

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

Mohsen Hosseini Jolfan<sup>1</sup>, Mehdi Yasi<sup>2\*</sup>, Javad Farhoudi<sup>2</sup>, Hossein Khajeh Pour<sup>4</sup>

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](mailto:m.yasi@ut.ac.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 CO<sub>2</sub> Emissions (CE). These indicators were normalized and aggregated into the composite CLEWs Index, defined as:

$$CLEW_s = 0.4 \cdot I_w + 0.3 \cdot (1 - I_e) + 0.3 \cdot (1 - I_m),$$

Where  $I_w$ ,  $I_e$ , and  $I_m$  represent the normalized sub-indices of adequacy, energy, and emissions, respectively. 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 ( $CLEW_s < 0.75$ ), 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 CO<sub>2</sub> 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.

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

محسن حسین جلفان<sup>۱</sup>، مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>، جواد فرهودی<sup>۲</sup>، حسین خواجه‌پور<sup>۴</sup>

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

**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 CO<sub>2</sub> 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

گزارش (FAO (2021)، حدود ۷۰ درصد از کل برداشت‌های آب در جهان به بخش کشاورزی اختصاص دارد، در حالی که این عدد در ایران بیش از ۹۰ درصد است. با این حال، راندمان انتقال و توزیع آب در بسیاری از شبکه‌های آبیاری کشور همچنان پایین و در حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد است (Jalali and Zarei, 2019). شبکه‌های آبیاری سنتی اغلب بر پایه ساختارهای مکانیکی و بدون سامانه‌های هوشمند مدیریت می‌شوند، که این امر منجر به عدم تعادل در توزیع آب، تلفات بالا، نابرابری بین نواحی بهره‌بردار و اتکای فزاینده به منابع آب زیرزمینی شده است (Lahjouj et al., 2021). این مسائل نه تنها ظرفیت منابع آب را تحت فشار قرار داده، بلکه موجب افزایش

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 مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، چالش‌های اساسی در مدیریت پایدار منابع آب ایجاد کرده است (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 اساس

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 مطالعات تمرکز خود را بر روی بهبود کارایی سامانه‌های کنترل خودکار در سطح مزرعه معطوف کرده‌اند و کمتر به ارتباط بین بهره‌برداری از منابع آب، انرژی و پایداری محیط‌زیست پرداخته‌اند. در حالی که مدل‌های کنترلی مانند MPC قادر به بهبود توزیع آب در زمان واقعی هستند، این مدل‌ها به‌تنهایی قادر به ارزیابی اثرات انرژی و زیست‌محیطی ناشی از تصمیمات بهره‌برداری نیستند؛ از این‌رو، اتصال مدل‌های کنترلی مانند MPC به چارچوب تحلیلی همچون<sup>2</sup>CLEWs، که با هدف درک پیوندهای سیستمی میان منابع مختلف و اثرات متقابل تصمیمات در حوزه آب، انرژی و محیط-زیست طراحی شده است، می‌تواند چشم‌انداز جامع‌تری از پایداری سامانه ارائه دهد (Mirzaei et al., 2020). در واقع، بهره‌گیری از چارچوب‌های بین‌بخشی نظیر CLEWs در کنار مدل‌های کنترل پیش‌بین، می‌تواند نه‌تنها به بهبود بهره‌وری هیدرولیکی منجر شود، بلکه مسیر تصمیم‌سازی را به سوی کاهش اثرات 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 تلفیق 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 اهداف توسعه پایدار و مدیریت سازگار منابع در شرایط عدم قطعیت تلقی می‌شود (Howells et al., 2013).

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، مطالعه خودکارسازی بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات آب مورد توجه قرار گرفته است.

(Fele et al., 2014) با معرفی ساختار کنترلی مبتنی بر MPC، 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 سیستم‌های شاخه‌دار پیچیده مناسب‌تر بود و توانست به شکل موثرتری، تصمیم‌گیری‌های محلی را با اهداف سراسری هماهنگ کند. در پژوهشی دیگر توسط (Hosseini Jolfan et al., 2023) در یکی از مطالعات به بررسی اثرات خودکارسازی بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری پرداخته‌اند. آن‌ها 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. با این حال، تحلیل بین‌بخشی پیامدهای انرژی و زیست-محیطی در قالب چارچوب‌های تلفیقی نظیر CLEWs در آن مطالعه مورد توجه قرار نگرفت. همچنین در پاسخ به چالش‌های مربوط به پویایی محیطی و تغییر شرایط بهره‌برداری، (Chen et al., 2024) الگوریتم تطبیقی را طراحی کردند که با بهره‌گیری از مدل کنترل خودکار پیش‌بین (MPC)، امکان تنظیم خودکار پارامترهای کنترلی را فراهم می‌سازد و موجب افزایش دقت در توزیع آب و کاهش مصرف بی‌رویه منابع شد. همچنین در تازه‌ترین مطالعه، (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

- 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 تحقیق

روند انجام این پژوهش براساس 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 توسعه داده شد. در رویکرد نخست، شرایط موجود شبکه آبیاری بر پایه عملکرد دریاچه‌های آمیل (Amil Regulator) بازسازی گردید که بیانگر وضعیت سنتی بهره‌برداری است. در رویکرد دوم، سامانه کنترل خودکار متمرکز مبتنی بر سامانه کنترل پیش‌بین (MPC) توسعه داده شده تا عملکرد شبکه بصورت پویا و بهینه مدیریت گردد. پیاده‌سازی هر دو روش در سطح عملیاتی و با لحاظ محدودیت‌های فنی، هیدرولیکی و محیطی انجام گرفت. مدل MPC با هدف کاهش خطای تحویل جریان و حداقل‌سازی انرژی مصرفی، در محیط MATLAB پیاده‌سازی شد

گام دوم: تعریف سناریوی بهره‌برداری

دو سناریوی اصلی برای تحلیل سیستم تعریف گردید:

- (i) سناریوی نرمال، که بر مبنای جریان‌های مرجع و شرایط معمول بهره‌برداری شبکه شبیه‌سازی شد.
- (ii) سناریوی خشکسالی، که در آن دبی ورودی به کانال اصلی ۲۰ درصد کمتر از شرایط نرمال فرض گردید 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 (CO<sub>2</sub>) ارزیابی شد.

گام سوم: توسعه چارچوب تحلیلی CLEWs به منظور تحلیل هم‌زمان ارتباطات میان سه بُعد آب، انرژی و محیط‌زیست، چارچوب تحلیلی CLEWs توسعه یافت. این چارچوب بر اساس شاخص کفایت نواحی، نواحی بهره‌برداری را در سه سطح «پایدار»، «وابسته به

با این حال، در اغلب مطالعات کاربرد CLEWs، تمرکز بر سطح کلان (ملی یا حوضه‌ای) بوده و کمتر به سطوح میانی یا عملیاتی نظیر شبکه‌های آبیاری پرداخته شده است. در واقع، CLEWs در بیشتر موارد به‌عنوان یک مدل بالادستی برای سیاست‌گذاری استفاده شده و فاقد پیوند عددی با فرآیندهای بهره‌برداری روزمره در شبکه‌های توزیع آب بوده است. در نتیجه، علی‌رغم قابلیت‌های مفهومی بالا، CLEWs به‌تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای فنی و اجرایی در سطوح محلی باشد؛ مگر آن‌که به مدل‌های عددی بهره‌برداری و کنترلی متصل گردد (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 نظیر 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، تلفیق مدل‌های بهره‌برداری دقیق با چارچوب‌های تحلیلی همچون CLEWs، می‌تواند مسیر نوینی برای پیوند دانش فنی با تصمیم‌سازی سیاستی فراهم آورد.

