



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۹۶۵-۹۴۹

DOI: 10.22059/jwim.2022.333328.938

مقاله پژوهشی:

بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری با رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی

فاطمه بیات^۱، عباس روزبهانی^{۲*}، سید مهدی هاشمی شاهدانی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

چکیده

بهبود کارایی سامانه‌های توزیع آب در بخش کشاورزی به منظور افزایش نسبی تولید محصولات زراعی با توجه به حجم آب سطحی و انرژی مصرفی، امری ضروری است. از این رو هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد گزینه‌های کاربردی در طرح‌های مدرن‌سازی به منظور بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری و انجام ارزیابی کمی عملکرد آن‌ها مبتنی بر رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی است. در این مطالعه، علاوه بر شبیه‌سازی وضعیت موجود توزیع آب در کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت اصفهان تحت دو سناریوی بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی؛ دو سامانه بهره‌برداری دستی بهبودیافته و روش کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) توسعه داده شد و بهبود توزیع آب سطحی بررسی شد. به منظور بررسی روش‌های بهره‌برداری، از هشت شاخص تحویل آب سطحی، انرژی مصرفی، بهره‌وری آب سطحی، بهره‌وری غذا، بهره‌وری انرژی، بهره‌وری اقتصادی آب سطحی، بهره‌وری اقتصادی انرژی و بهره‌وری اقتصادی غذا استفاده شد. در وضعیت موجود (روش بهره‌برداری دستی) تحت سناریوی نرمال مقدار میانگین شاخص پیوند آب-غذا-انرژی برابر با ۰/۴۱ و در سناریو کم‌آبی برابر با ۰/۰۷ برآورد شد. با ارتقای روش بهره‌برداری به دستی بهبودیافته نیز، مقدار میانگین شاخص پیوند آب-غذا-انرژی در سناریو نرمال برابر با ۰/۴۶ و در سناریو کم‌آبی برابر با ۰/۰۹ برآورد شد. هم‌چنین نتایج MPC نشان داد که این روش در سناریوی نرمال و کم‌آبی به ترتیب با مقدار میانگین ۰/۹۴ و ۰/۳۸ دارای بهترین عملکرد است. رویکرد ارزیابی پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های مدرن‌سازی سامانه‌های توزیع آب کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری اقتصادی، بهره‌وری انرژی، شبکه آبیاری رودشت، مدرن‌سازی.

Improving the performance of agricultural water distribution systems in irrigation networks using water-food-energy nexus

Fatemeh Bayat¹, Abbas Roozbahani^{2*}, S. Mehdy Hashemy Shahdany³

1. Ph.D. Student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: November, 02, 2021

Accepted: January, 06, 2022

Abstract

Improving the performance of water distribution systems in the agricultural sector is essential to increase arable crops production by considering surface water volume and energy consumption. Therefore, the main objective of the current research is to evaluate performance of practical alternatives in modernization projects in order to improve the performance of surface water distribution systems and to quantitatively evaluate their performance based on the water-food-energy nexus. The current operational management of the Rudasht Irrigation Network located in Isfahan, was simulated under normal and water shortage scenarios. Then the impact of two modernization methods including an improved manual operation and an automatic control system by using the Model Predictive Control (MPC) on the improvement of surface water distribution was investigated. In order to investigate the operational methods, eight indicators of surface water delivery, energy consumption, surface water productivity, food productivity, energy productivity, surface water economic productivity, energy economic productivity and food economic productivity were used. In the current status (Manual Method) under normal and water shortage scenarios, the values of water-food-energy nexus index were estimated 0.41 and 0.07, respectively. By improving the operational method to improved manual operation method, under normal and water shortage scenarios, the values of water-food-energy nexus index were estimated 0.46 and 0.09, respectively. The results of MPC method showed that this method has the best performance with 0.94 and 0.38 in normal and water shortage scenarios, respectively. The proposed evaluation approach can be used as an appropriate evaluation method to evaluate and prioritize modernization options of agricultural water distribution systems.

Keywords: Economic Productivity, Energy Productivity, Modernization, Rudasht Irrigation Network.

مقدمه

با توجه به تأثیر عواملی هم‌چون تغییر اقلیم، رشد جمعیت، افزایش تقاضای انرژی، تقاضای اجتماعی، توسعه اقتصادی و فرهنگی، تغییرات تکنولوژیکی، تغییر سبک زندگی و روند شهرنشینی بر منابع آب، غذا و انرژی؛ توسعه پایدار جامعه بشری با فشار عظیمی از برقراری امنیت آب، غذا و انرژی رویه‌رو است. از یک‌سو روابط نزدیک و پیچیده بین منابع آب، غذا و انرژی و از سوی دیگر رقابت مصرف‌کنندگان و عدم موفقیت استراتژی‌های مدیریتی بخش‌محور منجر به برجسته‌کردن اهمیت ارتباطات جدایی‌ناپذیر بین منابع و ایجاد چالش‌های بزرگ برای سیاست‌گذاران به جهت دستیابی به اهداف پایدار شده است (Al-Saidi & Elagib, 2017; Sadeghi et al., 2020; Ji et al., 2020).

بخش کشاورزی به‌عنوان موتور محرک رشد و توسعه اقتصادی، با مصرف ۷۰ درصد از آب‌های سطحی و زیرزمینی جهان و ۳۰ درصد از انرژی تولیدی جهان؛ نقش اساسی را در عرضه و تقاضا برای منابع آب، مواد غذایی و انرژی ایفا می‌کند (Flammini et al., 2014). در این بخش، شبکه‌های آبیاری و زهکشی وظیفه اصلی تحویل و توزیع منابع آب را برعهده دارند. مطالعات و بررسی‌های مختلف در مورد نحوه عملکرد این سامانه‌ها، نشان‌دهنده عملکرد نامطلوب در تحویل مقدار آب کشاورزی کافی به ذی‌نفعان (Hashemy et al., 2013)، توزیع عادلانه آب در نواحی (Shahdany & Firoozfar, 2017) و تلفات قابل‌توجه در سیستم توزیع آب کشاورزی (Kamrani et al., 2020) است. عدم کفایت در توزیع منابع آب سطحی در سامانه‌های تحویل و توزیع آب کشاورزی موجب شده است که اکثر اراضی کشاورزی به منابع آب زیرزمینی وابسته شوند. در سال‌های اخیر، به تبع افزایش برداشت آب زیرزمینی،

انرژی مصرفی برای پمپاژ آب‌های زیرزمینی نیز به مقدار قابل‌توجهی افزایش یافته است.

با توجه به این نکته که بهبود عملکرد سامانه‌های تحویل و توزیع آب در بخش کشاورزی به‌منظور افزایش نسبی تولید محصولات زراعی با توجه به حجم آب سطحی و انرژی مصرفی می‌تواند در تأمین اهداف بخش کشاورزی اقدام مؤثری باشد؛ از این‌رو، بررسی روش‌هایی برای بهبود عملکرد این سامانه‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. Kamrani et al. (2019) تأثیر بهبود فرایند تحویل و توزیع آب سطحی در کاهش برداشت آب زیرزمینی در شبکه آبیاری رودشت اصفهان را بررسی کردند. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش برداشت سه درصد و ۲۵ درصد از آبخوان به‌ترتیب برای روش دستی بهبود یافته و خودکار در شرایط نرمال و نیز اثربخشی یک درصدی برای روش دستی بهبود یافته و اثربخشی نه درصدی برای روش خودکار در سناریوی کم‌آبی در کاهش برداشت از آبخوان است. در مطالعه‌ای دیگر، Kaghazchi et al. (2021) به شبیه‌سازی و ارزیابی سامانه‌های تحویل و توزیع آب کشاورزی با استفاده از مدل شبکه بیزین هیبرید پرداختند. در این مطالعه، نتایج اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته شبکه بیزین هیبرید نشان داد مدل برتر دارای مقدار شاخص میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) ۱۷/۳۱ درصد و ضریب تعیین (R^2) برابر با مقدار ۰/۹۶ است. به‌طور کلی مدل شبکه بیزین هیبرید برای "ارزیابی و شبیه‌سازی عملکرد" هر سیستم بهره‌برداری در مناطق تحت کشت آبی مفید است. Bozorgi et al. (2021) نیز در پژوهشی، به توسعه مدل شبکه بیزین هیبرید برای ارزیابی ریسک چند خطری شبکه‌های آبیاری در شبکه آبیاری رودشت پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، مقادیر ریسک قسمت توزیع سامانه به‌طور میانگین به‌ترتیب برابر با ۱۴/۸ درصد و ریسک جزءها در بازه ۰/۰۱ تا ۴۹/۲ درصد است.

مدل عددی با ارائه روابط ریاضی برای بررسی ارتباطات بین آب، غذا و انرژی و محاسبه تقاضای نهایی این منابع پرداخت. بدین صورت که در این پژوهش روابط و ارزیابی‌های لازم برای تحلیل پیوند آب-غذا-انرژی معرفی و در نهایت مدل را برای سال ۲۰۱۲ در کشور لبنان اجرا کرد.

