



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

صفحه‌های ۵۱۱-۵۲۵

DOI: 10.22059/jwim.2022.339054.965

مقاله پژوهشی:

ارزیابی روش‌های مختلف آبیاری با استفاده از رویکرد همبست آب، انرژی، غذا و کربن

حوریه مسائلی^۱، سید علیرضا گوهری^{۲*}، محمد شایان‌نژاد^۳

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳

چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر استفاده هر یک از روش‌های آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای بر وضعیت حوضه زاینده‌رود است. به این منظور از رویکرد همبست آب، انرژی، غذا و کربن برای بررسی جامع استفاده شد. در رویکرد همبست با توجه به آثار متقابل مؤلفه‌ها، در جهت افزایش بهره‌وری و تأمین امنیت منطقه تلاش می‌شود. در مطالعه حاضر، این رویکرد در قالب یک شاخص ترکیبی جدید با عنوان شاخص همبست آب، انرژی، غذا و گازهای گلخانه‌ای (WEFGN) توسعه داده شده که با در نظر گرفتن ده شاخص شامل نهاده‌های مصرف تولید محصول، انرژی مصرفی برای آبیاری، خودکفایی غذایی، بهره‌وری اقتصادی و انتشار کربن به بررسی روش‌های آبیاری پرداخته است. این شاخص می‌تواند دیدگاهی جامع به مدیران و تصمیم‌گیران ارائه دهد. نتایج بررسی روش‌های آبیاری در سال ۱۳۹۹ نشان داد که با تغییر روش آبیاری کنونی به آبیاری قطره‌ای و بارانی در اثر کاهش آب مصرفی (به ترتیب ۱۷ و ۴/۸۴ درصد (۴۸۳/۷ و ۱۳۸/۵ میلیون مترمکعب در سال) وضعیت حوضه بهبود می‌یابد، اما در روش بارانی انرژی بیش‌تری جهت آبیاری نیاز است (۲۸۰/۵ درصد (۱۱۲۴۱۵/۸ هزار کیلوکالری در سال) و کربن منتشرشده در اثر افزایش انرژی آبیاری نیز ۸۷۴۳۲/۵ تن در سال (۷۳/۷ درصد) افزایش می‌یابد. بنابراین امتیاز شاخص WEFGN به ترتیب برای هر یک از روش‌های آبیاری قطره‌ای، بارانی و وضعیت کنونی برابر ۰/۸۶، ۰/۳۱ و ۰/۴۷ محاسبه شد و بهترین روش آبیاری در حوضه زاینده‌رود از منظر رویکرد همبست، آبیاری قطره‌ای شناخته شد.

کلیدواژه‌ها: آبیاری بارانی، آبیاری سطحی، آبیاری قطره‌ای، همبست آب غذا انرژی.

Evaluation of different irrigation methods using water, energy, food and carbon nexus approach

Hourieh Masaeli¹, Seyed Alireza Gohari^{2*}, Mohammad shayannejad³

1. M. Sc, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran..

3. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran..

Received: February 12, 2022

Accepted: July 07, 2022

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of using each of the surface, sprinkler and drip irrigation methods on the condition of Zayandehrud basin. For this purpose, water, energy, food and carbon nexus approach was used for a comprehensive study. In the nexus approach, considering their interactions, efforts are made to increase productivity and ensure the security of the region. In this study, this approach has appeared in the form of a newly developed index called water, energy, food and greenhouse gases nexus (WEFGN) and considering ten indicators including inputs of crop production, energy consumption for irrigation, food self-sufficiency, economic efficiency and carbon emissions were studied for irrigation methods that could provide a comprehensive view of managers and decision makers. The results of the study of irrigation methods in 2020 showed that by changing the current irrigation method to drip and sprinkler irrigation due to reduced water consumption (17 and 4.84 percent (483.7 and 138.5 million cubic meters per year, respectively)) the condition of the basin improves, but in the sprinkler method more energy is needed for irrigation (280.5 percent (112415.8 thousand kcal per year)) and the carbon released due to the increase in irrigation energy also increases to 87432.5 tons per year (73.7 percent). Therefore, the WEFGN index score for each of the drip irrigation, sprinkler and current status methods was 0.86, 0.31 and 0.47, respectively, and the best irrigation method in Zayandehrud basin in terms of nexus approach was drip irrigation.

Keywords: Drip irrigation, Sprinkler irrigation, Surface irrigation, Water Energy Food Nexus.

مقدمه

توجه علمی و عملی دارد به طوری که اعتراض‌هایی در سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ و همچنین اعتراض‌های اخیر در پی همین مشکل رخ داد (Esmaeili et al., 2020). عدم آگاهی کشاورزان از روش‌های صحیح آبیاری و مقدار آب مورد نیاز گیاه سبب شده این بخش آب بیش‌تری نسبت به نیاز خود مصرف کند. با توجه به اهمیت دستیابی به خودکفایی کشاورزی و استفاده صحیح از منابع آب و خاک، سیاست‌گذاران و مدیران تصمیم‌هایی جهت استفاده بهینه از نهاده‌های کشاورزی و استفاده از روش‌های نوین کشاورزی از جمله آبیاری تحت فشار اخذ کرده‌اند (Haddad et al., 2021).

بخش کشاورزی، به‌عنوان مصرف‌کننده اصلی آب در بیش‌تر کشورهای دنیا شناخته می‌شود و طبق آمار در ایران حدود ۹۰ درصد آب در دسترس در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. این موضوع ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب به‌منظور آبیاری اراضی است. در حوضه زاینده‌رود نیز حدود ۷۶ درصد از منابع آب صرف بخش کشاورزی می‌شوند. یکی از دلایل این موضوع ضعف در برنامه‌ریزی، اجرا، بازرسی، بهره‌برداری و نگهداری بوده که منجر به عملکرد پایین در توزیع آب کشاورزی می‌شود (Hosseini & Yasi, 2021). بررسی‌های انجام‌شده توسط مؤسسه تحقیقات فنی کشاورزی نشان می‌دهد که راندمان کاربرد آبیاری در سطح کشور از ۲۲/۵ تا ۸۵/۵ درصد متغیر بوده و میانگین آن ۵۶ درصد است. راندمان کاربرد بستگی به شرایط توپوگرافی، نوع خاک، شکل قطعه زمین و روش آبیاری دارد. به‌عنوان مثال طبق نتایج ارائه‌شده توسط این مؤسسه در سال ۱۳۹۵ با وجود این‌که روش آبیاری قطره‌ای بازده اسمی ۹۰ درصد و بیش‌تر از آن دارد، اما با توجه به موارد ذکر شده و با مقایسه روش‌های مختلف آبیاری تحت فشار ملاحظه می‌شود که میانگین بازده عملی آبیاری قطره‌ای

از مهم‌ترین نهاده کشاورزی که سبب محدودیت توسعه این بخش می‌شود، آب است. منابع آبی از ارزشمندترین منابع هر کشور محسوب شده و به‌عنوان مهم‌ترین منبع راهبردی برای جوامع بشری به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک دنیا معرفی می‌شوند. از دیرباز سیاست‌گذاران در چنین مناطقی تلاش نموده‌اند تا از روش‌های مختلف برای مدیریت و رفع بحران آب استفاده نمایند. با این حال شواهد نشان می‌دهد که بحران آب می‌تواند توسط تصمیم‌های ناپایدار برای تأمین نیاز آب، به‌وجود آمده و یا تشدید شود (Gohari et al., 2013). آب در بخش‌های مختلف منابع طبیعی و اقتصادی از جمله کشاورزی نقش حیاتی داشته است، به این صورت که به‌عنوان مثال در حوضه زاینده‌رود، کشاورزی با ایجاد اشتغال ۲۳ درصدی از کل مشاغل موجود و تولید ناخالص چهار تا هفت درصدی نسبت به کل تولید ناخالص کالا برحسب میلیون ریال نه‌تنها سبب تأمین نیاز غذایی مردم شده است بلکه نقش کلیدی در توسعه پایدار دارد (Statistical Yearbook of Iran, 2019 (A); Statistical Yearbook of Iran, 2019 (B)).

