

Optimal Water Distribution within the Main Irrigation Canal Considering Economic Perspective in Water Shortages Conditions

M. Hashemi^{1*}, Y. Hassani² and M. Hormozi³

Abstract

In this study, a newly operation-economy framework is proposed for the operation of irrigation canals in water scarcity periods. The framework is working based on maximization of the net revenue derived from the existing farming activities and economic value of water. To this aim, the economic model of Positive Mathematic Programing (PMP) and the Model Predictive Controller (MPC) were employed respectively to determine the economic value of water and water delivery to secondary farming units. Considering the existing agricultural potential at Qazvin Irrigation Network, the economic model computed the economic value of water based on optimizing the existing cropping pattern. Consequently, the secondary farming units were ranked with regards to the corresponding economic values of water. According to the results, the secondary canals of L4 and L1 respectively with 2000 and 2180 IRR per cubic meters got the first rank in value of water and L9, and L10 with respectively 1220 and 1000 IRR per cubic meters were in the last rank. The MPC operational model was minimizing the water level errors regarding the provided prioritizing by the economic model. Results showed the satisfactory operation of the canal reaches so that the water delivery to L4 and L1 canals with high economic water value would be closer to the operational target levels. This resulted in that under water shortages scenario the delivery of water to these main canals has not been affected.

Keywords: Economic Value of Water; Economic Operation; Water Shortages; Model Predictive Control; Positive Mathematical Programming.

Received: November 21, 2016

Accepted: February 28, 2017

توزیع بهینه آب در کانال اصلی آبیاری از نظر اقتصادی در شرایط کم آبی

مهدی هاشمی^{۱*}، یوسف حسینی^۲ و محمد هرمزی^۳

چکیده

در این تحقیق رویکرد جدید بهره‌برداری اقتصادی شبکه‌های آبیاری در شرایط کم آبی و بر پایه حداکثرسازی سود حاصل از فعالیت‌های کشاورزی و ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب تحویلی ارائه شده است. برای این منظور، از تلفیق مدل اقتصادی برنامه‌ریزی اثباتی، به‌منظور تعیین ارزش اقتصادی آب، و مدل بهره‌برداری پیش‌بین، جهت تحویل آب به واحدهای زراعی درجه دو استفاده شده است. مدل اقتصادی بر پایه پتانسیل‌های موجود اقتصاد کشاورزی اراضی شبکه آبیاری قزوین، اقدام به محاسبه ارزش اقتصادی آب بر پایه بهینه‌سازی الگوی کشت موجود، برای هر واحد زراعی نموده و امکان رتبه‌بندی واحدهای زراعی موجود را براساس ارزش اقتصادی آب فراهم آورده است. بر این اساس بیشترین مقدار ارزش اقتصادی آب برای کانال‌های درجه دو L4 و L1 به ترتیب با ۲۱۸۰ و ۲۰۰۰ ریال و کمترین آن برای کانال‌های L9 و L10 به ترتیب با ۱۲۲۰ و ۱۰۰۰ ریال در مترمکعب به‌دست آمده است. توزیع بهینه آب بر مبنای ارزش اقتصادی محاسبه شده، توسط مدل بهره‌برداری و با حداقل‌سازی خطای رقوم سطح آب در بالادست آبگیرهای واقع در کانال اصلی انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که با وجود کم‌آبی در کانال اصلی، با این حال کانال‌های L4 و L1، که بیشترین مقدار ارزش اقتصادی آب را داشته‌اند، بدون هیچ‌گونه خللی آب مورد نیاز خود را برداشت نموده‌اند.

کلمات کلیدی: ارزش اقتصادی آب، بهره‌برداری اقتصادی، کم‌آبی، کنترل پیش‌بین، مدل برنامه‌ریزی اثباتی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۹/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۲/۱۰

1- Assistant Professor, Irrigation Engineering Department, College of Aburairhan, University of Tehran, Tehran, Iran Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir
2- Researcher, Water Consumption Management and Productivity Enhancement Department, Ministry of Energy, Tehran, Iran
3- Head of Economic and Financial Evaluation Department, Planning Deputy, Khuzestan Water and Power Authority, Ahvaz, Iran
*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
۲- کارشناس ارشد دفتر مدیریت مصرف و ارتقا بهره‌وری آب و آبفا، وزارت نیرو
۳- رئیس گروه ارزیابی اقتصادی و مالی معاونت برنامه‌ریزی، سازمان آب و برق خوزستان
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان اسفند ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

پاسخگویی مناسب به تقاضای رقابتی آب بین در بازارهای محلی آب، بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل خودکار در این مناطق الزامی می‌باشد.

در شرایط کم‌آبی، تأمین میزان آب ورودی به شبکه بر اساس کل میزان تقاضا تقریباً امکان‌پذیر نمی‌باشد. اگر مطابق استراتژی خطای تفاوت سطح آب (Clemmens, 2012) کمبود آب به طور مساوی و عادلانه بین تمام آب‌بران واقع در بالادست و پایین دست کانال اصلی تقسیم شود، فرآیند تحویل آب از نقطه نظر کشاورزان و مسئولان شبکه رضایت بخش است. اما این روش تحویل آب در آن دسته از شبکه‌های آبیاری که رقابت شدید بین تعاونی‌های آب‌بران، انجمن‌های کشاورزی و شرکت‌های کشت و صنعت برای دسترسی به آب بیشتر وجود دارد، کارایی ندارد. در این تحقیق تلاش شده تا برای اولین بار «عدالت توزیع آب» در محدوده شبکه آبیاری از مفهوم فیزیکی به اقتصادی تغییر داده شود. به عبارت دیگر، نوآوری این تحقیق آن است که با تلفیق مدل اقتصادی با مدل بهره‌برداری در شرایط کم‌آبی، تحویل آب به آبیگرهای واحدهای زراعی درجه دو بر اساس ارزش اقتصادی آب صورت گرفته است. در نتیجه امکانی فراهم شده که تولید هر محصول زراعی بر مبنای سود و ارزش اقتصادی بیشتر آب انجام گرفته و زمینه لازم را به منظور بهره‌مندی از پتانسیل بازار آب فراهم نموده است.

