

Water Footprint and Irrigation Dietary Efficiency in Potato Production under Critical Water Resource Conditions: A Case Study in Ghorveh-Dehgolan Plain

Sh. Abdi, M. A. Asaadi, S. H. Mosavi* , and H. Najafi Alamdarlo

MSc. Graduate in Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

shayeste.abdi@modares.ac.ir

PhD in Agricultural economics, Tarbiat Modares University Tehran, Iran.

a.asadi@modares.ac.ir

Associate Prof., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

shamosavi@modares.ac.ir

Associate Prof., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

hamed_najafi@modares.ac.ir

Received: May 2025 and Accepted: September 2025

Abstract

This research aimed to evaluate water footprint and irrigation dietary efficiency (IDE) of potato production in the Ghorveh-Dehgolan Plain of Kurdistan Province, during 2011 and 2021. In this study, water footprint indices (blue, green, and grey), net production benefit per drop (NPBD), and irrigation dietary efficiency (IDE) were calculated using data from the Agricultural Jihad Organization, Meteorological Organization, FAO, and the USDA Food Composition Database. The results indicate that the average total water footprint for each ton of potatoes in the Ghorveh and Dehgolan regions was 431 and 446 cubic meters, respectively; i.e. producing each ton of the product requires significant consumption of water, which indicates high pressure on the region's limited water resources. Additionally, the economic productivity of water in Ghorveh (388 Tomans/m³) is higher than in Dehgolan (372 Tomans/m³). Analysis of dietary indices also showed that each liter of water in Ghorveh produces an average of 5.95 k.cal. and 0.016 g of protein, while these values in Dehgolan are 5.73 k.cal. and 0.014 g, respectively. Furthermore, examining the temporal trend of indices reveals a significant decrease in productivity during drought years, highlighting the vulnerability of the region's agricultural system to climate change. This research emphasizes the necessity of a paradigm shift from the approach of "supplying more water" toward "more efficient management of existing water" and, by providing evidence based on field data, establishes an appropriate scientific foundation for water resource and agricultural policy-making in critical regions of the country.

Keywords: Food security, Water resource sustainability, Economic productivity, Water footprint

*- Corresponding Author's email: shamosavi@modares.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.369543.1082>

ردپای آب^۱ و کارایی تغذیه‌ای آبیاری^۲ در تولید سیب‌زمینی در شرایط بحرانی منابع

آب: مطالعه موردی دشت قروه- دهگلان

شایسته عبدی، محمدعلی اسعدی، سیدحبیب‌اله موسوی *  و حامد نجفی علمدارلو

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

shayeste.abdi@modares.ac.ir

دانش‌آموخته دکتری اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

a.asadi@modares.ac.ir

دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس .

shamosavi@modares.ac.ir

دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

hamed_najafi@modares.ac.ir

دریافت: خرداد ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع ردپای آب و کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE) محصول سیب‌زمینی در دشت قروه-دهگلان استان کردستان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ انجام شد. در این بررسی، شاخص‌های ردپای آب (آبی، سبز و خاکستری)، بهره‌وری اقتصادی آب (NPBD^۳) و کارایی تغذیه‌ای آبیاری با بهره‌گیری از داده‌های سازمان جهاد کشاورزی، سازمان هواشناسی، FAO و پایگاه ترکیب مواد غذایی USDA محاسبه شد. نتایج حاکی از آن است که میانگین ردپای کل آب برای تولید هر تن سیب‌زمینی در مناطق قروه و دهگلان به ترتیب ۴۳۱ و ۴۴۶ مترمکعب بوده است؛ به عبارت دیگر، تولید هر تن محصول نیازمند مصرف قابل توجه منابع آبی است که این امر نشان‌دهنده فشار بالا بر منابع محدود آب منطقه می‌باشد. همچنین بهره‌وری اقتصادی آب در قروه (۳۸۸ تومان بر مترمکعب) نسبت به دهگلان (۳۷۲ تومان بر مترمکعب) است. تحلیل شاخص‌های تغذیه‌ای نیز نشان داد که هر لیتر آب مصرفی در قروه به طور میانگین ۵/۹۵ کیلوکالری انرژی و ۰/۱۶ گرم پروتئین تولید می‌کند، در حالی که این مقادیر در دهگلان به ترتیب ۵/۷۳ کیلوکالری و ۰/۱۴ گرم است. همچنین، بررسی روند زمانی شاخص‌ها حاکی از کاهش چشمگیر بهره‌وری در سال‌های خشکسالی است که آسیب‌پذیری سامانه کشاورزی منطقه را در برابر تغییرات اقلیمی نمایان می‌سازد. این پژوهش ضرورت گذار بنیادی از رویکرد «تأمین آب بیشتر» به سمت «مدیریت کارآمدتر آب موجود» را برجسته می‌سازد و با ارائه شواهد مبتنی بر داده‌های میدانی، مبنای علمی مناسبی برای سیاست‌گذاری منابع آب و کشاورزی در مناطق بحرانی کشور فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، بهره‌وری اقتصادی آب، پایداری منابع آب، ردپای آب

1- Water footprint
2- Irrigation Dietary Efficiencies
3- Net production benefit per drop

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: shamosavi@modares.ac.ir



مقدمه

بحران آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در قرن بیست‌ویکم، دیگر صرفاً یک مسئله محیط-زیستی محسوب نمی‌شود، بلکه به موضوعی راهبردی در ابعاد مختلف حیات بشری از جمله امنیت غذایی، پایداری اقتصادی، عدالت اجتماعی و ثبات سیاسی تبدیل شده است (فائو، ۲۰۲۳). طبق پیش‌بینی‌های سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ بیش از دو سوم جمعیت جهان در مناطقی زندگی خواهند کرد که با درجات مختلفی از کم‌آبی روبرو هستند (بورتی و رزا، ۲۰۱۹). در این میان، کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، در معرض بیشترین آسیب قرار دارند. شرایط اقلیمی خاص ایران، با میانگین بارندگی حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال-یعنی یک‌سوم متوسط جهانی- و نرخ تبخیر بالا، موجب شده است که بخش قابل توجهی از منابع آبی کشور در معرض تهدید جدی قرار گیرد (اسعدی و همکاران، ۲۰۲۱).

تنش آبی در ایران تنها به کاهش بارندگی محدود نمی‌شود، بلکه با افت مداوم سطح آب‌های زیرزمینی، نابودی تالاب‌ها، شوری و آلودگی منابع آب و کاهش کیفیت منابع قابل‌استفاده، به بحرانی چندلایه بدل شده است. بخش کشاورزی، به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی کشور با سهمی بالغ بر ۹۰ درصد از مصرف آب تجدیدپذیر، بیشترین نقش را در این بحران ایفا می‌کند؛ اما متأسفانه، این بخش از کمترین بهره‌وری در مصرف آب برخوردار است؛ مسئله‌ای که به‌دلائل متعددی از جمله روش‌های سنتی آبیاری، الگوی نادرست کشت و ناهماهنگی میان ظرفیت‌های اکولوژیکی مناطق و نوع محصولات زراعی پدید آمده است. این شرایط، لزوم تغییر نگرش از مدیریت کمی منابع آب به مدیریت کیفی و کارآمدتر را دوچندان کرده است.

در پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از شاخص‌های علمی و جامع برای ارزیابی بهره‌وری مصرف آب، به یکی از رویکردهای مهم در تحقیقات و سیاست‌گذاری‌های اخیر

تبدیل شده است. در این میان، مفهوم ردپای آب^۱ به‌عنوان ابزاری نوین و قدرتمند برای تحلیل میزان و نوع مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است (دیهیمفرد و همکاران، ۲۰۲۲). این شاخص، برخلاف معیارهای سنتی، کل چرخه مصرف آب را در بر می‌گیرد و به سه مؤلفه اصلی ردپای آبی (مصرف آب آبیاری)، ردپای سبز (مصرف آب بارندگی ذخیره‌شده در خاک) و ردپای خاکستری (حجم آبی که برای رقیق‌سازی آلاینده‌های ناشی از تولید مورد نیاز است) تقسیم می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۲۲؛ میزید و همکاران، ۲۰۲۵).