در این راستا، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب تلفیقی میان مدل‌های بهره‌برداری آب سطحی و چارچوب تحلیلی CLEWs انجام شده است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر بهبود عملکرد هیدرولیکی یا خودکارسازی بهره‌برداری تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش برای نخستین بار پیامدهای انرژی و زیست‌محیطی تصمیمات بهره‌برداری در سطح عملیاتی شبکه آبیاری به‌صورت کمی و نظام‌مند تحلیل شده است. در این مدل، خروجی‌های عددی دو رویکرد بهره‌برداری شامل روش مرسوم (دریاچه‌های آمیل) و کنترل پیش‌بین متمرکز (MPC) به شاخص‌های ترکیبی CLEWs متصل شده‌اند تا ارزیابی چندبُعدی 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

شبکه با هدف توسعه 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 آبیگیر 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 اساس 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) احداث شده است. بهره‌برداری از آن نیازمند حضور مستمر اپراتورها بوده و در برابر تغییرات جریان یا نوسانات نیاز آبی، انعطاف‌پذیری محدودی دارد. این ساختار سنتی موجب کاهش کارایی انتقال، افزایش تلفات، و وابستگی بیشتر به منابع آب زیرزمینی شده است.

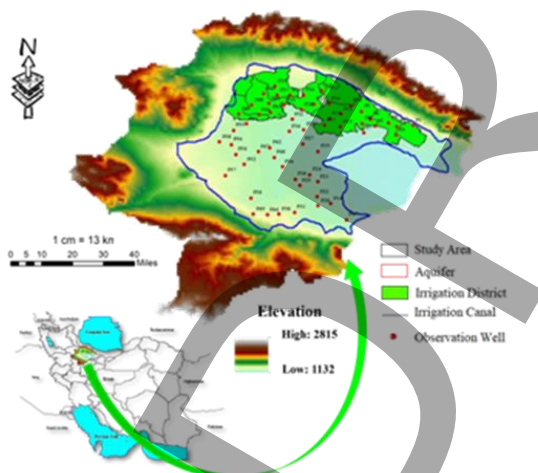


Fig. 2 Geographical location of the case study area  
شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری قزوین از تأسیسات انحراف آب رودخانه طالقان شامل سدهای انحرافی سنگان 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

منابع مکمل» و «بحرانی» طبقه‌بندی نمود. در این ساختار، شاخص ترکیبی CLEWs با وزن‌های ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۳ به ترتیب برای زیرشاخص‌های آب، انرژی و محیط‌زیست محاسبه شد. این رویکرد امکان مقایسه کمی بین روش‌های بهره‌برداری و تحلیل جامع اثرات متقابل آن‌ها را فراهم ساخت.

گام چهارم: تعریف آستانه‌های مدیریتی بر پایه طبقه‌بندی CLEWs، آستانه‌های مدیریتی برای فعال‌سازی برداشت از منابع آب زیرزمینی تعریف گردید. 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 گردید.

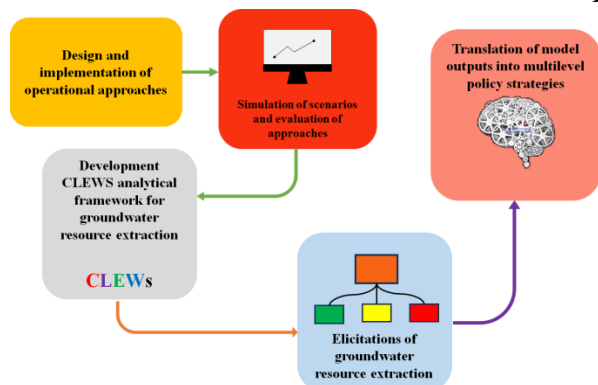


Fig. 1 Research Methodology Framework  
شکل ۱ روند انجام پژوهش

## ۲-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شبکه آبیاری قزوین است که در استان قزوین واقع شده و یکی از مهم‌ترین سامانه‌های آبیاری سطحی کشور به‌شمار می‌رود. این

MatLab استفاده شد، تا شرایط هیدرولیکی موجود در کانال را شبیه‌سازی کرده و امکان تبادل آسان داده‌ها با کنترل‌گرها را فراهم کند. بر اساس این مدل، قسمتی از کانال 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 اساس دو مشخصه اصلی هر بازه عبارتند از: زمان تاخیر ( $T_c$ ) و سطح ذخیره ( $A_s$ ). محاسبه عمق سطح آب در انتهای هر بازه بر اساس معادله ۱ قابل محاسبه است.

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

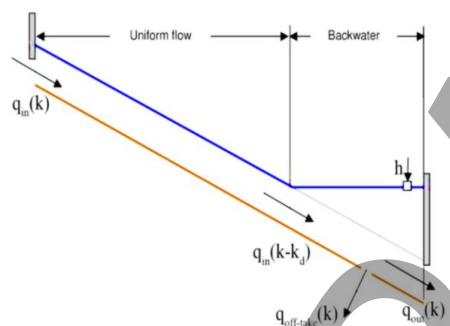


Fig. 3 Schematization of a modeled canal reach by Integrator Delay model

شکل ۳ شمای مدل شده یک بخش از کانال با مدل انتگرال تاخیری

سه و چهار به طول تقریبی ۸۸۰ کیلومتر در نواحی مختلف توزیع می‌شود. شبکه آبیاری قزوین به‌عنوان مطالعه 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 توسعه و آزمون چارچوب ترکیبی بهره‌برداری و مدل CLEWs تبدیل کرده است.

### ۲-۳- شبیه‌سازی بهره‌برداری سیستم توزیع آب در کانال اصلی آبیاری

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

به منظور ارزیابی میزان بهبود فرآیند بهره‌برداری، با بکارگیری سیستم‌های کنترل خودکار، لازم است شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در سیستم مورد مطالعه و ارزیابی عملکرد وضعیت موجود توزیع آب انجام گیرد.

برای این منظور لازم است از مدل‌های شبیه‌ساز هیدرودینامیکی استفاده شود که قادر باشد با کنترل-گرهای طراحی شده لینک شده و فرامین کنترلی را بصورت همزمان دریافت و اجرا نماید (Hassani et al. 2019; Rodriguez et al. 2020). در این تحقیق از مدل انتگرالی-تأخیری (ID)، توسعه داده شده در نرم افزار

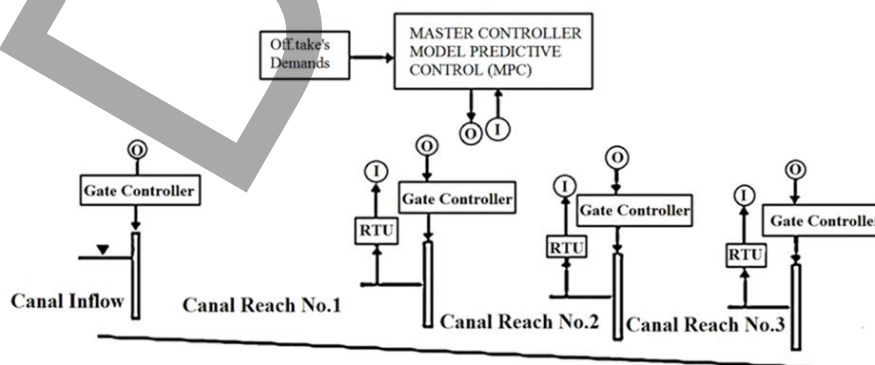


Fig. 4 overview of the control system (MPC)

شکل ۴ شمای کلی از سامانه کنترلی MPC

خطا در هر بازه کانال را بر اساس جریان ورودی و جریان-های خروجی محاسبه نمود (van Overloop et al., 2008).

