University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: https://ije.ut.ac.ir

Online ISSN: 2423-6101

Simulation and Temporal- Spatial Assessment of Surface Water Distribution to Agricultural Units in Abshar Plain, Esfahan

Amir Hadi Safavi Nia[1] | Jaber Soltani[2*] | S. Mehdy Hashemy Shahdany[3] | Majid Delavar[4]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: safavinia@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: jsoltani@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aburaihan), University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modeares University, Iran, Email: m.delavar@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received October 03, 2023
Revised November 02, 2023
Accepted December 02, 2023
Published online 14 February 2024

Keywords:
Water Distribution Management,
Hydraulic Simulation,
Surface Water,
Water Delivery Efficiency,
Performance Assessment.

ABSTRACT

In this study, an assessment of the performance of the surface water distribution system in the Abshar Isfahan irrigation network was conducted. For this purpose, the two main right and left channels and ten secondary channels of this network were integrated into an integral- delay simulator model developed in MATLAB. The simulation of surface water distribution between the intakes located in the main and secondary channels for an irrigation season, corresponding to the water year 1400-1401 and divided into five dominant operational scenarios, was carried out. The evaluation of surface water distribution performance involves the use of performance assessment indices, specifically the adequacy of water distribution, for each intake, region, and the entire channel. Additionally, the simulated data was imported into GIS software to analyze the spatial distribution of surface water distribution across the entire network, and maps of the average adequacy index dispersion for each operational scenario were extracted and analyzed. The simulation results indicated a predominantly decreasing trend in water delivery adequacy indices from the upstream intakes to the downstream in both the main and secondary channels. The average surface water distribution adequacy index ranged from 98% to 100%, 90% to 100%, 97% to 84%, 96% to 81%, and 93% to 69% in the upstream intakes and from 80% to 85%, 65% to 70%, 41% to 45%, 30% to 34%, and 20% to 28% in the downstream intakes, in scenarios one through five, namely, from high water availability to severe water scarcity. The results obtained highlighted deficiencies in the existing irrigation system's water distribution adequacy, especially in scenarios of low water availability, along the main and secondary channels. Furthermore, the spatial classification maps revealed a distinct pattern of inefficiency in surface water distribution at the network level and identified vulnerable areas within the network.

Cite this article: Safavi Nia, A. H.; Soltani, J.; Hashemy Shahdany, S. M. & Delavar, M. (2024). Simulation and Temporal- Spatial Assessment of Surface Water Distribution to Agricultural Units in Abshar Plain, Esfahan. *ECO HYDROLOGY*. 10 (4), 511-528. Doi: doi.org/10.22059/ije.2024.368053.1771

© Amir Hadi Safavi Nia, Jaber Soltani, S. Mehdy Hashemy Shahdany, Majid Delavar
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ije.2024.368053.1771

انتشارات دانشگاه تهران

آب و هیدرولوژی

سایت نشریه: https://ije.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۶۱۰۱-۲۴۲۳

شبیه‌سازی فرایند و ارزیابی زمانی‌ـ مکانی توزیع آب سطحی به واحدهای کشاورزی در دشت آبشار اصفهان

امیر هادی صفوی‌نیا[۱] | جابر سلطانی[۲*] | سید مهدی هاشمی شاهدانی[۳] | مجید دلاور[۴]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: safavinia@ut.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: jsoltani@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران. رایانامه: m.delavar@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

کلیدواژه:
مدیریت توزیع آب،
شبیه‌سازی هیدرولیکی،
آب سطحی،
کفایت تحویل آب،
ارزیابی عملکرد.

چکیده

در این تحقیق ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، دو کانال اصلی راست و چپ و ده کانال درجهٔ ۲ این شبکه در قالب یک شبکهٔ کانال‌های آبیاری به‌هم‌پیوسته در مدل شبیه‌ساز انتگرالی‌ـ تأخیری در محیط MATLAB توسعه داده شد. شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی بین آبگیرهای واقع در کانال‌های اصلی و فرعی برای یک فصل آبیاری؛ منطبق بر اطلاعات سال آبی ۱۴۰۰ـ ۱۴۰۱ و به تفکیک پنج سناریوی غالب بهره‌برداری، صورت گرفت. فرایند ارزیابی عملکرد توزیع آب سطحی شامل به‌کارگیری شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع آب به تفکیک هر آبگیر، منطقه و کل کانال است. همچنین داده‌های شبیه‌سازی‌شده به منظور تحلیل مکانی توزیع آب سطحی در کل شبکه، وارد نرم‌افزار GIS شد و نقشه‌های پراکندگی میانگین شاخص کفایت برای هر سناریوی بهره‌برداری استخراج و تحلیل شد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر روند غالباً کاهشی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست در کانال‌های اصلی و فرعی بود، به نحوی که میانگین شاخص کفایت توزیع آب سطحی به‌ترتیب از سناریوی اول، پرآبی، تا سناریوی پنجم، کم‌آبی شدید، در دامنهٔ تغییرات ۹۸ـ ۱۰۰؛ ۹۰ـ ۱۰۰؛ ۸۴ـ ۹۷؛ ۸۱ـ ۹۶؛ ۶۹ـ ۹۳ درصد در آبگیرهای بالادست و ۸۰ـ ۸۵؛ ۶۵ـ ۷۰؛ ۴۱ـ ۴۵؛ ۳۰ـ ۳۴ و ۲۰ـ ۲۸ درصد در آبگیرهای پایین‌دست قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده ضعف سامانهٔ بهره‌برداری موجود را در توزیع کافی آب آبیاری در طول کانال‌های اصلی و فرعی به‌خصوص در سناریوهای بهره‌برداری کم‌آبی نشان داده است. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی به‌دست‌آمده الگوی مشخصی از ناکارآمدی توزیع کافی آب سطحی در سطح شبکه ارائه کرده و مناطق آسیب‌پذیر شبکه را مشخص کرده است.

استناد: صفوی‌نیا، امیر هادی؛ سلطانی، جابر؛ هاشمی شاهدانی، سید مهدی و دلاور، مجید (۱۴۰۲). شبیه‌سازی فرایند و ارزیابی زمانی‌ـ مکانی توزیع آب سطحی به واحدهای کشاورزی در دشت آبشار اصفهان. *آب و هیدرولوژی*، ۱۰ (۴) ۵۱۱-۵۲۸.

DOI: http//doi.org/10.22059/ije.2024.368053.1771

© امیر هادی صفوی‌نیا، جابر سلطانی، سید مهدی هاشمی شاهدانی، مجید دلاور. **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ije.2024.368053.1771

مقدمه

سامانهٔ کانال‌های اصلی و فرعی آبیاری و سازه‌های هیدورلیکی وابسته آن، زیرساخت اصلی انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی در شبکه‌های آبیاری ایران هستند. مطالعات متعدد صورت‌گرفته و نیز بررسی‌های میدانی مختلف بیانگر کارایی پایین‌تر از انتظار وضعیت بهره‌برداری این سامانه‌های یادشده در توزیع کافی، عادلانه و قابل اعتماد آب سطحی میان کشاورزان/تعاونی‌های آب‌بران بالادست و پایین‌دست شبکه‌های آبیاری بوده است [۱]. با تشدید دوره‌های کم‌آبی در سه دههٔ اخیر و فشار مضاعف بر منابع آب سطحی، کارکرد سامانه/روش‌های بهره‌برداری موجود، از وضعیت دور از انتظار به حالت نامطلوب و غیر قابل اعتماد تغییر می‌یابد و الگوهای مشخصی از عدم اطمینان کشاورزان به این سامانه‌ها به‌وضوح در اکثر شبکه‌های آبیاری کشور دیده می‌شود. رد پایی از شواهد مؤید این ادعای مطرح‌شده در مقالات علمی منتشرشده چشم می‌خورد، ولی در عین حال به این شکل ارائه نشده است. به‌زعم نویسندگان این مقاله رخداد پدیده‌های دیگری از جمله افزایش قابل توجه تعداد چاه‌های بهره‌برداری مجوزدار در دو دههٔ اخیر (و بی‌شک چاه‌های غیرمجوزدار که آمار دقیق و قابل استنادی از آن در دست نیست) در محدودهٔ جغرافیایی شبکه‌های آبیاری کشور می‌تواند دلیلی بر اثبات این ادعا باشد. در همین ارتباط شایان یادآوری است که آمار افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری مجوزدار که در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری کشور قرار گرفته‌اند، از تطبیق محدودهٔ جغرافیایی شبکه‌های آبیاری با محل قرارگیری چاه‌های بهره‌برداری (اطلاعات آماربرداری آب زیرزمینی سال‌های گذشته که از سامانهٔ داده‌های آبی شرکت مدیریت منابع آب ایران قابل حصول است) استنتاج شده است. لازم به توضیح است‌که عوامل کلی از جمله توسعهٔ ناپایدار اراضی کشاورزی در فقدان حکمرانی آب سبب مدیریت ناکارآمد آب کشاورزی، در مقیاس کلی و کلان، شده است، ولی در مقیاس سامانهٔ توزیع آب در شبکه‌های آبیاری (به عنوان یک واحد کوچک مقیاس مدیریتی در مقایسه با حوضهٔ آبریز) شواهد مختلفی دیده می‌شود که براساس آن می‌توان عدم کارایی مدیریت توزیع آب سطحی توسط آن‌ها را استنباط کرد. اینکه تا چه حد پیش‌فرض‌های مختلف به نتیجه‌ای منطقی حاصل شود نیازمند انجام یک تحقیق علمی مستقل است.

در این ارتباط لازم به توضیح است که عملکرد بهره‌برداری سامانه‌های یادشده در شبکه‌های آبیاری ایران، در شرایط نرمال (یعنی شرایطی که میزان آب تأمین‌شدهٔ روزانه در محل بند انحرافی متناسب با مجموع کل تقاضای برآوردشده در محدودهٔ شبکه باشد) از نظر کفایت، عدالت، پایداری و راندمان توزیع آب عموماً در مجاورت محدودهٔ قابل قبول جهانی قرار می‌گیرد، اما معضل اساسی و مشکل جدی در شرایط غیرمتعارف بهره‌برداری شبکه‌ها به وجود می‌آید و اصلی‌ترین عوامل ایجاد شرایط یادشده، ظهور دوره‌های کم‌آبی منتج از تغییرات اقلیمی است که سامانه‌های تأمین آب سطحی را بسیار آسیب‌پذیر کرده و ریسک شکست سامانهٔ بهره‌برداری را تحت تأثیر خطرات مختلف به طرز قابل توجهی افزیش داده است [۲ و ۳]. لازم به توضیح است که بدون تردید عوامل مؤثری از قبیل توسعه و تغییر کاربری اراضی و تغییر الگوی کشت به سمت کاشت گیاهان آب‌بر نقش انکارناپذیری در معضلات کنونی مدیریت آب کشاورزی داشته و دارد. با این‌وجود اگر مرزهای بررسی را محدود به سامانهٔ توزیع و تحویل آب در یک شبکه آبیاری شود، دامنهٔ عوامل تأثیرگذار به ۱) سامانهٔ تأمین (آب سطحی تأمین‌شده در محل بند انحرافی) و ۲) سامانهٔ انتقال، توزیع و تحویل (مجاری روباز یا مجاری کم‌فشار و سازه‌های هیدرولیکی انتقال، تنظیم سطح آب و آبگیر) محدود خواهد شد.