برای تحقق هدف مذکور در این تحقیق از تلفیق مدل اقتصادی برنامه‌ریزی اثباتی PMP¹ با مدل سامانه خودکار MPC² بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری، استفاده گردید. هر دو مدل اقتصادی و بهره‌برداری برای سامانه اصلی انتقال شبکه آبیاری قزوین (شامل کانال اصلی و کانال‌های درجه دو این شبکه) طراحی و واسنجی شدند. نیاز روز افزون به شبیه‌سازی توابع رفتاری تحت شرایط مختلف فنی، اقتصادی، سیاسی و زیست محیطی، استفاده از مدل PMP که فاقد تخصص بیش از حد³، مشکل معتبرسازی، عدم انعطاف‌پذیری نسبت به تغییر پارامترها و نیز دارای قابلیت واسنجی می‌باشد، تقویت کرده است (Howitt, 1995). این مدل به صورت گسترده در تحقیقات کاربردی و تجزیه و تحلیل سیاست‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Garay et al., 2010; Howitt et al., 2012; Medellín-Azuara et al., 2010).

همچنین با توجه به پر رنگ شدن نقش استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری کانال‌های آبیاری، روش کنترل خودکار MPC، به عنوان ابزار قدرتمند پیاده‌سازی دامنه وسیعی از استراتژی‌های مذکور، در مطالعات متنوعی در ارتباط با خودکارسازی شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار گرفته است

کشاورزی فاریاب نقش غیر قابل انکاری در بخش بزرگی از فعالیت‌های کشاورزی کشورهای در حال توسعه، که معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند، ایفا می‌کند. تقاضای چشم‌گیر مواد غذایی به دلیل افزایش جمعیت، عدم توجه دولت‌ها به سیاست کنترل جمعیت، رقابت شدید بین بخش‌های غیرکشاورزی با بخش کشاورزی در به‌دست آوردن میزان آب بیشتر و نیز تولید محصول نامطمئن در کشاورزی دیم به دلیل توالی وقایع خشکسالی از نگرانی‌های متداول در این کشورها به‌شمار می‌رود. در نتیجه عوامل مذکور یک انگیزه قوی در زمینه بهبود بهره‌وری آب کشاورزی با افزایش راندمان عملکرد سامانه‌های آبیاری به‌وجود آمده است. با این حال عملکرد رضایت بخش سامانه‌های آبیاری در مزرعه هنگامی میسر می‌شود که سامانه‌های مدرن انتقال، توزیع آب در شبکه‌های آبیاری پیاده شوند تا بتوانند فرآیند تحویل آب را به‌صورت مطمئن و با انعطاف‌پذیری کافی در اختیار سامانه‌های درون مزرعه‌ای قرار دهند. در صورتی که روش توزیع آب در کانال‌ها به شیوه سنتی انجام گردد و همزمان از سامانه‌های مدرن آبیاری درون مزرعه استفاده گردد، آب مازادی به‌سبب بهبود راندمان کاربرد آب در هر مزرعه به وجود می‌آید. در نتیجه کشاورزان اقدام به توسعه سطح زیر کشت یا تغییر الگوی کشت و استفاده از محصولات آب‌بر در کشت خود می‌نمایند. نتیجه این امر، نه‌تنها بهبود بهره‌وری آب در مقیاس کل یک شبکه آبیاری را به‌همراه نداشته بلکه اجرای طرح‌های مدرن‌سازی درون مزرعه‌ای را با چالش جدی مواجه می‌کند. برای رفع این مشکل چاره‌ای جز بهبود مدیریت بهره‌برداری و بهره‌گیری از روش‌های موثر انتقال، توزیع آب در کانال‌های اصلی و فرعی نمی‌باشد (Burt, 2011).

تجربیات موفق در استفاده از روش‌های مختلف کنترل خودکار برای کانال‌های آبیاری با در نظر گرفتن ملاحظات فیزیکی و بهره‌برداری مختلف گزارش شده است (Zafra-Cabeza et al., 2011; van Overloop et al., 2010; Fele et al., 2014). هدف ابتدایی از پیاده‌سازی این سامانه‌ها حصول عملیات بهره‌برداری مناسب برای توزیع آب بر اساس روش برحسب تقاضا بوده که این استراتژی بهره‌برداری در مناطق کشاورزی فاریاب (و نه در مناطق خشک و نیمه‌خشک) عملی است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأمین آب کافی برای پاسخ‌گویی به تقاضای کل در کانال امکان‌پذیر نمی‌باشد و دستیابی به سطح رضایت بخش و منصفانه در تحویل آب به تمامی آب‌بران پایین دست و بالادست، به عنوان یکی از اهداف بهره‌برداری کانال، گنجانده شده است. به‌منظور حل معضلات مدیریت بهره‌برداری در مناطق خشک اعم از تأمین عادلانه آب بین آب‌بران و نیز

جامعه آماری تحقیق حال حاضر دارای ۸۳ روستا بوده که توسط نمونه‌گیری خوشه‌ای تعداد ۱۲۰ پرسشنامه از کشاورزان شاغل در محدوده مطالعاتی این تحقیق تکمیل شده است. این پرسشنامه، که اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی اقتصادی را در بر گرفته است، حاوی مشخصات فردی، اجتماعی و اطلاعات مربوط به هزینه‌های تولید محصولات زراعی آبی واقع در الگوی کشت واحدهای زراعی منتهی به کانال‌های درجه دو شبکه آبیاری قزوین می‌باشد. همچنین اطلاعات مربوط به قیمت محصولات زراعی، میزان مصرف آب در واحد هکتار محصولات مذکور، تعرفه آب هر محصول و قیمت نهاده‌های کشاورزی از سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری گردیده است و مجموعه این اطلاعات به عنوان داده‌های مدل اقتصادی در نظر گرفته شده است. همچنین تمام اطلاعات مورد نیاز جهت مدل‌سازی بهره‌برداری از قبیل مشخصات فیزیکی کانال اصلی و آبگیرهای درجه دو به همراه اطلاعات بهره‌برداری شبکه برای سال آبی ۱۳۹۳ مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- مدل اقتصادی

مدل اقتصادی این تحقیق نیز بر پایه مدل PMP بنا شده است که مراحل مدل‌سازی آن در ادامه تشریح شده است. همچنین روند انجام برنامه‌ریزی اثباتی از مرحله ورود اطلاعات تا شبیه‌سازی مدل اقتصادی و استخراج نتایج در روندنمای شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.

مدل PMP در راستای رسیدن به ارزش اقتصادی آب محصولات زراعی و الگوی کشت بهینه موجود در محدوده مطالعاتی، مراحل ذیل را طی می‌نماید.