در سال‌های اخیر نیز، با توجه به افزایش جمعیت و لزوم توجه به امنیت غذایی در راستای توسعه پایدار منابع، پژوهش‌گران ملی و فراملی توجه ویژه‌ای به بررسی پیوند آب-غذا-انرژی در بخش کشاورزی پرداختند. از جمله *El-Gafy et al.* (2017) به مقایسه رویکردهای پیوندی و غیرپیوندی برای توسعه استراتژی‌هایی برای تدوین الگوی بهینه کشت ۱۹ محصول به منظور استفاده بهینه از آب و انرژی در مصر پرداختند. نتایج شاخص پیوند آب-غذا-انرژی نشان داد سناریو رویکرد پیوندی با امتیاز ۰/۸۲ بهترین سناریو و سناریو اول (شرایط کنونی) با امتیاز صفر، بدترین رویکرد است. *Mirzaei et al.* (2019)، اولین مطالعه در زمینه پیوند آب‌زیرزمینی-غذا-انرژی محصولات زراعی ایران مبتنی بر مجموعه داده‌های استانی و ملی و اولین برآورد از برداشت‌های آب زیرزمینی در بخش زراعی را ارائه دادند. براساس نتایج آن‌ها، اختلاف بین برداشت آب کشاورزی تخمین زده شده و گزارش شده حاکی از عدم گزارش برداشت گسترده آب‌های زیرزمینی کشاورزی است که به نظارت بهتر آب‌های زیرزمینی نیاز دارد.

به دلیل تازگی موضوع پیوند آب-غذا-انرژی در سطح سامانه‌های تحویل و توزیع آب که بزرگترین مصرف‌کننده آب در بخش کشاورزی است، مطالعات معدودی در این زمینه انجام شده است. *Kamrani et al.* (2020) یک چارچوب برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های توزیع آب کشاورزی در سیستم توزیع آب رودشت واقع در مرکز

شایان ذکر است روش‌های بهره‌برداری پیشنهادی برای بهبود عملکرد سامانه‌های تحویل و توزیع آب کشاورزی باید به گونه‌ای باشند که علاوه بر برآورده ساختن مطلوبیت تحویل آب سطحی، مطلوبیت مصرف انرژی و تولید محصولات زراعی را نیز دارا باشند؛ چنین راه‌حل‌های یکپارچه، نیاز به تغییر پارادایم از رویکرد معمول (سیلو)^۱ به رویکرد ترکیبی همانند پیوند آب-غذا-انرژی^۲ است که همگرایی و مدیریت بین منابع و انسجام بین بخشی را تسهیل می‌کند (Leck *et al.*, 2015; Daher & Mohtar, 2015). رویکرد سیلو بر پایه سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری تک بعدی و بخشی است که در آن مدیران منابع در مورد روابط متقابل بین بخش‌های مختلف که در مدیریت منابع دخیل هستند، تأمل نمی‌کنند. رویکرد پیوند به‌عنوان راهی برای حذف سیلوها با شناسایی و درک ارتباط متقابل جریان‌های چندگانه منابع در یک فضای مکانی و زمانی معین، مشخص شده است (Hoff, 2011).

تاکنون پژوهش‌گران بسیاری به بررسی فعل و انفعالات موجود بین منابع آب، غذا و انرژی در سطح منطقه‌ای و حوضه‌ای پرداختند. از جمله Hoff (2011) نشان داد که ارتباطات بین سیستم‌های آب، غذا و انرژی پویا می‌باشد. این سیستم‌ها علاوه بر این‌که بر روی یک‌دیگر در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت اثرگذار هستند بلکه عوامل متعدد اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، تکنولوژی و محیطی نیز با این سیستم‌ها درگیر هستند. *Lawford et al.* (2013) در مطالعه‌ای، عوامل اصلی مؤثر بر پیوند امنیت آب-غذا-انرژی را در حوضه‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد پیوند آب-غذا-انرژی می‌تواند وسیله‌ای مؤثر برای پیشبرد مسائل پایداری و آب باشد. *Karnib* (2017) به ارائه یک چارچوب به‌منظور توسعه یک

مصرف انرژی، بهره‌وری اقتصادی آب سطحی، بهره‌وری اقتصادی انرژی و بهره‌وری اقتصادی غذا با هدف ارایه یک ساختار جامع ارزیابی مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی نموده است. شایان ذکر است هدف اصلی پژوهش پیش‌رو، ارزیابی کمی میزان بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی مبتنی بر رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی در محدوده شبکه آبیاری رودشت در اصفهان به واسطه ارتقا روش بهره‌برداری به سیستم دستی بهبود یافته و کنترل خودکار پیش‌بین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

انتخاب شبکه آبیاری رودشت به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش به این دلیل صورت گرفته که این شبکه در حوضه‌ای قرار دارد که یکی از حوضه‌های آبریز تحت تنش آبی در کشور است که با توجه به تداوم طرح‌های توسعه منابع آب در حوضه به دلیل رشد سریع تقاضا همواره با کمبود آب مواجه بوده است. شبکه آبیاری رودشت واقع بر رودخانه زاینده‌رود اصفهان می‌باشد. این منطقه گسترده در دو سوی زاینده‌رود به دو بخش رودشت شمالی و رودشت جنوبی تقسیم شده است. شبکه آبیاری این منطقه حدود ۴۵۰۰۰ هکتار از اراضی مربوطه را تحت پوشش قرار می‌دهد. کانال اصلی شاخه چپ شبکه رودشت شمالی به‌عنوان سامانه تأمین و توزیع آب کشاورزی مورد مطالعه در این پژوهش جهت ارزیابی وضعیت بهره‌برداری شبکه از دیدگاه پیوند آب-غذا-انرژی انتخاب شده است. در شکل (۱) شمایی از کانال مورد مطالعه، آبگیرهای درجه دو و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری موجود در محدوده شبکه ارائه شده است.

ایران از چشم انداز پیوند آب-غذا-انرژی ارائه کردند. با در نظر گرفتن نتایج این مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که روش بهره‌برداری MPC^۳ بهتر از سایر روش‌ها از نظر پیوند آب-غذا-انرژی تحت سناریوی جریان نرمال است. *Monem et al.* (2020) به بررسی کاربرد و ارزیابی پیوند آب، غذا و انرژی در مدیریت شبکه‌های آبیاری در سطح شبکه آبیاری زاینده‌رود پرداختند. این پژوهش نشان داد در نظر گرفتن هم‌زمان پیوند آب، غذا و انرژی در تحلیل عملکرد شبکه‌های آبیاری و انتخاب سیاست‌های برتر امری ضروری است. در مطالعه‌ای دیگر، *Ghorbani et al.* (2020) مدل پیوند آب، غذا و انرژی را در سطح شبکه آبیاری قزوین براساس شاخص‌های کفایت و پایداری آب توسعه دادند. در این پژوهش از رویکرد دینامیک سیستم‌ها برای بررسی ساختارهای موجود بین این منابع استفاده و روابط علت و معلولی بین آن‌ها به‌صورت مدل مفهومی ارائه شده است. با توجه به نتایج این مطالعه، از بین سناریوهای در نظر گرفته شده، کاهش منابع آب سطحی بیش‌ترین تأثیر را در کاهش تولید محصول و مطلوبیت، نسبت به ادامه وضع موجود، داشته است.

بررسی سابقه پژوهش به‌کارگیری پیوند آب-غذا-انرژی در ارزیابی عملکرد سامانه‌های مختلف آب کشاورزی حاکی از آن است که باوجود مطالعات محدود در مورد پیوند آب-غذا-انرژی در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی، ضرورت تعریف شاخص‌های مناسب و همسان برای پیوند مطرح شده است. در این ارتباط شاخص‌های بهره‌وری آب سطحی، بهره‌وری غذا و بهره‌وری انرژی به‌عنوان شاخص‌های اصلی روش‌های ارزیابی عملکرد مبتنی بر پیوند در مطالعات مرتبط معرفی شده است. این مطالعه برای اولین بار اقدام به معرفی شاخص‌های تحویل آب سطحی،

بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری با رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی

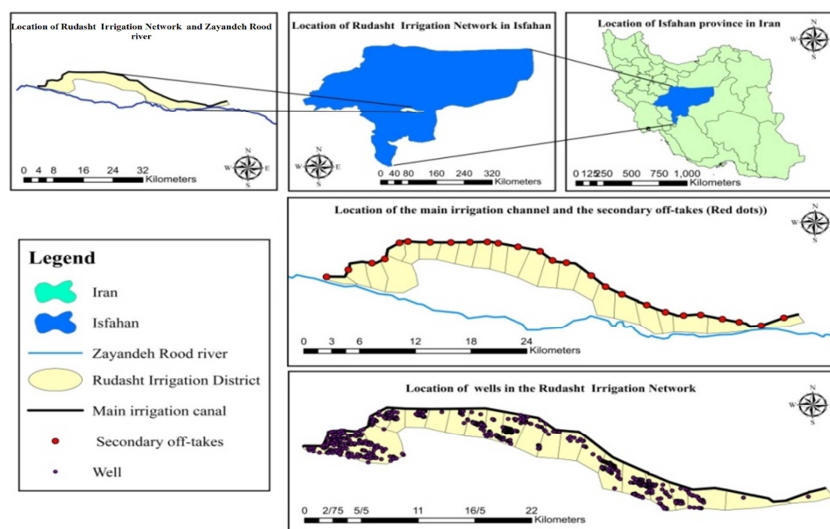


Figure 1. Main irrigation canal, the secondary off-takes (Red dots) and the wells located within the boundaries of the Rudasht agricultural water distribution system