تغییر پارامترهای اقلیمی، کمبود منابع آب، رشد روزافزون جمعیت (با متوسط شیب رشد ۲/۱۸ درصد) و به‌دنبال آن نیاز به تأمین غذا و توسعه بیش‌تر، همگی باعث برداشت بی‌رویه از منابع شده است (Ravar et al., 2020). به‌طوری‌که در ۱۰ سال گذشته رودخانه زاینده‌رود از اصفهان تا تالاب گاوخونی هم‌چون رودخانه دائمی جاری نبوده و ورودی تالاب گاوخونی از سال ۲۰۱۰ به بعد تقریباً برابر صفر شده است و در سال‌های اخیر کم‌تر از ۶۰ میلیون مترمکعب آب به این بخش رسیده است (Haddad et al., 2021). بحران آب در حوضه علاوه بر مشکلات کمبود آب، تبعات سیاسی و اجتماعی زیادی را نیز در منطقه داشته است. رویدادهای تلخی که نیاز به

در رویکرد همبست، آب، غذا و انرژی از جایگاه و اهمیت برابر با یکدیگر برخوردارند هرچند در بیش‌تر موارد، منابع آب در محور همبست قرار گرفته است (Benson et al., 2015). هدف نهایی در رویکرد همبست، توجه به تأمین هم‌زمان مؤلفه‌های آن می‌باشد (Schlör et al., 2018). از مهم‌ترین مؤلفه‌های مرتبط در این زمینه، موضوع امنیت است. نخستین تعریف پیرامون امنیت آبی در گزارش سال ۱۹۹۶ میلادی سازمان خواروبار جهانی^۲ ارائه شد. یکی از نقاط مثبت رویکرد همبست، ورود به مباحث امنیت و توجه هم‌زمان به امنیت مؤلفه‌های هر بخش است (Barjesteh et al., 2020).

برخی از پژوهش‌هایی که در بخش کشاورزی و آب مصرفی با استفاده از رویکرد همبست آب، غذا و انرژی انجام شده، به این شرح است؛ García et al. (2018) با استفاده از رویکرد همبست آب، غذا و انرژی به بررسی اثرات اجرایی کردن مدرنیزاسیون کشاورزی و استفاده از سیستم‌های تحت فشار آبیاری در اسپانیا پرداختند. نتایج نشان داد باوجود کاهش ۲۳ درصدی مصرف آب، به دلیل افزایش تقاضای انرژی و افزایش ۵۲ درصدی هزینه اجرا و نگهداری سیستم‌ها، کشاورزان با مشکلات جدی روبه‌رو شدند. Arvandi et al. (2022) سامانه‌های نوین آبیاری را با استفاده از رویکرد همبست آب، غذا و انرژی و با تکیه بر مفهوم امنیت در هریک از منابع ذکر شده بررسی کردند و نشان دادند روش‌های آبیاری ارائه شده تأثیر مثبتی بر امنیت هر سه محور آب، غذا و انرژی دارد. El-Gafy (2017) تأثیر تولید محصولات کشاورزی را با استفاده از شاخص توسعه داده شده WEFNI براساس رویکرد همبست آب، غذا و انرژی بررسی کرد و یک الگوی کشت بهینه برای مصر ارائه داد. هم‌چنین Sadeghi et al. (2020) با توسعه شاخصی برگرفته از شاخص El-Gafy (2017) و بر مبنای همبست آب، غذا و انرژی

۷۱ درصد و برای آبیاری بارانی ۶۲ درصد ذکر شده است (Abbasi et al., 2015). Zare Abyaneh et al. (2021) با پژوهش بر ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری نوین در شهرستان همدان نشان دادند که استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری به علت عوامل اقلیمی، لوازم نامناسب، مشکلات بهره‌برداری و عدم بازمبانی دوره‌ای و آموزش، راندمانی کم‌تر از حد انتظار داشته است. هم‌چنین ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری را یکی از راه‌کارهای مفید جهت مدیریت مصرف آب معرفی کردند. Bayati et al. (2022) به بررسی بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی پرداختند. آن‌ها این امر را بر افزایش نسبی تولید محصولات کشاورزی مؤثر خوانده و به‌منظور کمی‌سازی عملکرد آن از توسعه شاخص استفاده کردند. نتایج نشان داد که بهبود شبکه آبیاری از دستی به خودکار حدود ۵۳ درصد سبب بهبود شاخص می‌شود. Nikbakht & Najib (2015) تأثیر تبدیل سامانه‌های سنتی آبیاری را به سامانه‌های تحت فشار در دشت عجب‌شیر بررسی کردند، نتایج نشان داد که با افزایش راندمان ناشی از این تغییر، سطح آب‌های زیرزمینی این دشت ۳/۲۳ میلیون مترمکعب در سال افزایش می‌یابد.

آب، غذا و انرژی با وجود تفاوت‌های بسیار با یکدیگر، در عین حال ارتباط بسیار نزدیکی نیز دارند و دارای اثرات متقابل بر یکدیگر هستند، لذا امروزه مفهوم جدیدی به نام همبست مطرح شده است. در این رویکرد با توجه به پیوستگی این منابع و اثرات متقابل آن‌ها، در جهت افزایش بهره‌وری و تأمین امنیت منطقه تلاش می‌شود. مفهوم همبست آب، غذا و انرژی نخستین بار در سال ۲۰۱۱ در کنفرانس شهر بن با عنوان همبست امنیت آب، غذا و انرژی راهی برای اقتصاد سبز مطرح شد. پس از آن و از سال ۲۰۱۳ پژوهش‌گران به بررسی این دیدگاه و تبیین چستی آن پرداختند (Barjesteh et al., 2020).

همچنین با عدم استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی و مدل‌سازی آب و انرژی مانند WEAP^۳ و LEAP^۴ مشکلات استفاده موازی از چند نرم‌افزار و فرض بر خطی بودن روابط نیز حل گشته است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به منظور بررسی و مقایسه کارایی روش‌های آبیاری در حوضه آبریز زاینده‌رود انجام گرفته است. برای این منظور یک شاخص ترکیبی WEFGN مشتمل بر ۱۰ شاخص با دیدگاه همبست آب، انرژی، غذا و کربن و با در نظر گرفتن مسائل اجتماعی و اقتصادی ارائه می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت ۴۱۳۴۷ کیلومتر مربع جزئی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران است (Gohari, 2013). این حوضه در محدوده جغرافیایی ۲۴° تا ۵۰° طول شرقی و ۱۲° تا ۳۱° عرض شمالی قرار گرفته که حدود ۹۰/۹ درصد حوضه آبریز در استان اصفهان واقع شده است (Hajian & Hajian, 2015) (شکل ۱).

به تعیین الگوی بهینه کشاورزی در مقیاس حوضه آبریز سازند پرداختند.

طبق مطالعات مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و پژوهش‌های انجام شده توسط سایر پژوهش‌گران، افزایش راندمان آبیاری سبب شده حجم قابل توجهی از منابع آب به چرخه تولید بازگردد و بخش بزرگی از نیازهای آب کشاورزی از این طریق برآورده شود (Abbasi et al., 2015). در این مطالعه تأثیر اجرای کامل سامانه‌های نوین آبیاری با استفاده از شاخص WEFGN بررسی شده است. نوآوری این پژوهش ارائه شاخص ترکیبی بر مبنای همبست، همانند شاخص توسعه یافته توسط El-Gafy (2017) یا Sadeghi et al. (2020) است به این صورت که علاوه بر در نظر گرفتن آب، غذا و انرژی، مسائل زیست محیطی و انتشار کربن ناشی از گازهای گلخانه‌ای، مسائل اجتماعی و اقتصادی و امنیتی را نیز در نظر می‌گیرد. در این شاخص سعی شده است به هر بخش از همبست توجه یکسانی شود و برخلاف بسیاری از مطالعات انجام شده (مانند Goodarzi et al. (2019)) یکی از بخش‌ها محور قرار نگیرد.