۲-۲-۱- مرحله اول مدل اقتصادی

در این مرحله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمین، نیروی کار خانوادگی، حجم آب و نیز محدودیت‌های واسنجی، به منظور شبیه‌سازی شرایط موجود کشاورزی در محدوده مطالعاتی ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی مذکور با هدف حداکثرسازی درآمد کشاورزان به شرح ذیل می‌باشد (Howitt, 1995):

$$\max_{\text{land}} \sum_i p_i \hat{y}_i X_{i\text{land}} - \sum_i p_h a_{ih} X_{i\text{land}} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Land: } \sum_i X_{i\text{land}} \leq B_{\text{land}}, \\ \text{Family labor: } \sum_i a_{i\text{fl}} X_{i\text{land}} \leq B_{\text{fl}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Surface Water: } \sum_i X_{i\text{swm}} \leq B_{\text{swm}}, \end{array} \right. \quad (3)$$

انتخاب شبکه آبیاری قزوین، برای مطالعه، به این سبب انجام گرفت که بخش زیادی از آب مصرفی شبکه مذکور، بعد از برطرف کردن نیاز شرب شهرهای تهران و کرج توسط سد طالقان تأمین می‌گردد. بنابراین علی‌رغم اثرات اقلیم منطقه (خشکسالی) بر میزان آب قابل‌دسترس دشت مذکور، رهاسازی آب در این شبکه به شدت تحت تأثیر نیازهای آب شرب شهرهای تهران و کرج (دارای تمرکز جمعیتی و فعالیت‌های صنعتی بالا) می‌باشد که رشد روز افزون جمعیت شهرهای مذکور اثرات این نیازها را چند برابر نموده است. از طرف دیگر وجود کم‌آبی، افت شدید آبهای زیرزمینی بر اثر بهره‌برداری بیش از حد، بهره‌وری، تعرفه و راندمان نازل آب کشاورزی، تخصیص ناکارای آب به محدوده‌های مطالعاتی و الگوی کشت نامناسب نیز از دیگر مشکلات دشت مذکور به شمار می‌رود. با در نظر گرفتن موارد فوق و با عنایت به اهمیت ارزش اقتصادی آب در جهت استفاده بهینه و کارا از سیستم‌های منابع آب، پژوهش حاضر در صدد توزیع و تخصیص بهینه آب به واحدهای مطالعاتی شبکه مذکور بر پایه ارزش اقتصادی تحت شرایط کمبود آب می‌پردازد.

هدف اصلی این تحقیق، به کارگیری مدل اقتصادی PMP در قالب یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای مدل بهره‌برداری می‌باشد تا بتوان به یک برنامه‌ریزی توزیع واقع‌بینانه آب در راستای حداکثر رساندن سود اقتصادی ناشی فعالیت کشاورزی در کانال اصلی آبیاری رسید. برای این منظور، مدل مقیاسی^۴ ارائه شده در تحقیق حاضر با تلفیق داده‌های هیدرولیکی (محاسبه شده از مدل بهره‌برداری) و اقتصادی (ارزش اقتصادی آب محاسبه شده در کانال‌های درجه دو توسط مدل اقتصادی) اولویت‌بندی تحویل آب به آبگیرهای واحد درجه دو را مطابق پتانسیل آنها در تولید سود اقتصادی بیشتر مشخص کرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- شبکه آبیاری قزوین

قدمت بهره‌برداری از شبکه، سوابق مطالعاتی فراوان (از سال ۱۳۴۶ تا کنون) و از همه مهم‌تر وجود امکانات فنی و نهادی مناسب در شبکه به منظور مطالعات اقتصادی، از جمله تحویل آب بر مبنای حجم به میرابها، زیرساختارها و ابزارهای اندازه‌گیری مناسب به‌عنوان پیش نیاز توزیع و تخصیص و قیمت‌گذاری آب و وجود تشکل‌های آبران از مواردی هستند که به انتخاب این شبکه از بین ۵۷ شبکه آبیاری و زهکشی در کشور، جهت مطالعه در این تحقیق منجر شد.

۲-۲-۲- مرحله دوم مدل اقتصادی

در این مرحله پارامترهای تابع تولید از نوع کشش جانشینی ثابت با استفاده از قیمت‌های سایه‌ای نهاده‌های تولید (منابع محدود و محدودیت واسنجی) بدست آمده از مرحله اول تخمین زده می‌شود. شایان ذکر است که تابع تولید مذکور برای محصولات زراعی آبی بوده و به صورت زیر می‌باشد:

$$q_i^{ir} = A_i \left(\sum_h b_{ih-1} X_{ih-1}^\gamma + b_w (X_{isw} + P_i^a)^\gamma \right)^{\frac{\varepsilon_i}{\gamma}} \quad (5)$$

که در آن توان ir در q_i^{ir} ، مخفف تابع تولید آبی می‌باشد که مشخص است. مقدار A_i ، γ و ε_i از مقالات مرجع در نظر گرفته شده است، که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۰.۵، ۱ و ۱ لحاظ شده است. b_{ih-1} پارامترهای تابع تولید می‌باشد که توسط خروجی مرحله اول مدل اقتصادی (قیمت‌های سایه‌ای نهاده‌های تولید) محاسبه شده است. b_w سهم آب سطحی (X_{isw}) یا بارش P_i^a از اطلاعات اخذ شده در منطقه مورد مطالعه بدست آمده است.

۲-۲-۲- مرحله سوم مدل اقتصادی

در مرحله آخر، با استفاده از تابع تولید تخمینی مرحله دوم و لحاظ آن در تابع هدف مرحله اول مدل اقتصادی [معادله (۱)]، مدل برنامه‌ریزی جدیدی با همان محدودیت‌های مدل مرحله اول و با حذف محدودیت‌های واسنجی جهت دستیابی به مجموعه بهینه از نهاده‌های حداکثر کننده درآمد خالص و ارزش اقتصادی آن‌ها ارایه شده است.

۲-۳- مدل بهره‌برداری

در تکنیک طراحی روش کنترل پیش‌بین علاوه بر روش کنترل پس‌خور^۵ و پیش‌خور^۶ یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر (در سامانه‌های آبی عبارت است از رقوم سطح آب یا دبی عبوری از سازه‌های کنترل، تنظیم و آبیگرها) استفاده می‌شود. استفاده از فرآیند بهینه‌سازی در کنترل‌گر سبب خواهد شد تا محدودیت‌های موجود در عملکرد سامانه‌های آبی تحت کنترل (شامل حداکثر ظرفیت ایستگاه پمپاژ و یا محدودیت بازشدگی سازه‌های کنترل و تنظیم) در فرآیند بهره‌برداری لحاظ شده و مجموعه‌ای از اهداف مختلف در کنترل هیدرولیک جریان در نظر گرفته شود (Camacho and Bordons, 2004). کنترل‌گر مدرن MPC با استفاده از پیش‌بینی تأثیر اغتشاشات ناشی از تغییرات برداشت آب (یا هر اختلال قابل پیش‌بینی دیگری) از سیستم در یک افق زمانی آینده و نیز لحاظ نمودن محدودیت‌های فیزیکی و سازه‌ای سیستم کانال در فرآیند بهینه‌سازی قادر خواهد بود با سرعت و دقت بیشتری تراز سطح