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

#### ۲-۴- شاخص‌های عملکرد در چارچوب یکپارچه CLEWs

به‌منظور ارزیابی یکپارچه اثرات بهره‌برداری شبکه آبیاری بر سه بُعد اصلی منابع، شامل آب، انرژی و انتشار در این پژوهش از چارچوب CLEWs استفاده شد. این چارچوب به عنوان ابزاری برای تحلیل هم‌زمان متغیرهای مرتبط با پایداری طراحی گردید تا بتواند بازخورد کمی میان عملکرد هیدرولیکی، هزینه‌های انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی را در فرآیند کنترل شبکه نشان دهد. در مطالعات گذشته، مدل CLEWs اغلب در مقیاس ملی یا سیاستی برای ارزیابی سناریوهای کلان استفاده شده است، در حالی که در این تحقیق، این چارچوب برای نخستین بار در مقیاس عملیاتی شبکه آبیاری به‌صورت 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 می‌گردد، تعریف و محاسبه شدند. در این رویکرد، شاخص CLEWs به‌صورت یک شاخص ترکیبی نرمال شده تعریف شد که سه زیرشاخص اصلی را شامل می‌شود:

#### • کفایت تحویل آب

بر اساس تعریف ارائه شده (Molden and Gate, 1990)، شاخص کفایت تحویل آب عبارت است از:

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

که در آن، PA شاخص کفایت برای کل سیستم، T فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد، R تعداد کل آبیگرهای اندازه‌گیری شده Q<sub>D</sub> دبی تحویلی و Q<sub>R</sub> دبی مورد نیاز است. براساس توصیه (Molden and Gate, 1990)، طبقه‌بندی شاخص کفایت بصورت جدول ۱ بیان می‌شود:

#### ۲-۳-۲- سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC)

این روش، یک سامانه‌ی کنترلی است که در تکنیک طراحی آن علاوه بر روش کنترل پسخور و پیشخور، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر در (رقوم سطح آب) استفاده می‌شود. وظیفه کنترل‌گر رساندن سطح آب پائین‌دست بازه به سطح آب هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان تنظیم شدگی دریاچه‌ها بیان می‌شود. کنترل‌گر MPC با بهره‌گیری از ترکیب دو عامل افق زمانی و مدل ریاضی کانال تحت کنترل (مدل داخلی سیستم) اقدام به پیش‌بینی متغیرهای هیدرولیکی سیستم در آینده می‌نماید.

فرمان‌های کنترل در هر گام زمانی بر اساس وضعیت هیدرولیکی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در کانال مشخص می‌شود (Overloop, 2006; Hashemy et al. 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 کنترل‌گر MPC در یک سیستم آبی قابل مشاهده است. در این تحقیق از مدل فضای حالت خطی بدست آمده از رابطه سنت و نانت گسسته شده جهت تعریف مدل داخلی MPC استفاده شده است (Overloop et al., 2005).

در کنترل سیستم آبی به روش MPC از مدل فضای حالت که امکان فشرده سازی فرمولاسیون چند متغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند، جهت بیان مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده شده در سیستم کانال-ها را می‌توان در حالت کلی به فرم زوج معادله ۲ بیان نمود (Overloop, 2006).

$$x(k+1) = A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k) \quad (2)$$

$$y(k) = C.x(k)$$

تابع هدف مورد استفاده برای سیستم 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 حداقل شود، X متغیرهای حالت، U اعمال کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی می‌باشند.

با تعریف h<sub>ref</sub> به‌عنوان مقدار هدف و تعریف خطا به فرم رابطه ۳ و جایگذاری آن در معادله ۲ می‌توان رابطه میزان

بررداری در هر ناحیه از دیدگاه CLEWs است. محاسبات CLEWs برای هر ناحیه و هر گام زمانی به صورت خودکار در محیط MATLAB R2023b اجرا گردید. برای این منظور، یک تابع اختصاصی توسعه داده شد تا ورودی‌های مربوط به کفایت تحویل، مصرف انرژی و میزان انتشار را از خروجی‌های مدل کنترل پیش‌بین MPC دریافت نموده و مقدار شاخص CLEWs را برای هر سناریو محاسبه نماید.

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 نرمال شده %

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

$I_m = CO_2 / \max(CO_2)$ ; انتشار نرمال شده %

ترکیبی CLEWS محاسبه %

$CLEWS = ww * I_w + we * (1 - I_e) + wem * (1 - I_m)$ ;

end

این تابع برای تمامی نواحی شبکه و دو سناریوی بهره‌برداری (حالت مرسوم و حالت کنترل شده با MPC) اجرا شد. به منظور اطمینان از پایداری عددی، تمام شاخص‌ها پیش از ترکیب، در بازه [0,1] نرمال گردیدند. شاخص CLEWs محاسبه شده به صورت یک معیار کلیدی برای مقایسه عملکرد دو رویکرد بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی تبادلات میان اهداف چندگانه، تحلیل چندهدفه (Multi-objective Analysis) بر مبنای تغییر وزن‌های مؤلفه‌های CLEWs انجام شد. در این تحلیل، وزن‌های مربوط به آب، انرژی و انتشار در محدوده‌های مختلف تغییر داده شدند تا اثر نسبی هر مؤلفه بر عملکرد شبکه مشخص گردد. بر این اساس، مجموعه‌ای از سناریوهای وزنی ایجاد و برای هر سناریو شاخص‌های کفایت، انرژی و CLEWs محاسبه شدند. در مراحل بعد، با استفاده از این داده‌ها، جبهه پارتو میان شاخص کفایت و انرژی مصرفی ترسیم گردید تا بهترین ترکیب وزنی (trade-off point) میان اهداف متضاد مشخص شود.

لازم به ذکر است در این پژوهش، به منظور سازگاری چارچوب CLEWs با مقیاس بهره‌برداری شبکه آبیاری و امکان اتصال عددی آن به مدل‌های کنترلی، از رویکرد

جدول ۱ طبقه‌بندی شاخص کفایت تامین آب

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

Indicator	Performance Classes		
	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 راندمان کل سامانه محاسبه شد. این پارامتر بر اساس رابطه زیر و مطابق با روش پیشنهادی (Howells et al. 2013) محاسبه گردید:

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

که در این رابطه  $Q_i$  برداشت کل از چاه بر حسب  $(m^3)$ ، H عمق چاه بر حسب (m) و  $\eta_P$  راندمان پمپ می‌باشد.

• انتشار  $CO_2$  ناشی از انرژی مصرفی

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

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

شاخص تلفیقی 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 تحقیق، وزن‌ها با رویکرد توازن چندمعیاره و پس از انجام آزمون حساسیت انتخاب شدند. که در آن  $w_1$ ،  $w_2$  و  $w_3$  وزن‌های مربوط به ابعاد آب، انرژی و محیط‌زیست است. که در آن وزن مربوط به بخش آب برابر ۰.۴ و مجموع دو بخش دیگر (انرژی و محیط زیست) برابر ۰.۶ 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 نواحی فراهم گردد. همچنین  $E_{max}$  و  $CO_2^{max}$  به ترتیب بیشترین مقدار کربن منتشر شده و انرژی استفاده شده در بین نواحی شبکه آبیاری می‌باشد. این شاخص نشان دهنده عملکرد کلی بهره-

تامین آب که از خروجی خروجی مدل‌های بهره‌برداری ID و MPC استخراج گردید، به‌عنوان متغیر واسطه کلیدی میان بخش آب و سایر اجزای CLEWs تعریف شد. کاهش مقادیر 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 et al., 2023). بدین ترتیب، ارتباط عددی و علی<sup>۵</sup> میان بهره‌برداری هیدرولیکی و پیامدهای انرژی و محیط-زیست برقرار گردید. برای فعال‌سازی اجزای CLEWs بر اساس 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 ارزیابی انرژی و پایداری در چارچوب CLEWs محسوب می‌شود. در گام نهایی، تحلیل چندهدفه میان کفایت تأمین آب، انرژی مصرفی و انتشار کربن دی‌اکسید انجام گرفت و جبهه پارتو برای شناسایی ترکیب‌های بهینه تصمیم‌گیری مدیریتی استخراج شد. در پایان به‌منظور شفاف‌سازی روند اتصال میان مدل‌های بهره‌برداری و چارچوب CLEWs، فلوجارت مفهومی فرآیند تبادل داده و تحلیل چندبُعدی در شکل (5) ارائه شده است که توالی مراحل، متغیرهای ورودی و خروجی، و منطق تصمیم‌گیری مدیریتی را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد.