تحلیل ردپای آب، امکان مقایسه کارایی مصرف آب در محصولات مختلف و در مناطق گوناگون را فراهم می‌سازد و نقش مهمی در شناسایی الگوهای ناکارآمد، ارتقای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و تدوین سیاست‌های سازگار با پایداری ایفا می‌کند (صفدری و همکاران، ۱۴۰۰). این ابزار به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران که با محدودیت منابع و تنوع اقلیمی روبرو هستند، می‌تواند به اولویت‌بندی کشت محصولات و اصلاح سامانه‌های آبیاری کمک شایانی کند؛ اما برای ارزیابی جامع‌تر، کافی نیست که فقط به کمیت آب مصرفی توجه شود، بلکه باید کیفیت و ارزش تغذیه‌ای محصولات نیز مدنظر قرار گیرد. در همین راستا، شاخص کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE) ۲ به‌عنوان مکملی مهم برای ارزیابی پایداری کشاورزی معرفی شده است (دراستیگ و همکاران، ۲۰۲۳). این شاخص، نسبت مقدار مواد مغذی تولیدشده مانند انرژی، پروتئین، ویتامین‌ها یا فیبر به حجم آب مصرفی را محاسبه می‌کند و به‌جای تمرکز صرف بر بازده حجمی یا وزنی، کیفیت تغذیه‌ای محصولات را نیز در محاسبات لحاظ می‌کند (کهرمان‌اوغلو و همکاران، ۲۰۲۰). بدین ترتیب، این شاخص نه‌تنها ابزاری برای سنجش بهره‌وری در مصرف آب است، بلکه به‌طور مستقیم با امنیت غذایی و تغذیه جامعه نیز پیوند دارد. ترکیب این شاخص با ردپای آب، بستری مناسب برای تحلیل چندبعدی سامانه‌های زراعی فراهم می‌آورد که برای تدوین راهبردهای

بلندمدت مدیریت منابع آبی و امنیت غذایی در سطح ملی بسیار مفید خواهد بود.

در میان محصولات زراعی کشور، سیب‌زمینی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. این محصول به دلیل سازگاری نسبتاً بالا با شرایط اقلیمی متنوع، نیاز آبی متوسط و همچنین ارزش غذایی بالا، یکی از منابع مهم تغذیه‌ای خانوارهای ایرانی به‌شمار می‌رود (اسعدی و همکاران، ۱۳۹۸). سیب‌زمینی سرشار از کربوهیدرات، پتاسیم و فیبر است و در امنیت غذایی و تنوع سفره خانوار نقشی تعیین‌کننده دارد. درعین‌حال، روش‌های کشت و آبیاری آن می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف منابع آبی داشته باشد (کونز و همکاران، ۲۰۲۴). از این‌رو، بررسی ردپای آب و بهره‌وری تغذیه‌ای این محصول در مناطق مختلف، به‌ویژه مناطق بحرانی از نظر منابع آبی، اهمیت خاصی دارد. یکی از مناطقی که به‌طور خاص با بحران شدید منابع آبی مواجه است، دشت قروه-دهگلان در استان کردستان است. این دشت به‌دلیل بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، کاهش نزولات جوی و توسعه بی‌رویه فعالیت‌های کشاورزی، دچار افت سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت منابع آب شده است. هم‌زمان، اهمیت اقتصادی و معیشتی کشاورزی برای ساکنان این منطقه بسیار بالا است و بخش عمده‌ای از درآمد خانوارها از طریق تولیدات زراعی تأمین می‌شود. از این‌رو، بحران آب در این دشت نه تنها یک تهدید محیط‌زیستی، بلکه چالشی جدی برای توسعه پایدار منطقه نیز محسوب می‌شود.

مطالعات داخلی متعددی به بررسی بهره‌وری آب و ردپای آبی محصولات کشاورزی پرداخته‌اند. کریمی و همکاران (۱۴۰۲) با محاسبه حجم آبیاری و بهره‌وری آب در مزارع جو خراسان رضوی، میانگین بهره‌وری آب را ۰/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش کردند. در پژوهش شاهرخ‌نیا و باغانی (۱۴۰۰) درباره سیب‌زمینی در استان فارس، بهره‌وری آب برابر با ۴/۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد و مشخص شد که آبیاری قطره‌ای و بارانی، با وجود افزایش عملکرد و کاهش مصرف آب، تفاوت

معنی‌داری در سطح پنج درصد ایجاد نکردند. پیری و سارانی (۱۳۹۹) با رویکرد ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی محصولات را بررسی کردند و نشان دادند که ذرت خوشه‌ای در میان محصولات زراعی و موز در میان محصولات باغی دارای بیشترین بهره‌وری اقتصادی هستند. همچنین، فتحی‌تیلکو و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی درباره سیب‌زمینی در دشت دهگلان، تأثیر معنی‌دار عمق آبیاری و جایگذاری نوار آبیاری را بر عملکرد و بهره‌وری آب گزارش کردند.

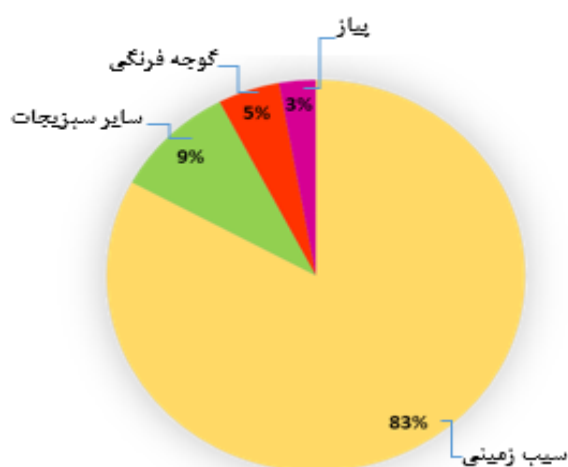
در حوزه مطالعات خارجی، هوکسترا و چاپاگان (۲۰۰۷) برای نخستین‌بار ردپای آب را در سطح جهانی محاسبه کرده و تفاوت چشمگیر این شاخص را میان کشورها مانند ردپای بالای آب در آمریکا (۲۴۸۰ مترمکعب بر تن در سال) و ردپای پایین آب در چین (۷۰۰ مترمکعب بر تن در سال) را نشان دادند. لیو و همکاران (۲۰۲۰) در چین با استفاده از مفاهیم ردپای آب و آب مجازی، تأثیر عواملی چون رشد جمعیت و توسعه صنعت انرژی بر امنیت غذایی و منابع آب را بررسی کردند و افزایش رقابت بین بخش‌ها بر سر منابع آبی را برجسته نمودند. در نهایت، کهرمان‌اوغلو و همکاران (۲۰۲۰) بهره‌وری‌های مختلف آبیاری را برای محصولات متنوع بررسی کرده و نشان دادند که کشت محصولات کم‌مصرف مانند خرنوب و انجیر می‌تواند به کاهش مصرف آب و حفظ امنیت غذایی کمک کند. این یافته‌ها، بر ضرورت بازنگری سیاست‌های آبیاری و اولویت‌بندی کشت محصولات سازگار با شرایط کم‌آبی تأکید دارند.

جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور به بررسی ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی و عملکرد آبیاری محصولات مختلف کشاورزی پرداخته‌اند. در سطح ملی، تمرکز اغلب مطالعات بر سنجش بهره‌وری آب در محصولات عمده‌ای همچون جو، سیب‌زمینی و ذرت بوده و نقش الگوهای آبیاری و تکنولوژی در بهینه‌سازی مصرف آب بررسی شده است. در سطح بین‌المللی نیز مطالعات با

روش پژوهش

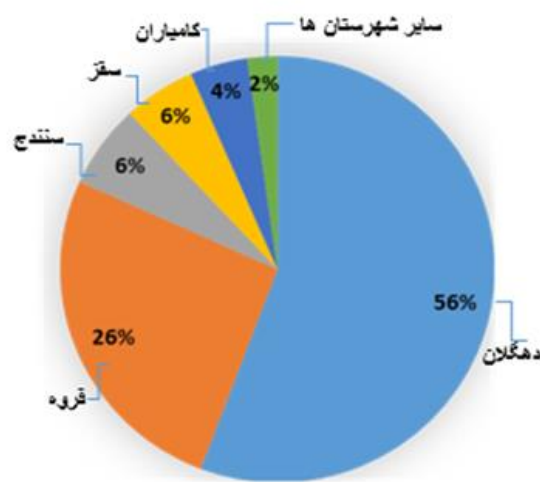
منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در دشت قروه- دهگلان، واقع در شرق استان کردستان و در بخش سراب حوضه سفیدرود، انجام شده است. استان کردستان با تولید سالانه ۲۴۱۸۹۲ تن سیب‌زمینی در سال ۱۴۰۰ و سطح زیر کشت ۶۹۲۱ هکتار، رتبه پنجم تولید این محصول در کشور را به خود اختصاص داده است. نزدیک به ۹۰ درصد از این میزان تولید در دشت قروه-دهگلان صورت می‌گیرد (شکل ۱) که به‌عنوان بزرگ‌ترین دشت استان با وسعتی معادل ۱۳۱۴٫۲ کیلومترمربع، نقش مهمی در کشاورزی منطقه ایفا می‌کند. این دشت دارای سه آبخوان مهم به نام‌های قروه، دهگلان و چهاردولی است که در سال‌های اخیر با برداشت‌های فزاینده از منابع آب زیرزمینی مواجه شده‌اند. به‌دلیل برهم خوردن توازن میان تغذیه و برداشت، این آبخوان‌ها به ترتیب از سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در شمار مناطق ممنوعه قرار گرفته‌اند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۴۰۰). این شرایط بحرانی، ضرورت ارزیابی دقیق شاخص‌هایی چون ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی و کارایی تغذیه‌ای در تولید سیب‌زمینی را دوچندان کرده و نیاز به بازنگری در مدیریت منابع و الگوهای بهره‌برداری را به‌روشنی نشان می‌دهد.



(ب)

نگاهی گسترده‌تر به تحلیل ردپای آب، بهره‌وری زمین و چالش‌های کلان امنیت غذایی ناشی از فشار بر منابع آبی پرداخته‌اند و بر لزوم اصلاح سیاست‌های مدیریت آب و کشت محصولات کم‌مصرف تأکید داشته‌اند. باوجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در حوزه سنجش بهره‌وری مصرف آب و تحلیل ردپای آبی محصولات زراعی، هنوز خلأهای مهمی در ادبیات پژوهش وجود دارد. یکی از این خلأها، کمبود مطالعاتی است که به‌طور هم‌زمان دو جنبه «کارایی تغذیه‌ای» و «ردپای آب» را برای یک محصول مهم غذایی در یک منطقه بحرانی بررسی کنند. اگرچه شاخص ردپای آب به‌تنهایی می‌تواند میزان فشار واردشده بر منابع آبی را نشان دهد، اما در غیاب شاخص‌هایی نظیر کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE)، نمی‌توان به ارزیابی دقیقی از کارایی واقعی مصرف آب در تأمین نیازهای غذایی جامعه دست یافت. از این‌رو، سؤال اصلی این پژوهش آن است که وضعیت ردپای آب و کارایی تغذیه‌ای آبیاری محصول سیب‌زمینی در دشت بحرانی قروه-دهگلان چگونه است و چه راهبردهایی می‌توان برای ارتقای کارایی مصرف آب و بهبود پایداری غذایی در این منطقه پیشنهاد داد؟



(الف)

شکل ۱- الف) سهم تولید شهرستان‌های استان و ب) میزان تولید سیب‌زمینی در مقایسه با چهار محصول برتر زراعی در استان کردستان (سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان، ۱۴۰۱)

محاسبات ردپای آب

در این پژوهش، به منظور ارزیابی مصرف آب در تولید محصول سیب زمینی، از رویکرد جامع محاسبه ردپای آب بهره گرفته شد. ردپای آب به عنوان یک شاخص بین‌المللی شناخته شده برای تحلیل کمی و کیفی مصرف منابع آب در طول زنجیره تأمین محصول، به سه مؤلفه اصلی تقسیم می‌شود:

ردپای آبی^۱ نمایانگر میزان مصرف آب‌های آبی (سطحی و زیرزمینی) است که مستقیماً برای آبیاری محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ردپای سبز^۲ به میزان استفاده از آب باران ذخیره شده در خاک (رطوبت خاک) در فرآیند رشد گیاه اشاره دارد و در واقع مؤلفه‌ای از منابع طبیعی تجدیدپذیر به شمار می‌رود. **ردپای خاکستری^۳** بیانگر حجم آبی است که برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها، به‌ویژه کودهای نیتروژن‌دار تا سطح استانداردهای محیط‌زیستی مورد نیاز است و از آن به عنوان شاخصی از فشار آلودگی کشاورزی بر منابع آب یاد می‌شود.

محاسبه اجزای مختلف ردپای آب در این پژوهش بر اساس چارچوب مفهومی و فرمول‌بندی ارائه شده توسط هوکسترا و چاپاگن (۲۰۰۷) انجام شد. این چارچوب در حال حاضر به عنوان مبنای علمی معتبر در سطح جهانی برای محاسبه و مقایسه ردپای آب در محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. در این پژوهش، اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، میزان تولید، قیمت محصول و هزینه‌های تولید در واحد سطح (یک هکتار) از محصول سیب زمینی، از سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان اخذ شد. داده‌های اقلیمی شامل میانگین حداقل و حداکثر دمای روزانه در ماه، میانگین حداقل و حداکثر رطوبت نسبی روزانه، میانگین سرعت باد و متوسط ساعات آفتابی ماهانه نیز از سازمان هواشناسی کشور تأمین شده است. همچنین، ضرایب گیاهی مربوط به مراحل مختلف رشد محصول از نشریات سازمان خواربار و کشاورزی مل

متحد (فائو) استخراج شد. این محاسبات برای دوره آماری ده‌ساله ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ انجام شده تا روند تغییرات ردپای آب طی زمان نیز بررسی شود.

