

کنترل بهینه عملکرد ایستگاه پمپاژ آب به کمک سامانه کنترل هوشمند پیش‌بین (مطالعه موردی: خط انتقال آب زرینه رود به تبریز)

مریم جوان صالحی^۱، مهدی ضرغامی^۲، جعفر کیقبادی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

نویسنده مسئول: m.javansalehi@gmail.com

خلاصه

کنترل‌کننده پیش‌بین یک روش شناخته شده برای مدیریت و کنترل جریان از منابع عرضه به مصرف‌کننده‌ها برای تامین مصارف آینده و همچنین بهینه‌سازی اهداف موجود در شبکه می‌باشد. در دهه‌های اخیر، تطبیق پذیری کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل با شرایط متغیر سیستم، در زمینه‌های مختلف صنعت به ویژه مهندسی مکانیک و مهندسی برق مورد توجه بسیاری قرار گرفته، ولی مطالعات کافی در زمینه مدیریت سیستم‌های منابع آبی به خصوص در ایران انجام نشده است. لذا این تحقیق به بررسی کارایی کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل، به جهت بهبود مدیریت و کنترل سیستم‌های آبی با مقیاس بزرگ پرداخته است. همچنین یک مدل کنترل‌کننده پیش‌بین برای کنترل و مدیریت خط انتقال آب طراحی گردید. در ادامه نتایج شبیه‌سازی بر روی خط انتقال زرینه رود به تبریز بررسی شده و مقایسه ای بین نتایج حاصله از مدل با داده‌های مشاهداتی انجام شده است. این خط به طول ۱۸۰ کیلومتر، شامل ۲۴ انشعاب بوده و به عنوان بزرگترین خط انتقال آب در خاورمیانه مطرح می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که کنترل‌کننده پیش‌بین به خوبی توانسته ضمن برآورد همه قیود موجود در سامانه، نوسان پمپاژ را به طور متوسط به میزان ۳۳٪ کاهش داده، ضمن این که حجم آب در مخازن را با کمترین خطا در مجاورت حجم مطلوب حفظ کند.

کلمات کلیدی: خط انتقال آب شهری، ایستگاه پمپاژ، کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل، خط انتقال زرینه رود.

۱. مقدمه

در کشورهایی مانند ایران پراکندگی زمانی و مکانی بارندگی‌ها نامناسب است و ریزش‌های جوی در فصولی صورت می‌گیرد که شاید نیاز کمتری به آب باشد، تنها راه چاره و مقابله با این مساله ایجاد مخازن است. احداث مخازن و سدها برای تامین تقاضای جوامع بشری بدون فعالیت‌های مدیریتی و کنترلی نتیجه بخش نبوده و باعث خسارات جبران ناپذیر محیط زیستی در آینده می‌شود. از دیرباز که جوامع بشری برای تامین نیازهای آبی خود دست به ساخت انواع سازه‌های کنترلی کرده‌اند، همواره مدیریت و کنترل این سازه‌ها جزوه چالش‌های اصلی بوده است.

تامین، انتقال و توزیع آب اغلب به طور جداگانه و با روش‌های مختلف توسط مسئولین کنترل می‌شود. شبکه‌های انتقال آب دارای وظایفی هستند که مهمترین آنها می‌توان به تامین آب آشامیدنی، تامین آب مورد نیاز کارخانه‌های کوچک و بزرگ و تامین آب لازم مراکز صنعتی اشاره کرد. یک شبکه انتقال آب باید قادر باشد وظایف و نیازهای آبی نامبرده را از نظر کیفی (خواص فیزیکی و شیمیایی آب) و از نظر کمی (دبی و فشار آب) برابر استاندارد های موجود به خوبی انجام دهد. مدیریت و برنامه ریزی برای این سیستم‌های انتقال آب اهداف متفاوت با مقیاس زمانی مختلف دارد. در بیشتر سیستم‌های خط انتقال، کنترل بر اساس مشاهدات تجربی و قضاوت متخصصین انجام می‌گیرد، این کار در سیستم‌های با مقیاس بزرگ کاری بسیار پیچیده و سخت می‌باشد. در سال‌های اخیر با رشد علم و فناوری، سازمان‌های کنترل‌کننده سعی در استفاده از مدل‌های ریاضی جهت مدیریت و کنترل بهینه سازه‌های کنترلی کرده‌اند.

