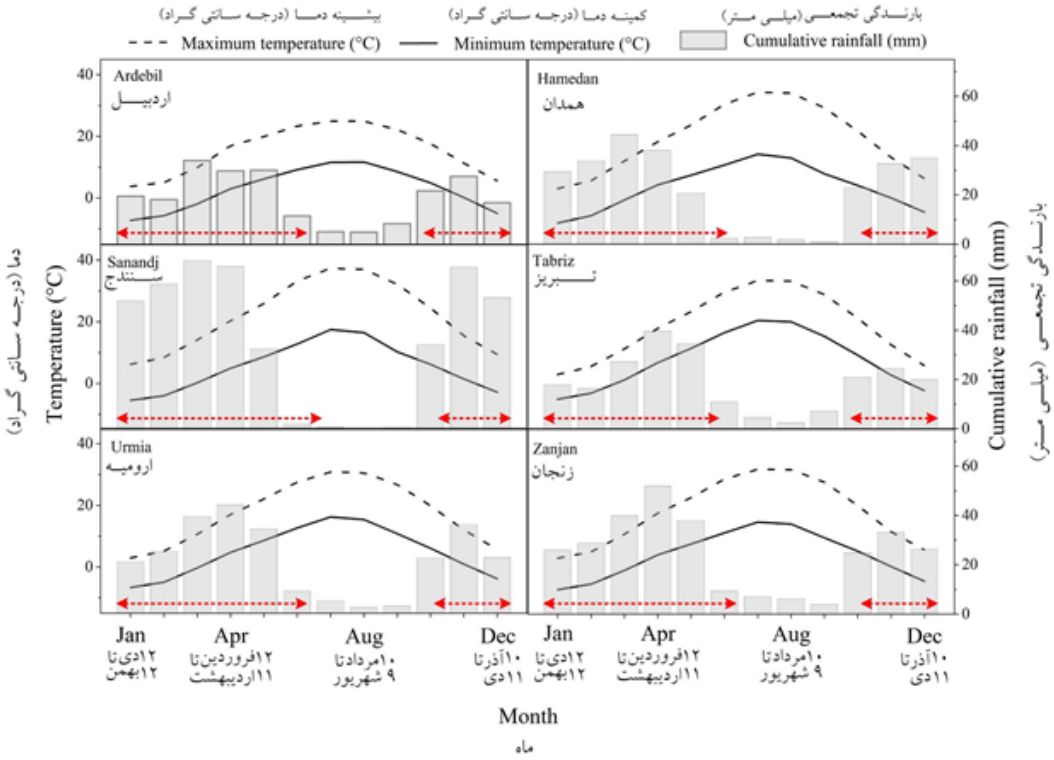
یکی از مزایای تعیین ردپای آب در سیستم‌های کشاورزی اثربخشی تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت آب و ایجاد تغییر نگرش از کشت آبی به دیم و بالعکس است که البته تابعی از اقلیم می‌باشد (٤). ردّپای آب به شدت تابع منطقه بوده و تنش خشکی به عنوان یکی از عوامل محیطی می‌تواند میزان آن را به طور مستقیم تحت تاثیر قرار دهد (٤، ٨). کمبود آب از یک طرف و کیفیت پایین آن (به عنوان تابعی از مولفه‌های تشکیل دهنده ردّپای آب) از طرف دیگر، از جمله عواملی هستند که توسعه پایدار محصولات استراتژیکی مانند گندم در کشور را تهدید می‌کنند. در یک مطالعه انجام شده در کشور، مقایسه و ارزیابی ردّپای آب آبی، سبز و خاکستری گندم در اقلیم‌های مختلف ایران نشان داد که بیش‌ترین مقادیر ردّپای آب آبی در نواحی مرکزی و جنوبی، بیش‌ترین مقدار ردّپای آب سبز در نواحی شمالی و غربی و بیش‌ترین مقدار ردّپای آب خاکستری در نواحی جنوبی مشاهده شد (۸). در نهایت بر اساس برآورد سهم هر یک از مولفه‌های ردّپای آب بیان شد که کشت محصول گندم مناسب تمام اقلیم‌های کشور نیست و در مناطق با شرایط اقلیمی خشک - گرم و خشک - خیلی گرم قابل توصیه نمی‌باشد. علاوه بر این، در تحقیقی دیگر بررسی مولفه‌های ردّپای آب در ۱۵ استان کشور نشان داد که در اراضی آبی (فاریاب)، سهم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به‌ترتیب ۲۳، ۲۵ ،۱۷ و ۳۵ درصد از مجموع کل ردپای آب در تولید گندم در هر استان است و در اراضی دیم، سهم آب سبز و خاکستری به‌ترتیب ۹۰ و ۱۰ درصد بود (٤). همچنین، در این مطالعه مشخص گردید که ردپای آب سبز در تولید محصول گندم تقریباً ۲/۳ برابر مقدار ردپای آب آبی می‌باشد. این محققین نتیجه‌گیری کردند که با توجه به بالاتر بودن مجموع ردپای آب در تولید گندم آبی در سه استان گلستان، خراسان و لرستان نسبت به گندم دیم، تغییر نگرش نسبت به انتخاب نوع سیستم کشت گندم از آبی به دیم در این مناطق منطقی به نظر می‌رسد.

به‌طور کلی در چند مطالعه پیشین برای تخمین میزان ردپای آب و اجزای آن، از گزارشات عملکرد

محصولات زراعی استفاده شده است در حالی که این مطالعه از رهیافت مدل‌سازی به صورت بلندمدت برای شبیه‌سازی عملکرد و صفات مورد نیاز برای تخمین ردپای آب استفاده کرده که می‌تواند ضمن برآورد دقیق از عملکرد دانه و صفات مورد بررسی، تغییرات سالانه آن‌ها نیز مورد ارزیابی گیرد. با توجه به ارزشمند بودن اطلاعات مربوط به مقادیر و سهم هر یک از مولفه‌های ردّپای آب در مدیریت منابع آب به‌ویژه در برخی از مراکز اصلی تولید گندم و از طرفی وجود اطلاعات کم در ارتباط با برآورد دقیق از مقایسه ردّپای آب در تولید این گیاه زراعی استراتژیک در دو شرایط دیم و آبی، این آزمایش شبیه‌سازی با هدف مقایسه ردّپای آب و تعیین سهم هر یک از مولفه‌های آن (آب سبز، آبی، خاکستری و سفید) در بوم‌نظام‌های گندم دیم با آبی در برخی مناطق کشور در یک دوره ۳۷ ساله (۲۰۱۶-۱۹۸۰) با استفاده از رهیافت مدل‌سازی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد بررسی: این تحقیق به‌منظور مقایسه ردّپای آب و تعیین سهم هر یک از مولفه‌های آن (آب آبی، سبز، خاکستری و سفید) در بوم‌نظام‌های گندم آبی و دیم در شش منطقه (اردبیل، همدان، سنندج، تبریز، ارومیه و زنجان) در یک دوره ۳۷ ساله (۲۰۱۶-۱۹۸۰) انجام شد. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه شامل عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، خصوصیات اقلیمی مناطق مورد مطالعه شامل بیشینه و کمینه دما و بارش در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱- میانگین بیشینه وکمینه دما و بارندگی تجمعی ماهانه در مناطق مورد مطالعه در یک دوره ۳۷ ساله (۲۰۱۶-۱۹۸۰). پیکان های قرمز رنگ طول دوره رشد گندم را نشان می دهند.