## ۲-۶- اعتبارسنجی مدل

به‌منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی و انطباق نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی، فرآیند کالیبراسیون و اعتبارسنجی برای مدل‌های بهره‌برداری و شاخص CLEWs انجام شد. داده‌های مشاهداتی دبی و سطح آب

شاخص‌محور و نرمال‌شده CLEWs استفاده شد. اگرچه چارچوب CLEWs در مطالعات کلان معمولاً شامل روابط غیرخطی و سناریوهای پیچیده است، اما در مقیاس شبکه‌های آبیاری، به‌کارگیری چنین ساختارهایی با محدودیت داده و تفسیر مدیریتی همراه است. از این‌رو، مشابه با مطالعات پیشین، ابعاد آب، انرژی و محیط‌زیست به‌صورت شاخص‌های نرمال‌شده و با ترکیب خطی وزن‌دار ادغام شدند.

وزن‌دهی شاخص‌ها بر اساس 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 ادبیات موجود در حوزه CLEWs و رویکردهای شاخص‌محور سازگار بوده و در مطالعات متعددی برای 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 محیط‌زیست) با هدف تحلیل هم‌افزایی‌ها و تضادهای میان اجزای کلیدی توسعه پایدار طراحی شده است. در این پژوهش، اتصال میان مدل‌های بهره‌برداری و چارچوب CLEWs به‌صورت اتصال ترتیبی<sup>۳</sup> 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 مورد استفاده قرار گرفتند. در این فرآیند، تبادل داده به‌صورت گام‌به‌گام در هر بازه زمانی شبیه‌سازی انجام نشده است، بلکه شاخص‌های عملکرد نهایی حاصل از اجرای مدل‌های بهره‌برداری در هر سناریو، پس از اتمام شبیه‌سازی، به چارچوب CLEWs منتقل شده‌اند. بنابراین، در این پژوهش به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی بالادستی<sup>۴</sup> برای تفسیر پیامدهای انرژی و زیست‌محیطی تصمیمات بهره‌برداری به‌کار گرفته شده است، نه به‌عنوان یک مدل کنترلی هم‌زمان. در این راستا، شاخص کفایت

<sup>3</sup> Sequential Coupling

<sup>4</sup> Analytical Meta-Framework

<sup>5</sup> causal-numerical linkage

سیستم کانال انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی سناریوی بهره‌برداری در شرایط نرمال براساس 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 دبی ورودی به کانال اصلی ۲۰ درصد کاهش یافت که این الگو براساس شرایط خشکسالی سال ۱۴۰۰ در شبکه در نظر گرفته شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج حاصل 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 درجه‌های آمیل و سامانه کنترل پیش‌بین (MPC) مورد مقایسه قرار گرفت. شاخص کفایت تأمین آب (PA) که نسبت حجم آب تحویلی 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 مرسوم آمیل، مقدار کفایت از ۱۰۰٪ در ناحیه بالادست به ۷۰٪ در ناحیه پایین‌دست کاهش یافته است. این روند نزولی بیانگر افت تدریجی تراز سطح آب و تأخیر زمانی در واکنش سازه‌های مکانیکی است که منجر به توزیع غیریکپارچه آب در طول شبکه می‌شود. براساس طبقه‌بندی (Molden and Gates, 1990)، نواحی ۱ تا ۴ با کفایت بالاتر از ۰/۹ در محدوده «عملکرد خوب» و نواحی ۸ تا ۱۰ با کفایت کمتر از ۰/۸ در محدوده «عملکرد ضعیف» قرار می‌گیرند (شکل ۵). بر اساس آنچه که در شکل ۵ قابل ملاحظه است، در روش کنترل پیش‌بین (MPC)، شاخص کفایت در تمامی نواحی برابر با ۱۰۰٪ به دست آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که سامانه کنترل خودکار MPC با پیش‌بینی تغییرات جریان، تنظیم هم‌زمان درجه‌ها و حذف نوسانات تراز سطح آب، موفق به تأمین پایدار و کامل نیاز آبی در تمام 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 مرسوم

در ایستگاه‌های کنترلی شبکه برای سال‌های مرجع ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ مورد استفاده قرار گرفت. معیارهای ارزیابی عملکرد شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای میانگین مربعات (RMSE) و انحراف نسبی (RE) محاسبه گردیدند. نتایج کالیبراسیون نشان داد که مدل MPC توانسته است تغییرات تراز و دبی را با دقت بالایی ( $R^2 > 0.95$ ) پیش‌بینی کند. همچنین شاخص CLEWs محاسبه شده با داده‌های واقعی تطابق قابل‌قبولی داشته است، به طوری که میانگین اختلاف آن کمتر از ۰/۵٪ برآورد گردید. این امر نشان‌دهنده اعتبار مدل توسعه‌یافته در تحلیل تلفیقی بهره‌برداری و پایداری شبکه است.

لازم به توضیح 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 تجمیعی و مدیریتی نظیر کفایت تأمین، مصرف انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی قرار داشته است. از این رو، اعتبارسنجی مدل بر اساس 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<sup>۶</sup> پژوهش بوده و در مطالعات مرتبط با ارزیابی شبکه‌های آبیاری و کنترل بهره‌برداری متداول است.

#### ۲-۷- سناریوهای بهره‌برداری

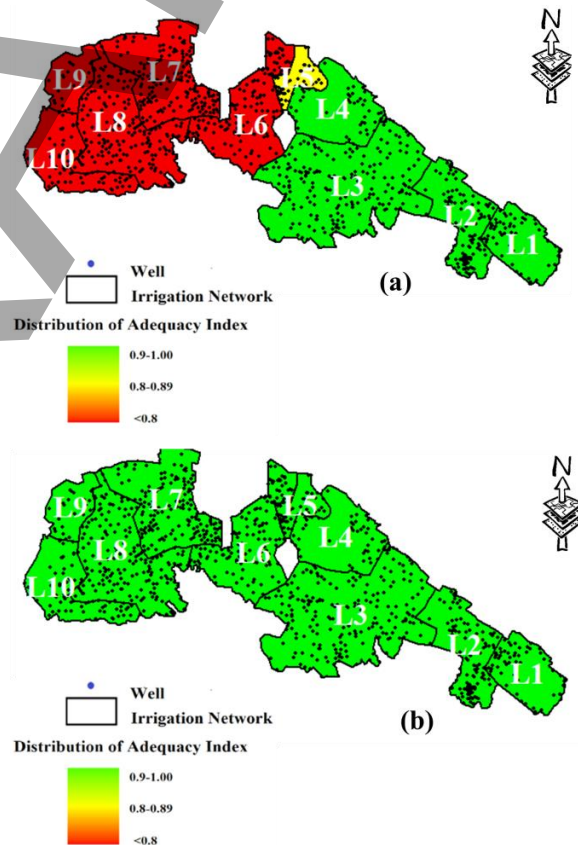
آزمون سامانه کنترل خودکار پیش‌بین طراحی شده در این تحقیق، توسط دو سناریوی انجام گرفت. به جهت بررسی کارایی سامانه کنترل پیش‌بین در مقایسه با شرایط حال حاضر بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین (درجه‌های آمیل)، سناریوی اول طراحی گردید. هدف اصلی در سناریوی اول بررسی وضعیت موجود بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط بهره‌برداری 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 آبگیرها با یک برنامه زمانی مشخص و به دور از هرگونه شوک ناگهانی و تغییرات شدید به

