Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 3 (55)

Received:
2024-06-23

Accepted:
2024-08-03

Pages: 43-55

Optimizing the Water, Energy, and Food Nexus in the Pishkooh Watershed, Yazd Province, Iran

Sanaz Pourfallah Asadabadi[1], Seyed Hamidreza Sadeghi[2]*,
Mehdi Vafakhah[3] and Majid Delavar[4]

1) Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.
2) Professor, Department of Watershed Management Engineering, of Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.
3) Professor, Department of Watershed Management Engineering, of Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.
4) Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, of Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
*Corresponding author email: sadeghi@modares.ac.ir

Abstract

Background and Aims: Population growth and the need to provide human biological needs, especially in developing countries, have led to unprincipled uses of water and soil resources in this region. The strategy of increasing production with excessive exploitation of resources has faced the country with a severe crisis, especially in water and the environment. On the other hand, improper management of water and soil resources has threatened the water and food security of the country, which is one of the leading national goals. Today, despite the importance of the Water-Energy and Food (WEF) Nexus as adaptive management of resources, it has yet to be employed for integrated watershed management in the Pishkooh Watershed. This research, however, presents a novel approach to optimize the water, energy, and food nexus for the adaptive management of this crucial watershed.

Methods: In this research, to optimize the WEF Nexus of water and energy consumption indicators, productivity and economic productivity of water and energy and food availability per capita in nine farming groups, Viz., 1 (i.e., apple, pear, beet, cherry, plums, peaches, apricots, almonds and walnuts), 2 (i.e., grapes, elderberries, barberries, berries, figs, and jujubes), 3 (i.e., lentils, peas, and beans), 4 (i.e., sunflowers), 5 (i.e., tomatoes, eggplants, carrots, pumpkin and cabbage), 6 (i.e., watermelon), 7 (i.e., alfalfa, turnip and fodder beet), 8 (i.e., wheat, barley and corn), and 9 (i.e., potato and onion). The WEF nexus in the Pishkooh Watershed was optimized using linear programming and through the optimal multivariable model and constraints on the water and energy resources of the watershed in the Lingo 18.0 software environment.

Results: The findings showed that in the Pishkooh Watershed, the third (i.e., lentils, chickpeas, and beans) and the seventh agricultural groups (i.e., alfalfa, turnips, and fodder beets) had the lowest and highest water consumption of 4727.93 and 9787.93 m^3 ha y^{-1}. In contrast, the fourth (i.e., sunflower) and fifth agricultural groups (i.e., tomatoes, eggplants, carrots, squash, and cabbage) had the minimum and maximum energy consumption of 7226.87 and 42888.99 MJ ha^{-1} y^{-1}. While, the water productivity index showed the performance of agricultural groups in relation to the amount of water consumed the fifth (tomato, eggplant, carrot, pumpkin and cabbage) and third (lentil, chickpea and bean) crop groups with 2.66 and 0.28 kg/m3 have the highest and lowest values of the index. The third (i.e., lentils, peas, and beans) and the seventh (i.e., alfalfa, turnips, and fodder beets) agricultural groups had an entirely different energy efficiency of 20.66 and 0.94 kg MJ^{-1}, respectively. Ultimately, the second agricultural group (i.e., grape, elderberry, barberry, mulberry, fig, and jujube) has the highest water economic productivity (i.e., 0.56 MRials m^{-3}) and energy (0.266 MRials MJ^{-1}). However, the eighth agricultural group (i.e., wheat, barley, and corn) in the Pishkooh Watershed plays the most critical role in the per capita food availability index.

Conclusion: This research, with its potential to significantly influence the Pishkooh Watershed, has successfully optimized the WEF Nexus in this region of Iran. After analyzing seven indicators of water and energy consumption, productivity and economic efficiency of water and energy, and food availability per capita in the study area, the results demonstrated that the WEF index in the Pishkoosh Watershed ranged from 0.18 (the worst) to 0.48 (the best) associated with the fifth (i.e., tomato, eggplant, carrot, pumpkin and cabbage) and second crop (i.e., elder, barberry, mulberry, fig and jujube), respectively. By implementing the WEF optimization model in the Pishkooh Watershed, we can take a positive stride towards increasing productivity and reducing resource consumption every year by monitoring relevant indicators. This approach will alleviate the strain on existing resources and pave the way for sustainability and ecosystem conservation. On the other hand, improving the economic status of farmers by changing the cultivation pattern will ensure the sustainability of the supply chain of agricultural products and increase food security in the Pishkoh Watershed. In other words, the management of different dimensions of the WEF index can provide suitable solutions to achieve the economic sustainability of agriculture in the region.

Keywords: Integrated Management, Sustainable Production, Soil and water adaptive management, Watershed security

مقاله پژوهشی

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ۳ (۵۵)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۱۳

صفحات: ۵۵-۴۳

بهینه‌سازی پیوند آب، انرژی و غذا در حوزه آبخیز پیشکوه، استان یزد

ساناز پورفلاح‌اسدآبادی[۱]، سیدحمیدرضا صادقی[*۲]، مهدی وفاخواه[۳] و مجید دلاور[۴]

۱) دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس نور، ایران
۲) استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس نور، ایران
۳) استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس نور، ایران
۴) دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: رشد جمعیت و لزوم تأمین نیازهای زیستی انسان به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، منجر به استفاده‌های غیراصولی از منابع آب‌وخاک شده است. به‌طوری‌که راهبرد افزایش تولید با بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع، امروزه کشور را با بحران جدی، به‌ویژه درزمینه آب و محیط‌زیست، مواجه کرده است. از طرفی مدیریت ناصحیح منابع آب وخاک، امنیت آبی و غذایی کشور به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اهداف کلان ملی را در معرض تهدید قرار داده است. امروزه علی‌رغم اهمیت پیوند آب-انرژی و غذا به‌عنوان یک رویکرد مدیریتی سازگار منابع، از این رویکرد کم‌تر در مدیریت جامع آبخیز استفاده شده است. لذا در پژوهش حاضر رویکرد جدید بهینه‌سازی پیوند آب، انرژی و غذا در مدیریت سازگار حوزه آبخیز پیشکوه استفاده شد.

روش پژوهش: در این پژوهش برای بهینه‌سازی پیوند WEF شاخص‌های مصرف آب و انرژی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و سرانه موجودیت غذا در نه گروه زارعی اول (شامل محصولات سیب، گلابی، به، آلبالو، گیلاس، آلو، هلو، زردآلو، گوجه‌سبز، بادام و گردو)، دوم (شامل انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب)، سوم (شامل عدس، نخود و لوبیا)، چهارم (آفتابگردان)، پنجم (شامل گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم)، ششم (هندوانه)، هفتم (شامل یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای)، هشتم (شامل گندم، جو و ذرت)، و نهم (شامل سیب‌زمینی و پیاز) در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی پیوند آب-انرژی و غذا در سطح حوزه آبخیز پیشکوه از برنامه‌ریزی خطی و از طریق مدل چند متغیره بهینه سازی پیوند آب-انرژی-غذا و محدودیت‌های بر منابع آب و انرژی حوزه آبخیز در محیط نرم‌افزار Lingo 18.0 استفاده شد.

یافته‌ها: پژوهش حاضر نشان داد که در حوزه آبخیز پیشکوه گروه زارعی سوم (عدس، نخود و لوبیا) و گروه زراعی هفتم (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) به ترتیب با مصرف ۴۷۲۷/۹۳ و ۹۷۸۷/۹۳ مترمکعب بر هکتار بر سال کم‌ترین و بیش‌ترین شاخص مصرف آب بوده است و بالاعکس گروه‌های زراعی چهارم (آفتابگردان) و پنجم (گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم) با مقدار ۷۲۲۶/۸۷ و ۴۲۸۸۸/۹۹ مگاژول بر هکتار بر سال دارای حداقل و حداکثر مقدار انرژی مصرفی بوده است. با این وجود شاخص بهره‌وری آب با بررسی میزان عملکرد گروه‌های زراعی نسبت به میزان آب مصرفی نشان داد که گروه‌های زراعی پنجم (گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم) و سوم (عدس، نخود و لوبیا) با مقدار ۲/۶۶ و ۰/۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب، دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار شاخص مذکور است. گروه‌های زراعی سوم (عدس، نخود و لوبیا) و هفتم (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) با مقدار ۲۰/۶۶ و ۰/۹۴ کیلوگرم بر مگاژول بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار شاخص بهره‌وری انرژی را داشته است. گروه زراعی دوم (انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب) در حوزه آبخیز پیشکوه نیز دارای بیش‌ترین مقدار بهره‌وری اقتصادی آب (۰/۵۶ میلیون ریال بر مترمکعب) و انرژی (۰/۲۶۶ میلیون ریال بر مگاژول) است. نهایتاً گروه زراعی هشتم (گندم، جو و ذرت) بیش‌ترین نقش در شاخص سرانه موجودیت غذا را ایفا می‌کند.