Figure 1. Monthly maximum and minimum temperatures and cumulative rainfall in the study locations in a 37-year period (1980-2016). Red arrows indicate wheat growing season.

جدول ۱- ویژگی‌های جغرافیای، خاکی و مدیریتی مناطق مورد مطالعه.

Table 1. Geographical characteristics, soil properties and management information in the study locations.

منطقه Location	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m)	تاریخ کاشت Sowing date*	آب اولیه خاک (میلی‌متر) Initial soil water (mm)*	کود نیتروژن (دیم/آبی؛ کیلوگرم در هکتار) Nitrogen fertilizer (rainfed/irrigated; kg ha^{-1})**	وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (g cm^{-3})	ظرفیت آب خاک در نقطه پژمردگی (میلی‌متر بر میلی‌متر) Soil water content at wilting point (mm mm^{-1})	ظرفیت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (میلی‌متر بر میلی‌متر) Soil water content at field capacity (mm mm^{-1})	ظرفیت آب خاک در نقطه اشباع (میلی‌متر بر میلی‌متر) Saturation water content (mm mm^{-1})
اردبیل Ardebil	38.2	48.2	1351	8-Oct	31	23/267.9	1.35	0.20	0.36	0.49
همدان Hamedan	34.8	48.7	1850	22-Oct	29	55.2/161.6	1.35	0.19	0.35	0.49
سنندج Sanandaj	35.4	46.9	1500	26-Oct	37	54.4/156.4	1.33	0.26	0.39	0.50
تبریز Tabriz	37.8	45.9	1351	9-Oct	27	31.1/105.1	1.41	0.20	0.31	0.48
ارومیه Urmia	37.5	44.9	1332	21-Oct	28	43.7/111.3	1.41	0.19	0.33	0.47
زنجان Zanjan	36.8	48.3	1638	19-Oct	29	94.2/193.4	1.42	0.20	0.33	0.46

* آب اولیه خاک و تاریخ کاشت برای سیستم کشت دیم از یک سری آزمایش شبیه‌سازی اولیه با توجه به مطالعه رحیمی مقدم و همکاران (۲۰۲۱) استخراج شده است (۹). ** ۵۰ درصد کود نیتروژن در هنگام کاشت و مابقی در زمان ساقه‌روی گندم استفاده شد. عمق خاک برای مناطق مختلف ۹۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (۹). داده‌های جمع‌آوری شده مربوط به کل شهرستان‌های مورد مطالعه است.

*Sowing date and initial soil water for rainfed wheat were obtained from an initial set of simulations based on Rahimi-Moghaddam et al. 2021 (9). ** Half of N was applied at sowing and the rest at stem elongation. The soil depth was considered 90 cm for all study locations (9). The collected data is related to the whole study counties.

مدل مورد استفاده: در این مطالعه از مدل APSIM-Wheat (۱۰) نسخه 7.7 برای شبیه‌سازی عملکرد و نیاز آبی گندم به منظور برآورد ردّپای آب در بوم‌نظام‌های مختلف استفاده شد. این مدل، سرعت رشد روزانه گیاه را با تبدیل تابش خورشیدی دریافت شده به ماده خشک گیاهی با استفاده از پارامتر کارایی مصرف نور[1] شبیه‌سازی می‌کند. میزان نور دریافت شده توسط کنوپی (تاج پوشش) گیاه بر اساس شاخص سطح برگ محاسبه می‌شود که این شاخص تحت تأثیر دمای روزانه و تنش‌های آب و نیتروژن قرار دارد. کارایی مصرف نور نیز در مدل تحت تاثیر مرحله نموی، دما و تنش‌های آب و نیتروژن قرار دارد. مدل APSIM-Wheat نموّ فنولوژیکی گیاه را با توجه به دمای تجمعی و طول روز شبیه‌سازی می‌کند. از جمله ضرایب مربوط به نمو فنولوژیکی ضرایب مربوط به حساسیت طول روز و بهاره‌سازی می‌باشند و با تاثیر بر درجه روز رشد باعث تسریع یا کند شدن نمو گیاهی می شوند. تابع درجه روز رشد یک تابع دو تکه‌ای[2] می‌باشد در حالیکه تابع طول روز یک تابع خطی هست و بین صفر تا یک متغیر است و تحت تاثیر طول روز و ضریب حساسیت به طول روز می‌باشد. همچنین تابع بهاره‌سازی نیز یک تابع خطی هست که بین صفر و ۱/٤ در مدل متغیر بوده و تحت تاثیر میانگین، بیشینه و کمینه دما و ضریب حساسیت به بهاره سازی می‌باشد و از زمان بین سبز شدن تا گل‌انگیزی بر روی نموّ گیاه تاثیر می‌گذارد. ماده خشک تولیدی روزانه با ضرایبی به اندام‌های مختلف تخصیص داده می‌شود. در این مدل همچنین معادلات مربوط به تبخیر خاک، تعرق گیاه، زه‌کشی و رواناب برای شبیه‌سازی بیلان آب به صورت روزانه در مراحل مختلف گیاه در نظر گرفته شده است (۱۰).

برای اجرای مدل چهار گروه ورودی شامل خصوصیات گیاهی، داده‌های آب و هوایی، خصوصیات خاک و شیوه‌های مدیریتی مورد نیاز است. داده‌های آب و هوایی شامل تابش روزانه خورشید (مگاژول در متر مربع در روز)، کمینه و بیشینه دما (درجه سانتی‌گراد) و بارندگی (میلی‌متر) می‌باشند که از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱٦ به صورت روزانه از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شدند. خصوصیات خاکی برای مناطق مورد مطالعه شامل آب اولیه خاک، وزن مخصوص ظاهری خاک، ظرفیت آب خاک در نقطه پژمردگی، ظرفیت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه و ظرفیت آب خاک در نقطه اشباع در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات خاکی از منابع مختلف شامل مقالات، مطالعات تفضیلی نیمه تفضیلی خاکشناسی ایران، آزمایشگاه‌های خاکشناسی در سطح شهرستان و گزارشات سازمان خوار و بار جهانی استخراج شد. خصوصیات مدیریتی شامل تاریخ کاشت، آبیاری، کوددهی و ارقام مورد استفاده توسط کشاورزان هر منطقه در جدول ۱ نشان داده شده است. خصوصیات مدیریتی از طریق متخصصان بخش‌های جهاد کشاورزی و مرکز تحقیقات وآموزش کشاورزی در مناطق مورد بررسی به دست آمد. در سیستم‌های فاریاب، با مبنای الگوی رایج کشاورزان محلی در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن دو دور آبیاری از زمان کاشت تا مرحله ساقه‌دهی، آب اولیه خاک روی ۵۰ درصد آب بالقوه موجود در خاک تنظیم شد. از مرحله ساقه‌دهی به بعد آبیاری در مدل بر مبنای محتوای آب خاک در نقطه ظرفیت مزرعه انجام گرفت به این صورت که رطوبت خاک همواره در حد ۷۵ درصد ظرفیت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه باشد. در سیستم‌های دیم، تاریخ‌کاشت و آب اولیه خاک از مجموعه اولیه شبیه‌سازی‌های مطالعه رحیمی‌مقدم و همکاران (۲۰۲۱) به دست آمد (۹).