<sup>۶</sup> Performance-based

در ادامه‌ی تحلیل کفایت تأمین آب، میزان انرژی مصرفی در فرآیند بهره‌برداری شبکه آبیاری برای دو روش کنترل مرسوم (آمیل) و کنترل پیش‌بین در سناریوی نرمال بررسی شد. انرژی مصرفی در این مطالعه به صورت مجموع انرژی الکتریکی مورد نیاز برای برداشت آب از منابع زیرزمینی در هر ناحیه محاسبه گردید. از آنجا که سامانه آمیل در بسیاری از نواحی پایین دست با کمبود آب مواجه بود، بخشی از نیاز آبی از طریق پمپاژ چاه‌ها تأمین شده و منجر به افزایش قابل توجه مصرف انرژی گردیده است.

نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۳ آورده شده است. در روش مرسوم، مقدار انرژی مصرفی بین نواحی مختلف تفاوت چشمگیری دارد، به گونه‌ای که در نواحی بالادست، پمپاژی صورت نگرفته ( $E \approx 0$ )، اما در نواحی پایین دست به دلیل افت کفایت تأمین آب، مصرف انرژی به مقادیر بسیار بالا رسیده است. بیشترین مقدار مصرف انرژی مربوط به ناحیه ۸ با حدود ۵۰,۲۵۲,۷۳۶ کیلووات ساعت بوده است، که به وضوح نشان‌دهنده وابستگی شدید این ناحیه به منابع زیرزمینی است. در مقابل، با استفاده از کنترل پیش‌بین MPC و حذف نیاز به پمپاژ، مصرف انرژی در تمامی نواحی عملاً صفر شد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، کنترل پیش‌بین توانسته است در مقیاس کل شبکه، مصرف انرژی را به صورت کامل حذف نماید. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از کنترل هوشمند با بهینه‌سازی زمان‌بندی دریاچه‌ها، موجب کاهش فشار هیدرولیکی در نواحی 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 ادامه بررسی‌های انرژی، میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف انرژی پمپاژ در نواحی مختلف شبکه محاسبه گردید. این محاسبات بر اساس ضرایب انتشار برق در ایران انجام شد. به عبارت دیگر، هر واحد انرژی مصرفی در فرآیند پمپاژ با ضریب یادشده به

برابر با  $۰.۸۴/۳\%$  و در روش MPC معادل  $۱.۰۰\%$  بوده که بیانگر افزایش میانگین حدود  $۱۵/۷\%$  درصد واحد است. بیشترین بهبود عملکرد در نواحی پایین دست (۷ تا ۱۰) مشاهده شد، جایی که کنترل پیش‌بین توانست افت جریان و تلفات حجمی را به حداقل 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 نه تنها موجب افزایش عدالت مکانی در توزیع آب می‌شود، بلکه قابلیت انعطاف شبکه را در برابر تغییرات جریان ورودی نیز ارتقا می‌دهد. بر این اساس، می‌توان پیشنهاد کرد که استفاده از کنترل متمرکز پیش‌بین به عنوان یک سیاست بهره‌برداری هوشمند، جایگزین روش‌های سنتی مبتنی بر تنظیمات مکانیکی گردد.



**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 کفایت تأمین آب (a) سیستم سنتی (دریاچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

نواحی به دلیل افت کفایت تحویل آب و نیاز به برداشت از چاه‌های عمیق، بیشترین فشار زیست‌محیطی را بر سامانه وارد کرده‌اند. در مقابل، در روش MPC با حذف کامل انرژی پمپاژ، انتشار CO<sub>2</sub> نیز در تمامی نواحی به صفر رسیده است.

انتشار CO<sub>2</sub> تبدیل گردید تا بتوان اثرات زیست‌محیطی دو روش بهره‌برداری را به صورت کمی ارزیابی کرد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که الگوی انتشار CO<sub>2</sub> دقیقاً از الگوی مصرف انرژی تبعیت می‌کند. در روش مرسوم (دریچه‌های آمیل)، نواحی بالادست عملاً بدون انتشار بوده‌اند، در حالی که در نواحی پایین‌دست، به‌ویژه نواحی ۷ و ۸، بیشترین مقدار انتشار مشاهده شده است. این

جدول ۳ مقادیر 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	29244221	15853434	41171217	50252736	3459309	16939303
	CO2(kg)	0	0	0	0	321600	1665800	3435800	4635500	380500	1863000
	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

نتایج حاصل از محاسبه این شاخص در نواحی 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 مرسوم دارای روند نزولی از بالادست به پایین‌دست است، در حالی که در روش کنترل پیش‌بین، مقدار شاخص در تمامی نواحی برابر یک بوده و بیانگر عملکرد کاملاً پایدار است. در روش مرسوم، نواحی بالادست (۱ تا ۴) با CLEWs بالاتر از ۰/۹ در محدوده عملکرد پایدار قرار دارند، در حالی که نواحی پایین‌دست (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 CO<sub>2</sub> در طول مسیر است. در مقابل، با استفاده از روش MPC، شاخص CLEWs در تمامی نواحی برابر با ۱.۰ محاسبه شد که بیانگر حذف کامل افت‌های عملکردی و دستیابی به پایداری کامل در تمام ابعاد است (شکل ۶). از دیدگاه تحلیلی، میانگین CLEWs در روش مرسوم برابر ۰/۷۵ و در روش MPC برابر ۱/۰۰ به‌دست آمد. بر اساس آزمون t زوجی، این اختلاف در سطح اطمینان ۹۹٪ معنادار است (t(9)=6.21, p<0.001). نتایج نشان می‌دهد که رویکرد MPC نه‌تنها عملکرد هیدرولیکی را بهبود داده

### ۳-۲- تحلیل شاخص تلفیقی 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 بخش مواد و روش‌ها محاسبه گردید 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. لارم به ذکر است که، شاخص CLEWs عددی نرمال‌شده بین صفر و یک است که مقدار بالاتر آن نشان‌دهنده پایداری بیشتر سامانه است.