بنابراین، پیش‌فرض بیان مسئله در تحقیق حاضر آن است که روش بهره‌برداری متداول سامانه‌های توزیع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری کشور، در شرایط کم‌آبی امکان توزیع قابل اعتماد بین آبگیرهای واقع در کانال‌های آبیاری ندارد. در این شرایط احیای فرایند تحویل حجمی آب سطحی در شبکه‌های آبیاری کشور نیازمند بازنگری کلی شیوهٔ بهره‌برداری متداول این زیرساخت هیدرولیکی توزیع آب کشاورزی (شبکهٔ کانال‌های اصلی و فرعی و سازه‌های هیدرولیکی وابستهٔ آن) بین واحدهای زراعی در قالب پروژه‌های نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی است. برای درک صحیح از لزوم این نوسازی، نحوهٔ بهره‌برداری متداول این سامانه‌ها در ایران و ضعف‌های و محدودیت‌های آن در شرایط غیرمتعارف بهره‌برداری و مخصوصاً شرایط کم‌آبی، به‌اختصار در ادامه ارائه می‌شود. شیوهٔ بهره‌برداری کانال‌های اصلی و فرعی آبیاری و سازه‌های هیدرولیکی وابسته در شبکه‌های آبیاری ایران به دو شیوهٔ بهره‌برداری دستی و بهره‌برداری با استفاده از سازه‌های تنظیم سطح آب ثابت/خودکار هیدرولیکی است. در شیوهٔ اول، وظیفهٔ تنظیمات روزانهٔ سازه‌های هیدرولیکی تنظیم سطح آب و سازه‌های آبگیر (سازه‌های تحویل حجمی آب به

واحدهای زراعی) به عهدهٔ اکیپ‌های بهره‌برداری است که بر اساس یک دستورالعمل مشخص روزانه این امر صورت می‌گیرد. در شیوهٔ دوم، تنظیمات سطح آب در مجاورت آبگیرها توسط سازه‌های کنترل سطح آب ثابت (سریزهای نوک اردکی)/خودکار هیدرولیکی (سازهٔ آمیل در ایران) و فرایند تحویل آب به واحدهای زراعی توسط سازه‌های آبگیر صورت می‌گیرد که تنظیم روزانهٔ آن را اکیپ بهره‌برداری انجام می‌دهند [۴].

تجربیات مختلف ارائه‌شده از عملکرد شیوهٔ بهره‌برداری دستی/به‌کارگیری سازه‌های خودکار هیدرولیکی [۵] بیانگر عملکرد نامطمئن و غیرقابل قبول در توزیع آب کشاورزی بین مصرف‌کنندگان در شرایط کم‌آبی و سناریوهای نامتعارف تأمین آن است. در این ارتباط لازم به توضیح است که توزیع آب کشاورزی، تأمین‌شده از منبع آب سطحی، به صورت نظام‌مند و از طریق سامانهٔ مجاری روباز انتقال آب (شبکهٔ کانال‌های به‌هم‌پیوستهٔ آبیاری) صورت می‌گیرد، لذا تعیین محدودهٔ کارایی عملکرد این شبکه‌ها، اولین گام برای مدیریت صحیح منابع آب و به تبع آن اولین اقدام در پیاده‌سازی طرح‌های نوسازی و بهسازی است [۶]. لذا در ادامهٔ این بخش سعی شد که سابقهٔ تحقیق کاملی از میزان تلفات آب در فرایند توزیع و تحویل آب کشاورزی، که عموماً به دلیل به‌کارگیری سامانه‌های بهره‌برداری سنتی است، ارائه شود. نتایج مطالعات مشابه صورت‌گرفته در زمینهٔ موضوع این تحقیق، با هدف شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد فرایند توزیع آب سطحی در دشت‌های کشاورزی، بیانگر میزان قابل توجه تلفات آب در فرایند انتقال، توزیع و تحویل در سامانه‌های سنتی بهره‌برداری شبکهٔ کانال‌های آبیاری است، به نحوی که این میزان تلفات در Lower Rio Grande Valley در ایالت تگزاس آمریکا را بر اساس اندازه‌گیری میدانی در کلان‌تحویل‌ها و مقایسهٔ آن با مقدار نیاز واقعی محصولات تحت کشت آن شبکه، حدود ۳۰ درصد میزان آب تأمین‌شده در محل بند انحرافی [۷]، در دشت Kifil ـ Hilla در بخش جنوبی کشور عراق حدود ۱۹ـ ۳۷ درصد و بر اساس اندازه‌گیری میدانی در دوره‌های متناوب بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری واقع در این دشت محاسبه کردند [۸]، در دشت Shoa ـ Wonji در کشور اتیوپی حدود ۱۲ـ ۷۲ درصد در سناریوهای کم‌آبی تا پرآبی [۹]، در دشت Panchnadi کشور هندوستان حدود ۲۵ـ ۳۶ درصد [۱۰]، در دشت‌های مرکزی کشور ترکیه حدود ۲۸ـ ۴۵ درصد آب سطحی تأمین شده [۱۱]، در دشت کشاورزی رودشت واقع در منطقهٔ خشک و نیمه‌خشک ایران حدود ۵۰ درصد و با استفاده از شبیه‌سازی جریان در کانال‌های اصلی و فرعی با استفاده از مدل توسعه‌داده‌شده در نرم‌افزار ICSS و تطابق نتایج شبیه‌سازی با مقادیر ثبت‌شده توسط میراب شبکه [۱۱]، در دشت‌های مرکزی کشور اسپانیا حدود ۴۵درصد بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی [۱۲] و در دشت شیراز در ایران (شبکهٔ آبیاری درودزن) براساس محاسبهٔ بازده تولید حدود ۱۹ درصد [۱۳]، گزارش داده‌اند.

به‌کارگیری وسیع مدل‌های هیدرودینامیکی که امکان شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های آبیاری را دارند، به عنوان ابزار اصلی محققان برای ارزیابی عملکرد بهره‌برداری وضع موجود و همچنین، بررسی گزینه‌های ارتقای شیوهٔ بهره‌برداری دیده می‌شود. کاغذچی و همکاران (۲۰۲۱) با هدف ارائهٔ یک سامانهٔ هوشمند شبیه‌سازی هیدرولیکی و ارزیابی عملکرد سامانه‌های توزیع و تحویل آب کشاورزی که قابلیت جایگزینی با مدل‌های تجاری مانند HEC ـ RAS و SOBEK را داشته باشد، اقدام به توسعهٔ یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian کرده‌اند [۱۴]. قومان و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی ابتدا روش بهره‌برداری موجود در کانال Swat، واقع در پاکستان را که دارای سامانهٔ کنترل بالادست است، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این ارزیابی نشان داد روش بهره‌برداری موجود مطلوب نبوده، سپس با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CANALMAN،کانال مورد نظر شبیه‌سازی شد و راهکار بستن کانال‌های درجهٔ ۲ در شب برای جلوگیری از هدررفت آب پیشنهاد شد و مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۵]. دجن (۲۰۱۵) با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی به واسطهٔ بهره‌برداری مؤثر، جریان را در کانال اصلی شبکهٔ آبیاری Mahatra در کشور اتیوپی با استفاده از مدل DUFLOW شبیه‌سازی کرد و با به‌کارگیری شاخص‌های کفایت، راندمان، عدالت و پایداری، روش‌های بهبود عملکرد را مورد ارزیابی قرار داد [۱۶]. سولر و همکاران (۲۰۱۸) مدل HEC ـ RAS را برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در کانالی واقع در اسپانیا انتخاب کردند و برای کاهش اختلالات به‌وجودآمده در دو جهت پایین‌دست و بالادست بر اثر تغییرات دبی پمپاژ ورودی، از روش کنترل خودکار، استفاده کردند [۱۷]. شاهوردی و مائستره (۲۰۲۳) مطالعه‌ای با هدف معرفی یک چارچوب جامع برای مدرن‌سازی کانال با توسعهٔ

مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی RAS ـHEC به منظور شبیه‌سازی جریان در کانال آبیاری و ادغام روش یادگیری ماشین Fuzzy Sarsa با هدف بهینه‌سازی شاخص‌های ارزیابی عملکرد کارایی، کفایت و عدالت انجام دادند [۱۸]. همچنین تحقیقات متنوعی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌های مختلف هیدرولیکی واقع در کانال آبیاری در محیط آزمایشگاه صورت گرفته است که به عنوان نمونه به مطالعهٔ مرعشی و همکاران (۲۰۲۳) اشاره می‌شود که در آن کاربرد شبکهٔ عصبی ENN و دو مدل هیبرید ENN ـGA و SVM ـSA را در محاسبهٔ دبی عبوری از دریچهٔ دوار (به منظور کنترل جریان در کانال‌های آبیاری نیم‌دایره‌ای) در شرایط جریان آزاد و مستغرق و همچنین تشخیص شرایط آستانهٔ استغراق (حد مدولار) را استفاده کرده‌اند [۱۹].

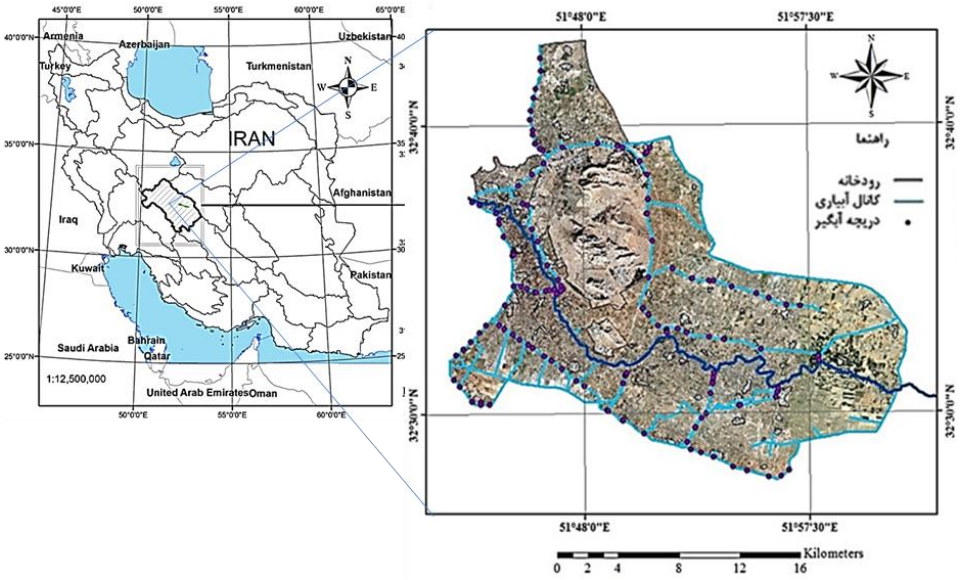
با توجه به موارد یادشده، اولین گام در پیاده‌سازی پروژه‌های نوسازی و بهسازی سامانه‌های بهره‌برداری در بخش کشاورزی ارزیابی عملکرد سامانهٔ موجود بهره‌برداری و تعیین نقاط آسیب‌پذیر در سطح شبکه است. این مهم با اهدافی از قبیل بهبود برنامه‌ریزی توزیع آب سطحی در شبکهٔ کانال‌های به‌هم‌پیوسته، کاهش تلفات ناشی از مدیریت ناصحیح توزیع آب کشاورزی، افزایش رضایت کشاورزان از تأمین به‌موقع، کافی و عادلانهٔ آب صورت می‌گیرد. به این‌منظور در این تحقیق نحوهٔ کارکرد سامانهٔ اصلی و فرعی بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان، به عنوان یکی از شبکه‌های آبیاری اصلی و پرچالش حوضهٔ زاینده‌رود، از نظر کفایت توزیع آب سطحی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. ارزیابی به دو صورت شاخص‌محور، با به‌کارگیری شاخص کفایت توزیع آب و تحلیل مکانی متوسط شاخص یادشده در سطح شبکه انجام شد. بر این اساس، نوآوری این تحقیق منطقه‌محور بوده و عبارت از ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری آبشار در سه سطح نقطه‌ای (در محل هر سازهٔ آبگیر درجهٔ ۲)، منطقه‌ای (در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال‌های اصلی) و کلی به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری پرآبی، نرمال و کم‌آبی است. همچنین سؤال تحقیق این‌طور عنوان می‌شود که سامانهٔ بهره‌برداری کنونی آب سطحی تا چه میزان هدف اولیه در زمان احداث این شبکهٔ آبیاری، که عبارت از توزیع کافی و مناسب آب سطحی بین محدوده‌های زراعی است، را محقق کرده است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، هدف اصلی این تحقیق ارائهٔ یک روش کاربردی برای تعیین سهم منبع آب سطحی در تأمین تقاضای حقابهٔ مشخص آبگیرهای واقع در کانال‌های اصلی و فرعی شبکهٔ آبیاری آبشار است.

