

Coupling Surface Water Operation Control with the CLEWs Framework for Sustainable Irrigation Management: A Case Study of the Qazvin Irrigation Network

Mohsen Hosseini Jolfan¹, Mehdi Yasi^{2*}, Javad Farhoudi², Hossein Khajeh Pour³

1- Ph.D. Candidate in Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* m.yasi@ut.ac.ir

Received: 27 October 2025

Revised: 28 January 2025

Accepted: 30 January 2025

Discussion: 23 September 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In recent decades, increasing drought frequency, declining renewable water resources, and growing agricultural water demand have intensified the need for sustainable water management, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran. The agricultural sector, which accounts for over 90% of total water withdrawals in Iran, suffers from low conveyance efficiency and excessive dependence on groundwater abstraction. Traditional irrigation networks, controlled by manual structures such as Amil regulators, often fail to respond to flow fluctuations and result in significant water losses, high energy consumption, and inequitable water distribution among users. These challenges necessitate the adoption of automated and data-driven operation systems. Model Predictive Control (MPC) has recently emerged as an effective technique for improving the hydraulic performance of open-channel systems. However, MPC alone cannot assess the environmental and energy implications of operational decisions. Therefore, integrating MPC with an analytical sustainability framework such as CLEWs (Climate–Land–Energy–Water Systems) provides a comprehensive understanding of the interlink ages between hydraulic, energy, and environmental dimensions. This research aims to develop a coupled MPC–CLEWs framework to quantify the synergies and trade-offs between operational efficiency, energy use, and carbon emissions in an irrigation network.

Methodology: The study was conducted on the Qazvin irrigation network in northwestern Iran, which covers approximately 59,000 hectares and receives water mainly from the Taleghan Dam. Two operational strategies were modeled: (1) the conventional Amil regulator-based method and (2) a centralized Model Predictive Control (MPC) system. Both methods were simulated under two hydrological scenarios: normal and drought conditions, using a dynamic integrator-delay hydraulic model. Key performance indicators included Water Delivery Adequacy (PA), Energy Consumption (E), and CO₂ Emissions (CE). These indicators were normalized and aggregated into the composite CLEWs Index, defined as:

$$\text{CLEWs} = 0.4 \cdot I_w + 0.3 \cdot (1 - I_e) + 0.3 \cdot (1 - I_m),$$

where I_w , I_e , and I_m respectively represent the normalized sub-indices of adequacy, energy, and

emissions. Energy consumption was calculated based on pumping volume, head, and pump efficiency according to Howells et al. (2013). The coupled module was implemented in MATLAB R2023b, allowing automatic integration of the operational outputs (from MPC) into the CLEWs analytical structure. Additionally, a multi-objective sensitivity analysis was conducted by varying the weight of each component to identify trade-offs between water supply adequacy and energy use. Pareto front diagrams were then generated to visualize optimal balance points between performance and sustainability under both operational modes.

Results and Discussion: The results revealed significant differences between the two operation strategies under both hydrological conditions. In the normal scenario, the average CLEWs Index improved from 0.75 under the Amil operation to 1.00 under MPC, indicating complete system stability and elimination of groundwater dependency. Downstream reaches (7–10), which previously suffered from inadequate supply (CLEWs < 0.75), achieved full adequacy and zero emissions under MPC. Under the drought scenario, the Amil-based system experienced a sharp decline in performance, with the average CLEWs Index dropping to 0.62, driven by increased groundwater pumping and CO₂ emissions. Conversely, MPC maintained a relatively high CLEWs value of 0.88, demonstrating resilience against reduced inflows. The energy demand in the Amil method increased by more than 40% compared to MPC due to inefficient reallocation of flows. Pareto front analysis highlighted that MPC achieves superior trade-offs, minimizing energy consumption while maximizing adequacy and environmental sustainability. In contrast, the Amil regulator showed steep trade-offs between supply reliability and energy costs, reflecting its vulnerability to hydrological variability. The coupled CLEWs framework effectively captured these multi-dimensional interactions, offering a quantitative link between operational decisions and their sustainability outcomes. Overall, the integrated MPC–CLEWs system enhances not only hydraulic stability but also energy efficiency and carbon reduction potential in irrigation management.

Conclusion: This study introduced a novel coupling between operational control (MPC) and the CLEWs analytical framework to evaluate irrigation sustainability in real time. Results demonstrated that MPC substantially improves water delivery adequacy, reduces energy demand, and minimizes greenhouse gas emissions compared to conventional Amil-based management. The coupled model provides a comprehensive decision-support tool for irrigation managers, enabling the formulation of adaptive strategies under water scarcity. The proposed MPC–CLEWs framework bridges the gap between operational modeling and sustainability assessment, offering a replicable approach for integrated water–energy–environment management.

Keywords: CO emissions, Hydraulic performance of irrigation network, Maintenance energy consumption, Model Predictive Control (MPC) system, Water delivery adequacy.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Data analysis, Modeling, Result and Discussion, Presenting the 1st draft of the Paper.

Second Author: Main supervision, Data control & Analysis, Review & Editing.

Third Author: Co-supervision, Confirmation of the results, Editing of the paper.

Fourth Author: Advisor & Review.

ارزیابی راهبرد خودکارسازی بهره‌برداری آب سطحی در شبکه آبیاری با استفاده از چارچوب CLEWs (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین)

محسن حسین جلفان^۱، مهدی یاسی^{۲*}، جواد فرهودی^۳، حسین خواجه‌پور^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف.

* m.yasi@ut.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده: در سال‌های اخیر، تشدید خشکسالی‌ها، کاهش منابع آب تجدیدپذیر و افزایش هزینه‌های انرژی، ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای هوشمند در مدیریت بهره‌برداری سامانه‌های آبیاری سطحی را دوچندان کرده است. پژوهش حاضر با هدف توسعه چارچوبی عددی برای اتصال مدل‌های بهره‌برداری آب سطحی به مدل (CLEWs آب، انرژی، غذا و پایداری محیط‌زیست) در شبکه آبیاری قزوین انجام شد. بدین منظور، دو روش بهره‌برداری شامل روش مرسوم مبتنی بر درجه‌های آمیل و روش نوین کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) در قالب دو سناریوی نرمال و خشکسالی شبیه‌سازی گردید. شاخص‌های کمی شامل کفایت تأمین آب، انرژی مصرفی پمپاژ و انتشار CO₂ محاسبه و در قالب شاخص ترکیبی CLEWs ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در سناریوی نرمال، میانگین شاخص CLEWs از ۰/۷۵ در روش مرسوم به ۱/۰۰ در روش MPC افزایش یافت. در سناریوی خشکسالی نیز این مقادیر به ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۸۸ محاسبه شدند که بیانگر بهبود قابل توجه عملکرد سامانه تحت کنترل خودکار است. تحلیل جبهه پارتو نشان داد که استفاده از MPC موجب کاهش هم‌زمان انرژی مصرفی، کاهش انتشار کربن و افزایش پایداری هیدرولیکی می‌شود. در مجموع، اتصال عددی مدل بهره‌برداری سطحی به چارچوب CLEWs تصویری جامع از تعامل میان آب، انرژی و محیط‌زیست فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌سازی مدیریتی و برنامه‌ریزی راهبردی در شرایط کم‌آبی و تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC)؛ کفایت توزیع آب؛ عملکرد هیدرولیکی شبکه؛ مصرف انرژی بهره‌برداری؛ انتشار دی‌اکسید کربن.

۱- مقدمه (Hosseini Jolfan et al., 2020). در این بین، بخش کشاورزی

که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب در بسیاری از کشورها به‌شمار می‌رود، نقش اصلی در شکل‌گیری پایداری یا ناپایداری منابع آب تجدیدپذیر ایفا می‌کند (FAO, 2017; Jovanovic et al., 2020). بر مبنای گزارش (FAO (2021)، حدود ۷۰ درصد از کل برداشت‌های آب در جهان به بخش کشاورزی

در دهه‌های اخیر، کاهش منابع آب تجدیدپذیر به دلیل شدت یافتن خشکسالی‌ها، افزایش نرخ تقاضای آب در نتیجه افزایش جمعیت و بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب، به‌ویژه در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، چالش‌های بنیادینی در مدیریت پایدار منابع آب ایجاد کرده است

با این حال، تجزیه و تحلیل‌های بین‌بخشی پیامدهای انرژی و زیست‌محیطی در قالب چارچوب‌های ترکیبی مانند CLEWs در آن بررسی مورد توجه قرار نگرفت. همچنین در پاسخ به چالش‌های مربوط به پویایی محیطی و تغییر شرایط بهره‌برداری، Pacheco et al. (2024) الگوریتم تطبیقی را طراحی کردند که با بهره‌گیری از مدل کنترل خودکار پیش‌بین (MPC)، امکان تنظیم خودکار فراسنجه-های کنترلی را فراهم می‌سازد و موجب افزایش دقت در توزیع آب و کاهش مصرف بی‌رویه منابع شد. همچنین در تازه‌ترین بررسی، Ranjbar et al. (2025) ترکیب نوآورانه‌ای از MPC و SMPC را پیشنهاد کردند که به بهبود چشمگیر در پایش و کنترل سطح آب در کانال‌های آبیاری منجر شد. اما با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه خودکارسازی بهره‌برداری کانال‌های آبیاری، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالای پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار، نیاز به زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و آموزش بهره‌برداران همچنان وجود دارد (Mohammadi et al., 2017; Shahsavandi et al., 2024). همچنین، بسیاری از پژوهش‌ها تمرکز خود را بر روی بهبود کارایی سامانه‌های کنترل خودکار در سطح مزرعه معطوف کرده‌اند و کمتر به رابطه بین بهره‌برداری از منابع آب، انرژی و پایداری محیط‌زیست پرداخته‌اند. در حالی که مدل‌های کنترلی مانند MPC بتواند به بهبود توزیع آب در زمان واقعی هستند، این مدل‌ها به‌تنهایی قادر به ارزیابی اثرگذاری‌های انرژی و محیط‌زیستی ناشی از تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری نیستند؛ از این‌رو، اتصال مدل‌های کنترلی مانند MPC به چارچوب تحلیلی همچون $CLEWs^2$ ، که با هدف درک پیوندهای سامانه‌ای میان منابع مختلف و اثرگذاری‌های متقابل تصمیم‌های در حوزه آب، انرژی و محیط‌زیست طراحی شده است، می‌تواند چشم‌انداز جامع‌تری از پایداری سامانه ارائه دهد (Xu et al., 2018; Mirzaei et al., 2020). در واقع، بهره‌گیری از چارچوب‌های بین‌بخشی مانند CLEWs در کنار مدل‌های کنترل پیش‌بین، می‌تواند نه تنها به بهبود بهره‌وری هیدرولیکی منجر شود، بلکه مسیر تصمیم‌سازی را

اختصاص دارد، در حالی که این عدد در ایران بیش از ۹۰ درصد است. با این حال، بازده انتقال و توزیع آب در بسیاری از شبکه‌های آبیاری کشور همچنان پایین و در حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد است (Ebrahimipak et al., 2026). شبکه‌های آبیاری سنتی اغلب بر پایه ساختارهای مکانیکی و بدون سامانه‌های هوشمند مدیریت می‌شوند، که این امر منجر به نبود تعادل در توزیع آب، هدررفت بالا، نابرابری بین ناحیه‌های بهره‌بردار و اتکای فزاینده به منابع آب زیرزمینی شده است (Lahjouj et al., 2021). این مسئله نه تنها ظرفیت منابع آب را تحت فشار قرار داده، بلکه موجب افزایش مصرف انرژی، هزینه‌های پمپاژ و حتی تهدید امنیت غذایی در مقیاس محلی شده است (Kamrani et al., 2020). با در نظر گرفتن تعامل تنگاتنگ بین آب، انرژی، غذا و محیط زیست، نیاز به چارچوب‌هایی که بتوانند این مؤلفه‌ها را به صورت یکپارچه و کمی تحلیل و مدیریت کنند، بیش از پیش احساس می‌شود. از این رو، به‌کارگیری مدل‌هایی که قادر به تبیین این پیچیدگی‌ها و ارائه راهکارهای هوشمند برای بهره‌برداری پایدار باشند، ضرورتی انکارناپذیر است. در دهه‌های اخیر، بررسی خودکارسازی بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری و کاهش هدررفت آب مورد توجه قرار گرفته است.

(Fele et al., 2014) با معرفی ساختار کنترلی مبتنی بر MPC^1 ، زمینه‌ای برای کاهش هزینه‌های ارتباطی و افزایش کارایی در کنترل کانال‌های آبیاری فراهم کرد. در ادامه، Zhu et al. (2023) ساختاری توزیع‌شده را مبتنی بر الگوریتم ADMM پیشنهاد دادند که برای سامانه‌های شاخه‌دار پیچیده مناسب‌تر بود و توانست به شکل موثرتری، تصمیم‌گیری‌های محلی را با هدف‌های سراسری هماهنگ کند. در پژوهشی دیگر توسط Hosseini Jolfan et al. (2023) در یکی از پژوهش‌ها به بررسی اثرگذاری‌های خودکارسازی بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری پرداخته‌اند. آنان نشان دادند که استفاده از سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) در شبکه آبیاری قزوین منجر به کاهش برداشت از آبخوان و صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود.

1. Model Predictive Control

2. Climate, Land-use, Energy and Water Systems

در این راستا، این پژوهش با هدف گسترش یک چارچوب ترکیبی میان مدل‌های بهره‌برداری آب سطحی و چارچوب تحلیلی CLEWs انجام شده است. برخلاف پژوهش‌های پیشین که عمدتاً بر بهبود عملکرد هیدرولیکی یا خودکارسازی بهره‌برداری تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش برای نخستین بار پیامدهای انرژی و محیط زیستی تصمیم‌های بهره‌برداری در سطح عملیاتی شبکه آبیاری به صورت کمی و نظام‌مند تحلیل شده است. در این مدل، خروجی‌های عددی دو رویکرد بهره‌برداری شامل روش متداول (دریچه‌های آمیل) و کنترل پیش‌بین متمرکز (MPC) به شاخص‌های ترکیبی CLEWs متصل شده‌اند تا ارزیابی چندبعدی از پایداری شبکه در شرایط نرمال و خشکسالی ارائه شود.