نتایج: پژوهش پیش‌رو باهدف بهینه‌سازی پیوند آب-انرژی و غذا در حوزه آبخیز پیشکوه انجام گرفت. پس از بررسی هفت شاخص مصرف آب و انرژی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و سرانه موجودیت غذا در منطقه موردمطالعه نتایج نشان داد که مقدار شاخص WEF برای گروه‌های مختلف زراعی از ۰/۱۸ (بدترین) تا ۰/۴۸ (بهترین) به ترتیب مربوط به گروه زراعی پنجم (گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم) و دوم (سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب) بوده است. با اجرای مدل بهینه‌سازی WEF در حوزه آبخیز پیشکوه می‌توان با اندازه‌گیری شاخص‌های مربوطه، هرساله نسبت به افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف منابع قدم مثبتی را برداشت. این رویکرد نه‌تنها منجر به کاهش فشار بر منابع موجود خواهد شد بلکه پایداری و حفاظت از بوم‌سازگان را در پی خواهد داشت. از طرفی بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان با تغییر الگوی کشت باعث پایداری زنجیره تأمین محصولات کشاورزی و افزایش امنیت غذایی در حوزه آبخیز پیشکوه خواهد شد. به عبارتی دیگر مدیریت ابعاد مختلف شاخص WEF می‌تواند راه‌کارهای مناسب برای دستیابی به پایداری اقتصادی کشاورزی در منطقه را فراهم کند.

کلیدواژه‌ها: امنیت آبخیز، تولید پایدار، مدیریت جامع، مدیریت سازگار آب‌وخاک

مقدمه

امروزه با توجه به شرایط نامناسب حاکم بر منابع طبیعی، پژوهش‌گران و سیاست‌گذارها به دنبال تعیین الگوی مفهومی مدیریت جامع حوزه آبخیز به‌عنوان مهم‌ترین راهبرد موانع و مشکلات هستند. از طرفی برنامه‌ریزی جامع مدیریت آبخیز به مفهوم تلاش برای درک نیازها و تأثیر گروداران بر عملکردهای طبیعی یک آبخیز و ارائه یک طرح برای تصمیم‌سازی در رابطه با مدیریت منابع و توسعه پایدار است. ازاین‌رو مدیریت جامع آبخیز ناظر بر روابط درونی عامل‌های مؤثر منابع مختلف یک آبخیز است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸). بشر برای ادامه حیات خود به آب، انرژی و غذا نیازمند است. بااین‌حال آب، انرژی و غذا منابع اصلی یک آبخیز و دارای ارتباط‌های متقابل با یکدیگر هستند. لذا ایجاد تغییر در هر یک از آن‌ها بر دیگر از عامل‌های اثر گذاشته و پیامدهای مختلفی ازجمله اثرهای محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی را در پی خواهد داشت (Campell و Sayer، ۲۰۰۱).

امروزه افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی، تغییرات آب و هوایی، سامانه‌های تولید ناکارآمد، توسعه اقتصادی، تغییرات فناوری، فرهنگ، تغییر سبک زندگی، منجر به ایجاد چالش در امنیت پیوند آب، انرژی و غذا[1] شده است. منابع آبی کشور با مشکلات متعددی ازجمله، عدم توازن بین عرضه و تقاضای آب، بهره‌وری کم در محصولات کشاورزی، کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی، وجود چاه‌های جذبی فاضلاب و دفع غیرصحیح فاضلاب‌های خانگی و پساب‌های صنعتی روبه‌رو است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸). به همین دلیل، هدف بلندمدت مدیریت راهبردی آب، برقراری تعادل بین تقاضای آب و منابع آب موجود با کم‌ترین هزینه ممکن است. هم‌چنین بشر از همان ابتدا با سوزاندن چوب و سپس زغال‌سنگ، نفت و گاز در پی تأمین انرژی موردنیاز خود بوده است. از طرفی تقاضای انرژی در سطح جهان رو به افزایش است که تنش‌های بیش‌تری بر منابع آب شیرین همراه با انعکاس آن بر دیگر کاربری‌ها، همچون، کشاورزی و صنعت را در پی خواهد داشت. بر همین اساس استفاده از انرژی‌های جایگزین مانند هسته‌ای، خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و امواج را می‌توان مورد تأکید فراوان قرارداد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۹ب). ازآنجایی‌که برای ارزیابی جامع منابع آب، انرژی و غذا تهیه مدل مفهومی موردنیاز ضروری است، در همین ارتباط کاربست پیوند WEF یک مدل مفهومی ریاضی در جهت توزیع بهینه منابع است که بر اساس اهداف و محدودیت‌های سیاسی، اقتصادی و اجتماعی منشأ گرفته است (Cansino-Loeza و Ponce-Ortega، ۲۰۲۱). هر یک از اجزای پیوند WEF با دیگری در ارتباط بوده و برآیند ارتباط ترکیبی آن‌ها تعیین‌کننده سطح تعادل حاکم بر منطقه موردمطالعه است. به‌نحوی‌که هر یک از اجزای پیوند WEF با دیگری در ارتباط بوده و برآیند ارتباط ترکیبی آن‌ها تعیین‌کننده سطح تعادل و سلامت حاکم بر بوم‌سازگان موردمطالعه است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین لحاظ جزئیات پیوند در بخش‌های مختلف از اهمیت خاصی برخوردار است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸).

رویکرد WEF توسط مجمع اقتصاد جهانی باهدف تصمیم‌گیری مناسب در شرایط بحرانی ارائه شد (Bizikova و همکاران، ۲۰۱۳). پیوند WEF در بریتانیا، به‌عنوان یک مفهوم رایج و مبتنی بر با یکپارچگی، تأکید بر راه‌حل‌های فنی برای رفع مشکلات محیط‌زیست، افزایش بهره‌وری (سودمندی) و گزینه‌های برد-برد در مدیریت محیط‌زیست و بحث‌های منابع طبیعی معرفی‌شده است (Smajgl و همکاران، ۲۰۱۶). بررسی‌های پیوند WEF بر سال ۲۰۳۰ افزایش تقاضای ۴۰ درصدی در آب و ۵۰ درصدی در انرژی و غذا را نشان می‌دهد (Nexus Regional Dialogue Programme، ۲۰۱۸). امروزه تغییرات آب و هوایی از مهم‌ترین عواملی است که پایداری پیوند WEF را در معرض خطر انداخته است (Zeng و همکاران، ۲۰۱۹). بسیاری از پژوهش‌گران، موجودیت آب در پیوند WEF را از اصلی‌ترین جزء پیوند می‌داند، زیرا در صورت نبود آن، نمی‌توان منبع دیگری را جایگزین آن کرد (Hussein و همکاران، ۲۰۱۷). از طرفی بی‌ثباتی مسائل اقتصادی-اجتماعی، درگیری جغرافیای سیاسی و آسیب‌های محیط‌زیستی ازجمله پیامدهای جبران‌ناپذیر کمبود منابع است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸). در همین راستا تمرکز روی یکی از بخش‌های پیوند WEF بدون در نظر گرفتن اثر متقابل بین آن‌ها خطرات جدی را به دنبال خواهد داشت. بر همین اساس رویکرد پیوند WEF یک چشم‌انداز کلی از پایداری است که تلاش می‌کند تا تعادل میان اهداف مختلف، منافع و نیازهای آبخیزنشینان و محیط‌زیست را برقرار سازد که طبعاً از اهداف غائی و آرمانی مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۸).