بهره‌برداری کانال آبیاری رودشت، با هدف بررسی کارایی روش‌های بهره‌برداری پیشنهادشده در بهبود عملکرد سامانه توزیع آب کشاورزی با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS توسعه داده توسط *Shahdany et al.* (2016) استفاده شد. ارزیابی عملکرد وضعیت موجود توزیع آب سطحی در این شبکه- براساس روش بهره‌برداری دستی- بر پایه اطلاعات اندازه‌گیری‌شده توسط شرکت بهره‌برداری این شبکه برای سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ صورت پذیرفته است. گزینه دوم روش بهره‌برداری مورد بررسی در این پژوهش، روش دستی بهبود یافته است. روش بهره‌برداری دستی بهبودیافته، به دلیل امکان پیاده‌سازی آسان آن در شبکه آبیاری رودشت و عدم نیاز به سرمایه‌گذاری کلان جهت زیرساخت لازم در شبکه به مانند روش‌های اتوماسیون خودکارسازی، انتخاب شد. فرض اساسی در این روش این است که می‌توان نوسانات جریان آب ورودی به سیستم توزیع را در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در بالادست سامانه شناسایی، تشخیص و اندازه‌گیری کرد. در شکل (۲)، شمایی از این روش ارائه شده است.

آب موردنیاز شبکه آبیاری رودشت از سد انحرافی رودشت به ظرفیت ۵۰۰۰۰ متر مکعب تأمین می‌شود. عمده‌ترین محصولات کشت شده در منطقه رودشت گندم و جو می‌باشد. در این شبکه حدود ۳۰۰ درچه آبگیر نصب شده است که این درچه‌ها براساس مقدار معینی از دبی ورودی به شبکه، باز می‌شوند. از این تعداد، ۲۶ آبگیر روی کانال اصلی واقع هستند که آب را به کانال‌های فرعی درجه دو تحویل می‌دهند (*Sharifi et al.*, 2020). کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت آخرین شبکه آبیاری است که از زاینده‌رود آبگیری می‌کند. بنابراین همه نوسانات رودخانه در طول مسیر ۳۵۰ کیلومتری، به‌صورت نوسانات مداوم دبی ورودی به شبکه و در نتیجه اختلال در کارکرد شبکه بروز می‌کند.

روش‌های بهره‌برداری شبکه

در این مطالعه، به جهت ارزیابی میزان بهبود عملکرد شبکه به‌واسطه ارتقا روش‌های بهره‌برداری، از سه وضعیت بهره‌برداری مختلف سامانه تأمین و توزیع آب کشاورزی استفاده شده است. بدین منظور مدل ریاضی

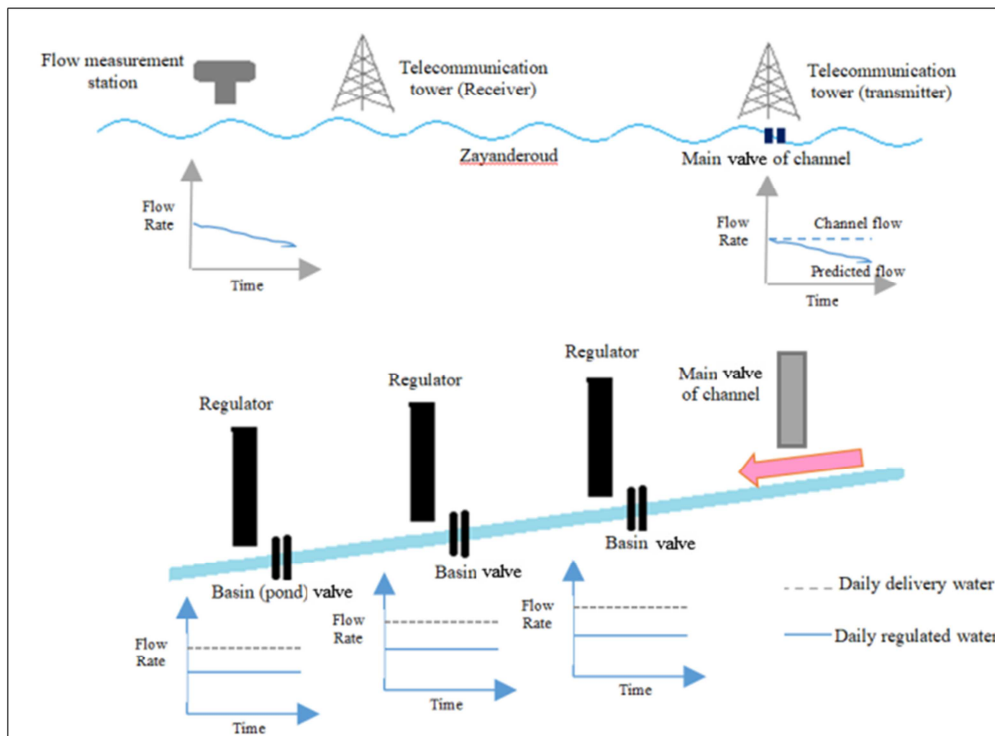


Figure 2. A schema of the improved manual operational method

مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده شده در سیستم کانال آبیاری را می‌توان به‌طور کلی در قالب معادله (۱) بیان نمود (Van Overloop, 2006).

$$X(k+1) = A(k) * X(k) + B_u^* u(k) + B_d^* d(k) \quad (1)$$

در این معادله، X وضعیت جریان در کانال را نشان می‌دهد. u اقدام کنترلی محاسبه‌شده به‌وسیله کنترل‌گر، d اغتشاشات پیش‌بینی‌شده و k نیز شاخص گام زمانی است. پارامترهای A ، B_u و B_d ضرایب معادلات است. به حداقل رساندن حرکت سازه‌های تنظیم آب، در برابر کنترل درست سطح آب در بازه‌های کانال، تابع هدف MPC را به‌عنوان معادله (۲) فرموله می‌کند.

$$MinJ = X^T * Q * X + U^T * R * U \quad (2)$$

در این معادله X ماتریس وضعیت سیستم، Q ماتریس وزن نسبی برای متغیرهای سیستم، U ماتریس مقادیر کنترل و R ماتریس متغیرهای کنترل‌گر می‌باشد.

در ادامه سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC)، با هدف برآورد حداکثر میزان بهبود عملکرد سامانه توزیع آب کشاورزی، انتخاب شد. MPC به‌دلیل قابلیت‌هایش در مواجهه با اهداف بهینه‌سازی متعدد تحت انواع مختلف محدودیت‌ها، تأخیرهای کوتاه و طولانی و متغیرهای نامشخص در یک مسأله کنترل بسیار مورداستفاده قرار گرفته است. MPC، یک سامانه‌ی کنترل خودکار است که در تکنیک طراحی آن، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر (رقوم سطح آب در بازه‌های کانال آبیاری) استفاده می‌شود (Kamrani et al., 2020). وظیفه کنترل‌گر رساندن سطح آب پایین‌دست هر بازه کانال اصلی رودشت به سطح آب هدف، با تنظیم سازه کنترل سطح آب واقع شده در بالادست هر بازه کانال می‌باشد. در شکل (۳)، نمای کلی مدل کنترل‌گر MPC ارائه شده است. در کنترل سیستم توزیع آب به روش MPC از مدل‌های فضای حالت جهت بیان

بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری با رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی

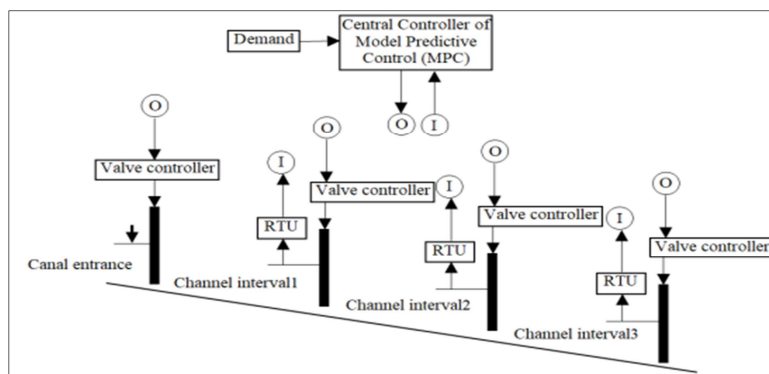


Figure 3. A general schema of an MPC controller system

پیوند آب-غذا-انرژی

روابط بین آب، انرژی و مواد غذایی، توجه و آگاهی را نسبت به پیامدهای ناشی از آن که جامعه با آن روبه‌رو هست، می‌طلبد. درک رابطه بین این منابع به کشورها این امکان را می‌دهد تا استراتژی‌ها و سیاست‌های توسعه پایدار مؤثر را براساس داده‌های دقیق و سیستماتیک ایجاد کنند و از خطرات دنباله‌دار جلوگیری و یا بکاهند. یکی از ابزارهای که به مطالعه این روابط می‌پردازد مفهوم پیوند آب-غذا-انرژی (WFE Nexus) است. مفهوم Nexus نخستین بار توسط مجمع جهانی اقتصاد در نشست سالانه در Davos Klosters (2008) بیان شد که در آن رهبران مشاغل، فراخوانی برای اقدام در مورد آب را به‌عنوان یک پیوند میان نگرانی‌های زیست‌محیطی و رشد اقتصادی اعلام کردند (World Economic Forum (WEF), 2011). دیدگاه پیوند آب-غذا-انرژی یک دیدگاه چندبُعدی است که می‌تواند اثرات تصمیم‌گیری در یک سیستم را بر سیستم‌های دیگر مانند سیستم تولیدات غذایی و سیستم انرژی ارزیابی کند (Flammini et al., 2014).