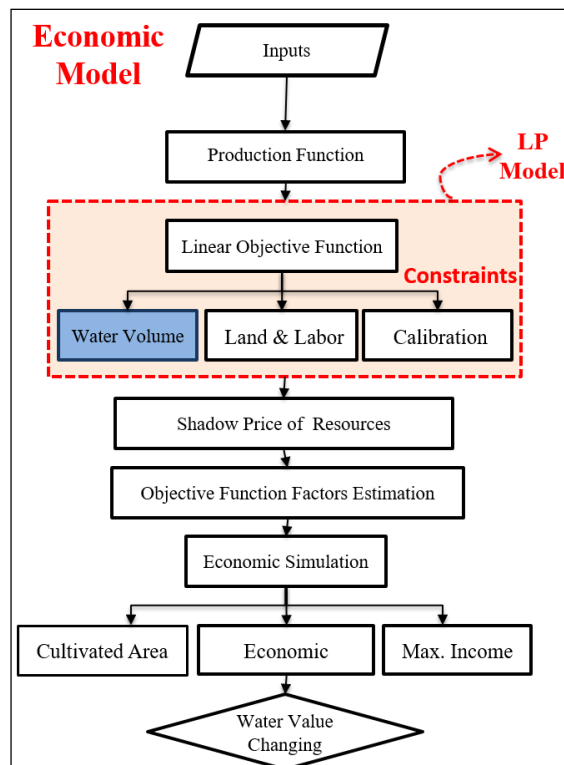


Fig. 1- Modelling steps of the economic PMP model
شکل ۱- مراحل مدل‌سازی مدل اقتصادی PMP

$$X_{iland} \leq \hat{X}_{iland} \quad (4)$$

که در معادله (۱)، p_i قیمت محصول i ام، \hat{y}_i محصول در هکتار، (X_{iland}) زمین تخصیص داده شده به محصول i ، p_h هزینه هر واحد از نهاده h مورد استفاده در تولید محصول i و a_{ih} نهاده‌های مورد استفاده در واحد هکتار می‌باشند (X_{ih}/X_{iland}) و B_{ih} به ترتیب بازتاب کل زمین در دسترس و نیروی کار خانوادگی در معادله (۲) می‌باشند. معادله (۳) تضمین می‌کند که مقدار کل آب‌های سطحی مورد استفاده (X_{iswm}) در ماه یا سال m کمتر یا مساوی میزان کل آب سطحی در دسترس (B_{swm}) برای آبیاری محصولات زراعی در همان ماه و یا سال می‌باشد که با استفاده از ضریب گیاهی (kc)، محاسبه تبخیر-تعرق برای هر محصول زراعی i و سطح بارش واقعی (P_n^a) در هر روز سال (n) محاسبه می‌گردد. در معادله (۴)، \hat{X}_{iland} عبارت است از مساحت کل زمین تخصیص داده شده به محصول زراعی i که توسط محقق مشاهده گردیده است. این محدودیت باعث حفظ الگوهای کشت مشاهده شده در منطقه و استفاده از اطلاعات آن جهت تخمین قیمت‌های سایه‌ای منابع غیر بازاری و محدود، می‌گردد.

از حداکثر خطای مطلق (MAE)^۲ و خطای مطلق تجمعی (IAE)^۱ که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۴- تهیه مدل بهره‌برداری - اقتصادی

تلفیق مدل اقتصادی توسعه داده شده در این تحقیق به عنوان مدل پشتیبانی تصمیم برای مدل بهره‌برداری به این صورت انجام گرفته است که خروجی این مدل (که عبارت است از ارزش اقتصادی آب به تفکیک هر کدام از کانال‌های درجه دو شبکه آبیاری قزوین) به صورت ورودی مدل بهره‌برداری استفاده می‌شود. اطلاعات کشاورزی به‌دست آمده از مصاحبه با کشاورزان و سایر ذینفعان، به عنوان ورودی برای مدل اقتصادی استفاده شده است.

سپس مدل اقتصادی PMP، مکرراً با تغییر مقدار آب ورودی به داخل کانال، براساس سناریوهای بهره‌برداری این تحقیق اجرا شده و ارزش اقتصادی آب برای هر محصول، به طور جداگانه محاسبه گردیده است. بر اساس ارزش اقتصادی آب محاسبه شده کانال‌های درجه دو، این کانال‌ها اولویت‌بندی شدند. مدل بهره‌برداری پیش‌بین با لحاظ نمودن این اولویت‌بندی، کنترل رقوم سطح آب در بالادست آبگیر کانال‌های درجه دو را انجام داده است. شایان ذکر است که هر دو مدل اقتصادی و بهره‌برداری مورد استفاده در این تحقیق، به طور جداگانه برنامه‌نویسی شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل اقتصادی

در ابتدا، مدل اقتصادی تحقیق حاضر بر مبنای پتانسیل‌های وضعیت کشاورزی موجود در شبکه آبیاری قزوین و با هدف حداکثر نمودن درآمد ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، اقدام به محاسبه ارزش اقتصادی آب در ازای هر متر مکعب آب تحویلی به واحدهای زراعی درجه چهار (مزرعه) نموده است.

آب در بازه‌های کانال را در محدوده هدف نگه دارد. شکل ۲ روند شماتیک مدل کنترل MPC در یک سیستم آبی تحت کنترل را نشان می‌دهد. معرفی اجزای مدل، فرمولاسیون اجزا مذکور و معرفی روابط حاکم بر اجزای مدل پیش‌بین در (Hashemy et al., 2013) آمده است.

شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی مورد مطالعه این تحقیق توسط مدل ریاضی تهیه‌شده در نرم‌افزار مطلب و با گام زمانی شبیه‌سازی ۳۰۰ ثانیه، گام زمانی بهره‌برداری ۶۰ ثانیه و افق زمانی ۳ ساعت برای کنترل‌گر پیش‌بین انجام شد. شبیه‌سازی در قالب دو سناریوی بهره‌برداری به شرح ذیل انجام گردید:

سناریوی بهره‌برداری اول: در این سناریو اثر کمبود آب در کانال اصلی با کاهش میزان آب ورودی به کانال اصلی از ۳۰ متر مکعب بر ثانیه (برابر مجموع تقاضا در کانال اصلی) به ۲۵ متر مکعب بر ثانیه وارد شده است. در این شرایط کنترل‌گر پیش‌بین باید بهره‌برداری کانال اصلی را به نحوی انجام دهد که کل خطای تحویل آب در طول مدت بهره‌برداری حداقل گردد. در این سناریو از مدل اقتصادی استفاده نشده است.