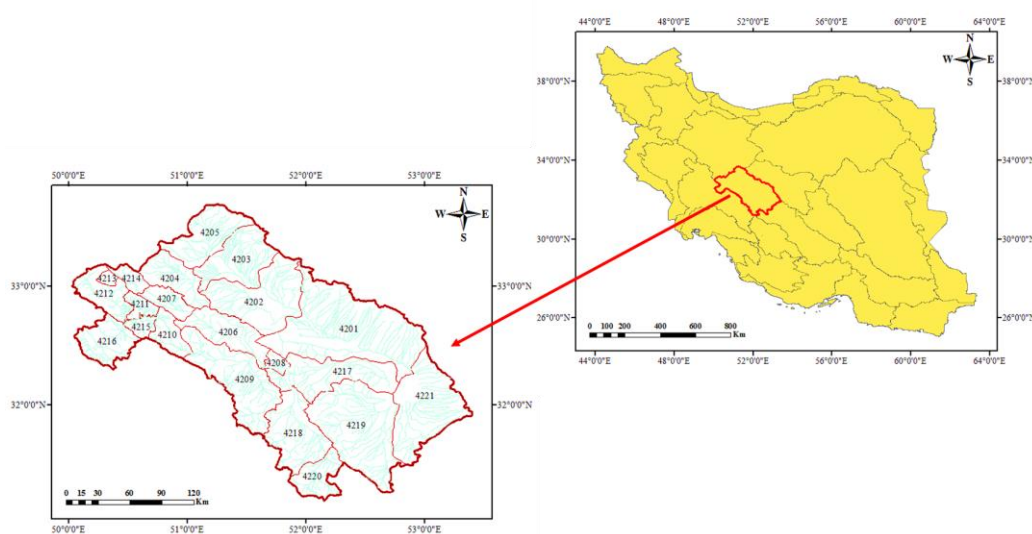


Figure 1. Location of the study area

بخش کشاورزی، هم‌چنان کم‌تر از ۴۰ درصد از زمین‌های زیرکشت منطقه مورد مطالعه، با این روش آبیاری می‌شوند. از جمله دلایل احتمالی توسعه کم‌تر روش آبیاری تحت فشار با وجود تنش آبی موجود در حوضه، هزینه زیاد اجرای این روش و هم‌چنین هزینه‌های نگهداری و مصرف برق آن می‌باشد.

طبق اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۹، به‌طور میانگین ۳۳ درصد (۹۰۲۶۶ هکتار) به‌روش تحت فشار کشت می‌شوند که ۵۵/۸۷ درصد (۵۰۴۳۱ هکتار) آن به‌روش قطره‌ای و تیپ، ۲۹/۰۳ درصد (۲۶۲۰۴ هکتار) به‌روش بارانی و ۱۵/۱ درصد (۱۳۶۳۰ هکتار) به‌روش کم‌فشار آبیاری می‌شوند. با وجود آن‌که راندمان روش آبیاری بارانی به‌علت تبخیر بیش‌تر و بادبردگی نسبت به‌روش قطره‌ای کم‌تر است، کشاورزان گاهی تمایل بیش‌تری نسبت به استفاده از آن نشان می‌دهند. علت تمایل بیش‌تر به‌روش آبیاری بارانی به‌صرفه‌بودن اقتصادی آن است. در مقایسه این روش با روش‌های دیگر، به‌علت عمر مفید بیش‌تر هزینه بهره‌برداری کاهش می‌یابد. این در حالی است که در روش‌های دیگر مانند تیپ با وجود هزینه اجرای اولیه کم‌تر، نیاز به تعویض دوره‌ای لوله‌های تیپ منجر به تحمیل هزینه‌های بیش‌تر به بهره‌بردار می‌شود.

در مورد انرژی مصرفی برای هر یک از روش‌های آبیاری باید گفت که در روش آبیاری بارانی به‌علت فشار بیش‌تر (ارتفاع آب) مورد نیاز در آب‌پاش‌ها، مصرفی ۱/۵ برابر برق مصرفی پمپ برای روش آبیاری قطره‌ای می‌باشد که این امر خود نیز به عوامل دیگری مانند نوع محصول، فاصله گیاهان، توپوگرافی و آب و هوا بستگی دارد.

توسعه شاخص ترکیبی WEFGN بر مبنای همبست آب، انرژی، غذا و محیط زیست
مراحل اصلی توسعه شاخص ترکیبی عبارتند از ۱- پیشنهاد

طبق سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت حوضه زاینده‌رود برابر با ۵۱۲۰۸۵۰ نفر با متوسط رشد سالانه ۰/۹۷ درصد بوده است. بهره‌برداری‌های کشاورزی این منطقه برحسب نوع فعالیت به‌ترتیب از بیش‌ترین به کم‌ترین شامل، زراعت، باغداری و کشت گلخانه‌ای می‌باشد. مساحت کشت به تفکیک شامل کشت آبی ۳۲۹۷۴۰ هکتار و کشت دیم ۵۲۷۲۷ هکتار است. از بین محصولات کشت‌شده ۷۰۲۵۳ هکتار به گندم، ۴۵۸۹۵ هکتار به جو و ۳۳۵۳ هکتار به برنج اختصاص یافته است. سایر محصولات زراعی ۶۷۵۱۸ هکتار از زمین‌های تحت کشت را به خود اختصاص داده‌اند (Statistical Yearbook of Iran, 2017).

آب این حوضه از کوه‌های کوه‌رنگ و زردکوه بختیاری تغذیه شده و رودخانه زاینده‌رود را که تأمین‌کننده عمده آب‌های سطحی و زیرزمینی استان به‌شمار می‌رود، تشکیل می‌دهد. این رودخانه به‌عنوان بزرگ‌ترین رودخانه مرکزی ایران از غرب به شرق امتداد یافته و به باتلاق گاوخونی منتهی می‌شود. هم‌چنین منابع آب زیرزمینی با تأمین بیش از ۶۰ درصد آب مورد استفاده حوضه نقش مهمی در آب مورد نیاز منطقه دارد. در صورت مدیریت در برداشت از آن‌ها، این منابع تضمین‌کننده توسعه پایدار خواهند بود. با این حال، با برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی و سطحی، تعادل منابع به‌هم خورده و باعث ایجاد شرایط بحرانی در منطقه شده است. طبق پژوهش Keesstra et al. (2018)، از راه‌کارهای حل بحران، کاهش برداشت، افزایش راندمان آبیاری و عملکرد محصولات کشت شده است که همگی این موارد در راستای اهداف کشاورزی پایدار و راه‌حلی مبتنی بر طبیعت برای ارتقای خدمات اکوسیستم بوده است. مطابق با آمار ارائه‌شده از سوی جهاد کشاورزی استان اصفهان، با وجود آثار مثبت آبیاری تحت فشار از جمله افزایش راندمان آبیاری و کاهش تلفات آب در

بخش کشاورزی^۹ بدون در نظر گرفتن انرژی لازم برای آبیاری در سال t برحسب کیلوکالری است.

شاخص انرژی مصرفی به منظور آبیاری

با توجه به این که در روش‌های آبیاری تحت فشار نیاز به مصرف انرژی است، لذا در کشاورزی نوین انرژی بیش‌تری نسبت به حالت سنتی مصرف می‌شود شاخص انرژی مصرفی به‌ازای آب مصرف‌شده جهت آبیاری^{۱۰} $ECWC(t)$ با در نظر گرفتن روش‌های مختلف آبیاری محاسبه شده و با استفاده از رابطه (۳) انرژی مصرفی به‌ازای مقدار آب آبیاری مشخص می‌شود.

$$ECWC(t) = \frac{ECI(t)}{AWC(t)} \quad (3)$$

در رابطه فوق، $ECI(t)$ انرژی مصرفی برای آبیاری^{۱۱} برحسب کیلوکالری و $AWC(t)$ آب مصرفی بخش کشاورزی در سال t برحسب میلیون مترمکعب است.

شاخص خود کفایی غذایی

از مهم‌ترین زمینه‌های امنیت در هر منطقه موضوع امنیت غذایی است که با شاخص‌های مختلفی سنجیده می‌شود. پس از بررسی شاخص‌های موجود شاخص نسبت خودکفایی^{۱۲} (SSR) برای سنجش این متغیر در حوضه انتخاب شد. شاخص مورد استفاده در این پژوهش برگرفته از شاخص نرخ خودکفایی کشور بوده که در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان خواروبار جهانی ارائه شده و بیانگر مقدار تولید با توجه به مصرف و نیاز است. هرچه نسبت این شاخص در منطقه بالاتر باشد واردات و در نتیجه وابستگی در آن کم‌تر بوده و خودکفایی بیش‌تر است (Soflae shahr babak et al., 2018).

شاخص خودکفایی غذایی^{۱۳} در حوضه $FS(t)$ با در نظر گرفتن میزان تولید و نیاز غذا تعریف می‌شود. مقدار این شاخص، تعیین‌کننده آن است که حوضه برای تأمین غذا

۱۰ شاخص برای دریافت روابط بین آب، انرژی، غذا، محیط زیست و اجتماعی-اقتصادی، ۲- توسعه شاخص یکپارچه همبست آب، انرژی، غذا و محیط زیست (WEFGN) براساس ۱۰ شاخص ذکر شده.