شاخص پیوند آب-غذا-انرژی

در این پژوهش، شاخص پیوند آب-غذا-انرژی براساس هشت شاخص معرفی شده شامل، ۱- شاخص تحویل آب سطحی ($W_{c,t}$)، ۲- شاخص مصرف انرژی ($E_{c,t}$)، ۳- شاخص

بهره‌وری آب سطحی ($W_{pro,t}$)، ۴- شاخص بهره‌وری انرژی ($E_{pro,t}$)، ۵- شاخص بهره‌وری غذا ($F_{pro,t}$)، ۶- شاخص بهره‌وری اقتصادی آب سطحی ($W_{EV,t}$)، ۷- شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی ($E_{EV,t}$) و ۸- شاخص بهره‌وری اقتصادی غذا ($F_{EV,t}$) و با استفاده از رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$WEFNI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i X_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

هم‌چنین در این مطالعه به جهت نرمال‌سازی شاخص‌های پیوند آب-غذا-انرژی از روابط (۴) و (۵) به‌ترتیب برای معیار مثبت و منفی استفاده شده است.

$$X_i = \frac{x_i - \text{Min}(x_i)}{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)} \quad (4)$$

$$X_i = \frac{\text{Max}(x_i) - x_i}{\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)} \quad (5)$$

شاخص تحویل آب سطحی

شاخص تحویل آب سطحی ($W_{c,t}$) به‌صورت میزان آب سطحی تحویل داده‌شده به‌ازای الگوی کشت شبکه (c) در نظر گرفته شده است.

شاخص مصرف انرژی

در این مطالعه، فقط انرژی مرتبط با انرژی پمپاژ آب زیرزمینی درون شبکه در نظر گرفته شده است. بنابراین انرژی مدنظر این پژوهش، میزان انرژی مصرف‌شده برای پمپاژ آب از آبخوان ($E_{c,t}$) به‌ازای الگوی کشت شبکه (c) در سطح شبکه است.

شاخص بهره‌وری آب سطحی

شاخص بهره‌وری آب (W_{prot} , ton/m^3) به صورت رابطه (۶) ارائه شده است (El-Gafy, 2017):

$$W_{\text{prot}} = Y_{\text{c,t}}/W_{\text{c,t}} \quad (6)$$

پارامترهای رابطه فوق برای این پژوهش به صورت $Y_{\text{c,t}}$ مقدار محصول تولیدشده c در مساحت تحت آبیاری شبکه رودشت (ton) با آب سطحی در دوره زمانی آبیاری (t) و $W_{\text{c,t}}$ میزان آب تحویل شده به کل شبکه (m^3) برای تولید الگوی کشت مدنظر در زمان آبیاری (t) تعریف می‌شود.

شاخص بهره‌وری انرژی

شاخص بهره‌وری انرژی ($E_{\text{pro,t}}$, ton/J) به صورت رابطه (۷) ارائه شده است (El-Gafy, 2017):

$$E_{\text{pro,t}} = Y_{\text{c,t}}/E_{\text{c,t}} \quad (7)$$

پارامترهای رابطه فوق برای این پژوهش به صورت $Y_{\text{c,t}}$ مقدار محصول تولیدشده c در مساحت تحت آبیاری شبکه رودشت (ton) با آب سطحی در دوره زمانی آبیاری (t) و $E_{\text{c,t}}$ میزان انرژی مصرف شده در کل شبکه (KWh) برای تولید الگوی کشت مدنظر در زمان (t) تعریف می‌شود.

شاخص بهره‌وری غذا

این شاخص به منظور تحلیل بهتر پیوند آب-غذا-انرژی ارائه شده است و به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$F_{\text{pro,t}} = Y_{\text{c,t}}/Y_{\text{TOTAL}} \quad (8)$$

که در آن Y_{TOTAL} مقدار محصول تولیدشده مدنظر c در کل شبکه می‌باشد.

شاخص بهره‌وری اقتصادی آب سطحی

بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری در زمان t ($W_{\text{EV,t}}$, $\$/\text{m}^3$) استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌شود (El-Gafy, 2017):

$$W_{\text{EV,t}} = (N_{\text{c,t}} - C_{\text{c,t}})/W_{\text{c,t}} \quad (9)$$

پارامترهای رابطه فوق برای این پژوهش به صورت $N_{\text{c,t}}$ بازده محصول c تولیدشده با آب سطحی (تومان) در زمان (t) و $C_{\text{c,t}}$ هزینه منابع استفاده شده برای تولید محصول c با استفاده از آب سطحی در زمان t تعریف می‌شود.

شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی

بهره‌وری اقتصادی انرژی C در زمان t ($E_{\text{EV,t}}$, $\$/\text{J}$) با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می‌شود (El-Gafy, 2017):

$$E_{\text{EV,t}} = (N_{\text{c,t}} - C_{\text{c,t}})/E_{\text{c,t}} \quad (10)$$

شاخص بهره‌وری اقتصادی غذا

بهره‌وری اقتصادی محصول c در زمان t ($F_{\text{EV,t}}$, toman/ton) نیز با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$F_{\text{EV,t}} = (N_{\text{c,t}} - C_{\text{c,t}})/Y_{\text{TOTAL}} \quad (11)$$

داده‌های مدل سازی

در این پژوهش، برای ارزیابی شاخص‌های پیوند آب-غذا-انرژی برای شبکه آبیاری نیاز به اطلاعاتی از قبیل میزان آب تحویل داده شده، میزان انرژی پمپاژ مصرف شده به‌ازای دبی تحویل داده شده و غذای تولیدشده به‌ازای آب تحویل داده شده است. انرژی مصرف شده همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، برای این پژوهش فقط میزان انرژی پمپاژ آب از آبخوان در شبکه در نظر گرفته شده است. بدین منظور اطلاعات مربوط به بهره‌برداری چاه‌ها از قبیل موقعیت چاه‌ها، دبی برداشتی و عمق هر چاه از آب منطقه‌ای اصفهان تهیه شده است. در این پژوهش جهت محاسبه میزان برداشت آب از چاه و در نتیجه میزان انرژی مصرفی، از شاخص کفایت که نمایان‌گر میزان آب تحویل شده به نیاز در محل آبیگرها می‌باشد، استفاده شده است.

شاخص کفایت تحویل آب

شاخص کفایت تحویل و توزیع آب با استفاده از فرمول (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$P_a = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \right) \quad (12)$$

که در آن، P_a شاخص کفایت برای کل سیستم، T دوره زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد، R پارامتر مکانی (تعداد کل آبگیرهای اندازه‌گیری شده)، Q_D دبی تحویلی، Q_R دبی مورد نیاز است (Kamrani et al., 2019).