مقدار کل ردپای آب^۴ محصول سیب زمینی از مجموع سه مؤلفه آبی، سبز و خاکستری مطابق با روابط ارائه شده در معادلات (۱) تا (۳) محاسبه شد.

$$WF_{blue} = \frac{10 \times Irr}{Y} \quad (1)$$

$$WF_{green} = \frac{10 \times P_{eff}}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{grey} = \frac{a \times AR}{C_{max} - C_{nat}} \times \frac{1}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{total} = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (4)$$

که در آن‌ها: WF_{total} نمایانگر ردپای کل آب و شامل سه مؤلفه WF_{Blue} (ردپای آب آبی)، WF_{green} (ردپای آب سبز) و WF_{grey} (ردپای آب خاکستری) است که همگی بر حسب مترمکعب به ازای هر تن محصول بیان می‌شوند. متغیر Y عملکرد محصول (تن در هکتار) را نشان می‌دهد.

a ضریب تلفات کود نیتروژن مصرفی است که عددی بین صفر تا یک بوده و بیانگر نسبت نیتروژن وارد شده به سیستم زراعی است که به منابع آب نشت می‌یابد. بر اساس پژوهش پراسد و همکاران (۲۰۱۵)، مقدار این ضریب برای محصول سیب زمینی برابر با ۰/۲۵ (بدون واحد) در نظر گرفته شده است. AR ، مقدار مصرف کود نیتروژن بر حسب کیلوگرم در هکتار، C_{max} غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب (برابر با ۱۰ میلی گرم در لیتر) و C_{Nat} نشان دهنده غلظت طبیعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده است. در این پژوهش، به دلیل نبود داده‌های معتبر و قابل استناد درباره غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت قروه-دهگلان، مقدار این پارامتر مطابق با رویکرد پیشنهادی مکنون و هوکسترا (۲۰۱۰) برابر با صفر در نظر گرفته شده است. هرچند ممکن است در شرایط واقعی منطقه، آبخوان‌ها دارای سطوحی از آلودگی نیتراتی باشند، اما در نبود داده‌های دقیق، استفاده از این فرضیه باعث حفظ انسجام روش‌شناسی و امکان مقایسه پذیری نتایج با مطالعات مشابه بین‌المللی می‌شود. بدین ترتیب، هرچند این

تغذیه‌ای و زیست‌محیطی تولید را فراهم می‌کنند. این شاخص می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. بر اساس این شاخص‌ها، می‌توان استراتژی‌های مدیریتی مناسبی برای بهبود بهره‌وری آب و افزایش ارزش تغذیه‌ای محصولات کشاورزی تدوین کرد.

شاخص‌های محاسبه‌شده در این بخش شامل کارایی تغذیه‌ای بر اساس انرژی، پروتئین، کربوهیدرات، فیبر و قند می‌باشند که با استفاده از روابط (۶) تا (۱۰) به‌دست آمده‌اند (که‌رمان‌اوغلو و همکاران، ۲۰۲۰).

$$DE - \text{Energy (kcal/L)} = \frac{(y \times \text{USDA ref for Energy} \times 10)}{WF \times 1000} \quad (6)$$

$$IDE - \text{Protein (g/L)} = \frac{(y \times \text{USDA ref for Protein} \times 10)}{WF \times 1000} \quad (7)$$

$$IDE - \text{Sugar (g/L)} = \frac{(y \times \text{USDA ref Sugar} \times 10)}{WF \times 1000} \quad (8)$$

که در آن‌ها: Y بیانگر عملکرد محصول (تن در هکتار)، USDA ref مقدار مرجع محتوای آن مواد تغذیه‌ای در هر ۱۰۰ گرم سیب‌زمینی و WF نیز مجموع کل ردپای آب (مترمکعب در هکتار) می‌باشند. این شاخص‌ها به تصمیم‌گیران امکان می‌دهد تا نه تنها از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی، بلکه از نظر تغذیه‌ای نیز اثربخشی سامانه‌های تولیدی را ارزیابی کرده و در راستای امنیت غذایی و استفاده پایدار از منابع، راهبردهای مناسب‌تری اتخاذ کنند. برای محاسبه شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری، مقادیر مرجع مربوط به انرژی، پروتئین، کربوهیدرات، فیبر و قند موجود در سیب‌زمینی از پایگاه داده ترکیب مواد غذایی (USDA 2020) مورد استفاده قرار گرفته است.

فرض می‌تواند بر مقدار برآوردی ردپای آب خاکستری اثر اندکی داشته باشد، ولی چارچوب تحلیلی مورد استفاده همچنان معتبر و قابل اتکا باقی می‌ماند. همچنین، ضریب ۱۰ در روابط شماره (۱) و (۲) به‌منظور تبدیل عمق آب از میلی‌متر به حجم آب برحسب مترمکعب در واحد سطح (هکتار) استفاده شد.

بهره‌وری اقتصادی آب

بهره‌وری اقتصادی آب یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی به‌شمار می‌رود. در این مطالعه، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب برای محصول سیب‌زمینی در دشت قروه-دهگلان طی دوره آماری مورد نظر محاسبه شد. این شاخص تحت عنوان خالص سود به‌ازای واحد حجم آب مصرفی (NBPD)^۱ تعریف می‌شود و بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۹):

$$NBPD = \frac{NB}{TWF} \quad (5)$$

که در آن: NBPD نمایانگر بهره‌وری اقتصادی آب (تومان بر مترمکعب)، NB سود خالص حاصل از تولید در یک هکتار (بر حسب تومان) و TWF مقدار کل ردپای آب (مجموع اجزای آبی، سبز و خاکستری بر حسب مترمکعب) است. محاسبه این شاخص امکان مقایسه کارایی اقتصادی مصرف آب در تولید سیب‌زمینی را فراهم کرده و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در زمینه بهینه‌سازی مصرف منابع آب و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های زراعی منطقه باشد.

کارایی تغذیه‌ای آبیاری

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل جامع‌تری از پایداری سامانه تولید سیب‌زمینی، شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE)^۲ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها بیانگر میزان مواد مغذی تأمین‌شده از محصول به‌ازای هر لیتر آب مصرف‌شده (شامل اجزای ردپای آب) هستند و امکان ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های

نتایج و بحث

بررسی اجزای ردپای آب نشان می‌دهد که در هر

دو منطقه، سهم ردپای آب آبی و خاکستری بیشتر از ردپای آب سبز بوده است. این موضوع نشان‌دهنده وابستگی بالای تولید سیب‌زمینی در این مناطق به منابع آب آبیاری و همچنین تأثیر قابل توجه کودها و آفت‌کش‌ها در ایجاد آلودگی‌های آبی است. کمترین سهم در هر دو منطقه مربوط به ردپای آب سبز (بارندگی مؤثر) است که نشان می‌دهد تولید سیب‌زمینی در این مناطق عمدتاً متکی به آبیاری بوده و سهم بارندگی در تأمین نیاز آبی این محصول کمتر است. لازم به ذکر است که تاریخ کشت سیب‌زمینی در منطقه مورد مطالعه معمولاً در نیمه دوم اردیبهشت آغاز می‌شود و برداشت آن نیز در اواخر شهریور تا اوایل مهرماه صورت می‌گیرد. این زمان‌بندی در محاسبه نیاز آبی، تبخیر و تعرق و نیز تفکیک اجزای ردپای آب لحاظ شده است.

مقایسه دو منطقه قروه و دهگلان نشان می‌دهد

که اگرچه ردپای کل آب در دهگلان بیشتر است، اما ترکیب اجزای ردپای آب در دو منطقه متفاوت است. در منطقه دهگلان، سهم ردپای آب آبی بیشتر از منطقه قروه است، در حالی که سهم ردپای آب خاکستری در منطقه قروه بیشتر است. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در شیوه‌های مدیریت آبیاری، شرایط خاک و استفاده از نهاده‌های شیمیایی در دو منطقه باشد.

ردپای آب سیب‌زمینی به تفکیک اجزای آن طی

دوره موردبررسی در جدول (۱) ارائه شده است. در دوره آماری مورد بررسی، میانگین ردپای کل آب برای تولید سیب‌زمینی در منطقه قروه ۴۳۱ مترمکعب بر تن و در منطقه دهگلان ۴۴۶ مترمکعب بر تن بوده است. این ارقام نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، تولید سیب‌زمینی در منطقه دهگلان نسبت به قروه، ردپای آب بیشتری داشته است. ردپای آب به تفکیک اجزای آن شامل آب آبی، سبز و خاکستری در هر دو منطقه قابل توجه است. در منطقه قروه، میانگین ردپای آب آبی، سبز و خاکستری به ترتیب ۲۲۱ و ۷/۱ و ۲۱۲ مترمکعب بر تن و در منطقه دهگلان به ترتیب ۲۲۸، ۵/۴۵ و ۲۱۲ مترمکعب بر تن بوده است. روند تغییرات ردپای آب طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد که در منطقه قروه، بیشترین ردپای کل آب مربوط به سال ۱۳۹۲ با ۵۵۰ مترمکعب بر تن و کمترین آن مربوط به سال ۱۳۹۸ با ۳۶۹ مترمکعب بر تن بوده است. همچنین، در منطقه دهگلان، بیشترین ردپای کل آب در سال ۱۳۹۷ با ۵۳۶ مترمکعب بر تن و کمترین آن در سال ۱۳۹۸ با ۳۷۶ مترمکعب بر تن مشاهده شده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی، مدیریت آبیاری و روش‌های کشت در سال‌های مختلف باشد.