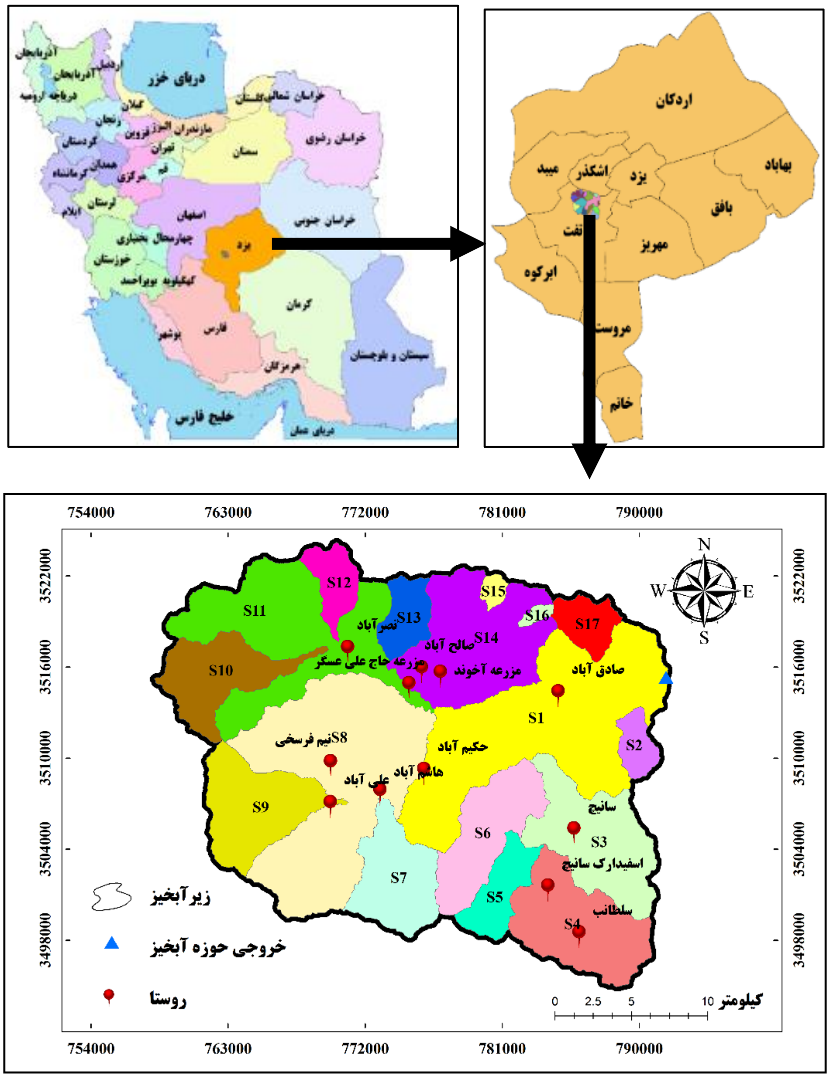
با توجه به اهمیت موضوع و همچنین نوین بودن این مبحث، پژوهش‌های مختلفی در جهان در این زمینه انجام‌شده است. در این خصوص، Zhang و همکاران (۲۰۱۷) از رویکرد پیوند WEF در راستای استفاده بهینه از منابع آب، انرژی و غذا استفاده کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، از رویکرد WEF می‌توان برای تجزیه‌وتحلیل کمی روابط متقابل سامانه ازجمله تأمین انرژی، تولید برق، عرضه و تقاضای آب، تولید غذا و کاهش خسارت‌های محیط‌زیستی استفاده نمود. در پژوهشی دیگر Cansino-Loeza و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه‌ای در مکزیک به دلیل افزایش فعالیت‌های صنعتی، چالش‌های

درزمینه تأمین منابع آب، منطقه را تهدید کرده است لذا نتایج حاصل از پیوند آب-انرژی-غذا نتایج نشان داد که این پیوند در پایداری و استفاده مجدد منابع آبی بسیار اهمیت دارد. هم‌چنین مشخص شد که بیش‌ترین کمبود منابع در بخش کشاورزی است که می‌توان با این رویکرد و با مشارکت گروداران در بین منابع در جهت پایداری تعادل برقرار کرد. Sušnik و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی نقش اجرای سیاست‌های فعلی بر پیوند WEF-زمین-آب و هوا (WEFLC) در جمهوری لیتونی پرداختند. در این مطالعه اطلاعات جمع‌آوری‌شده و هم‌چنین سیاست‌های اجرای فعلی، به‌عنوان سیاست‌های آینده به مدل معرفی شد. نتایج نشان داد که بر سال ۲۰۵۰ میزان مصرف کاهش خواهد یافت درحالی‌که میزان تولید محصولات غذا و انرژی افزایش می‌یابد. اجرای هم‌زمان چندین سیاست ممکن است به دلیل ارتباط متقابل در بخش‌های مختلف اثراتی را در پی داشته باشد. بنابراین، هنگام انتخاب سیاست‌ها، پیامدهای بین‌بخشی باید با دقت موردتوجه قرار شد. Motealegre و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی جایگاه آب باران در پیوند WEF پرداختند. اجرای پیوند WEF در شکل ساختمان‌ها موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شکل ساختمان‌های مسکونی و غیرمسکونی بر بهره‌وری پیوند WEF نقش معنی‌دار داشته است و ساختمان‌های صنعتی بالاترین بهره‌وری در پیوند WEF را به خود اختصاص داده‌اند. تجزیه‌وتحلیل پیوند WEF یک چالش جهانی است و امروزه می‌توان با مدل‌سازی مؤلفه‌های آب، انرژی و غذا در راستای افزایش تاب‌آوری، پایداری و بهره‌وری منابع موجود راهکارهای کارآمد و پایداری را پیشنهاد داد. اخیراً نیز Schlemm و همکاران (۲۰۲۴) پس از بررسی پیوند آب-انرژی-غذا-محیط[۲] (WEFE) در شرق آفریقا بیان کردند که اهمیت رویکرد پیوندی امروزه با وجود مشکلات مختلف از جمله رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و تغییر کاربری اراضی به همراه تهدیدهای محیطی از جمله تغییر اقلیم و ناکافی بودن منابع مالی و انسانی بیش از گذشته شناخته شده‌است و از طرفی گروداران محلی نقش مهمی در شناسایی اجزای مختلف رویکرد پیوندی می‌توانند را ایفا می‌کنند. در ایران نیز میرزایی و همکاران (۱۳۹۶) راه‌حل‌های سیاسی از قبیل قیمت‌گذاری آب و انرژی، تدوین الگوی کشت و جانمایی مناسب صنایع، اصلاح سیاست‌های واردات و صادرات با رویکرد توجه به آب مجازی و ردپای آب و افزایش محصولات گلخانه‌ای برای کاهش بحران آب با استفاده از رویکرد پیوند WEF را پیشنهاد دادند و در مطالعه دیگری Sharifi Moghadam و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی مروری کاربست پیوند WEF در سطح جهان پرداختند. در همین راستا، حدود ۲۰۳ مقاله در آسیا (مرکزی، جنوبی، جنوب شرقی و شرق)، استرالیا، آفریقا (شمال، جنوب و شرق)، آمریکای شمالی (ایالات متحده، مکزیک و کانادا)، آمریکای جنوبی (برزیل)، اروپا (انگلیس، ایتالیا، آلمان، اسپانیا، سوئد و یونان) و اقیانوسیه بررسی شد. در این پژوهش‌ها، ارتباط‌های اجزای مختلف پیوند در قالب آب-غذا، آب-انرژی-غذا، بوم‌سازگان-آب-غذا، آب-انرژی-غذا-خشکی، غذا-انرژی-محیط‌زیست، آب-خاک-ضایعات، آب-هوا-خدمات در بوم‌سازگان‌های مختلف بررسی و اهمیت کاربرد جامع آن‌ها در مدیریت صحیح منابع آبخیز مورد تأیید قرار گرفت. در پژوهش دیگری Sadeghi و همکاران (۲۰۲۰) با توجه به افزایش جمعیت و توسعه در حوزه آبخیز شازند به بررسی کاربرد پیوند WEF برای تعیین الگوی مدیریتی مناسب در بخش کشاورزی آبخیز مزبور پرداختند. تجزیه‌وتحلیل انواع مختلف روابط بین منابع، اهمیت وجود عنصر خاک در مطالعات آینده را تأیید نمود. به‌نحوی‌که برای ارزیابی ارتباط‌های پیچیده و پویای حوزه‌های آبخیز از پیوند خاک-آب-انرژی-غذا[۳] (SWEF) باهدف کاهش آسیب‌پذیری و افزایش امنیت انسانی و محیطی استفاده شد. در همین راستا ارتباط WEF مرتبط با ۱۴ محصول کشاورزی در حوزه آبخیز شازند موردبررسی قرار گرفت. با محاسبه شاخص مصرف و انرژی، بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی ارتباط پیوند WEF ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مقدار WEFNI برای محصولات کشاورزی در حوزه آبخیز مذکور بین ۰/۱۷ تا ۰/۷۹ متغیر بوده است. این شاخص برای به دست آوردن الگوی کشت بهینه در منطقه موردمطالعه استفاده شود. همچنین صادقی و همکاران (۱۳۹۹ج) ضرورت کاربست رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی در مدیریت جامع حوزه آبخیز را تحلیل و گزارش نموده‌اند. بررسی‌ها نشان داد آب، انرژی و غذا هر یک جزئی از منابع نهایی یک آبخیز هستند که دارای ارتباطی متقابل با یکدیگر می‌باشند. به‌طوری‌که ایجاد تغییر بر هر یک از آن‌ها بر عامل دیگر اثر گذاشته و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی خود در اجتماع را به‌وضوح نشان می‌دهد. منعم و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به ارزیابی کاربرد پیوند WEF در مدیریت شبکه آبیاری زاینده‌رود پرداختند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن شاخص بهره‌وری نرمال‌شده آب مصرفی به‌تنهایی، بهترین سناریو، کاهش ۲۰ درصدی آورد رودخانه با حداکثر بهره‌وری ۵۴ درصد برای شبکه آبیاری است. بر اساس شاخص بهره‌وری نرمال‌شده انرژی بهترین سناریو، انسداد چاه‌های غیرمجاز با حداکثر بهره‌وری ۴۹ درصد برای شبکه آبیاری است. هم‌چنین نتایج نشان داد که هرچند هر یک از شاخص‌های بهره‌وری به‌تنهایی منعکس‌کننده اثرات تک‌بعدی هر یک از سیاست‌ها در شبکه‌های مختلف است. اما با استناد به تنها یک شاخص نمی‌توان در مورد اثربخشی سیاست‌ها تصمیم‌گیری قطعی نمود. اخیراً نیز Sharifi Moghadam و همکاران (۲۰۲۳) نقش توسعه کاربری اراضی در وضعیت پیوند خاک- آب-انرژی-غذا (SWEF) موردبررسی قرار گرفت. در این مطالعه با محاسبه پیوند SWEF با استفاده شاخص‌های مختلف در اراضی مختلف نقشه هم‌بست تهیه شد.

