

Water Footprint as a Tool for Sustainable Management of Water Resources in the Agricultural Sector (Case Study: Markazi Province)

Saeed Farahani¹, Farhad Mirzaei¹, Masoud ParsiNejad¹ and Mahmood Akbari^{2*} 

(Received: May 1-2025 ; Revised: May 21-2025 ; Accepted: November 28-2025)

1- Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

1- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran.

*Corresponding author, E-mail: m-akbarii@araku.ac.ir

Abstract

The present study was conducted with the aim of quantitative and qualitative analysis of agricultural water consumption in Markazi Province, and calculated and examined water consumption at the level of 18 crops and 12 counties using the water footprint as a comprehensive indicator. A simultaneous study of the three components of the blue, green, and gray water footprint was conducted as an analytical tool to assess the amount and manner of water consumption. In this study, meteorological, agricultural, and input consumption data were used in the 2022-2023 crop year, and water footprint values were estimated in terms of units and totals by crop and county. The results showed that BWFU is strongly influenced by spatial factors (climate and precipitation) and plant characteristics (yield, crop type, and growth period). A difference of up to 98% in BWFU among different crops and a difference of more than 9 times in GWFU in rainfed compared to irrigated lands were observed. Also, GRWFU values exceeded BWFU for many crops, indicating a significant pollutant load from the use of chemical fertilizers. In addition to spatial factors and plant characteristics, the difference of 223 MCM between Saveh and Ashtian counties and the difference of 52.7 MCM between Shazand and Mahallat counties in BWF and GWF, respectively, indicate spatial differences in BWFU and cultivation area. Also, the difference in 1377 MCM between the GRWF of Arak and Ashtian counties is affected by the amount and type of fertilizer used, in addition to the cultivation area. In addition to improving performance, suggested management measures include reducing the cultivation area of high-consumption crops, expanding rainfed lands in high-rainfall areas, optimizing input consumption, and modifying the cultivation pattern in accordance with resources and climatic conditions in order to maintain the quantity and quality of water resources. Accordingly, the research results demonstrate the potential of the water footprint index in location-based and product-based analysis of water consumption and formulation of management responses.

Keywords: Environmental impacts of fertilizer use, Rainfed land development, Unit and total water footprint, Sustainable water resources management

How to cite this article: Farahani, S., Mirzaei, F., ParsiNejad, M. and Akbari, M. 2026. Water Footprint as a Tool for Sustainable Management of Water Resources in the Agricultural Sector (Case Study: Markazi Province). *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 65-86. DOI: [10.47176/jwss.30.1.27455](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.27455)

Copyright © 2026 Farahani et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

ردپای آب ابزاری برای مدیریت پایدار منابع آب بخش کشاورزی (مطالعه موردی: استان مرکزی)

سعید فراهانی^۱، فرهاد میرزایی^۱، مسعود پارسی‌نژاد^۱ و محمود اکبری^{۲*} 

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۷)

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m-akbarii@araku.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تحلیل کمی و کیفی مصرف آب کشاورزی در استان مرکزی، به محاسبه و بررسی مصرف آب در سطح ۱۸ محصول زراعی و ۱۲ شهرستان با استفاده از ردپای آب به عنوان شاخصی جامع پرداخته است. در این راستا، بررسی هم‌زمان سه مؤلفه ردپای آب آبی، سبز و خاکستری به عنوان ابزاری تحلیلی برای ارزیابی میزان و نحوه مصرف آب صورت گرفت. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی، کشاورزی و مصرف نهاده‌ها در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ استفاده شده و مقادیر ردپای آب به صورت واحد و کل بر حسب محصول و شهرستان برآورد شده‌اند. نتایج نشان داد که BWF_U به شدت تحت تأثیر عوامل مکانی (اقلیم و بارش) و ویژگی‌های گیاهی (عملکرد، نوع محصول و دوره رشد) قرار دارد. تفاوت BWF_U تا ۹۸٪ در میان محصولات مختلف و تفاوت بیش از ۹ برابری GWF_U در اراضی دیم نسبت به فاریاب دیده شد. همچنین مقادیر $GRWF_U$ برای بسیاری از محصولات از BWF_U فراتر رفت که بیانگر بار آلاینده قابل توجه ناشی از مصرف کودهای شیمیایی است. علاوه بر عوامل مکانی و ویژگی‌های گیاهی، اختلاف MCM ۲۲۳ بین شهرستان‌های ساوه و آشتیان و اختلاف MCM ۵۲/۷ بین شهرستان‌های شازند و محلات به ترتیب در BWF و GWF نشانگر تفاوت مکانی در BWF_U و سطح کشت است. همچنین اختلاف MCM ۱۳۷۷ بین $GRWF$ شهرستان‌های اراک و آشتیان علاوه بر سطح کشت، تحت تأثیر میزان و نوع کود مصرفی قرار دارد. اقدامات مدیریتی پیشنهادی در کنار بهبود عملکرد، شامل کاهش سطح کشت محصولات پر مصرف، توسعه اراضی دیم در نواحی پربارش، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و اصلاح الگوی کشت متناسب با منابع و شرایط اقلیمی به منظور حفظ کمیت و کیفیت منابع آب توصیه می‌شود. بر این اساس، نتایج پژوهش قابلیت شاخص ردپای آب را در تحلیل مکان‌محور و محصول‌محور مصرف آب و تدوین واکنش‌های مدیریتی بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اثرهای زیست‌محیطی مصرف کود، توسعه اراضی دیم، ردپای آب واحد و کل، مدیریت پایدار منابع آبی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

کشاورزی یکی از ارکان کلیدی در تأمین غذا و تضمین امنیت غذایی در سطح جهان به شمار می‌رود. با این حال، این بخش به شدت به منابع آب شیرین، به‌ویژه برای مقاصد آبیاری، متکی است (۳). این وابستگی عمدتاً به منابع آب آبی (Blue Water) شامل منابع سطحی و زیرزمینی است؛ منابعی که در دهه‌های اخیر به‌واسطه عواملی چون رشد پرشتاب جمعیت، گسترش شهرنشینی و در نتیجه افزایش تقاضا برای آب و زمین، تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر الگوهای بارش و دسترسی به منابع آب، تحول در الگوهای مصرف (با گرایش بیشتر به مصرف محصولات با ردپای آب زیاد)، و همچنین توسعه صنعتی، با فشار فزاینده و کاهش شدید مواجه شده‌اند (۱۲). در نتیجه، بحران کمبود آب به‌عنوان یک مسئله جهانی، مانعی جدی در مسیر رشد اقتصادی، توسعه پایدار و بهبود رفاه اجتماعی در بسیاری از مناطق جهان محسوب می‌شود (۵ و ۲۴). استمرار این وضعیت، پایداری سامانه‌های کشاورزی را تهدید کرده، موجب کاهش عملکرد محصولات شده و امنیت غذایی را در معرض آسیب قرار داده است (۱۹).

با توجه به اینکه کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین در جهان به شمار می‌رود، تحقق مدیریت پایدار منابع آب در این بخش، به‌ویژه در شرایط چالش‌برانگیز کنونی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱۵). مطالعات متعدد نیز بر ضرورت پیاده‌سازی اصول مدیریت پایدار منابع آب تأکید کرده‌اند (۱۷ و ۲۵)؛ با این حال، دستیابی به این هدف، مستلزم درک جامع و دقیق از الگوهای مصرف آب و شناسایی فشارهای فزاینده‌ای است که منابع آبی را تهدید می‌کنند. در واقع، گام نخست در مسیر مدیریت پایدار، تحلیل دقیق مصارف است؛ چرا که بدون شناخت روشن از چگونگی و میزان مصرف، امکان طراحی سیاست‌ها و اقدامات مؤثر برای بهره‌برداری کارآمد، حفاظت هدفمند و تخصیص بهینه منابع آب فراهم نخواهد بود. این نوع ارزیابی، زیرساخت اصلی تدوین مداخلات کارآمد در مواجهه با بحران‌های آبی محسوب می‌شود.

از سوی دیگر، در کشاورزی فاریاب، منابع آب مورد استفاده محدود به منابع آب آبی (آب سطحی و زیرزمینی) نبوده، بلکه آب سبز حاصل از بارش نیز نقش کلیدی در تأمین نیاز آبی گیاهان ایفا می‌کند (۱۸)؛ بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب در این بخش نیازمند ارزیابی جامع هر دو منبع آب آبی و سبز است (۲۳). در این میان، آب سبز، با وجود اهمیت زیاد در تأمین رطوبت موردنیاز محصولات زراعی، اغلب منبعی نادیده‌انگاشته و کمتر مدیریت‌شده باقی مانده است (۲). شناسایی سهم واقعی آب سبز در فرایند تولید، می‌تواند زمینه‌ساز تدوین راهبردهایی برای بهینه‌سازی استفاده از آن باشد؛ راهبردهایی که علاوه بر کاهش نیاز به آبیاری، به حفاظت از منابع آب آبی منجر می‌شوند (۴). افزون بر این، مطالعاتی چون (۲۶) نشان داده‌اند، چنین ارزیابی‌هایی می‌توانند به بهینه‌سازی نظام‌های آبیاری و شناسایی اقدامات مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر کم‌آبی کمک کنند.

در این بستر، مفهوم «ردپای آب» که نخستین بار توسط هوکسترا (۱۰) معرفی شد، به‌عنوان شاخصی تحلیلی و کاربردی، جایگاه برجسته‌ای در ارزیابی و مدیریت الگوهای مصرف آب یافته است (۲۲). به علاوه این شاخص، برخلاف معیارهای سنتی مصرف آب، با تفکیک مصارف به سه مؤلفه مجزا شامل آب آبی (آب سطحی و زیرزمینی)، آب سبز (بارندگی ذخیره‌شده در خاک) و آب خاکستری (مقدار آبی که برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها مورد نیاز است)، چارچوبی جامع برای تحلیل دقیق‌تر فراهم می‌آورد (۸). نمونه‌هایی از مطالعات انجام‌شده در سطح بین‌المللی (۶) و در ایران (۱)، گویای گستردگی و اثربخشی این رویکرد هستند؛ رویکردی که با اهداف مدیریت پایدار منابع آب، با تأکید بر هر دو مؤلفه آب آبی و آب سبز، هم‌راستاست.

به‌علاوه ردپای آب نه تنها میزان برداشت از منابع آبی، بلکه تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی‌های حاصل از تولید کالا، خدمات و محصولات کشاورزی را نیز پوشش می‌دهد (۱۱ و ۲۱). همچنین ردپای آب با در نظر گرفتن هم‌زمان سطح

اهمیت بیشتری می‌یابد. استان مرکزی با اقلیم نیمه‌خشک، و وابستگی شدید به کشاورزی، همانند عمده استان‌های خشک و نیمه‌خشک کشور ایران، با مشکلاتی مانند افت سطح آب‌های زیرزمینی، روش‌های آبیاری ناکارآمد و کشت محصولات پرمصرف دست‌به‌گریبان است. این مشکلات منجر به بحران آبی در سطح منطقه شده‌اند و تحلیل دقیق مصرف آب برای طراحی سیاست‌های بهینه ضروری است.

از این رو به منظور مرتفع نمودن این شکاف، پژوهش حاضر با به‌کارگیری مفهوم ردپای آب و تحلیل هم‌زمان سه نوع ردپای آب (آبی، سبز، خاکستری) در مقیاس شهرستانی، گامی مؤثر در تحلیل و آسیب‌شناسی الگوهای مصرف آب در استان مرکزی برداشته است. این پژوهش با تحلیل تغییرات مکانی و تقسیم‌بندی دقیق‌تر منطقه‌ای، می‌تواند تفاوت‌ها و چالش‌های خاص هر شهرستان را شناسایی کند و در نتیجه، پیشنهادهایی دقیق‌تر برای مدیریت منابع آبی به سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب ارائه دهد. همچنین، به‌ویژه با تحلیل ردپای آب خاکستری که معمولاً در مطالعات مشابه نادیده گرفته می‌شود، این پژوهش بینش‌های نوینی را برای بهینه‌سازی مصرف منابع آب و مدیریت پایدار آن در اختیار می‌گذارد.