جدول ۱- ردپای آب سیب‌زمینی به تفکیک اجزای آن طی دوره آماری ۱۳۹۰-۱۴۰۰ (مترمکعب بر تن)

سال	قروه				دهگلان			
	آبی	سبز	خاکستری	ردپای کل آب	آبی	سبز	خاکستری	ردپای کل آب
1390	211	6	202	419	242	3	202	447
1391	245	14	193	451	276	13	186	474
1392	209	12	329	550	249	4	161	415
1393	207	3	220	430	210	3	220	433
1394	208	4	210	423	255	4	204	463
1395	204	7	208	419	239	7	208	454
1396	176	10	212	398	186	3	212	401
1397	232	6	292	530	238	6	292	536
1398	177	11	181	369	188	7	181	376
1399	178	6	259	443	186	5	259	450
1400	223	4	179	406	224	4	190	419
میانگین	202	7.1	221	431	228	5.45	212	446

آبی: نمایانگر میزان مصرف آب‌های آبی (سطحی و زیرزمینی) است
سبز: میزان استفاده از آب باران ذخیره‌شده در خاک (رطوبت خاک)
خاکستری: بیانگر حجم آبی است که برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها

در جدول (۲)، نتایج بهره‌وری اقتصادی آب (تومان بر مترمکعب) و شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی طی دوره آماری ۱۳۹۰-۱۴۰۰ ارائه شده است. شاخص میانگین بهره‌وری اقتصادی آب در تولید سیب‌زمینی طی دوره مورد مطالعه در منطقه قروه ۳۸۸ تومان بر مترمکعب و در منطقه دهگلان ۳۷۲ تومان بر مترمکعب محاسبه شده است. این تفاوت ۱۶ تومانی در بهره‌وری اقتصادی نشان‌دهنده برتری نسبی منطقه قروه از نظر ارزش اقتصادی تولید شده به ازای هر واحد آب مصرفی است. عوامل متعددی از جمله مدیریت بهتر آبیاری، کیفیت بالاتر محصول، بازاریابی مناسب‌تر و یا هزینه‌های تولید پایین‌تر در منطقه قروه می‌تواند در این تفاوت مؤثر باشد. همچنین بررسی روند تغییرات سالانه بهره‌وری اقتصادی آب نشان می‌دهد که این شاخص در هر دو منطقه نوسانات قابل توجهی داشته است. در منطقه دشت قروه، بهره‌وری اقتصادی آب از ۲۸۱ تومان در سال ۱۳۹۰ به ۵۱۸ تومان بر مترمکعب در سال ۱۳۹۶ افزایش یافته که نشان‌دهنده رشد چشمگیر ۸۴/۳ درصدی است. پس از آن، این شاخص روند نزولی داشته و در سال ۱۴۰۰ به ۳۱۷ تومان بر مترمکعب کاهش یافته است. در منطقه دهگلان نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که بهره‌وری اقتصادی آب از ۳۷۸ تومان در سال ۱۳۹۰ به ۴۸۵ تومان بر مترمکعب در سال ۱۳۹۶ افزایش یافته (رشد ۲۸/۳ درصدی) و سپس با نوساناتی به ۳۴۷ تومان بر مترمکعب در سال ۱۴۰۰ رسیده است.

جالب توجه است که در هر دو منطقه، سال ۱۳۹۶ نقطه اوج بهره‌وری اقتصادی آب بوده است. این هم‌زمانی می‌تواند ناشی از شرایط بازار مطلوب، قیمت‌های بالاتر محصول و یا شرایط اقلیمی مناسب در آن سال باشد. همچنین، پس از سال ۱۳۹۶، هر دو منطقه با کاهش بهره‌وری اقتصادی مواجه شده‌اند که می‌تواند به دلیل تغییرات اقلیمی، افزایش هزینه‌های تولید، کاهش قدرت خرید مصرف‌کنندگان و یا تغییرات قیمت بازار باشد. به‌منظور افزایش دقت تحلیل اقتصادی و مقایسه بین‌ساله،

قیمت‌های مربوط به محصول سیب‌زمینی و هزینه‌های تولید در تمامی سال‌های مورد بررسی، با استفاده از نرخ رسمی تورم توسط بانک مرکزی، به سال پایه ۱۴۰۰ تعدیل شده‌اند. بر اساس نتایج جدول (۲)، شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی در دو منطقه قروه و دهگلان نشان می‌دهد که میانگین کارایی انرژی در منطقه قروه ۵/۹۵ کیلوکالری بر لیتر و در منطقه دهگلان ۵/۷۳ کیلوکالری بر لیتر بوده است. این اختلاف نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، هر لیتر آب مصرفی در منطقه قروه حدود ۳/۸ درصد انرژی غذایی بیشتری نسبت به منطقه دهگلان تولید می‌کند. روند تغییرات این شاخص در طول دوره مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین میزان کارایی انرژی در هر دو منطقه مربوط به سال ۱۳۹۸ با مقادیر ۸/۰۳ کیلوکالری بر لیتر در قروه و ۷/۲۱ کیلوکالری بر لیتر در دهگلان بوده است، این افزایش چشمگیر می‌تواند ناشی از بهبود تکنیک‌های آبیاری، استفاده از ارقام پرمحصول و توسعه تدریجی سامانه‌های آبیاری نوین در منطقه باشد. اگرچه داده‌های مربوط به سطح دقیق اراضی تحت پوشش آبیاری نوین برای برخی سال‌ها دارای ناپیوستگی و پراکندگی آماری بوده، اما اطلاعات دریافتی از جهاد کشاورزی شهرستان‌های قروه و دهگلان نشان می‌دهد که سطح بهره‌برداری از سامانه‌های تحت فشار در سال‌های اخیر روندی افزایشی داشته است. همچنین، استفاده از ارقام پرمحصول نیز نقش مهمی در افزایش عملکرد داشته است. در مناطق مورد مطالعه، ارقام رایج سیب‌زمینی شامل آگریا، پانامرا، اسپریت، ساگیتا، کولومبا، سیفرا، جلی و سانیتا می‌باشند که با توجه به سازگاری اقلیمی و پتانسیل تولید بالا، مورد استقبال کشاورزان قرار گرفته‌اند. دیگر نتایج جدول نشان می‌دهد که کمترین میزان کارایی انرژی در منطقه قروه مربوط به سال ۱۳۹۷ و در منطقه دهگلان نیز مربوط به همان سال با ۴/۱۵ کیلوکالری بر لیتر بوده است. این کاهش هم‌زمان در هر دو منطقه می‌تواند نشان‌دهنده شرایط نامساعد اقلیمی یا چالش‌های مدیریتی مشترک در آن سال باشد.