شاخص‌های نهاده‌های مصرفی تولید محصولات کشاورزی

سالانه مقدار قابل توجهی از منابع آب، خاک، کود و سموم برای تولید محصولات کشاورزی مصرف می‌شوند تغییر روش کشاورزی بر روی نهاده‌های مصرفی مؤثر بوده و سبب تغییراتی در مصارف لازم برای تولید محصولات می‌شود که بر محیط زیست و زندگی انسان‌ها نیز بی‌تأثیر نیست (Khoram & Amin ghafouri, 2015).

شاخص آب مصرفی به‌ازای محصول تولیدی: محاسبه و بررسی شاخص آب مصرفی به‌ازای محصول تولیدی^۵ $WCC(t)$ بیانگر آب مورد نیاز برای تولید یک واحد از محصولات کشاورزی است و با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$WCC(t) = \frac{CPA(t)}{AWC(t)} \quad (1)$$

در رابطه یک، $CPA(t)$ محصول تولیدشده^۶ برحسب تن در سال و $AWC(t)$ آب مصرفی بخش کشاورزی^۷ در سال t برحسب میلیون مترمکعب است.

شاخص انرژی مصرفی به‌ازای محصول تولیدی: شاخص انرژی مصرفی به‌ازای محصول تولیدی^۸ $ECC(t)$ با در نظر گرفتن محصول تولیدشده از بخش کشاورزی و انرژی مصرف‌شده برای تولید آن تعریف می‌شود. مقدار این شاخص، تعیین‌کننده انرژی مصرفی به‌ازای هر واحد محصول تولید شده است.

$$ECC(t) = \frac{CPA(t)}{AEC(t)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $CPA(t)$ محصول تولیدشده بخش کشاورزی برحسب تن در سال و $AEC(t)$ انرژی مصرفی

محدودیت کیفی و کمی آب در حوضه مورد مطالعه و به‌طور کلی کشور از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. این شاخص بیانگر ارزش افزوده تولید غذا به‌ازای هر واحد آب است و طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$WCEP(t) = \frac{AVC(t)}{AWC(t)} \quad (5)$$

در رابطه فوق، $AVC(t)$ ارزش افزوده تولید محصولات کشاورزی^{۱۷} برحسب میلیون ریال در سال و $AWC(t)$ آب مصرفی بخش کشاورزی در سال t برحسب میلیون مترمکعب است.

شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی در تولید محصولات کشاورزی: شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی بخش محصولات کشاورزی^{۱۸} $ECEP(t)$ با در نظر گرفتن ارزش افزوده و انرژی مصرف شده برای تولید غذا تعریف می‌شود. مقدار این شاخص، تعیین‌کننده ارزش افزوده غذا به‌ازای هر واحد انرژی است.

$$ECEP(t) = \frac{AVC(t)}{AEC(t)} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $AVC(t)$ ارزش افزوده تولید محصولات کشاورزی برحسب میلیون ریال و $AEC(t)$ انرژی مصرفی بخش کشاورزی در سال t برحسب کیلوکالری است.

شاخص بهره‌وری اقتصادی محصولات کشاورزی نسبت به کربن منتشر شده: انتشار کربن در اتمسفر سبب جلوگیری از خروج گرما و تشدید اثر گلخانه‌ای در کره زمین شده که تأثیر زیادی بر اقلیم و زندگی انسان بر جای می‌گذارد و خسارت‌هایی را به دنبال دارد (Vafabakhsh & Mohammadzadeh, 2019).

به واردات از خارج وابسته است یا توانمندی تأمین نیاز غذایی خود و یا حتی صادرات به خارج از حوضه را دارد.

$$FS(t) = \frac{FP(t)}{FD(t)} \quad (4)$$

$FP(t)$ غذا تولید شده^{۱۴} و $FD(t)$ غذای مورد نیاز^{۱۵} در سال t در حوضه است.

غذای مورد نیاز برحسب جمعیت و رژیم غذایی کنونی ساکنین حوضه (جدول ۱) محاسبه می‌شود. بنابراین شاخص توسعه داده شده برای بررسی وضعیت حوضه در اثر تغییراتی هم‌چون تغییر در رژیم غذایی و جمعیت نیز مناسب است. به‌منظور بررسی وضعیت حوضه در قسمت کشاورزی با توجه به گروه‌بندی رژیم غذایی ده گروه مدنظر قرار گرفت. هشت گروه رژیم غذایی به علاوه کشت دیم و گلخانه‌ای.

شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی

ارتقای بهره‌وری منابع در تولید از مسائل کلیدی و جهانی است لذا با اندازه‌گیری و تحلیل شاخص‌های مرتبط با آن برای مدیریت بهتر و بهبود شرایط تلاش می‌شود. شاخص‌های مرتبط با ارتقای بهره‌وری اقتصادی منابع در کشاورزی از جمله شاخص‌های پراهمیت بوده که علاوه بر مدیریت مصارف و تولید، ارزش افزوده محصولات کشاورزی را نیز بررسی کرده و اطلاعات مفیدی در اختیار مدیران قرار می‌دهد (Zamani et al., 2014).

شاخص بهره‌وری اقتصادی آب در تولید محصولات کشاورزی: محاسبه و بررسی شاخص بهره‌وری اقتصادی آب بخش تولید محصولات^{۱۶} $WCEP(t)$ به دلیل

Table 1. Per capita consumption and greenhouse gas emissions diet food groups (Institute for Strategic Studies - Center for Industry, Mining and Trade Information Analysis, 2013; Soltani, 2019)

Crop products	Per capita food consumption (gr/day)	Greenhouse gas emissions (Kg equivalent of CO ₂ /ton)	Selected plant	Yield of crops (tons/ha)	Water Requirements from NETWAT (m ³)	Crop area (ha)
Cereals	215.8	776	Wheat	4.45	6015	56261
Rice	126	850	Rice	5.5	7000	6789
Beans	30.6	1241	Beans	2.2	6165	3007
Potato	68	153	Potato	29.5	6660	12406
Oil Seeds	46	1625	Canola	3.2	2500	457
Sugar plants	49.5	86	Sugar beet	39	8950	1315
Fruits	212	463	Almond	1.2	8235	7096
Vegetables	228	95	Onion	61.2	7570	5044

میزان کربن آزاد شده به‌زای هر واحد انرژی تعریف و طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود. هم‌چنین با توجه به فرایند تولید برق و تأثیر آن در افزایش آلودگی هوا لازم است، کربن منتشر شده در اثر تولید آن نیز لحاظ شود.

$$ECR(t) = \frac{EGE(t)}{AEC(t)} \quad (9)$$

در رابطه فوق، $EGE(t)$ گاز گلخانه‌ای منتشر شده مصرف انرژی^{۲۴} برحسب کیلوگرم معادل CO_2 در سال و $AEC(t)$ انرژی مصرفی بخش کشاورزی در سال t در حوضه برحسب کیلوکالری است. انرژی مطرح شده در این قسمت، به انرژی مورد نیاز برای فعالیت‌های کشاورزی، تنظیم دمای گلخانه‌ها و برداشت آب از منابع در دسترس به‌منظور مصرف در بخش کشاورزی اشاره دارد. ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی (کیلوگرم معادل CO_2 در هر لیتر) برای سوخت‌های بنزین، گاز طبیعی، نفت، گاز، نفت سفید، نفت و گازوئیل به‌ترتیب برابر ۲/۳، ۰/۰۰۱۹۴، ۲/۲۵، ۲/۶۱، ۲/۷ و ۱/۵۲ است (Velaiatzade, 2018; Independent Statistics Analysis U.S Energy Information Administration, 2021).

شاخص کربن منتشر شده آب مصرفی: در شاخص کربن منتشر شده آب مصرفی^{۲۵} $RCW(t)$ با توجه به توضیحات پیشین، تنها به بررسی کربن منتشر شده در اثر آبیاری تحت فشار و انرژی مصرفی ناشی از آن پرداخته می‌شود و با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$RCW(t) = \frac{EGEI(t)}{AWC(t)} \quad (10)$$

در این رابطه، $EGEI(t)$ گاز گلخانه‌ای منتشر شده مصرف انرژی جهت آبیاری^{۲۶} برحسب کیلوگرم معادل CO_2 در سال و $AWC(t)$ آب مصرفی بخش کشاورزی در سال t در حوضه برحسب میلیون مترمکعب است.