مواد و روش‌ها

شبکهٔ آبیاری و زهکشی آبشار

در حوضهٔ آبریز رودخانهٔ زاینده‌رود و در پایاب سد زاینده‌رود، شش شبکهٔ آبیاری موجود است که شبکهٔ آبیاری آبشار (شکل ۱) به سبب مجاورت با شهر اصفهان چالشی‌ترین دشت کشاورزی است که از رودخانهٔ زاینده‌رود آبگیری می‌کند. مساحت در حال بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری آبشار حدود ۲۱ هزار هکتار است. موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۸ دقیقهٔ شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۷ دقیقهٔ شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است [۲۰] که این میزان بسیار کمتر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، حدود ۲۴۰ میلی‌متر است. این در حالی است که میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین‌کنندهٔ آب این شبکهٔ آبیاری، آب رهاشده از سد انحرافی آبشار است. در طرفین سد انحرافی آبشار، در منشأ تأمین آب این شبکهٔ آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب با هدف تحت پوشش قرار دادن اراضی به وسعت ۳۲ هزار هکتار، که بنا بر اطلاعات اخذشده توسط محققان این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در حال حاضر حدود ۲۱ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است. شبکهٔ آبیاری آبشار دارای دو رشته کانال اصلی درجهٔ ۱ به طول حدود ۶۹ کیلومتر و با ظرفیت حدود ۱۶ متر مکعب در ثانیه و ۱۰ رشته کانال فرعی درجهٔ ۲ به طول حدود ۶۱ کیلومتر با ظرفیت حدود ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ لیتر در ثانیه و نیز حدود ۱۸۰ کیلومتر زهکش سطحی روباز است. دریچه‌های برداشت آب از نوع نیرپیک تیپ XX2، L2 و C2 هستند. سازه‌های تنظیم سطح آب دینامیک از تیپ آمیل هستند. کنترل و تنظیم سطح آب به دو شیوهٔ کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۳۲ سازهٔ خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازهٔ بتنی ثابت Bill ـDuck صورت می‌گیرد. بر اساس تحلیل اولیهٔ اطلاعات میدانی جمع‌آوری‌شده

از شبکهٔ آبیاری آبشار، طی انجام این تحقیق، عملکرد ضعیف بهره‌برداری این شبکه به هدررفت حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان ورودی در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی منجر می‌شود. مقادیر یادشده بر اساس مقایسهٔ دبی تحویل‌داده‌شده در محل بند انحرافی به کانال‌های اصلی شبکه با مجموع مقادیر اندازه‌گیری ثبت‌شدهٔ دبی تحویل‌داده‌شده آبگیرهای اصلی و فرعی به دست آمد.



شکل ۱. محدودهٔ مورد مطالعهٔ این پژوهش شامل پراکندگی شبکهٔ مجاری روباز به‌هم‌پیوسته انتقال آب سطحی و دریچه‌های آبگیر توزیع آب

شبیه‌سازی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری

به منظور ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری موجود که برنامه‌ریزی توزیع آب سطحی در شبکهٔ آبشار را محقق می‌سازد، لازم است که شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در مجاری اصلی و فرعی انتقال آب سطحی انجام گیرد. به این‌منظور در پژوهش پیش رو از مدل ریاضی انتگرالی‌ـ تأخیری[1] (ID) در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبگیر (برنامه‌ریزی روزانهٔ تحویل و توزیع آب) امکان‌پذیر شود. در این نرم‌افزار روند انجام محاسبات بر پایهٔ روش روندیابی جریان در هر بازهٔ سامانهٔ انتقال، در حد فاصل دو سازهٔ تنظیم سطح آب، است و به‌کارگیری مدل ID برای شبیه‌سازی جریان در مجاری اصلی توزیع آب سطحی، با هدف ارزیابی عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری موجود یا مدرن‌سازی سامانه‌های یادشده، به سبب راحتی محاسبات و تأمین دقت مورد نیاز، مورد استقبال قرار گرفته است [۲۱].

در مدل یادشده، هر بازهٔ کانال اصلی سامانهٔ توزیع آب به دو بخش، شامل iـ بخش جریان یکنواخت و iiـ بخش منحنی برگشت آب است. هر بخش یک مشخصهٔ اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل انتگرالی‌ـ تأخیری به دست می‌آید. این دو مشخصهٔ اصلی در هر بازه کانال عبارت‌اند از: زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره (A_s). در بخش اول (جریان یکنواخت) فرض می‌شود که موج جریان ورودی جریان فقط به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. هر تغییری در سازهٔ تنظیم‌کنندهٔ سطح آب بالادست به تولید یک موج منجر می‌شود، این بخش از کانال فقط به عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان یادآوری است که سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است [۲۲]. زمان تأخیر ناشی از حرکت موج یادشده به بخش منحنی برگشت آب می‌رسد و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. زمان تأخیر تنها پارامتری است که در بخش جریان یکنواخت، برای تشریح جریان، در نظر گرفته می‌شود. معادلهٔ حاکم بر این بخش به صورت رابطهٔ ۱ ارائه می‌شود [۲۳]:

1- Integrator-Delay (ID) Model

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t-\tau) \quad (۱)$$

که در آن q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) است. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) براساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به صورت رابطهٔ ۲ در حوزهٔ زمان و حوزهٔ فرکانس، قابل بیان است [۲۳]:

$$A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t)$$
$$A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot \left[q_{canal}(s) - q_{out}(s)\right] \quad (۲)$$

که در آن A_s مساحت سطح ذخیره (m^2)، h عمق آب و (m)، q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (m^3/s) است. برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب است، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه‌شده در بخش‌های قبلی به دست می‌آید.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهره‌برداری کانال‌های مورد مطالعه این پژوهش که با استفاده از مدل ریاضی ساده‌شدهٔ ID توسعه داده شد، براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در محل (در دورهٔ زمان بهره‌برداری سال‌های ۱۳۹۰_ ۱۴۰۰) انجام گرفت. لازم به شفاف‌سازی است که منظور از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل یادشده در این شبکهٔ آبیاری، دبی تحویل‌داده‌شده به هر آبگیر است. اندازه‌گیری توسط اکیپ بهره‌برداری شبکه و توسط مولینه در کانال پایین‌دست آبگیر انجام شده است. این روش تنها روش قابل استفاده توسط بهره‌برداران است که در سه دوره در سال بهره‌برداری سال‌های ۱۳۹۰_ ۱۴۰۰ انجام شده است. محققان این پژوهش، این اطلاعات یادشده را دفتر بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری کردند و هیچ امکان دیگری برای تأمین یا صحت‌سنجی همین اطلاعات وجود نداشت.

لازم به توضیح است که به دلیل کمبود آب، در برخی از سال‌های اخیر، دورهٔ توزیع آب سطحی در محدودهٔ شبکه از یک فصل کامل آبیاری (آنچه در شرایط نرمال بهره‌برداری اتفاق می‌افتد که جریان بدون وقفه در کانال‌های درجهٔ ۱ و ۲ در تمام زمان فصل آبیاری جریان دارد) به چند هفته محدود شده است. بر این اساس، در سال‌های کم‌آبی آبگیری شبکه محدود به چند مرتبه در هر سال آبی می‌شود که آب از سد مخزنی زاینده‌رود رها می‌شود و رودخانهٔ زاینده‌رود این آب را به شبکه‌های پایین‌دست منتقل می‌کند. بنابراین، با توجه به اینکه هدف این تحقیق، شبیه‌سازی توزیع جریان در یک فصل کامل آبیاری و سپس ارزیابی نحوهٔ توزیع صورت گرفته بوده است، لذا سعی شد بازهٔ زمانی کاملی برای شبیه‌سازی توزیع آب در کانال‌ها بر اساس آمار ده‌سالهٔ اخیر (۱۳۹۰_ ۱۴۰۰) جمع‌آوری‌شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان انتخاب شود. بازهٔ زمانی یادشده که حاوی الگوهای مختلف آب ورودی به کانال‌های اصلی است (سناریوهای مختلف بهره‌برداری)، به عنوان شرط اولیهٔ مدل هیدرولیکی انتخاب شد.

واسنجی مدل بر پایهٔ میزان تطبیق داده‌های دبی تحویلی به کلیهٔ آبگیرهای واقع در کانال اصلی سامانهٔ توزیع آب، به عنوان ضریب واسنجی، انجام گرفت. ضریب واسنجی مدل توسعه‌داده‌شده، زمان تأخیر حرکت جریان در هر بازهٔ کانال آبیاری انتخاب شد. برای مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی، از شاخص‌های ارزیابی ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE)، روابط ۳_ ۵ استفاده شد.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - Y_i\right)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$\mathrm{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i - \sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i} \quad (۴)$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Y_i - X_i\right| \quad (۵)$$

که در این روابط Y_i و X_i به‌ترتیب برابر مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده هستند.

تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۳۸ آبگیر – کانال اصلی شاخهٔ جنوبی (چپ) – و ۲۰ آبگیر – کانال اصلی شاخهٔ شمالی (راست) و در کانال‌های فرعی ده‌گانه توسط ۷۷ آبگیر انجام می‌گیرد که به صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. سامانهٔ توزیع آب سطحی شبکهٔ آبیاری آبشار شامل ۵۸ منطقهٔ زراعی مستقل است توزیع آب سطحی توسط ۵۸ آبگیر اصلی صورت می‌گیرد. با توجه به شرایط سازه‌ای کانال اصلی سامانهٔ توزیع آب محدودهٔ مورد مطالعه، فرم مدل ماتریسی فضای حالت، مطابق رابطهٔ ۳، با ابعاد مختلف ماتریس، به تفکیک کانال‌های آبیاری – دو کانال اصلی و ۱۰ کانال فرعی ـ به دست آمد. با تبدیل روابط به‌دست‌آمده برای تمامی بازه‌ها، به جهت بزرگ بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای بازه اول در رابطهٔ ۶ آورده شده است:

$$\begin{bmatrix} Q_{hg}(k+1) \\ Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ e_1(k+1) \\ e_1^*(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ Q_{hg}(k-3) \\ e_1(k) \\ e_1^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla Q_{hg}(k) \\ u^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} \\ -\frac{T_c}{A_s} \end{bmatrix} \cdot \left[Q_{off-take1}(k) \right] \qquad (۶)$$

$$u^*(k) \geq href_{min}$$
$$u^*(k) \leq href_{max}$$

که در این رابطه $Q_{hg}(k)$، $Q_{hg}(k-1)$، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به‌ترتیب دبی‌های کنترلی (m^3/s) رهاشده از سازهٔ تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی kـ 3 تا k (sec) است. زمان تأخیر بین ورود آب از سراب تا تغییر ایجادشده رقوم سطح آب در انتهای پایین‌دست اولین بازهٔ کانال مورد مطالعه برابر ۳ گام زمانی است. $e_1(k)$ خطای محاسبه‌شده (رقوم سطح آب اندازه‌گیری‌شده از رقوم هدف) برای بازهٔ اول کانال (m) و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه‌شده به سامانه است که دربرگیرندهٔ محدودیت نرم ناشی از تجاوز رقوم سطح آب از رقوم حداکثر و حداقل در بازه اول (m) است. $u^*(k)$ مقداری است که از میزان خطای ناشی از انحراف سطح آب از سطح هدف کم می‌شود تا مقدار $e_1^*(k)$ را به وجود آورد. درواقع متغیر $u^*(k)$ تفسیر فیزیکی ندارد و فقط یک متغیر فرضی برای اعمال جریمه بیشتر بر تابع هدف در زمانی که سطح آب از محدودهٔ مجاز بین حداکثر و حداقل رقوم سطح آب تجاوز می‌کند، است.

ارزیابی زمانی- مکانی فرایند تحویل و توزیع آب سطحی

ارزیابی تحویل و توزیع آب به صورت نقطه‌ای (به تفکیک هر سازهٔ آبگیر)، منطقه‌ای (در سه ناحیهٔ بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) و کلی (منظور کل آبگیرهای واقع در کانال اصلی) با بهره‌گیری از شاخص ارزیابی عملکرد کفایت تحویل و توزیع آب سطحی انجام شد. به این‌صورت که در ارزیابی نقطه‌ای (ارزیابی زمانی) میانگین روزانهٔ شاخص کفایت به ازای هر آبگیر مورد محاسبه قرار گرفت. برای بررسی منطقه‌ای تحویل و توزیع آب در کانال، تغییرات زمانی میانگین شاخص کفایت در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست منطقهٔ مورد مطالعه بررسی و تحلیل شد. به جهت ارائهٔ دیدگاه جامع برای مدیر شبکه، میانگین شاخص کفایت با استفاده از روش یادشده در کل کانال نیز محاسبه شد. خروجی نتایج ارزیابی وارد GIS شد تا مقدمات تحلیل مکانی کفایت توزیع آب در سطح شبکهٔ مورد مطالعه و به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری مختلف – که در بخش نتایج به‌تفصیل توضیح داده شده است – فراهم شود. شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع اب سطحی به صورت رابطهٔ ۷ تعریف می‌شود [۲۴]:

$$PA = \frac{1}{T}\sum_T \left[\frac{1}{R}\sum_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \right] \qquad (۷)$$

که در آن PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (sec)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر (m^3/s) و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) است. هرچه مقدار شاخص کفایت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر شود، مقدار مطلوب آن رخ داده است. با این‌حال، براساس طبقه‌بندی طبقه‌بندی ارائه‌شده در [۲۳]، از دیدگاه مدیریتی شاخص یادشده به سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب ($PA \in (90-100)$)، قابل قبول ($PA \in (80-90)$) و ضعیف ($PA \leq 80$) سامانهٔ توزیع آب است، قابل تقسیم‌بندی است.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز توزیع آب سطحی

به منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل ریاضی بهره‌برداری سامانهٔ انتقال و توزیع شبکهٔ آبشار با استفاده از شبیه‌ساز هیدرولیک جریان توسعه‌داده‌شده در این تحقیق، شاخص‌های آماری ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) [۲۵] و میانگین خطای مطلق (MAE) [۲۶] محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی بر اساس شبیه‌سازی دورهٔ بهره‌برداری ۵۰ روزه‌ای صورت گرفت که داده‌های بهره‌برداری، شامل دبی ورودی به کانال اصلی و دبی تحویلی به آبگیرها در طول کانال اصلی، در سطح کانال مورد مطالعه اندازه‌گیری شده بود. بر این اساس، ۲۵ روز از این ۵۰ روز برای کالیبراسیون و ۲۵ روز برای صحت‌سنجی استفاده شد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، کالیبراسیون مدل به صورت آزمون و خطای دبی تحویلی به هر سازهٔ آبگیر واقع در کانال اصلی آبشار انجام شد و نتایج این ارزیابی به شرح جدول ۱ است. بر این اساس، میزان میانگین خطای مطلق (MAE)، برای دورهٔ کالیبراسیون برابر ۰/۰۰۴ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۰/۰۰۷ مترمکعب بر ثانیه است. مقدار بهینهٔ این شاخص برابر صفر است، با توجه به اینکه مقادیر یادشده به مقدار بهینه نزدیک هستند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌کند. شاخص ضریب خطای پسماند (CRM)، برای دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی، به‌ترتیب برابر ۰/۰۴- و ۰/۰۶- هستند، با توجه به اینکه بهترین میزان برای CRM صفر است، مقادیر کم این شاخص بیانگر دقت قابل قبول مدل در مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی است. درنهایت، میزان ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای دورهٔ کالیبراسیون برابر ۰/۰۰۷ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۰/۰۰۹ متر مکعب بر ثانیه به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای آماری برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل ID

پارامتر آماری	کالیبراسیون	صحت‌سنجی
MAE(m^3/s)	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷
RMSE(m^3/s)	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹
CRM	-۰/۰۴	-۰/۰۶

شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی در سطح دشت آبشار

به منظور بررسی وضع موجود بهره‌برداری سامانهٔ انتقال و توزیع آبیاری در این تحقیق، شبیه‌سازی بهره‌برداری وضع موجود به تفکیک هر یک از کانال‌های اصلی (شاخهٔ شمالی (راست) و شاخهٔ جنوبی (چپ)) و فرعی توسط مدل کالیبره‌شده، انجام گرفت و نتایج استخراج شدند. سپس ارزیابی تحویل و توزیع آب به صورت نقطه‌ای (به تفکیک هر سازهٔ آبگیر)، منطقه‌ای (در سه ناحیهٔ بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) وکلی (منظور کل آبگیرهای واقع در امتداد هر کانال) با بهره‌گیری از شاخص کفایت تحویل و توزیع آب و به ازای سناریوهای مختلف انجام شد. به این‌صورت که در ارزیابی نقطه‌ای، شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع و تحویل آب برای آبگیرهای واقع در طول کانال اصلی محاسبه شد. همچنین به منظور بررسی منطقه‌ای تحویل و توزیع آب در هر کانال، شاخص مورد نظر در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست برآورد شد. شایان یادآوری است که در ارزیابی شاخص کفایت با استفاده از این روش، تعداد آبگیرها در هر بازه (بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) حتی‌الامکان یکسان انتخاب شده و ارزیابی

کفایت تحویل و توزیع آب در امتداد هر بازه بر اساس متوسط شاخص‌های کفایت توزیع و تحویل آب برای آبگیرهای واقع در امتداد آن بازه محاسبه می‌شود. از طرف دیگر، به دلیل ارائهٔ دیدگاه جامع برای مدیر شبکه، شاخص کفایت با استفاده از روش یادشده در کل کانال نیز محاسبه شدند و تحویل و توزیع آب با توجه به سناریوهای مختلف بررسی شده است.

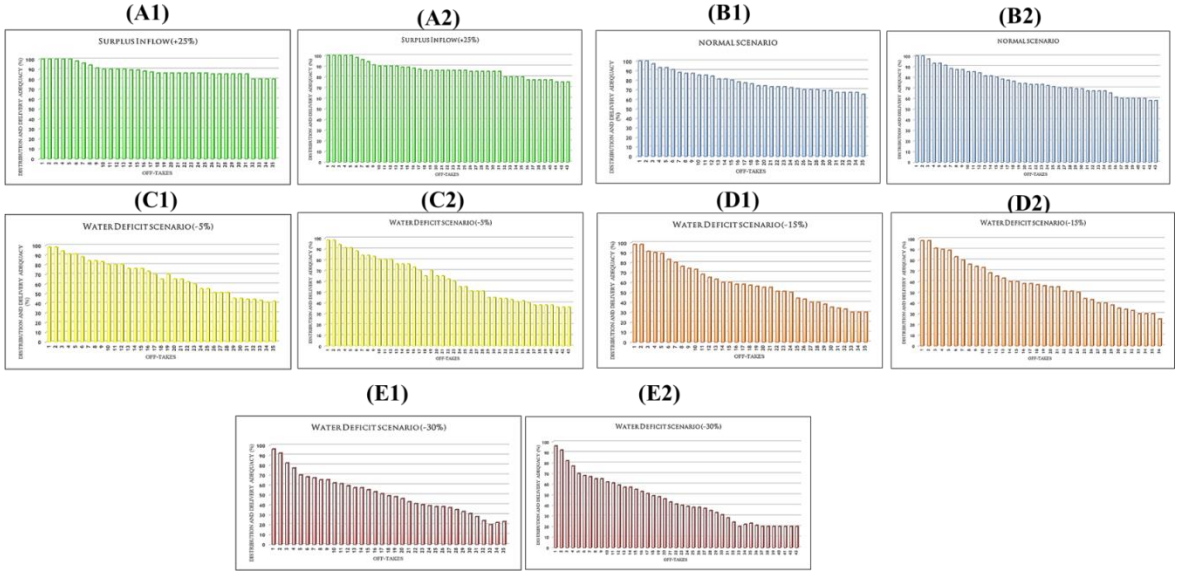
منظور از سناریوهای بهره‌برداری در این تحقیق، طیف مشخصی از دبی‌های ورودی در محل بند انحرافی به شبکهٔ آبیاری است که به عنوان شرط مرزی بالادست مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی در نظر گرفته شد. لازم به توضیح است که هدف اصلی از معرفی سناریوهای مختلف بهره‌برداری بر اساس محدودهٔ دبی ورودی و الگوی تغییرات دبی ورودی، ارزیابی به صورت دقیق‌تر و جامع‌تر است. از هر سناریو بر اساس میزان تکرار وقوع این دبی در داده‌های اندازه‌گیری‌شده در شبکه طی بهره‌برداری، یک دبی به عنوان نماینده انتخاب شد. بر این اساس، سناریوهای بهره‌برداری این تحقیق عبارت‌اند از: ۱ـ سناریوی پرآبی با افزایش ۲۵ درصدی جریان ورودی (A) که مربوط به روزهای محدودی طی فصل زراعی که میزان دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۲۵٪+ جریان بیشتر از میزان تقاضای شبکهٔ آبیاری بود؛ ۲ـ سناریوی نرمال یعنی زمانی که کانال مورد نظر جریان آب را بدون هیچ محدودیتی (افزایش و یا کاهش در دبی ورودی) در کانال‌های درجهٔ ۲ توزیع می‌کند (B)؛ ۳ـ سناریوی کم‌آبی ملایم با کاهش ۵ درصدی جریان ورودی (C) در محل بند انحرافی؛ ۴ـ سناریوی کم‌آبی شدید با کاهش ۱۵ درصدی جریان ورودی (D) و ۵ـ سناریوی کم‌آبی شدید با کاهش ۳۰ درصدی جریان ورودی (E).

ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری آب سطحی بر مبنای کفایت توزیع

با در دست داشتن اطلاعات مربوط به دبی مورد نیاز هر آبگیر و متوسط دبی تحویلی روزانه به آن‌ها که از مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان واسنجی‌شده به دست آمد، شاخص کفایت به تفکیک هر آبگیر و به ازای پنج سناریوهای مختلف بهره‌برداری در نظر گرفته شده، محاسبه شد. لازم به توضیح است که دبی روزانه مورد نیاز آبگیر در این پژوهش بر اساس اطلاعات حقابهٔ موجود در دفتر بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری آبشار استفاده شد. روش دیگر، در صورت عدم در دسترس بودن اطلاعات یادشده، به‌کارگیری مدل‌های برآورد نیاز آبی و اعمال راندمان‌های کاربرد و انتقال آب است. در ارتباط با نتایج به‌دست‌آمده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی لازم به توضیح است که برای هر آبگیر هیدروگراف تحویل آب روزانه، با بازه‌های زمانی پانزده دقیقه، به عنوان خروجی در هر روز شبیه‌سازی بهره‌برداری حاصل شد. شاخص کفایت توزیع آب، که ماهیتاً تناسب دبی تحویلی با دبی درخواستی (حقابهٔ مشخص) را بررسی می‌کند، برای هر گام زمانی محاسبه و میانگین کلی مقادیر محاسبه‌شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل میانگین مقادیر شاخص کفایت توزیع آب، برای آبگیرهای درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳ واقع در هر دو کانال اصلی شبکهٔ آبیاری رودشت (کانال اصلی شاخهٔ شمالی با ۳۵ و شاخهٔ جنوبی با ۴۳ آبگیر)، تحت پنج سناریوی بهره‌برداری به تصویر کشیده شده است.

مطابق با نتایج ارائه‌شده، با کاهش جریان ورودی به کانال اصلی مورد نظر در شبکهٔ آبشار، در تمامی سناریوهای بهره‌برداری مربوطه (سناریوهای کم‌آبی ۵٪ـ ، ۱۵٪ـ و ۳۰٪ـ)، میزان متوسط شاخص کفایت در کل امتداد مسیر کانال مستقیم تحت تأثیر قرار گرفته که باعث کاهش مطلوبیت بهره‌برداری سامانه متناسب با هر سناریو خواهد بود. روند کاهشی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا آبگیرهای پایین‌دست در سناریوی نرمال (شکل‌های B1 و B2) و سایر سناریوهای مربوط به کم‌آبی، نشان از ضعف مدیریت صحیح توزیع آب و ناکارآمدی شبکه در تحویل آب مورد نیاز آبگیرهای واقع در میان‌دست و به‌ویژه پایین‌دست این کانال دارد. توجیه این پدیده علاوه بر ماهیت کنترل بالادستی بودن بهره‌برداری، به نحوهٔ سازوکار و تنظیم کردن سازه‌های تنظیم سطح آب و نیز سازه‌های آبگیر این سامانه که به صورت دستی (روش سنتی و متکی بر اپراتور) است، برمی‌گردد. نتایج بیانگر آن است حتی در زمان نبود کم‌آبی (تحت سناریوی نرمال بهره‌برداری)، مقادیر کفایت تحویل آب، به جز ۱۴ آبگیر ابتدایی کانال (حدود ۴۰ درصد از آبگیرهای ابتدایی کانال)، در بیشترین حالت خود مقدار۸۰ درصد را تجربه می‌کنند و با کاهش این شاخص برای ۶۰ درصد باقی‌ماندهٔ آبگیرها (واقع در میانه و انتهای کانال) آسیب‌پذیری در آبگیرهای پایین‌دست افزایش یافته و بنابراین شبکه قادر به تأمین نیاز آبگیرها نیست. این روند کاهشی در سایر سناریوهای بهره‌برداری مربوط به کم‌آبی نیز به طور واضحی قابل مشاهده است.

به طوری که به ازای کاهش جریان ورودی متناسب با سناریوهای مربوط به شرایط کم‌آبی در کانال شاخهٔ شمالی (شکل‌های C1، D1 و E1) و در کانال شاخهٔ جنوبی (شکل‌های C2، D2 و E2)، میزان متوسط شاخص کفایت به همان نسبت از میزان مطلوب فاصله گرفته است و شرایط مطلوب تحویل آب تنها در تعداد محدودی از آبگیرها (به‌خصوص آبگیرهای واقع‌شده در ابتدای کانال) مشاهده خواهد شد. مقدار مورد نظر برای شاخص کفایت (حداقل ۸۰ درصد) برای هر یک از سناریوهای کم‌آبی ۵٪- ۱۵٪- و ۳۰٪- به‌ترتیب و تنها در ۱۰، ۷ و ۴ آبگیر ابتدایی کانال شاخهٔ شمالی (یعنی تنها برای ۲۸، ۱۹ و ۱۱ درصد آبگیرها) مشاهده می‌شود و برای سایر آبگیرها مقادیر بسیار کمتری از کفایت تحویل را نشان می‌دهد. از طرفی، با افزایش دبی در سناریوی بهره‌برداری مربوط به ۲۵٪+ جریان مازاد (شکل A1)، اگرچه میزان متوسط شاخص کفایت در ۸۶ درصد آبگیرهای درجهٔ ۲ و ۳ کانال شاخهٔ شمالی بالاتر از ۸۰ درصد به دست آمده که بیانگر مطلوبیت بهره‌برداری است، ولی ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که وقوع شرایط مورد نظر خطر تشدید نوسانات در بازه‌های کانال را به همراه داشته و سبب بالازدگی آب از کانال می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به محدودیت زمانی در ایجاد این سناریو، وقوع شرایط مورد نظر بسیار ناپایدار است. بنابراین، با وجود مطلوبیت بهره‌برداری در این سناریو، نمی‌توان از عملکرد بهره‌برداری کانال مورد نظر در سایر سناریوها چشم‌پوشی کرد. به طور مشابه، شاخص کفایت (حداقل ۸۰ درصد) برای هر یک از سناریوهای کم‌آبی به‌ترتیب و تنها در ۹، ۶ و ۳ آبگیر ابتدایی کانال اصلی شاخهٔ جنوبی (یعنی تنها برای ۲۱، ۱۴ و ۷ درصد آبگیرها) مشاهده می‌شود و برای سایر آبگیرها مقادیر بسیار کمتری از کفایت تحویل را نشان می‌دهد. خلاصهٔ نتایج این قسمت در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به توضیح است که تقسیم‌بندی ارائه‌شده در این جدول مطابق با استاندارد طبقه‌بندی عملکرد شاخص کفایت تحویل آب است.



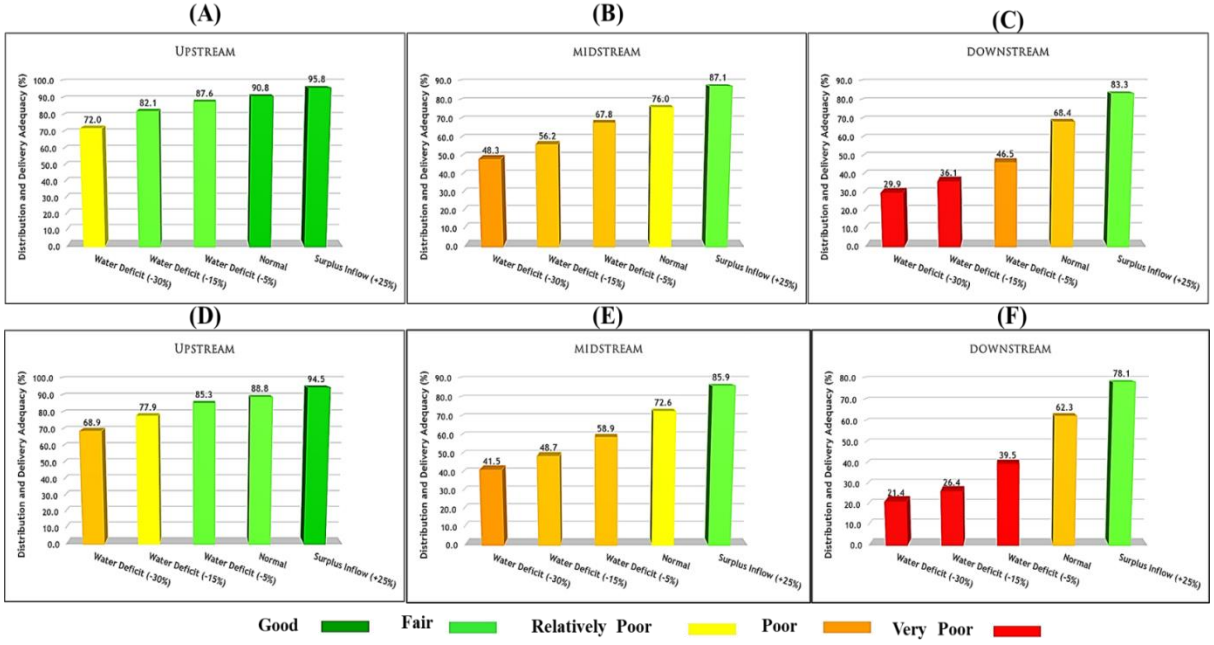
شکل ۲. نتایج ارزیابی نقطه‌ای شامل مقادیر متوسط شاخص کفایت توزیع آب محاسبه‌شده در کل فصل آبیاری شبیه‌سازی‌شده برای کانال اصلی شاخهٔ شمالی (1) و شاخهٔ جنوبی (2) به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری پرآبی (A)، نرمال (B)، کم‌آبی ملایم (C)، کم‌آبی شدید (D) و کم‌آبی بسیار شدید (E)