[1] Radiation Use Efficiency (RUE)
[2] Segmented function

بنابراین باتوجه به مطالب مطرح شده تاریخ کاشت سیستم دیم از مطالعه رحیمی‌مقدم و همکاران (۲۰۲۱) و تاریخ کاشت سیستم‌های فاریاب از طریق مشاوره با متخصصان بخش‌های جهاد کشاورزی و مرکز تحقیقات وآموزش کشاورزی در مناطق مورد بررسی به دست آمد (۹).

خصوصیات گیاهی مورد نیاز مدل شامل ضرایب ژنتیکی ارقام مورد استفاده در مطالعه حاضر است. دو رقم گندم زراعی غالب آذر-۲ (به عنوان رقم دیم) و چمران (به عنوان رقم آبی) معمولاً در بوم‌نظام‌های زراعی هدف کشت می‌شوند. این ارقام پیش‌تر توسط دیهیم‌فرد و همکاران (۲۰۱۵) و رحیمی مقدم و همکاران (۲۰۲۱) تحت شرایط محدودیت آب و نیتروژن و روش‌های مدیریتی در مناطق مختلف پارامتریابی و ارزیابی شده است و نتایج ارزیابی مدل، بیانگر دقت بالای مدل APSIM در شبیه‌سازی رشد و نمو این ارقام تحت شرایط مذکور می‌باشد (۹، ۱۱). ضرایب ژنتیکی این ارقام که حاصل کالیبراسیون مدل است در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی ارقام مورد استفاده در مدل APSIM-wheat (۸، ۱۹).

Table 2. Genetic coefficients for the two cultivars used in the APSIM-wheat model (8, 19) and cardinal temperatures for wheat.

Coefficient	Cultivar ارقام		
	آذر-۲ (Azar-2)	چمران (Chamran)	واحد (Unit)
نیاز حرارتی تا پایان مرحله جوانی Thermal time at the end of juvenile stage	380	380	درجه روز رشد °Cd
نیاز حرارتی تا مرحله گل‌انگیزی Thermal time at floral initiation stage	500	500	درجه روز رشد °Cd
نیاز حرارتی از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی Thermal time from start grain filling to maturity	400	545	درجه روز رشد °Cd
حساسیت به طول روز Photoperiod sensitivity	2.5	3.5	-
حساسیت به بهاره‌سازی Vernalization sensitivity	2	2.5	-
تعداد دانه به ازای هر گرم ساقه Number of grains per gram of stem	25	22.5	دانه به ازای گرم ساقه Kernel/g stem
بیشینه وزن دانه Maximum grain size	0.041	0.044	گرم g
دماهای کاردینال گندم در مدل APSIM-wheat (درجه سانتی گراد) Cardinal temperatures in APSIM-wheat model (°C)	پایه Base 0	بهینه Optimum 26	سقف Ceiling 34

شبیه‌سازی ردپای آب و مولفه‌های آن (آب آبی، سبز، خاکستری و سفید): از خروجی شبیه‌سازی‌های انجام شده با مدل APSIM برای تخمین ردّپای آب (متر مکعب در تن) و مولفه‌های آن استفاده شد. این خروجی‌ها شامل عملکرد دانه در دو شرایط آبی (Y_{Irr}) و دیم (Y_{RF}) بر حسب تن در هکتار، تبخیر و تعرق واقعی در طی فصل رشد گندم در شرایط آبی (ETc_{Irr}) و دیم (ETc_{RF})، میزان بارش در طول فصل رشد و میزان آبیاری در طول فصل رشد بودند (معادله‌های ۱ تا ۸، جدول ۳). برای برآورد ردّپای آب از روش پیشنهاد شده توسط آبابایی و رمضانی اعتمادی (۲۰۱۶) استفاده شد (٤). این روش بر اساس چارچوب اولیه پیشنهادی توسط هوکسترا و چاپاگن (۲۰۰۸) برای شرایط کشور اصلاح شده است (معادله‌های ۱ تا ۸، جدول ۳) (۳).

جدول ۳- فرمول‌های مورد استفاده برای محاسبه ردّپای آب و مولفه‌های آن در سیستم‌های کشت گندم دیم و آبی.

Table 3. Formulas used to calculate water footprint and its components in rainfed and irrigated wheat systems.

شماره معادله Equation number	معادله Equation	سیستم کشت Cropping system	مولفه ردپای آب Water footprint components
(1)	$WF_{Blue,Irr} = \frac{ET_{c_{Irr}} - ET_{c_{RF}}}{Y_{Irr}} \times 10$	آبی Irrigated	ردّپای آب آبی در سیستم فاریاب Blue water footprint in irrigated system
(2)	$WF_{Green,Irr} = \frac{ET_{c_{RF}}}{Y_{Irr}} \times 10$	آبی Irrigated	ردّپای آب سبز در سیستم فاریاب Green water footprint in irrigated system
(3)	$WF_{Gray,Irr} = \frac{\alpha_{Irr} \times NAR_{Irr}}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y_{Irr}}$	آبی Irrigated	ردّپای آب خاکستری در سیستم فاریاب Gray water footprint in irrigated system
(4)	$WF_{White,Irr} = \max\left(0, \frac{10 \times (GI - IR)}{Y_{Irr}} - WF_{Gray,Irr}\right)$	آبی Irrigated	ردّپای آب سفید در سیستم فاریاب White water footprint in irrigated system
(5)	$WF_{Blue,RF} = 0$	دیم Rainfed	ردّپای آب آبی در سیستم دیم Blue water footprint in rainfed system
(6)	$WF_{Green,RF} = \frac{ET_{c_{RF}}}{Y_{RF}} \times 10$	دیم Rainfed	ردّپای آب سبز در سیستم دیم Green water footprint in rainfed system
(7)	$WF_{Gray,RF} = \frac{\alpha_{RF} \times NAR_{RF}}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y_{RF}}$	دیم Rainfed	ردّپای آب خاکستری در سیستم دیم Gray water footprint in rainfed system
(8)	$WF_{White,RF} = 0$	دیم Rainfed	ردّپای آب سفید در سیستم دیم White water footprint in rainfed system