شاخص ترکیبی WEFGN

شاخص ترکیبی مورد نظر با در نظر گرفتن تمامی

شاخص بهره‌وری اقتصادی محصولات نسبت به کربن منتشر شده^{۱۹} $FPEPC(t)$ با در نظر گرفتن ارزش افزوده غذا و کربن منتشر شده برای تولید محصولات کشاورزی تعریف می‌شود.

$$CPEPC(t) = \frac{AVC(t)}{RCC(t)} \quad (7)$$

در رابطه فوق، $AVC(t)$ ارزش افزوده تولید محصولات کشاورزی برحسب میلیون ریال در سال و $RCC(t)$ کربن آزاد شده تولید محصولات کشاورزی^{۲۰} در سال t برحسب کیلوگرم است.

شاخص‌های انتشار کربن

استفاده از رویکرد همبست آب، غذا و انرژی برای اهدافی هم‌چون توسعه پایدار و دستیابی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است. لذا سازمان خواروبار جهانی نیز بر وابستگی همبست و مسائل تغییر اقلیم تأکید کرده است (Tayebi, 2020).

شاخص کربن منتشر شده محصول تولیدی: شاخص کربن منتشر شده در اثر تولید محصولات کشاورزی^{۲۱} $CRC(t)$ با در نظر گرفتن ضریب انتشار کربن برای تولید هر یک از محصولات غذایی براساس نهاده‌های مصرفی مطابق جدول (۱) به بررسی تأثیر تولید مواد غذایی بر کربن منتشر شده و مسائل تغییر اقلیم می‌پردازد و طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$CRC(t) = \frac{EGC(t)}{CPA(t)} \quad (8)$$

در رابطه فوق، $EGC(t)$ گاز گلخانه‌ای منتشر شده برای تولید محصولات^{۲۲} برحسب تن معادل CO_2 در سال و $CPA(t)$ محصول تولید شده بخش کشاورزی برحسب تن در سال t در حوضه است. در نهایت شاخص محاسبه شده بی‌بعد می‌باشد.

شاخص کربن منتشر شده انرژی مصرفی: شاخص کربن منتشر شده مصرف انرژی^{۲۳} $ECR(t)$ برای محاسبه و تحلیل

(برای محصولات مناسب این کشت به جز گلخانه‌ها و درختان) بررسی و با استفاده از شاخص ارائه‌شده مقایسه شود. داده‌های مورد استفاده مربوط به سال ۹۹-۱۳۹۸ بوده و از جهاد کشاورزی استان اصفهان، شرکت توزیع برق اصفهان، آب منطقه‌ای اصفهان و سالنامه‌های ارائه‌شده توسط مرکز آمار ایران جمع‌آوری شده است.

نتایج و بحث

پژوهش حاضر در راستای بررسی روش‌های آبیاری، نشان می‌دهد که با استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری، آب مورد نیاز برای کشت محصولات کاهش یافته و باعث بهبود بهره‌وری در کشاورزی می‌شود که این نتیجه مؤید نتایج حاصل از پژوهش‌های ارائه‌شده می‌باشد. مطابق توضیحات مطرح‌شده، در صورت جایگزین کردن روش آبیاری کنونی با روش آبیاری قطره‌ای مشاهده می‌شود آب مصرفی ۱۷ درصد کاهش یافته (شکل A-۲) و در نتیجه آن فشار بر منابع آب که از معضلات اصلی منطقه مورد مطالعه است نیز کاهش می‌یابد. انرژی کل که شامل انرژی لازم برای آبیاری و سایر موارد می‌باشد، به میزان ۰/۷ درصد (۴۰۷۱۰/۱ هزار کیلوکالری) کاهش یافته است و این امر موجب شده انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز ۰/۸ درصد کاهش (۱۱۰۳۳/۵ تن) یابد (شکل B و C-۲). بنابراین همان‌طور که در شکل (C-۲) مشاهده می‌شود با اجرای آبیاری قطره‌ای نسبت به وضعیت کنونی تمامی ابعاد مصرف آب، مصرف انرژی و انتشار کربن بهبود می‌یابد.

مطابق شکل (A-۲)، در صورت تغییر روش کنونی آبیاری به آبیاری بارانی، کاهش ۴/۸۳ درصدی میزان آب مصرفی مشاهده می‌شود، بنابراین استفاده از این روش تنها از دیدگاه منابع آب سبب شده وضعیت حوضه بهبود یابد. این در حالی است که مطابق شکل (B-۲) با وجود کاهش مصرف انرژی در سایر موارد به‌جز آبیاری به دلیل کاهش

شاخص‌های فوق و به شرح زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۱۱):

$$WEFGN = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (11)$$

در رابطه فوق، x_i مقدار شاخص محاسبه‌شده و w_i وزن در نظر گرفته شده برای هر شاخص می‌باشد که با توجه به مفهوم همبست آب، غذا و انرژی و دید یکسان به تمامی متغیرهای مؤثر، ضریب مذکور برای همه یکسان در نظر گرفته شده است. بنابراین رابطه فوق به یک میانگین‌گیری حسابی تبدیل می‌شود. نتیجه محاسبه این شاخص عددی بین صفر و یک می‌باشد، که هرچه مقدار محاسبه‌شده به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده حالت مطلوب در منطقه مورد مطالعه است. از آنجاکه مقادیر واقعی شاخص‌ها در واحدها و اندازه‌های مختلف ارائه شده‌اند لازم است قبل از استفاده از رابطه (۱۱) شاخص‌های فوق نرمال‌سازی شوند. با توجه به تأثیر مثبت یا منفی آن‌ها در رابطه (۱۱)، به ترتیب از رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) استفاده شد.

$$X_i = \frac{x_i - \text{Min}(x_i)}{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)} \quad (12)$$

$$X_i = \frac{\text{Max}(x_i) - x_i}{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)} \quad (13)$$

در روابط مذکور، x_i مقدار هر شاخص جهت نرمال‌سازی، Max و Min بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار محاسبه‌شده برای آن شاخص هستند.

همان‌طور که در بالا توضیح داده شد در حال حاضر حدود ۳۳ درصد از سطح کشت مزارع به‌روش تحت فشار آبیاری می‌شود و با توجه به شرایط منطقه حوضه زاینده‌رود، مسئله تبخیر و بادبردگی و نوع خاک، بهترین روش آبیاری، روش قطره‌ای است. اما مدنظر است سه حالت شرایط کنونی، آبیاری تمامی زمین‌های کشاورزی آبی به‌جز شالیزارها (حدود شش تا هفت درصد اراضی کشاورزی) به‌روش قطره‌ای و آبیاری به‌روش بارانی

این روش آبیاری است (شکل ۲-B). بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رود میزان کربن منتشر شده از طریق روش بارانی ۶۷۵۸۵/۵ تن (۴/۸ درصد) بیش‌تر است.

بنابراین تغییر روش آبیاری به سمت قطره‌ای و بارانی سبب شده به ترتیب ۴۸۳/۷ و ۱۳۸/۵ میلیون مترمکعب آب آزاد شود. لذا بهره‌وری تولید محصولات نیز به ترتیب ۱۸/۱ و ۴/۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین انرژی مصرفی در آبیاری قطره‌ای ۶۰۷۶۷۹۵۰/۴ هزار کیلوکالری و در آبیاری بارانی ۶۰۹۸۵۸۱۹/۴ هزار کیلوکالری بوده است و موجب شده کربن منتشر شده در روش قطره‌ای به ترتیب ۰/۸۱ درصد (۱۱۰۳۳/۵ تن) کاهش و در روش بارانی ۴/۱۷ درصد (۵۶۵۵۲ تن) افزایش یابد.