جدول ۲. عملکرد تحویل و توزیع آب کشاورزی در بخش شمالی و جنوبی دشت آبشار

		سناریوهای بهره‌برداری در شبیه‌سازی فرایند توزیع آب				
		نرمال	کمبود آب ۵٪-	کمبود آب ۱۵٪-	کمبود آب ۳۰٪-	آب مازاد ۲۵٪+
بخش شمالی	توزیع مناسب (خوب)	آبگیر ۱ تا ۶	آبگیر ۱ تا ۵	آبگیر ۱ تا ۳	آبگیر ۱ تا ۲	آبگیر ۱ تا ۹
	توزیع نامناسب (متوسط)	آبگیر ۷ تا ۱۴	آبگیر ۶ تا ۹	آبگیر ۴ تا ۶	آبگیر ۳	آبگیر ۱۰ تا ۳۱
	توزیع ناپایدار (ضعیف)	آبگیر ۱۵ تا ۳۵	آبگیر ۱۰ تا ۳۵	آبگیر ۷ تا ۳۵	آبگیر ۴ تا ۳۵	آبگیر ۳۲ تا ۳۵
بخش جنوبی	توزیع مناسب (خوب)	آبگیر ۱ تا ۶	آبگیر ۱ تا ۵	آبگیر ۱ تا ۳	آبگیر ۱ تا ۲	آبگیر ۱ تا ۹
	توزیع نامناسب (متوسط)	آبگیر ۷ تا ۱۴	آبگیر ۶ تا ۹	آبگیر ۴ تا ۶	آبگیر ۳	آبگیر ۱۰ تا ۳۱
	توزیع ناپایدار (ضعیف)	آبگیر ۱۵ تا ۴۳	آبگیر ۱۰ تا ۴۳	آبگیر ۷ تا ۴۳	آبگیر ۴ تا ۴۳	آبگیر ۳۲ تا ۴۳

برای بررسی تحویل و توزیع آب در بخش‌های بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخهٔ شمالی (راست) و شاخهٔ جنوبی (چپ)، شاخص کفایت در بخش‌های یادشده مورد محاسبه قرار گرفتند. شکل ۳ نمودارهای ستونی مستخرج از داده‌ها را در سناریوهای مختلف بهره‌برداری به تفکیک هر کانال به نمایش گذاشته است. همان‌طور که در این شکل‌ها نمایان است، در همهٔ سناریوها الگوی روند نزولی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا آبگیرهای پایین‌دست کاملاً مشهود است که ماهیت کنترل بالادست بودن روش بهره‌برداری و همچنین دستی بودن سازوکار سازه‌های تنظیم و آبگیرها در کانال را به‌خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در ارزیابی نقطه‌ای نیز توضیح داده شد، نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه بیانگر ضعف مدیریت توزیع آب و ناکارآمدی شبکه در تحویل آب مورد نیاز به‌ویژه در آبگیرهای واقع در میان‌دست و پایین‌دست شبکه و به ازای سناریوهای مختلف بهره‌برداری نرمال و کم‌آبی است. به عنوان مثال در کانال شاخهٔ شمالی (شکل‌های A، B و C)، سناریوی ورود جریان مازاد با افزایش ۲۵٪+ دبی ورودی در سراب کانال، به‌ترتیب در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست دارای کفایت ۹۵/۸، ۸۷/۱ و ۸۲/۸ درصد است که به‌ترتیب نشان از وضعیت عملکرد خوب، متوسط و متوسط از حیث شاخص یادشده دارد. در باقی سناریوها به‌ویژه در بازه‌های میان‌دست و پایین‌دست شاخص کفایت در محدودهٔ ضعیف برآورد شده است که ضعیف‌ترین آن مربوط به سناریو ۳۰٪- کم‌آبی و با حدود ۳۰ درصد کفایت در پایین‌دست کانال مورد نظر است. به عنوان مثال، در سناریو نرمال حداکثر کفایت تحویل آب آبیاری تنها به آبگیرهای واقع در امتداد بازهٔ بالادستی، آبگیرهای شماره ۱ تا ۱۲، به میزان ۹۰/۸ درصد اختصاص یافته است که بیانگر تحویل و توزیع مناسب (خوب) در این بازه است. مشابه چنین الگویی نیز در سناریوهای کم‌آبی ۵٪- و ۱۵٪- به‌ترتیب با شاخص کفایت ۸۷/۶ و ۸۲/۱ درصد در بازهٔ بالادستی مشاهده شده است. مطابق نتایج ارائه‌شده در این نمودارها، آبگیرهای واقع در میان‌دست کانال اصلی شاخهٔ شمالی مورد مطالعه، آبگیر شمارهٔ ۱۳ تا ۲۴، به‌ترتیب و به طور متوسط فقط می‌توانند حدود ۶۷/۸، ۵۶/۲ و ۴۸/۳ درصد میزان تقاضای سطح تحت کشت خود را دریافت کنند. این در حالی است که در آبگیرهای پایین‌دستی، آبگیر شمارهٔ ۲۵ تا ۳۵، متناظر با سناریوهای یادشده، این شاخص به کمتر از ۵۰ درصد رسیده و بنابراین با قرارگیری در وضعیت ناپایدار (ضعیف) تحویل و توزیع، می‌توان گفت که آبگیرهای واقع در این بازه آبی دریافت نمی‌کنند. بنابراین، با کاهش جریان ورودی، آسیب‌پذیری در آبگیرهای پایین‌دست بسیار زیاد بوده و شبکه قادر به تأمین نیاز آبگیرها نیست.

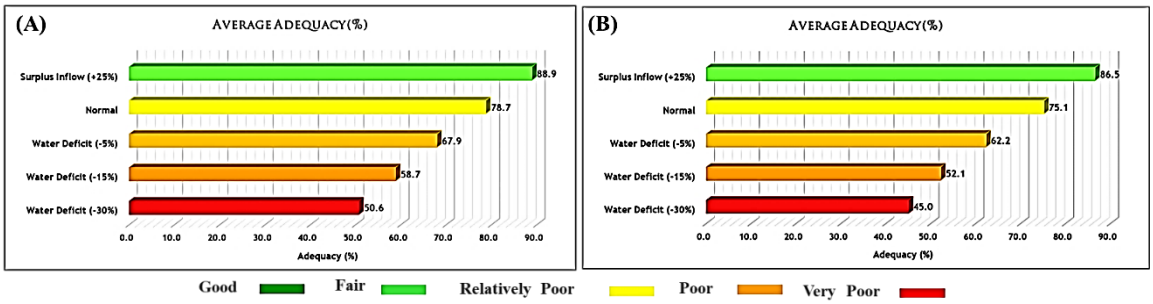
در کانال اصلی شاخهٔ جنوبی، در سناریوی نرمال حداکثر کفایت تحویل آب آبیاری تنها به آبگیرهای واقع در امتداد بازهٔ بالادستی، آبگیرهای شمارهٔ ۱ تا ۱۵، به میزان ۸۸/۸ درصد اختصاص یافته است که بیانگر تحویل و توزیع نامناسب (متوسط) در این بازه است. مشابه چنین الگویی نیز در سناریوهای کم‌آبی ۵٪- و ۱۵٪- به‌ترتیب با شاخص کفایت ۸۵/۳ و ۷۸ درصد در بازهٔ بالادستی مشاهده شده است. در سناریوهای کم‌آبی ۵٪- ۱۵٪- و ۳۰٪- مطابق نتایج ارائه‌شده در این نمودارها، آبگیرهای واقع در میان‌دست کانال اصلی شاخهٔ جنوبی، آبگیر شمارهٔ ۱۶ تا ۳۰، به‌ترتیب و به طور متوسط فقط می‌توانند حدود ۵۹، ۴۸/۷ و ۴۱/۵ درصد میزان تقاضای سطح تحت کشت خود را دریافت کنند. این در حالی است که در آبگیرهای پایین‌دستی، آبگیر شمارهٔ ۳۱ تا ۴۳، متناظر با سناریوهای یادشده، این شاخص به کمتر از ۴۰ درصد رسیده و بنابراین با قرارگیری در وضعیت ناپایدار (ضعیف) تحویل و توزیع، می‌توان گفت که آبگیرهای واقع در این بازه آبی دریافت نمی‌کنند.



شکل ۳. نتایج ارزیابی منطقه‌ای شامل مقادیر متوسط شاخص کفایت توزیع آب محاسبه‌شده در کل فصل آبیاری شبیه‌سازی‌شده برای بالادست (A & D)، میان‌دست (B & E) و پایین‌دست (C & F) کانال‌های اصلی شاخهٔ شمالی (A_ C) و شاخهٔ جنوبی (D_ F) به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری پرآبی تا کم‌آبی بسیار شدید

شکل ۴ ارزیابی کلی تحویل و توزیع آب را در آبگیرهای درجهٔ ۲ و ۳ هر دو کانال اصلی به صورت نمودارهای ستونی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بهترین عملکرد تحویل و توزیع آب آبیاری در کانال شاخهٔ شمالی بر اساس متوسط شاخص کفایت محاسبه‌شده در امتداد این کانال، به ازای سناریوی جریان مازاد ۲۵٪+ و به میزان حدود ۹۰ درصد حاصل شده است. با کاهش جریان ورودی، چه در سناریوی نرمال و چه در سایر سناریوهای مربوط به کم‌آبی، به‌تدریج از میزان این شاخص و بنابراین، از مطلوبیت تحویل و توزیع در این امتداد کاسته می‌شود، به طوری که شاخص مورد نظر در سناریوی مربوط به ۳۰ درصد کمبود آب، با کسب ضعیف‌ترین عملکرد به میزان حدود ۵۰ درصد رسیده است. در سناریوی نرمال نیز میانگین شاخص کفایت در امتداد این کانال به میزان حدود ۷۹ درصد رسیده است. به بیانی دیگر، بدون اعمال هیچ‌گونه محدودیت (کاهش) جریان، سامانهٔ بهره‌برداری موجود در امتداد این کانال توانایی لازم در تأمین آب مورد نیاز آبگیرهای خود را ندارد. این در حالی است که با وجود هرگونه عامل کاهش جریان به میزان ۵_ ۱۵ درصد، مطابق با سناریوهای مربوطه، با تأمین متوسط کفایت حداکثری ۵۹_ ۷۰ درصدی، شرایط بهره‌برداری ضعیف‌تری نسبت به سناریوی نرمال به وجود آمده و بنابراین باعث تحویل و توزیع نامطمئن و همچنین ناعادلانه در بین آبگیرهای این کانال می‌شود.

برای کانال شاخهٔ جنوبی، بهترین عملکرد تحویل و توزیع آب آبیاری بر اساس متوسط شاخص کفایت محاسبه‌شده در امتداد این کانال، به ازای سناریوی جریان مازاد ۲۵٪+ و به میزان ۸۶/۵ درصد حاصل شده است. با کاهش جریان ورودی، چه در سناریوی نرمال و چه در سایر سناریوهای مربوط به کم‌آبی، به‌تدریج از میزان این شاخص و بنابراین از مطلوبیت تحویل و توزیع در این امتداد کاسته می‌شود، به طوری که شاخص مورد نظر در سناریوی مربوط به ۳۰ درصد کمبود آب، با کسب ضعیف‌ترین عملکرد به میزان ۴۰ درصد رسیده است. در سناریوی نرمال نیز میانگین شاخص کفایت در امتداد این کانال به میزان حدود ۷۵ درصد رسیده است. این در حالی است که با وجود هرگونه عامل کاهش جریان به میزان ۵_ ۱۵ درصد، مطابق با سناریوهای مربوطه، با تأمین متوسط کفایت حداکثری ۵۲_ ۶۲ درصدی، شرایط بهره‌برداری ضعیف‌تری نسبت به سناریوی نرمال به وجود آمده است.