مدل کنترل پیش‌بین یک روش کنترل بهینه ترکیبی از سه الگوریتم کنترل حلقه باز، کنترل حلقه بسته و کنترل بهینه است. الگوریتم کنترل پیش‌بین علی‌رغم سادگی طراحی و اجرای الگوریتم قادر به کنترل سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ و متغیرهای مختلف است. الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل قادر است اغتشاشات بزرگ وارد بر سیستم‌های کنترل را مد نظر قرار دهد. همچنین مهمترین ویژگی الگوریتم کنترل پیش‌بین قابلیت در نظر گرفتن

محدودیت‌ها بر روی ورودی‌ها و حالت‌های سیستم و تعیین پاسخ بهینه برای رساندن پاسخ سیستم به اهداف تعیین شده می‌باشد [1]. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مارتینز و همکاران (۲۰۰۹) از الگوریتم کنترل پیش‌بین برای مدیریت و کنترل شبکه آب شرب شهر بارسلونا استفاده کرد و کارایی این روش را در بهبود مدیریت سیستم مورد نظر با اهداف معین نشان دادند [2]. بلاسو و همکاران (۲۰۱۰) برای اولین بار کنترل‌کننده پیش‌بینی به جهت کنترل سیلاب رودخانه دمر ارائه کردند و نتایج حاصل از مدل را با سایر روش‌های کنترل سیلاب مقایسه و انعطاف‌پذیری کنترل‌کننده پیش‌بین را نسبت به سایر کنترل‌کننده‌ها نشان دادند [3]. پویگ و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل کنترل پیش‌بین به منظور تعیین استراتژی کنترل حجم آب در سدها و جریان پایدار در دریچه‌ها و پمپ‌ها برای مدیریت شبکه ترکیبی از آبیاری و سیستم تامین آب ارائه کردند. در نهایت برای صحت سنجی، مدل ارائه شده را بر روی رودخانه ای در هلند اعمال کرده و نتایج را بررسی کردند [4].

هان و همکاران (۲۰۱۴) یک کنترل‌کننده پیش‌بین چند هدفه غیر خطی برای فرآیند تصفیه فاضلاب ارائه کردند. مدل کنترل پیش‌بین ارائه شده شامل پیش‌بینی شبکه عصبی و بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش کنترلی ارائه شده به خوبی قادر به بهبود عملکرد فرآیند تصفیه فاضلاب در طی اختلالات وارد به سیستم است [5]. همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) یک کنترل پیش‌بین غیر تعاونی برای سیستم آبیاری بزرگ که تحت تاثیر اغتشاشات عظیم محیطی و تاثیرات هیدرولوژیکی منطقه است، ارائه کردند. استراتژی ارائه شده، یک راهکار مناسب برای تنظیم سیستم آبیاری با توجه به اهداف مورد نظر در زمان تغییرات جوی ناگهانی می‌باشد [6]. سان و همکاران (۲۰۱۵) از مدل خطی ترکیبی شامل کنترل-کننده پیش‌بین و مدل ارضاسازی قیود و روش تجمیع شبکه برای کنترل عملکرد پمپاژ آب استفاده کردند. روش ارائه شده یک استراتژی بهینه برای پمپاژ بهینه در زمان مصرف ارائه می‌کند [7]. وانجیرو و همکاران (۲۰۱۶) کنترل پیش‌بینی جهت مدیریت انرژی آب در مصارف شهری ارائه کردند. در این تحقیق دو روش مدل کنترل بهینه با حلقه باز و مدل کنترل پیش‌بین حلقه بسته مورد مطالعه قرار داده و تاثیر هر یک را در رسیدن به پاسخ مطلوب مقایسه کردند [8]. جدیدالی و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل کنترل پیش‌بین برای کاهش سولفاید در شبکه‌های فاضلاب ارائه کردند. در ابتدا با استفاده از یک مدل فضای حالت غلظت مواد شیمیایی موجود در شبکه فاضلاب را پیش‌بینی کرده سپس با استفاده از الگوریتم مدل کنترل پیش‌بین غلظت مناسب مواد شیمیایی در شبکه تصفیه مشخص کردند. آن‌ها مدل ارائه شده را بر روی یک شبکه واقعی تصفیه اعمال کرده و نشان دادند، این مدل به خوبی قادر به کاهش قابل توجه میزان سولفاید شبکه ضمن برآورد اهداف شبکه است [9].

لذا با توجه به پیشینه گفته شده و اهمیت توجه به راه کارهای مدیریتی و کنترلی که در تامین و انتقال آب شرب شهری وجود دارد، تاکنون مطالعات موثری بر روی شبکه تولید و انتقال آب برای شرب شهری با مقیاس کلان انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق یک کنترل‌کننده پیش‌بین برای خط انتقال آب فاز اول زرنه رود که مطالعه موردی در این تحقیق می‌باشد، طراحی شده و نتایج حاصل از آن تحلیل و بررسی شده است.

۲. مواد و روش

کنترل‌کننده مغز متفکر یک پردازش صنعتی است. تمامی فرآیندی را که یک متخصص در نظر دارد اعمال کند تا پروسه، جریان استاندارد خود را در پیش گیرد و نهایتاً پاسخ مطلوب حاصل شود از طریق کنترل‌کننده به سیستم فهمانده می‌شود. کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل یکی از ابزارهای بسیار مهم و قابل اعتماد برای طراحی استراتژی کنترل بهینه در سیستم‌های آبی با مقیاس بزرگ می‌باشد [3].