مقدار نیاز به آب، انرژی موردنیاز جهت آبیاری بارانی افزایش یافته است (۱۱۲۴۱۵/۸ هزار کیلوکالری (۷۳/۷ درصد)) و همین امر سبب افزایش کربن منتشر شده ناشی از این روش نیز گشته است (شکل ۲-D) و موجب شده کربن منتشر شده به میزان ۵۶۵۵۲/۱ تن (۰/۴ درصد) افزایش یابد. تفاوت دو روش آبیاری بارانی و قطره‌ای در منابع آب، انرژی و کربن منتشر شده در شکل (۲-E) کاملاً مشخص است. در روش آبیاری قطره‌ای علاوه بر کاهش ۱۲ درصدی آب مصرفی، انرژی کم‌تری (۲۱۷۸۶۹ هزار کیلوکالری (۰/۳۶ درصد)) نیز مصرف می‌شود (شکل ۲-A). علت کاهش انرژی مصرفی در این روش علاوه بر مصرف انرژی کم‌تر برای برداشت آب از منابع، به سبب فشار موردنیاز کم‌تر در

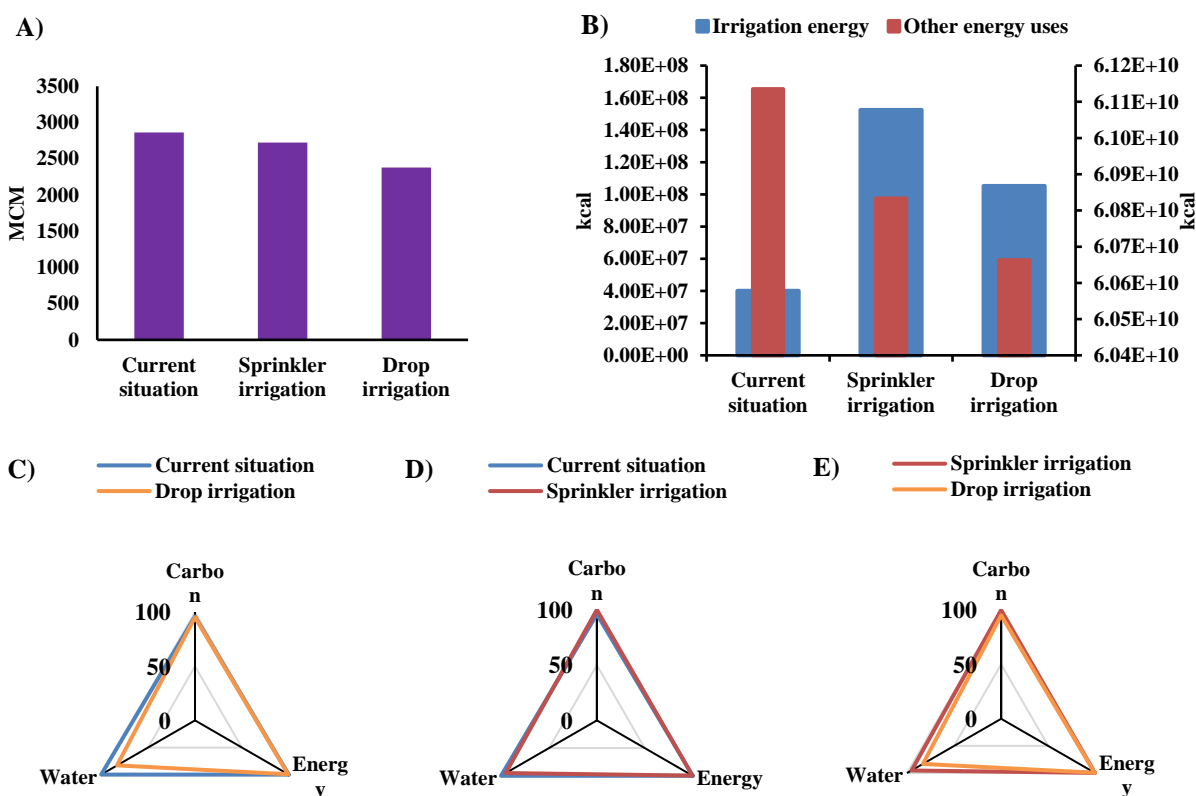


Figure 2. Comparison irrigation methods in A) Water consumption, B) Energy consumption separately energy required for irrigation and other energy uses, C, D & E) water and energy consumption and carbon emissions by percentage

برای تولید محصولات به‌ترتیب در روش‌های قطره‌ای، بارانی و وضعیت کنونی همان میزان محصول تولید شده و این امر موجب افزایش شاخص بهره‌وری اقتصادی آب محصولات کشاورزی در سامانه‌های نوین آبیاری شده است. طبق توضیحات مذکور، با توجه به این امر که در سامانه‌های نوین آبیاری مصرف آب کاهش می‌یابد، لذا انرژی کم‌تری نیز برای برداشت آب از منابع نیاز است. بنابراین افزایش دو شاخص انرژی مصرفی به‌زای غذای تولیدشده و بهره‌وری اقتصادی انرژی تولید محصولات در اثر تغییر روش آبیاری مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن تفاوت راندمان بین دو روش آبیاری بارانی و قطره‌ای و با توجه به برتری روش قطره‌ای در راندمان کاربردی، امتیاز این روش در دو شاخص ذکرشده، بیش‌تر از سایر روش‌هاست. با توجه به این‌که در روش بارانی انرژی بیش‌تر و آب کم‌تری نسبت به وضعیت کنونی مصرف می‌شود، لذا امتیاز این روش آبیاری در شاخص انرژی مصرفی به‌زای آب مصرف‌شده برابر صفر است. پس از آن آبیاری قطره‌ای با مصرف انرژی کم‌تر نسبت به بارانی قرار داد و بالاترین امتیاز نیز مربوط به وضعیت کنونی است. همان‌طورکه در توضیحات بالا نیز اشاره شده، مصرف انرژی منجر به انتشار کربن بیش‌تر خواهد شد. در این مطالعه دو نوع سوخت فسیلی و الکتریسیته در نظر گرفته شده است. با وجود این‌که الکتریسیته آلودگی ایجاد نخواهد کرد اما با در نظر گرفتن فرایند تولید آن و با توجه به این‌که حدود ۹۹ درصد برق تولیدی حوضه از روش‌های تجدیدناپذیر تأمین می‌شود، لذا آلودگی ناشی از تولید برق به‌زای برق مصرفی در بخش کشاورزی نیز در محاسبات لحاظ شده است. با وجود این‌که کربن آزادشده در اثر روش آبیاری بارانی بیشینه بوده و پس از آن آبیاری قطره‌ای قرار دارد. اما باید گفت با در نظر گرفتن صرفه‌جویی

با توجه به پژوهش‌های García *et al.* (2018)، مبنی بر ایجاد مشکلات اقتصادی در اثر اجرایی شدن روش‌های آبیاری تحت فشار باید گفت با در نظر گرفتن این موضوع که در ایران کمک‌هزینه‌هایی جهت اجرایی کردن شیوه‌های نوین آبیاری توسط دولت اختصاص داده شده است و با توجه به قیمت بسیار پایین انرژی برای کشاورزان (در سال ۹۹-۱۳۹۸ برابر ۷۱ تا ۲۸۲ ریال بر کیلووات بوده است)، لذا مشکلات اقتصادی خاصی برای کشاورز به‌وجود نخواهد آمد و تنها موردی که جای تأمل و تفکر دارد افزایش سطح کشت توسط کشاورز است. احتمال وقوع این موضوع با توجه به قیمت پایین آب و برق مصرفی و سود کشاورز در اثر افزایش کشت بیش‌تر خواهد بود. در اثر اجرایی کردن روش‌های آبیاری تحت فشار امنیت منابع آبی افزایش یافته و حتی با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای انرژی کم‌تری نیز مصرف می‌شود که امنیت در بخش انرژی را نیز افزایش می‌دهد. این موضوع در پژوهش Arvandi *et al.* (2022) نیز مورد تأکید قرار گرفته است. به‌علاوه در اثر اجرای شیوه آبیاری قطره‌ای، امنیت محیط زیست نیز افزایش خواهد یافت. در صورت تغییر رژیم غذایی و افزایش سطح کشت به میزان مناسب، مشروط بر آن‌که امنیت سایر بخش‌ها را کاهش ندهد می‌توان امنیت غذایی حوضه را نیز افزایش داد.