جدول ۲- محاسبه بهره‌وری اقتصادی آب و شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری در دشت قروه-دهگلان (* برحسب تومان بر مترمکعب)

سال	بهره‌وری اقتصادی	قروه					دهگلان				
		شاخص‌های کارایی رژیم غذایی					شاخص‌های کارایی رژیم غذایی				
		انرژی (kcal/L)	پروتئین (g/L)	کربوهیدرات (g/L)	فیبر (g/L)	قند (g/L)	انرژی (kcal/L)	پروتئین (g/L)	کربوهیدرات (g/L)	فیبر (g/L)	قند (g/L)
۱۳۹۰	۲۸۱	۴.۴۷	۰.۰۱۱	۰.۰۹	۰.۰۱۱	۰.۰۰۴	۵.۴۱	۰.۰۱۴	۰.۱۲	۰.۰۱۵	۰.۰۰۶
۱۳۹۱	۴۶۶	۶.۶۳	۰.۰۱۸	۰.۱۵	۰.۰۱۹	۰.۰۰۷	۴.۴۰	۰.۰۱۲	۰.۱۰	۰.۰۱۲	۰.۰۰۵
۱۳۹۲	۳۵۰	۵.۰۸	۰.۰۱۴	۰.۱۲	۰.۰۱۴	۰.۰۰۷	۵.۶۴	۰.۰۱۵	۰.۱۳	۰.۰۱۶	۰.۰۰۶
۱۳۹۳	۳۹۶	۶.۰۶	۰.۰۱۷	۰.۱۴	۰.۰۱۷	۰.۰۰۶	۵.۶۹	۰.۰۱۳	۰.۱۳	۰.۰۱۶	۰.۰۰۶
۱۳۹۴	۳۹۵	۵.۸۹	۰.۰۱۶	۰.۱۳	۰.۰۱۷	۰.۰۰۷	۵.۰۱	۰.۰۱۵	۰.۱۱	۰.۰۱۴	۰.۰۰۶
۱۳۹۵	۳۹۵	۵.۷۸	۰.۰۱۶	۰.۱۳	۰.۰۱۶	۰.۰۰۷	۵.۴۹	۰.۰۱۹	۰.۱۳	۰.۰۱۶	۰.۰۰۶
۱۳۹۶	۵۱۸	۷.۵۷	۰.۰۲	۰.۱۷	۰.۰۲۱	۰.۰۰۶	۷.۱۸	۰.۰۱۱	۰.۱۷	۰.۰۲۰	۰.۰۰۸
۱۳۹۷	۲۷۳	۴.۳۷	۰.۰۱۲	۰.۱۰	۰.۰۱۲	۰.۰۰۸	۴.۱۵	۰.۰۱۹	۰.۰۹	۰.۰۱۲	۰.۰۰۵
۱۳۹۸	۵۲۰	۸.۰۳	۰.۰۲۲	۰.۱۹	۰.۰۲۳	۰.۰۰۵	۷.۲۱	۰.۰۱۷	۰.۱۷	۰.۰۲۰	۰.۰۰۸
۱۳۹۹	۳۶۲	۶.۱۸	۰.۰۱۷	۰.۱۴	۰.۰۱۸	۰.۰۰۹	۶.۴۹	۰.۰۱۷	۰.۱۵	۰.۰۱۸	۰.۰۰۷
۱۴۰۰	۳۱۷	۵.۸۰	۰.۰۱۶	۰.۱۳	۰.۰۱۶	۰.۰۰۷	۶.۳۷	۰.۰۱۵	۰.۱۳	۰.۰۱۸	۰.۰۰۷
میانگین	۳۸۸	۵.۹۵	۰.۰۱۶	۰.۱۴	۰.۰۱۶	۰.۰۰۷	۵.۷۳	۰.۰۱۶	۰.۱۴	۰.۰۱۶	۰.۰۰۶

میانگین کارایی پروتئین در منطقه قروه ۰/۰۱۶ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان ۰/۰۲ گرم بر لیتر بوده است که نشان می‌دهد منطقه دهگلان حدود ۲۵ درصد کارایی بالاتری در تولید پروتئین به ازای واحد آب مصرفی دارد. بیشترین میزان کارایی پروتئین در منطقه قروه در سال ۱۳۹۸ و در منطقه دهگلان در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ مشاهده شده است. تفاوت در کارایی تولید پروتئین بین دو منطقه می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله تفاوت در ویژگی‌های خاک، تنوع ارقام مورد استفاده، مدیریت تغذیه گیاهی و شرایط اقلیمی باشد. بررسی‌های میدانی و گزارش‌های جهاد کشاورزی نشان داد که در منطقه دهگلان، مصرف نیتروژن به صورت هدفمندتر و مطابق با مراحل رشدی حساس گیاه انجام می‌شود و کشاورزان از تجربه بالاتری در کاربرد مؤثر کودهای ازته و مرغی برخوردارند. این مسئله می‌تواند منجر به بهبود جذب نیتروژن و افزایش کیفیت پروتئینی محصول شود. در مقابل، در منطقه قروه علی‌رغم مصرف بالاتر کودهای پایه، بهره‌گیری از نیتروژن بهینه نبوده که ممکن است بر کارایی نهایی تولید پروتئین تأثیر منفی داشته باشد.

همچنین با توجه به نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود که میانگین کارایی کربوهیدرات در هر دو منطقه ۰/۱۴ گرم بر لیتر بوده است که نشان می‌دهد علی‌رغم تفاوت‌ها در سایر شاخص‌ها، از نظر تولید کربوهیدرات به ازای واحد

آب مصرفی، هر دو منطقه عملکرد مشابهی دارند. بیشترین میزان کارایی کربوهیدرات در منطقه قروه مربوط به سال ۱۳۹۸ با ۰/۱۹ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان نیز مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ با ۰/۱۷ گرم بر لیتر بوده است. کمترین مقدار این شاخص نیز در قروه مربوط به سال ۱۳۹۰ با ۰/۰۹ گرم بر لیتر و در دهگلان مربوط به سال ۱۳۹۷ با ۰/۰۹ گرم بر لیتر است. این تشابه در کارایی کربوهیدرات می‌تواند نشان‌دهنده اثرات مشابه شرایط محیطی و مدیریتی بر تجمع نشاسته در سیب‌زمینی در هر دو منطقه باشد. از آنجاکه کربوهیدرات‌ها مهم‌ترین ترکیب مغذی در سیب‌زمینی هستند، این یافته از اهمیت زیادی برخوردار است.

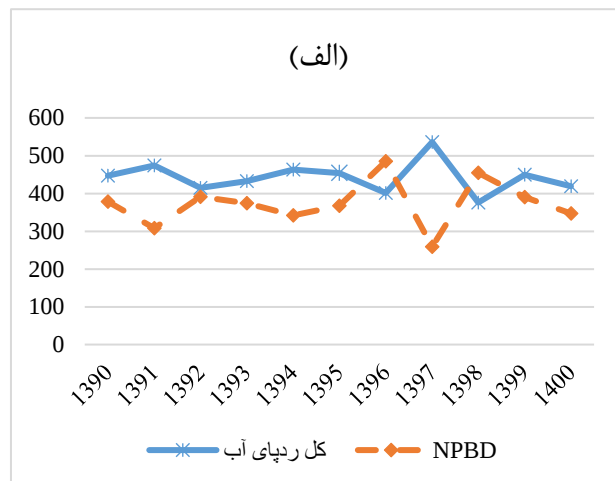
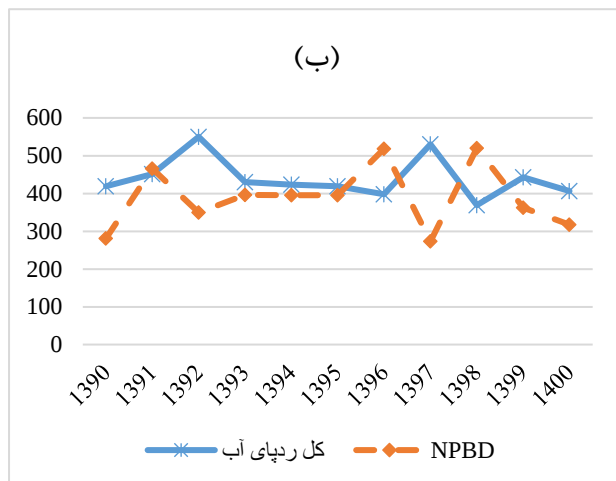
میانگین کارایی فیبر نشان می‌دهد که در منطقه قروه ۰/۰۱۶ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان ۰/۰۲ گرم بر لیتر بوده است که نشان‌دهنده برتری ۲۵ درصدی منطقه دهگلان در این شاخص است. فیبر رژیمی یک ترکیب مهم از نظر سلامتی است و کارایی بالاتر تولید آن در منطقه دهگلان می‌تواند یک مزیت از نظر تغذیه‌ای محسوب شود. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ارقام کشت‌شده، شرایط خاک و یا مدیریت زراعی در دو منطقه باشد. همچنین میانگین کارایی قند در منطقه قروه برابر ۰/۰۰۷ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان ۰/۰۱ گرم بر لیتر بوده است. این مقادیر نشان‌دهنده برتری قابل توجه (حدود ۴۳