بر اساس معادلات جدول ۳، کل ردّپای آب (WF_{Total}) در کشت آبی بر مبنای مجموع ردپای آب آبی ($WF_{Blue,\ Irr}$)، آب سبز ($WF_{Green,\ Irr}$)، آب خاکستری ($WF_{Gray,Irr}$) و آب سفید ($WF_{White,Irr}$) و در کشت دیم بر مبنای مجموع ردپای آب سبز ($WF_{Green,\ RF}$) و آب خاکستری ($WF_{Gray,RF}$) محاسبه شد (۱). در معادلات ۱، ۲، ۳، ٦ و ۷، ET_{cIrr} و ETc_{RF} به‌ترتیب بیان‌گر تبخیر و تعرق واقعی طی فصل رشد گندم در شرایط آبی و دیم و Y_{Irr} و Y_{RF} به‌ترتیب بیان‌گر عملکرد دانه در دو شرایط آبی و دیم بر حسب تن در هکتار می‌باشند. در معادلات آب خاکستری (WF_{Gray}) (معادلات ۳ و ۷ جدول ۳)، ضریب α درصد تلفات کود نیتروژن را نشان می‌دهد که برای شرایط آبی (α_{Irr}) و دیم (α_{RF}) به‌ترتیب ۱۰ و ۵ درصد کل کود نیتروژن مصرفی در نظر گرفته شد، زیرا میزان هدر رفت (تلفات) آب در سیستم‌های آبی از طریق روان‌آب و نفوذ عمقی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر است (۷، ۱۲). درمعادله ٤ جدول ۳، GI آبیاری ناخالص را نشان می‌دهد که برابر با تقسیم IR (آبیاری خالص تجمعی) بر راندمان آبیاری است که در همه مناطق ۰/٤۳ در نظر گرفته شده است. با توجه به گزارشات موجود تنها ۵ درصد از بوم‌نظام‌های کشت در ایران تحت سیستم‌های آبیاری تحت فشار قرار دارند (۱۳)، و بیش از ۹۰ درصد آن‌ها، سیستم‌های آبیاری سطحی با راندمان ۰/۳۵ تا ۰/۵۵ هستند (۱٤). متوسط راندمان آبیاری توسط گزارش ملی راندمان آبیاری ۰/٤۳ گزارش شده است (۱٤). عدد ۱۰ در معادلات ۱، ۲، ٤ و ٦ (جدول ۳) ضریب تبدیل میلی‌متر به متر مکعب آب در

هکتار است. *NAR* در معادلـه ۷ میـزان مصـرف کـود (کیلوگرم در هکتار)، C_{Max} حـداکثر غلظـت بحرانـی نیتروژن (طبق استاندارد US-EPA ۱۰ میلی‌گرم در هر لیتر آب در نظر گرفته شده است (۱۵)، و C_{Nat} غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننـده[3] را نشـان می‌دهد. از آنجا که اطلاعات دقیقی از غلظـت واقعـی نیتروژن در منابع آب دریافت کنـــنده در دست نیست، این مقدار در این تحقیق برابر صفر (فرض معمول) در نظر گرفته شد (۱۵).

تمامی آزمایشات شبیه‌سازی در شرایط محدودیت آب و نیتـروژن و بـدون محـدودیت سـایر تنش‌هـای زیسـتی (علـف‌هـای هـرز، بیمـاری‌هـا و آفـات) و غیرزیستی انجام شد. همچنین از آنجایی که میزان آب برای رفع آلودگی کـود نیتـروژن نسـبت منـابع آلـوده کننده دیگر بیش‌تر می‌باشد، برای تخمـین WF_{Gray} در مناطق مورد مطالعه فقط نیتروژن در نظر گرفته شـد و از منابع آلودگی دیگر صرفه نظر شد (۱، ٤).

نتایج و بحث

عملکرد دانه، تبخیر- تعرق و طول فصل رشد گندم آبی و دیم: متوسط عملکرد دانه در شرایط آبی (۵/۷۱ تن در هکتار) ۲/۳۸ برابر شـرایط دیـم (۲/٤۰ تـن در هکتار) شبیه سازی شد (جدول ٤). میزان آب مصرفی برای این میزان از تولید (ردّپای آب) در شـرایط آبـی ۱۳۹۲/۷ متر مکعب در تن (به‌ترتیـب ٤۵۰/٦، ۳۳٦/۲، ۲۹۱/۵ و ۳۱٤/٤ متر مکعـب در تـن آب سـبز، آبـی، خاکستری و سـفید) و در شـرایط دیـم ۱٤۹۸/۳ متـر مکعب در تن (به‌ترتیب ۱۳۵۳/۹ و ۱٤٤/٤ متر مکعب در تن آب سبز و خاکستری) بود (شـکل‌های ۳ و ٤). این عملکردهـا بـا یافتـه هـای اطلـس جهـانی خلـاء عملکرد گندم برای کشور تا حـد زیـادی هـم‌خـوانی دارند (۲۰، https://www.yieldgap.org/Iran). نتـایج مطالعه حاضر همچنین نشان داد میزان تبخیر و تعـرق تجمعی در طـول فصـل رشـد در شـرایط آبـی ٦٦/۵ درصد بیش‌تر از شرایط دیـم (۲٦۷/۸ میلی‌متـر) بـود. علاوه بر این، طول دوره رشـد در شـرایط آبـی ۱۲/۹ روز نسبت به شرایط دیـم (۲٤۲/۹ روز) بیش‌تـر بـود (شکل ۲). در اراضی دیـم، مجمـوع تبخیـر و تعـرق گندم در طول فصل رشد کم‌تـر از شـرایط اسـتاندارد (ET_p) اســـت، در حـــالی کـــه در شـــرایط آبـــی، آب بیش‌تری برای مصـرف گیـاه موجـود بـوده و مقـادیر برآورد شدهٔ تبخیر و تعرق گنـدم نزدیـک بـه مقـادیر پتانسیل می‌باشند (٤). بالاترین و پـایین‌ترین عملکـرد دانه گندم در کشت آبـی بـه‌ترتیب در منـاطق اردبیـل (٦/۱٦ تن در هکتار) و زنجان (۵/۳۸ تن در هکتار) و در شرایط دیم به‌ترتیب در مناطق همدان (۲/۵۲ تن در هکتار) و زنجان (۲/۱۳ تن در هکتار) شبیه سازی شد (جـدول ٤). ایـن موضـوع را مـی‌تـوان در شـکل ۲ مشاهده کرد جایی که بیش‌تـرین میـزان طـول فصـل رشد در شهرستان اردبیل به دست آمد. به طـور کلـی، با افزایش طول دوره رشد گیاه فرصت بیش‌تری برای تولیـد بیومـاس دارد و ایـن بیومـاس در نهایـت بـه عملکرد دانه انتقال داده می‌شود. همچنین، همانطور که در جدول ٤ مشاهده می شود تغییرات زیادی در بـین سال‌های مختلف در زمینـه عملکـرد دانـه در منـاطق مختلف به ویژه منطقه ارومیه در سیستم دیم نسبت به مناطق دیگر وجود دارد. این تغییـرات در ایـن منطقـه نسبت به سایر منـاطق مربـوط بـه تغییـرات بارنـدگی تجمعی در این شهر نسبت به سایر مناطق می‌باشد بـه طوری که تغییرات ۱۸۲/۵ میلی‌متر (فاصله صدک ۰/۱ تا صدک ۰/۹) بود که در مناطق دیگر این عدد ۱۵٤/۲ میلی‌متر بـود. ایـن نتـایج مشـابهی مبنـی بـر تفـاوت معنـی‌دار عملکـرد دانـه در شـرایط آبـی و دیـم در اقلیم‌های مختلف کشور با سهم مختلفی از ردّپای آب و مولفه‌های آن گزارش شده است (٤، ۱٦).