نتایج در کاربری‌های مختلف نشان داد که بیش‌ترین مقدار شاخص SWEF در اراضی زارعی بادام و کم‌ترین مقدار در اراضی مرتعی بوده است. با بررسی پیشینه پژوهشی می‌توان گفت که به‌رغم مطالعات انجام‌شده در زمینه پیوند WEF به‌طور مشخص اثر ترکیبی سه بخش آب، انرژی و غذا در مقیاس زیرآبخیز کمتر و به‌ویژه در مناطق خشک مرکز کشور موردبررسی قرارگرفته است. ازاین‌رو پژوهش پیش‌رو باهدف بهینه‌سازی شاخص‌های مؤثر بر پیوند آب، انرژی و غذا به‌منظور تعیین راهبردهای مدیریتی در راستای کاهش رقابت در مصرف آب و انرژی و هم‌چنین افزایش امنیت و پایداری کشاورزی در حوزه آبخیز پیشکوه به شرح ذیل انجام گرفت. در واقع این پژوهش نشان می‌دهد چگونه با تخصیص بهینه منابع موجود در سطح حوزه آبخیز، می‌توان میزان بهره‌وری و مصرف منابع را به‌ترتیب افزایش و کاهش داد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در حوزه آبخیز پیشکوه (شکل ۱) انجام گرفت. حوزه آبخیز پیشکوه در شهرستان تفت، استان یزد با مساحت کل ۶۸۴۰۰ هکتار واقع‌شده است. حداکثر ارتفاع آبخیز ۳۰۴۹ متر در زیرآبخیز سانیج و حداقل ارتفاع در زیرآبخیز اکبرآباد نواب (صادق‌آباد) برابر با ۲۵۱۸ متر از سطح دریا و میانگین بارش سالیانه ۱۹۸ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۲ درجه سانتی‌گراد است. براساس آخرین آمار مکسوبه از شرکت آب منطقه‌ای استان یزد، تعداد شش رشته قنات، دو چشمه و ۲۵ حلقه چاه شناسایی‌شده و براساس این آمار و میزان دبی قنوات و چاه‌ها میزان تخلیه سالیانه حدود ۵/۴ میلیون مترمکعب است (اختصاصی، ۱۳۹۹). در حوزه آبخیز پیشکوه سطح اراضی زارعی ۲۸۲۹ است و در این مطالعه گروه محصولات زراعی به نه دسته تقسیم‌بندی شد (جدول ۱).


دریای خزر
خلیج فارس
دریای عمان
یزد
اردکان
میبد
اشکذر
تفت
ابرکوه
مهریز
بافق
بهاباد
مروست
خاتم
754000
763000
772000
781000
790000
3522000
3516000
3510000
3504000
3498000
N
E
S
W
S1
S2
S3
S4
S5
S6
S7
S8
S9
S10
S11
S12
S13
S14
S15
S16
S17
نصرآباد
مزرعه حاج علی عسگر
صالح آباد
مزرعه آخوند
صادق آباد
نیم فرسخی
حکیم آباد
هاشم آباد
علی آباد
سانیج
اسفیدارک سانیج
سلطانب
زیرآبخیز
خروجی حوزه آبخیز
روستا
0
2.5
5
10
کیلومتر

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه در کشور و استان یزد

تهیه مدل پیوند آب، انرژی و غذا

شاخص پیوند WEF در این مطالعه از ترکیب روابط بین مؤلفه‌های آب، انرژی و غذا که شامل هفت شاخص از جمله مقادیر آب و انرژی مصرفی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و سرانه موجودیت غذا استفاده شد. بهینه‌سازی مدیریت منابع آب، انرژی و غذا در حوزه آبخیز پیشکوه با استفاده از برنامه‌ریزی خطی[4] در محیط نرم افزار Lingo 18.0 انجام شد.

ارزیابی شاخص‌های آب و انرژی مصرفی

میزان آب مصرفی (آب آبی یا آبیاری و آب سبز یا آب باران) در هر هکتار از محصول محاسبه شد. در این راستا از داده‌های جمع‌آوری‌شده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی استان یزد برای برآورد میزان آب مصرفی منطقه موردمطالعه استفاده شد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۲۰). هم‌چنین در راستای محاسبه مقدار بارش مؤثر و نیاز خالص آبیاری محصولات کشاورزی آبخیز موردمطالعه از نرم‌افزار NETWAT (طرح نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران) تهیه‌شده توسط وزرات جهاد کشاورزی و سازمان هواشناسی تعیین نیاز خالص آبیاری برای تمامی محصولات قابل‌کشت در کشور استفاده شد. سپس کل حجم آب مصرفی مطابق با رابطه (۱) محاسبه‌شده است.

$$W_c = \sum_{j,i=1}^{m} A_{ij} \times W_{ij}$$ (۱)

در رابطه مذکور W_c میزان کل مصرف آب (مترمکعب)، A_{ij} وسعت تحت پوشش هر محصول کشاورزی در زیرآبخیز (هکتار محصول) و W_{ij} میزان آب مصرفی برای هرمحصول در هر زیرآبخیز (مترمکعب بر هکتار محصول m) است.

میزان انرژی مصرفی در هر هکتار از محصول به‌صورت انرژی ماشین‌آلات کشاورزی، نیروی کار، نهاده‌های کشاورزی و سوخت محاسبه شد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۲۰). در راستای محاسبه انرژی ماشین‌آلات کشاورزی از رابطه (۲) استفاده شد و در این رابطه، EM مقدار انرژی ماشین‌آلات (مگاژول بر هکتار)، E میزان انرژی انواع ماشین‌آلات و G، T و Qh به ترتیب بیان‌گر وزن دستگاه (کیلوگرم)، عمر مفید و اقتصادی دستگاه (ساعت) و کل کارکرد دستگاه در یک دوره زارعی (ساعت) است. انرژی نیروی کار مطابق با رابطه (۳) محاسبه شد (Sadeghi و همکاران، ۲۰۲۱) و در این رابطه، E_l، W_l و E_i به ترتیب مقادیر میزان انرژی به ازای هر کارگر (مگاژول بر هکتار)، تعداد نیروی کارگر در هر هکتار و انرژی مصرفی برای هر کارگر (مگاژول در تعداد) است. در راستای محاسبه میزان انرژی در نهاده‌های کشاورزی، آفت‌کش‌ها و کود در ابتدا از طریق پرسشنامه و بازدیدهای میدانی اطلاعات اولیه جمع‌آوری شد. میزان انرژی در نهاده‌های کشاورزی و به‌ویژه تأمین بذر از رابطه (۴) محاسبه شد (Kitani، ۱۹۹۹) و در این رابطه ، E_p، Q_i و E_i نشانگر میزان انرژی سوخت (مگاژول بر هکتار)، مقدار سوخت مصرفی (لیتر بر هکتار) و انرژی معادل یک واحد سوخت (مگاژول در لیتر) است.

$$EM = E \times \frac{G}{T} \times Qh$$ (۲)

$$E_l = W_l \times E_I$$ (۳)

$$E_s = W_i \times E_i$$ (۴)

$$E_p = Q_i \times E_i$$ (۵)

شاخص‌های بهره‌وری آب و انرژی

شاخص بهره‌وری آب میزان عملکرد گیاه نسبت به میزان آب تحویلی به گیاه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و از عملکرد هر محصول (کیلوگرم بر هکتار) بر میزان مصرف آب در هر هکتار از محصول (مترمکعب بر هکتار) محاسبه شد (رابطه ۶). بهره‌وری مقدار انرژی از نسبت مقدار عملکرد هر محصول (کیلوگرم بر هکتار) به میزان مصرف انرژی در هر هکتار از محصول محاسبه شد.

$$W_p = \frac{Y_m}{W_c}$$ (۶)

$$E_{p,t} = \frac{Y_m}{E_c}$$ (۷)

شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی

به‌منظور محاسبه بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی از میزان بازدهی هر محصول، هزینه نهاده‌های استفاده‌شده و مقدار آب و انرژی مصرفی در هر هکتار را استفاده شد (El-Gafy، ۲۰۱۷؛ Sadeghi و همکاران، ۲۰۲۰).

$$W_{EV,t} = N_{c,t} - \frac{C_{c,t}}{W_{c,t}}$$ (۸)

$$E_{EV,t} = N_{c,t} - \frac{C_{c,t}}{E_{c,t}}$$ (۹)