نوآوری اصلی این پژوهش در سه محور متمرکز است:

۱. پیوند عددی میان مدل بهره‌برداری با چارچوب تحلیلی CLEWs در مقیاس شبکه آبیاری.
۲. تعریف آستانه مدیریتی برای فعال‌سازی برداشت‌های زیرزمینی.
۳. تدوین راهبردهای سیاستی چند سطحی مبتنی بر داده‌های کفایت، انرژی و انتشار کربن دی‌اکسید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش انجام پژوهش

روند انجام این پژوهش بر مبنای شکل ۱ در پنج گام اصلی طراحی و اجرا شد که به شرح زیر می‌باشد:

گام اول: طراحی دو رویکرد بهره‌برداری

در این مرحله، دو الگوی بهره‌برداری برای کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین گسترش داده شد. در رویکرد نخست، شرایط موجود شبکه آبیاری بر پایه عملکرد دریچه‌های آمیل (Amil Regulator) بازسازی شد که بیانگر وضعیت سنتی بهره‌برداری است. در رویکرد دوم، سامانه کنترل خودکار متمرکز مبتنی بر سامانه کنترل پیش‌بین (MPC) گسترش داده شده تا عملکرد شبکه به صورت پویا و بهینه مدیریت شود. پیاده‌سازی هر دو روش در سطح عملیاتی و با لحاظ محدودیت‌های فنی، هیدرولیکی و محیطی انجام گرفت.

به سوی کاهش اثرگذاری های کربنی و افزایش تاب‌آوری شبکه‌های آبیاری هدایت کند. با این حال، تاکنون پژوهشی که این دو رویکرد را در سطح عملیاتی و بر پایه داده‌های واقعی شبکه‌های آبیاری ترکیب کرده باشد، گزارش نشده است. چارچوب CLEWs با ترکیب داده‌های کمی و ساختارهای تحلیلی، امکان بررسی پویای سناریوهای مختلف بهره‌برداری و پیش‌بینی پیامدهای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی آن‌ها را فراهم می‌سازد. این مدل قادر است نشان دهد که چگونه یک تصمیم در زمینه بهره‌برداری آب می‌تواند به مصرف بیشتر انرژی، تولید گازهای گلخانه‌ای یا افت تولید کشاورزی منجر شود. از این نظر CLEWs ابزار کلیدی در تحقق هدف های گسترش پایدار و مدیریت سازگار منابع در شرایط نبود قطعیت تلقی می‌شود (Howells et al., 2013).

با این حال، در اغلب پژوهش‌ها کاربرد CLEWs، تمرکز بر سطح کلان (ملی یا حوضه‌ای) بوده و کمتر به سطح های میانی یا عملیاتی مانند شبکه‌های آبیاری پرداخته شده است. در واقع، CLEWs در بیشتر موارد به عنوان یک مدل بالادستی برای سیاست‌گذاری استفاده شده و فاقد پیوند عددی با فرآیندهای بهره‌برداری روزمره در شبکه‌های توزیع آب بوده است. در نتیجه، به رغم قابلیت‌های مفهومی بالا، CLEWs به تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای فنی و اجرایی در سطح های محلی باشد؛ مگر آن‌که به مدل‌های عددی بهره‌برداری و کنترلی متصل شود (Ringler et al., 2013).

با توجه به آنچه که بیان شد، در بسیاری از شبکه‌های آبیاری، فرآیندهای تصمیم‌گیری مرتبط با تخصیص آب، بهره‌برداری از منابع مکمل و مدیریت انرژی همچنان مبتنی بر قضاوت انسانی و تجربه‌های سنتی است. این در حالی است که چالش‌های نوظهور مانند خشکسالی‌های شدیدتر، افت کیفیت منابع آبی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیازمند سازوکارهایی پاسخ‌گو، عددی و مبتنی بر داده برای پشتیبانی از تصمیم‌سازی در سطح عملیاتی هستند (Bwambale et al., 2022). از این رو، ترکیب مدل‌های بهره‌برداری دقیق با چارچوب‌های تحلیلی همچون CLEWs، می‌تواند مسیر نوینی برای پیوند دانش فنی با تصمیم‌سازی سیاستی فراهم آورد.

محیط‌زیست محاسبه شد. این رویکرد امکان مقایسه‌ی کمی بین روش‌های بهره‌برداری و تحلیل جامع اثرگذاری‌های متقابل آن‌ها را فراهم ساخت.

گام چهارم: تعریف آستانه‌های مدیریتی

بر پایه طبقه‌بندی CLEWs، آستانه‌های مدیریتی برای فعال‌سازی برداشت از منابع آب زیرزمینی تعریف شد. این تعاریف به جهت کمک به مدیران شبکه در شرایط کمبود منابع آب سطحی و در جهت پایداری منابع آب زیرزمینی طراحی شد.

گام پنجم: تفسیر نتایج و تدوین راهبردهای کاربردی:

در مرحله پایانی، خروجی‌های عددی مدل‌ها شامل شاخص‌های کفایت، انرژی و محیط‌زیست به زبان قابل‌درک برای دو گروه اصلی ذی‌نفع ترجمه شد: گروه اول مدیران شبکه آبیاری، برای برنامه‌ریزی تخصیص منابع و تصمیم‌سازی مدیریتی؛ و گروه دوم بهره‌برداران (کشاورزان)، به‌منظور آگاهی از وضعیت پایداری تأمین آب در ناحیه خود. در این راستا، خروجی‌ها به‌صورت جدول‌های تحلیلی، نقشه‌های پایداری و نمودارهای شاخص CLEWs تدوین شد.

مدل MPC با هدف کاهش خطای تحویل جریان و کمینه‌سازی انرژی مصرفی، در محیط MATLAB پیاده‌سازی شد

گام دوم: تعریف سناریوی بهره‌برداری

دو سناریوی اصلی برای تحلیل سامانه تعریف شد:

- (i) سناریوی نرمال، که بر مبنای جریان‌های مرجع و شرایط معمول بهره‌برداری شبکه شبیه‌سازی شد.
 - (ii) سناریوی خشکسالی، که در آن بده جریان ورودی به کانال اصلی ۲۰ درصد کمتر از شرایط متوسط فرض شد تا وضعیت کم‌آبی و افت جریان بازنمایی شود.
- عملکرد هر دو رویکرد در قالب این دو سناریو، با شاخص‌های کمی شامل کفایت تأمین (PA)، انرژی مصرفی (E)، و انتشار دی‌اکسید کربن (CO₂) ارزیابی شد.

گام سوم: گسترش چارچوب تحلیلی CLEWs

به‌منظور تحلیل هم‌زمان رابطه‌های میان سه بُعد آب، انرژی و محیط‌زیست، چارچوب تحلیلی CLEWs گسترش یافت. این چارچوب بر مبنای شاخص کفایت ناحیه‌های، ناحیه‌های بهره‌برداری را در سه سطح «پایدار»، «وابسته به منابع مکمل» و «بحرانی» طبقه‌بندی کرد. در این ساختار، شاخص ترکیبی CLEWs با وزن‌های ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۳ به ترتیب برای زیرشاخص‌های آب، انرژی و

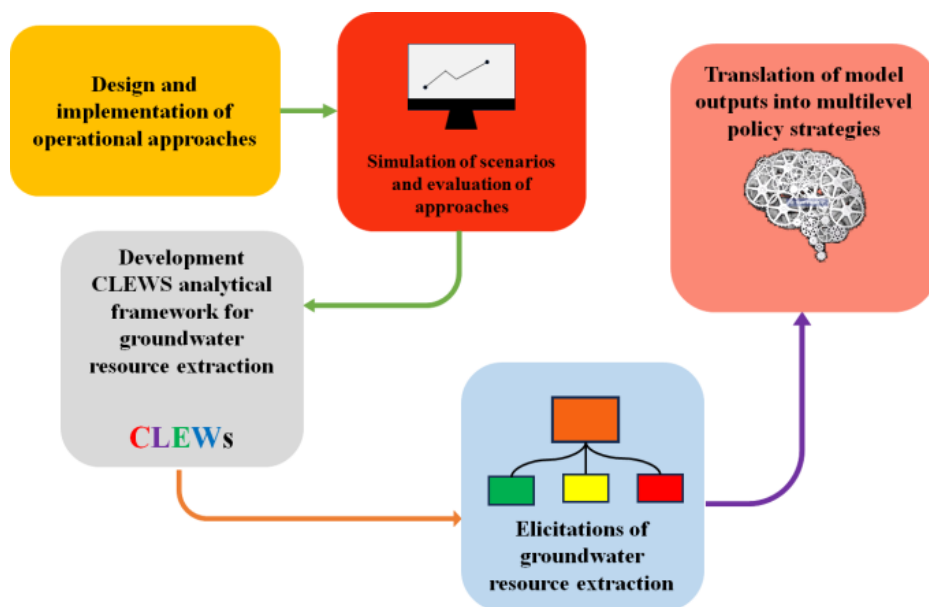


Fig. 1 Research Methodology Framework

شکل ۱ روندنمای پژوهش

۲-۲- منطقه مورد بررسی

منطقه مورد نظر در این پژوهش، شبکه آبیاری قزوین است که در استان قزوین واقع شده و یکی از مهم‌ترین سامانه‌های آبیاری سطحی کشور به‌شمار می‌رود. این شبکه با هدف گسترش کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری منابع آب سطحی طراحی شده و عمدتاً از منابع سد طالقان و رودخانه‌های فصلی تغذیه می‌شود. وسعت اراضی تحت پوشش این شبکه حدود ۵۹ هزار هکتار بوده و در قالب ده ناحیه آبیگر مستقل سازماندهی شده است. آب ورودی به شبکه قزوین عمدتاً از طریق سد طالقان تأمین می‌شود و مقدار آن بسته به شرایط هیدرولوژیکی هر سال

متغیر است. بر مبنای آمار شرکت آب منطقه‌ای قزوین، متوسط حجم سالانه ورودی به شبکه طی سال‌های اخیر بین ۱۸۵ تا ۳۳۰ میلیون مترمکعب در نوسان بوده است (Hosseini Jolfan et al., 2018). از نظر طراحی، این شبکه بر پایه سامانه‌های کلاسیک کانال باز و دریاچه‌های مکانیکی (آمیل) ساخته شده است. بهره‌برداری از آن نیازمند حضور پیوسته اپراتورها بوده و در برابر تغییرپذیری های جریان یا نوسان های نیاز آبی، انعطاف‌پذیری محدودی دارد. این ساختار سنتی موجب کاهش کارایی انتقال، افزایش هدررفت، و وابستگی بیشتر به منابع آب زیرزمینی شده است.