سناریوی بهره‌برداری دوم: در این سناریو همه شرایط مانند سناریوی قبلی بهره‌برداری است با این تفاوت که از مدل تلفیقی بهره‌برداری - اقتصادی معرفی شده در این تحقیق بهره‌برداری گرفته شده است.

ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین تحت هر دو سناریوی بهره‌برداری توسط معیارهای ارزیابی عملکرد بهره‌برداری انجام شده است که بر اساس میزان خطای سطح آب از سطح هدف و مدت زمان وقوع این خطا طرح‌ریزی شده‌اند. رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف (Molden and Gates, 1990; Clemmens et al., 1998) عبارتند

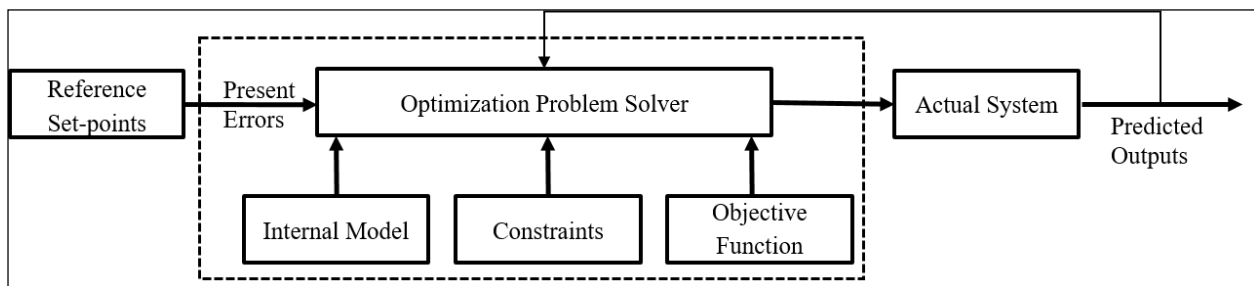


Fig. 2- MPC controller diagram for a controlled water system

شکل ۲- دیاگرام کنترل‌گر MPC در یک سیستم آبی تحت کنترل

(درجه دو و درجه سه) نیز فراهم نمود.

با در نظر گرفتن اطلاعات مندرج در شکل ۳، اولویت‌بندی مختلف بازه‌های کانال اصلی صورت گرفته است. لازم به توضیح است که در هر بازه از کانال اصلی شبکه قزوین تنها یک آبگیر واحد درجه دو جای گرفته است. بنابراین اولویت‌بندی بازه‌های کانال اصلی همان معنی رتبه‌گذاری واحدهای زراعی درجه دو می‌باشد.

ارزش‌های اقتصادی آب و اولویت‌های تحویل آب به واحدهای زراعی درجه دو در جدول ۱ آمده است. رتبه‌بندی مذکور مبنای تحویل آب به آبگیرهای متناظر هر واحد زراعی درجه دو می‌باشد که در سناریوی دوم این تحقیق توسط مدل بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

توسط روش میانگین‌گیری وزنی، با توجه به نسبت سطح زیر کشت هر محصول به کل سطح زیر کشت، میانگین ارزش اقتصادی آب برای واحدهای زراعی درجه سه و به‌طور مشابه برای هر واحد زراعی درجه دو محاسبه گردید. شکل ۳ مقادیر محاسبه شده میانگین ارزش اقتصادی آب را به تفکیک هر واحد زراعی درجه دو به تصویر کشانده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، محصولات زراعی واقع در الگوی کشت محدوده تحت پوشش هر واحد زراعی درجه دو نیز مشخص شده است. شایان ذکر است که محاسبه مقادیر مذکور به تفکیک واحد زراعی درجه دو، به دلیل هدف اصلی این تحقیق که بهینه‌سازی توزیع آب در کانال اصلی مدنظر بوده انجام گرفته است. به عبارت دیگر، با تلفیق مدل اقتصادی- بهره‌برداری ارایه شده در این تحقیق، می‌توان رویکرد اقتصادی تحویل آب را برای کانال‌های فرعی

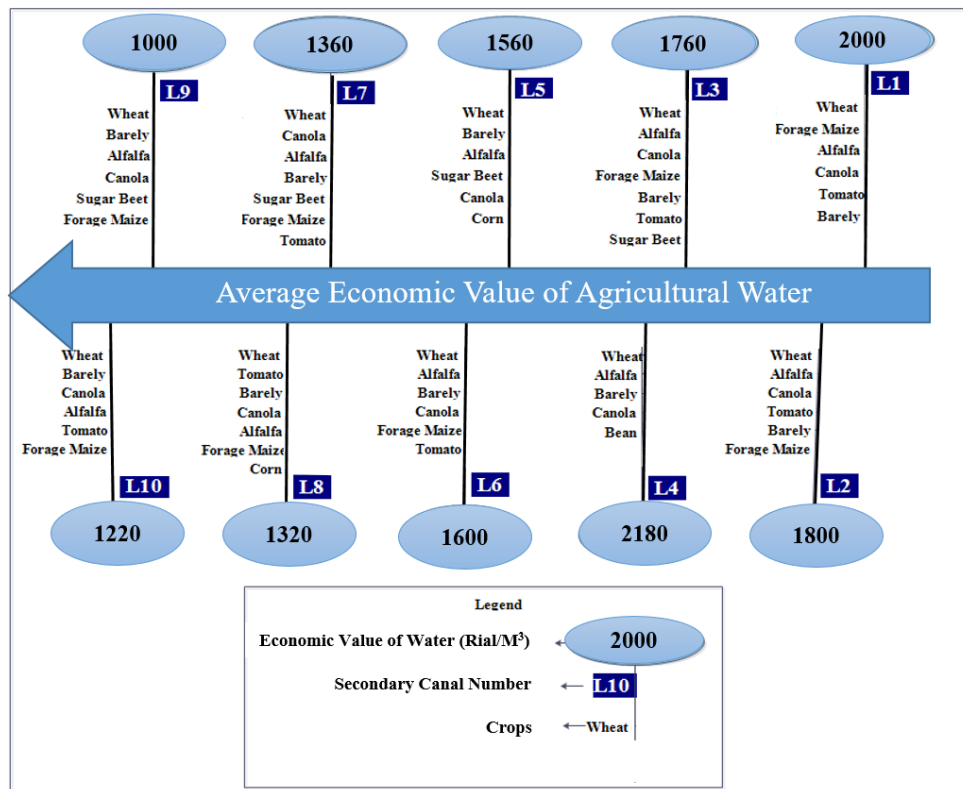


Fig. 3- Calculated average economic value of water

شکل ۳- میانگین ارزش اقتصادی آب محاسبه شده

Table 1- Calculated economic value of water and the canal rankings

جدول ۱- مقادیر محاسبه شده ارزش اقتصادی آب و رتبه‌بندی کانال‌ها

Secondary canals	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Economic value of water (Rial/m ³)	2000	1800	1760	2180	1560	1600	1360	1320	1000	1220
Canal ranking	1	2	2	1	3	3	4	4	5	5