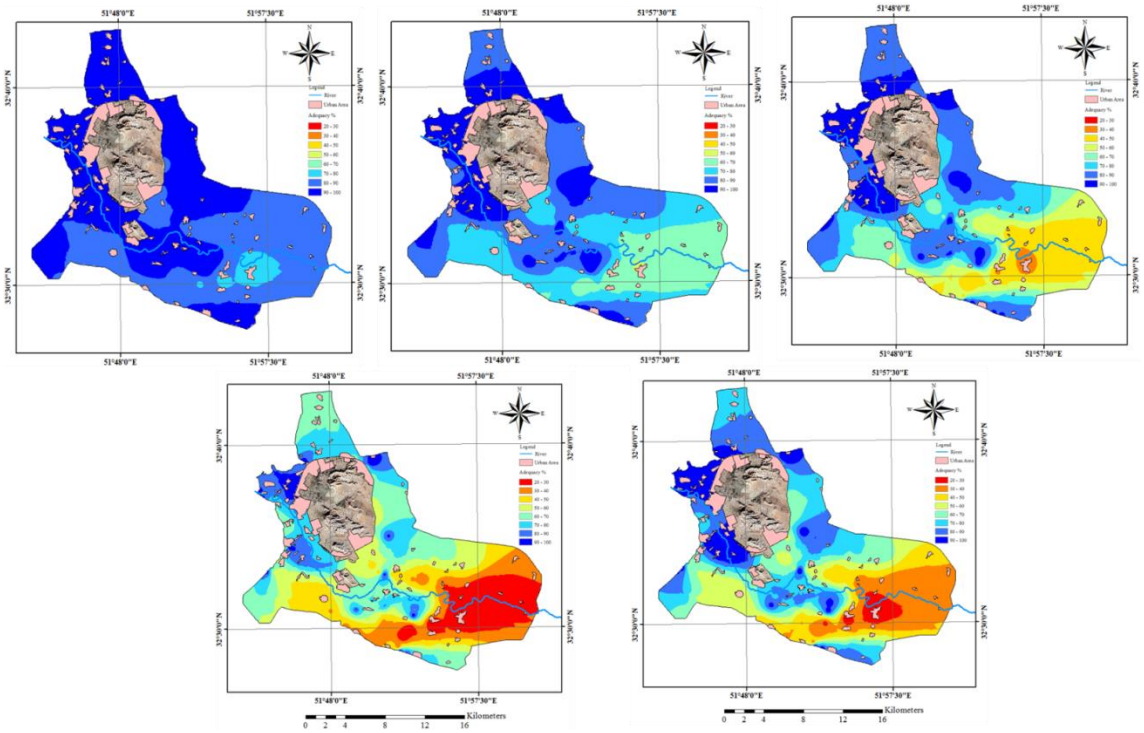


شکل ٤. نتایج ارزیابی کلی شامل مقادیر متوسط شاخص کفایت توزیع آب محاسبه‌شده در کل فصل آبیاری شبیه‌سازی‌شده برای کانال‌های اصلی شاخهٔ شمالی (A) و شاخهٔ جنوبی (B) به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری پرآبی تا کم‌آبی بسیار شدید

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اولین گام در پیاده‌سازی طرح‌های نوسازی، بهسازی و مدرن‌سازی با هدف ارتقای شیوهٔ مدیریت تخصیص و توزیع آب در یک شبکهٔ آبیاری، بررسی مکانی نحوهٔ توزیع آب سطحی و در نتیجه، تعیین سهم هر یک از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز کشاورزی آن شبکه است. در این راستا، در گام اول اقدام به ارزیابی وضعیت فعلی و عملکرد بهره‌برداری انتقال و توزیع آب شبکهٔ آبیاری آبشار در برخورد با شرایط بهره‌برداری محتمل صورت گرفت. ارزیابی عملکرد بهره‌برداری بستری را ایجاد می‌کند که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و همچنین، تعیین عوامل مؤثر در بهره‌برداری از شبکه، به منظور ارائهٔ اقدامات لازم برای بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم، انجام شود. در این راستا ارزیابی عملکرد به‌دست‌آمده در سامانهٔ انتقال و توزیع آب کشاورزی (شامل کانال‌های اصلی و فرعی) در شبکهٔ آبیاری آبشار از دیدگاه کفایت تحویل و توزیع آب آبیاری صورت گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکهٔ آبیاری آبشار شامل شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری موجود در سامانهٔ انتقال و توزیع، در شرایط مختلف بهره‌برداری به صورت مشروح در سه قالب ارزیابی نقطه‌ای (شکل ۲)، ارزیابی منطقه‌ای (شکل ۳) و ارزیابی کلی (شکل ۴) ارائه شد. در ادامه، به منظور ارائهٔ تحلیل مکانی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکهٔ آبشار، مقدار متوسط شاخص محاسبه‌شده (کفایت تحویل و توزیع آب)، با استفاده از نرم‌افزار GIS و بر اساس طیف رنگی برای هر یک از واحدهای درجهٔ ۲ در شکل ۵ به تفکیک سناریوهای بهره‌برداری، ارائه شد. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسهٔ مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم کرده است. مطابق با این شکل در همهٔ سناریوها، شاخص کفایت از بالادست (منطقهٔ نزدیک به بند انحرافی آبشار) به سمت پایین‌دست (انتهای کانال‌های اصلی و تخلیه به زهکش انتهایی) روندی نزولی را طی می‌کند. دلیل این امر ماهیت سامانهٔ بهره‌برداری با روش کنترل بالادست در کانال‌های مورد مطالعه است. مقدار شاخص کفایت نشان‌داده‌شده در این شکل بیانگر این است که به طور کلی بهره‌برداری در امتداد کانال اصلی شاخهٔ شمالی با مقادیر بالاتر، از مطلوبیت بیشتری برخوردار است، به طوری که به عنوان مثال در سناریوی بهره‌برداری نرمال، در امتداد بالادست اکثر مناطق تحت پوشش دارای کفایت ۸۰ ـ ۱۰۰ درصدی هستند که نشان از عملکرد متوسط از حیث شاخص یادشده است. این در حالی است که شاخص مورد نظر در بخش بالادستی کانال اصلی شاخهٔ جنوبی در برخی از مناطق حتی به ۵۰ـ ۶۰ درصد نیز نزول پیدا کرده است. ارزیابی شاخص کفایت در مناطق میان‌دستی و پایین‌دستی نیز گواه بر ضعف شرایط بهره‌برداری در این مناطق دارد. به بیانی، از مناطق تحت پوشش هر کانال از میان‌دست تا پایین‌دست، شاخص کفایت به‌ویژه در بخش پایین‌دست حتی به کمتر از ۳۰ درصد رسیده است.

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش هم‌راستا با نتایج پژوهش کاغذچی و همکاران (۲۰۲۱) بوده که ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری در سه سطح نقطه‌ای، منطقه‌ای و کلی برای شبکهٔ آبیاری رودشت اصفهان و توسط یک مدل هوشمند توزیع آب کشاورزی با استفاده از شبکه‌های ترکیبی Bayesian صورت گرفته است [۱۴]. بر اساس نتایج آن تحقیق، متوسط شاخص کفایت توزیع آب در نمایندهٔ آبگیرهای بالادست در سناریوهای بهره‌برداری نرمال، کم‌آبی‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به‌ترتیب حدود ۶۸، ۶۵، ۶۲، ۵۹، ۵۶، ۵۲ درصد در میان‌دست شبکه به‌ترتیب حدود ۶۷، ۶۳، ۶۰، ۵۶، ۵۳، ۴۹ درصد و در پایین‌دست شبکه به‌ترتیب حدود ۴۹، ۴۵، ۴۲، ۳۸، ۳۴، ۳۱ درصد به دست آمد. مقایسهٔ نتایج یادشده با تحقیق حاضر نشان

می‌دهد شبکهٔ آبیاری آبشار به‌رغم اینکه در منطقهٔ بالادست شبکهٔ آبیاری رودشت واقع شده و خطر کمبود آب در سامانهٔ تأمین (آب رهاشده از سد مخزنی زاینده‌رود) عواقب کمتری برای این شبکه دارد، ولی متوسط کفایت توزیع آب سطحی در شرایط کم‌آبی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کمتر از میزان مشابه در شبکهٔ آبیاری رودشت به دست آمده است. دلایل متعددی می‌تواند این اختلاف را ایجاد کرده باشد که با توجه به عدم امکان بررسی آن‌ها در این پژوهش، فقط می‌توان لیستی از دلایل از جمله تجربه و تخصص ناکافی تیم بهره‌برداری، فرسودگی و ناکافی بودن یا عدم انجام واسنجی دوره‌ای سازه‌های آبگیر در کانال‌های اصلی و فرعی برشمرد. در ارتباط با مقادیر کلی شاخص کفایت توزیع آب نتایج به‌دست‌آمده توسط نتایج مشابه شاخص کفایت محاسبه‌شده در سناریوی نرمال بهره‌برداری ارائه‌شده در دو تحقیق [۲۲ و ۱۸] تأیید می‌شود.



شکل ۵. پراکندگی مکانی کفایت توزیع آب سطحی (نقشه‌های هم‌کفایت) در شبکهٔ آبیاری آبشار تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری از پرآبی تا کم‌آبی شدید

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سامانهٔ بهره‌برداری موجود در شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان، اقدام به بررسی نحوهٔ توزیع آب سطحی، تأمین‌شده در محل بند انحرافی، در کانال‌های اصلی و فرعی کرد. در این راستا، شبیه‌سازی توزیع آب سطحی در کانال‌های اصلی و فرعی توزیع آب کشاورزی توسط مدل ریاضی ساده‌شده ID انجام شد. ارزیابی نحوهٔ توزیع آب توسط شاخص ارزیابی کفایت تحویل آب در سه سطح نقطه‌ای (در محل هر آبگیر)، منطقه‌ای (میانگین شاخص در آبگیرهای واقع در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) و کلی صورت گرفت. در ادامه تحلیل مکانی کفایت توزیع آب در محیط GIS انجام شد. لازم به توضیح است که انتخاب سه سطح ارزیابی یادشده در راستای ارائهٔ نتایج کاربردی قابل استفاده توسط متولیان بهره‌برداری شبکه، شامل شرکت بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری، دفتر بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای و ادارهٔ امور آب شهرستان انتخاب شده است. ارزیابی نقطه‌ای این امکان را برای مدیر بهره‌برداری شبکه فراهم می‌کند که سازه‌های آبگیر درجهٔ ۲ و ۳ آسیب‌پذیر واقع در کانال‌های آبیاری را شناسایی و اقدامات لازم اصلاحی (مانند به‌روزرسانی نمودارهای دبی- اشل یا تغییر کالیبراسیون دوره‌ای) این سازه‌ها را فراهم آورد. نتایج ارزیابی منطقه‌ای، در یک سطح مدیریتی بالاتر، این امکان را فراهم می‌کند که با ارائهٔ یک اولویت‌بندی مکانی، امکان اختصاص مؤثرتر بودجهٔ محدود سالانهٔ تعمیر، نگهداری و نوسازی را برای مدیر شبکه فراهم آورد. نتایج ارزیابی کلی نیز علاوه بر ارائهٔ شمای کلی از وضعیت کفایت توزیع آب در سطح شبکه، امکان اولویت‌بندی شبکه‌های آبیاری واقع در یک

محدودهٔ مدیریتی (اشل استانی برای شرکت‌های آب منطقه‌ای و اشل حوضه‌ای برای سطوح بالاتر تصمیم‌گیری در شرکت مدیریت منابع آب ایران) از نظر توزیع کافی و قابل اعتماد آب سطحی میسر می‌سازد.