ارزیابی مطلوبیت بهره‌برداری شاخص کفایت با استفاده از مفاهیم کیفی خوب، مناسب و ضعیف انجام می‌گیرد. جهت تعیین میزان برداشت آب از چاه و انرژی مصرفی، ابتدا شاخص کفایت به‌ازای روش‌های مختلف بهره‌برداری در محل آبگیرهای کانال اصلی محاسبه شد. سپس مقادیر شاخص کفایت به‌ازای روش‌های مختلف از مقدار میانگین شاخص کفایت وضعیت موجود کم شد تا میزان بهبودیافتگی شاخص کفایت برای روش‌های مختلف بهره‌برداری مشخص شود. با توجه به توضیحات داده شده و فرض‌های در نظر گرفته شده، میزان بهبودیافتگی شاخص کفایت به‌ازای روش‌های مختلف بهره‌برداری در واقع معادل میزان بهبودیافتگی آب تحویل داده شده و در نتیجه میزان کاهش برداشت از چاه‌های واقع در شبکه می‌باشد. در نهایت با در دست داشتن میزان کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی به‌ازای استفاده از روش‌های مختلف بهره‌برداری و همچنین اطلاعات چاه‌های منطقه، میزان مصرف انرژی محاسبه شد. اطلاعات مورد نیاز برای تعیین میزان غذای تولیدی شبکه آبیاری رودشت و شاخص‌های اقتصادی از *Khiabani et al.* (2021) و گزارش‌های منتشره سازمان برنامه و بودجه

استخراج شدند. خلاصه‌ای از اطلاعات مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

برای تعیین میزان غذای تولید شده با آب سطحی $(Y_{c,t})$ کافی است مساحت سطحی از شبکه که با آب سطحی آبیاری می‌شود در عملکرد محصول ضرب شود. میزان مساحتی که تحت آبیاری سطحی و زیرزمینی قرار می‌گیرد براساس رابطه (۱۳) و (۱۴) محاسبه شده است (Kamrani et al., 2020).

$$A_s = A * (Q_s / (Q_g + Q_s)) \quad (13)$$

$$A_g = A * (Q_g / (Q_g + Q_s)) \quad (14)$$

که در این رابطه A مساحت شبکه، Q_s حجم آب سطحی تحویل داده شده در دوره آبیاری و Q_g حجم آب زیرزمینی استحصال شده در دوره آبیاری می‌باشد.

نتایج و بحث

با توجه به این نکته که هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی میزان بهبود عملکرد سامانه توزیع آب سطحی به‌واسطه ارتقای روش‌های بهره‌برداری در شبکه آبیاری رودشت اصفهان با استفاده از شاخص‌های پیوند آب-غذا-انرژی تحت دو سناریو نرمال و کم‌آبی است. از این‌رو، شاخص کفایت برای هر کدام از روش‌های بهره‌برداری و به تفکیک هر یک از آبگیرها تحت سناریو نرمال و کم‌آبی محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. قابل ذکر است در این مطالعه، در سناریو نرمال دبی‌هایی در بازه ۴-۵ مترمکعب بر ثانیه و در سناریو کم‌آبی نیز، دبی‌هایی در بازه ۰/۵۲-۱/۹۲ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

Table 1. Current crop pattern and selected values from economic information of Rudasht Irrigation Network

	Crop				
	Sugar beet	Safflower	Alfalfa	Barley	Wheat
Sale price (toman kg ⁻¹)	831.25	6243.8	2493.2	2379.8	5000
Yield (ton ha ⁻¹)	44.23	1.88	11.21	4.08	4.28
Gross profit (toman ha ⁻¹)	15,059,716	4,711,735	7,784,198	4,126,838	9,236,943

Table 2. Results of water distribution adequacy index in normal and water shortage scenarios

Off-takes No	Manual Method		Improved Manual Method		MPC		Off-takes No	Manual Method		Improved Manual Method		MPC	
	Normal	Water shortage	Normal	Water shortage	Normal	Water shortage		Normal	Water shortage	Normal	Water shortage	Normal	Water shortage
1	0.67	0.23	0.74	0.25	0.95	0.34	14	1	0.30	1	0.33	0.95	0.35
2	0.57	0.27	0.61	0.29	0.97	0.35	15	0.49	0.12	0.53	0.13	0.93	0.34
3	0.48	0.22	0.51	0.24	0.91	0.35	16	0.48	0.12	0.52	0.13	0.87	0.34
4	0.67	0.32	0.72	0.34	1	0.35	17	0.38	0.06	0.40	0.07	0.90	0.35
5	0.57	0.26	0.62	0.27	0.97	0.34	18	0.63	0.16	0.68	0.18	0.95	0.35
6	0.64	0.31	0.68	0.33	0.97	0.35	19	0.38	0.09	0.41	0.10	0.92	0.35
7	0.70	0.18	0.76	0.19	0.97	0.35	20	0.83	0.00	0.90	0.00	0.94	0.34
8	0.95	0.42	0.99	0.44	0.99	0.34	21	0.76	0.17	0.82	0.18	0.97	0.35
9	0.47	0.21	0.51	0.22	0.99	0.34	22	0.38	0.07	0.41	0.08	0.95	0.36
10	0.95	0.40	0.99	0.42	0.88	0.35	23	0.14	0.03	0.16	0.03	0.98	0.35
11	0.55	0.24	0.59	0.25	0.93	0.35	24	0.87	0.16	0.95	0.18	1	0.35
12	0.99	0.28	1	0.30	0.98	0.36	25	0.46	0.07	0.49	0.08	0.98	0.35
13	0.42	0.10	0.45	0.11	0.97	0.34	26	0.69	0.11	0.74	0.12	0.99	0.35

روش‌های مختلف بهره‌برداری در دو سناریو نرمال و کم‌آبی محاسبه شد. براساس نتایج به‌طور متوسط در سناریو نرمال، روش بهره‌برداری دستی (وضع موجود) ۴۳/۹ درصد، روش بهره‌برداری دستی بهبودیافته ۴۳/۹ درصد و روش بهره‌برداری MPC ۹۲/۱ درصد از مقدار آب ورودی به شبکه را به آبیگرهای درجه دو تحویل می‌دهد. در سناریو کم‌آبی نیز روش بهره‌برداری دستی به‌طور متوسط ۳۷/۱ درصد، روش بهره‌برداری دستی بهبودیافته ۳۹/۸ درصد و روش MPC ۷۸/۱ درصد از مقدار آب ورودی به شبکه را به آبیگرهای درجه دو تحویل می‌دهد. در ادامه براساس توضیحات ارائه‌شده در بخش قبل، میزان انرژی مصرفی به‌ازای روش‌های مختلف بهره‌برداری در دو سناریو نرمال (دبی‌های واقع در رنج ۴/۵-۴) و کم‌آبی (دبی‌های واقع در رنج ۱/۹۲-۰/۵۲) محاسبه و میزان کاهش مصرف انرژی به‌ازای ارتقای روش بهره‌برداری به دستی بهبودیافته و MPC در شکل (۴) ارائه شده است.

با توجه به نتایج در طول دوره مطالعاتی در سناریو نرمال به‌طور میانگین نزدیک به ۷۳۵۱۱۶ KWh و در سناریو کم‌آبی ۱۱۱۴۰۲۵ KWh به جهت برداشت آب از آبخوان، انرژی

همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است در روش بهره‌برداری موجود تحت سناریو نرمال، میزان تغییرات شاخص کفایت در محدوده ۰/۱۴ الی یک است که با توجه به تعریف مطلوبیت (Molden & Gate, 1990)، نشان‌دهنده عملکرد ضعیف است. با به‌کارگیری روش بهره‌برداری دستی بهبودیافته، میزان تغییرات شاخص کفایت در محدوده ۰/۱۶ الی یک به‌دست آمد که با توجه به نتایج، تغییرات ناچیزی در مقدار شاخص کفایت شبکه دیده می‌شود. اما با بهبود روش بهره‌برداری به روش MPC توزیع آب سطحی در شبکه به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. به‌طوری‌که شاخص کفایت تحویل آب در محدوده ۰/۸۷ تا یک قرار گرفته است. در شرایط کم‌آبی، محدوده تغییرات شاخص کفایت شبکه در محدوده صفر الی ۰/۴۲ است که از مطلوبیتی برخوردار نیست. با بهبود روش بهره‌برداری به روش دستی بهبودیافته، توزیع آب در شبکه بهبود اندکی می‌یابد. اما با به‌کارگیری روش MPC فرایند تحویل و توزیع آب سطحی در کانال آبیاری رودشت به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. به‌طوری‌که شاخص کفایت در محدوده ۰/۳۴ تا ۰/۳۶ قرار گرفته است.

مقادیر روزانه و تجمعی آب تحویل‌شده به هر کدام از آبیگرهای درجه دو در طی دوره بهره‌برداری، به‌ازای

بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری با رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی

رو با توجه به مقایسه نتایج می‌توان اظهار داشت روش بهره‌برداری MPC عملکرد بسیار مطلوب‌تری در کاهش مصرف انرژی در شبکه داشته است. به‌منظور محاسبه پارامترهای شاخص‌های پیوند آب-غذا-انرژی؛ میزان مساحت سطح زیرکشت آب سطحی و میزان محصول تولیدی به‌ازای روش‌های مختلف بهره‌برداری محاسبه شد. در شکل (۵) میزان محصول تولیدی به‌ازای روش‌های مختلف بهره‌برداری ارائه شده است.