۳-۲- سناریوی اول بهره‌برداری

در این سناریو سازه تنظیم در سراب کانال در طول ۶ ساعت ابتدایی بهره‌برداری با دبی ۳۰ مترمکعب بر ثانیه، برابر با کل تقاضا در طول کانال، و سپس در مابقی ۱۸ ساعت بهره‌برداری با دبی ۲۵ مترمکعب بر ثانیه آب وارد کانال اصلی می‌نماید. هدف در این سناریو فراهم کردن شرایط ۱۵٪ کمبود آب تأمین شده در سراسر شبکه آبیاری است. با توجه به شکل (۴)، منحنی‌های خطای رقوم سطح آب با یک شیب تند با شروع محدودیت آب ورودی به کانال از خطای صفر فاصله گرفته و بعد از مدتی به یک روند کم و بیش ثابت می‌رسند. همچنین منحنی‌ها نشان می‌دهد که بازه‌های پایین دست کانال بیشتر تحت تأثیر کم آبی می‌باشد. شاخص‌های ارزیابی عملکرد IAE و MAE در حدود ۳۰-۱۶ درصد در بازه‌های پایین دست افزایش یافته است. دلیل این امر به ماهیت رویکرد کنترل بالادست برمی‌گردد که هر گونه افزایش یا کاهش در میزان آب ورودی در سراب کانال مستقیماً کشاورزان پایین دست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به علت آنکه سناریوی بهره‌برداری این تحقیق منطبق بر شرایط کم آبی می‌باشد، لذا پائین افتادگی رقوم سطح آب در بازه‌های پایین دست رخ داده و در نتیجه شاخص‌های ارزیابی عملکرد IAE و MAE در مقایسه با مقادیر مشابه بازه‌های بالادست افزایش یافته است. شایان ذکر است که بر اساس نتایج این سناریو، آبیگرهای واقع در بالادست کانال اصلی تأثیر کمی از کم آبی دیده‌اند، به طوری که مقدار به دست آمده هر دو شاخص ارزیابی عملکرد تقریباً ۱۰ درصد به دست آمده است.

۳-۳- سناریوی دوم بهره‌برداری

همان طور که نتایج سناریوی اول نشان دادند، به منظور عملی‌سازی اهداف مختلف بهره‌برداری در شبکه‌های آبیاری لازم است تا استراتژی بهره‌برداری به درستی تعیین شده تا با تلفیق آن با کنترل‌گر بتوان به نتایج مورد انتظار رسید. در این تحقیق، همان طور که پیش‌تر نیز بیان شد، استراتژی اقتصاد بهره‌برداری دنبال می‌شود. به همین سبب مدل اقتصادی PMP با مدل بهره‌برداری MPC برای دستیابی به حداکثر سود اقتصادی تلفیق شده است. هدف بهره‌برداری سازه‌های کنترل سطح آب در کانال به نحوی است که بالاترین درآمد، هنگامی که آب موجود در سراب شبکه قادر نخواهد بود کل مطالبات در طول کانال را تأمین کند، حاصل شود. نتایج مدل اقتصادی PMP در قالب اولویت‌های بازه‌های کانال اصلی (کانال‌های درجه دو) در جدول ۱ آمده است. نتایج اقتصادی نشان می‌دهد که بر اساس ارزش اقتصادی آب به دست آمده برای کانال‌های درجه دو، بالاترین درآمد در کانال اصلی مربوط به بازه‌های بالادست می‌باشد.

بنابراین، چارچوب بهره‌برداری برای ارائه‌ی سطح بالایی از کفایت در تحویل آب به بخش بالادست و انتقال اثرات کم آبی به بازه‌های پایین دست کانال، عمل نموده است. براین اساس، جریمه‌های اعمالی بر هر سازه کنترل و تنظیم که در فرآیند بهینه‌سازی کنترل‌گر پیش‌بین استفاده می‌شود، براساس رتبه‌بندی ارائه شده مدل اقتصادی مشخص شدند.

منحنی‌های خطای رقوم سطح آب در شکل ۵ برای بازه‌های کانال با رتبه اول، به عنوان مثال بازه‌های L1 و L4، در طول شبیه‌سازی نزدیک به صفر نگه داشته شده است. در نتیجه کانال‌های درجه دو مذکور با وجود کم آبی در سراب کانال، هرگز کمبود آب را احساس نکرده و نیازهای آبی خود را از کانال اصلی مشابه شرایط نرمال بهره‌برداری که مسأله کمبود آب تأمین‌شده وجود ندارد، تأمین نموده‌اند. همچنین شاخص‌های عملکرد برای چهار بازه‌ی اول کانال که با رتبه‌ی اول و دوم اولویت‌بندی شده است، سطح بالایی از مطلوبیت بهره‌برداری را در مقایسه با بازه‌های پایین دستی نشان می‌دهد. به کارگیری مدل توسعه داده شده این تحقیق در بهره‌برداری از یک کانال اصلی با شرایط مشابه شبکه آبیاری قزوین که در آن شرکت‌های تعاونی آب‌بران، بهره‌برداری قسمت‌های مختلف توزیع آب در کانال درجه دو را به عهده دارند، بهره‌وری آب را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. در این شرایط لازم است کشاورزان نیز توسط مدیران بهره‌برداری مربوطه برای به کارگیری فعالیت‌های مدرن درون مزرعه‌ای و همچنین انتخاب الگوهای کشت مقرون به صرفه برای

ممکن است این سؤال مطرح گردد که با توجه به توانایی کافی روش کنترل خودکار MPC در پیاده‌سازی رویکرد کنترل پایین دست، چرا در این تحقیق از رویکرد مذکور استفاده نشده تا مشکلات تحویل آب به پایین دستی‌ها مرتفع گردد؟ در پاسخ باید بیان شود که هدف مدل‌سازی بهره‌برداری این تحقیق پیاده‌سازی رویکرد کنترل بالادست حاکم بر شبکه آبیاری قزوین بوده است. در واقع کنترل‌گر پیش‌بین در تلاش بوده است تا کم آبی را بین بازه‌های مختلف کانال بر اساس حداقل‌سازی خطاهای کل سطح آب تقسیم کند. اما با نگاهی به منحنی‌های خطای سطح آب مشخص می‌شود که کنترل‌گر در رسیدن به این هدف چندان موفق نبوده است. اگرچه MPC، به عنوان یک کنترل‌گر مدرن، قابلیت بسیار قوی در برخورد با شرایط سخت بهره‌برداری را دارد، اما نتایج این سناریوی بهره‌برداری نشان می‌دهد دستیابی به هدف‌های مشخص، مانند توزیع عادلانه آب، منوط به به کارگیری استراتژی‌های بهره‌برداری به منظور جهت‌دهی صحیح کنترل‌گر در نیل به اهداف تعیین شده می‌باشد.