[3] Receiving water bodies

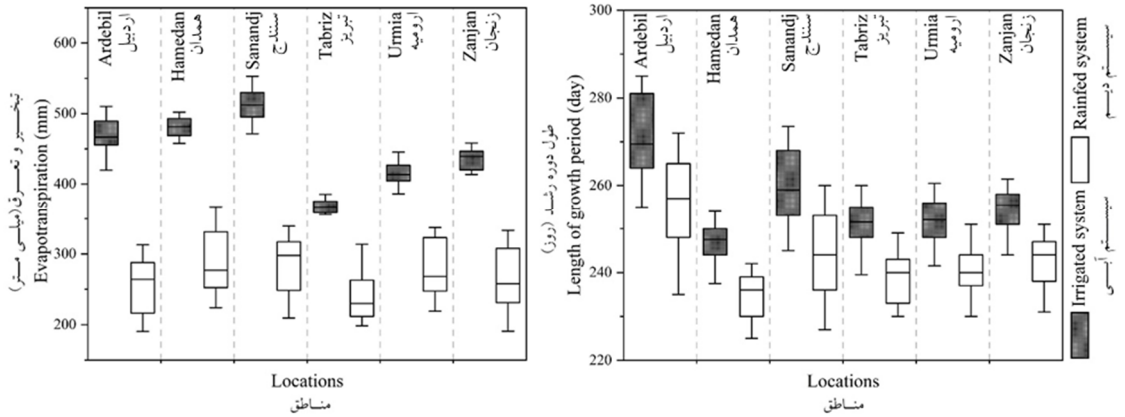
جدول ٤- میانگین عملکرد دانه بلندمدت شبیه‌سازی شده (۲۰۱٦-۱۹۸۰) در سیستم‌های آبی و دیم در مناطق مورد مطالعه تحت شرایط محدودیت آب و نیتروژن.

Table 4. Long-term (1980-2016) simulated wheat grain yield at baseline in irrigated and rainfed systems in the study locations under water- and nitrogen-limited conditions.

منطقه Location	سیستم آبی (تن در هکتار) Irrigated system (t ha^{-1})	سیستم دیم (تن در هکتار) Rainfed system (t ha^{-1})
اردبیل Ardebil	6.16 ± 0.102	2.45 ± 0.233
همدان Hamedan	5.54 ± 0.099	2.52 ± 0.204
سنندج Sanandaj	6.08 ± 0.084	2.46 ± 0.206
تبریز Tabriz	5.70 ± 0.121	2.41 ± 0.230
ارومیه Urmia	5.45 ± 0.143	2.46 ± 0.254
زنجان Zanjan	5.38 ± 0.105	2.14 ± 0.228

* اعداد ارائه شده در سمت راست علامت ± نشان دهنده خطای استاندارد می باشد.

*The numbers presented at the right side of the ± sign show the standard error.



شکل ۲- تبخیر و تعرق و طول دوره رشد گندم شبیه‌سازی شده در دوره پایه ۲۰۱٦-۱۹۸۰ در سیستم‌های آبی و دیم در مناطق مورد مطالعه. اندازه هر باکس نشان دهنده واریانس عملکرد در ۳۷ سال شبیه‌سازی هست.

Figure 2- Long-term (1980-2016) simulated wheat evapotranspiration and length of growth period in irrigated and rainfed systems in all study locations. Length of each boxplot indicates the variability amongst the simulation years.

ردّپای آب و مولفه‌های آن در سیستم هـای آبـی و دیم: با در نظر گرفتن میانگین تمامی منـاطق، ردّپـای آب کل در دو شرایط دیم و آبی بـه‌ترتیب ۱٤۹۸/۳ و ۱۳۹۲/۷ متر مکعب در تن برآورد شد (شکل‌های ۳ و ٤). در سیستم‌های فاریاب آب سبز، آبی، خاکستری و سـفید بـه‌ترتیب سـهم ۳۲/۳، ۲٤/۲، ۲۰/۹ و ۲۲/٦ درصدی، درحالی که در شرایط دیـم آب سـبز و آب خاکستری به‌ترتیب سهم ۹۰/۳ و ۹/٦ درصـدی را در ردّپای آب در بوم‌نظام‌های گندم غرب کشـور داشـتند (شکل ٤). در مطالعه‌ای مشابه در برآورد ردّپای آب و مولفه‌های آن در آذربایجان شـرقی گـزارش شـد کـه مجموع میانگین ردّپـای آب در گنـدم آبـی و دیـم و همچنین جو آبی و دیـم نیـز اختلـاف چنـدانی بـاهم نداشتند؛ بر این مبنا بیان شد کـه در صـورت در نظـر

گرفتن مجموع ردپای آب و دیدگاه مصرف آب، کشت دیم و کشت آبی هر محصول (فارغ از نوع آب) به‌طور متوسط ردپای آب تقریبا یکسانی خواهند داشت (١٦).

متوسط میزان آب خاکستری در شرایط آبی تقریبا دو برابر شرایط دیم بود (شکل ٤). در یافته‌های مشابه اما با روش متفاوت در شبیه‌سازی عملکرد دانه، سهم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید در اراضی فاریاب، به‌ترتیب ٢٣، ٢٥، ١٧ و ٣٥ درصد و در اراضی دیم، سهم آب سبز و خاکستری به‌ترتیب ٩٠ و ١٠ درصد برآورد شد (٤). بالاتر بودن سهم آب سبز نسبت به خاکستری در اراضی دیم علاوه بر بارندگی به استفاده محدودتر از کود در سطح اراضی دیم در مقایسه با اراضی آبی برمی‌گردد (١٦). بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر در سیستم‌های کشت آبی، حدود ٢٠ درصد از آب مصرفی از سیستم هدر می شود تا آلودگی‌های خاک رقیق شود (آب خاکستری). با این حال، در سیستم‌های کشت دیم بیش‌تر آب به صورت آب سبز (٩٠/٣ درصد) مصرف می‌شود و سهم آب سبز را می‌توان با بهینه‌سازی مصرف کود افزایش داد. کمی‌سازی دقیق و جامع ردّپای آب مبنای مدیریت منابع آب کشاورزی منطقه‌ای است که مقدار آن به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اقلیم، نوع خاک و شیوه‌های مدیریت آب است (١٧، ١٨، ١٩، ٢١).

نتایج نشان داد که ردّپای آب و مولفه‌های آن علاوه بر نوع سیستم تامین آب (آبی و دیم) به شدت تابع منطقه است. مجموع ردّپای آب در تولید گندم آبی در سه منطقه اردبیل، همدان و سنندج نسبت به گندم دیم بیش‌تر بود (شکل ٣). به عبارت دیگر، درصد تغییرات ردّپای آب در شرایط دیم نسبت به شرایط آبی در سه منطقه اردبیل (٥/٩٤-)، همدان (٩/٠٣-) و سنندج (٩/١٢-) منفی و در منطقه تبریز (١٥/٢+)، ارومیه (١٤/٦+)، زنجان (٢٨/١+) مثبت بود (شکل ٣) که نشان‌دهنده اثرپذیری ردّپای آب از عوامل آب و هوایی موثر بر میزان آب مصرفی در مناطق مختلف یک اقلیم است. برای مثال، مصرف آب خاکستری بین شرایط دیم و آبی در سه منطقه تبریز، ارومیه و زنجان اختلاف زیادی وجود نداشت، اما در سه منطقه اردبیل، همدان و سنندج این اختلاف قابل توجه بود (شکل ٤). بر این مبنا در این مناطق (اردبیل، همدان و سنندج) تغییر نگرشی در انتخاب نوع کشت گندم از آبی به دیم منطقی به نظر می‌رسد.