مصرف شده است. براساس نتایج می‌توان اظهار داشت ارتقای سیستم بهره‌برداری شبکه به دستی بهبودیافته در سناریوی نرمال موجب ۵/۵ درصد کاهش مصرف انرژی و به‌کارگیری روش بهره‌برداری MPC موجب ۳۸/۶ درصد کاهش مصرف انرژی می‌شود. در سناریو کم‌آبی نیز بهبود سیستم بهره‌برداری به دستی بهبودیافته موجب یک درصد کاهش مصرف انرژی و پیاده‌سازی روش بهره‌برداری MPC موجب ۱۳/۷ درصد کاهش مصرف انرژی می‌شود. از این

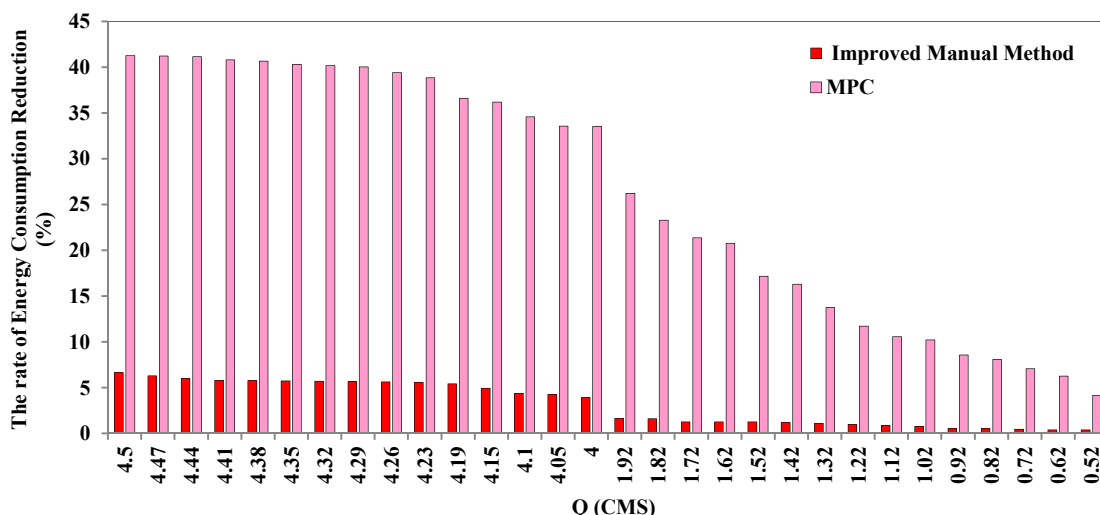


Figure 4. The rate of energy consumption reduction for the various operating systems

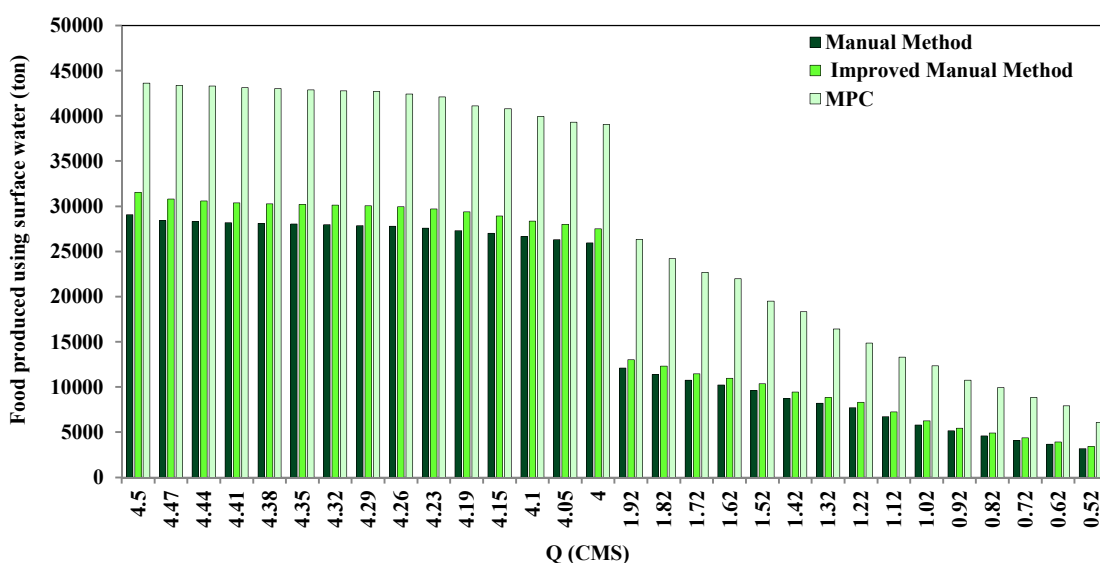


Figure 5. Food production by surface water through the operating systems

محاسبه مقادیر آب تحویلی، انرژی مصرفی و غذای تولیدشده، مقادیر شاخص های پیوند آب-غذا-انرژی برای روش های مختلف بهره برداری در دو سناریوی نرمال و کم آبی محاسبه شد. در شکل (۶)، مقادیر نرمال شاخص تحویل آب سطحی، شاخص مصرف انرژی، شاخص بهره وری آب سطحی، شاخص بهره وری انرژی، شاخص بهره وری غذا، شاخص بهره وری اقتصادی آب سطحی، شاخص بهره وری اقتصادی انرژی و شاخص بهره وری اقتصادی غذا برای دبی ورودی ۴/۲۶ مترمکعب بر ثانیه (سناریو نرمال) و ۱/۱۲ مترمکعب بر ثانیه (کم آبی) برای سه وضعیت بهره برداری ارائه شده است.

براساس شکل (۶) در وضعیت موجود تحت سناریوی نرمال، مقادیر شاخص تحویل آب سطحی، شاخص مصرف انرژی، شاخص بهره وری آب سطحی، شاخص بهره وری انرژی، شاخص بهره وری غذا، شاخص بهره وری اقتصادی آب سطحی، شاخص بهره وری اقتصادی انرژی و شاخص بهره وری اقتصادی غذا به ترتیب برابر با ۵۸۴/۶، ۱/۴، ۳۷/۹ کیلوگرم بر مترمکعب، ۵۳/۴ کیلووات ساعت بر هکتار، ۰/۴۳، ۲/۵ هزار تومان بر مترمکعب، ۶۷/۳ هزار تومان بر کیلووات ساعت و ۷۷۱/۲ هزار تومان بر تن و در سناریو کم آبی به ترتیب برابر با ۱۳۷/۵ مترمکعب بر هکتار، ۸۲/۲ کیلووات ساعت بر هکتار، ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب، ۵/۹ کیلووات ساعت بر کیلووات ساعت، ۰/۱۰، ۲/۳ هزار تومان بر مترمکعب، ۱۰/۶ هزار تومان بر کیلووات ساعت و ۱۸۶/۸ هزار تومان بر تن برآورد شد. با ارتقای روش بهره برداری به دستی بهبودیافته، تحت سناریوی نرمال مقادیر شاخص تحویل آب سطحی، شاخص مصرف انرژی، شاخص بهره وری آب سطحی، شاخص بهره وری انرژی، شاخص بهره وری غذا، شاخص بهره وری اقتصادی آب سطحی، شاخص بهره وری اقتصادی انرژی و شاخص بهره وری

براساس نتایج، در وضعیت موجود تحت سناریوی نرمال، به طور میانگین حدود ۴۳ درصد و تحت سناریو کم آبی در حدود ۱۲ درصد از سطح زیر کشت شبکه با آب سطحی آبیاری شده است. با ارتقای روش بهره برداری به دستی بهبودیافته، به طور میانگین در سناریوی نرمال حدود ۴۶ درصد و تحت سناریوی کم آبی حدود ۱۳ درصد از سطح زیر کشت شبکه با آب سطحی آبیاری شده است. این رقم برای روش MPC به طور میانگین در سناریوی نرمال ۶۶ درصد و در سناریوی کم آبی ۲۴ درصد است. از این رو، با توجه به نتایج مقادیر تجمعی حجم آب تحویلی، حجم آب زیرزمینی برداشتی و درصد سطوح زیر کشت آبیاری شده با آب سطحی در وضعیت موجود می توان اظهار داشت عدم تحویل آب کافی به کشاورزان، دلیل گرایش کشاورزان این منطقه به منابع آب زیرزمینی بوده و می توان با ارتقای روش بهره برداری، کشاورزان را با توجه به افزایش آب سطحی تحویلی و کاهش هزینه انرژی، ترغیب به کاهش مصرف آب زیرزمینی نمود. علاوه بر این، با در نظر گرفتن میزان عملکرد پنج محصول اصلی شبکه یعنی گندم، جو، گلرنگ، یونجه و چغندر قند، میزان تجمعی محصول تولیدی اراضی شبکه به ازای مصرف این مقدار از آب سطحی تحت وضعیت موجود (روش بهره برداری دستی) در سناریوی نرمال در طول دوره مطالعاتی در حدود ۲۷۶۳۵ تن و در سناریوی کم آبی در حدود ۷۴۶۳ تن است. با به کارگیری روش بهره برداری دستی بهبودیافته، میزان تجمعی محصول تولیدی اراضی شبکه به ازای مصرف این مقدار از آب سطحی در سناریوی نرمال در طول دوره مطالعاتی به حدود ۲۹۷۲۰ تن و در سناریوی کم آبی به حدود ۸۰۱۶ تن افزایش می یابد. این رقم برای روش MPC به طور میانگین در سناریوی نرمال ۴۱۹۷۳ تن و در سناریوی کم آبی ۱۵۵۶۹ تن است. پس از

بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری با رویکرد پیوند آب-غذا-انرژی

کیلووات ساعت بر هکتار، ۱/۴ کیلوگرم بر مترمکعب، ۶/۵ کیلوگرم بر کیلووات ساعت، ۰/۱۱، ۲/۵ هزارتومان بر مترمکعب، ۱۱/۵ هزارتومان بر کیلووات ساعت و ۲۰۱/۲ هزار تومان بر تن حاصل شد که در مقایسه با نتایج وضعیت موجود، به‌کارگیری این روش تأثیر قابل‌توجهی در بهبود توزیع آب سطحی در شبکه ندارد.