سرانه موجودیت غذا

ازآنجایی‌که موجود بودن غذا، دسترسی به غذا، پایداری در دریافت غذا سه عنصر اصلی در رویکرد امنیت غذاست لذا در پژوهش حاضر، میزان سرانه موجودیت غذایی به‌عنوان عنصر مهم امنیت در هر واحد زیرآبخیز مطابق با رابطه (۱۰) محاسبه شد. در این رابطه آن Y_i عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار)، A_i وسعت تحت پوشش هر محصول کشاورزی در زیرآبخیز (هکتار محصول)، C_i کالری محصول کشاورزی (ژول بر کیلوگرم)، C_R سرانه کالری موردنیاز برای هر فرد (ژول) و P_i جمعیت زیرآبخیز (نفر) است.

$$F_{ss} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(Y_i \times A_i \times C_i)}{C_R \times P_i}$$ (۱۰)

بهینه‌سازی پیوند آب-انرژی-غذا

نظر به تفاوت بزرگی و واحد متغیرهای مورد استفاده در بخش پیوندWEF، نرمال‌سازی کلیه متغیرها (si) برای دستیابی به داده‌های همگن صورت گرفت. ازاین‌رو نرمال‌سازی شاخص‌های آب و انرژی مصرفی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و سرانه موجودیت غذا در حوزه آبخیز پیشکوه، با استفاده از روش حداقل-حداکثر[۵] (Juwana و همکاران، ۲۰۱۲) و اثر مثبت و منفی بر پیوند WEF به ترتیب از رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) استفاده شد (Lio و Hao، ۲۰۱۷؛ Hazbavi و همکاران، ۲۰۱۸ب؛ ۲۰۱۹؛ حزباوی و همکاران، ۱۳۹۷).

$$X_n = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۱۱)$$

$$X_n = \frac{X_{max} - X_i}{X_{max} - X_{min}} \quad (۱۲)$$

در رابطه‌های مذکور، X_n، X_i، X_{min} و X_{max} به ترتیب بیان‌گر مقدارهای نرمال‌شده، واقعی، حداقل و حداکثر معیار مورد نظر است. در راستای بهینه‌سازی پیوند WEF از طریق مدل بهینه چند متغیره و محدودیت‌های بر منابع آب و انرژی حوزه آبخیز به شرح مندرج در روابط (۱۳) تا (۱۶) استفاده شد. در راستای بهینه‌سازی پیوند WEF معیارهای سطح زیرکشت گروه‌های زراعی، آب و انرژی مصرفی در حوزه آبخیز پیشکوه محاسبه و در نهایت مقادیر محاسبه شده در مقیاس زیرآبخیز به عنوان محدودیت درنظر گرفته شد.

$$\text{Max}\ (z) = \sum_{i=1}^{n} \text{WEFI}_i \times A_i \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i=1}^{m} A_i \leq A_j \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i=1}^{m} W_i \times A_i \leq W_j \quad (۱۵)$$

$$\sum_{i=1}^{m} E_i \times A_i \leq E_j \quad (۱۶)$$

نتایج و بحث

شاخص‌های پیوند آب، انرژی و غذا

نتایج شاخص‌های مصرف آب و انرژی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی در حوزه آبخیز پیشکوه پس از بهینه‌سازی مؤلفه‌های آب، انرژی و غذا در شکل ۲ ارائه‌شده است. میانگین مصرف آب در بخش کشاورزی ۷۶۷۵ مترمکعب بر هکتار بر سال است. بیش‌ترین میزان آب مصرفی مربوط به گروه زارعی هفتم (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) است که با نتایج پژوهش‌های Sadeghi و همکاران (۲۰۲۱) و Sharifi Moghadam و همکاران (۲۰۲۳) باهدف مفهوم‌سازی رویکرد WEF مبنی بر مصرف زیاد آب گونه یونجه در حوزه آبخیز شازند هم‌خوانی دارد. از سوی دیگر در بین محصولات کشاورزی خراسان رضوی، یونجه و جو به عنوان محصولاتی با شاخص مصرف آب زیاد و کم معرفی شدند (Zare و Moghaddam، ۲۰۲۳). بررسی نتایج در شکل ۲الف نشان داد که گروه زارعی سوم (عدس، نخود و لوبیا) دارای کم‌ترین مقدار مصرف آب در حوزه آبخیز پیشکوه است. با این حال آب عامل مهم در امنیت غذایی مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Li و همکاران، ۲۰۰۴). بر همین اساس بحران آب به‌عنوان عمده‌ترین مشکل در مناطق خشک و نیمه‌خشک باقی‌مانده است. عدم توازن میان آب قابل دسترس با آب مصرفی در این مناطق مشهودتر است و امنیت غذایی در تهدید خواهد بود. بنابراین مدیریت بهینه منابع به‌منظور کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی می‌تواند موجود بودن غذا، دسترسی به غذا، پایداری در دریافت غذا و در نهایت امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را افزایش دهد. ازاین‌رو مصرف آب به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین شاخص‌های رویکرد پیوند آب-انرژی-غذاست. تخصیص بهینه آب می‌تواند در کاهش هزینه و هدر رفت آب در سطح اراضی کشاورزی و افزایش اشتغال و بهره‌وری نقش بسزایی داشته باشد (پرهیزکاران و همکاران، ۱۳۹۳).

جدول ۱. مشخصات گروه‌های زارعی حوزه آبخیز پیشکوه، شهرستان تفت، استان یزد

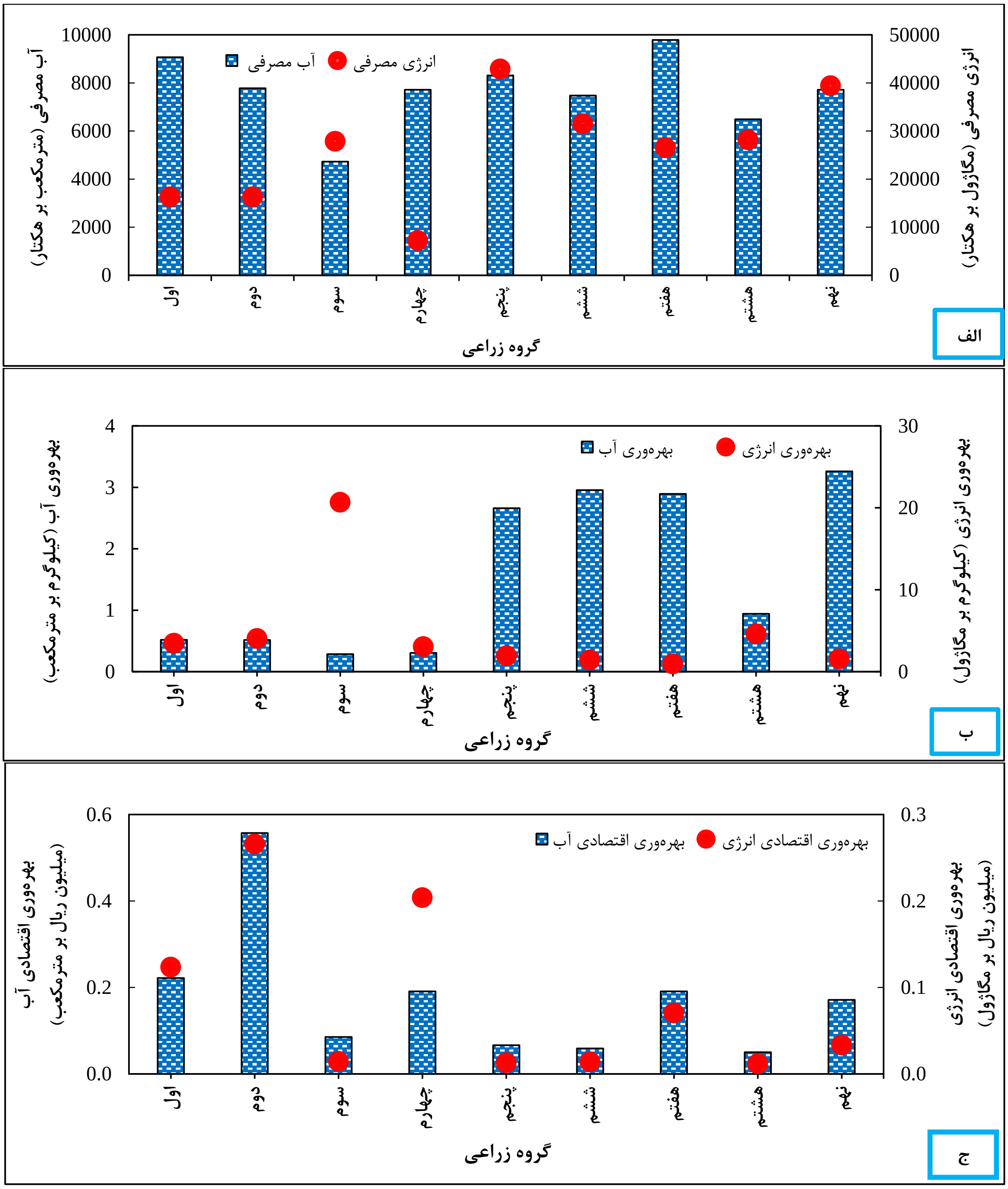
گروه زراعی	سطح زیرکشت (هکتار)	حداکثر نیاز آبی (مترمکعب بر هکتار)	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	قیمت (ریال به ازای هر کیلوگرم)	کالری (به ازای ۱۰۰ گرم)
اول (شامل محصولات سیب، گلابی، به، آلبالو، گیلاس، آلو، هلو، زردآلو، گوجه‌سبز، بادام و گردو)	۹۴۲/۳۲	۹۱۶۰	۴۷۰۲/۰۴	۸۵۶/۲۵۰	۲۱۰
دوم (شامل انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب)	۹۰/۳۴	۷۸۷۰	۴۰۲۳/۷۰	۲/۱۵۴/۴۴۰	۱۰۵
سوم (شامل عدس، نخود و لوبیا)	۹۷/۵۱	۴۸۲۰	۱۳۴۶/۶۷	۶۰۰/۰۰۰	۳۴۶
چهارم (آفتابگردان)	۸۴/۴۳	۷۸۱۰	۲۳۵۷/۶۷	۱/۲۵۰/۰۰۰	۵۶۰
پنجم (شامل گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم)	۶۳/۳۲	۸۴۰۵	۲۲۱۱۸/۳۳	۵۰/۰۰۰	۲۳۷/۵
ششم (هندوانه)	۷/۲۶	۷۵۷۰	۲۲۱۰۰	۴۰/۰۰۰	۲۳۰
هفتم (شامل یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای)	۹۰۵/۴۱	۹۸۸۰	۲۳۳۲۶/۷۵	۱۳۱/۹۶۰	۲۳۰
هشتم (شامل گندم، جو و ذرت)	۵۴۲/۱۷	۶۵۸۳	۶۱۱۶/۳۳	۱۰۷/۰۰۰	۳۸۸
نهم (شامل سیب‌زمینی و پیاز)	۹۶/۶۳	۷۸۱۰	۲۵۱۷۰	۱۰۵/۰۰۰	۷۳۰