مواد و روش‌ها

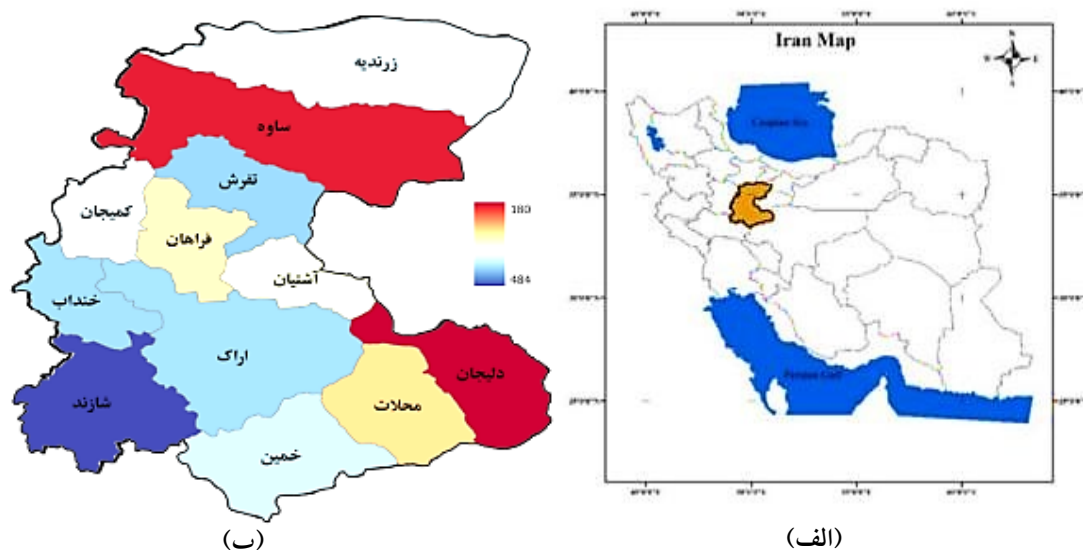
۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در استان مرکزی، ایران انجام شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است. استان مرکزی در مختصات تقریبی ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه شمال و ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه شرقی قرار داشته و مساحتی حدود ۲۹۲۶۴ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. این استان از ۱۲ شهرستان شامل اراک، آشتیان، تفرش، خمین، خنداب، دلیجان، زرنديه، ساوه، شازند، فراهان، کميجان و محلات تشکیل شده است. از نظر جغرافیایی، استان مرکزی در محل تلاقی رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس واقع شده و همین امر موجب تنوع قابل توجه در شرایط

تولید و مقدار آب مصرفی، به تحلیل نسبت تولید به مصرف می‌پردازد و هر دو نوع مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب را شامل می‌شود (۹). از این رو، محاسبه دقیق ردپای آب می‌تواند بازتابی واقع‌گرایانه از الگوهای مصرف و بهره‌برداری از منابع آبی در بخش‌های مختلف ارائه داده و چشم‌اندازی برای ارزیابی پایداری مصرف منابع فراهم کند.

علاوه بر این، چنان‌که در شماری از مطالعات (۱۶ و ۲۵) نیز مورد تأکید قرار گرفته است، شاخص ردپای آب، ظرفیت زیادی برای انجام تحلیل‌های مکانی و زمانی مصرف آب دارد. این ابزار، به‌ویژه در بعد مکانی، قادر است الگوهای منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آبی و تفاوت‌های فضایی ناشی از آن را شناسایی کرده و از این طریق، بستر لازم را برای تدوین سیاست‌ها و راهبردهای مدیریتی ناحیه‌محور و متناسب با ویژگی‌های جغرافیایی مناطق فراهم آورد (۷). همچنین، ردپای آب قابلیت تحلیل میزان وابستگی نظام‌های تولیدی به منابع آب آبی یا سبز را دارا بوده و به‌علاوه، امکان سنجش و مقایسه پیامدهای اجرایی سناریوهای مختلف مدیریتی را در راستای تحقق اهداف پایداری در بهره‌برداری از منابع آب فراهم می‌کند. بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب در کشاورزی به‌ویژه با توجه به بحران‌های موجود، نیازمند ارزیابی دقیق و جامع از منابع آبی و آب سبز است. استفاده از شاخص «ردپای آب» به عنوان ابزاری تحلیلی می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف منابع آبی، کاهش آسیب‌پذیری در برابر کم‌آبی و دستیابی به راهبردهای مدیریت منابع آب کمک کند (۷).

با توجه به پیشینه تحقیقاتی موجود، هنوز در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در استان مرکزی ایران، ارزیابی جامع و هم‌زمان از اجزای مختلف ردپای آب انجام نشده است. این خلأ باعث شده است که الگوهای مصرف منابع آبی در سطح شهرستان‌ها به‌طور مؤثر شناسایی نشوند و به تبع آن چالش‌ها و فرصت‌های ویژه برای مدیریت بهینه منابع آب کشاورزی به‌درستی تحلیل نگردند. این امر به‌ویژه در شرایطی و مناطقی که منابع آبی محدود هستند و نیاز به سیاست‌گذاری دقیق‌تر وجود دارد،



شکل ۱. معرفی منطقه مورد مطالعه. (الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه و تقسیمات شهرستانی و (ب) پراکنش بارندگی در منطقه مورد مطالعه

۵۵ درصد به صورت دیم بهره‌برداری می‌شود. با این حال طی سه دهه گذشته، کشاورزی آبی به طور متوسط نزدیک به ۸۵ درصد از تولید محصولات زراعی را به خود اختصاص داده است.

مدیریت منابع آب در استان مرکزی، مشابه روندهای ملی، با چالش‌های متعددی مواجه است. محدودیت منابع آب، بهره‌برداری غیربهبهینه از سامانه‌های آبیاری، و برداشت ناپایدار از منابع آب زیرزمینی، منجر به افت سطح آبخوان‌ها و فرونشست زمین شده‌اند. بخش کشاورزی که حدود ۹۰ درصد از منابع آبی کشور را مصرف می‌کند، همچنان متکی به روش‌های سنتی آبیاری و زیرساخت‌های توزیع ناکارآمد است که موجب اتلاف قابل توجه آب می‌شود. علاوه بر این، کاهش کیفیت آب به دلیل رواناب‌های کشاورزی، پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های تصفیه‌نشده، منابع آب سطحی و زیرزمینی را در معرض تهدید قرار داده است. ضعف حاکمیت، نبود انسجام در سیاست‌گذاری‌ها و کمبود سامانه‌های پایش مصرف آب، بحران منابع آب استان را تشدید کرده و بازتابی از مشکلات گسترده‌تر کشور در این حوزه است. همچنین، کشت محصولات آب‌بر در مناطق خشک و عدم بهره‌گیری از فناوری‌های نوین صرفه‌جویی

توپوگرافی و اقلیمی آن شده است. حدود ۷۵ درصد از وسعت استان را نواحی کوهستانی و تپه‌ماهور و ۲۵ درصد باقی‌مانده را دشت‌هایی تشکیل می‌دهند که عمدتاً برای کشاورزی مناسب‌اند.

اقلیم استان مرکزی عمدتاً نیمه‌خشک بوده و در نقاط مختلف آن، نوسانات قابل توجهی در دما و بارش دیده می‌شود. میانگین بلندمدت بارندگی سالانه در این استان حدود ۲۷۷ میلی‌متر است؛ به طوری که در مناطق کوهستانی غربی و جنوبی، میزان بارش بیشتر و در نواحی خشک شرقی و شمالی کمتر است. زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم از ویژگی‌های اقلیمی این منطقه محسوب می‌شوند؛ به گونه‌ای که کمینه دمای ثبت شده در شازند برابر با $-۱۴/۹$ درجه سانتی‌گراد و بیشینه دما در ساوه برابر با $۴۲/۷$ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

اگرچه استان مرکزی تنها حدود $۱/۷۹$ درصد از مساحت ایران را در بر می‌گیرد، اما ۲ درصد از منابع آب تجدیدپذیر کشور را داراست. بخش کشاورزی نقش مهمی در اقتصاد استان ایفا می‌کند؛ به طوری که حدود ۲ درصد از اراضی کشاورزی و ۳ درصد تولیدات کشاورزی کشور در این منطقه قرار دارد. حدود ۴۵ درصد از اراضی کشاورزی استان به صورت آبی و

۳. محاسبات ردپای آب

۳.۱. ردپای آب آبی و سبز

در کشاورزی، ردپای آب آبی کل (BWF) به مقدار حجم کل آب مصرفی از منابع سطحی یا زیرزمینی (مانند رودخانه‌ها، سدها و چاه‌ها) اطلاق می‌شود که به طور مستقیم برای آبیاری گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحلیل مصرف منابع آب در کشاورزی، تمرکز بر ردپای آب به جای صرفاً حجم برداشت‌شده، اهمیت بسزایی دارد. ردپای آب مفهومی مبتنی بر مصرف خالص آب است و نه برداشت آن. به بیان دقیق‌تر، ردپای آب تنها آن بخشی از آب را در بر می‌گیرد که در فرایند تولید از دسترس خارج شده است. در مقابل، بخشی از آب برداشت‌شده که پس از آبیاری به منابع آبی بازمی‌گردد (جریان‌های برگشتی)، در محاسبه ردپای آب لحاظ نمی‌شود؛ چرا که ممکن است در آن دوره زمانی قابلیت استفاده مجدد در همان حوزه آبریز را داشته باشد.

به همین ترتیب می‌توان گفت که ردپای آب سبز کل (GWF) به استفاده از بارش طبیعی اشاره دارد. این نوع آب بخشی از چرخه طبیعی آب است و عمدتاً در اراضی دیم مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما در اراضی فاریاب نیز بخشی از نیاز آبی محصول را تأمین می‌کند. مقادیر BWF و GWF که نشان از حجم آب مصرفی آبی و سبز محصولات برحسب m^3 دارند، با توجه به مقادیر ردپای آب آبی واحد (BWF_U)، ردپای آب سبز واحد (GWF_U) و میزان کل تولید هر محصول $P(kg)$ از معادله ۱ و ۲ به دست می‌آیند:

$$BWF = BWF_U \times P \quad (1)$$

$$GWF = GWF_U \times P \quad (2)$$

ردپای آب آبی واحد (BWF_U) به میزان آبی اطلاق می‌شود که در فرایند تولید محصول مصرف شده و دیگر در دسترس حوضه آبریز قرار ندارد (۲۰). این مقدار شامل آبی است که در مراحل مختلف تولید تبخیر شده، وارد ساختار گیاه شده، یا از طریق جریان‌های زیرسطحی و رواناب به حوضه‌های دیگر یا دریا منتقل شده است. در کشاورزی فاریاب، BWF_U نشان‌دهنده آب

آب، فشار مضاعفی بر منابع موجود وارد کرده است. همانند سایر مناطق کشور، تغییر اقلیم نیز پیش‌بینی می‌شود که این چالش‌ها را تشدید کند. انتظار می‌رود که استان مرکزی نیز با کاهش بیشتر در جریان‌های سطحی، افت شدید آب‌های زیرزمینی، شوری خاک و افزایش بروز پدیده‌هایی چون طوفان‌های گردوغبار مواجه شود. با توجه به اتکای شدید همه بخش‌ها به منابع آب سطحی و زیرزمینی، مدیریت کارآمد مصرف آب، پیش‌نیازی اساسی برای پایداری منابع و تدوین سیاست‌های مؤثر به شمار می‌آید.

۲. داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، ۱۸ محصول عمده کشاورزی در ۱۲ شهرستان منطقه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محصولات مورد ارزیابی شامل غلات (گندم، جو و ذرت)، حبوبات (نخود، عدس و لوبیا) و محصولات صنعتی (پنبه، چغندر قند، آفتابگردان و کلزا) هستند. همچنین، گروه سبزی‌ها شامل سیب‌زمینی، پیاز و گوجه‌فرنگی، گروه صیفی‌جات شامل هندوانه و خیار، و گروه علوفه‌ای شامل یونجه، شبدر و ذرت نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. داده‌های کشاورزی و مصرف کود برای کشت آبی و دیم، شامل اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، تولید محصول، عملکرد محصول و میزان مصرف کودهای نیتروژنه و فسفره، از (۱۳) استخراج شده‌اند. علاوه بر این، داده‌های مربوط به راندمان آبیاری از (۱۳) به دست آمده‌اند. داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد از (۱۴) جمع‌آوری شده‌اند. دوره زمانی داده‌ها مربوط به سال زراعی - آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ است: به‌طوری که داده‌های کشاورزی و مصرف کود به صورت سالانه و داده‌های هواشناسی به صورت روزانه گردآوری شده‌اند. داده‌های کشاورزی و مصرف کود در سطح شهرستانی در دسترس بوده‌اند و داده‌های هواشناسی نیز از ایستگاه‌های هواشناسی مستقر در هر شهرستان جمع‌آوری و به منظور نمایش شرایط اقلیمی هر شهرستان، در همان مقیاس تجمیع شده‌اند.

محاسبه می‌شود. در معادلات ۴ و ۶ عدد ۱۰ برای تبدیل مقادیر تبخیر و تعرق آبی و سبز از mm/day به m³/ha استفاده شده است.

ET_{Blue} و ET_{Green} با توجه به مدل هوکسترا (۱۰) و از معادلات ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند. این معادلات امکان تفکیک تبخیر و تعرق به اجزای سبز و آبی را فراهم می‌کنند. این تمایز برای درک سهم بارش طبیعی و آبیاری در تأمین نیاز آبی محصول ضروری است.

$$ET_{Blue} = \max(0, ET_C - P_{eff}) \quad (۷)$$

$$ET_{Green} = \min(ET_C, P_{eff}) \quad (۸)$$

در این معادلات تبخیر - تعرق محصول (ET_C) و بارش مؤثر (P_{eff}) برحسب mm/day هستند. تبخیر - تعرق مرجع (ET₀) و ET_C با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 برآورد شدند. ET₀ با استفاده از روش پنمن - مانتیث به عنوان گسترده‌ترین روش برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع (۱۲) و ET_C بر اساس ET₀ و نوع و مرحله رشد خاص گیاه، با استفاده از ضرایب گیاهی مندرج در مدل CROPWAT تعیین شدند. داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد برای این محاسبات استفاده شد. همچنین P_{eff} (بخش در دسترس بارندگی برای گیاه با فرض تلفات رواناب و تبخیر) (۷) بر اساس داده‌های هواشناسی از روش توصیه‌شده توسط FAO محاسبه شد.

۲.۳. ردپای آب خاکستری

در این مطالعه، ردپای آب خاکستری واحد (GRWF_U) با استفاده از روش ارائه‌شده توسط (۱۰) محاسبه شد. GRWF_U نمایانگر حجم آب شیرینی است که برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها به منظور رعایت استانداردهای کیفیت آب مورد نیاز است. این محاسبه شامل حجم آبی است که برای کاهش غلظت آلاینده‌ها، عمدتاً ناشی از نهاده‌های کشاورزی مانند نیترژن (در فرم نیترات) و فسفر کل، تا سطوح قابل قبول، ضروری است.