اقتصادی غذا به‌ترتیب برابر با ۶۳۲/۵ مترمکعب بر هکتار، ۵۰/۴ کیلووات ساعت بر هکتار، ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب، ۴۳/۴ کیلوگرم بر کیلووات ساعت، ۰/۴۷، ۲/۷ هزارتومان بر مترمکعب، ۷۶/۸ هزارتومان بر کیلووات ساعت و ۸۳۱/۳ هزارتومان بر تن و در سناریوی کم‌آبی به‌ترتیب برابر با ۱۴۸/۲ مترمکعب بر هکتار، ۸۱/۴

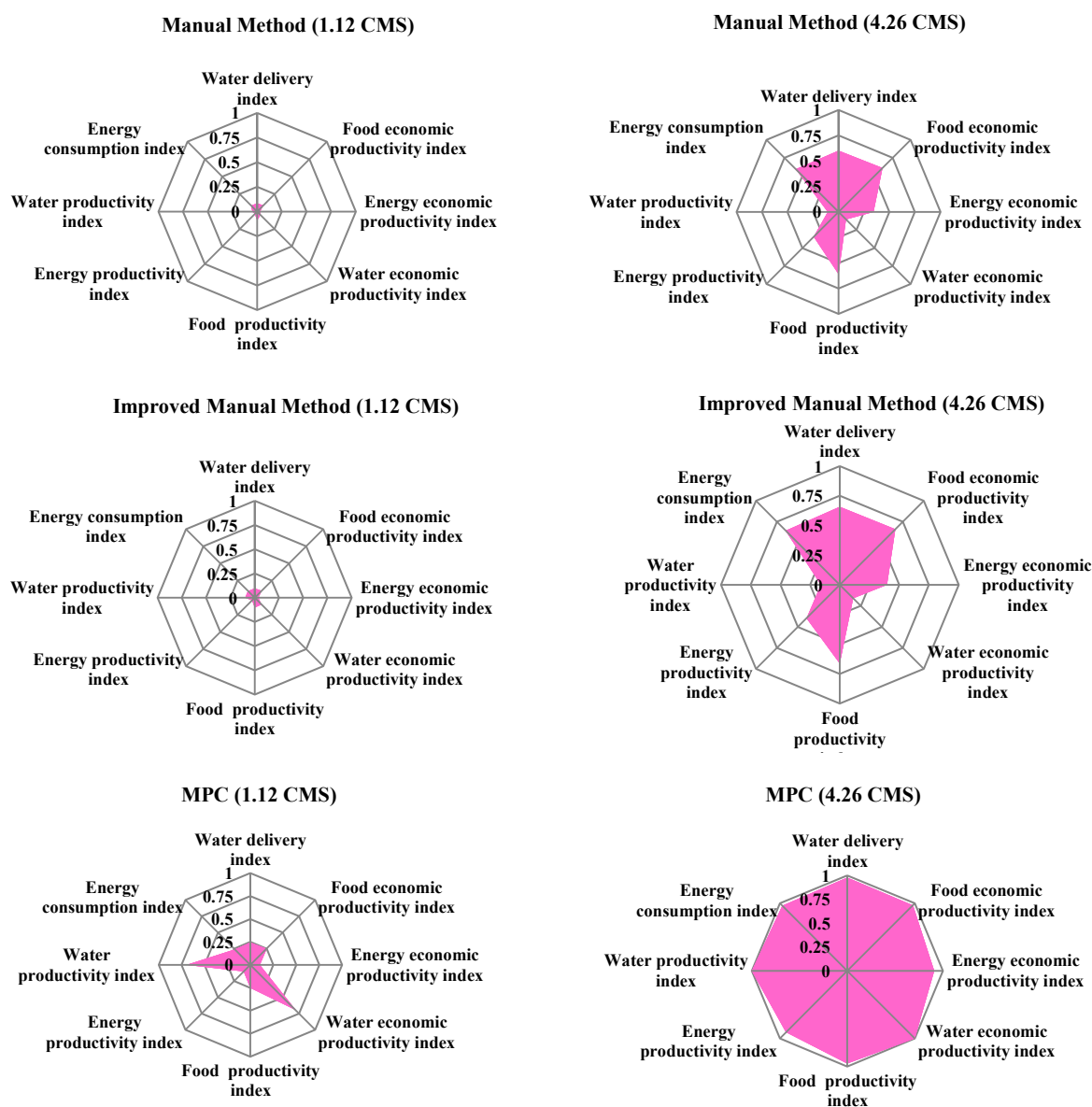


Figure 6. Values of water-Food-Energy Nexus indicators for the various operational methods

دارای عملکرد مناسب و قابل توجه در تحویل و توزیع آب سطحی در شبکه است. مقادیر شاخص پیوند آب-غذا-انرژی نیز به‌زای روش‌های مختلف بهره‌برداری تحت دو سناریوی نرمال و کم‌آبی براساس رابطه (۳) محاسبه و در شکل (۷) ارائه شده است.

این مطالعه نشان داد که WFENI محاسبه‌شده به‌زای دبی‌های ورودی مختلف دارای امتیازاتی از ۰/۰۱ تا ۰/۹۹ است. در وضعیت موجود (روش بهره‌برداری دستی) تحت سناریوی نرمال مقدار میانگین شاخص پیوند آب-غذا-انرژی برابر با ۰/۴۱ و در سناریوی کم‌آبی برابر با ۰/۰۷ برآورد شد. با ارتقای روش بهره‌برداری به دستی بهبودیافته نیز، مقدار میانگین شاخص پیوند آب-غذا-انرژی در سناریوی نرمال برابر با ۰/۴۶ و در سناریوی کم‌آبی برابر با ۰/۰۹ برآورد شد. هم‌چنین نتایج MPC نشان داد که این روش در سناریوی نرمال و کم‌آبی به‌ترتیب با مقدار میانگین ۰/۹۴ و ۰/۳۸ دارای بهترین عملکرد است. بنابراین، براساس مقادیر شاخص پیوند آب-غذا-انرژی به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که روش MPC دارای بهترین عملکرد در تحویل و توزیع آب کشاورزی در شبکه آبیاری رودشت است.

اما با بهبود سامانه توزیع آب با استفاده از روش MPC، در سناریوی نرمال مقادیر شاخص تحویل آب سطحی، شاخص مصرف انرژی، شاخص بهره‌وری آب سطحی، شاخص بهره‌وری انرژی، شاخص بهره‌وری غذا، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب سطحی، شاخص بهره‌وری اقتصادی انرژی و شاخص بهره‌وری اقتصادی غذا به‌ترتیب برابر با ۹۰۹/۸ مترمکعب بر هکتار، ۳۲/۴ کیلووات ساعت بر هکتار، ۳/۲ کیلوگرم بر مترمکعب، ۹۵/۶ کیلوگرم بر کیلووات ساعت، ۰/۶۶، ۵/۷ هزارتومان بر مترمکعب، ۱۶۹/۵ هزارتومان بر کیلووات و ۱۱۷۷/۲ هزار تومان بر تن و در سناریو کم‌آبی به‌ترتیب برابر با ۲۷۴/۹ مترمکعب بر هکتار، ۷۳/۵ کیلووات ساعت بر هکتار، ۲/۶ کیلوگرم بر مترمکعب، ۱۳/۲ کیلوگرم بر کیلووات ساعت، ۰/۲۱، ۴/۶ هزارتومان بر مترمکعب، ۲۳/۴ هزارتومان بر کیلووات و ۳۶۹/۴ هزار تومان بر تن به‌دست آمد که با توجه به نتایج هر سه روش می‌توان نتیجه گرفت که روش MPC از نظر هر یک از شاخص‌های تحویل آب سطحی، مصرف انرژی، بهره‌وری آب سطحی، بهره‌وری انرژی، بهره‌وری غذا، بهره‌وری اقتصادی آب سطحی، بهره‌وری اقتصادی انرژی و بهره‌وری اقتصادی غذا