با توجه به اهمیت انرژی و فرآیند تبدیل آن در تولید بخش کشاورزی و نقش نهاده انرژی به‌عنوان یک منبع محدود و اقتصادی در تولید محصولات کشاورزی، در رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا شاخص انرژی مصرفی محاسبه شد. در محصولات کشاورزی حوزه آبخیز پیشکوه براساس درنظر گرفتن مقدار انرژی در بخش‌های مختلف از جمله انرژی ماشین‌آلات کشاورزی، نیروی کار، انرژی بذر و سوخت میانگین مصرف انرژی برای کشت گروه‌های زراعی ۲۳۶۲۰۶/۸۷ مگاژول بوده است. در همین ارتباط، گروه‌های زراعی پنجم (شامل گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم) و چهارم (آفتابگردان) به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر انرژی مصرفی در سطح حوزه آبخیز موردمطالعه را داشته است (شکل ۲الف). Mirzaeiو همکاران (۲۰۱۹) اظهار داشتند که افزایش مصرف انرژی، منجر به کشاورزی ناکارآمد و برداشت بیش از اندازه منابع آب زیرزمینی خواهد شد. میسمی و جلالی (۱۳۹۹) با بررسی میزان انرژی مصرفی در کشت گندم در استان گلستان بیان نمود، با کاهش انرژی در بخش‌های کود ازته و کاهش انرژی ماشین‌آلات می‌توان بدون کاهش عملکرد محصول، میزان انرژی مصرفی را کاهش داد.

امروزه با وجود محدودیت‌های منابع، افزایش بهره‌وری و نیل به خوداتکایی در بخش کشاورزی امری ضروری است. افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی نه تنها منجر به رشد اقتصادی خواهد شد، بلکه امنیت غذایی را نیز در پی خواهد داشت (محمودی و چیذری، ۱۳۹۶) و از طرفی مدیریت صحیح آب می‌تواند افزایش بهره‌وری محصولات زراعی را در پی داشته باشد (سعادتی و همکاران، ۱۳۹۷). در حوزه آبخیز پیشکوه بیش‌ترین مقدار شاخص بهره‌وری آب در گروه زارعی نهم (سیب‌زمینی و پیاز) و هم‌چنین کم‌ترین مقدار این شاخص در گروه زارعی سوم (عدس، نخود و لوبیا) گزارش شد (شکل ۲ب). اسدی و همکاران (۱۴۰۰) شاخص بهره‌وری آب برای محصولات گندم، جو، کلزا، ذرت علوفه‌ای به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۵۱، ۰/۳۳ و ۲/۸ کیلوگرم بر مترمکعب را تعیین کردند. امینی و همکاران (۱۳۹۹) در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان با بررسی بهره‌وری فیزیکی آب پنج محصول گندم، سیب‌زمینی، جو، یونجه و شبدر با پوشش بیش از ۹۳ درصد از اراضی آبی منطقه گزارش کردند که محصول سیب‌زمینی و گندم به ترتیب بیشترین و کمترین بهره‌وری را به خود اختصاص داده‌اند. افزایش بهره‌وری آب در محصولات کشاورزی نیازمند برنامه‌ریزی جامع و دقیق است. اعمال روش و سیاست‌های مناسب در حوزه مدیریت منابع آب می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای مقابله با بحران آب و افزایش کمی و کیفی محصولات در بخش کشاورزی و هم‌چنین توجه به بهره‌وری باشد. شکل ۲ب همچنین نشان می‌دهد که گروه زارعی سوم (عدس، نخود و لوبیا) بیش‌ترین شاخص بهره‌وری انرژی در حوزه موردمطالعه داشتند و از طرفی گروه زراعی هفتم (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) هم کم‌ترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص داده‌اند. این شاخص نشان می‌دهد به ازای هر مگاژول انرژی بر هکتار، چه مقدار محصول تولید خواهد شد. بهره‌وری بالاتر در یک سیستم می‌تواند منجر به عملکرد بهتر و کاهش انرژی ورودی شود (Mohammadi و Omid، ۲۰۱۰).

شاخص بهره‌وری اقتصادی نیز یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار در صنعت کشاورزی است. در واقع محصولی دارای بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی بیش‌تری است که مقدار مصرف آب و انرژی کم‌تری داشته باشد و از طرفی سود خالص بیش‌تری را فراهم نماید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گروه زارعی دوم (انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب) بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی آب را داشته‌اند (شکل ۲ج). بهره‌وری اقتصادی در کنار بهره‌وری فیزیکی منابع می‌تواند منجر به مدیریت صحیح و متناسب با منابع موجود در سطح حوزه آبخیز شود. نتایج بهره‌وری اقتصادی این پژوهش با نتایج دیگر پژوهش‌گران (کریمی و جلینی، ۱۳۹۶؛ امینی و همکاران، ۱۳۹۹ و Xue و همکاران، ۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد. بهره‌وری اقتصادی انرژی یکی دیگر از شاخص‌های مهم در رویکرد پیوند آب-انرژی-غذاست که بر پایداری و کارایی آبخیز اثر مؤثر است. در حوزه آبخیز پیشکوه گروه زراعی دوم (انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب) بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی انرژی را به خود اختصاص داده است و از طرفی تجزیه‌وتحلیل نتایج نشان داد که کم‌ترین مقدار بهره‌وری اقتصادی انرژی مربوط گروه زراعی هشتم (گندم، جو و ذرت) بوده است. El-Gafy (۲۰۱۷) با بررسی الگوی بهینه محصولات کشاورزی در مصر، بیان کرد آفتاب‌گردان و پیاز بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار بهره‌وری اقتصادی آب را داشته است.

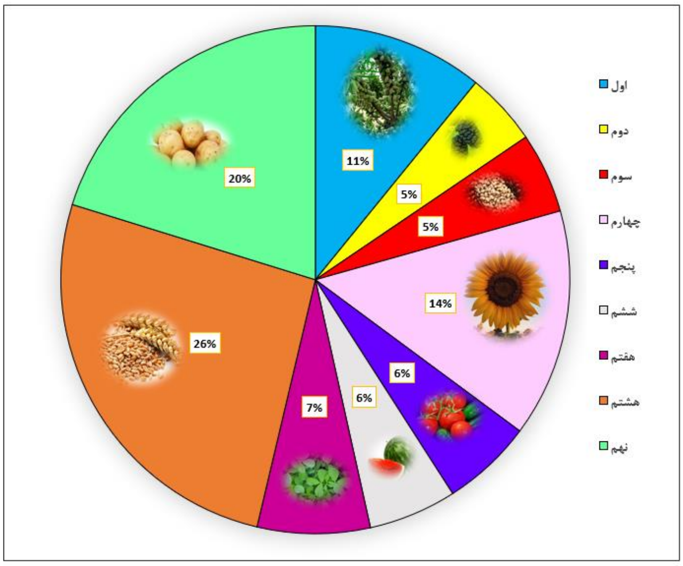
شاخص سرانه موجودیت غذا باهدف تأمین سرانه کالری موردنیاز در منطقه در نظر گرفته شد. در واقع کالری تولیدشده در بخش کشاورزی تا چه میزان می‌تواند کالری موردنیاز جمعیت ساکن یک منطقه را تأمین نماید. گروه زراعی هشتم (گندم، جو و ذرت) بیش از ۲۶ درصد از سرانه موجودیت غذا حوزه آبخیز پیشکوه را تشکیل می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۲. شاخص‌های پیوند آب، انرژی و غذا در حوزه آبخیز پیشکوه، شهرستان تفت، استان یزد