درصدی) منطقه دهگلان در این شاخص است. بیشترین میزان کارایی قند در منطقه قروه در سال ۱۳۹۹ با ۰/۰۰۹ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ با ۰/۰۰۸ گرم بر لیتر مشاهده شده است. این تفاوت چشمگیر در کارایی قند نیز می‌تواند به دلیل تفاوت در شرایط اقلیمی، خصوصیات خاک و یا مدیریت آبیاری باشد که بر متابولیسم قندها در گیاه تأثیر می‌گذارد. از آنجا که میزان قند سیب‌زمینی بر طعم و بافت آن تأثیر می‌گذارد، این یافته می‌تواند از نظر کیفیت محصول نیز حائز اهمیت باشد.

مقایسه شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای بین دو منطقه نشان می‌دهد که به‌جز شاخص انرژی که در منطقه قروه بیشتر است، سایر شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای شامل پروتئین، فیبر و قند در منطقه دهگلان بیشتر از منطقه قروه بوده است. این الگوی متفاوت می‌تواند ناشی از مجموعه‌ای از عوامل محیطی، مدیریتی و ژنتیکی باشد. به‌عنوان مثال، تفاوت در نوع خاک، ارقام کشت‌شده، الگوی آبیاری، مدیریت کود و حاصلخیزی خاک و شرایط اقلیمی می‌تواند بر ترکیب شیمیایی سیب‌زمینی و در نتیجه شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای تأثیر بگذارد. این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آبی برای مدیریت پایدار منابع آب، افزایش بهره‌وری اقتصادی و بهبود ارزش تغذیه‌ای محصولات کشاورزی در این منطقه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، بررسی روند تغییرات سالانه شاخص‌ها نشان می‌دهد که در هر دو منطقه، سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ از نظر اکثر شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای، سال‌های برتر بوده‌اند. در مقابل، سال ۱۳۹۷ در هر دو منطقه با افت قابل توجه در اکثر شاخص‌ها همراه بوده است. این کاهش چشمگیر در شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای در سال ۱۳۹۷ را می‌توان به

وقوع خشکسالی شدید در این سال نسبت داد. خشکسالی ۱۳۹۷ یکی از شدیدترین خشکسالی‌های دهه اخیر بود که با کاهش قابل توجه بارندگی و افزایش دما، تأثیر منفی قابل توجهی بر تولیدات کشاورزی منطقه گذاشت. همچنین، روند کلی شاخص‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از سال ۱۳۹۸، اکثر شاخص‌ها در هر دو منطقه روند نزولی داشته‌اند. این می‌تواند هشدار برای سیاست‌گذاران و کشاورزان منطقه باشد که نیاز به بازنگری در روش‌های مدیریت آب، تغذیه گیاهی و سایر عملیات زراعی وجود دارد.

ارتباط بین شاخص ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی آب (NPBD) برای دشت‌های قروه و دهگلان در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج در هر دو منطقه، شاخص کل ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی نوسانات قابل توجهی داشته‌اند. نکته قابل تأمل آنکه در سال ۱۳۹۷، هر دو منطقه کاهش چشمگیری در شاخص NPBD را نشان می‌دهند که می‌تواند مرتبط با خشکسالی این سال باشد. در منطقه دهگلان (نمودار الف)، نوسانات شاخص ردپای آب ملایم‌تر بوده، درحالی‌که در قروه (نمودار ب) نوسانات شدیدتری به‌ویژه افزایش قابل توجه در سال ۱۳۹۲ مشاهده می‌شود. همچنین، در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۶، هر دو منطقه افزایش قابل توجهی در شاخص NPBD نشان می‌دهند که نشان‌دهنده بهبود بهره‌وری اقتصادی در این سال‌هاست. این تحلیل نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی مانند خشکسالی می‌توانند تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری اقتصادی در هر دو منطقه داشته باشند، اگرچه الگوی پاسخ در دو منطقه کمی متفاوت است.



شکل ۲- ارتباط بین ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی برای دشت‌های الف) دهگلان و ب) قروه

آبیاری در قروه است. بررسی روند تاریخی این شاخص‌ها آشکار می‌سازد که بهره‌وری اقتصادی آب در سال‌های خشکسالی (به‌ویژه سال ۱۳۹۷) با افت چشمگیری مواجه شده که هم‌زمانی آن با نوسانات قیمت سیب‌زمینی و افزایش هزینه‌های تولید، آسیب‌پذیری سامانه کشاورزی منطقه را در برابر تغییرات اقلیمی و اقتصادی نمایان می‌سازد.

ارزیابی شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری نیز ابعاد جدیدی از اهمیت بهینه‌سازی مصرف آب را آشکار می‌کند. هر لیتر آب مصرفی در قروه به‌طور میانگین ۵/۹۵ کیلوکالری انرژی و ۰/۰۱۶ گرم پروتئین تولید می‌کند، درحالی‌که این مقادیر در دهگلان به ترتیب ۵/۷۳ کیلوکالری و ۰/۰۲ گرم است. این اختلاف، متأثر از تفاوت در سامانه‌های آبیاری، کیفیت خاک و راهبردهای مدیریت مزرعه است. یافته‌های این پژوهش، همسو با نتایج پژوهش‌های ژنگ و همکاران (۲۰۱۶) و کهرمان‌اوغلو و همکاران (۲۰۲۰)، بر اهمیت رویکرد تلفیقی در ارزیابی پایداری سامانه‌های کشاورزی تأکید می‌ورزد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود به‌منظور ارتقای پایداری مصرف آب در منطقه، اقدامات اصلاحی بر مبنای نتایج واقعی شاخص‌ها صورت گیرد. با توجه به عملکرد بالاتر شاخص‌های تغذیه‌ای (به‌ویژه پروتئین و کربوهیدرات) در منطقه دهگلان، الگوبرداری از

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با رویکردی جامع‌نگر به ارزیابی شاخص‌های ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی و کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی دشت قروه-دهگلان در استان کردستان پرداخته است. یافته‌های این پژوهش، تصویری چندبعدی از وضعیت بحرانی منابع آبی و چالش‌های پیش روی کشاورزی پایدار در این منطقه ارائه می‌دهد. نتایج پژوهش نشان‌دهنده میانگین ردپای کل آب معادل ۴۳۱ و ۴۴۶ مترمکعب بر تن به ترتیب برای مناطق قروه و دهگلان است. حدود ۸۰ درصد از این مقدار را ردپای آب آبی (عمدتاً منابع آب زیرزمینی) تشکیل می‌دهد. این وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی، در راستای ممنوعیت بهره‌برداری از آبخوان‌های منطقه از دهه ۱۳۷۰، بیانگر فشار فزاینده بر منابع تجدیدنپذیر و روند نگران‌کننده تخلیه ذخایر استراتژیک آب است. علاوه بر این، افزایش معنادار ردپای آب خاکستری در سال‌های خشک (به‌ویژه سال ۱۳۹۲)، پیامد مستقیم کاربرد بی‌رویه کودهای شیمیایی در واکنش به تنش آبی است که آلودگی منابع آب را تشدید می‌کند. از دیدگاه اقتصادی، بهره‌وری آب در منطقه قروه با میانگین ۳۸۸ تومان بر مترمکعب، از دهگلان با میانگین ۳۷۲ تومان بر مترمکعب پیشی گرفته است. این تفاوت معنادار عمدتاً ناشی از عملکرد بالاتر محصول، مدیریت مؤثرتر نهاده‌ها و بهینه‌سازی هزینه‌های