همان‌طورکه در شکل (A-۳) آمده است هر شاخص ترکیبی از ۱۰ شاخص تشکیل شده که با استفاده از آن و با مدنظر قراردادن تمامی ابعاد منابع آب، انرژی، تولید غذا، محیط زیست و مسائل اجتماعی و اقتصادی به بررسی روش‌های آبیاری پرداخته شده است. همان‌طورکه انتظار می‌رفت با افزایش راندمان کاربردی در روش‌های آبیاری تحت فشار و کاهش آب مصرفی

نسبت به شرایط کنونی کم‌تر شود. این در حالی است که بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مقایسه روش‌های آبیاری تنها با در نظر گرفتن کاهش آب مصرفی ناشی از این روش، آبیاری بارانی را روشی مناسب معرفی کرده‌اند. در مورد شاخص خودکفایی غذا باید گفت اکثر محصولات کشاورزی اصلی در رژیم غذایی مردم کم‌تر از مقدار موردنیاز تولید می‌شود و نیاز به واردات این محصولات وجود دارد. اما دو گروه سیب‌زمینی و محصولات گلخانه‌ای که اکثراً در گروه سبزیجات قرار می‌گیرند به سبب راندمان بالایی که دارند به مقدار بسیار بیش‌تر از نیاز، تولید می‌شوند، لذا مشاهده می‌شود که در مجموع و بدون در نظر گرفتن نوع محصول، میزان محصولات تولیدشده از مقدار موردنیاز ساکنین حوضه بیش‌تر بوده که این امر سبب صادرات محصولات کشاورزی گردیده است. در صورتی که به سبب تغییر روش آبیاری و صرفه‌جویی صورت گرفته در مصرف آب سطح زیر کشت تغییر کند، شاخص خودکفایی غذا نیز تغییر خواهد کرد.

انجام‌شده در مصرف آب و در نتیجه انرژی مصرفی کم‌تر برای برداشت آن، شاخص بهره‌وری اقتصادی غذا نسبت به کربن آزادشده در روش آبیاری قطره‌ای برابر یک و بیشینه است. پس از آن به ترتیب وضعیت کنونی و آبیاری بارانی قرار می‌گیرد. در مورد کربن منتشرشده به‌ازای انرژی مصرفی برای آبیاری باید گفت به ترتیب در روش‌های بارانی، قطره‌ای و وضعیت کنونی بیش‌ترین مقدار بوده و باعث شده شاخص کربن منتشرشده به‌ازای آب مصرفی به همین ترتیب امتیاز بگیرد. در مورد سایر انرژی‌ها نیز با توجه به مصرف آب کم‌تر در روش‌های نوین، دریافت کمینه امتیاز در وضعیت کنونی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (B-3) دیده می‌شود نتایج حاکی از تأثیر مثبت روش آبیاری قطره‌ای با امتیاز ۰/۸۶ نسبت به سایر روش‌هاست. پس از آن به ترتیب تأثیر وضعیت کنونی آبیاری و آبیاری بارانی با امتیازهای ۰/۴۷ و ۰/۳۱ بهتر ارزیابی شد. بنابراین دو عامل مصرف انرژی و کربن آزادشده بیش‌تر سبب شده با وجود مصرف آب کم‌تر در روش آبیاری بارانی، امتیاز آن

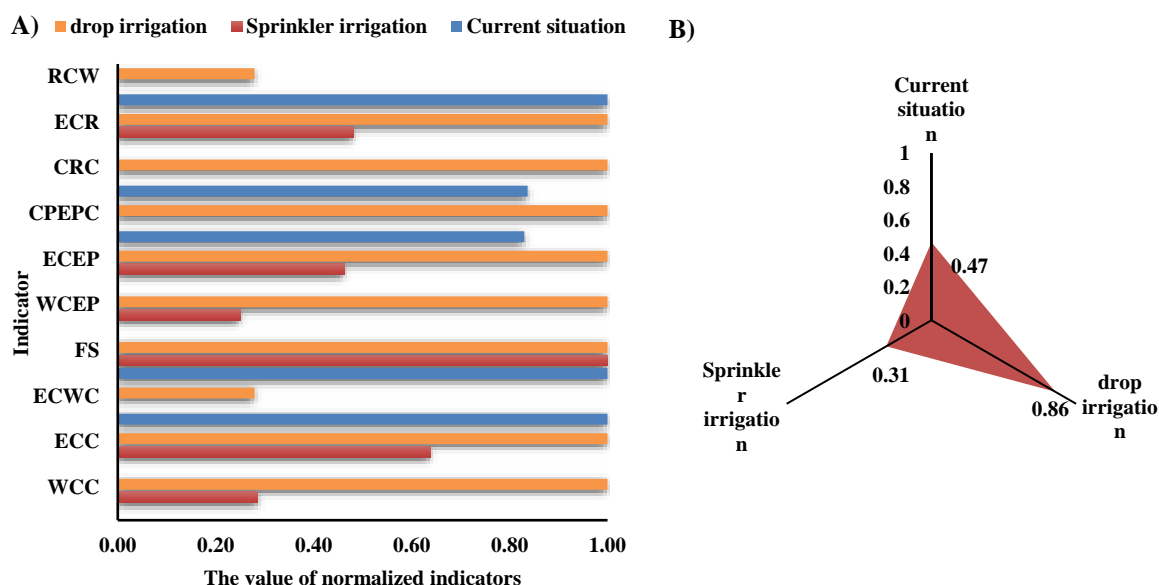


Figure 3. Evaluation of irrigation methods using A) Normalized value of WEFGN constructor indices and B) WEFGN index

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر روش‌های آبیاری با در نظر گرفتن تمامی ابعاد منابع آب، انرژی، غذا، مسائل اجتماعی و اقتصادی و محیط زیست (کربن منتشرشده) بررسی شد. نتایج نشان داد که با تغییر روش آبیاری از حالت کنونی به تحت فشار، مصرف آب به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (۴۸۳/۷ میلیون مترمکعب در آبیاری قطره‌ای و ۱۳۸/۵ میلیون مترمکعب در آبیاری بارانی) و این مسئله سبب شده بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی در این زمینه افزایش یابد. همچنین در صورت آبیاری به روش قطره‌ای انرژی مصرفی و کربن منتشرشده نیز کاهش یافته (۴۰۷۱۰۰ هزار کیلوکالری و ۱۱۰۳۳/۵ تن) و این امر سبب شده امنیت آب، انرژی و محیط زیست افزایش یابد. لذا مناسب‌ترین روش برای آبیاری، روش قطره‌ای معرفی می‌شود، چرا که علاوه بر موارد ذکر شده با شرایط آب‌وهوایی و اقلیم منطقه نیز سازگاری بیشتری داشته و به واسطه راندمان بالای آن سبب کاهش تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی می‌شود. با در نظر گرفتن پرداخت کمک‌هزینه‌های اجرای سامانه‌های نوین آبیاری توسط دولت و همچنین توجه به قیمت آب و برق، کشاورز با مشکل اقتصادی خاصی نیز روبرو نخواهد بود. در مورد روش آبیاری بارانی باید گفت با توجه به این‌که میزان صرفه‌جویی آب در این روش ۱۲ درصد کم‌تر و میزان انرژی مصرفی ناشی از برداشت از منابع آب و انرژی مصرفی جهت آبیاری بیش‌تر از روش قطره‌ای است، لذا انتشار کربن آن نیز بیش‌تر بوده و همین عامل سبب شده شرایط حوضه از نظر همبست آب، غذا، انرژی و کربن نسبت به وضعیت کنونی - که حدود ۶۷ درصد اراضی زیر کشت به روش سنتی آبیاری می‌شود - بدتر شود. بنابراین نتایج این پژوهش نشان‌دهنده برتری روش آبیاری قطره‌ای با اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به شرایط کنونی و

آبیاری بارانی است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش بحث و نتیجه‌گیری و نیاز مدیران به بررسی واکنش‌های محتمل کشاورزان به افزایش آب در دسترس، پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن افزایش سطح کشت ناشی از صرفه‌جویی آب در روش‌های آبیاری تحت فشار، حالت آبیاری بارانی و آبیاری قطره‌ای دوباره با حالت‌های قبل مقایسه شود.

در صورتی‌که هریک از محصولات به تفکیک و با استفاده از شاخص WEFNG با یکدیگر مقایسه شود، می‌توان دیدگاهی مناسب با در نظر گرفتن تمامی ابعاد جهت برنامه‌ریزی بهینه برای کشت در حوضه به مدیران ارائه داد.

پیشنهاد می‌شود تأثیر تغییر رژیم غذایی با در نظر گرفتن رژیم غذایی مطلوب وزارت بهداشت یا رژیم‌های غذایی گیاه محور بر امنیت غذایی بررسی شود.

بررسی گرایش کشاورزان به سمت کشت‌های گلخانه‌ای با در نظر گرفتن تأثیر آن بر شاخص WEFNG و یافتن سطح زیرکشت بهینه جهت کشت گلخانه‌ای می‌تواند جهت برنامه‌ریزی برای مدیریت بخش کشاورزی بسیار مفید باشد.