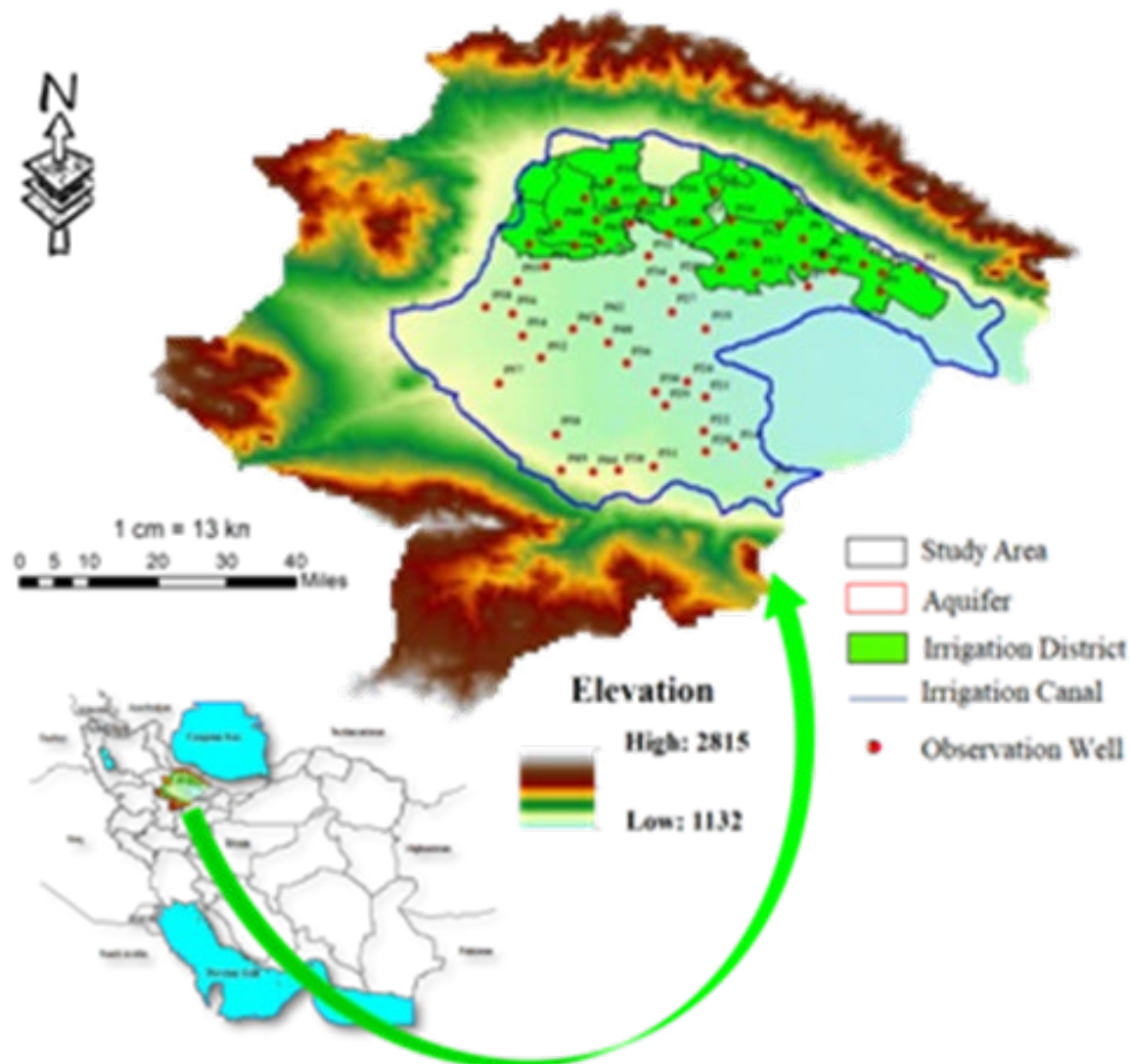


Fig. 2 Geographical location of the case study area

شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی

بکارگیری سامانه های کنترل خودکار، لازم است شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در سامانه مورد بررسی و ارزیابی عملکرد وضعیت موجود توزیع آب انجام گیرد. برای این منظور لازم است از مدل‌های شبیه‌ساز هیدرودینامیکی استفاده شود که قادر باشد با کنترل‌گرهای طراحی شده لینک شده و دستورهای کنترلی را به‌صورت همزمان دریافت و اجرا کند (Hassani et al. 2019; Rodriguez et al. 2020). در این پژوهش از مدل انتگرالی-تاخیری (ID)، گسترش داده شده در نرم افزار MatLab استفاده شد، تا شرایط هیدرولیکی موجود در کانال را شبیه‌سازی کرده و امکان تبادل آسان داده‌ها با کنترل‌گرها را فراهم کند. بر مبنای این مدل، قسمتی از کلنال انتقال آب، مطابق شکل ۳، که بین دو سازه تنظیم سطح آب قرار گرفته باشد بازه نامیده می‌شود. هر بازه شامل دو بخش است، این دو بخش عبارت هستند از بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب که براین مبنای دو مشخصه اصلی هر بازه عبارت‌اند از: زمان تاخیر (T_c) و سطح ذخیره (A_s). محاسبه عمق سطح آب در انتهای هر بازه بر مبنای رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$h(k+1) = -\frac{T_c}{A_s} q_{out}(k) + \frac{T_c}{A_s} q_{in}(k-k_d) - \frac{T_c}{A_s} q_{off-take}(k) + h(k) \quad (1)$$

شبکه آبیاری قزوین از تأسیسات انحراف آب رودخانه طالقان شامل سدهای انحرافی سنگبان و زیاران و تونل انتقال آب طالقان به طول تقریبی ۱/۹ کیلومتر تشکیل شده است. آب انتقال‌یافته از طریق کانال‌های روباز درجه یک و دو به طول حدود ۹۴ و ۲۲۰ کیلومتر با ظرفیت ۳ تا ۳۰ مترمکعب بر ثانیه و همچنین شبکه کانال‌های درجه سه و چهار به طول تقریبی ۸۸۰ کیلومتر در ناحیه های مختلف توزیع می‌شود. شبکه آبیاری قزوین به‌عنوان بررسی موردی در این پژوهش انتخاب شد زیرا از یک‌سو دارای ساختار هیدرولیکی کلاسیک و قابل بازطراحی است و از سوی دیگر، در معرض چالش‌هایی مانند کاهش منابع آب سطحی، فشار بر آب‌های زیرزمینی و نیاز فوری به بهبود بهره‌برداری با رویکردهای هوشمند قرار دارد. ویژگی‌های ساختاری، داده‌های تاریخی و اهمیت اقتصادی منطقه، این شبکه را به گزینه‌ای مناسب برای گسترش و آزمون چارچوب ترکیبی بهره‌برداری و مدل CLEWs تبدیل کرده است.

۲-۳- شبیه‌سازی بهره‌برداری سامانه توزیع آب در کانال اصلی آبیاری

۲-۳-۱- شرایط وضعیت موجود بهره‌برداری (دریچه آمیل)

به منظور ارزیابی میزان بهبود فرآیند بهره‌برداری، با

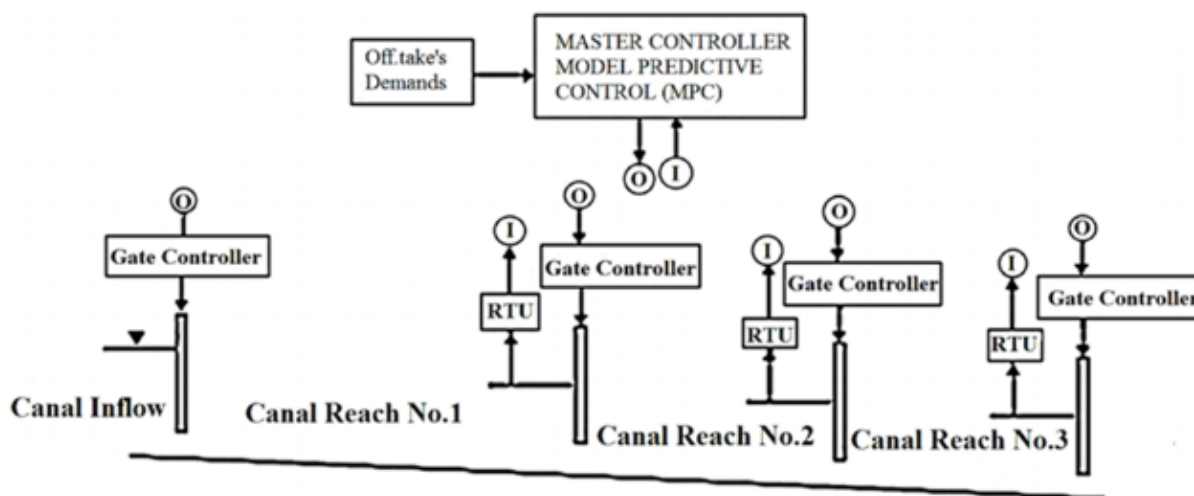


Fig. 4 overview of the control system (MPC)

شکل ۴ نمای کلی از سامانه کنترلی MPC

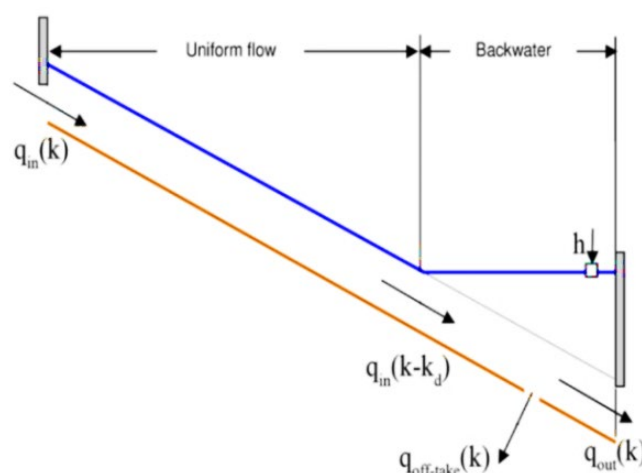


Fig. 3 Schematization of a modeled canal reach by Integrator Delay model

شکل ۳ نمای مدلسازی یک بخش از کانال با مدل انتگرال تاخیری

استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده شده در سامانه کانال‌ها را می‌توان در حالت کلی به صورت دوگانه با رابطه ۲ بیان کرد (Overloop, 2006).

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k) \\ y(k) &= C.x(k) \end{aligned} \quad (2)$$

تابع هدف مورد استفاده برای سامانه کانال به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Overloop, 2006).

$$\min J = X^T.Q.X + U^T.R.U \quad (3)$$

که در آن J تابع هدف بوده و می‌بایست کمینه شود، X متغیرهای حالت، U اعمال کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی می‌باشند.

با تعریف h_{ref} به عنوان مقدار هدف و تعریف خطا به صورت رابطه ۳ و جایگذاری آن در رابطه ۲ می‌توان رابطه میزان خطا در هر بازه کانال را بر مبنای جریان ورودی و جریان‌های خروجی محاسبه کرد (van Overloop et al., 2008).

$$e(k) = h(k) - h_{ref} \quad (4)$$

۲-۴-۲ شاخص‌های عملکرد در چارچوب یکپارچه CLEWs

به منظور ارزیابی همسان اثرگذاری های بهره‌برداری شبکه آبیاری بر سه بُعد اصلی منابع، شامل آب، انرژی و انتشار در این پژوهش از چارچوب CLEWs استفاده شد. این

۲-۳-۲- سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش بین (MPC) این روش، یک سامانه‌ی کنترلی است که در روش و فن طراحی آن افزون بر روش کنترل پس‌خور و پیش‌خور، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترلی در (رقوم سطح آب) استفاده می‌شود. وظیفه کنترلی رساندن سطح آب پائین‌دست بازه به سطح آب هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان تنظیم شدگی درجه‌ها بیان می‌شود. کنترلیگر MPC با بهره‌گیری از ترکیب دو عامل افق زمانی و مدل ریاضی کانال تحت کنترل (مدل درونی سامانه) اقدام به پیش‌بینی متغیرهای هیدرولیکی سامانه در آینده می‌کند.

صورتان‌های کنترل در هر گام زمانی بر مبنای وضعیت هیدرولیکی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در کانال مشخص می‌شود (Overloop, 2006; Hashemy, 2019). در این پژوهش، افق پیش‌بینی و کنترل به ترتیب ۴ و ۲ گام زمانی در نظر گرفته شد. در شکل ۴ شمای کلی مدل کنترلیگر MPC در یک سامانه آبی قابل مشاهده است. در این پژوهش از مدل فضای حالت خطی به دست آمده از رابطه سنت و نانت گسسته شده جهت تعریف مدل درونی MPC استفاده شده است (Overloop et al., 2005).

در کنترل سامانه آبی به روش MPC از مدل فضای حالت که امکان فشرده سازی ترکیب بندی‌های چند متغیره مدل‌های خطی را فراهم می‌کنند، جهت بیان مدل درونی

فراسنجه بر مبنای رابطه زیر و همسان با روش پیشنهادی (Howells et al. 2013) محاسبه شد:

$$E_i = \frac{Q_i \cdot H \cdot \gamma}{\eta_P} \quad (6)$$

که در این رابطه Q_i برداشت کل از چاه بر حسب (m^3) ، H عمق چاه بر حسب (m) و η_P بازده پمپ می‌باشد.

انتشار CO_2 ناشی از انرژی مصرفی

انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) ناشی از مصرف انرژی در فرآیند پمپاژ، بر مبنای ضریب انتشار سوخت یا منبع انرژی الکتریکی محاسبه شد. این رابطه همسان با دستورالعمل‌های IEA, 2020 و رویکرد ارائه‌شده توسط (Howells et al. 2013) تعریف شد:

$$CO_2^i = E_i * 0.43 \quad (7)$$

شاخص ترکیبی CLEWs برای هر ناحیه

$$CLEWS_i = w_1 A_i + w_2 \left(1 - \frac{E_i}{E_{max}}\right) + w_3 \left(1 - \frac{CO_2^i}{CO_2^{max}}\right) \quad (8)$$

در این پژوهش، وزن‌ها با رویکرد توازن چندمعیاره و پس از انجام آزمون حساسیت انتخاب شدند. که در آن w_1 ، w_2 ، w_3 وزن‌های مربوط به ابعاد آب، انرژی و محیط‌زیست است. که در آن وزن مربوط به بخش آب برابر 0.4 و مجموع دو بخش دیگر (انرژی و محیط زیست) برابر 0.6 در نظر گرفته شد. به گونه‌ای که مجموع وزن‌ها برابر ۱ باشد. در رابطه ۸، مقادیر نرمال شده انرژی و انتشار کربن در اکسید به صورت مقیاس بدون بعد بین ۰ تا ۱ تنظیم شدند تا قابلیت مقایسه بین ناحیه‌های فراهم شود. همچنین CO_2^{max} و E_{max} به ترتیب بیشترین مقدار کربن منتشر شده و انرژی استفاده شده در بین ناحیه‌های شبکه آبیاری می‌باشد. این شاخص نشان دهنده عملکرد کلی بهره‌برداری در هر ناحیه از دیدگاه CLEWs است. محاسبه CLEWs برای هر ناحیه و هر گام زمانی به صورت خودکار در محیط MATLAB R2023b اجرا شد. برای این منظور، یک تابع اختصاصی گسترش داده شد تا ورودی‌های مربوط به کفایت تحویل، مصرف انرژی و میزان انتشار را از خروجی‌های مدل نظارتی پیش‌بین MPC

چارچوب به عنوان ابزاری برای تحلیل هم‌زمان متغیرهای مرتبط با پایداری طراحی شد تا بتواند بازخورد کمی میان عملکرد هیدرولیکی، هزینه‌های انرژی و پیامدهای محیط زیستی را در فرآیند کنترل شبکه نشان دهد. در پژوهش‌های گذشته، مدل CLEWs اغلب در مقیاس ملی یا سیاستی برای ارزیابی سناریوهای کلان استفاده شده است، در حالی که در این پژوهش، این چارچوب برای نخستین بار در مقیاس عملیاتی شبکه آبیاری به صورت پویا با الگوریتم کنترل پیش‌بین MPC کوپل شد. برای تحلیل جامع عملکرد سامانه بهره‌برداری از منابع آب در شبکه آبیاری قزوین، مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی در سه بعد آب، انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای که منتج به پایداری کشاورزی می‌شود، تعریف و محاسبه شدند. در این رویکرد، شاخص CLEWs به صورت یک شاخص ترکیبی نرمال شده تعریف شد که سه زیرشاخص اصلی را شامل می‌شود:

کفایت تحویل آب

بر مبنای تعریف ارائه شده (Molden and Gate, 1990)، شاخص کفایت تحویل آب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$PA = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \right) \quad (5)$$

که در آن، PA شاخص کفایت برای کل سامانه، T فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد، R تعداد کل آبیگرهای اندازه‌گیری شده Q_D بده جریان تحویلی و Q_R بده جریان مورد نیاز است. بر مبنای توصیه (Molden and Gate, 1990) طبقه‌بندی شاخص کفایت به صورت جدول ۱ بیان می‌شود:

جدول ۱ طبقه‌بندی شاخص کفایت تامین آب

Table 1 Water Supply Adequacy Index classification (Molden and Gate, 1990)

Performance Classes			
Indicator	Good	Mediocre	Poor
Adequacy(PA)	0.9-1.0	0.8-0.89	< 0.8

انرژی مصرفی پمپاژ

انرژی مصرفی پمپاژ (E) به عنوان تابعی از حجم برداشت از منبع، ارتفاع پمپاژ و بازده کل سامانه محاسبه شد. این

کلان به‌طور معمول شامل رابطه‌های غیرخطی و سناریوهای پیچیده است، اما در مقیاس شبکه‌های آبیاری، به‌کارگیری چنین ساختارهایی با محدودیت داده و تفسیر مدیریتی همراه است. از این‌رو، همانند پژوهش‌های پیشین، ابعاد آب، انرژی و محیط‌زیست به‌صورت شاخص‌های نرمال‌شده و با ترکیب خطی وزن‌دار ترکیب شدند.