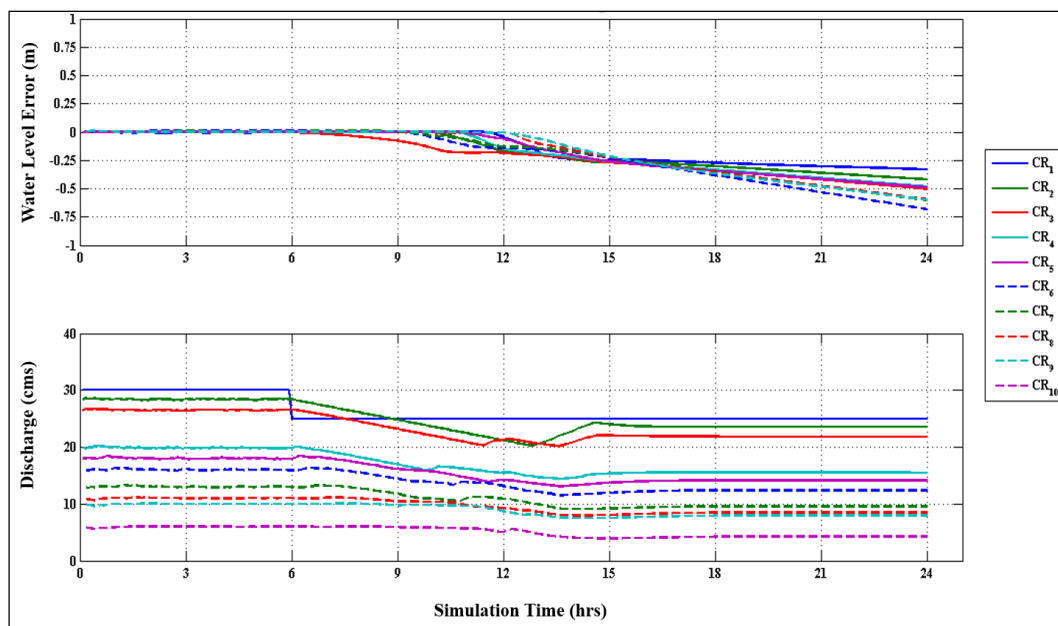


Fig. 4- Water level error and controlled discharge at the tail Canal Reaches (CR) for the first scenario
 شکل ۴- خطای سطح آب و دبی تنظیم شده در انتهای هر بازه کانال (CR) در سناریوی اول

نتایج به دست آمده از سناریوهای بهره‌برداری این مطالعه نشان می‌دهد که در شرایط کمبود آب، کنترل‌گر MPC تلاش می‌کند تا اثرات کم آبی را به نحوی بین بازه‌های کانال اصلی تقسیم کند این امر سبب می‌شود که خطاهای رقوم سطح آب در بین بازه‌های کانال اصلی به نحوی تقسیم شود که کل مقدار خطای ناشی از کمبود آب در طول شبیه‌سازی حداقل گردد. با تلفیق کنترل‌گر MPC با مدل اقتصادی PMP، تقسیم خطای ناشی از کمبود آب بر اساس میزان پتانسیل کانال‌های درجه دو در حداکثرسازی سود اقتصادی کل شبکه انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که کنترل‌گر MPC تلاش کرده است تا توزیع آب به آبگیرهای بالادستی واقع در امتداد بازه‌های کانال اصلی که اولویت اقتصادی بالاتری دارند، حتی در شرایط کمبود آب با خطای کمتری در مقایسه با آبگیرهای پایین‌دستی (با رتبه اقتصادی کمتر) انجام دهد. به طور کلی دو محدودیت عمده‌ای در راه انجام این نوع تحقیق وجود دارد.

مورد اول مربوط به وجود زیرساخت‌های لازم پیاده‌سازی سیاست‌ها و استراتژی‌های اقتصادی در یک شبکه آبیاری است. دانش کشاورزی، تحویل حجمی آب در زمان و مکان مناسب، درک درست از اهمیت نهاده حیاتی آب توسط کشاورزان، وجود تشکلهای آب‌بران و اتحادیه‌های کشاورزی در محدوده شبکه آبیاری، رغبت کشاورزان به افزایش درآمد براساس شرایط موجود و علاقمندی به رفع مشکل و مسایل زیست محیطی از جمله این زیرساخت‌ها می‌باشند.

فصل کشت بعدی توجیه کافی شوند تا کلیه فعالیت‌های کشاورزی مطابق ارزش اقتصادی بدست آمده آب صورت پذیرد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

یک پیکربندی جدید از مدل بهره‌برداری- اقتصادی در این مطالعه ارائه شده است. در واقع، هدف ارائه‌ی یک چارچوب توزیع آب کاربردی و واقع‌گرایانه، برای دوره‌های کم آبی، بر مبنای پتانسیل موجود در واحدهای زراعی درجه سه مختلف واقع شده در طول کانال اصلی با نگاه حداکثرسازی درآمد خالص می‌باشد. بنابراین، هنگامی که تقاضای کل آب در شبکه بیش از مقدار آب تامین شده در سراب کانال اصلی باشد، آب‌بران و کشاورزانی بیشتر از کمبود آب متضرر می‌شوند که نسبت به توانایی‌های خود برای به حداکثر رساندن بازدهی مطمئن‌تر هستند. در این تحقیق از مدل اقتصادی برنامه‌ریزی مثبت (PMP) برای تعیین ارزش اقتصادی آب استفاده شده است. بدین ترتیب، بازه‌های کانال اصلی (که آبگیرهای کانال‌های درجه دو در آنها واقع شده است) بر اساس ارزش اقتصادی آب رتبه‌بندی شده‌اند. این اولویت‌بندی ارائه شده از بازه‌های کانال، مقادیر جریمه‌های مورد استفاده در مدل بهره‌برداری کانال (کنترل‌گر پیش‌بین (MPC) در این تحقیق) را تعیین می‌کند.