کمی اکتفا نشود و ارزش تغذیه‌ای محصولات نیز در سیاست‌گذاری‌های کشاورزی مدنظر قرار گیرد. این پژوهش ضرورت گذار پارادایمی از رویکرد «تأمین آب بیشتر» به سمت «مدیریت کارآمدتر آب موجود» را برجسته می‌سازد. رویکرد مذکور می‌تواند الگویی کاربردی برای سایر دشت‌های بحرانی کشور باشد و در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه هدف ششم (آب پاک و بهداشت) و دوم (گرسنگی صفر)، گامی مؤثر محسوب می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

مدیریت تغذیه‌ای مؤثر این منطقه می‌تواند به سایر مناطق نیز تعمیم یابد. نوسانات شدید بهره‌وری اقتصادی آب در سال‌های خشک مانند ۱۳۹۷ نیز لزوم طراحی سازوکارهای حمایتی اقتصادی از جمله بیمه کشاورزی یا صندوق‌های جبرانی را آشکار می‌سازد. همچنین سهم بالای ردپای آب خاکستری در هر دو منطقه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و به‌ویژه نیتروژنی، از طریق آموزش و زمان‌بندی صحیح، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش بار آلودگی و افزایش کارایی زیست‌محیطی داشته باشد. اختلاف ردپای کل آب بین دو منطقه نیز ضرورت برنامه‌ریزی منطقه‌ای برای اصلاح مدیریت آبیاری و بهره‌وری منابع آب را نشان می‌دهد. افزون بر این، با توجه به تفاوت شاخص‌های تغذیه‌ای در سال‌های مختلف، توصیه می‌شود در ارزیابی عملکرد زراعی، صرفاً به تولید

فهرست منابع

۱. اسعدی، محمدعلی، وکیل‌پور، محمدحسن، مرتضوی، سید ابوالقاسم و نعمتی فرج، طاهره. ۱۳۹۸. برآورد ارزش اقتصادی آب مصرفی از رهیافت‌های تمایل به پرداخت کشاورزان سیب‌زمینی‌کار و ارزش تولید نهایی. مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۰(۴): ۱۰۳۷-۱۰۲۳.
۲. بهرامی، مهدی، اسعدی، محمدعلی و خلیلیان، صادق. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب با تأکید بر آبیاری‌های نوین و سنتی در محصولات زراعی شهرستان شهریار. مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۶(۳): ۲۹۳-۱۸۵. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.225362.1354>
۳. پیری، حلیمه و سارانی، رامین. ۱۳۹۵. بررسی بهره‌وری اقتصادی محصولات کشاورزی استان سیستان و بلوچستان با رویکرد ردپای آب. مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۱(۵)، ۱۱۰۴-۱۰۹۳.
۴. سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان. ۱۴۰۱. گزارش‌های سالیانه. <http://kurdistan.agri-jahad.ir> <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.289567.668325>
۵. شاهرخ‌نیا، محمدعلی و باغانی، جواد. ۱۴۰۰. بررسی میزان آب کاربردی و بهره‌وری آب مزارع سیب‌زمینی در شرایط زارعین استان فارس. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۳): ۶۳۵-۶۲۴.
۶. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کردستان. ۱۴۰۰. گزارش‌های امور آب استان. <https://www.kdrw.ir>
۷. صفدری، مهدی، حکمت‌نیا، مهران و خواجه دادمیری، الهه. ۱۴۰۰. کارایی مصرف آب گندم از دیدگاه ردپای آب (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۶): ۱۴۸۰-۱۴۶۹.
۸. فتحی تیلکو، زینب، فتحی، پرویز و حسین پناهی، فرزاد. ۱۳۹۵. تأثیر عمق جایگذاری نوار آبیاری و میزان آب کاربردی بر عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی در دشت دهگلان. مجله آب‌وخاک، ۳۰(۵): ۱۴۰۲-۱۳۹۴.

<https://doi.org/10.22067/jsv.v0i0.45453>

۹. کریمی، محمد، حقایقی مقدم، سید ابوالقاسم و جلینی، محمد. ۱۴۰۲. بررسی حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی در مزارع جو استان خراسان رضوی (سبزوار و نیشابور). تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی،

<https://doi.org/10.22092/idser.2023.363803.1561> ۸۶-۷۰: (۹۱)۲۴

10. Asaadi, M. A., Khalilian, S. and Mousavi, S. H. 2021. Evaluation of agricultural sustainability indicators and determination of cropping patterns with emphasis on deficit irrigation strategy: The case of the Qazvin irrigation network, Iran. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(1):11-23.
11. Boretti, A. and Rosa, L. 2019. Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 15.
12. Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B. and Azizi, K. 2022. Future climate change could reduce irrigated and rainfed wheat water footprint in arid environments. *Science of the Total Environment*, 807, 150991.
13. Drastig, K., Singh, R., Telesca, F. M., Carra, S. Z. and Jordan, J. 2023. A review of nutritional water productivity (NWP) in agriculture: why it is promoted and how it is assessed? *Water*, 15(24), 4278.
14. FAO. 2023. The state of food security and nutrition in the world 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
15. Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water resources management*, 21(1): 35-48.
16. Kahramanoğlu, İ., Usanmaz, S. and Alas, T. 2020. Water footprint and irrigation use efficiency of important crops in Northern Cyprus from an environmental, economic and dietary perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1): 134-141.
17. Kahramanoğlu, İ., Usanmaz, S. and Alas, T. 2020. Water footprint and irrigation use efficiency of important crops in Northern Cyprus from an environmental, economic and dietary perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1): 134-141.
18. Kunz, R., Reddy, K., Mthembu, T., Lake, S., Mabhaudhi, T., Chimonyo, V. and Naiken, V. 2024. Crop and Nutritional Water Productivity of Sweet Potato and Taro (No. 3124/1, p. 24). WRC Report.
19. Liu, X., Shi, L., Engel, B. A., Sun, S., Zhao, X., Wu, P. and Wang, Y. 2020. New challenges of food security in Northwest China: Water footprint and virtual water perspective. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118939.
20. Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7): 1259-1276.
21. Mizyed, A., Mogheir, Y. and Hamada, M. 2025. Assessment of blue and green agricultural water footprint in the Gaza Strip, Palestine. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 21(2): 326-334.
22. Prasad, R., Hochmuth, G. J. and Boote, K. J. 2015. Estimation of nitrogen pools in irrigated potato production on sandy soil using the model SUBSTOR. *PloS One*, 10(1), e0117891.
23. USDA. 2020. USDA FoodData Central. Printed at. (Accessed 12 March 2020). <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/nutrients/index>
24. Wu, M., Li, Y., Xiao, J., Guo, X. and Cao, X. 2022. Blue, green, and grey water footprints assessment for paddy irrigation-drainage system. *Journal of Environmental Management*, 302, 114116.
25. Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W. and Li, X. 2016. Environmental footprint of aluminum production in China. *Journal of Cleaner Production*, 133: 1242-1251.