نتایج نشان داد ردّپای آب سبز در مناطق دیم (١٣٥٣/٩ مترمکعب بر تن) تقریبا سه برابر مناطق آبی (٤٥٠/٦ مترمکعب بر تن) بود (شکل ٥). احتمالا از آنجایی که برخلاف مناطق آبی در مناطق دیم تولید محصولات بدون انجام عملیات آبیاری و کاملا متکی بر آب باران است، لذا سهم اصلی ردّپای آب را آب سبز (آب باران) تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، همان‌طور که نتایج مطالعه حاضر هم این امر را تایید می‌کند در مناطق دیم تلفات آب (آب سفید) معادل صفر است و سهم آب خاکستری در شرایط دیم (به علت محدودیت منابع آبی جهت رقیق‌سازی کودهای شیمیایی) ٥٤ درصد کم‌تر از مناطق آبی است و باعث می‌شود که عملکرد دانه کاملا متکی بر آب باران باشد. لذا با توجه به سهم قابل توجه آب سبز در مناطق دیم، بدیهی است که سهم ردّپای آب سبز در مناطق دیم سه برابر شرایط آبی باشد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان ردپای آب سبز در شرایط آبی به‌ترتیب متعلق به مناطق همدان (٥٠٣/٤ متر مکعب در تن) و اردبیل (٣٨٣/٤ متر مکعب در تن) و بیش‌ترین و کم‌ترین آن در شرایط دیم به‌ترتیب متعلق به مناطق زنجان (١٦٤٦/٢ متر مکعب در تن) و تبریز (١١٦١/٩ متر مکعب در تن) بود (شکل ٤). در شرایط کشت آبی بیش‌ترین و کم‌ترین ردپای آب آبی به مناطق اردبیل

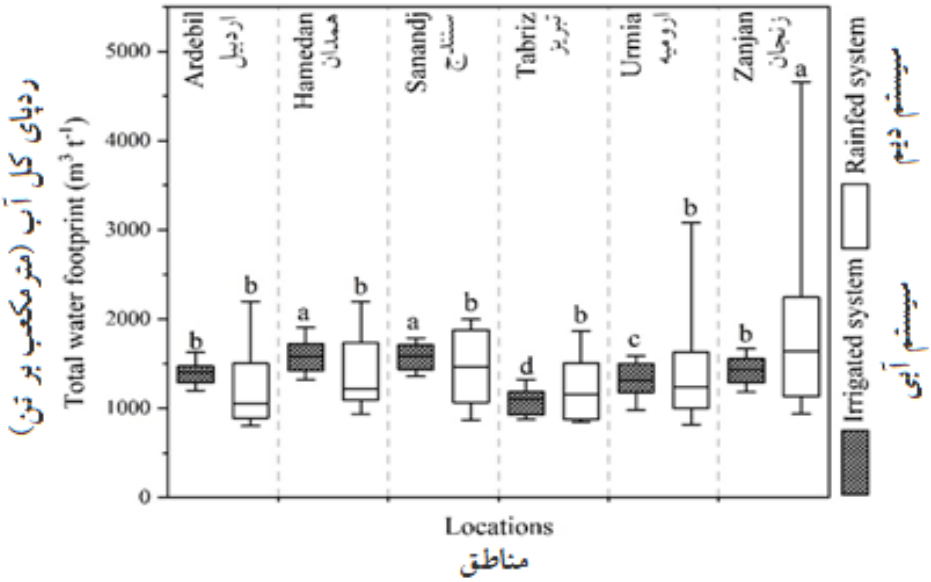
(۳۷۶/٤ متر مکعب در تن) و تبریز (۲٦٦/۳ متر مکعب در تن) تعلق داشت (شکل ۳).

بیش‌ترین و کم‌ترین ردّپای آب خاکستری در شرایط آبی به‌ترتیب متعلق به مناطق اردبیل (٤۳۸ متر مکعب در تن) و ارومیه (۱۹٦/۳ متر مکعب در تن) و بیش‌ترین و کم‌ترین آن در شرایط دیم به‌ترتیب متعلق به مناطق زنجان (۳۳۳/۱ متر مکعب در تن) و اردبیل (٦۱/۸ متر مکعب در تن) بود (شکل ٤). در شرایط آبی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان آب سفید به‌ترتیب به مناطق سنندج (٤۷۰/۸ متر مکعب در تن) و اردبیل (۱۹۵/۱ متر مکعب در تن) تعلق داشت (شکل ۳). بررسی سهم مولفه‌های ردّپای آب در تولید گندم در بوم‌نظام‌های ۱۵ استان کشور نتایج مشابهی مبنی بر ۹ برابر بودن سهم آب سبز نسبت به آب خاکستری در شرایط دیم را نشان داد (٤). این محققان در نتایجی مشابه همچنین بیان داشتند که ردّپای آب کل در سیستم‌های آبی و دیم تفاوت جزئی را نشان می‌دهد. اما با این وجود در سطح مناطق مختلف از نظر ردپای آب در اراضی آبی و دیم گاه اختلاف‌های زیادی دیده می‌شود که می‌توان بر این اساس، نوع کشت آبی یا دیم را در سطح این مناطق تعیین کرد. در واقع این تغییرات نشان می‌دهد که احتمالا ردّپای آب به عنوان یک شاخص مدیریتی منابع آب می‌تواند نقش مهمی برای ایجاد تغییر نگرش کشت از آبی به دیم در مناطق اردبیل، همدان و سنندج داشته باشد.

در سیستم‌های فاریاب سهم مجموع آب خاکستری و سفید حدود ٤۳/۵ درصد از مجموع کل ردّپای آب در تولید بود (شکل ٤). هرچند که این میزان آب به چرخه آبی کشور بر می‌گردد، اما کاهش کیفیت آب و گاه از دسترس خارج شدن آن موضوعی است که بایستی مورد توجه برنامه‌ریزان قرار گیرد (٤، ۸، ۱٦، ۱۸). احتمالا این حجم بالا از هدر رفت آب به مصرف زیاد کودهای شیمیایی (آلودگی منابع آبی) و استفاده از روش‌های سنتی آبیاری (آبیاری کرتی) در سیستم‌های فاریاب بر می‌گردد چراکه در بسیاری از مناطق کشور، آبیاری اراضی کشاورزی از جمله گندم معمولا به صورت ثقلی و یا غرقابی است و مزارع به صورت نواری، کرتی، نشتی و یا جوی و پشته آبیاری می‌شوند. علاوه بر این، گاها میزان و توزیع بارندگی مطابقت کاملی با نیاز آبی گیاه ندارد و کشاورزان برای کاهش اثرات اقلیمی بر عملکرد و افزایش بهره‌وری محصول استفاده از کودهای شیمیایی را مد نظر قرار می‌دهد که این امر افزایش آب خاکستری را در پی دارد (۱٦). با این وجود، احتمالا به کارگیری روش‌های نوین آبیاری و نیز کاربرد متعادل کودهای شیمیایی بتواند در کاهش این حجم از هدررفت آب در بوم‌نظام‌های فاریاب گندم غرب کشور موثر واقع شود. در نتایج مشابهی بررسی ردّپای آب محصول گندم (مقدار آب مصرفی واقعی) مراکز استآن‌های مختلف ایران نشان داد که ردّپای آب و مولفه‌های تشکیل دهنده آن در مناطق و اقلیم‌های مختلف ایران یکسان نبوده و بسته به نوع اقلیم، وضعیت آب و هوایی و سیستم مدیریتی این محصول متفاوت است (۸). در همین راستا، برآورد ردّپای آب چندین گیاه زراعی در سودان نیز نشان داد که تنوع زیادی در ردّپای سبز وجود دارد که آن را به تغییر در میزان بارش و فعالیت‌های زراعی نسبت دادند. علاوه بر این بیان شد که استفاده از تکنیک‌های برداشت آب باران می‌تواند این تنوع و همچنین مصرف آب را بدون کاهش در میزان عملکرد و ثبات تولید آن کاهش دهد (۲۲). نتایج پژوهش این محققین همچنین نشان داد که در سیستم‌های فاریاب، ردّپای آب آبی بیش‌ترین سهم را از کل ردّپای گیاهان زراعی مانند پنبه (۸۸ درصد)، سورگوم (٦۸ درصد) و گندم (۱۰۰ درصد) دارد. با این حال، نقش آب سبز (آب باران) را به علت تاثیر بر میزان آب نگهداری شده در خاک و