محاسبه GRWF_U متغیرهای متعددی را در بر می‌گیرد که شامل نرخ کاربرد کود (AR)، غلظت طبیعی آلاینده در بدنه آبی

آبیاری مصرف‌شده توسط گیاهان است؛ درحالی‌که در اراضی دیم این مقدار برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

ردپای آب سبز واحد (GWF_U) نیز به حجم بارندگی مؤثر اشاره دارد که در خاک ذخیره شده و توسط گیاه از طریق تبخیر - تعرق (ET_C) مصرف شده یا در تولید محصول برداشت شده نقش داشته است. در هر دو نوع زراعت آبی و دیم، GWF_U نشان‌دهنده مقدار آبی است که به صورت باران توسط گیاه مصرف می‌شود.

مقادیر BWF_U و GWF_U به تفکیک برای هر محصول با استفاده از مدل ارائه شده توسط هوکسترا (۱۰) و از معادلات ۳ و ۵ محاسبه می‌شوند. مقادیر BWF_U و GWF_U با در نظرگیری نسبت میزان حجم آب آبی مصرفی گیاه در واحد سطح (CWU_{Blue}) و آب سبز مصرفی گیاه در واحد سطح (CWU_{Green}) به‌ازای عملکرد گیاه (Y) محاسبه می‌شوند. عملکرد در این محاسبات برای ارزیابی میزان آبی که برای تولید هر واحد محصول نیاز است، در نظر گرفته می‌شود. این امر درک بهتری از مصرف آب در ارتباط با تولید محصول فراهم می‌آورد که برای ارزیابی کارایی استفاده از آب در سیستم‌های کشاورزی مهم است. مقادیر CWU_{Blue} و CWU_{Green} نیز به ترتیب از معادلات ۴ و ۶ محاسبه می‌شوند.

$$BWF_U = \frac{CWU_{Blue}}{Y} \quad (۳)$$

$$CWU_{Blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{lg p} ET_{Blue} \quad (۴)$$

$$GWF_U = \frac{CWU_{Green}}{Y} \quad (۵)$$

$$CWU_{Green} = 10 \times \sum_{d=1}^{lg p} ET_{Green} \quad (۶)$$

در معادلات فوق BWF_U و GWF_U برای هر محصول برحسب m³/kg، CWU_{Blue} و CWU_{Green} برحسب m³/ha و Y برحسب kg/ha هستند. گفتنی است که برای محصولات دیم، BWF_U و به تبع آن CWU_{Blue} برابر با صفر است. همچنین CWU_{Blue} و CWU_{Green} با توجه به مجموع تبخیر - تعرق سبز (ET_{Green}) و تبخیر - تعرق آبی (ET_{Blue}) هر گیاه در طول فصل رشد (lgp)

که نشان‌دهنده اهمیت آن عامل است. همه مقادیر، به‌جز نرخ کاربرد و عملکرد محصول، برای کل منطقه ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این ساده‌سازی به دلیل نبود داده‌های دقیق مکانی برای برخی پارامترها و بر اساس توصیه‌های منبع (۱۰) انجام شده است. پس از تعیین وضعیت هر عامل، ضریب آبشویی α با استفاده از معادله ۹ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \alpha_{\min} + \left[\frac{\sum_i (s_i \times w_i)}{\sum_i w_i} \right] \times (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \quad (9)$$

مقدار α در بازه‌ای بین کمینه و بیشینه مقدار ممکن خود قرار می‌گیرد. برای نیتروژن، α بین ۰/۰۱ تا ۰/۲۵ و برای فسفر بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. مقادیر $\alpha_{\max}$ و $\alpha_{\min}$ نمایانگر کمترین و بیشترین پتانسیل آبشویی آلاینده‌ها تحت شرایط محیطی مختلف هستند. درنهایت بر اساس مقادیر α به‌دست‌آمده، $GRWF_U$ برای هر یک از محصولات زراعی در شرایط فاریاب و دیم، با بهره‌گیری از معادله ۱۰ محاسبه شد.

$$GRWF_U = \frac{AR \times \alpha}{C_{\max} - C_{nat}} \times \frac{1}{Y} \quad (10)$$

که در آن، مقدار AR برحسب kg/ha ، ضریب α بدون واحد (بی‌بعد) و مقادیر $C_{\max}$ و C_{nat} برحسب kg/m^3 بیان می‌شوند. همچنین همانند ردپای آب سبز و آبی، می‌توان مقادیر ردپای آب خاکستری کل ($GRWF$) را نیز با توجه به مقادیر تولید P از معادله ۱۱ برحسب m^3 محاسبه کرد.

$$GRWF = GRWF_U \times P \quad (11)$$

نتایج و بحث

۱. ردپای آب واحد

در این بخش، مقادیر ردپای آب واحد برای محصولات منتخب در سطح شهرستانی مورد بررسی قرار گرفته است. ردپای آب شامل مؤلفه‌های آبی، سبز و خاکستری بوده و برای ۱۸ محصول زراعی در ۱۲ شهرستان استان در دو نوع کشت فاریاب و دیم تحلیل شده است.

(C_{nat})، بیشینه غلظت قابل قبول ($C_{\max}$) و ضریب آبشویی (α) است. AR به مقدار کودی اطلاق می‌شود که به زمین زراعی اعمال شده و برای کودهای نیتروژن و فسفر، به تفکیک برای هر محصول در هر شهرستان منطقه مورد مطالعه لحاظ شده است. C_{nat} در یک بدنه آبی، غلظتی است که در صورت نبود هرگونه مداخله انسانی در حوضه آبخیز انتظار می‌رود. برای مواد شیمیایی مصنوعی که به‌طور طبیعی در آب وجود ندارند، مقدار C_{nat} برابر صفر فرض می‌شود. همچنین در مواردی که اطلاعات دقیق از مقدار C_{nat} در دسترس نباشد، اما برآورد می‌شود که مقدار آن اندک باشد، می‌توان به‌منظور سادگی، مقدار آن را صفر در نظر گرفت که در این مطالعه نیز چنین فرضی اتخاذ شده است. افزون بر این، مقدار $C_{\max}$ در منابع آبی، بر اساس استانداردهای سازمان $CCME$ کانادا برای نیتروژن و فسفر به‌ترتیب برابر با ۱۳ و ۰/۱ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

ضریب آبشویی (α) حاصل تأثیر عوامل متعددی است و یک ویژگی ذاتی ماده شیمیایی، خاک یا روش کاربرد ماده در مزرعه به شمار نمی‌رود. برای نیتروژن، مقدار α مطابق با دستورالعمل‌های ارائه‌شده توسط (۱۰) تعیین شد. در این دستورالعمل‌ها، دسته‌بندی‌هایی برای عوامل مؤثر بر نسبت آبشویی - رواناب در نظر گرفته شده است.

در خصوص نیتروژن، عوامل زیست‌محیطی شامل ویژگی اتمسفر، ویژگی‌های خاک و شرایط اقلیمی و همچنین عوامل مربوط به فعالیت کشاورزی شامل تثبیت نیتروژن، نرخ کاربرد، عملکرد محصول و مدیریت، مد نظر قرار گرفته‌اند. از آنجا که عوامل مؤثر بسته به ماده شیمیایی اندکی متفاوت است، برای فسفر، تنها عوامل زیست‌محیطی (ویژگی‌های خاک و اقلیم) و عوامل کشاورزی شامل نرخ کاربرد، عملکرد محصول و مدیریت در نظر گرفته شده‌اند. برای هر یک از عوامل فوق i ، یک امتیاز s بین صفر تا یک برای پتانسیل آبشویی - رواناب، بر اساس وضعیت آن عامل (از بسیار کم تا بسیار زیاد) اختصاص می‌یابد. همچنین وزن w برای هر عامل لحاظ می‌شود

۱.۱. ردپای آب آبی و سبز

بررسی مقادیر BWF_U (شکل ۲) نشان می‌دهد که این شاخص در مناطق مختلف استان مرکزی دارای تغییرات قابل توجهی است. برای نمونه، در بین شهرستان‌ها، محصول پیاز کمترین اختلاف و محصول عدس بیشترین تفاوت را تجربه کرده‌اند؛ به‌طوری که فاصله بین کمینه و بیشینه مقدار این شاخص به ترتیب به حدود ۴۰ و ۹۶ درصد می‌رسد. چنین اختلاف‌هایی بیانگر نقش قابل توجه عوامل مکانی، از جمله شرایط اقلیمی و شیوه‌های کشت، در تعیین میزان مصرف آب آبی هستند.

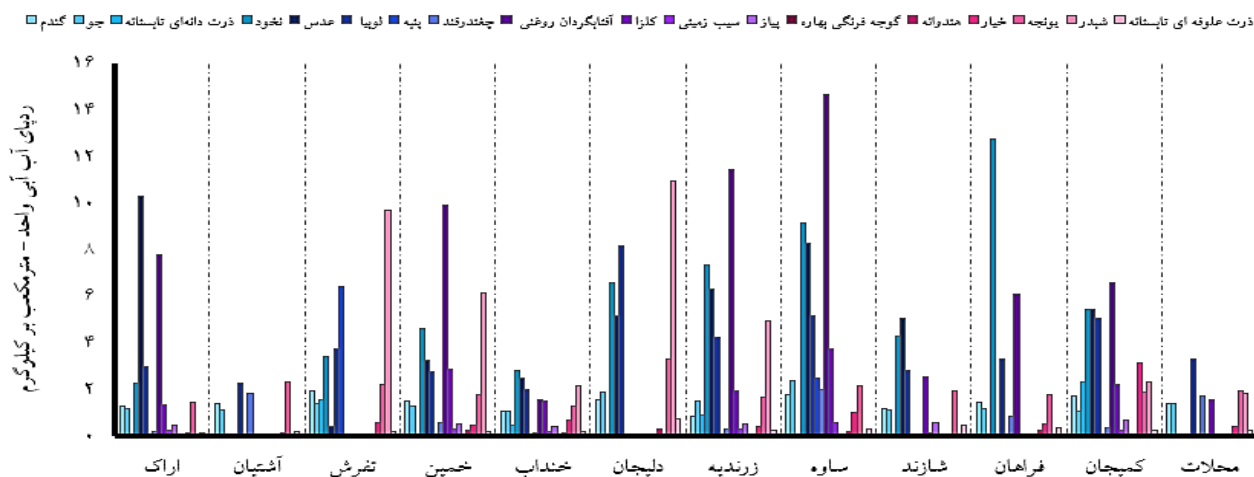
تأثیر اقلیم بر این شاخص را می‌توان با مقایسه بین شهرستان‌هایی مانند ساوه و شازند به‌خوبی دید. شازند با داشتن اقلیم سردتر و بارندگی بیشتر (شکل ۱-ب)، مقدار کمتری از CWU_{Blue} (شکل ۳) و در نتیجه BWF_U را ثبت کرده است (شکل ۲). در مقابل، ساوه با اقلیمی گرم‌تر و کم‌بارش‌تر (شکل ۱-ب)، به دلیل افزایش تبخیر و کاهش تأمین آب از بارش، به مقادیر بیشتری از BWF_U دست یافته است (شکل ۲).

اما تفاوت‌ها تنها به اقلیم محدود نمی‌شود. عملکرد محصول نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. حتی در شرایطی که CWU_{Blue} در بین دو منطقه تقریباً یکسان است، اختلاف در عملکرد می‌تواند باعث ایجاد تفاوت در BWF_U شود. به عنوان نمونه، در محصول گندم بین شهرستان‌های اراک و تفرش، یا در آفتابگردان بین فراهان و خمین، باوجود مقادیر CWU_{Blue} مشابه (شکل ۳)، عملکرد بیشتر در اراک و فراهان منجر به کاهش قابل توجه BWF_U شده است. نمونه دیگر، مربوط به ذرت علوفه‌ای است که در ساوه باوجود CWU_{Blue} بیشتر نسبت به دلیجان (شکل ۳)، عملکرد بیشتر باعث شده مقدار BWF_U در ساوه کمتر باشد. علاوه بر تفاوت‌های بین شهرستان‌ها، اختلافات معناداری نیز در میان محصولات مختلف در هر منطقه دیده می‌شود؛ به‌طوری که در یک شهرستان، فاصله بین بیشترین و کمترین مقدار BWF_U ممکن است تا ۹۸ درصد برسد (شکل ۲). این موضوع بیانگر اثرپذیری شدید این شاخص از نوع محصول

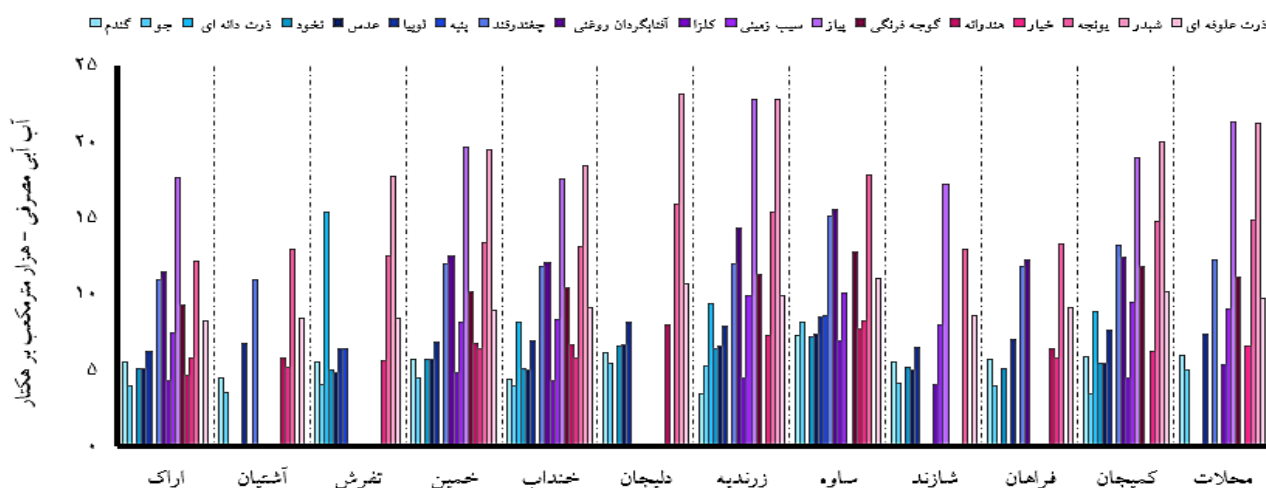
است. محصولاتی مانند چغندرقد، شبدر، یونجه، آفتابگردان، ذرت و گوجه‌فرنگی، عموماً دارای مقادیر زیاد CWU_{Blue} هستند. بخشی از این میزان ناشی از دوره رشد طولانی‌تر این محصولات و هم‌زمانی آنها با ماه‌های گرم و کم‌بارش سال است که نیاز آنها به آب آبی را افزایش می‌دهد. در مقابل، محصولات پاییزه یا بهار مانند عدس، نخود، گندم، جو و کلزا به دلیل رشد در فصول خنک‌تر و مرطوب‌تر، به‌طور متوسط CWU_{Blue} کمتری دارند. برای نمونه، یونجه به دلیل چندچین بودن و فصل رشد طولانی، دارای CWU_{Blue} قابل توجهی است (شکل ۳).