وزن‌دهی شاخص‌ها بر مبنای نقش غالب آب به‌عنوان متغیر کنترلی اصلی در شبکه آبیاری انجام شد، به‌گونه‌ای که وزن آب برابر ۰/۴ و وزن انرژی و محیط‌زیست هر یک برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. این انتخاب با ابده جریانات موجود در حوزه CLEWs و رویکردهای شاخص‌محور سازگار بوده و در پژوهش‌های چندی برای تجزیه و تحلیل پایداری سامانه‌های منابع در مقیاس عملیاتی پیشنهاد شده است (Howells et al., 2013; Liu et al., 2018; Endo et al., 2017; Ringler et al., 2013).

۲-۵- اتصال مدل‌های بهره‌برداری به چارچوب CLEWs

چارچوب CLEWs (آب، انرژی، غذا، و پایداری محیط زیست) با هدف تحلیل هم‌افزایی‌ها و تضادهای میان اجزای کلیدی گسترش پایدار طراحی شده است. در این پژوهش، اتصال میان مدل‌های بهره‌برداری و چارچوب CLEWs به‌صورت اتصال ترتیبی^۱ و در مقیاس زمانی شبیه‌سازی انجام شد، به‌گونه‌ای که خروجی‌های مدل بهره‌برداری در هر سناریو به‌عنوان ورودی تحلیلی برای ارزیابی ابعاد انرژی و محیط‌زیست در چارچوب CLEWs استفاده شده‌اند. در این فرآیند، تبادل داده به‌صورت گام‌به‌گام در هر بازه زمانی شبیه‌سازی انجام نشده است، بلکه شاخص‌های عملکرد نهایی بدست‌آمده از اجرای مدل‌های بهره‌برداری در هر سناریو، پس از پایان شبیه‌سازی، به چارچوب CLEWs منتقل شده‌اند. بنابراین، CLEWs در این پژوهش به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی بالادستی^۲ برای تفسیر پیامدهای انرژی و محیط‌زیستی تصمیم‌های بهره‌برداری به‌کار گرفته شده است، نه به‌عنوان یک مدل کنترلی هم‌زمان. در این

دریافت کرده و مقدار شاخص CLEWs را برای هر سناریو محاسبه کند. شبه‌کد این تابع به شرح زیر است:

```
function CLEWS = calc_clews(PA, E, CO2, ww, we, wem)
```

محاسبه زیرشاخص‌ها %

$I_w = PA / 100$; کفایت تحویل نرمال‌شده %

$I_e = E / \max(E)$; انرژی نرمال‌شده %

$I_m = CO2 / \max(CO2)$; انتشار نرمال‌شده %

ترکیبی CLEWS محاسبه %

```
CLEWS = ww*Iw + we*(1 - Ie) + wem*(1 - Im);
end
```

این تابع برای همه ناحیه‌های شبکه و دو سناریوی بهره‌برداری (حالت متداول و حالت کنترل‌شده با MPC) اجرا شد. به‌منظور اطمینان از پایداری عددی، همه شاخص‌ها پیش از ترکیب، در بازه [0,1] نرمال شدند. شاخص CLEWs محاسبه‌شده به‌صورت یک معیار کلیدی برای مقایسه عملکرد دو رویکرد بهره‌برداری استفاده شد. همچنین به‌منظور بررسی تبادلهای میان هدف‌های چندگانه، تحلیل چندهدفه (Multi-objective Analysis) بر مبنای تغییرپذیری‌های وزن‌های مؤلفه‌های CLEWs انجام شد. در این تجزیه و تحلیل، وزن‌های مربوط به آب، انرژی و انتشار در محدوده‌های مختلف تغییر داده شدند تا اثر نسبی هر مؤلفه بر عملکرد شبکه مشخص شود. بر این مبنای، مجموعه‌ای از سناریوهای وزنی ایجاد و برای هر سناریو شاخص‌های کفایت، انرژی و CLEWs محاسبه شدند. در مرحله‌های بعد، با استفاده از این داده‌ها، جبهه پارتو میان شاخص کفایت و انرژی مصرفی ترسیم شد تا بهترین ترکیب وزنی (trade-off point) میان هدف‌های متضاد مشخص شود.

لازم به یادآوری است در این پژوهش، به‌منظور سازگارسازی چارچوب CLEWs با مقیاس بهره‌برداری شبکه آبیاری و امکان اتصال عددی آن به مدل‌های کنترلی، از رویکرد شاخص‌محور و نرمال‌شده CLEWs استفاده شد. اگرچه چارچوب CLEWs در پژوهش‌های

1. Sequential Coupling
2. Analytical Meta-Framework

شبهه‌سازی با شرایط واقعی، فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی برای مدل‌های بهره‌برداری و شاخص CLEWs انجام شد. داده‌های شاهد بده جریان و سطح آب در ایستگاه‌های کنترلی شبکه برای سال‌های مرجع ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ مورد استفاده قرار گرفتند. معیارهای ارزیابی عملکرد شامل ضریب تعیین (R^2)، خطای میانگین مربعات (RMSE) و انحراف نسبی (RE) محاسبه شدند.

نتایج واسنجی نشان داد که مدل MPC توانسته است تغییرپذیری‌های تراز و بده جریان را با دقت بالایی ($R^2 > 0.95$) پیش‌بینی کند. همچنین شاخص CLEWs محاسبه‌شده با داده‌های واقعی همسانی شایانی داشته است، به طوری که میانگین اختلاف آن کمتر از ۵٪ برآورد شد. این امر نشان‌دهنده اعتبار مدل گسترش‌یافته در تحلیل ترکیبی بهره‌برداری و پایداری شبکه است.

لازم به یادآوری است که هدف این پژوهش، بازتولید دقیق دینامیک زمانی جریان و تراز آب در مقیاس لحظه‌ای نبوده است، بلکه تمرکز اصلی بر ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکه در قالب شاخص‌های تجمعی و مدیریتی مانند کفایت تأمین، مصرف انرژی و پیامدهای محیط زیستی قرار داشته است. از این رو، اعتبارسنجی مدل بر مبنای شاخص‌های آماری R^2 و RMSE انجام شده که توانایی مدل در بازنمایی رفتار کلی سامانه و روندهای حاکم بر توزیع آب را نشان می‌دهند. این رویکرد، متناسب با ماهیت عملکردمحور^۲ پژوهش بوده و در پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی شبکه‌های آبیاری و کنترل بهره‌برداری متداول است.

۲-۷- سناریوهای بهره‌برداری

آزمون سامانه کنترل خودکار پیش‌بین طراحی شده در این پژوهش، توسط دو سناریوی انجام گرفت. به جهت بررسی کارایی سامانه کنترل پیش‌بین در مقایسه با شرایط حال بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین (دریچه‌های آمیل)، سناریوی اول طراحی شد. هدف اصلی در سناریوی اول بررسی وضعیت موجود بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط بهره‌برداری

راستا، شاخص کفایت تأمین آب که از خروجی مدل‌های بهره‌برداری ID و MPC استخراج شدند، به‌عنوان متغیر واسط کلیدی میان بخش آب و سایر اجزای CLEWs تعریف شد. کاهش مقدار این شاخص، منجر به فعال‌سازی برداشت از منابع آب زیرزمینی شده و این برداشت اضافی، به‌صورت مستقیم به افزایش انرژی مصرفی پمپاژ و انتشار گاز گلخانه‌ای کربن دی‌اکسید منجر می‌شود (Hosseini jolfan et al., 2023). بدین ترتیب، رابطه عددی و علی^۱ میان بهره‌برداری هیدرولیکی و پیامدهای انرژی و محیط‌زیست برقرار شدند. برای فعال‌سازی اجزای CLEWs بر مبنای سطح تأمین آب، آستانه‌های مدیریتی تعریف شد. این آستانه‌ها تعیین می‌کنند که در چه سطحی از کفایت تأمین، منابع جایگزین مانند چاه‌های آب زیرزمینی باید وارد مدار بهره‌برداری شوند:

- وضعیت پایدار (کفایت $\leq 90\%$): تنها آب سطحی، بدون نیاز به منابع مکمل
- وضعیت وابسته ($80\% \leq$ کفایت $< 90\%$): استفاده محدود از چاه‌های مجاز
- وضعیت بحرانی (کفایت $< 80\%$): بهره‌برداری گسترده از منابع زیرزمینی و افزایش فشار بر محیط

این طبقه‌بندی مبنای ارزیابی‌های انرژی و پایداری در چارچوب CLEWs به‌شمار آیند. در گام نهایی، تحلیل چندهدفه میان کفایت تأمین آب، انرژی مصرفی و انتشار کربن دی‌اکسید انجام گرفت و جبهه پارتو برای شناسایی ترکیب‌های بهینه تصمیم‌گیری‌های مدیریتی استخراج شدند. در پایان به‌منظور شفاف‌سازی روند اتصال میان مدل‌های بهره‌برداری و چارچوب CLEWs، روندنمای مفهومی فرآیند تبادل داده و تحلیل چندبعدی در شکل (۵) ارائه شده است که پیوستگی مرحله‌های، متغیرهای ورودی و خروجی، و منطق تصمیم‌گیری مدیریتی را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد.

۲-۶- اعتبارسنجی مدل

به‌منظور اطمینان از درستی مدل‌سازی و همخوانی نتایج

1. causal-numerical linkage
2. Performance-based

(MPC)، شاخص کفایت در همه ناحیه ها برابر با ۱۰۰٪ به دست آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که سامانه کنترل خودکار MPC با پیش‌بینی تغییرپذیری های جریان، تنظیم هم‌زمان دریچه‌ها و حذف نوسان های تراز سطح آب، موفق به تأمین پایدار و کامل نیاز آبی در همه بخش‌های شبکه شده است. تحلیل آماری اختلاف میانگین کفایت در دو روش با آزمون t زوجی نشان داد که این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار است ($t(9)=5.00, p<0.001$). همچنین میانگین کلی کفایت در روش متداول برابر با ۸۴/۳٪ و در روش MPC معادل ۱۰۰٪ بوده که بیانگر افزایش میانگین حدود ۱۵/۷ درصد واحد است. بیشترین بهبود عملکرد در ناحیه های پایین‌دست (۷ تا ۱۰) مشاهده شد، جایی که کنترل پیش‌بین توانست افت جریان و هدرروی حجمی را به کمینه رسانده و تأمین آب را به سطح کامل برساند. این الگو بیانگر کارایی بالای سامانه MPC در جبران محدودیت‌های زمانی و هیدرولیکی شبکه‌های طولانی است. از دید مدیریتی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که استفاده از کنترل پیش‌بین نه‌تنها موجب افزایش عدالت مکانی در توزیع آب می‌شود، بلکه قابلیت انعطاف شبکه را در برابر تغییرپذیری های جریان ورودی نیز ارتقا می‌دهد. بر این مبنا، می‌توان پیشنهاد و تاکید کرد که استفاده از کنترل متمرکز پیش‌بین به‌عنوان یک سیاست بهره‌برداری هوشمند، جایگزین روش‌های سنتی مبتنی بر تنظیم‌های مکانیکی شود. در ادامه‌ی تحلیل کفایت تأمین آب، میزان انرژی مصرفی در فرآیند بهره‌برداری شبکه آبیاری برای دو روش کنترل متداول (آمیل) و کنترل پیش‌بین در سناریوی نرمال بررسی شد. انرژی مصرفی در این بررسی به‌صورت مجموع انرژی الکتریکی مورد نیاز برای برداشت آب از منابع زیرزمینی در هر ناحیه محاسبه شد. از آنجا که سامانه آمیل در بسیاری از ناحیه های پایین‌دست با کمبود آب روبه‌رو بود، بخشی از نیاز آبی از طریق پمپاژ چاه‌ها تأمین شده و منجر به افزایش قابل توجه مصرف انرژی شده است.