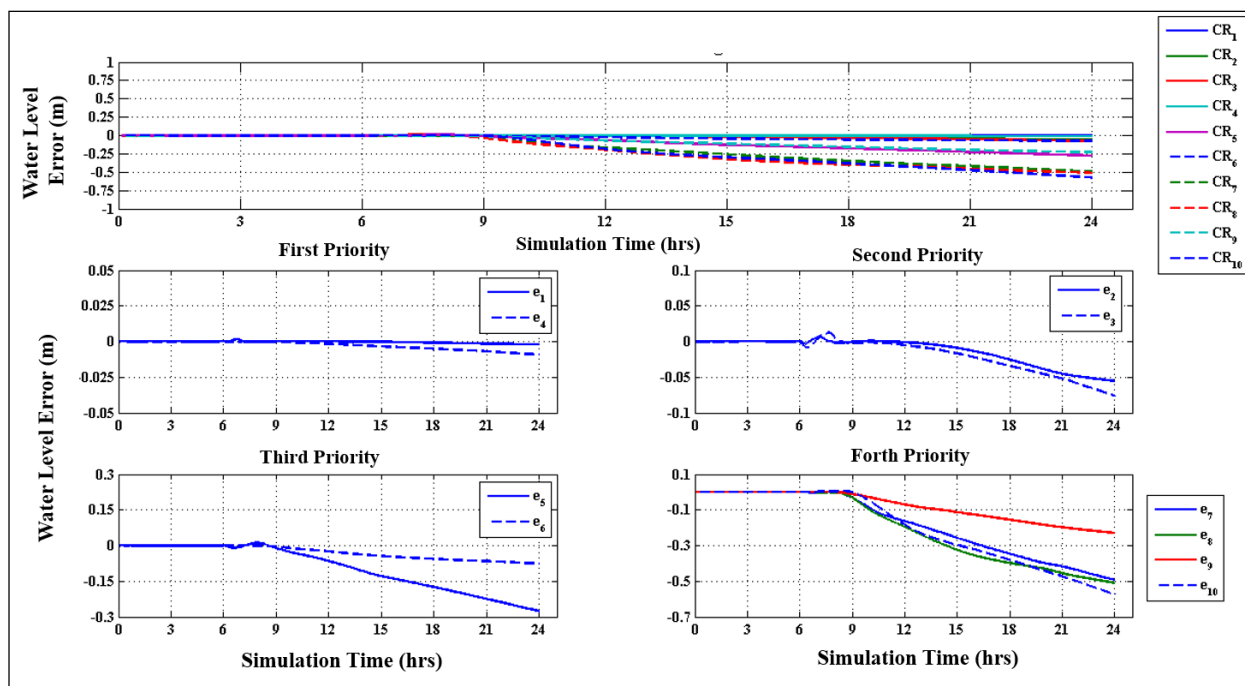


Fig. 5- Minimized water level errors (e) based on the obtained economic value
شکل ۵- خطای حداقل شده سطح آب (e) براساس اولویت به دست آمده از ارزش اقتصادی

- 6 - Feedforward Control
- 7- Maximum Absolute Error
- 8- Integrated Absolute Error

۵- مراجع

- Burt CM (2011) The irrigation sector shift from construction to modernization: what is required for success?. In: Proc. of 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 10-12 Oct, Tehran, Iran 24-36
- Camacho EF, Bordons C (2004) Model predictive control in the process industry. Springer, London, England, 250p
- Clemmens AJ (2012) Water-level difference controller for main canals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 138(1):1-8
- Clemmens AJ, Kacerek TF, Grawitz B, Schuurmans W (1998) Test cases for canal control algorithms. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 124(1):23-30
- Fele F, Maestre JM, Hashemy SM, Muñoz de la Peña D, Camacho EF (2014) Coalitional model predictive control of an irrigation canal. Journal of Process Control 24(4):314-325
- Garay PV, Peterson JM, Smith CM, Golden BB (2010) Disaggregated spatial modeling of irrigated land and water use. In: Proc. of Agricultural and Applied

محدودیت دیگر مربوط به امکان بهبود عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری موجود با استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار می‌شود. استقرار سامانه اندازه‌گیری الکترونیکی پارامترهای هیدرولیکی جریان در اکثر شبکه‌های بزرگ کشور، یک گام اساسی در پیاده‌سازی سامانه‌های کنترل خودکار می‌باشد. با توجه به ضرورت بهبود بهره‌وری آب در بخش انتقال و توزیع، به زودی شاهد استقرار این سامانه‌ها خواهیم بود.

بنابراین توانایی انواع تکنیک‌های کنترل خودکار (شامل روش‌های غیرمتمرکز تا روش‌های متمرکز) به همراه تبیین و بررسی عملکرد استراتژی‌های بهره‌برداری مبتنی بر اسناد بالادستی صنعت آب کشور (شامل پیاده‌سازی بازارهای محلی آب، بهبود بهره‌وری آب کشاورزی، تجارت آب مجازی، مدیریت یکپارچه آب با لحاظ نمودن اثر متقابل آب-انرژی-غذا، بهبود رفاه جوامع روستایی) مواردی است که در تحقیقات آتی در زمینه مدیریت نوین شبکه‌های آبیاری باید بررسی گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Positive Mathematical Programing
- 2 - Model Predictive Control
- 3 - Excessive Specialization
- 4 - Compartmental
- 5 - Feedback Control

- Medellín-Azuara J, Harou JJ, Howitt RE (2010) Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment* 408(23):5639-5648
- Molden D, Gates T (1990) Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(6):804-823
- van Overloop PJ, Clemmens AJ, Strand RJ, Wagemaker RMJ, Bautista E (2010) Real-time implementation of model predictive control on Maricopa-Stanfield irrigation and drainage district's WM canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136(11):747-756
- Zafra-Cabeza A, Maestre JM, Ridao MA, Camacho EF, Sánchez L (2011) A hierarchical distributed model predictive control approach to irrigation canals: A risk mitigation perspective. *Journal of Process Control* 21(5):787-799
- Economics Association Annual Meeting, 20-22 Sep, Denver, Colorado, 124-138
- Guan G, Clemmens AJ, Kacerek TF, Wahlin BT (2011) Applying water-level difference control to central Arizona project. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137(12):747-753
- Hashemy S, Monem M, Maestre J, Van Overloop P (2013) Application of an in-line storage strategy to improve the operational performance of main irrigation canals using model predictive control. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(8):635-644
- Howitt RE (1995) Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77(6):329-342
- Howitt RE, Medellín-Azuara J, MacEwan D, Lund JR (2012) Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environmental Modelling & Software* 38(4):244-258