نوع محصول همچنین عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای نمونه، اگرچه چغندرقد از لحاظ CWU_{Blue} جزء محصولات پرمصرف است، اما عملکرد زیاد آن منجر به کاهش مقدار BWF_U می‌شود. در مقابل، محصولاتی مانند شبدر، یونجه و ذرت دانه‌ای که با وجود CWU_{Blue} زیاد، عملکرد کمتری دارند، منجر به افزایش مقدار BWF_U می‌گردند (شکل ۲ و ۳). در نتیجه، ترکیب عوامل اقلیمی، نوع محصول و میزان عملکرد منجر به شکل‌گیری الگوهای متفاوتی از BWF_U در سطح منطقه‌ای می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت مصرف آب تنها از طریق کاهش CWU_{Blue} ممکن نیست؛ بلکه باید به با اقدامات مؤثر به‌زراعی در بهبود عملکرد نیز توجه ویژه داشت. همچنین، در مورد محصولاتی که با وجود عملکرد زیاد، دارای CWU_{Blue} قابل توجهی هستند، در صورتی که سطح زیر کشت آنها کنترل نشود، مجموع BWF_U در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند بسیار زیاد باشد؛ بنابراین، تحلیل BWF_U باید با در نظر گرفتن هم‌زمان مؤلفه‌های اقلیمی، ویژگی‌های فیزیولوژیکی محصول، فصل رشد و بهره‌وری تولید انجام شود.

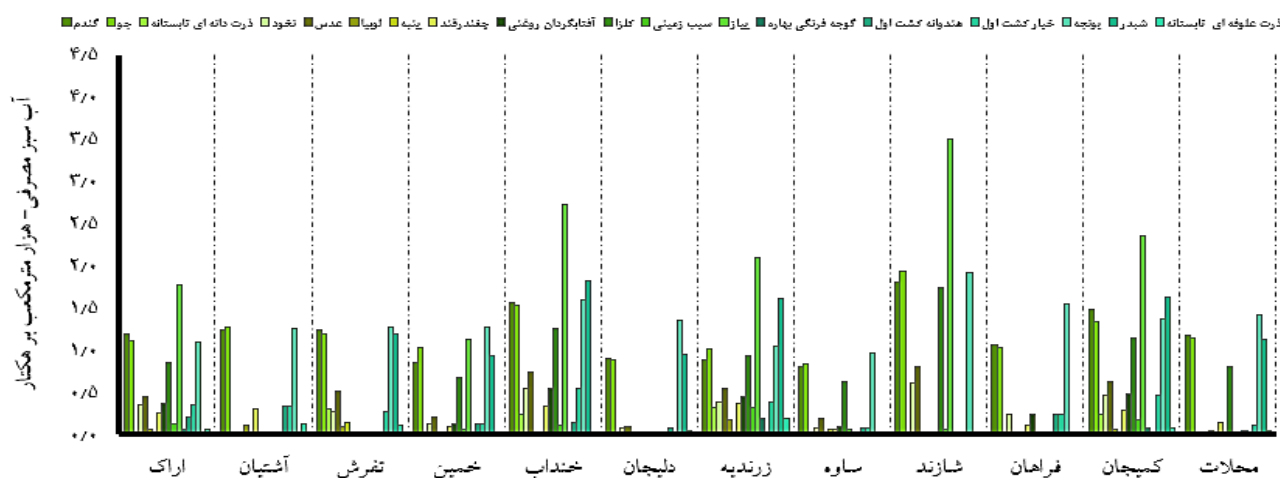
الگوهای CWU_{Green} (شکل ۴) و GWF_U (شکل ۵) در سطح شهرستان‌های استان و برای محصولات به‌طور عمده تحت تأثیر بارندگی سالانه و توزیع مکانی آن (شکل ۱-ب) قرار دارند. بارش نه تنها منبع اصلی تأمین نیاز آبی سبز گیاهان محسوب می‌شود، بلکه از طریق تغییر در توزیع زمانی، شدت و فراوانی، سهم مؤثری در کاهش یا افزایش GWF_U ایفا می‌کند.



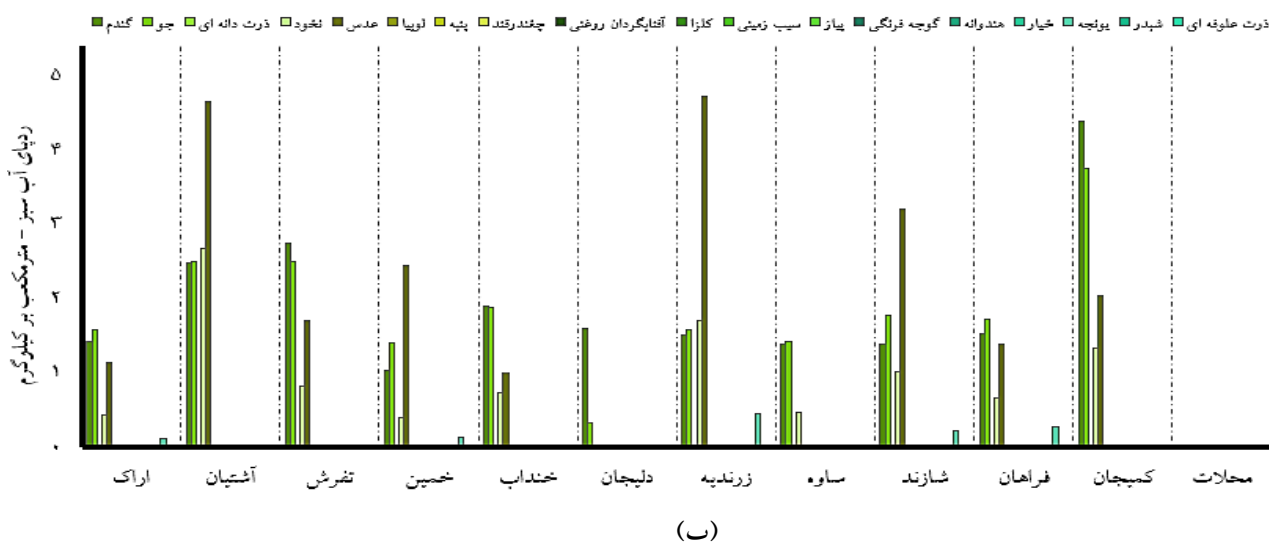
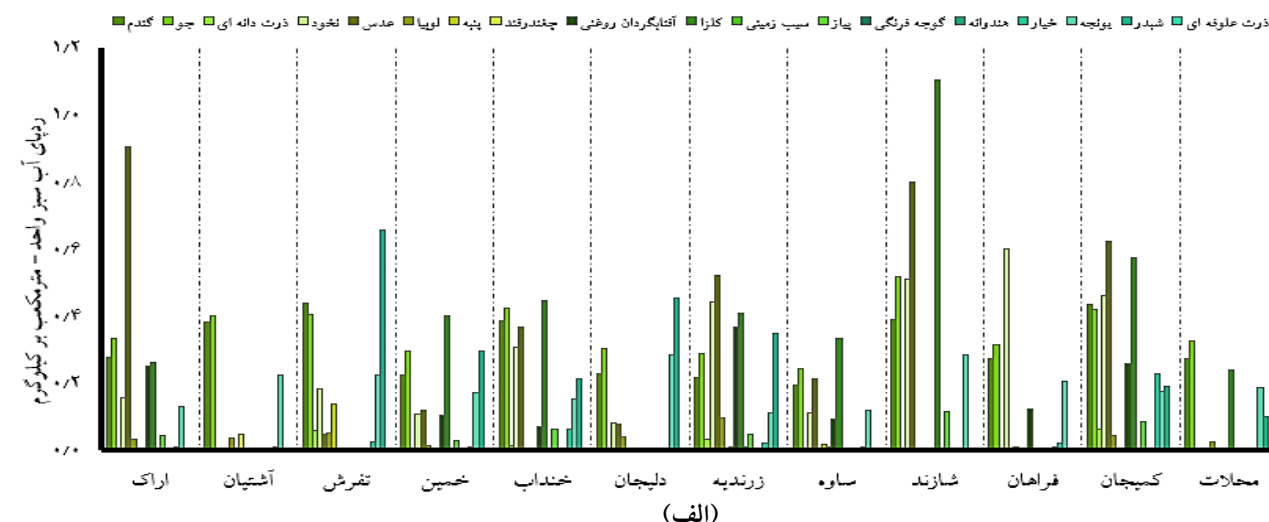
شکل ۲. ردیای آب آبی واحد (BWFu) برای محصولات و شهرستانها



شکل ۳. مصرف آب آبی (CWUBlue) برای محصولات و شهرستانها



شکل ۴. مصرف آب سبز (CWUGreen) برای محصولات و شهرستانها



شکل ۵. ردپای آب سبز واحد (GWF_U), (الف) برای محصولات و شهرستان‌ها در اراضی فاریاب و (ب) برای محصولات و شهرستان‌ها در اراضی دیم

و پاییزه چون گندم، جو، کلزا، عدس، نخود که فصل رشدشان هم‌زمان با ماه‌های مرطوب‌تر است، از سهم بیشتری از آب سبز بهره‌مند می‌شوند (شکل ۴). در مقابل، گیاهانی که عمدتاً در دوره‌های خشک‌تر رشد می‌کنند، با وجود حضور در مناطق پر بارش، (مانند ذرت علوفه‌ای در شازند) ممکن است از آب سبز کمتری بهره‌مند شده و ردپای بیشتری ثبت کنند. همچنین محصولات با دوره رشد طولانی‌تر چون یونجه، مقادیر بیشتری از CWU_{Green} را به ثبت رسانده‌اند. در نهایت، همان‌گونه که BWF_U متأثر از تعامل بین اقلیم، نیاز آبی و عملکرد محصول

مقایسه مقادیر در نقاط مختلف استان نشان می‌دهد که مناطق پر بارش‌تر غربی چون شازند، خنداب و کمپجان، به‌واسطه دریافت آب بیشتر از طریق بارندگی، مقادیر بیشتری از CWU_{Green} را نسبت به شهرستان‌هایی چون ساوه و زرنديه دارند (شکل ۴). مشابه با آنچه در تحلیل BWF_U دیده شد، عوامل اقلیمی، دوره رشد، نوع محصول و عملکرد در واحد سطح نیز در تبیین تفاوت‌های مکانی این شاخص‌ها نقش دارند. به‌ویژه نوع محصول و زمان‌بندی فصل رشد آن در نسبت‌گیری مؤثر از بارندگی تأثیرگذار است؛ به‌گونه‌ای که محصولات بهاره

عملکرد زیاد در شهرستان‌های اراک، خنداب و محلات باعث کاهش $GRWF_U$ در عمده محصولات در این شهرستان‌ها شده است (شکل ۷-الف).

از سویی با وجود زیاد بودن مقادیر عملکرد متوسط در زرنديه، در عمده محصولات مانند نخود، عدس، آفتابگردان، خیار و ذرت علوفه‌ای عملکرد کم بوده و باعث افزایش $GRWF_U$ شده است (شکل ۶-الف و ۷-الف). این تأثیر همچنین در تعیین ضریب آبشویی (α) نیز دیده می‌شود؛ جایی که سایر پارامترها برای کل مناطق یکسان در نظر گرفته شده‌اند. عامل دوم، مصرف کود در هر منطقه است. در مناطقی که مصرف کود بیشتر است، به‌ویژه در خاک‌های فقیر، احتمال تولید بار آلودگی و افزایش $GRWF_U$ بیشتر می‌شود. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که کشاورزان برای افزایش عملکرد محصولات خود از کودهای شیمیایی بیش‌ازحد استفاده می‌کنند، اهمیت می‌یابد. چنین شرایطی در شهرستان ساوه دیده می‌شود که با وجود عملکرد زیاد در این شهرستان (شکل ۷-الف)، به علت مصرف کود زیاد (شکل ۷-ب)، مقادیر $GRWF_U$ در عمده محصولات بیشتر از سایر شهرستان‌هاست.