نرمال می‌باشد. منظور از بهره‌برداری نرمال زمانی است که کانال اصلی آبیاری تنها وظیفه انتقال آب به کانال‌های درجه دو را بدون هیچ محدودیتی بر میزان آب ورودی به کانال اصلی به عهده دارد. برداشت آب در آبیگرها با یک برنامه زمانی مشخص و به دور از هرگونه نکانه ناگهانی و تغییرپذیری‌های شدید به سامانه کانال انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری در شرایط نرمال بر مبنای داده‌های واقعی بهره‌برداری شبکه آبیاری قزوین در سال آبی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در نظر گرفته شده است. هدف اصلی در سناریوی دوم، بررسی وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط کمبود آب (خشکسالی) می‌باشد. بنابراین در سناریوی دوم، مقدار بده جریان ورودی به کانال اصلی ۲۰ درصد کاهش یافت که این الگو بر مبنای شرایط خشکسالی سال ۱۴۰۰ در شبکه در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج به دست آمده از شاخص‌های عملکرد

چارچوب یکپارچه CLEWs در سناریوی اول

در این بخش، عملکرد شبکه آبیاری قزوین در شرایط بهره‌برداری نرمال، با دو رویکرد مبتنی بر دریچه‌های آمیل و سامانه کنترل پیش‌بین (MPC) مقایسه شدند. شاخص کفایت تأمین آب (PA) که نسبت حجم آب دریافتی به حجم آب مورد نیاز را در هر ناحیه نشان می‌دهد، برای ده ناحیه از کانال اصلی محاسبه شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که در روش متداول آمیل، مقدار کفایت از ۱۰۰٪ در ناحیه بالادست به ۷۰٪ در ناحیه پایین‌دست کاهش یافته است. این روند کاهش‌ی بیانگر افت تدریجی تراز سطح آب و تأخیر زمانی در واکنش سازه‌های مکانیکی است که منجر به توزیع یکپارچه نبودن ورود آب در طول شبکه می‌شود. بر مبنای طبقه‌بندی (Molden and Gates, 1990)، ناحیه های ۱ تا ۴ با کفایت بالاتر از ۰/۹ در محدوده «عملکرد خوب» و ناحیه های ۸ تا ۱۰ با کفایت کمتر از ۰/۸ در محدوده «عملکرد ضعیف» قرار می‌گیرند (شکل ۵). بر مبنای آنچه که در شکل ۵ قابل ملاحظه است، در روش کنترل پیش‌بین

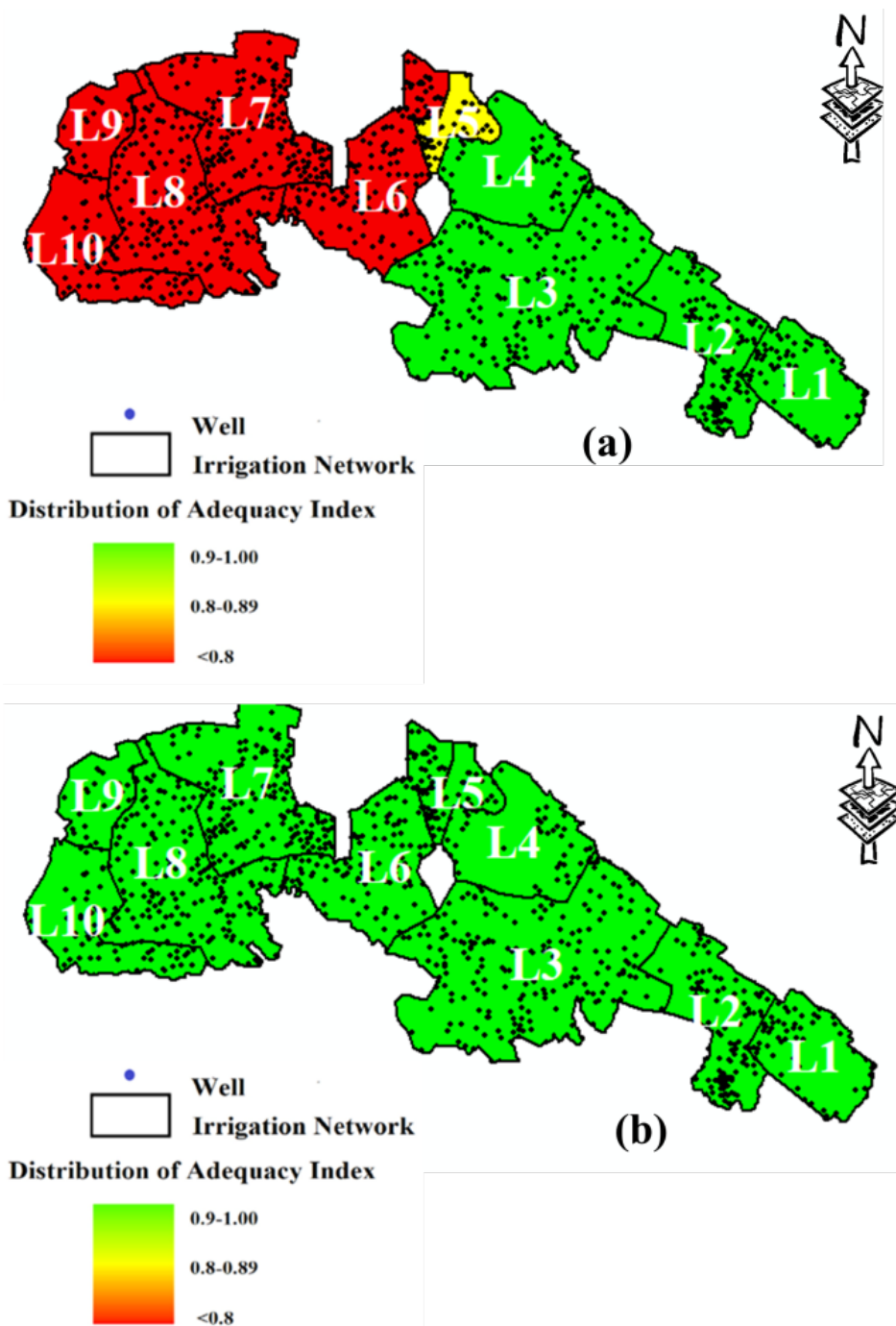


Fig. 5 Operational status under the normal scenario and spatial distribution of the Water Delivery Adequacy Index: (a) conventional system, (b) centralized MPC system

شکل ۵ وضعیت بهره‌برداری در سناریوی نرمال و توزیع شاخص کیفیت تأمین آب (a) سامانه سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

مقادیر بسیار بالا رسیده است. بیشترین مقدار مصرف انرژی مربوط به ناحیه ۸ با حدود ۵۰,۲۵۲,۷۳۶ کیلووات‌ساعت بوده است، که به‌وضوح نشان‌دهنده وابستگی شدید این ناحیه به منابع زیرزمینی است. در مقابل، با استفاده از کنترل پیش‌بین MPC و حذف نیاز به پمپاژ، مصرف انرژی

نتایج به دست آمده از محاسبه در جدول ۳ آورده شده است. در روش متداول، مقدار انرژی مصرفی بین ناحیه‌های مختلف تفاوت چشمگیری دارد، به‌گونه‌ای که در ناحیه‌های بالادست، پمپاژی صورت نگرفته ($E \approx 0$)، اما در ناحیه‌های پایین‌دست به دلیل افت کیفیت تأمین آب، مصرف انرژی به

مبنای ضریب‌های انتشار برق در ایران انجام شد. به عبارت دیگر، هر واحد انرژی مصرفی در فرآیند پمپاژ با ضریب یادشده به انتشار CO₂ تبدیل شد تا بتوان اثرگذاری های محیط زیستی دو روش بهره‌برداری را به صورت کمی ارزیابی کرد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که الگوی انتشار CO₂ دقیقاً از الگوی مصرف انرژی تبعیت می‌کند. در روش متداول (دریچه‌های آمیل)، ناحیه های بالادست عملاً بدون انتشار بوده‌اند، در حالی که در ناحیه های پایین دست، به‌ویژه ناحیه های ۷ و ۸، بیشترین مقدار انتشار مشاهده شده است. این ناحیه های به دلیل افت کفایت تحویل آب و نیاز به برداشت از چاه‌های عمیق، بیشترین فشار محیط زیستی را بر سامانه وارد کرده‌اند. در مقابل، در روش MPC با حذف کامل انرژی پمپاژ، انتشار CO₂ نیز در همه ناحیه‌ها به صفر رسیده است.

در همه ناحیه ها در عمل صفر شد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، کنترل پیش‌بین توانسته است در مقیاس کل شبکه، مصرف انرژی را به صورت کامل حذف کند. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از کنترل هوشمند با بهینه‌سازی زمان‌بندی دریچه‌ها، موجب کاهش فشار هیدرولیکی در ناحیه های پایین دست شده و نیاز به برداشت از چاه‌های زیرزمینی را از بین می‌برد. در تحلیل مقایسه‌ای میان دو روش، کاهش مصرف انرژی در MPC نسبت به روش آمیل از نظر آماری بسیار معنی‌دار است، $t(9)=4.89$. ($p < 0.001$) در عمل، این کاهش نه تنها سبب صرفه‌جویی اقتصادی چشمگیر در هزینه برق می‌شود، بلکه نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی فسیلی ایفا می‌کند. در ادامه‌ی بررسی‌های انرژی، میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف انرژی پمپاژ در ناحیه های مختلف شبکه محاسبه شد. این محاسبه‌ها بر

جدول ۳ مقدارهای شاخص‌های عملکرد بهره‌برداری محاسبه‌شده در سناریوی نرمال برای هر دو سامانه بهره‌برداری

Table 3 Mean values of the calculated operational performance indicators under normal conditions for both the conventional system and the centralized MPC controller

Operation method	Canal Reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amil Regulator	Adequacy	100	95	92	90	85	80	79	77	72	70
	E(kwh)	0	0	0	0	292442	158534	411712	502527	34593	169393
	CO2(kg)	0	0	0	0	321600	166580	343580	463550	38050	186300
	CLEWS	1	0.97	0.86	0.93	0.74	0.72	0.45	0.38	0.84	0.65
MPC	Adequacy	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E(kwh)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CO2(kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CLEWS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

بخش مواد و روش‌ها محاسبه شد که در آن وزن بخش آب، انرژی و محیط زیست به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۳ در نظر گرفته شد. لازم به یادآوری است که، شاخص CLEWs عددی نرمال‌شده بین صفر و یک است که مقدار بالاتر آن نشان‌دهنده پایداری بیشتر سامانه است.

۳-۲- تحلیل شاخص ترکیبی CLEWs در سناریوی نرمال

برای ارزیابی یکپارچه عملکرد سامانه بهره‌برداری در سه بُعد اصلی منابع (آب، انرژی و محیط زیست)، از شاخص ترکیبی CLEWs استفاده شد. این شاخص با استفاده از روابط

جدول ۴ شاخص CLEWS در ناحیه های مختلف تحت دو روش بهره‌برداری (سناریوی نرمال)

Table 4 CLEWS index in various regions under two resource utilization approaches (Normal Scenario)

Canal Reaches	CLEWS – MPC	CLEWS – Amil	Relative Change (%)
1	1.00	1.00	0
2	1.00	0.97	2.8
3	1.00	0.86	13.9
4	1.00	0.93	6.9
5	1.00	0.745	25.5
6	1.00	0.726	27.4
7	1.00	0.452	54.8
8	1.00	0.308	69.2
9	1.00	0.84	15.7
10	1.00	0.658	34.2

۳-۳- تحلیل چندهدفه عملکرد شبکه با استفاده از جبهه پارتو (Pareto Front) در سناریوی نرمال

در این بخش، به منظور تحلیل هم‌زمان اثرگذاری های بهره‌برداری شبکه بر دو هدف اصلی یعنی کفایت تأمین آب و مصرف انرژی پمپاژ، از روش تحلیل چندهدفه پارتو (Pareto Front) استفاده شد. این تحلیل به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا رابطه بین دو هدف متضاد، یعنی افزایش کفایت و کاهش انرژی مصرفی را در قالب یک منحنی بهینه مشاهده کنند. نمودار شکل ۷ جبهه پارتو را برای ناحیه های مختلف شبکه آبیاری قزوین در سناریوی نرمال نشان می‌دهد. در این نمودار، هر نقطه نمایانگر عملکرد یکی از ناحیه های ده‌گانه شبکه در شرایط بهره‌برداری متداول (دریچه آمیل) است. همان‌گونه که دیده می‌شود، با حرکت از ناحیه های بالادست به پایین دست، کفایت تأمین آب از ۱۰۰ به ۷۰ درصد کاهش یافته و در مقابل، انرژی مصرفی برای برداشت آب از منابع زیرزمینی افزایش چشمگیری دارد. این الگو بیانگر تضاد ذاتی میان دو هدف است؛ هرچه تلاش شود تا آب بیشتری در ناحیه های پایین دست تأمین شود، مصرف انرژی و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد. منحنی آبی در شکل، مرز پارتو واقعی شبکه را نشان می‌دهد که محدوده عملکرد بهینه میان دو هدف را مشخص می‌کند. نقطه‌های واقع بر روی این منحنی، حالت‌هایی را نشان می‌دهند که در آن بهبود یکی از هدف ها تنها با کاهش

نتایج به دست آمده از محاسبه این شاخص در ناحیه های مختلف کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین در سناریوی نرمال در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود، مقدار CLEWS در روش متداول دارای روند کاهشی از بالادست به پایین دست است، در حالی که در روش کنترل پیش‌بین، مقدار شاخص در همه ناحیه ها برابر یک بوده و بیانگر عملکرد پایدار است. در روش متداول، ناحیه های بالادست (۱ تا ۴) با CLEWS بالاتر از ۰/۹ در محدوده عملکرد پایدار قرار دارند، در حالی که ناحیه های پایین دست (۷ تا ۱۰) به‌ویژه ناحیه ۸ با مقدار ۰/۳۰۸ در وضعیت بحرانی قرار گرفته‌اند. این الگو بیانگر توزیع نابرابر پایداری در شبکه و اثر تجمعی افت هیدرولیکی، افزایش انرژی مصرفی و انتشار CO₂ در طول مسیر است. در مقابل، با استفاده از روش MPC، شاخص CLEWS در همه ناحیه‌ها برابر با ۱/۰ محاسبه شد که بیانگر حذف کامل افت‌های عملکردی و دستیابی به پایداری کامل در همه ابعاد است (شکل ۶). از دیدگاه تحلیلی، میانگین CLEWS در روش متداول برابر ۰/۷۵ و در روش MPC برابر ۱/۰ به دست آمد. بر مبنای آزمون t زوجی، این اختلاف در سطح اطمینان ۹۹٪ معنادار است (t(9)=6.21, p<0.001). نتایج نشان می‌دهد که رویکرد MPC نه تنها عملکرد هیدرولیکی را بهبود داده است، بلکه به شکل مستقیم باعث کاهش وابستگی انرژی و حذف انتشار کربن نیز شده است. این هم‌افزایی بین ابعاد سه‌گانه، جوهره اصلی فلسفه CLEWS را در مقیاس شبکه آبیاری نشان می‌دهد.