شاخص‌های مصرف آب و انرژی (الف)، شاخص‌های بهره‌وری آب و انرژی (ب)، شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی (ج)

(**گروه زراعی اول**: محصولات سیب، گلابی، به، آلبالو، گیلاس، آلو، هلو، زردآلو، گوجه‌سبز، بادام و گردو، **دوم**: انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب، **سوم**: عدس، نخود و لوبیا، **چهارم**: آفتابگردان، **پنجم**: گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم، **ششم**: هندوانه، **هفتم**: یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای، **هشتم**: گندم، جو و ذرت، **نهم**: سیب‌زمینی و پیاز)

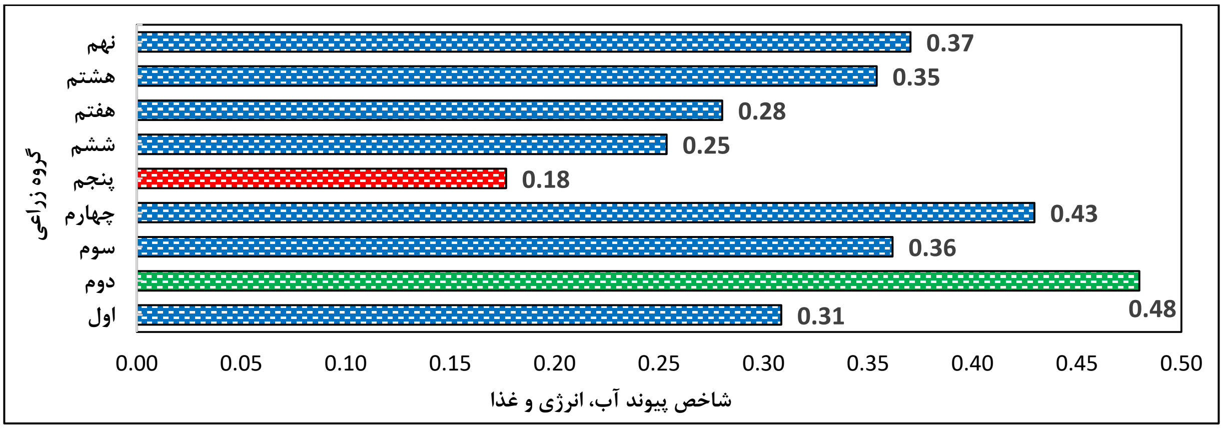


شکل ۳. شاخص سرانه موجودیت غذا در پیوند آب، انرژی و غذا در حوزه آبخیز پیشکوه، شهرستان تفت، استان یزد

(**گروه زارعی اول:** محصولات سیب، گلابی، به، آلبالو، گیلاس، آلو، هلو، زردآلو، گوجه‌سبز، بادام و گردو، **دوم:** انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب، **سوم:** عدس، نخود و لوبیا، **چهارم:** آفتابگردان، **پنجم:** گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم، **ششم:** هندوانه، **هفتم:** یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای، **هشتم:** گندم، جو و ذرت، **نهم:** سیب‌زمینی و پیاز)

شاخص پیوند آب، انرژی و غذا

عدم مدیریت بهینه منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأثیرات نامناسبی را بر وضعیت حوزه‌های آبخیز گذاشته است. پژوهش حاضر در حوزه آبخیز پیشکوه به‌منظور مدیریت منابع موجود و تعیین نقش مؤلفه‌های آب، انرژی و غذا در وضعیت پایداری و سلامت آبخیز با درنظر گرفتن شاخص‌های مصرف آب و انرژی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و هم‌چنین شاخص سرانه موجودیت غذا با استفاده از برنامه‌ریزی خطی پیوند WEF صورت گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد گروه زراعی دوم (انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب) با درنظر گرفتن سناریوی کمینه‌سازی مصرف آب و انرژی، بیشینه‌سازی بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و سرانه موجودیت غذا بیش‌ترین مقدار عددی شاخص پیوند آب، انرژی و غذا را خواهد داشت و از طرفی کم‌ترین مقدار این شاخص مربوط به گروه زراعی پنجم (گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم) تعریف شد. این موضوع اهمیت اجرای رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا را در این حوزه نشان می‌دهد تا با استفاده از این رویکرد به‌عنوان راهکار مدیریتی می‌تواند توسعه شرایط اجتماعی و اقتصادی آبخیز را در پی داشته باشد. جلیلی و همکاران (۱۳۸۵) بیان کردند می‌توان با بهینه‌سازی اراضی حوزه آبخیز بریموند، ۱۳/۵ درصد سطح اراضی باغی را افزایش و ۵۰ درصد اراضی دیم را کاهش داد.



شکل ۴. شاخص پیوند آب، انرژی و غذا در حوزه آبخیز پیشکوه، شهرستان تفت، استان یزد

(**گروه زارعی اول:** محصولات سیب، گلابی، به، آلبالو، گیلاس، آلو، هلو، زردآلو، گوجه‌سبز، بادام و گردو، **دوم:** انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب، **سوم:** عدس، نخود و لوبیا، **چهارم:** آفتابگردان، **پنجم:** گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم، **ششم:** هندوانه، **هفتم:** یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای، **هشتم:** گندم، جو و ذرت، **نهم:** سیب‌زمینی و پیاز)

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف بهینه‌سازی پیوند آب-انرژی-غذا در حوزه آبخیز پیشکوه بوده است. امروزه افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی، مصرف ناپایدار منابع، مدیریت‌های ناکارآمد منجر به تضعیف بوم‌سازگان و آسیب‌های محیط‌زیستی شده است. هم‌بست آب-انرژی-غذا رویکرد نوینی در جهت مدیریت پایدار منابع با توجه به توسعه‌های اقتصادی-اجتماعی به شمار می‌رود. کمبود منابع، رقابت در مصرف و عدم وجود مدیریت استراتژیک از جمله عامل‌های هستند که اهمیت جدایی‌ناپذیر پیوند آب-انرژی-غذا را نشان می‌دهد. بنابراین کاربست پیوند آب-انرژی-غذا با در نظر گرفتن شاخص‌های مصرف آب و انرژی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و سرانه موجودیت غذا در محیط نرم‌افزار Lingo.18 با لحاظ محدودیت منابع آبی و انرژی در آبخیز پیشکوه بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار آب مصرف‌شده در گروه هفتم زراعی (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) و گروه سوم زراعی (عدس، نخود و لوبیا) است و از طرفی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان از انرژی مصرفی مربوط به گروه‌های زراعی پنجم (گوجه‌فرنگی، بادمجان، هویج، کدو و کلم) و چهارم (آفتابگردان) زراعی بوده‌است. براساس شاخص بهره‌وری آب گروه زراعی نهم (سیب‌زمینی و پیاز)، ششم (هندوانه) و هفتم (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) در اولویت اول تا سوم برای بهره‌وری بهینه آب در آبخیز پیشکوه قرار می‌گیرند و گروه زراعی سوم (عدس، نخود و لوبیا) و هفتم (یونجه، شلغم و چغندر علوفه‌ای) دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار از بهره‌وری انرژی در آبخیز مطالعاتی است. از بین محصولات کشاورزی این امکان وجود دارد که محصولی دارای بهره‌وری بالایی باشد اما از نظر اقتصادی به‌صرفه نباشد. امروزه کشاورزان به دلیل کمبود منابع در دسترس، افزایش هزینه‌های بخش کشاورزی، کمبود نیروهای انسانی به دنبال محصولاتی با بهره‌وری اقتصادی بالا هستند و شاخص بهره‌وری اقتصادی می‌تواند در وضعیت آبخیزها نقش بسزایی را داشته باشد. در الگوی کشت حوزه آبخیز پیشکوه گروه زراعی دوم (انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب) دارای بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی بوده است و در نهایت شاخص سرانه موجودیت غذا باهدف تأمین سرانه غذای موردنیاز در سطح آبخیز محاسبه شد و بیش‌ترین مقدار این شاخص مربوط به گروه زراعی هشتم (گندم، جو و ذرت) بوده است. در ادامه شاخص WEFI پس از نرمال‌سازی شاخص‌های مصرف آب و انرژی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب و انرژی و هم‌چنین شاخص سرانه موجودیت غذا محاسبه شد. براساس این شاخص در سطح حوزه آبخیز پیشکوه، گروه‌های زراعی دوم (انگور، سنجد، زرشک، توت، انجیر و عناب)، چهارم (آفتابگردان)، نهم (سیب‌زمینی و پیاز) اولویت کشت در منطقه اختصاص‌یافته است. رویکرد بهینه‌سازی مؤلفه‌های آب-انرژی و غذا در حال حاضر به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین رویکردهای مدیریتی خواهد بود. می‌توان با اندازه‌گیری شاخص‌های مربوطه، هر ساله نسبت به افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف منابع قدم مثبتی را برداشت. این رویکرد نه تنها منجر به کاهش فشار بر منابع موجود خواهد شد بلکه پایداری و حفاظت از بوم‌سازگان را در پی خواهد داشت. استفاده از رویکرد پیوندی در تدوین سیاست‌ها و راهبردهای ملی نقش بسیار مهمی را در پی خواهد داشت و از طرفی جامع‌نگری در سیاست‌های اجرایی بخش کشاورزی نه تنها منجر به کاهش مصرف آب و انرژی خواهد شد بلکه زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری و بهبود وضعیت اقتصادی و اجتماعی منطقه می‌شود. در واقع با اجرای رویکرد WEF به‌منظور دست‌یابی به راه‌کارهای کلان سیاست‌گذاری، می‌توان شرایط توسعه پایدار بخش کشاورزی در منطقه را فراهم ساخت. از طرفی وجود ذخیره‌گاه اطلاعاتی جامع از شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه می‌تواند نتایج مطلوب‌تری در مدل‌های بهینه‌سازی را در پی داشته باشد. لذا رویکرد پیوندی به‌دلیل چندبخشی بودن نیاز به اطلاعات جامع از بخش‌های مختلف از جمله آب، انرژی و غذا داشته‌است که عدم وجود ذخیره‌گاه اطلاعاتی جامع و به‌روز، استفاده از داده‌های محاسباتی و میدانی را اجتناب‌ناپذیر ساخت که طبیعتاً خطای میدانی ناشی از برداشت اطلاعات را منجر شده است.