در سطح بین‌محصولی نیز، تفاوت‌های قابل‌توجهی در مقادیر $GRWF_U$ دیده می‌شود (شکل ۶-الف). محصولات زراعی مانند گوجه‌فرنگی، خیار، پنبه، لوبیا، چغندر، سیب‌زمینی، ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای در مقایسه با سایر محصولات، حجم بیشتری از آب خاکستری (بدون در نظرگیری عملکرد) دارند (شکل ۸-الف). این تفاوت عمدتاً به دلیل استفاده بیشتر از کود در این محصولات است (شکل ۸-ب)؛ چرا که این محصولات عمدتاً به دلیل نیاز تغذیه‌ای زیاد، پتانسیل افزایش عملکرد و نقش اقتصادی، بیشتر از سایر محصولات کود دریافت می‌کنند (شکل ۸-ب). با این حال، در بررسی اثرهای عملکرد روی $GRWF_U$ ، به نظر می‌رسد پتانسیل افزایش عملکرد در ازای همه محصولات وجود نداشته و تنها برخی از این محصولات، مانند چغندر، سیب‌زمینی و ذرت علوفه‌ای، به دلیل عملکرد زیاد (شکل ۸-ج)، در نهایت $GRWF_U$ کمتری دارند.

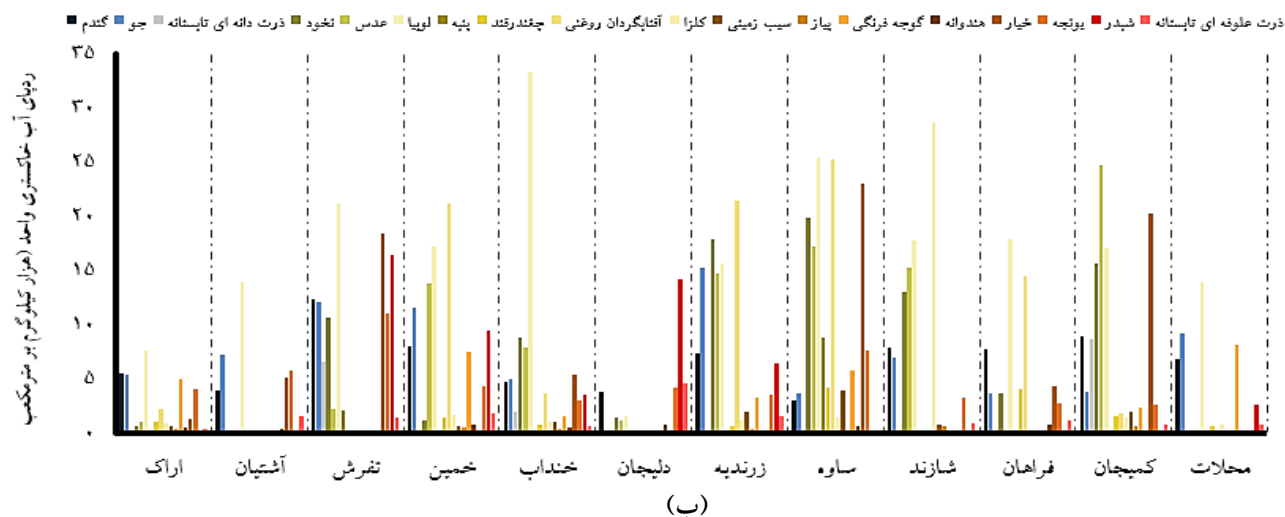
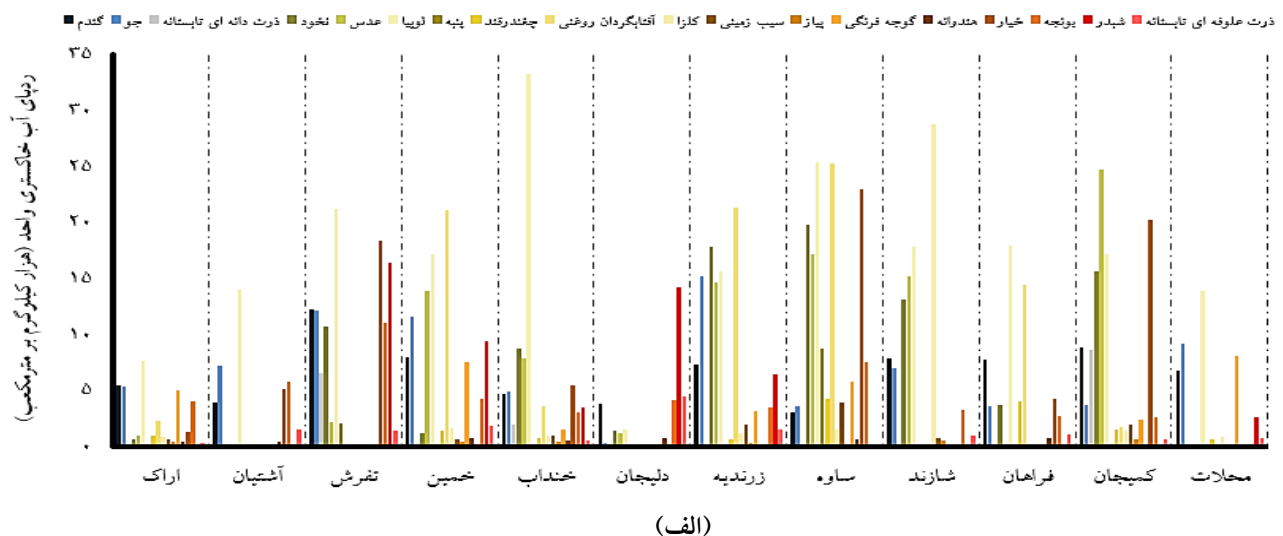
بود، GWF_U نیز بازتابی از برهم‌کنش میان بارندگی، ویژگی‌های فیزیولوژیک محصول و میزان عملکرد است. این موضوع می‌تواند در استفاده بیشتر گیاه از آب سبز و کاهش BWF_U مؤثر باشد.

مقایسه مقادیر GWF_U در محصولات فاریاب (شکل ۵-الف) و دیم (شکل ۵-ب) نشان می‌دهد که در شرایط دیم، با وجود مشابهت در میزان CWU_{Green} ، GWF_U دیم به‌طور قابل توجهی بیشتر از شرایط فاریاب است. این تفاوت عمدتاً ناشی از عملکرد کمتر محصولات در کشت دیم است. به عنوان نمونه، برای محصول عدس در شهرستان زرنديه، مقدار GWF_U در کشت دیم به $4/7$ واحد رسیده (شکل ۵-ب)؛ درحالی که در همان منطقه، این مقدار برای عدس فاریاب تنها $0/52$ حاصل شده است (شکل ۵-الف). این اختلاف چشمگیر تأکیدی است بر نقش محدودکننده مدیریت ضعیف، بهره‌گیری کمتر از نهاده‌ها و سطح رسیدگی ناکافی در نظام‌های دیم که موجب کاهش بهره‌وری و افزایش GWF_U در این مناطق شده است.

۲.۱. ردپای آب خاکستری

در کنار مؤلفه‌های سبز و آبی، $GRWF_U$ به عنوان شاخصی برای میزان آبی که برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها و رسیدن به سطح استاندارد کیفی منابع آبی مورد نیاز است، اهمیت دارد. مقادیر این شاخص برای هر محصول، به تفکیک کشت فاریاب و دیم، در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب ارائه شده‌اند.

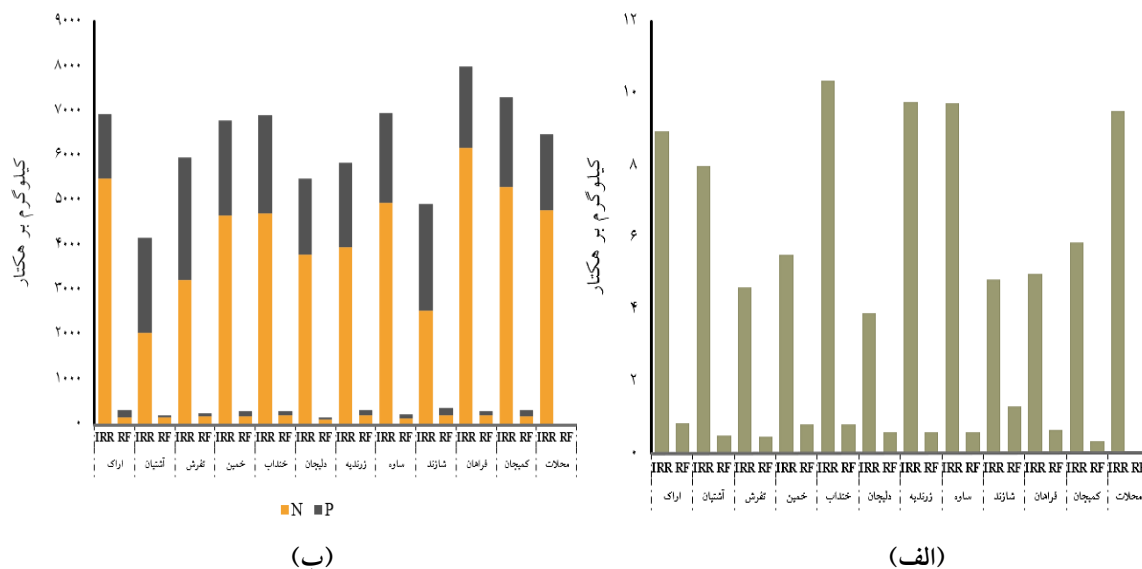
در بررسی مقادیر $GRWF_U$ فاریاب در سطح شهرستان‌ها، دیده می‌شود که این شاخص از نظر مکانی تفاوت‌های قابل‌توجهی دارد. برای نمونه، بیشترین مقادیر ردپای آب خاکستری در شهرستان‌های ساوه و شازند ثبت شده‌اند (شکل ۶-الف)؛ درحالی که کمترین مقادیر در اراک و دلیجان دیده می‌شود. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از دو عامل اصلی است. نخست، عملکرد محصول که به‌طور مستقیم در معادله (۱۰) بر مقدار $GRWF_U$ تأثیر می‌گذارد. به‌طوری که اگر عملکرد میانگین به عنوان نمایه‌ای از هر شهرستان در نظر گرفته شود، مقادیر



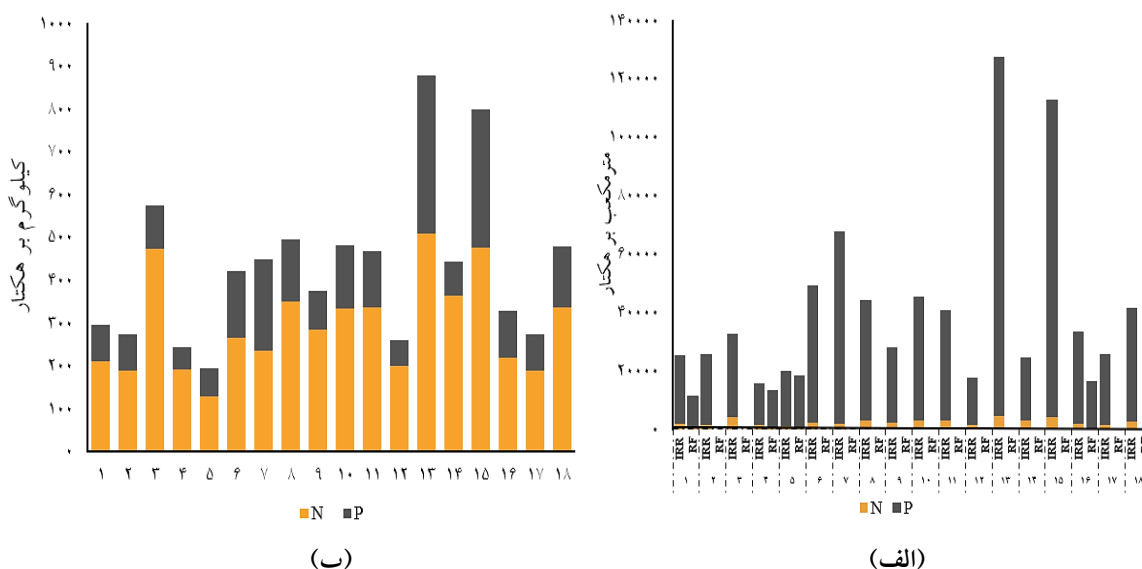
شکل ۶. ردپای آب خاکستری واحد ($GRWF_U$), (الف) برای محصولات و شهرستان‌ها در اراضی فاریاب و (ب) برای محصولات و شهرستان‌ها در اراضی دیم

همچنین مقادیر $GRWF_U$ در این تحلیل‌ها ناشی از مصرف کودهای نیتروژن و فسفر است. در این میان، اهمیت کود فسفر بیشتر از نیتروژن است؛ چرا که فسفر به دلیل حساسیت زیست‌محیطی بیشتر و استانداردهای مجاز سخت‌گیرانه‌تر در منابع آبی (مقادیر C_{max} کمتر)، تأثیر بیشتری در افزایش $GRWF_U$ دارد. این تأثیر در محصولات فاریاب و دیم روی حجم آب خاکستری (بدون در نظرگیری عملکرد) به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۸-الف)؛ بنابراین صرف نظر مقدار کود مصرفی، نوع کود مصرفی نیز اهمیت دارد. چرا که با وجود مقدار کود

افزون بر آن با توجه به اینکه کشاورزی دیم معمولاً با مشکلاتی همچون عدم مدیریت بهینه و رسیدگی کمتر به محصولات همراه است، از این رو مطابق انتظار کود کمتری در این نوع کشت کاربرد دارد (شکل ۷-ب). در این شرایط تفاوت‌های قابل توجه در مقادیر $GRWF_U$ بین محصولات فاریاب و دیم دیده می‌شود (شکل‌های ۶-الف و ۶-ب). این تفاوت‌ها می‌تواند به علت کاربرد کود کمتر (شکل ۷-ب) و پتانسیل افزایش عملکرد کمتر (شکل ۸-ج) محصولات در کشت دیم نسبت به فاریاب باشد که اثر مستقیم بر افزایش $GRWF_U$ باشد.