با بازتنظیم وزن‌های تصمیم‌گیری در چارچوب CLEWs یا اصلاح سیاست‌های بهره‌برداری، بهبودشان داد.

هدف دیگر ممکن است. در مقابل، نقطه‌های پایین‌تر از منحنی پارتو بیانگر عملکردهای بهینه نبوده‌اند؛ که می‌توان

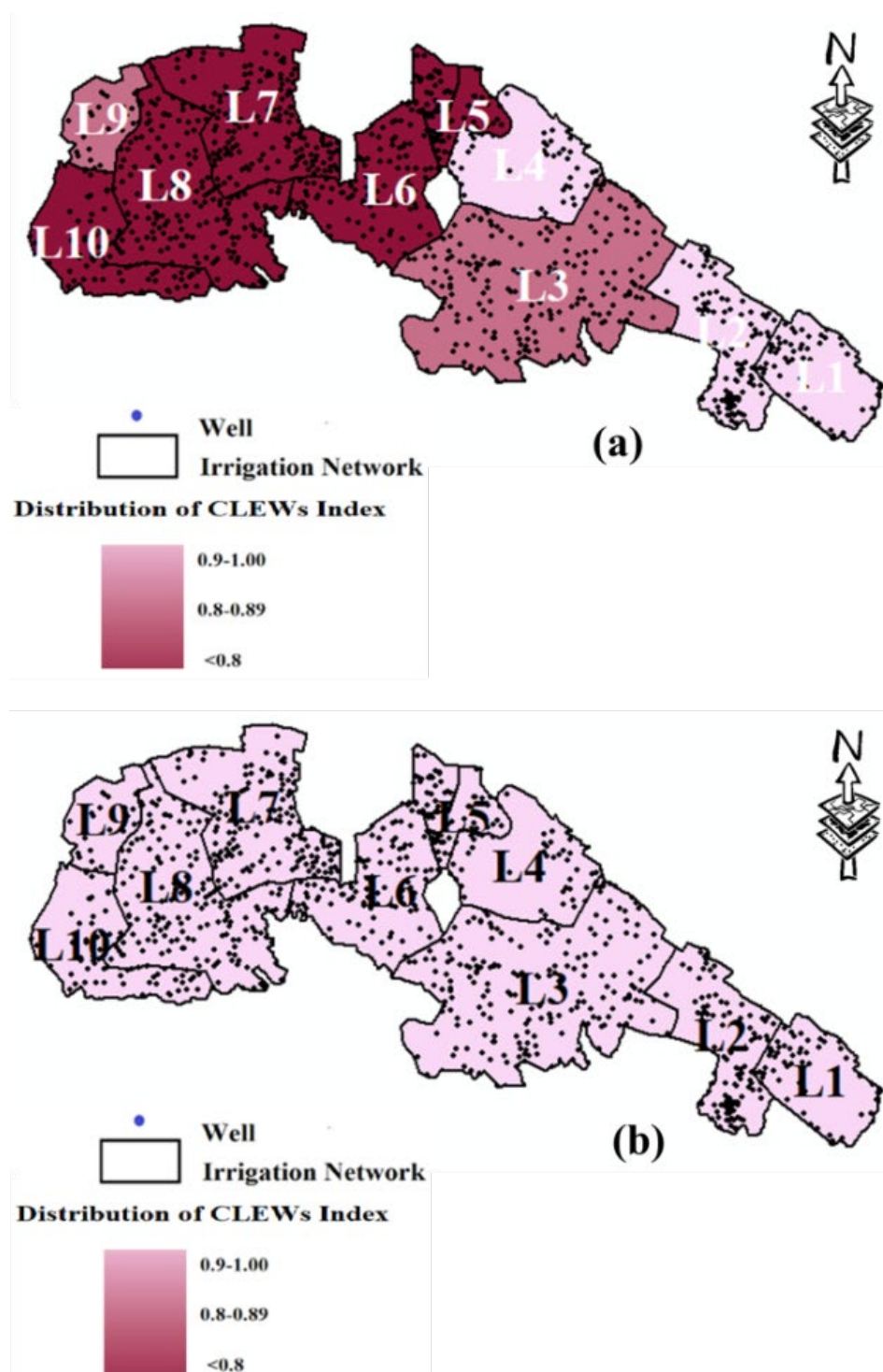


Fig. 6 Spatial distribution of the CLEWs index across the 10 irrigation network regions under two operating methods: (a) conventional system, (b) centralized MPC system

شکل ۶ وضعیت شاخص CLEWs در ناحیه‌های شبکه آبیاری تحت دو روش بهره‌برداری (a) سامانه سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

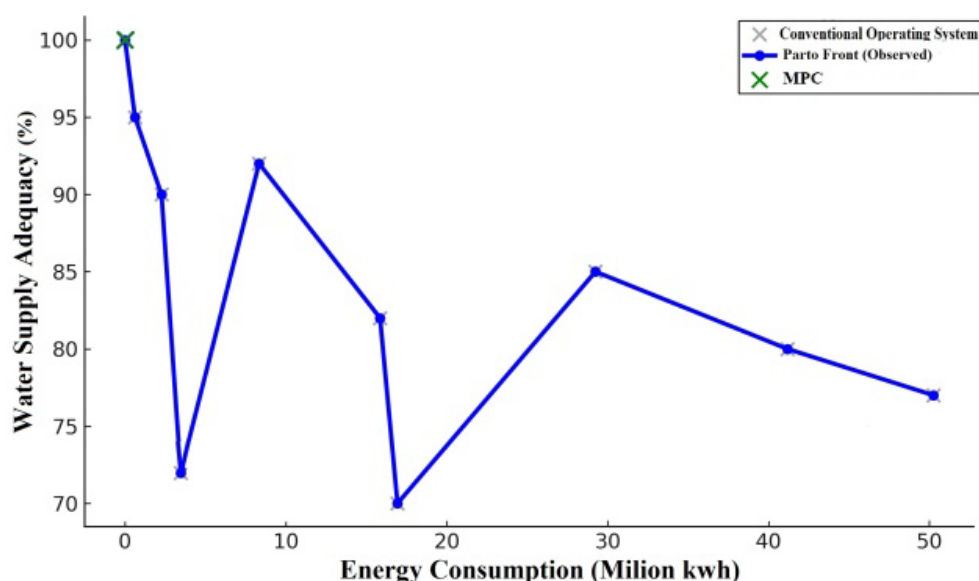


Fig. 7 Pareto front between water supply adequacy and energy consumption (Normal Scenario)

شکل ۷ جبهه پارتو بین کیفیت تأمین آب و مصرف انرژی (سناریوی نرمال)

عملکرد یکنواختی ندارد. در واقع، بین کیفیت تأمین آب و انرژی مصرفی رابطه‌ای متضاد برقرار است. از دید مدیریتی، منحنی پارتو می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌سازی بهینه در سیاست‌گذاری بهره‌برداری استفاده شود؛ به‌گونه‌ای که مدیر شبکه بتواند با توجه به شرایط منابع آب، انرژی و اولویت‌های محیط‌زیستی، نقطه‌ای از این جبهه را به‌عنوان راهبرد اجرایی انتخاب کند.

همچنین، نقطه سبزرنگ در شکل ۶ عملکرد کنترل‌گر پیش‌بین مدل MPC را نشان می‌دهد. در این حالت، سامانه بدون نیاز به برداشت از منابع زیرزمینی، به کیفیت ۱۰۰ درصدی در همه ناحیه‌ها دست یافته است. این نقطه مرز تئوریک پایداری سامانه را مشخص می‌کند و به‌عنوان بهینه‌ترین حالت ممکن در بهره‌برداری شبکه شناخته می‌شود. به‌طور کلی، این نمودار نشان می‌دهد که حتی در شرایط نرمال نیز، شبکه آبیاری از نظر پایداری منابع،

جدول ۵ مقدارهای شاخص‌های عملکرد بهره‌برداری محاسبه‌شده در سناریوی خشکسالی برای هر دو سامانه بهره‌برداری

Table 5 Mean values of the calculated operational performance indicators under water shortage conditions for both the conventional system and the centralized MPC controller

Operation method	Canal Reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amil Regulator	Adequacy	93	85	77	73	70	70	-	-	-	-
	E(kwh)	0	62054	833269	226762	292442	158534	411712	502527	34593	169393
	CO2(kg)	0	67950	877680	241400	321600	166580	343580	463550	38050	186300
	CLEWS	0.90	0.70	0.67	0.64	0.64	0.65	0	0	0	0
MPC	Adequacy	80	82	80	92	90	82	81	82	83	82
	E(kwh)	102928	62045	651770	0	0	792671	201015	261417	16325	120911
	CO2(kg)	112191	67639	710429	0	0	864012	219106	284944	17794	131793
	CLEWS	0.88	0.89	0.88	0.93	0.91	0.87	0.86	0.87	0.88	0.87

۳-۴- نتایج به دست آمده از شاخص‌های عملکرد

چارچوب یکپارچه CLEWs در سناریوی دوم

به منظور بررسی عملکرد سامانه بهره‌برداری در شرایط محدودیت منابع، سناریوی خشکسالی با کاهش ۲۰ درصدی جریان ورودی به کانال اصلی شبیه‌سازی شد.

این سناریو بیانگر وقوع خشکسالی متوسط بوده و هدف آن ارزیابی پایداری شبکه آبیاری در شرایط کم‌آبی و سنجش کارایی سامانه کنترل پیش‌بین (MPC) در مقایسه با روش متداول بهره‌برداری مبتنی بر درجه‌های آمیل است. در این چارچوب، شاخص‌های کفایت تأمین آب، انرژی مصرفی، انتشار CO₂ و شاخص مرکب CLEWs برای هر ناحیه محاسبه و تحلیل شدند تا تأثیر کاهش منابع بر پایداری آب، انرژی و محیط‌زیست مشخص شود (جدول ۵). نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان داد که در روش آمیل، کاهش جریان ورودی منجر به افت شدید کفایت تحویل آب در ناحیه‌های پایین دست شده است. مقدار کفایت از ۹۳٪ در ناحیه ۱ به کمتر از ۷۰٪ در ناحیه‌های میانی کاهش یافته و در ناحیه‌های ۷ تا ۱۰ جریان آب سطحی در عمل قطع شد. این کمبود موجب فعال شدن برداشت از منابع زیرزمینی شده است. در نتیجه، مصرف انرژی به حدود ۱۹۰ میلیون کیلووات‌ساعت و انتشار CO₂ به حدود ۱۸۳۲۷ تن رسید. لازم به توضیح است که در روش بهره‌برداری متداول (درجه‌های آمیل)، مصرف انرژی پمپاژ تابع مستقیم فعال‌سازی کامل منابع آب زیرزمینی است. از آنجا که در هر دو سناریوی نرمال و خشکسالی، ناحیه‌های پایین دست شبکه در این روش به سطح بحرانی کفایت رسیده و به طور کامل متکی به برداشت زیرزمینی می‌شوند، مقدار مصرف انرژی در این ناحیه‌های دو سناریو یکسان محاسبه شده است. تفاوت سناریوها در روش آمیل بیشتر در ناحیه‌های بالادست و در مرحله‌های آغازین بهره‌برداری بروز می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که در روش‌های بهره‌برداری ناکارآمد، خشکسالی بنا به ضرورت منجر به افزایش مصرف انرژی نمی‌شود، بلکه باعث تسریع ورود شبکه به وضعیت وابستگی کامل انرژی بر می‌گردد.

میانگین شاخص CLEWs برای کل شبکه در این روش

۰/۵۸۷ محاسبه شد که بیانگر وضعیت نیمه‌پایدار تا بحرانی است. تحلیل مکانی شاخص CLEWs نشان داد که ناحیه‌های بالادست (۱ تا ۳) عملکرد نسبی پایدار دارند (CLEWs بین ۰/۷۲ تا ۰/۸۹)، اما ناحیه‌های پایین دست (۷ تا ۱۰) به دلیل وابستگی کامل به منابع زیرزمینی، در وضعیت بحرانی قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار کنونی بهره‌برداری بدون انعطاف لازم برای شرایط کم‌آبی بوده و پاسخ مناسبی به تغییرپذیری‌های مکانی تقاضا و عرضه ندارد (شکل ۸). در مقابل، سامانه کنترل پیش‌بین توانست با بهره‌گیری از پیش‌بینی جریان و الگوریتم تنظیم خودکار درجه‌ها، توزیع جریان را بهینه‌سازی کند. در این حالت، میانگین شاخص کفایت شبکه ۸۱٪ به دست آمد و در همه ناحیه‌های آب سطحی تأمین شده است. مصرف انرژی کل شبکه در حالت MPC حدود ۸۹ میلیون کیلووات‌ساعت بود که نسبت به حالت آمیل کاهش ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد. در نتیجه آن، مجموع انتشار CO₂ نیز به حدود ۹۷۰۸ تن کاهش یافت. یعنی ۴۷ درصد کمتر از روش آمیل، میانگین شاخص CLEWs در این حالت ۰/۷۲۲ محاسبه شد که بیانگر ارتقای پایداری سامانه است. ناحیه‌های ۲، ۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۰ در محدوده پایدار (CLEWs > ۰.۷) قرار داشتند و تنها ناحیه‌های ۷ و ۸ به دلیل وابستگی بیشتر به پمپاژ، عملکرد ضعیف‌تری نشان دادند. بنابراین، اتصال مدل کنترل MPC به چارچوب CLEWs موجب شد تا ابعاد آب، انرژی و محیط‌زیست به صورت هم‌زمان در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ شوند و سامانه بتواند تعادلی میان کفایت آبی، مصرف انرژی و پایداری محیط زیستی برقرار کند. مقایسه دو روش بهره‌برداری در سناریوی خشکسالی نیز نشان داد که استفاده از MPC باعث بهبود چشمگیر پایداری شبکه شده است. در روش آمیل، نیمی از ناحیه‌های شبکه در وضعیت بحرانی (CLEWs < 0.6) قرار داشتند، در حالی که در حالت MPC هیچ ناحیه‌ای دچار فروپاشی کامل عملکرد (CLEWs = 0) نشد. افزون بر این، میانگین CLEWs از ۰.۵۸۷ به ۰.۷۲۲ افزایش یافت و مجموع انتشار CO₂ نیز در حدود نصف شد. از دیدگاه مکانی، الگوریتم پیش‌بین توانست عملکرد ناحیه‌های میانی را به محدوده پایدار منتقل کند. با وجود

مجموع، MPC توانسته است شبکه را از وضعیت بحرانی به وضعیت نیمه پایدار و پایدار سوق دهد.