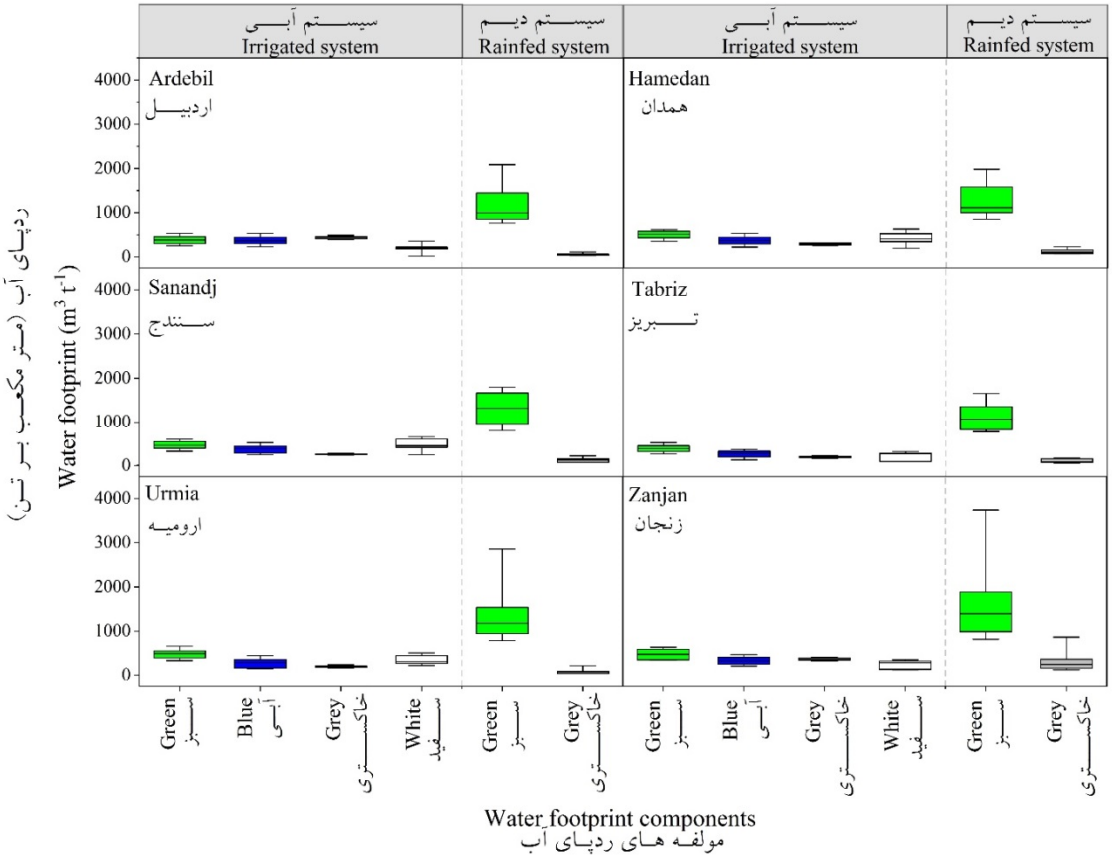
میزان آب جذب شده توسط گیاه و نهایتا عملکرد دانه نباید نادیده گرفت (۲۲).

به‌طور کلی، گزارش شده است که در اکثر استآن‌های ایران میزان ردّپای آب در سیستم‌های فاریاب زیاد است. یکی از دلایل اصلی این موضوع این است که کشاورزان فاریاب معمولا بر استفاده بیش‌تر از کود و سموم متمرکز می‌شوند که این امر شاید در نگاه اول باعث افزایش عملکرد محصول و کاهش ردّپا و آب مصرفی محصول گردد اما با افزایش ردّپای آب خاکستری، میزان ردّپای کل محصول افزایش می یابد و در صورت عدم آب‌شویی می‌تواند در درازمدت باعث تخریب منابع خاک شود (۸). برخی محققان در نتایج مشابهی در مقیاس‌های مختلف جغرافیایی، ملی، منطقه‌ای و استانی نتایج مشابهی مبنی بر اثرپذیری ردّپای آب و مولفه‌های آن از فاکتورهای مختلفی مانند نوع منطقه، نوع گیاه، شرایط خاک، مدیریت آب (دیم و آبی) را گزارش کرده‌اند (٤، ٨، ١٧، ١٨، ١٩، ٢١، ٢٢). یافته‌های این محققان و نیز مطالعه حاضر توجه جدی به ردّپای آب را به عنوان یک عامل مدیریتی منابع آب شیرین با توجه به نوع منطقه و سیستم آبیاری متذکر می‌شوند.



شکل ۳- شبیه‌سازی بلندمدت (۲۰۱٦-۱۹۸۰) ردّپای کل آب در سیستم‌های آبی و دیم در مناطق مورد مطالعه. اندازه هر باکس نشان دهنده واریانس ردپای آب در ۳۷ سال شبیه‌سازی هست. مقایسات بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری در سطح هر سیستم آبی و دیم می باشد و میانگین‌هایی که در هر ستون برای هر تیمار حداقل یک حرف مشترک دارند، در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Figure 3- Long-term (1980-2016) simulated total water footprint in irrigated and rainfed systems in the study locations. Length of each boxplot indicates the variability among the simulation years. Means comparisons are based on the LSD test at each irrigated and rainfed system. Means of boxplots with the same letter are not significant at 5% probability level.



شکل ٤- شبیه‌سازی بلندمدت (۲۰۱٦-۱۹۸۰) مولفه‌های ردّپای آب در سیستم‌های آبی و دیم در مناطق مورد مطالعه. اندازه هر باکس نشان دهنده واریانس ردپای آب در ۳۷ سال شبیه‌سازی هست.

Figure 4-. Long-term (1980-2016) simulated water footprint components in irrigated and rainfed systems in the study locations. Length of each boxplot indicates the variability amongst the simulation years.