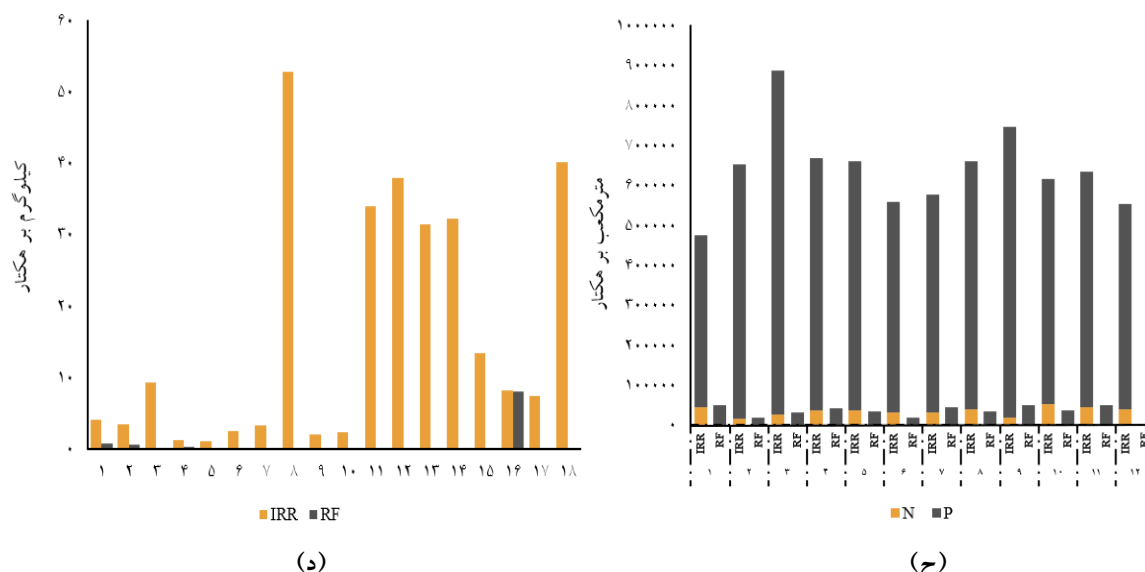
شکل ۷. (الف) میانگین عملکرد محصولات در هر شهرستان برای کشت فاریاب (IRR) و دیم (RF)، و (ب) کود مصرفی نیتروژن (N) و فسفر (P) در هر هکتار (AR) در هر شهرستان برای کشت فاریاب (IRR) و دیم (RF)



شکل ۸. تغییرات عوامل اثرگذار بر رد پای آب خاکستری (حجم آب خاکستری و کود مصرفی نیتروژن (N) و فسفر (P) و عملکرد) به تفکیک محصولات ۱۸ گانه فاریاب (IRR) و دیم (RF) یا شهرستان‌های ۱۲ گانه استان. (الف) حجم آب خاکستری محصولات، (ب) کود مصرفی (AR) محصولات فاریاب، (ج) میانگین استانی عملکرد محصولات و (د) حجم آب خاکستری در هر شهرستان

باید به این نکته توجه کرد که مقادیر $GRWF_U$ به طور کل مقادیر زیادی را نشان می‌دهد و در بسیاری از محصولات و شهرستان‌ها غالباً از مقادیر BWF_U نیز بیشتر است (شکل‌های ۶-الف، ۶-ب و ۲). این نکته نشان‌دهنده آن است که اثرهای ناشی

کمتر مصرف‌شده (شکل ۷-ب) در شازند نسبت به ساوه، به علت درصد مشارکت بیشتر کود فسفر در این شهرستان نسبت به ساوه (شکل ۸-ب)، موجب بیشتر بودن حجم آب خاکستری (بدون در نظرگیری عملکرد) شده است (شکل ۸-د).



شکل ۸. تغییرات عوامل اثرگذار بر ردپای آب خاکستری (حجم آب خاکستری و کود مصرفی نیتروژن (N) و فسفر (P) و عملکرد) به تفکیک محصولات ۱۸ گانه فاریاب (IRR) و دیم (RF) یا شهرستان‌های ۱۲ گانه استان. (الف) حجم آب خاکستری محصولات، (ب) کود مصرفی (AR) محصولات فاریاب، (ج) میانگین استانی عملکرد محصولات و (د) حجم آب خاکستری در هر شهرستان (ادامه شکل ۸)

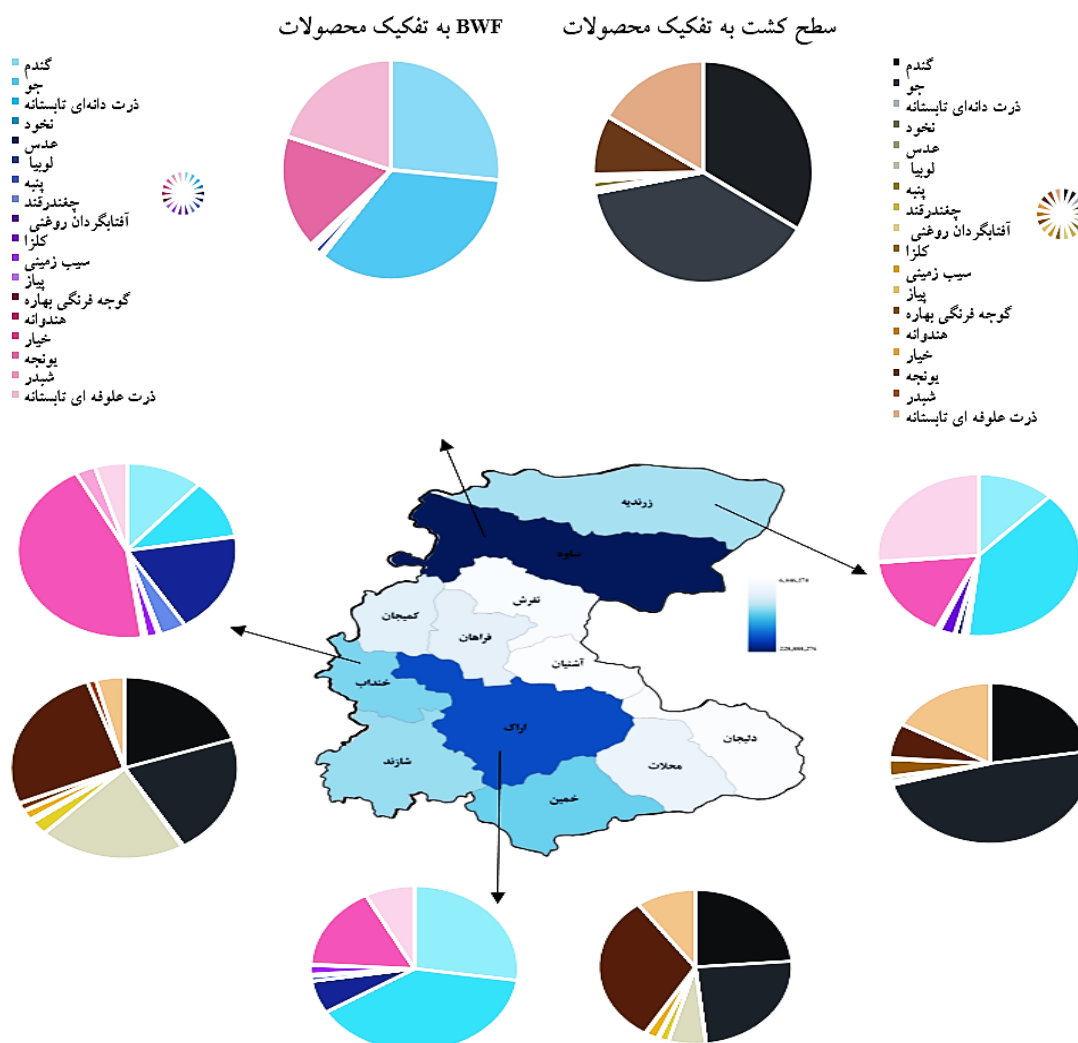
۹، شهرستان‌های ساوه (۲۲۹ MCM)، اراک (۱۸۷ MCM) و خمین (۱۱۳ MCM) به ترتیب بیشترین، و شهرستان‌های آشتیان (۶ MCM)، دلیجان (۱۰ MCM) و تفرش (۱۴ MCM) کمترین حجم مصرف آب آبی مصرفی را دارند. این الگو با سطح زیر کشت فاریاب این شهرستان‌ها (شکل ۱۰) سازگار است و افزایش سطح کشت موجب افزایش BWF می‌شود. با این حال، با وجود سطح زیر کشت فاریاب بیشتر در اراک نسبت به ساوه، میزان BWF در اراک کمتر است (شکل ۹) که این اختلاف عمدتاً ناشی از ترکیب متفاوت محصولات و سهم بیشتر گندم، جو و ذرت علوفه‌ای در سطح کشت ساوه است. این محصولات در ساوه نسبت به اراک BWF بیشتری را دارند یا به طور کل می‌توان گفت مقادیر BWF ساوه در بیشتر محصولات بیشتر از اراک است. همین موضوع در افزایش BWF در ساوه نقش دارد. روند مشابهی در مقایسه شهرستان‌های خنداب و زرنده نیز دیده می‌شود؛ به طوری که با وجود سطح زیر کشت فاریاب کمتر در خنداب (شکل ۱۰)، به دلیل سهم زیاد لوبیا و یونجه در سطح کشت، مقدار BWF نسبت به زرنده بیشتر است (شکل ۹).

از آلودگی منابع آبی، به‌ویژه به‌واسطه مصرف نهاده‌های شیمیایی، در برخی مناطق ممکن است بیشتر از مصرف خود آب باشد. به عبارت دیگر، حتی اگر میزان مصرف آب آبی در برخی مناطق کمتر باشد، اثرهای منفی آلودگی ناشی از $GRWF_U$ می‌تواند تهدیدی جدی برای کیفیت منابع آبی محسوب شود. به همین دلیل، مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها و کاهش آلاینده‌ها باید در اولویت قرار گیرد؛ چرا که این امر نه تنها برای حفظ کیفیت منابع آب بلکه برای کاهش آسیب‌های محیطی در کشاورزی و منابع آبی ضروری است.

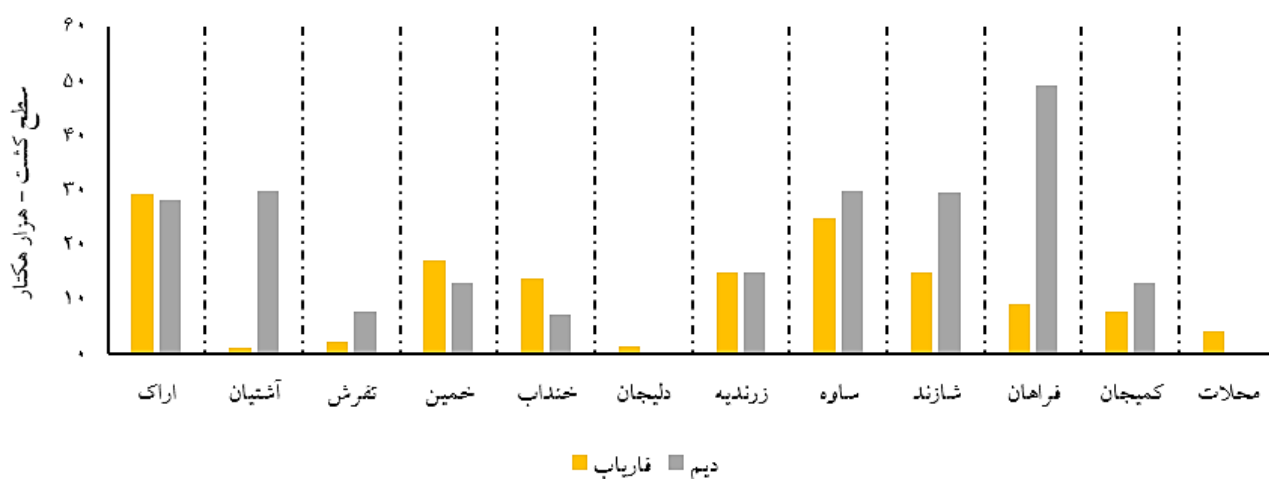
۲. ردپای آب کل

۲.۱. آبی و سبز

پس از محاسبه ردپای آب آبی واحد (BWF_U) و سبز واحد (GWF_U) برای هر واحد محصول، و با لحاظ کردن مقادیر تولید، میزان ردپای آب آبی کل (BWF) و سبز کل (GWF) برای شرایط فعلی استان مرکزی به تفکیک شهرستان محاسبه شد. مطابق شکل



شکل ۹. ردپای آب آبی کل (BWF) در سطح استان و مقادیر تفکیک شده BWF و سطح کشت برحسب محصولات



شکل ۱۰. سطح زیر کشت کل محصولات در هر شهرستان - فاریاب و دیم

دلیل وجود بارندگی در دوره رشد محصولات، سهمی از GWF کل در هر شهرستان به این اراضی تعلق می‌گیرد که این موضوع می‌تواند به کاهش وابستگی به آب آبی کمک کند. اما همانند محصولات فاریاب، در کشت دیم نیز انتخاب نوع محصول و منطقه کشت نیز می‌تواند در استفاده از آب سبز اثر زیادی داشته باشد. برای نمونه شهرستان خمین، با وجود میزان بارندگی و سطح کشت دیم بیشتر نسبت به کمیجان (شکل ۱۰)، به دلیل مقادیر CWU_{Green} کمتر (شکل ۴)، اختلاف قابل توجه در میزان GWF دیم با کمیجان داشته و کمتر است (شکل ۱۱-ب).