این، ناحیه های پایین دست همچنان به دلیل کاهش بار آبی و کاهش بازده انتقال نیازمند اقدام های اصلاحی هستند. در

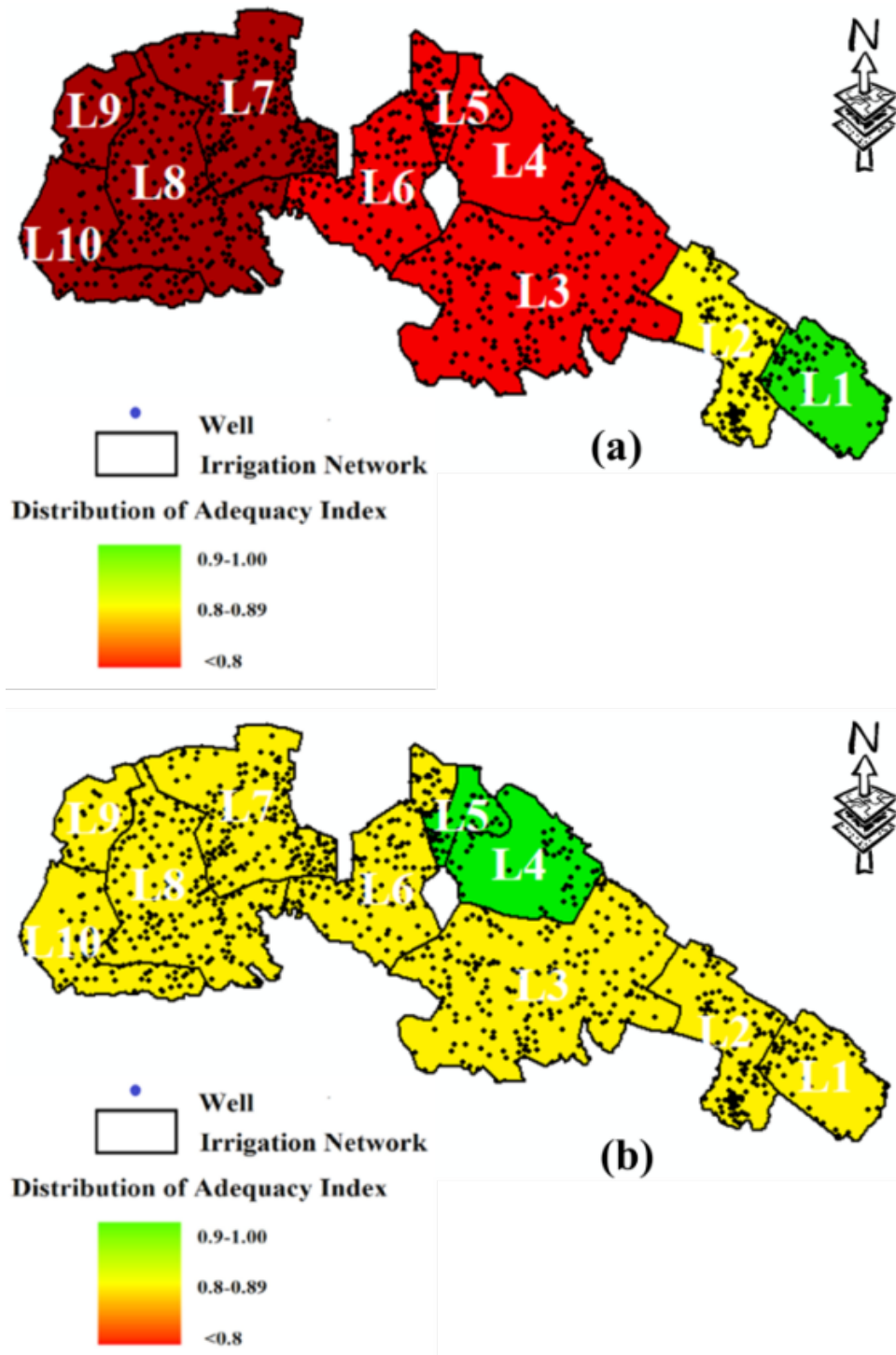


Fig. 8 Operational status under the water shortage scenario and spatial distribution of the Water Delivery Adequacy Index: (a) conventional system, (b) centralized MPC system

شکل ۸ وضعیت بهره‌برداری در سناریوی خشکسالی و توزیع شاخص کفایت تأمین آب (a) سامانه سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

۳-۵- تحلیل شاخص ترکیبی CLEWs در سناریوی خشکسالی

به منظور ارزیابی جامع پایداری سامانه بهره‌برداری شبکه آبیاری قزوین در شرایط کم‌آبی، شاخص ترکیبی CLEWs در سناریوی خشکسالی محاسبه شد. در این مرحله، کاهش ۲۰ درصدی در بده جریان ورودی کانال اصلی لحاظ شد و

دو رویکرد بهره‌برداری متداول (دریچه‌های آمیل) و کنترل پیش‌بین (MPC) مورد مقایسه قرار گرفتند. وزن مؤلفه‌های آب، انرژی و محیط‌زیست به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۳ در نظر گرفته شد و محاسبه‌ها با رابطه‌های ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها انجام گرفت. شاخص CLEWs در بازه ۰ تا ۱ نرمال شده و مقدار بالاتر نشان‌دهنده عملکرد پایدارتر سامانه است.

جدول ۶ شاخص CLEWS در ناحیه‌های مختلف تحت دو روش بهره‌برداری (سناریوی خشکسالی)

Table 6 CLEWS index in various regions under two resource utilization approaches (water shortage scenario)

Canal Reaches	CLEWS – MPC	CLEWS – Amil	Relative Change (%)
1	0.88	0.90	-2.4
2	0.89	0.7	8.1
3	0.88	0.67	24.0
4	0.93	0.64	38.2
5	0.91	0.64	36.9
6	0.87	0.64	0.87
7	0.86	0	0.86
8	0.87	0	0.87
9	0.88	0	0.88
10	0.87	0	0.87

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در شرایط خشکسالی، شاخص CLEWs در روش متداول (آمیل) به‌طور شایانی کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، ناحیه‌های بالادست (۱ تا ۳) همچنان در وضعیت نسبتاً پایدار قرار دارند، اما مقدار شاخص در پایین‌دست (ناحیه‌های ۵ و ۶) به کمتر از ۰/۷ کاهش یافته است که نشان‌دهنده ورود سامانه به محدوده بحرانی پایداری است. از ناحیه ۷ به پایین، انتقال آب به‌طور کامل متوقف شده و مقدار شاخص CLEWs قابل محاسبه نیست. این امر منعکس‌کننده آسیب‌پذیری شدید بخش پایانی شبکه در برابر کمبود منابع سطحی است.

۰/۴۱ و در روش MPC برابر با ۰/۸۸ است. بر مبنای آزمون آماری t زوجی، این اختلاف در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است ($t(6)=5.43, p<0.001$).

۳-۶- تحلیل چندهدفه عملکرد شبکه با استفاده از جبهه پارتو (Pareto Front) در سناریوی خشکسالی

بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل چندهدفه، نمودار جبهه پارتو بین دو شاخص «کفایت تأمین آب» و «انرژی مصرفی» در شکل ۱۰ ترسیم شد. در این نمودار، نقطه‌های مربوط به روش آمیل در بخش پایین‌تر و سمت راست صفحه قرار دارند که بیانگر مصرف انرژی بالاتر در ازای کفایت کمتر است. در حالی که نقطه‌های مربوط به روش MPC در ناحیه‌ی بالاتر و نزدیک به مرز بهینه قرار گرفته‌اند و نشان‌دهنده کارایی بیشتر در استفاده از انرژی هستند.

در مقابل، عملکرد سامانه‌ی کنترل پیش‌بین نشان داد که این الگوریتم توانسته است با بازتخصیص هوشمندانه جریان، کفایت تحویل آب را در همه ناحیه‌ها حفظ کند و در نتیجه مقدارهای CLEWs در بازه‌ی به‌نسبت پایدار ۰/۸۶ تا ۰/۹۳ قرار گرفته‌اند (شکل ۹). مقایسه‌ی میانگین CLEWs در دو روش نشان داد که مقدار میانگین در روش آمیل برابر با

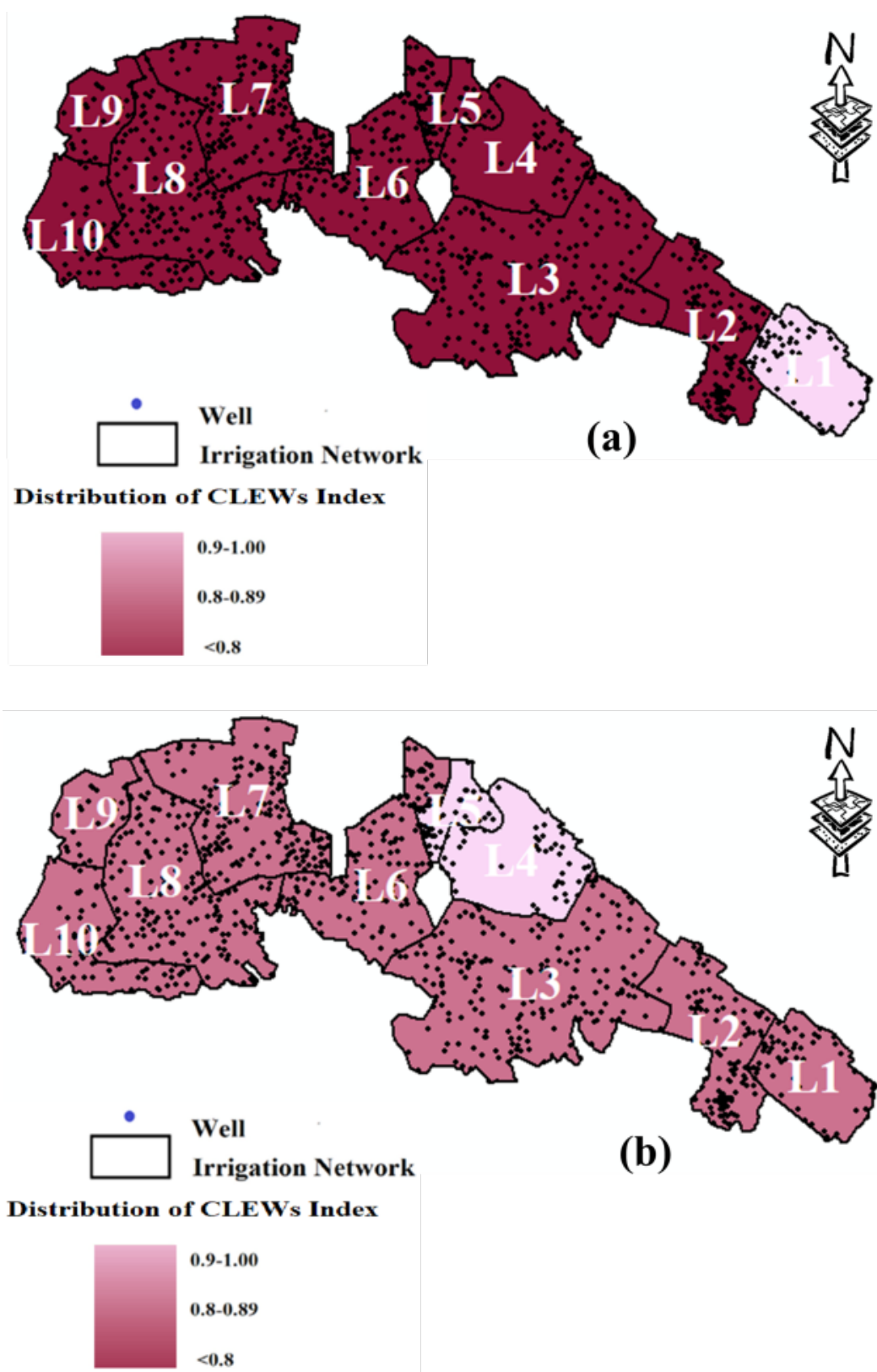


Fig. 9 Spatial distribution of the CLEWS index across the 10 irrigation network regions under two operating methods: (a) conventional system, (b) centralized MPC system

شکل ۹ وضعیت شاخص *CLEWS* در ناحیه های شبکه آبیاری تحت دو روش بهره‌برداری (a) سامانه سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