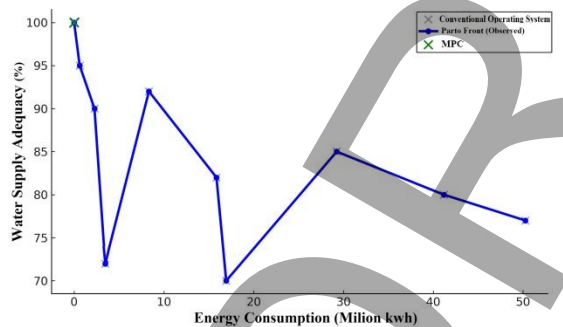
#### جدول ۴ شاخص CLEWs در نواحی مختلف تحت دو روش

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

نواحی مختلف شبکه آبیاری فزویین در سناریوی نرمال نشان می‌دهد. در این نمودار، هر نقطه نمایانگر عملکرد یکی از نواحی ده‌گانه شبکه در شرایط بهره‌برداری مرسوم (دریچه آمیل) است. همان‌گونه که دیده می‌شود، با حرکت از نواحی بالادست به پایین‌دست، 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 نواحی پایین‌دست تأمین گردد، 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. نقاط واقع بر روی این منحنی، حالاتی را نشان می‌دهند که در آن بهبود یکی از اهداف تنها با کاهش هدف دیگر ممکن است. در مقابل، نقاط پایین‌تر از منحنی پارتو بیانگر عملکردهای غیر بهینه هستند که می‌توان با بازتنظیم وزن‌های تصمیم‌گیری در چارچوب CLEWs یا اصلاح سیاست‌های بهره‌برداری، بهبودشان داد.

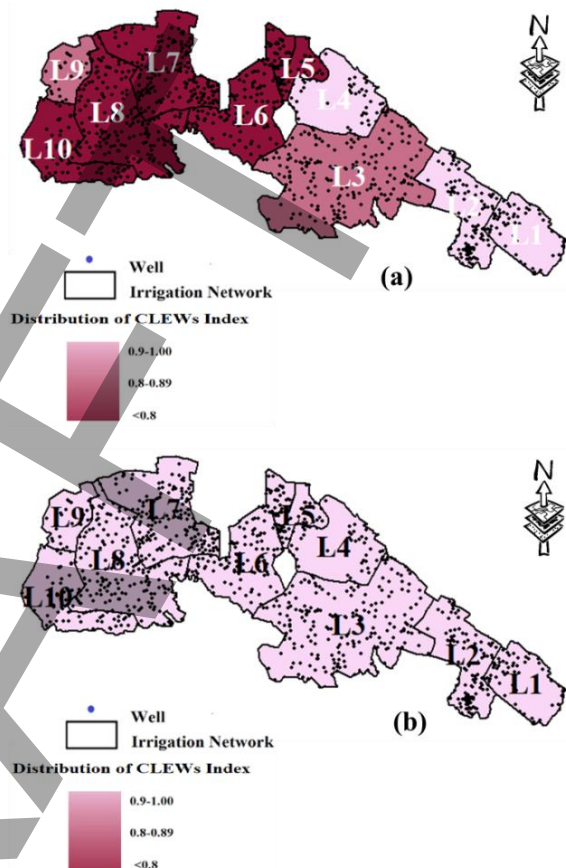


**Fig. 7** Pareto front between water supply adequacy and energy consumption (Normal Scenario)

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

همچنین، نقطه سبز رنگ در شکل ۶ عملکرد کنترل‌گر پیش‌بین مدل MPC را نشان می‌دهد. در این حالت، سیستم بدون نیاز به برداشت از منابع زیرزمینی، به کفایت ۱۰۰ درصدی در تمامی نواحی 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،

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.



**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 نواحی شبکه آبیاری تحت دو روش بهره‌برداری (a) سیستم سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

### ۳-۳- تحلیل چندهدفه عملکرد شبکه با استفاده از

#### جبهه پارتو (Pareto Front) در سناریوی نرمال

در این بخش، به‌منظور تحلیل هم‌زمان اثرات 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 رابطه‌ی 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

شود؛ به گونه‌ای که مدیر شبکه بتواند با توجه به شرایط منابع آب، انرژی و اولویت‌های محیط‌زیستی، نقطه‌ای از این جبهه را به‌عنوان راهبرد اجرایی انتخاب کند.

عملکرد یکنواختی ندارد. در واقع، بین کفایت تأمین آب و انرژی مصرفی رابطه‌ای متضاد برقرار است. از دید مدیریتی، منحنی پارتو می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌سازی بهینه در سیاست‌گذاری بهره‌برداری استفاده

**جدول ۵** مقادیر 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	620549.1	8332694.6	2267623.8	29244221	15853434	41171217	50252736	3459309	16939303
	CO2(kg)	0	67950	877680	241400	321600	1665800	3435800	4635500	380500	1863000
	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)	10292804	620459	6517702	0	0	7926717	20101510	26141720	1632500	1209115
	CO2(kg)	1121915	67639	710429	0	0	864012	2191064	2849447	177942	131793
	CLEWS	0.88	0.89	0.88	0.93	0.91	0.87	0.86	0.87	0.88	0.87

بهره‌برداری مرسوم (دریچه‌های آمیل)، مصرف انرژی پمپاژ تابع مستقیم فعال‌سازی کامل منابع آب زیرزمینی است. از آنجا که در هر دو سناریوی نرمال و خشکسالی، نواحی پایین‌دست شبکه در این روش به سطح بحرانی کفایت رسیده و به‌طور کامل متکی به برداشت زیرزمینی می‌شوند، مقدار مصرف انرژی در این نواحی در دو سناریو یکسان محاسبه شده است. تفاوت سناریوها در روش آمیل عمدتاً در نواحی بالادست و در مراحل ابتدایی بهره‌برداری بروز می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که در روش‌های بهره‌برداری ناکارآمد، خشکسالی الزاماً منجر به افزایش مصرف انرژی نمی‌شود، بلکه باعث تسریع ورود شبکه به وضعیت وابستگی کامل انرژی بر می‌گردد.

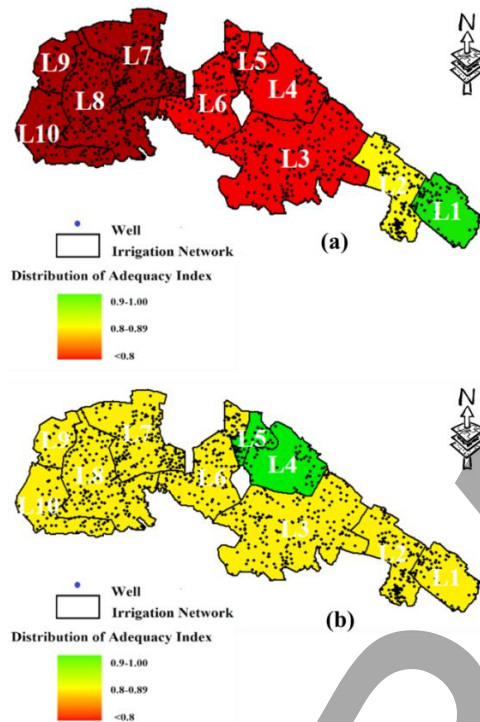
میانگین شاخص CLEWs برای کل شبکه در این روش ۰.۵۸۷ محاسبه شد که بیانگر وضعیت نیمه‌پایدار تا بحرانی است. تحلیل مکانی شاخص CLEWs نشان داد که نواحی بالادست (۱ تا ۳) عملکرد نسبتاً پایدار دارند (CLEWs بین ۰.۷۲ تا ۰.۸۹)، اما نواحی پایین‌دست (۷ تا ۱۰) به دلیل وابستگی کامل به منابع زیرزمینی، در وضعیت بحرانی قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که ساختار کنونی بهره‌برداری فاقد انعطاف لازم برای شرایط کم‌آبی بوده و پاسخ مناسبی به تغییرات مکانی تقاضا و عرضه ندارد (شکل ۸). در مقابل، سامانه کنترل پیش‌بینی توانست با بهره‌گیری از پیش‌بینی جریان و الگوریتم تنظیم خودکار دریچه‌ها، توزیع جریان را بهینه‌سازی کند. در این حالت،