محدودیت‌های تحقیق: در این تحقیق، با توجه به محدودیت های موجود در مورد عدم دسترسی به برخی از پارامترهای مورد استفاده و نیز عدم ثبت و اندازه‌گیری دقیق آن‌ها برای مناطق مختلف، از استانداردهای بین المللی و میانگین کلی استفاده شد که نتیجتا می‌توانند باعث ایجاد عدم قطعیت در نتایج به دست آمده شود. به عنوان مثال در زمینه راندمان آبیاری، با توجه به عدم اندازه‌گیری این صفت در هر شهرستان و نیز گاها اختلافات موجود در داده‌های قابل دسترس، از یک میانگین کلی گزارش شده بر اساس تحقیق عباسی و همکاران (١٤) برای سیستم‌های زراعی آبی در ایران استفاده شد. همچنین، در تخمین آب خاکستری، برای پارامتر حداکثر غلظت بحرانی نیتروژن از یک استاندارد کلی و بین‌المللی استفاده شد در حالی که این پارامتر ممکن از در مناطق مختلف، یکسان نباشد. شایان ذکر است که اندازه‌گیری دقیق این پارامترها برای هر منطقه بسیار وقتگیر و هزینه بر بوده و باید عدم قطعیت ناشی از آن‌ها را در نتایج به دست آمده مد نظر داشت. همچنین، ذکر این نکته ضروری است که در حال حاضر در بسیاری از مطالعات علمی بین المللی نیز برای صفات و پارامتر های مذکور از یک میانگین و استاندارد یکسان استفاده شده است (٤، ٧، ١٧).

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های مطالعه حاضر نشان داد که در بوم‌نظام‌های گندم غرب کشور متوسط عملکرد دانه در شرایط فاریاب (۵/۷۱ تن در هکتار) ۲/۳۸ برابر شرایط دیم (۲/٤۰ تن در هکتار) بود. در این بوم‌نظام‌ها، ردّپای آب کل در دو شرایط دیم و آبی با تفاوتی جزئی به‌ترتیب ۱٤۹۸ و ۱۳۹۳ متر مکعب در تن برآورد شد، اما سهم مولفه‌های آن بسته به سیستم کشت آبی و دیم متفاوت بود. به‌طوری که، در شرایط فاریاب آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به‌ترتیب سهم ۳۲/۳، ۲٤/۲، ۲۰/۹ و ۲۲/٦ درصدی، اما در شرایط دیم آب سبز و آب خاکستری به‌ترتیب سهم ۹۰/۳ و ۹/٦۰ درصدی در ردّپای آب مورد نیاز در تولید گندم داشتند. متوسط میزان آب خاکستری در شرایط آبی (۲۹۱/۵ متر مکعب در تن) تقریبا دو برابر شرایط دیم بود. علاوه بر این، اثر ردّپای آب و مولفه‌های آن در تولید گندم علاوه بر سیستم کشت (آبی یا دیم) به شدت تابع منطقه بود. به‌طوری که درصد تغییرات ردّپای آب در شرایط دیم نسبت به فاریاب در مناطق تبریز (۱۵/۲+)، ارومیه (۱٤/٦+)، زنجان (۲۸/۱+)، مثبت و در مناطق اردبیل (۵/۹٤-)، همدان (۹/۰۳-) و سنندج (۹/۱۲-) منفی بود. بر اساس یافته‌های حاضر می‌توان بیان داشت که ردّپای آب به عنوان یک شاخص مدیریتی منابع آب می‌تواند نقش مهمی در تغییر نگرش سیستم کشت از فاریاب به دیم داشته باشد. به‌طوری که بر اساس مولفه‌های ردّپای آب احتمالا تغییر نگرش از کشت گندم آبی به دیم در اردبیل، همدان و سنندج به دلیل کاهش قابل توجهی در نیاز آب آبی (آبیاری کم‌تر) منطقی به‌نظر می‌رسد.

منابع

1. Ababaei, B. & Ramezani-Etedali, H. (2017). Water footprint assessment of main cereals in Iran. Agric. Water Manag. 179: 40. 401-411.
2. Ababaei, B. & Ramezani-Etedali., H. 2016. Estimation of water footprint compartments in national wheat production. J. Water Soil. 29: 6. 1458-1468. (In Persian)
3. Abbasi, F., Sohrab, F. & Abbasi, N. (2017). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Irrig. Drain. Struct. Eng. Res. 17: 67. 113-128. (In Persian)
4. Ahmed, S. M. & Ribbe, L. (2011). Analysis of water footprints of rainfed and irrigated crops in Sudan. J. Nat. Resour. Develop. 1: 3. 20-28.
5. Aligholi Nia, T., Sheibani, H., Mohammadi, O. & Hesam, M. (2019). Evaluation and comparison of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran. Iran Water Resour. Res. 15: 3. 234-245. (In Persian)
6. Bazrafshan, O., Ramezani-Etedali, H., Moshizi, Z.G.N. & Shamili, M. 2019. Virtual water trade and water footprint accounting of saffron production in Iran. Agric. Water Manag. 213: 35. 368-374.
7. Chapagain, A.K., Hoeksta, A.Y. & Savenije, H.H.G. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 10: 3. 455–468.
8. Deihimfard, R., Mahallati, M.N. & Koocheki, A. (2015). Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modelling. Field Crops Res. 184: 4. 28-38.
9. Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B. & Azizi, K. (2022). Future climate change could reduce irrigated and rainfed wheat water footprint in arid environments. Sci. Total Environ. 807: 19. 150991.
10. Elbeltagi, A., Deng, J., Wang, K. & Hong, Y. (2020). Crop water footprint estimation and modeling using an artificial neural network approach in the Nile Delta, Egypt. Agric. Water Manag. 235: 7. 106080.
11. Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P. & Wu, P. (2021). A

quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002-2018. Ecol. Indic. 120: 66. 106962.

12. Gao, J., Xie, P., Zhuo, L., Shang, K., Ji, X. & Wu, P. (2021). Water footprints of irrigated crop production and meteorological driving factors at multiple temporal scales. Agric. Water Manag. 255: 26. 107014.
13. Hoekstra, A.Y. & Chapagain, A.K. (2008). Globalization of water: Sharing the Planet's freshwater resources. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
14. Holzworth, D.P., Huth, N.I., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D. & Brown, H. (2014). APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. Environ. Model. Softw. 62: 1. 327-350.
15. Iglesias, A. & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. Agric. Water Manag. 155: 11. 113-124.
16. Madani, K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? J. Environ. Stud. Sci. 4: 4. 315–328.
17. Mojtahedi, M., Kalantari, K., Asadi, A., Varmazyari, H., & Hosseinzad, J. (2021). Investigating the water footprint components of wheat and barley in east Azerbaijan province. Iran J. Soil Water Res. 52: 4. 981-995. (In Persian)
18. Nazari, R., Ramezani Etedali, H., Nazari, B., & Collins, B. (2020). The impact of climate variability on water footprint components of rainfed wheat and barley in the Qazvin province of Iran. Drain. Syst. 69: 4. 826-843.
19. Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Azizi, K., & Roustaii, M. (2021). Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: a modelling approach. Eur. J. Agron. 129: 7. 126333.
20. Zahed, M., Soltani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E. & Alimagham, S. (2020). Modeling of irrigated wheat yield potential and gap in Iran. Crop Prod. 12: 3. 35-52. (In Persian)
21. Zheng, J., Wang, W., Ding, Y., Liu, G., Xing, W., Cao, X. & Chen, D. (2020). Assessment of climate change impact on the water footprint in rice production: historical simulation and future projections at two representative rice cropping sites of China. Sci. Total Environ. 709: 34. 136190.
22. Zhuo, L., Mekonnen, M.M. & Hoekstra, A.Y. (2014). Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: a case study for the Yellow River basin. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18: 6. 2219-2234.