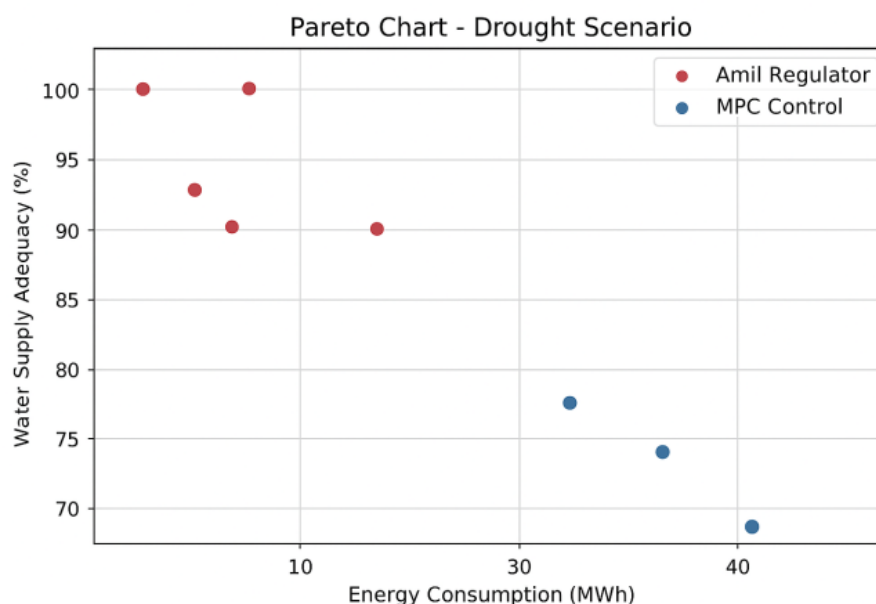


Fig. 10 Pareto front between water supply adequacy and energy consumption (water shortage scenario)

شکل ۱۰ جنبه پارتو بین کفایت تأمین آب و مصرف انرژی (سناریوی خشکسالی)

شبکه‌های آبیاری طولانی، تغییرپذیری های بده جریان ورودی به صورت موجی در طول کانال منتشر شده و با تأخیر زمانی شایان توجهی به ناحیه های پایین دست می‌رسند. در روش متداول مبتنی بر درجه‌های آمیل، تنظیم‌های محلی و واکنشی درجه‌ها قادر به جبران این تأخیر انتقال نبوده و در نتیجه، نوسان های تراز آب و کمبود جریان در پایین دست تشدید می‌شود. در مقابل، کنترل پیش‌بین مدل محور (MPC) با بهره‌گیری از مدل دینامیکی کانال، قادر است رفتار آینده سامانه را در افق زمانی مشخص پیش‌بینی کرده و تنظیم درجه‌ها را به صورت هماهنگ و پیش‌دستانه انجام دهد. این ویژگی موجب کاهش دامنه نوسان های تراز آب، جلوگیری از انباشت خطاهای نظارتی و بهبود توزیع زمانی و مکانی جریان در شبکه می‌شود. یکی از علت‌های اصلی کاهش کفایت در ناحیه های پایین دست در روش متداول، اثر تجمعی خطاهای بهره‌برداری در طول کانال است؛ به طوری که هر انحراف کوچک در تنظیم درجه‌های بالادست، در پایین دست تقویت می‌شود. MPC با نظارت هم‌زمان چندین مقطع کنترلی، این زنجیره انتقال خطا را قطع کرده و پایداری هیدرولیکی شبکه را افزایش می‌دهد. این بهبود هیدرولیکی به طور مستقیم به نتایج

در مقایسه با سناریوی نرمال، نمودار پارتو در سناریوی خشکسالی حالت پیوسته ندارد و داده‌ها به صورت نقطه‌های جداگانه^۱ نمایش داده شده‌اند. علت این موضوع، قطع عملکرد شبکه در ناحیه های پایین دست (۷ تا ۱۰) و گسستگی داده‌های مربوط به انرژی و کفایت است. این تفاوت از لحاظ علمی بیانگر انتقال رفتار سامانه از حالت «پیوسته و پایدار» به وضعیت «گسسته و بحرانی» در اثر محدودیت منابع است. در مجموع، نتایج سناریوی خشکسالی نشان داد که استفاده از کنترل پیش‌بین توانسته است پایداری شبکه را حتی در شرایط تنش آبی حفظ کند و از افزایش مصرف انرژی و انتشار CO₂ نیز جلوگیری کرده است. این موضوع جوهره‌ی اصلی مفهوم CLEWs را در سطح های عملیاتی شبکه آبیاری نشان می‌دهد و اهمیت استفاده از سامانه‌های کنترلی هوشمند در مدیریت تطبیقی خشکسالی را برجسته می‌سازد.

۳-۷- تفسیر هیدرولیکی عملکرد روش‌های

بهره‌برداری

تفاوت عملکرد دو روش بهره‌برداری را می‌توان از منظر رفتار هیدرولیکی جریان در کانال‌های روباز تحلیل کرد. در

اولویت‌بندی مداخله‌ها و تعریف آستانه‌های مدیریتی برای فعال‌سازی منابع مکمل را فراهم می‌کند. این ویژگی به مدیران شبکه امکان می‌دهد تا تصمیم‌گیری‌های بهره‌برداری را نه تنها بر مبنای کفایت تأمین آب، بلکه با در نظر گرفتن پیامدهای انرژی و محیط زیستی انجام دهند. از دیدگاه بهره‌برداران نیز، نتایج این چارچوب می‌تواند مبنایی برای همانندسازی الگوی کشت، به‌کارگیری روش‌های آبیاری با بازده بالا و کاهش خطرپذیری اقتصادی در شرایط کم‌آبی باشد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب کنترل پیش‌بین با چارچوب CLEWs می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مؤثر در مدیریت تطبیقی شبکه‌های آبیاری، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده شود و زمینه‌ساز گسترش سیاست‌های بهره‌برداری هوشمند در روبروئی با تغییرپذیری‌های اقلیم باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: تجزیه و تحلیل داده‌ها، مدلسازی، نتایج و بحث، نگارش نسخه اول مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای اول، بررسی نتایج، ویرایش نهائی.

انرژی و محیط زیستی گزارش شده در چارچوب CLEWs منجر شده است؛ به‌گونه‌ای که افزایش کفایت تأمین آب سطحی در روش MPC، نیاز به برداشت از منابع زیرزمینی را کاهش داده و در نتیجه مصرف انرژی پمپاژ و انتشار دی‌اکسیدکربن را به کمترین میزان احتمالی رسانده است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف گسترش و به‌کارگیری چارچوب CLEWs در مقیاس شبکه آبیاری و اتصال آن به سامانه کنترل پیش‌بین (MPC)، رویکردی نوین برای تحلیل هم‌زمان ابعاد آب، انرژی و محیط‌زیست در سطح عملیاتی نیز ارائه می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی دو سناریوی نرمال و خشکسالی نشان داد که استفاده از MPC، نه تنها موجب بهبود شاخص‌های هیدرولیکی شبکه می‌شود، بلکه به‌صورت معناداری مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را نسبت به روش متداول کاهش می‌دهد. این بهبود، بیشتر ناشی از توانایی MPC در پیش‌بینی نوسان‌های تقاضا، کاهش تأخیر زمانی در توزیع جریان، و نظارت فعال سطح آب در طول کانال است که منجر به توزیع یکنواخت‌تر آب و کاهش نیاز به برداشت‌های جبرانی از منابع زیرزمینی می‌شود.

در مقایسه با پژوهش‌های پیشین که تمرکز آن‌ها بیشتر بر بهبود کنترل هیدرولیکی کانال‌ها بوده است (Fele et al., 2024; Pacheco et al., 2014)، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب کنترل پیش‌بین با چارچوب CLEWs می‌تواند پیامدهای فراتر از عملکرد هیدرولیکی، شامل مصرف انرژی و اثرگذاری‌های محیط زیستی را نیز به‌صورت کمی و یکپارچه ارزیابی کند. همچنین، برخلاف بررسی (Hosseini Jolfan et al., 2023) که تنها به اثرگذاری‌های خودکارسازی بر کاهش برداشت آب زیرزمینی پرداخته است، این پژوهش با گسترش شاخص ترکیبی CLEWs، امکان ترجمه خروجی‌های فنی بهره‌برداری به شاخص‌های تصمیم‌یار مدیریتی را فراهم ساخته است، به‌ویژه در شرایط خشکسالی که فشار بر منابع آب و انرژی به‌طور هم‌زمان تشدید می‌شود.

از منظر مدیریتی، چارچوب CLEWs-MPC به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار، قابلیت شناسایی ناحیه‌های بحرانی،

Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 11-24.

Howells, M., Hermann, S., Welsch, M., Bazilian, M., Segerström, R., Alfstad, T. & Rogner, H. (2013). Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. *Nature Climate Change*, 3(7), 621–626.

International Energy Agency (IEA). (2022). CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights. OECD/IEA, Paris.

Ebrahimipak, N., Sedaghat, A. & Tafteh, A. (2026). Spatial analysis of water requirements and water-use efficiency in wheat cultivation across Iran using data from the water requirement system. *Irrigation and Drainage*, 1-19. <https://doi.org/10.1002/ird.70138>.

Jolfan, M.H., Shahdany, S.M.H., Javadi, S., Milan, S.G., Neshat, A., Berndtsson, R. & Tork, H. (2023). Modernization in agricultural water distribution system for aquifer storage and recovery—A case study. *Agricultural Water Management*, 282, 108270. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108270>.

Jovanovic, N., Pereira, L.S., Paredes, P., Pôças, I., Cantore, V. & Todorovic, M. (2020). A review of strategies, methods and technologies to reduce non-beneficial consumptive water use on farms considering the FAO56 methods. *Agricultural Water Management*, 239, 106267. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267>

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, 106265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106265>.

Lahjouj, A., Hmaid, A.E., Essahlaoui, A., Alam, M.J.B., Siddiquee, M.S. & Bouhafa, K. (2022). Groundwater vulnerability assessment through a modified DRASTI-LU framework: case study of Saiss Basin in Morocco. *Earth Systems and Environment*, 6, 885-902.

Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A.K., Hoff, H., Lawford, R. & Qi, J. (2017). Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus. *Hydrological Sciences Journal*, 62(11), 1714–1720.

Mohammadi, A., Parvaresh Rizi, A. & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Hydraulic Performance of Regulators and Distribution Structures in Varamin Irrigation Network. *Journal of Hydraulics*, 12(3), 1-

نویسنده سوم: استاد راهنمای دوم، بررسی نتایج، ویرایش مقاله.

نویسنده چهارم: استاد مشاور، بازبینی نتایج و گزارش.

۵- منابع

Bwambale, E., Abagale, F.K. & Anornu, G.K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>.

Pacheco, E.R.I.D., Pérez, E., Salvador, J.R. & Millán, P. (2024). Exploring the Capabilities of Adaptive Model Predictive Control in Irrigation Systems. In: 2024 European Control Conference (ECC), 418-423, IEEE. DOI: 10.23919/ECC64448.2024.10591156.

Endo, A., Burnett, K., Orenco, P.M., Kumazawa, T., Wada, C.A., Ishii, A. & Tsurita, I. (2017). A review of the current state of research on the water–energy–food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>

FAO. (2017). The future of food and agriculture – Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization.

Fele, F., Maestre, J.M., Hashemy, S.M., Muñoz de la Peña, D. & Camacho, E.F. (2014). Coalitional model predictive control of an irrigation canal. *Journal of Process Control*, 24(4), 314–325.

Hassani, Y., Shahdany, S.M.H., Maestre, J.M., Zahraie, B., Ghorbani, M., Hennebery, S.R. & Kulshreshtha, S.N. (2019). An economic-operational framework for optimum agricultural water distribution in irrigation districts without water marketing. *Agricultural Water Management*, 221, 348–361.

Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S.M., Javadi, S. & Banihabib, M.E. (2018). Assessment of improving operational approaches to the surface water resources on groundwater extraction reduction within the irrigation districts; case study of Qazvin irrigation district. *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 125-139. (In Persian)

Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S.M., Javadi, S., Mallakpour, I. & Neshat, A. (2020).

- Shahsavandi, M., Yazdi, J., Jalili Ghazizadeh, M. & Rashidi Mehrabadi, A. (2024). Hydraulic Model Calibration of a Laboratory Water Distribution Network Using Hydraulic and Water Quality Measurements. *Journal of Hydraulics*, 19(3), 113-125. (In Persian)
- Van Overloop, P.-J. (2006). Model predictive control on open water systems. IOS Press.
- van Overloop, P.J., Schuurmans, J., Brouwer, R. & Burt, C.M. (2005). Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 190-196.
- van Overloop, P., Miltenburg, I., Clemmens, A. & Strand, R. (2008). Identification of pool characteristics of irrigation canals. In: World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'a. Honolulu, Hawaii, USA.
- Xu, Z., Chen, X., Liu, J., Zhang, Y., Chau, S., Bhattarai, N. & Li, Y. (2020). Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO₂ nexus across metacoupled systems. *Nature Communications*, 11(1), 5837. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19520-3>.
- Zhu, Z., Guan, G. & Wang, K. (2023). Distributed model predictive control based on the alternating direction method of multipliers for branching open canal irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 285, 108372. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108372>.
12. (In Persian)
- 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), 1835. <https://doi.org/10.3390/w11091835>
- Molden, D.J. & Gates, T.K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(6), 804-823.
- Ranjbar, R., Martin, J.G., Maestre, J.M., Etienne, L., Duvilla, E. & Camacho, E.F. (2025). Stochastic model predictive control of an irrigation canal with integrated performance-driven path planning of a measurement robot. *Journal of Hydroinformatics*, 27(4), 740-754.
- Ringler, C., Bhaduri, A. & Lawford, R. (2013). The nexus across water, energy, land and food (WELF). <http://cdm15738.contentdm.oclc.org/cdm/ref/collection/p15738coll5/id/4188>.
- Rodriguez, L.P., Maestre, J.M., Camacho, E.F., & Sánchez, M.C. (2020). Decentralized ellipsoidal state estimation for linear model predictive control of an irrigation canal. *Journal of Hydroinformatics*, 22(3), 593-605.
- Shahdany, S.H., Taghvaeian, S., Maestre, J.M., & Firoozfar, A.R. (2019). Developing a centralized automatic control system to increase flexibility of water delivery within predictable and unpredictable irrigation water demands. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104862>.

© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