### ۳-۴- نتایج حاصل از شاخص‌های عملکرد چارچوب

#### یکپارچه CLEWs در سناریوی دوم

به‌منظور بررسی عملکرد سامانه بهره‌برداری در شرایط محدودیت منابع، سناریوی خشکسالی با کاهش ۲۰ درصدی جریان ورودی به کانال اصلی شبیه‌سازی گردید. این سناریو بیانگر وقوع خشکسالی متوسط بوده و هدف آن ارزیابی پایداری شبکه آبیاری در شرایط کم‌آبی و سنجش کارایی سامانه کنترل پیش‌بینی (MPC) در مقایسه با روش مرسوم بهره‌برداری مبتنی بر دریچه‌های آمیل است. در این چارچوب، شاخص‌های کفایت تأمین آب، انرژی مصرفی، انتشار CO<sub>2</sub> 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 حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که در روش آمیل، کاهش جریان ورودی منجر به افت شدید کفایت تحویل آب در نواحی پایین‌دست شده است. مقدار کفایت از ۹۳٪ در ناحیه ۱ به کمتر از ۷۰٪ در نواحی میانی کاهش یافته و در نواحی ۷ تا ۱۰ عملاً جریان آب سطحی قطع گردید. این کمبود موجب فعال شدن برداشت از منابع زیرزمینی شده است. در نتیجه، مصرف انرژی به حدود ۱۹۰ میلیون کیلووات‌ساعت و انتشار CO<sub>2</sub> به حدود ۱۸۳۲۷ تن رسید. لازم به توضیح است که در روش

مؤلفه‌های آب، انرژی و محیط‌زیست به ترتیب برابر با ۰.۳، ۰.۳ و ۰.۳ در نظر گرفته شد و محاسبات مطابق روابط ارائه‌شده در بخش مواد و روش‌ها انجام گرفت. شاخص CLEWs در بازه ۰ تا ۱ نرمال شده و مقدار بالاتر نشان‌دهنده عملکرد پایدارتر سیستم است.



**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) سیستم سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

جدول ۶ شاخص CLEWS در نواحی 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

میانگین شاخص کفایت شبکه ۰.۸۱ به دست آمد و در تمامی نواحی آب سطحی تأمین گردید. مصرف انرژی کل شبکه در حالت MPC حدود ۸۹ میلیون کیلووات‌ساعت بود که نسبت به حالت آمیل کاهش ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد. به تبع آن، مجموع انتشار CO<sub>2</sub> 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 سیستم است. نواحی ۲، ۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۰ در محدوده پایدار (CLEWs > ۰.۷) قرار داشتند و تنها نواحی 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 تصمیم‌گیری لحاظ شوند و سامانه بتواند تعادلی میان کفایت آبی، مصرف انرژی و پایداری زیست‌محیطی برقرار کند. مقایسه دو روش بهره‌برداری در سناریوی خشکسالی نشان داد که استفاده از MPC باعث بهبود چشمگیر پایداری شبکه شده است. در روش آمیل، نیمی از نواحی شبکه در وضعیت بحرانی (CLEWS < 0.6) قرار داشتند، در حالی که در حالت MPC هیچ ناحیه‌ای دچار فروپاشی کامل عملکرد (CLEWS = 0) نشد. علاوه بر این، میانگین CLEWs از ۰.۵۸۷ به ۰.۷۲۲ افزایش یافت و مجموع انتشار CO<sub>2</sub> تقریباً نصف گردید. از دیدگاه مکانی، الگوریتم پیش‌بین توانست عملکرد نواحی میانی را به محدوده پایدار منتقل کند. با وجود این، نواحی پایین‌دست همچنان به دلیل افت هد و افت راندمان انتقال نیازمند اقدامات اصلاحی هستند. در مجموع، MPC توانسته است شبکه را از وضعیت بحرانی به وضعیت نیمه‌پایدار و پایدار سوق دهد.

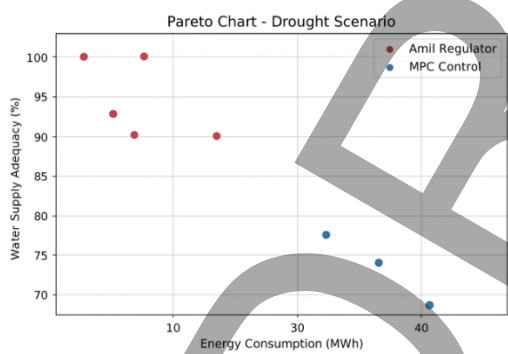
### ۵-۳- تحلیل شاخص تلفیقی CLEWs در سناریوی

#### خشکسالی

به‌منظور ارزیابی جامع پایداری سامانه بهره‌برداری شبکه آبیاری قزوین در شرایط کم‌آبی، شاخص ترکیبی CLEWs در سناریوی خشکسالی محاسبه گردید. در این مرحله، کاهش ۲۰ درصدی در دبی ورودی کانال اصلی لحاظ شد و دو رویکرد بهره‌برداری مرسوم (دریچه‌های آمیل) و کنترل پیش‌بین (MPC) مورد مقایسه قرار گرفتند. وزن

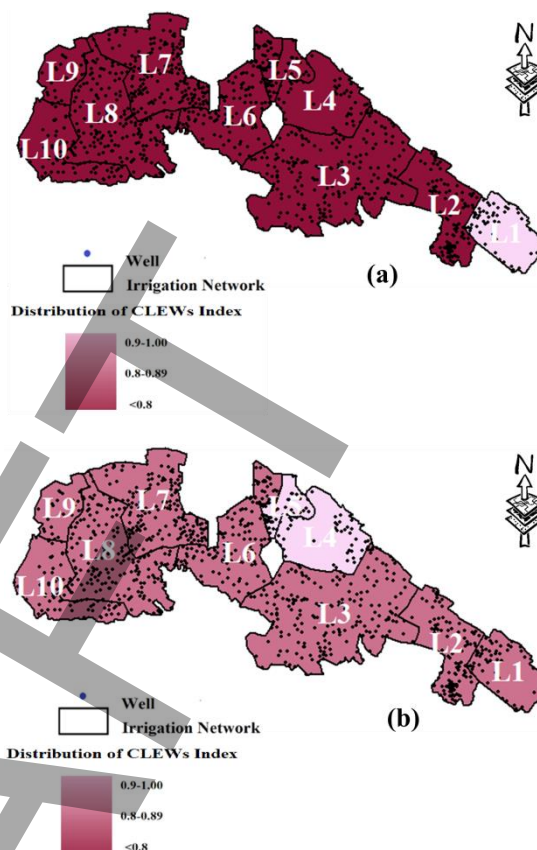
در نتیجه مقادیر CLEWs در بازه‌ی نسبتاً پایدار ۰/۸۶ تا ۰/۹۳ قرار گرفته‌اند (شکل ۹). مقایسه‌ی میانگین CLEWs دو روش نشان داد که مقدار میانگین در روش آمیل برابر با ۰/۴۱ و در روش MPC برابر با ۰/۸۸ است. بر اساس آزمون آماری t زوجی، این اختلاف در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است ( $t(6)=5.43, p<0.001$ ).

۳-۶- تحلیل چندهدفه عملکرد شبکه با استفاده از جبهه پارتو (Pareto Front) در سناریوی خشکسالی بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل چندهدفه، نمودار جبهه پارتو بین دو شاخص «کفایت تأمین آب» و «انرژی مصرفی» در شکل ۱۰ ترسیم شد. در این نمودار، نقاط 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 نقاط مربوط به روش MPC در ناحیه‌ی بالاتر و نزدیک به مرز بهینه قرار گرفته‌اند و نشان‌دهنده‌ی کارایی بیشتر در استفاده از انرژی هستند.