خلاصهٔ نتایج به‌دست‌آمده از فرایند شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال‌های درجهٔ ۱ و ۲ شبکهٔ آبیاری آبشار به این شرح است که در سناریوی نرمال بهره‌برداری مطلوبیت کفایت توزیع سطحی حدود ۱۵ـ ۱۷ درصد کل آبگیرهای کانال‌های اصلی و ۱۱ـ ۱۴ درصد کل آبگیرهای کانال‌های درجهٔ ۲ رخ داده است. در این شرایط به‌ترتیب ۲۰ـ ۲۴ درصد و ۱۳ـ ۱۷ درصد از آبگیرهای درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳ دارای شاخص کفایت توزیع آب متوسط و باقی آبگیرها (۶۱ـ ۶۳ درصد و ۶۵ـ ۷۱ درصد) بر اساس دسته‌بندی شاخص کفایت در کلاس ضعیف قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر عملکرد غیرمطمئن سامانهٔ بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری آبشار در توزیع کافی آب سطحی در سناریوی نرمال بهره‌برداری است. در سناریوهای بهره‌برداری کم‌آبی ملایم تا شدید (۵ـ تا ۳۰ـ درصد) کفایت توزیع آب به طور متوسط در ۶۶، ۸۳ و ۹۱ درصد آبگیرهای درجهٔ ۲ و۷۰، ۸۶ و ۹۳ درصد آبگیرهای درجهٔ ۳ در کلاس ضعیف و غیرقابل قبول قرار گرفت. لذا نتیجهٔ کاربردی یا به بیان دیگر تفسیر کاربردی نتایج این پژوهش به طور خلاصه عبارت است از: عدم کارایی سامانهٔ بهره‌برداری در توزیع مناسب آب سطحی در سطح شبکهٔ آبیاری است.

پیشنهاد کاربردی در راستای تکمیل فعالیت صورت‌گرفته در این تحقیق و با هدف افزایش دقت و سطح ارزیابی صورت گرفته، ارزیابی جامع حقابه‌های سنتی، توافقی و فروش آب موجود در محل هر آبگیر درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳ است. منظور از افزایش دقت ارزیابی در اینجا، تدقیق مقدار نیاز آب روزانهٔ هر آبگیر است که به عنوان مخرج کسر شاخص کفایت توزیع و تحویل آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین منظور از افزایش سطح ارزیابی، وارد کردن پارامترهای بیشتری شامل نیاز آبی الگوی کشت مشخص در شبکه، میانگین راندمان‌های کاربرد آب در مزارع و راندمان‌های انتقال و توزیع آب در کانال‌های فرعی و لترال‌ها به فرایند ارزیابی است. این مهم با استفاده از رنج وسیعی از روش‌ها و مدل‌سازی‌های مرتبط با مدیریت آب در سطح مزرعه قابل پیاده‌سازی است. شاخص‌ترین محدودیت‌های پیش روی این تحقیق که بی‌شک دقت فرایند ارزیابی را تحت تأثیر قرار داد به شرح ذیل ارائه می‌شود. محدودیت کلی در این‌گونه تحقیقات در ارتباط با گردآوری و جمع‌آوری اطلاعات کافی و مطمئن در سطح شبکه است. دلیل این امر هم نبود سازه‌های اندازه‌گیری مطمئن در کانال‌ها برمی‌گردد و هم به محرمانه بودن اطلاعات فروش آب شرکت بهره‌برداری است که اطلاعات به صورت قطره‌چکانی در اختیار محقق قرار می‌گیرد. به صورت جزئی‌تر محدودیت تحقیق شامل عدم امکان ارزیابی دقت منحنی‌های دبی‌ـ اشل موجود برای تمام سازه‌های آبگیر این شبکه، نبود هیچ‌گونه سنسور اندازه‌گیری عمق/سرعت/دبی جریان در این شبکه به منظور بررسی دقت سری زمانی عمق/سرعت/دبی جریان شبیه‌سازی‌شده در محل سازهٔ اندازه‌گیری با سری زمانی اندازه‌گیری شده و همچنین عدم امکان شبیه‌سازی فرایند توزیع آب در کانال‌های درجهٔ ۳ منتهی به دلیل تعدد بالا، زمان و هزینهٔ زیاد این فرایند است. در این راستا لازم به توضیح است که حمایت‌های مالی بسیار محدود برای انجام پژوهش در این موضوع خاص، به دلیل محدودیت بودجه‌های پژوهشی، گاه ناشناخته بودن موضوع و یا کم‌اهمیت جلوه دادن موضوع در صورت وجود آگاهی سبب در نظر گرفتن مفروضات زیادی برای به سرانجام رسیدن این‌گونه پژوهش‌ها شده که عموماً از دقت نتایج به‌دست‌آمده می‌کاهد.

منابع

[1]. Eftekhari SH, Monem MJ. Determination Irrigation Canal Capacity and Achievable Flexibility for Arranged Delivery. Water and Irrigation Management. 2023 Sep 23;13(3):801- 16. [Persian]

[2]. Orojloo M, Shahdany SM, Roozbahani A. Developing an integrated risk management framework for agricultural water conveyance and distribution systems within fuzzy decision making approaches. Science of the Total Environment. 2018 Jun 15;627:1363- 76.

[3]. Bozorgi A, Roozbahani A, Hashemy Shahdany SM, Abbassi R. Development of multi- hazard risk assessment model for agricultural water supply and distribution systems using bayesian network. Water Resources Management. 2021 Aug;35(10):3139- 59.

[4]. Ministry of Energy, Iran Water Resources Management CO. Deputy of Research, Office of Standard and Technical Criteria. General Design Criteria of Irrigation and Drainage System (Bulletin 281). Iranian Management and Planning Organization, 1994. Publication No.107, Tehran, Iran

[5]. Ostovari S, Monem MJ. Management and performance improvement of irrigation canals in water-scarce conditions considering hydraulic drawbacks: A case study for the Eastern Aghili secondary canal, Iran. Irrigation and Drainage. 2022 Dec;71(5):1294- 303.

[6]. Shahverdi K, Mollazeiynali H, Marofi M. Design of Operation Strategy for Canal Structures. Journal of Hydraulics. 2023 Dec 22;18(4).

[7]. Fipps G. Potential water savings in irrigated agriculture for the Rio grande planning region (Region M). Texas Water Resources Institute. 2005.

[8]. Akkuzu E, Ünal HB, Karataş BS. Determination of water conveyance losses in the Menemen open canal irrigation network. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2014;31(1):11- 22.

[9]. Kedir Y. estimation of conveyance losses of Wonji- Shoa Sugar Cane Irrigation Scheme in Ethiopia. Journal of Environment and Earth Science. 2015;5(17):2224- 3216.

[10]. Jadhav PB, Thokal RT, Mane MS, Bhange HN, Kale SR. improving conveyance efficiency through canal lining in command area: A Case Study. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014;3(6):820- 826.

[11]. Karimi Avargani H, Hashemy Shahdany SM, Hashemi Garmdareh SE, Liaghat A. determination of water losses through the agricultural water conveyance, distribution, and delivery system, Case study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. Water and Irrigation Management. 2020;10(1):143- 156. [Persian]

[12]. Serra P, Salvati L, Queralt E, Pin C, Gonzalez O, Pons X. estimating water consumption and irrigation requirements in a Long-Established Mediterranean Rural Community by remote sensing and field data. Irrigation and Drainage. 2016;65(5):578- 88.

[13]. Shahrokhnia MA, Olyan Ghiasi A. methods of seepage estimation in canals and evaluation of seepage and distribution efficiency in Doroodzan irrigation system. Journal of Water Management in Agriculture. 2018;4(2):27- 36. [Persian]

[14]. Kaghazchi A, Shahdany SM, Roozbahani A. Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model. Agricultural Water Management; 2021; 28(8):106578.

[15]. Ghumman AR, Ahmad S, Rahman S, Khan Z. Investigating management of irrigation water in the upstream control system of the upper swat canal. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering; 2018; 42(1):153- 64.

[16]. Dejen ZA. Hydraulic and operational performance of irrigation schemes in view of water saving and sustainability: sugar estates and community managed schemes In Ethiopia. Wageningen University and Research; 2015.

[17]. Soler, J., Gamazo, P., Rodellar, J., and Gómez, M. Operation of an irrigation canal by means of the passive canal control. Irrigation science; 2018; 33(2): 95- 106

[18]. Shahverdi K, Maestre JM. Holistic Framework for Canal Modernization: Operation Optimization, and Economic and Environmental Analyses. Water Resources Management. 2023; 30(1):1- 20.

[19]. Marashi A, Kouchakzadeh S, Yonesi HA. Rotary gate discharge determination for inclusive data from free to submerged flow conditions using ENN, ENN–GA, and SVM–SA. Journal of Hydroinformatics. 2023; 25(4): 1312–1328.

[20]. Akbari, M. Soil Water Balance and Crop Yield of Winter Wheat Using AquaCrop Simulation Model. Journal of Agricultural Engineering Research. 2012; 12(4):19- 34.

[21]. Van Overloop PJ, Negenborn RR., De Schutter B, Van De Giesen NC. Predictive control for national water flow optimization in the Netherlands. Intelligent Infrastructures. 2010; 42(4):439- 461.

[22]. Schuurmans J, Schuurmans W, Berger H, Meulenberg M, Brouwer R. Control of water levels in the Meuse river. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1997;123(3):180- 184.

[23]. Isapoor S, Montazer A, Van Overloop PJ, Van De Giesen N. Designing and evaluating control systems of the Dez main canal. Irrig. Drain. 2011;60(1):70- 79.
[24]. Molden DJ, Gates TK. Performance measures for evaluation of irrigation- water- delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.1990;116(6):804- 823.
[25]. Daneshfaraz R, Norouzi R, Abbaszadeh H, Azamathulla HM. Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients. Water Supply. 2022; 22(10):7767- 81.
[26]. Hassanzadeh, Yousef, and Hamidreza Abbaszadeh. Investigating Discharge Coefficient of Slide Gate- Sill Combination Using Expert Soft Computing Models. Journal of Hydraulic Structures. 2023; 9(1): 63- 80.