Reference:

Amini, A. Parhamat, J. Sedari, A. 2019. Investigating the physical and economic efficiency of water in major agricultural crops in the Talwar basin of Kurdistan province. Watershed Engineering and Management, 12(2), 481-491. [in Persian].

Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H.D. McCandless, M. 2013. The water-energy-food security nexus: Towards a practical planning and decision-support framework for landscape investment and risk management, Winnipeg: International Institute for Sustainable Development, 16-20.

Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. 2021. Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. Journal of Cleaner Production, 290: 125194. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125194.

Cansino-Loeza, B., Tovar-Facio, J., Ponce-Ortega, J. M. 2021. Stochastic optimization of the water-energy-food nexus in disadvantaged rural communities to achieve the sustainable development goals. Sustainable Production and Consumption, 28:249-1261. doi.orgن/10.1016/j.spc.2021.08.005.

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(6):2857-2868.

Ekhtesasi, M.R. 2020. Executive studies of the Pishkooh Watershed, Yazd University, Yazd, Iran.

Hazbavi, Z., Keesstra, S.D., Nunes, J.P., Baartman, J.E.M., and Gholamalifard, M., Sadeghi, S.H.R. 2018b. Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates, Ecological Indicators, 93:781-790.

Hizbavi, Z. Sadeghi, S.H.R. Gholam Alifard, M. 2017. Comparative analysis of the variability of health assessment indicators of pressure, state and response in Shazand watershed. The 13th National Conference of Iran's Watershed Science and Engineering and the 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, October 10 and 11, 2017, Mohaghegh Ardabili University. [in Persian].

Hussien, W.A., Memon, F.A., Savic, D.A., 2017. An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. Environmental Modelling & Software, 93: 366–380.

Jalili, Kh. Sadeghi, S.H.R., Nikkami, D. 2015. Optimizing land use in watersheds for soil erosion using linear programming (case study of Brimond Watershed, Kermanshah province). Agricultural sciences and techniques and natural resources. 10, 15-26. [in Persian].

Juwana, I., Muttil, N., & Perera, B. J. C. (2012). Indicator-based water sustainability assessment—A review. Science of the Total Environment, 438, 357-371.

Karimi, M. Jalini, M. 2016. Investigating agricultural water productivity indicators in important crops, case study: Mashhad plain (technical note). Water and sustainable development, 4(1), 133-138. [in Persian].

Kitani, O. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume V Energy and Biomass Engineering, Asae Publication, ST Joseph, MI 323 pp.a.

Li Z., Xu D., Guo X., 2014. Remote Sensing of Ecosystem Health: Opportunities, Challenges, and Future Perspectives. Sensors, 14: 21117-21139.

Mahmoudi M., Chizari, M., Kalantari, Kh., Ruknuddin Eftekhari, A.R. 2021. Designing a model of sustainable agricultural development from the organizational components of the study: Caspian Sea marginal provinces. Research and Development, 10(4), 159-173. [in Persian].

Manem, M.J. Hosseini, S.M. Delaware, 2019. Application and evaluation of water, food and energy link (NEXUS) in the management of irrigation networks, a case study of Zayandehroud irrigation network. Iran Irrigation and Drainage, 14(1): 275-285. [in Persian].

Mirzaei, Sh. Hero, b. Mosaedi, A. Zarghami, M. 2016. Policy solutions in the face of the water crisis with the water-energy-food link approach, the first consensus meeting with experts in water and environmental sciences, Ministry of Energy. [in Persian].

Mismi, M.A. Jalali, A. 2019. Evaluation of input-output energy in wheat cultivation in Iranian Modern Farms (Aq Qala, Golestan). Agricultural Knowledge and Sustainable Production (Agricultural Knowledge), 30(2), 333-346. [in Persian].

Moghadam, E. S., Sadeghi, S.H.R., Zarghami, M., & Delavar, M. 2023. Developing sustainable land-use patterns at watershed scale using nexus of soil, water, energy, and food. Science of The Total Environment, 856, 158935.

Mohammadi, A., Omid, M. 2010. Economical analysis and relation between energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. Applied Energy, 87(1): 191-196.

Montealegre, A. L., García-Pérez, S., Guillén-Lambea, S., Monzón-Chavarrías, M., Sierra-Pérez, J. 2022. GIS-based assessment for the potential of implementation of food-energy-water systems on building rooftops at the urban level. Science of The Total Environment,755: 149963. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149963.

Parhizkari A., Mozaffari Mohammad.M., Khaki M., & Taghizadeh Ranjbari H. 2015. Optimal allocation of water and land resources in Rudbar Almut region using FGFP model. [in Persian].

Saadati, Delbari, Panahi, Amiri, & Ibrahim. (2018). Simulation of sugar beet growth under water stress using AquaCrop model. Protection of water and soil resources (scientific-research), 7(3), 1-19. [in Persian].

Sadeghi, S.H.R., 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. doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106071

Sadeghi, S.H.R. Sadoddin, A. Asadniilvan, A. Hizbavi, Z. Zare Karizi, A. Hadi Meiri, M.H. 2019b. Watershed health and sustainability (fundamentals, approaches and assessment methods) Tarbiat Modares University Publications, 217 p. [in Persian].

Sadeghi, S.H.R. Sharifi Moghadam, A. Mohseni Saravi, M. 2018. New approaches in applied watershed management. Publications of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 251. [in Persian].

Sadeghi, S.H.R. Sharifi Moghadam, A. Pourfalah Asadabadi, S. 2019 J. The necessity of applying the water-food-energy approach in comprehensive watershed management. The 8th National Conference on Water Resources Management of Iran, 29 and 30 February 2019, Ferdowsi University of Mashhad. 8 p. [in Persian].

Sayer, J.A. and Campbell, B.M. 2001. Research to integrate productivity enhancement, environmental protection and human development. Conservation Ecology, 5, 32- 43.

Schlemm, A., Mulligan, M., Tang, T., Agramont, A., Namugize, J., Malambala, E., & van Griensven, A. 2024. Developing meaningful water-energy-food-environment (WEFE) nexus indicators with stakeholders: An Upper White Nile case study. *Science of the Total Environment*, *931*, 172839.

Smajgl, A., Ward, J., Pluschke, L. 2016. The water–food–energy Nexus–Realising a new paradigm. Journal of Hydrology, 533: 533-540.

Sušnik, J., Masia, S., Indriksone, D., Brēmere, I., Vamvakeridou-Lydroudia, L. 2021. System dynamics modelling to explore the impacts of policies on the water-energy-food-land-climate nexus in Latvia. Science of The Total Environment, 775: 145827. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145827.

Xia, J., Zhang, Y., Zhao, Ch., and Bunn, S.E. 2014. A bio indicator assessment framework of river ecosystem health and the detection of factors influencing the health of the Huai River Basin, China. Journal of Hydrologic Engineering, 19(8): 1-34.

Zhang, X., Xu, F., Liu, L., Feng, L., Wu, X., Shen, Y., Xu, Q. 2017. Borneol improves the efficacy of edaravone against DSS-induced colitis by promoting M2 macrophages polarization via JAK2-STAT3 signaling pathway. International Immunopharmacology, 53: 1-10.

یادداشت‌ها

---

[1] Water-Energy-Food (WEF) Nexus
[2] Water-Energy-Food-Environment (WEFE) Nexus
[3] *Soil*-Water-Energy-Food (SWEF) Nexus
[4] Linear Programming (LP)
[5] Min-Max Normalization