**Fig. 10** Pareto front between water supply adequacy and energy consumption (water shortage scenario)  
 شکل ۱۰ جبهه پارتو بین کفایت تأمین آب و مصرف انرژی (سناریوی خشکسالی)

در مقایسه با سناریوی نرمال، نمودار پارتو در سناریوی خشکسالی حالت پیوسته ندارد و داده‌ها به‌صورت نقاط مجزا نمایش داده شده‌اند. علت این موضوع، قطع عملکرد شبکه در نواحی پایین‌دست (۷ تا ۱۰) و گسستگی داده‌های مربوط به انرژی و کفایت است. این تفاوت از



**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 نواحی شبکه آبیاری تحت دو روش بهره‌برداری (a) سیستم سنتی (دریچه‌های آمیل) (b) سامانه کنترل خودکار پیش‌بین

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در شرایط خشکسالی، شاخص CLEWs در روش مرسوم (آمیل) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نواحی بالادست (۱ تا ۳) همچنان در وضعیت نسبتاً پایدار قرار دارند، اما مقدار شاخص در پایین‌دست (نواحی ۵ و ۶) به کمتر از ۰/۷ کاهش یافته است که نشان‌دهنده ورود سیستم 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 انتهایی شبکه در برابر کمبود منابع سطحی است.

در مقابل، عملکرد سامانه‌ی کنترل پیش‌بین نشان داد که این الگوریتم توانسته است با بازتخصیص هوشمندانه جریان، کفایت تحویل آب را در تمام نواحی حفظ کند و

<sup>1</sup> Discrete Scatter

کاهش داده و در نتیجه مصرف انرژی پمپاژ و انتشار دی‌اکسیدکربن را به حداقل رسانده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف توسعه 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 ارائه نمود. 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 مرسوم کاهش می‌دهد. این بهبود، عمدتاً ناشی از توانایی MPC در پیش‌بینی نوسانات تقاضا، کاهش تأخیر زمانی در توزیع جریان، و کنترل 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 مطالعات پیشین که تمرکز آن‌ها عمدتاً بر بهبود کنترل هیدرولیکی کانال‌ها بوده است (Fele et al., 2014; Chen et al., 2024)، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام کنترل پیش‌بین با چارچوب CLEWs می‌تواند پیامدهای فراتر از عملکرد هیدرولیکی، شامل مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی را نیز به‌صورت کمی و یکپارچه ارزیابی نماید. همچنین، برخلاف مطالعه (Hosseini Jolfan et al., 2023) که صرفاً به اثرات خودکارسازی بر کاهش برداشت آب زیرزمینی پرداخته است، پژوهش حاضر با توسعه شاخص تلفیقی 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 نواحی بحرانی، اولویت‌بندی مداخلات و تعریف آستانه‌های مدیریتی برای فعال‌سازی منابع مکمل را فراهم می‌کند. این ویژگی به مدیران شبکه امکان می‌دهد تا تصمیمات بهره‌برداری را نه تنها بر اساس کفایت تأمین آب، بلکه با در نظر گرفتن

لحاظ علمی بیانگر انتقال رفتار سیستم 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 قادر است پایداری شبکه را حتی در شرایط تنش آبی حفظ کند و از افزایش مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> جلوگیری نماید. این موضوع جوهره‌ی اصلی مفهوم CLEWs را در سطوح 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 بهره‌-

##### برداری

تفاوت عملکرد دو روش بهره‌برداری را می‌توان از منظر رفتار هیدرولیکی جریان در کانال‌های روباز تحلیل کرد. در شبکه‌های آبیاری طولانی، تغییرات دبی ورودی به‌صورت موجی در طول کانال منتشر شده و با تأخیر زمانی قابل‌توجهی به نواحی پایین‌دست می‌رسند. در روش مرسوم مبتنی بر دریچه‌های آمیل، تنظیمات محلی و واکنشی دریچه‌ها قادر به جبران این تأخیر انتقال نبوده و در نتیجه، نوسانات تراز آب و کمبود جریان در پایین‌دست تشدید می‌شود. در مقابل، کنترل پیش‌بین مدل‌محور (MPC) با بهره‌گیری از مدل دینامیکی کانال، قادر است رفتار آینده سیستم را در افق زمانی مشخص پیش‌بینی کرده و تنظیم دریچه‌ها را به‌صورت هماهنگ و پیش‌دستانه انجام دهد. این ویژگی موجب کاهش دامنه نوسانات تراز آب، جلوگیری از انباشت خطاهای کنترلی و بهبود توزیع زمانی و مکانی جریان در شبکه می‌شود. یکی از دلایل اصلی افت کفایت در نواحی پایین‌دست در روش مرسوم، اثر تجمعی خطاهای بهره‌برداری در طول کانال است؛ به‌طوری‌که هر انحراف کوچک در تنظیم دریچه‌های بالادست، در پایین‌دست تقویت می‌شود. MPC با کنترل هم‌زمان چندین مقطع کنترلی، این زنجیره انتقال خطا را قطع کرده و پایداری هیدرولیکی شبکه را افزایش می‌دهد. این بهبود هیدرولیکی مستقیماً به نتایج انرژی و زیست‌محیطی گزارش‌شده در چارچوب CLEWs منجر شده است؛ به‌گونه‌ای که افزایش کفایت تأمین آب سطحی در روش MPC، نیاز به برداشت از منابع زیرزمینی را

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.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.012>

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.

Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S. M., Javadi, S., Mallakpour, I., & Neshat, A. (2020). Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 11-24.

<https://doi.org/10.1002/ird.2396>

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.

<https://doi.org/10.1038/nclimate1789>

International Energy Agency (IEA). (2022). CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion Highlights. OECD/IEA, Paris.

Jalali, M., & Zarei, R. (2019). Assessment of water use efficiency in irrigation systems of Iran. *Iranian Water Resources Research*.

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

پیامدهای انرژی و زیست‌محیطی اتخاذ نمایند. از دیدگاه بهره‌برداران نیز، نتایج این چارچوب می‌تواند مبنایی برای تطبیق الگوی کشت، به‌کارگیری روش‌های آبیاری با راندمان بالا و کاهش ریسک اقتصادی در شرایط کم‌آبی باشد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق کنترل پیش‌بین با چارچوب CLEWs می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مؤثر در مدیریت تطبیقی شبکه‌های آبیاری، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد و زمینه‌ساز توسعه سیاست‌های بهره‌برداری هوشمند در مواجهه با تغییر اقلیم باشد.

## 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>

Chen, L., Garcia, M., & El-Sayed, A. (2024). An adaptive model predictive control approach for automated irrigation canal networks. *Journal of Agricultural Engineering*.

<https://doi.org/10.1016/j.jageng.2024.100101>

Endo, A., Burnett, K., Orencio, 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.

<https://doi.org/10.1016/j.procont.2014.02.005>

- 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*. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.150>
- 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>
- Shahsavandi, M., Yazdi, J., Jalili Ghazizadeh, M., and 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. [10.30482/jhyd.2024.419223.1679](https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.419223.1679)
- 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: AhupuaʻA*. 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–CO<sub>2</sub> 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>
- 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., Hmaidi, 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*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-0859-0>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1353695>
- Mohammadi, A., Parvaresh Rizi, A. and Abbasi, N. (2017). Evaluation of Hydraulic Performance of Regulators and Distribution Structures in Varamin Irrigation Network. *Journal of Hydraulics*, 12(3), 1-12. [10.30482/jhyd.2017.52004](https://doi.org/10.30482/jhyd.2017.52004)
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:6\(804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(804))
- Ranjbar, R., Martin, J. G., Maestre, J. M., Etienne, L., Duviella, 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. <https://doi.org/10.2166/hydro.2025.300>
- 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>