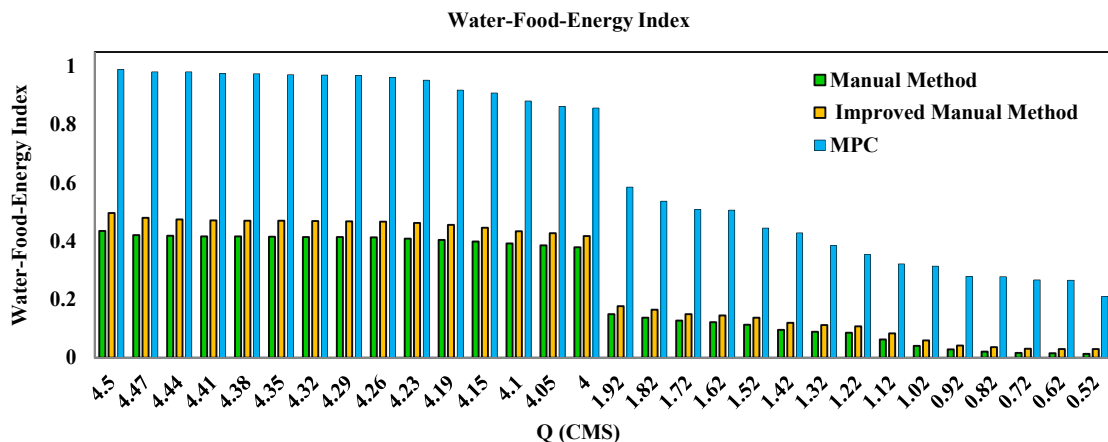


Figure 7. Values of Water-Food-Energy Index for the various operational methods

نتیجه‌گیری

رویکرد ارزیابی پیشنهادی در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی و اولویت‌بندی روش‌های بهره‌برداری در سامانه‌های تأمین و توزیع آب کشاورزی مبتنی بر پیوند آب-غذا-انرژی توسط سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و متولیان بهره‌برداری و نگهداری به‌منظور اعمال اصلاحات و ارتقای سطح کارایی سامانه‌های تأمین و توزیع آب مورد استفاده قرار گیرد. شایان ذکر است با توجه به پیامدهای ناشی از عدم دسترسی کافی و پایدار کشاورزان منطقه رودشت به آب سطحی و تمایل آن‌ها به جایگزینی استفاده از منابع آب زیرزمینی در آبیاری سطوح زیرکشت، نیاز به مدرنیزاسیون و ارتقای روش‌های بهره‌برداری موجود در شبکه بیش‌تر از پیش نمود پیدا کرده است. بدین منظور، در این پژوهش دو روش بهره‌برداری دستی بهبود یافته و روش بهره‌برداری کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) به‌عنوان روش‌های مدرنیزاسیون سامانه تأمین و توزیع آب کشاورزی با هدف ارتقای عملکرد سامانه پیشنهاد شد. رویکردهای پیشنهادی می‌توانند با کاهش تلفات، حفظ عملکرد واحدهای زراعی و دستیابی به اهداف اقتصادی بخش کشاورزی را به‌ویژه در دوره‌های کم آبی تضمین کنند. در این پژوهش از شاخص‌هایی با در نظر گرفتن حجم آب سطحی تحویلی و انرژی مصرفی، بهره‌وری و بهره‌وری اقتصادی آب سطحی، غذا و انرژی به جهت ارزیابی وضعیت موجود بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت و بررسی روش‌های بهره‌برداری به کار رفته جهت ارتقای عملکرد شبکه استفاده شد. تجزیه و تحلیل پیوند آب-غذا-انرژی شبکه آبیاری رودشت در طول دوره مورد مطالعه نشان داد که ارتقای روش بهره‌برداری به سیستم کنترل خودکار پیش‌بین در بهبود عملکرد سامانه تأمین و توزیع آب کشاورزی به جهت بهینه‌سازی مصارف و توزیع

یکنواخت و عادلانه منابع تأثیرگذار بوده است. به‌عبارت دیگر، روش MPC از نظر شاخص‌های پیوند آب-غذا-انرژی بهتر از وضع موجود (روش بهره‌برداری دستی) و روش دستی بهبود یافته در تحویل و توزیع آب کشاورزی در شبکه آبیاری رودشت عمل می‌کند. از این‌رو، با توجه به نتایج، قابل ذکر است مدرنیزاسیون سامانه‌های تأمین و توزیع آب کشاورزی با روش کنترل خودکار پیش‌بین در صورت تأمین منابع مالی موجب بهبود عملکرد در کاهش مصرف آب و انرژی در بخش کشاورزی و تضمین امنیت غذایی می‌شود و این در صورتی امکان‌پذیر است که در این مناطق قیمت آب سطحی توزیع شده برابر با ارزش اقتصادی آب باشد. از جمله مواردی که در تقویت رویکرد پیشنهادی در این پژوهش لازم است مورد توجه قرار گیرد بحث وزندهی به شاخص‌های مهم تشکیل دهند پیوند آب-غذا-انرژی، لحاظ عدم قطعیت در این پارامترها و همچنین بررسی این شاخص‌ها به‌صورت مکانی در واحدهای زراعی مختلف می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

1. Silo
2. Water-Food-Energy Nexus
3. Model Predictive Control

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Al-Saidi, M., & Elagib, N. A. (2017). Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Science of the Total Environment*, 574, 1131-1139.
2. Bozorgi, A., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2021). Development of Multi-Hazard Risk Assessment Model for Agricultural Water Supply and Distribution Systems Using Bayesian Network. *Water Resources Management*, 35(10), 3139-3159.

3. Daher, B. T., & Mohtar, R. H. (2015). Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International*, 40(5-6), 748-771.
4. 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.
5. Flammini, A., Puri, M., Pluschke, L., & Dubois, O. (2014). Walking the nexus talk: Assessing the water-energy-food nexus in the context of the sustainable energy for all initiative. Rome: FAO.
6. Ghorbani, E., Monem, M. J., & Vaez Tehrani, M. (2020). Development of Water, Energy and Food Nexus Model in Irrigation Networks Based on Water Adequacy and Stability Indicators (Qazvin Irrigation Network Case Study). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(80), 61-80. (In Persian)
7. Hashemy, S.M., & Van Overloop, P.J. (2013). Applying decentralized water level differencecontrol for operation of the Dez main canal under water shortage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (12), 1037-1044.
8. Hoff, H. (2011), Understanding the Nexus: Background paper for the Bonn 2011 Conference.
9. Ji, L., Zhang, B., Huang, G., & Lu, Y. (2020). Multi-stage stochastic fuzzy random programming for food-water-energy nexus management under uncertainties. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 1-13.
10. Kaghazchi, A., Shahdany, S.M.H., & Roozbahani, A. (2021). Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. *Agricultural Water Management*, 245, 106578.
11. Kamrani, K., Roozbahani, A., & Shahdany, S. M. H. (2019). Effect of Improvement in Surface Water Delivery and Distribution Processes on Reduction of Groundwater Overexploitation in Rudasht Irrigation Network. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sci.)*, 33(3), 446-461. (In Persian)
12. Kamrani, K., Roozbahani, A., & Shahdany, S. M. H. (2020). Using Bayesian networks to evaluate how agricultural water distribution systems handle the water-food-energy nexus. *Agricultural Water Management*, 239, 1-12.
13. Karnib, A. (2017). A quantitative assessment framework for water, energy and food nexus. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 6(1), 12-23.
14. Lawford, R., Bogardi, J., Marx, S., Jain, S., Wostl, C. P., Knüppe, K., ... & Meza, F. (2013). Basin perspectives on the water–energy–food security nexus. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 607-616.
15. Leck, H., Conway, D., Bradshaw, M., & Rees, J. (2015). Tracing the water–energy–food nexus: Description, theory and practice. *Geography Compass*, 9(8), 445-460.
16. Mirzaei, A., Saghafian, B., Mirchi, A., & Madani, K. (2019). The groundwater–energy–food nexus in Iran's agricultural sector: implications for water security. *Water*, 11(9), 1-15.
17. Molden, D., & Gates, T. (1990). Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116, 804-823.
18. Monem, M.J., & Delavar, M. Hosseini. (2020). Application and Evaluation of Water, Food and Energy (NEXUS) in Irrigation Networks Management: Case Study of Zayandehrud Irrigation Network. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(1), 275-285. (In Persian)
19. 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, 1-13.
20. Shahdany, S. H., Majd, E. A., Firoozfar, A., & Maestre, J. M. (2016). Improving operation of a main irrigation canal suffering from inflow fluctuation within a centralized model predictive control system: case study of Roodasht Canal, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(11), 05016007.
21. Shahdany, S.H., & Firoozfar, A.R. (2017). Providing a reliable water level control in maincanals under significant inflowfluctuations at drought periods within canal auto-mation. *Water resources management*, 31(11), 3343-3354.
22. Sharifi, H., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2020). Development of ANN, FIS and ANFIS Models to Evaluate the Adequacy Index in Agricultural Water Distribution Systems (Case study: Rudasht Irrigation Network). *ECOHIDROLOGY*, 7(3), 635-646. (In Persian).

23. Van Overloop, P. J. (2006). Model predictive control on open water systems (IOS Press).
24. WEF (World Economic Forum). (2011). Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus. Island Press, Washington.
25. Yaltaghian Khiabani, M., Hashemy Shahdany, S. M., Hassani, Y., & Maestre, J. M. (2021). Introducing an economic agricultural water distribution in a hyper-arid region: a case study in Iran. *Journal of Hydroinformatics*, 1-20.