توصیه می‌شود تأثیر تغییر پمپ‌های مورد استفاده برای برداشت آب و به‌طور کلی افزایش راندمان وسایل و ماشین‌آلات کشاورزی در انرژی مصرفی و کربن منتشرشده شاخص WEFNG بررسی شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Water, Food, Energy and Greenhouse gases Nexus Index (WEFGN)
2. FAO
3. Water Evaluation and Planning model (WEAP)
4. Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP)
5. Water consumption per crop produced (WCC)
6. Crop product of agricultural (CPA)
7. Agricultural water consumption (AWC)
8. Energy consumption per crop produced (ECC)

5. Benson, D., Gain, A. K., & Rouillard, J. J. (2015). Water governance in a comparative perspective: From IWRM to a “nexus” approach?. *Water alternatives*, 8, 756-773.
6. El-Gafy, I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop’s production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7, 2857-2868. doi: 10.1007/s13201-017-0551-3.
7. Esmaeili, M.M. (2020). Water Supply Crisis in Zayandehrud Watershed; Social Issues and Solutions to Manage it (Demonstrations of 2011 to 2014). *Quarterly of Social Studies and Research in Iran*, 9(3), 567-585. (In Persian).
8. García, I.F., García, A.M., Díaz, J.A.R., Barrios, P.M., & Poyato, E.C. (2018). *Water energy nexus in irrigated areas. lessons from real case studies*. London: Academic Press.
9. Gohari, A. (2013). *Providing adaptation solutions with different possible levels of the impact of climate change on water resources of Zayandehrud basin with a systems dynamics approach*. Doctoral dissertation, Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Persian).
10. Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., & Madani, K. (2013). Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. *Journal of Hydrology*, 491, 23-39. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.021.
11. Goodarzi, M., Piriaei, R., & Mousavi, M. (2019). Climate change and exploitation of the WEF Nexus urban approach to utilizing the resources available in Boroujerd. *Iranian Journal of EcoHydrology*, 3, 569-584. (In Persian).
12. Haddad, R., Banihabib, M.E., Hashemy Shahany, M., Javadi, S., & Najafi, S. (2021). Supplying Environmental Water of Gavkhoni Wetland by Improving Agricultural Water Demand Management. *Journal of EcoHydrology*, 8, 345-355. doi: 10.22059/IJE.2021.316459.1446. (In Persian).
13. Hajian, N., & Hajian, P. (2015). *Zayandehrud Database: Along with Graphic Data Analysis*. Isfahan: Elm Afarin Publications. (In Persian).
14. Hosseini Jolfan, M., & Yasi, M. (2021). Enhancing the integrated management of agricultural water in an irrigation network with the aim of balancing the aquifer (Case study: Qazvin irrigation District). *Journal of Water and Irrigation Management*, 11, 575-591.
15. Independent Statistics Analysis U.S Energy Information Administration. (2021). *Carbon Dioxide Emissions Coefficients*. Retrieved from https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php.
9. Agricultural energy consumption (AEC)
10. Energy consumption per water consumption (ECWC)
11. Energy consumption for irrigation (ECI)
12. Self-Sufficiency Ratio
13. Food self-sufficiency indicator (FS)
14. Food produced (FP)
15. Food demand (FD)
16. Water of crop production economic productivity indicator (WCEP)
17. Added value of crop production (AVC)
18. Energy of crop production economic productivity indicator (ECEP)
19. Crop production economic productivity indicator relative to released carbon (CPEPC)
20. Released carbon crop production (RCC)
21. Carbon released indicator from crop production (CRC)
22. Emitted greenhouse gases for crop production (EGC)
23. Energy carbon released indicator (ECR)
24. Emitted greenhouse gases for energy used (EGE)
25. Released carbon per water consumption (RCW)
26. Emitted greenhouse gases for energy consumption for irrigation (EGEL)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2015). *Irrigation efficiencies (changes in time and place in Iran)*. Research project of Agricultural Education and Extension Research Organization. Tehran. (In Persian).
2. Arvandi, S., Zare, A., & Afshar asl, M. (2022). *Water, food and energy nexus in modern irrigation systems*. Iranian Quarterly Journal of Water Engineering, Islamic Azad University of Shushtar. (In Persian).
3. Barjesteh, H., Qureshi, S.Z., & Mianabadi, H. (2020). Explain the function of correlation approach in transboundary water hydrogeopolitics. *Iranian Journal of EcoHydrology*, 7, 757-773. (In Persian).
4. Bayat, F., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, M. (2022). Improving the Performance of Agricultural Water Distribution Systems in Irrigation Networks Using Water-Food-Energy Nexus. *Journal of Water and Irrigation Management*, 11, 949-965.

16. Institute for Strategic Studies-Center for Industry, Mining and Trade Information Analysis (Mata). (2013). *One hundred practical points regarding the ranking of provinces in per capita consumption, diet welfare*. Retrieved from Institute of Studies and Business Research. (In Persian).
17. Jobbins, G., Kalpakian, J., Chriyaa, A., Legrouiri, A., & El Mzouri, E.H. (2015). To what end? Drip irrigation and the water-energy-food nexus in Morocco. *International Journal of Water Resources Development*, 31(3), 393-406.
18. Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., & Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 610, 997-1009.
19. Khoram del, S., & Amin ghafouri, A. (2015). Investigating the consumption of chemical inputs in the environment of agricultural systems in Quchan city and strategies to reduce their consumption. In: *Quchan city development conference, opportunities and challenges*, 13 May, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran. (In Persian).
20. Nikbakht, J., & Najib, Z. (2015). Effect of irrigation efficiency increasing on groundwater level fluctuations (Cast study: Ajab-Shir Plain, East Azarbaijan). *Journal of Water and Irrigation Management*, 5, 115-127.
21. Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H., & Jafari, S. (2020). System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. *Ecol. Indic.* 108. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105682.
22. Sadeghi, S.H., Moghadam, E.S., Delavar, M., & Zarghami, M. (2020). Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale. *Agricultural Water Management*, 233, 106071.
23. Schlör, H., Venghaus, S., & Hake, J. F. (2018). The FEW-Nexus city index – Measuring urban resilience. *Applied energy* 210: 382–392. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.026.
24. Soflae shahr babak, A., Mousavi, H., & Mortazavi, A. (2018). Consequences of eliminating bread subsidies on changing dependence on imports and food security, *Iranian Journal of Agricultural Economics Research*, 3, 82-55. (In Persian).
25. Soltani, A. (2019). *Analysis of the country's food security by 2050 with modeling of water, land, food and environment nexus: Perspectives and necessary policies*. Research project report of college of Agricultural Sciences and Natural Resources of Gorgan University and Agricultural Research, Agricultural Education and Extension Organization (in Persian).
26. General Statistics Office of Iran. (2017). *Statistical Yearbook of Iran, Chapter 5: Agriculture, Forestry and Fisheries*. Tehran. Website: <https://www.amar.org.ir/>. (In Persian).
27. General Statistics Office of Iran. (2019) (A). *Statistical Yearbook of Iran, Chapter 4: Manpower*. Tehran. Website: <https://www.amar.org.ir/>. (In Persian).
28. General Statistics Office of Iran. (2019) (B). *Statistical Yearbook of Iran, Chapter 23: Provincial Accounts*. Tehran. Website: <https://www.amar.org.ir/>. (In Persian).
29. Tayebi, M. (2020). *Evaluation of adaptation policies to water scarcity in grain production based on the correlation of water, energy and food*. Master Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan (in Persian).
30. Vafabakhsh, J., & Mohammadzadeh, A. (2019). Investigation and study of energy flow and emission of greenhouse gases in crop and horticultural production systems (Case study: Sharifabad plain). *Iranian Journal of Agricultural Ecology*, 11, 382-365. (In Persian).
31. Velaiatzade, M. (2018). Estimation of carbon emissions from fossil fuel consumption in the period 1306-94 in Iran. *Iranian Quarterly Journal of Environmental Health Research*, 4, 246-237. (In Persian).
32. Zamani, A., Mortazavi, A., & Balali, H. (2014). Investigation of water economic efficiency in different crops in Bahar plain. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 28, 61-52. (In Persian).
33. Zare Abyaneh, H., Aazam, D., Akhavan, S., & Jovzi, M. (2021). Performance evaluation of new irrigation systems in Hamedan. *Journal of Water and Irrigation Management*, 10, 381-395.