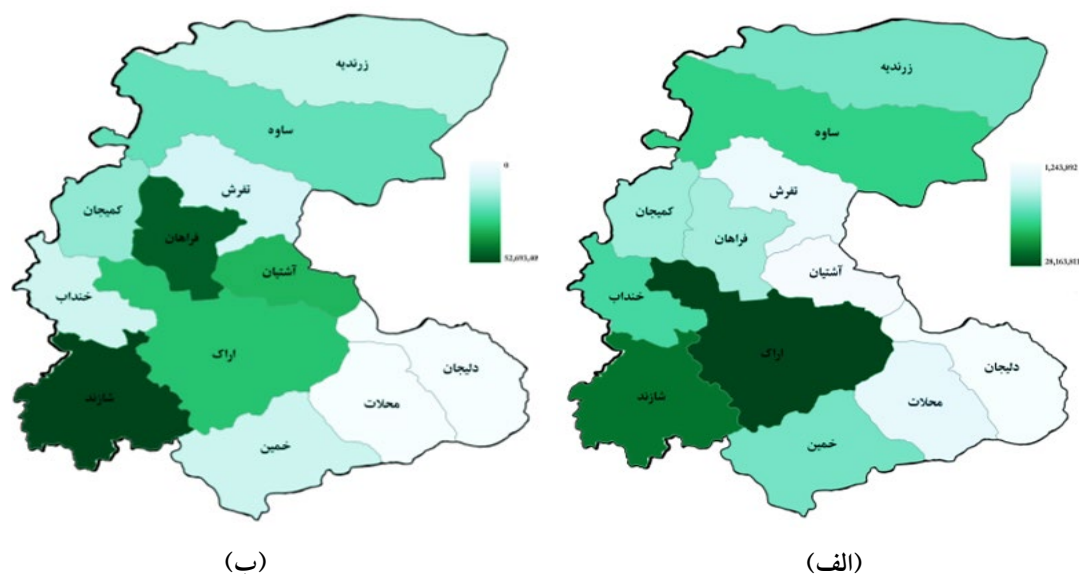
اما صرف نظر از عوامل یادشده، آنچه که اهمیت دارد این است که بررسی احجام حاصل از BWF و GWF در شهرستان‌های مختلف استان مرکزی نشان می‌دهد که کشت فعلی محصولات از نظر میزان مصرف آب آبی، در بسیاری از مناطق می‌تواند بهینه‌تر شود. انتخاب نوع محصول در هر منطقه و سطح زیر کشت اختصاص‌یافته به آن، دو عامل کلیدی در تعیین میزان مصرف آب به‌ویژه در مناطق با منابع محدود آبی هستند. تمرکز بر محصولاتی با BWF_U زیاد و سطح کشت گسترده در برخی شهرستان‌ها (مانند ساوه، شازند و اراک)، منجر به افزایش قابل توجه BWF شده است (شکل ۹). در مقابل، در برخی شهرستان‌ها مانند فراهان و آشتیان، با انتخاب محصولات متناسب‌تر و تنظیم بهتر سطح زیر کشت به ویژه به صورت دیم، امکان استفاده مؤثرتر از آب سبز فراهم شده و نیاز به آب آبی کاهش یافته است (شکل ۱۱)؛ بنابراین، انتخاب نوع محصول متناسب با شرایط اقلیمی، منابع آب هر شهرستان و ویژگی‌های فیزیولوژیکی هر محصول همراه با تنظیم منطقی سطح زیر کشت، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان مصرف آب آبی و سبز دارد و می‌تواند تأثیر زیادی بر بهینه‌سازی مصرف منابع داشته باشد. به ویژه اگر این تنظیم سطح زیر کشت در راستای توسعه اراضی دیم و انتقال آنها به مناطق پرباران‌تر، کشت محصولات کم آب بر و کاهش سطح محصولات پر آب بر و سعی در افزایش بهره برداری از منابع آب سبز باشد، اثرگذاری آن دوچندان خواهد شد. هر چند بررسی‌های صورت‌گرفته نشان

این در حالی است که سطح کشت در زرنديه سهم بیشتری از غلات را به خود اختصاص داده است (شکل ۹)؛ بنابراین، تفاوت در نوع محصول، به واسطه تفاوت در مقدار BWF_U که تحت تأثیر عملکرد محصول و تبخیر - تعرق است، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان BWF نهایی هر منطقه دارد. در نتیجه، نخست سطح زیر کشت هر شهرستان، و سپس نوع محصول کشت‌شده و BWF_U آن (ناشی از عملکرد و تبخیر - تعرق) عوامل اصلی در تعیین مقادیر BWF هر محصول هستند.

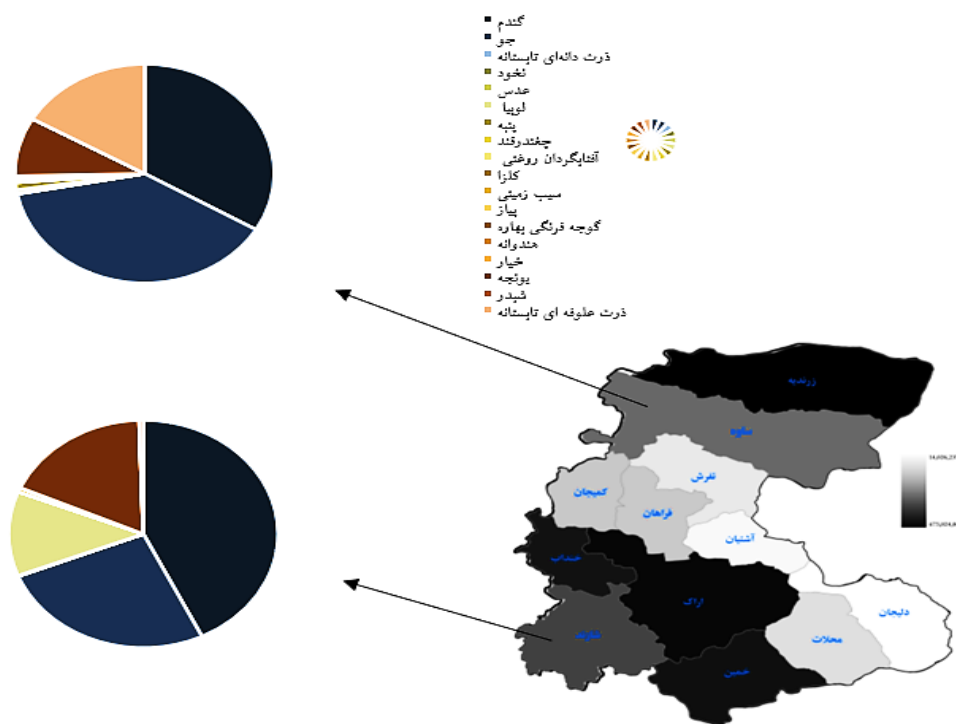
همین تحلیل را می‌توان در مورد GWF نیز ارائه داد. شهرستان‌هایی با سطح زیر کشت فاریاب یا دیم بیشتر (شکل ۱۰)، مقادیر بیشتری از GWF را نشان می‌دهند (شکل ۱۱-الف). به‌عنوان نمونه، شهرستان‌های اراک، شازند و ساوه به‌ترتیب با ۲۸، ۲۴ و ۱۷ (در کشت فاریاب) (شکل ۱۱-الف) و شازند، فراهان و آشتیان به ترتیب با ۵۲، ۴۸ و ۳۵ (در کشت دیم) (شکل ۱۱-ب) بیشترین GWF را دارا هستند.

اما تنها سطح کشت عامل اصلی و تعیین‌کننده نیست. همانند BWF، مقادیر GWF نیز تحت تأثیر میزان بارندگی و عملکرد محصولات در هر منطقه قرار دارد. برای نمونه، با وجود سطح زیر کشت فاریاب بیشتر در ساوه نسبت به شازند (شکل ۹)، مقدار GWF در شازند بیشتر است (شکل ۱۱-الف) که می‌توان آن را به بارندگی بیشتر شازند نسبت داد (شکل ۱-ب). نمونه‌های مشابهی بین دلیجان و آشتیان دیده می‌شود که با وجود سطح کشت زیاد دلیجان، به دلیل بارندگی بیشتر، GWF آشتیان مقادیر بیشتری را به خود اختصاص داده است. در مجموع، بارندگی بیشتر می‌تواند با افزایش GWF_U ، بر مقدار نهایی GWF اثرگذار باشد.

با توجه به اینکه در استان مرکزی، محصولات غالب در کشت دیم شامل گندم، جو، نخود و عدس هستند، سهم زیاد این محصولات در GWF دیم کاملاً قابل انتظار است. این سهم عمدتاً به دلیل هم‌زمانی فصل رشد این محصولات (پاییز تا بهار) با فصل‌های پربارش استان است. همچنین، در کشت فاریاب نیز به



شکل ۱۱. ردپای آب سبز کل (GWF)، (الف) ردپای آب سبز کل (GWF) - اراضی فاریاب و (ب) ردپای آب سبز کل (GWF) - اراضی دیم



شکل ۱۲. ردپای آب خاکستری کل (GRWF) در سطح استان به همراه درصد مشارکت سطح کشت محصولات - اراضی فاریاب

همچون سازند (شکل ۱۱-الف و شکل ۱۱-ب)، ایجاد بهبود در مدیریت کشت دیم اهمیت پیدا میکند. این بهبودها می‌تواند از طریق مصرف بهینه نهاده‌های کشاورزی (آب، کود و ...)،

می‌دهد که در توسعه اراضی دیم، صرف در نظرگیری ابعاد مکانی و سطح کشت اهمیت ندارد. با توجه به مقادیر بیشتر GWF در کشت دیم نسبت به فاریاب در برخی شهرستان‌ها

یا مدیریت زراعی متفاوت است (شکل ۶-الف). ترکیب کشت محصولات در ارتباط با $GRWF_U$ بین شهرستان‌های شازند و ساوه نیز از عوامل مؤثر در میزان نهایی $GRWF$ است؛ به‌طوری که درصد مشارکت زیاد گندم در سطح کشت شازند (شکل ۱۲) و $GRWF_U$ زیاده‌تر این محصول (شکل ۶-الف) از عوامل بیشتر بودن $GRWF$ در این شهرستان نسبت به ساوه است (شکل ۱۲)؛ درحالی‌که گندم با وجود درصد مشارکت و سطح زیاده‌تر گندم نسبت به شازند، $GRWF_U$ بسیار کمتری دارد.

همچنین شهرستان‌های ساوه، اراک، کمیجان به‌ترتیب با مقادیر MCM ۹۰۳، ۷۶۰ و ۵۵۵ دارای بیشترین و شهرستان‌های آشتیان، خنداب و فراهان به‌ترتیب با مقادیر MCM ۰/۶۵، ۱۲ و ۶۶ دارای کمترین مقادیر $GRWF$ در بین شهرستان‌های دارای اراضی دیم بوده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که شهرستان زرنديه ردپای آب خاکستری بسیار کمتری نسبت به ساوه دارد. برخلاف کشت فاریاب، در اینجا عملکرد محصولات در دو شهرستان تفاوت فاحشی با یکدیگر ندارد؛ با این حال، تقریباً تمام سطح زیر کشت دیم در ساوه به گندم اختصاص یافته که دارای $GRWF_U$ زیادی است (شکل ۶-ب) و همین موضوع عامل اصلی این تفاوت محسوب می‌شود. به عبارتی دیگر تولید زیاد محصول گندم با $GRWF_U$ بیشتر در ساوه نسبت به زرنديه عامل اصلی $GRWF$ بیشتر شده است. این موضوع در مقایسه بین دو شهرستان ساوه و شازند نیز تأثیرگذار است؛ به‌طوری که کشت دیم در ساوه با وجود مصرف کود کمتر (شکل ۷-ب)، به علت تولید بیشتر، موجب $GRWF$ بیشتر در ساوه است. به طور کلی مقادیر $GRWF$ در اثر برهم‌کنش بین مقادیر عملکرد، سطح کشت، کود مصرفی و حجم آب خاکستری و درنهایت $GRWF_U$ است.

درنهایت، مقادیر زیاد $GRWF$ در شهرستان‌های استان بیانگر بار آلاینده قابل‌توجه ناشی از کشاورزی فاریاب و دیم، در اثر مصرف کودهای شیمیایی است. این سطح از آلودگی به معنای نیاز به حجم زیاد آب برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها و رساندن آنها به سطح مجاز زیست‌محیطی است. در مناطقی با

رسیدگی بیشتر و اقداماتی چون آبیاری تکمیلی، به واسطه اثرگذاری در افزایش عملکرد اثر قابل توجهی در تولید، مصرف آب آبی و کاهش بحران آب داشته باشد. با توجه به محدودیت منابع آب آبی، وضعیت ناپایدار مصرف فعلی در برخی مناطق، و تفاوت‌های چشمگیر بین شهرستان‌ها به ویژه از منظر BWF ، بازنگری در الگوی کشت فعلی ضروری به نظر می‌رسد.

۲.۲. خاکستری

بررسی نقشه پراکنش حجمی $GRWF$ در اراضی فاریاب شهرستان‌های استان مرکزی نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص در شهرستان‌های مختلف به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است (شکل ۱۲). شهرستان‌های زرنديه، اراک، خمین و خنداب به‌ترتیب با مقادیر MCM ۶۷۳، ۶۵۳، ۶۲۱ و ۶۱۱ دارای بیشترین مقادیر و شهرستان‌های دلجان، آشتیان و تفرش به‌ترتیب با مقادیر MCM ۱۴، ۳۳ و ۹۲ دارای کمترین مقادیر بوده‌اند. این الگوی توزیع در وهله اول با سطح زیر کشت فاریاب در هر شهرستان همبستگی دارد (شکل ۱۰ و ۱۲)؛ به‌طوری که شهرستان‌هایی با سطح زیر کشت وسیع‌تر، مانند اراک، تمایل بیشتری به تولید بار آلاینده دارند؛ بنابراین، سطح زیر کشت به‌عنوان یکی از عوامل اولیه تأثیرگذار بر حجم آب خاکستری قابل‌تشخیص است (شکل ۱۲).

با این حال، مقایسه شهرستان زرنديه با ساوه که باوجود سطح زیر کشت کمتر، دارای $GRWF$ بیشتری است (شکل ۱۲)، نشان می‌دهد که سطح زیر کشت به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر کامل تفاوت‌ها باشد. در این مورد، ترکیب کشت محصولات نقش مهم‌تری ایفا کرده است. کشت محصولاتی مانند شبدر در زرنديه که دارای $GRWF_U$ زیادی هستند، درحالی‌که در ساوه کشت نمی‌شوند، می‌تواند دلیل این اختلاف باشد (شکل ۶-الف). همچنین، در محصولات مشترکی مانند گندم و جو، $GRWF_U$ در زرنديه بیشتر حاصل شده است که احتمالاً ناشی از مصرف بیشتر نهاده‌ها، تفاوت در ویژگی‌های خاک و اقلیم،

در مقابل، عواملی همچون سطح زیر کشت گسترده محصولات کم‌آبر در شهرستان‌هایی مانند آشتیان، دلجان و تفرش، BWF و GRWF کمتری را به ثبت رسانده است؛ از این رو کاهش سطح کشت محصولات با BWF_U و GRWF_U زیاد در شهرستان‌هایی با منابع محدود آبی برای حفظ کمیت و کیفیت منابع آب توصیه می‌شود.

همچنین شهرستان‌های شازند، فراهان، آشتیان و اراک دارای بیشترین GWF مجموع فاریاب و دیم در استان مرکزی هستند. بررسی مقادیر GWF_U علاوه بر عوامل یادشده، نشان‌دهنده اثر بیشتر بارندگی مؤثر به واسطه دوره و فصل رشد محصولات است. همچنین GWF علاوه بر GWF_U از میزان و نوع سطح کشت (دیم نسبت به فاریاب) نیز اثر می‌پذیرد. بر این اساس، توسعه اراضی دیم در مناطق پربارش و دارای پتانسیل بارندگی زیاد همراه با استفاده از آبیاری تکمیلی و ارتقای عملکرد در کشت دیم توصیه می‌شود.

از سوی دیگر، تحلیل ردپای آب خاکستری به عنوان شاخصی برای ارزیابی کیفیت و آلودگی منابع آبی، می‌تواند ابزاری هشداردهنده در تدوین سیاست‌های مصرف نهاده‌ها باشد. سهم زیاد GRWF در کشت دیم در کنار سهم زیاد GRWF نسبت به BWF در کشت فاریاب، بیانگر لزوم بازنگری در مصرف کودهای شیمیایی و اهمیت مدیریت آلودگی‌های غیرمستقیم منابع آبی در اراضی دیم و فاریاب است. مدیریت دقیق‌تر مصرف نهاده‌ها، به‌ویژه کودهای نیتروژن و فسفر، از طریق آموزش کشاورزان، به‌کارگیری فناوری‌های دقیق و نظارت اکولوژیک و همچنین لزوم ارتقای عملکرد از طریق عملیات به‌زراعی ضروری به نظر می‌رسد.

تحلیل مؤلفه‌های سه‌گانه آبی، سبز و خاکستری به تفکیک محصول و شهرستان، نشان داد که الگوی فعلی کشت در بسیاری از مناطق استان مرکزی با اصول بهره‌وری منابع و پایداری زیست‌محیطی سازگار نیست؛ از این رو با توجه به اثرهای قابل توجه سطح کشت و ترکیب کشت محصولات در تفاوت‌های چشمگیر در مقادیر BWF، GWF و GRWF بین

ظرفیت محدود خودپالایی آب‌های سطحی و زیرزمینی، ادامه این وضعیت می‌تواند منجر به کاهش کیفیت منابع آب، افزایش غلظت نترات و فسفر و آسیب به اکوسیستم‌های آبی شود. از این رو، GRWF باید به عنوان شاخصی هشداردهنده در مدیریت کشاورزی پایدار مدنظر قرار گیرد؛ به‌ویژه در تدوین سیاست‌های مربوط به نوع محصول، میزان مصرف کود و شیوه‌های کوددهی و آبیاری.

بنابراین، تحلیل GRWF نیازمند رویکردی چندبعدی است که هم سطح زیر کشت و هم ساختار و بهره‌وری الگوی کشت را در نظر گیرد. نقش تعیین‌کننده عملکرد در کنار نوع محصول و مصرف نهاده‌ها، اهمیت سیاست‌گذاری‌هایی را نشان می‌دهد که تنها به توسعه سطح کشت نپرداخته، بلکه بهره‌وری مصرف نهاده‌ها و بهینه‌سازی انتخاب محصولات را نیز در اولویت قرار دهند. این رویکرد با بهره‌گیری از مفاهیمی چون ردپای آب خاکستری می‌تواند در کاهش اثرهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف نهاده‌های کشاورزی چون کود اثرگذار باشد؛ بنابراین از اجرای اقدامات ترویجی در راستای کاهش مصرف بی‌رویه نهاده‌های کشاورزی همراه با حفظ عملکرد و بازنگری در الگوی کشت محصولات بر اساس میزان اثرهای زیست‌محیطی هر یک و متناسب با ظرفیت‌های هر منطقه ضروری به نظر می‌رسد. همچنین بیشتر بودن مقادیر GRWF در کشت دیم نسبت به کشت فاریاب در عمده شهرستان‌ها، لزوم توجه بیشتر را در این نوع کشت می‌رساند.

نتیجه‌گیری نهایی

تحلیل انجام‌شده در این مطالعه بر اساس یافته‌های عددی نشان داد ردپای آب کشاورزی در استان مرکزی تحت تأثیر عوامل اقلیمی، نوع محصول، عملکرد، سطح زیر کشت و شیوه‌های مدیریت مصرف آب و نهاده‌هاست. شهرستان‌هایی چون ساوه، اراک و شازند دارای BWF و GRWF زیادی هستند. این امر در ارتباط با شاخص‌های زیاد BWF_U و GRWF_U متأثر از عوامل یادشده و سطح زیر کشت گسترده محصولات پرمصرف است.

مناطق بحرانی است، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌سازی برای مدیریت پایدار منابع آب در سطح شهرستانی مورد استفاده قرار گیرد؛ از این رو تدوین سیاست‌های مبتنی بر ارزیابی‌های مکانی ردپای آب و تقویت سازوکارهای پایش در سطح محلی توصیه می‌شود.

شهرستان‌ها، اصلاح ترکیب محصولی در سطح منطقه‌ای با در نظرگیری شاخص‌های ردپای آب و ظرفیت‌های اقلیمی و آبی هر شهرستان، منجر به مدیریت بهینه منابع آب می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد تحلیلی مبتنی بر ردپای آب، با ترکیب تحلیل‌های محصول‌محور، مکانی و مدیریتی، نه تنها قادر به تشخیص ارزیابی جامع مصرف آب در

References

منابع مورد استفاده

1. Ababaei, B. and H.R. Etedali. 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management* 179: 401-411.
2. Albers, L.T., J.F. Schyns, M.J. Booij and L. Zhuo. 2021. Blue water footprint caps per sub-catchment to mitigate water scarcity in a large river basin: The case of the Yellow River in China. *Journal of Hydrology* 603: 126992.
3. Araya, A., P.H. Gowda, B. Golden, A.J. Foster, J. Aguilar, R. Currie, I.A. Ciampitti and P.V.V. Prasad. 2019. Economic value and water productivity of major irrigated crops in the Ogallala aquifer region. *Agricultural Water Management* 214: 55-63.
4. Bigurra-Alzati, C.A., R. Ortiz-Gómez, G.A. Vázquez-Rodríguez, L.D. López-León and L. Lizárraga-Mendiola. 2020. Water conservation and green infrastructure adaptations to reduce water scarcity for residential areas with semi-arid climate: Mineral de la reforma, Mexico. *Water* 13(1): 45.
5. Cao, X., Y. Bao, Y. Li, J. Li and M. Wu. 2023. Unravelling the effects of crop blue, green and grey virtual water flows on regional agricultural water footprint and scarcity. *Agricultural Water Management* 278: 108165.
6. Cao, X., W. Zeng, M. Wu, T. Li, S. Chen and W. Wang. 2021. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint. *Journal of Cleaner Production* 309: 127371.
7. Demir, M.S. and A. Muratoglu. 2025. Water footprint concept, approaches, and applications: A comprehensive review for the agricultural sector. *Water and Environment Journal* 39(2): 128-142.
8. Feng, B., L. Zhuo, D. Xie, Y. Mao, J. Gao, P. Xie and P. Wu. 2021. A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002–2018. *Ecological Indicators* 120: 106962.
9. Hoekstra, A.Y. 2017. Water footprint assessment: evolvement of a new research field. *Water Resources Management* 31(10): 3061-3081.
10. Hoekstra, A., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya and M.M. Mekonnen. 2012. The water footprint assessment manual: Setting the global standard, Routledge, London.
11. Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002, Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands
12. Hu, M., W. Wu, Q. Yu, H. Tang, Y. Wen and F. Zhao. 2022. Spatial-temporal variations in green, blue and gray water footprints of crops: how do socioeconomic drivers influence?. *Environmental Research Letters* 17(12): 124024.
13. IMAJ. 2024. Iran's Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran www.maj.ir.
14. IRIMO. Islamic Republic of Iran's Meteorological Organization <http://www.irimo.ir/far/index.php> (2024).
15. Li, Z., B. Feng, W. Wang, X. Yang, P. Wu and L. Zhuo. 2022. Spatial and temporal sensitivity of water footprint assessment in crop production to modelling inputs and parameters. *Agricultural Water Management* 271: 107805.
16. Liu, W., Z. Ma and B. Lei. 2022. Spatiotemporal distribution of irrigation water use efficiency from the perspective of water footprints in Heilongjiang Province. *Water* 14(8): 1232.
17. Liu, X., W. Liu, Q. Tang, B. Liu, Y. Wada and H. Yang. 2022. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future* 10(4): e2021EF002567.
18. Ma, W., L. Meng, F. Wei, C. Opp and D. Yang. 2021. Spatiotemporal variations of agricultural water footprint and socioeconomic matching evaluation from the perspective of ecological function zone. *Agricultural Water Management* 249: 106803.
19. Ma, W., C. Opp and D. Yang. 2020. Spatiotemporal supply-demand characteristics and economic benefits of crop water footprint in the semi-arid region. *Science of The Total Environment* 738: 139502.

20. Nalbandan, R.B., M. Delavar, H. Abbasi and M.R. Zaghiyan. 2023. Model-based water footprint accounting framework to evaluate new water management policies. *Journal of Cleaner Production* 382: 135220.
21. Nouri, H., B. Stokvis, A. Galindo, M. Blatchford and A. Y. Hoekstra. 2019. Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: the effect of soil mulching and drip irrigation. *Science of the Total Environment* 653: 241-252.
22. Nouri, M., M. Homaei, L.S. Pereira and M. Bybordi. 2023. Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management* 288:108480.
23. Saed, B., A. Afshar, M.R. Jalali, M. Ghoreishi and P. Aminpour Mohammadabadi. 2018. A water footprint based hydro-economic model for minimizing the blue water to green water ratio in the Zarrinehrud river-basin in Iran. *AgriEngineering* 1(1): 58-74.
24. Xia, W., B. Zhang, G. Meng and J. Dong. 2025. The Water–Soil Resource Matching Pattern of Grain Crops in the North China Plain from the Perspective of the Physical Water–Water Footprint. *Land* 14(2): 295.
25. Zhang, D., M.S. Sial, N. Ahmad, A.J. Filipe, P.A. Thu, M. Zia-Ud-Din and A.B. Caleiro. 2020. Water scarcity and sustainability in an emerging economy: a management perspective for future. *Sustainability* 13(1):144.
26. Zhuo, L. and A.Y. Hoekstra. 2017. The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency and green and blue water footprint. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 4(2): 185