۲-۱- ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین

کنترل‌کننده پیش‌بین، تکنیکی است، به ما اجازه می‌دهد تا یک مدیریت جامع چند متغیره به همراه محدودیت‌هایی که در ورودی و حالت سیستم مورد نظر وجود دارد، انجام دهیم. در این روش متغیرهای ورودی و خروجی و حالت سیستم با استفاده از یک مدل ریاضی در افق مشخص پیش‌بینی می‌شوند. به طور کلی کنترل‌کننده پیش‌بین دارای سه بخش اصلی پیش‌بینی، بهینه‌سازی و افق کاهش است که هر یک از اجزای ذکر شده به طور مختصر در ذیل توضیح داده خواهد شد.

۲-۱-۱- پیش‌بینی: پیش‌بینی پاسخ آینده سیستم، با استفاده از یک مدل دینامیکی انجام می‌شود، در بیشتر موارد از یک مدل فضای حالت خطی که به صورت زمانی گسسته شده است برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند [10].

$$x(k+1) = g(x(k), u(k), d(k)) \quad (1)$$

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Cd(k) \quad (2)$$

در معادله (۱)، $d(k)$, $u(k)$, $x(k)$ به ترتیب حالت سیستم، ورودی سیستم و اغتشاشات وارده بر سیستم در هر گام زمانی بوده و همچنین در معادله (۲)، A , B , C ماتریس‌های سیستم با ضرایب مناسب با توجه به ماهیت مسئله می‌باشند.

۲-۱-۲- بهینه‌سازی: یکی دیگر از قسمت‌های اساسی استراتژی است. چرا که اعمال کنترلی را ممکن می‌سازد. اگر تابع هزینه درجه دو باشد، مینیمم آن به عنوان تابعی صریح از ورودی و خروجی‌های پیشین و هدف در نظر گرفته می‌شود. در صورت وجود محدودیت‌های نامساوی، به دست آوردن راه حل، نیازمند استفاده از الگوریتم‌های عددی با انجام محاسبات بیشتر است [10].

$$\text{Minimize } J = X^T Q X + U^T R U \quad (3)$$

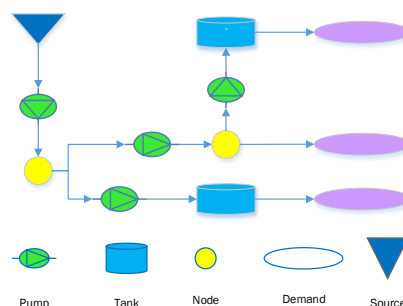
در رابطه (۳) J تابع هدف را نشان می‌دهد که باید حداقل شود. X متغیرهای حالت، U اعمال کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیر حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی می‌باشد.

۳-۱-۲- افق کاهشی: اصل افق کاهشی در کنترل پیش‌بین به کار رفته است. افق کاهشی به این معناست که در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در هر تکرار به تعداد گام زمانی افق پیش‌بینی، تلاش کنترلی محاسبه می‌شود ولی فقط اولین المان به عنوان ورودی به سیستم در تکرار بعدی انتخاب می‌شود. همین سبب شده است که این شیوه از بهینه‌سازی به بهینه‌سازی آنلاین مشهور شود. اینکار سبب پیش‌بینی بسیار نزدیک به واقعیت و بهینه‌سازی با کمترین خطای ممکن است [11].

$$u = u^*(k | k) \quad (4)$$

۲-۲- مدل‌سازی خط انتقال آب

خط انتقال آب، شامل گروهی از ایستگاه‌های پمپاژ، مخازن ذخیره آب و دریچه‌های کنترلی به منظور تامین آب مصرف کننده می‌باشد. خط انتقال آب را می‌توان یک مجموعه پیوسته از اجزای مختلف دانست که در شکل ۱ به مختصر شرح داده می‌شود [12].



شکل ۱ - نمونه شماتیک یک شبکه توزیع آب

۲-۲-۱- مخازن ذخیره: مخازن ذخیره، به منظور ذخیره آب در یک تراز مناسب برای تامین تقاضای مصرف کننده‌ها می‌باشند، برای هر مخزن ذخیره می‌توان معادله حالت پیوستگی را به شکل زمان گسسته زیر تعریف کرد.

$$V(k+1)_n = V(k)_n + \Delta t \left(\sum_j q_{in-n}^j(k) - \sum_h q_{out-n}^h(k) \right) \quad (5)$$

که در معادله (۵)، $V(k)$, q_{in} , q_{out} به ترتیب حجم مخزن n ام، دبی ورودی به مخزن n ام و دبی خروجی از مخزن n ام در هر گام زمانی k و Δt گام زمانی است.

۲-۲-۲- ایستگاه‌های پمپاژ (کنترل کننده‌ها): دبی خروجی قابل تنظیم از ایستگاه‌های پمپاژ همان متغیرهای کنترلی در مدل کنترل پیش‌بین می‌باشند، هر بخش از این کنترل کننده‌ها دارای ظرفیت بیشینه و کمینه می‌باشند و باید به صورت قیود در معادلات در نظر گرفته شوند.

$$\min q_{u-m} < q_{u-m} < \max q_{u-m} \quad (6)$$

در معادله (۶)، q_{u-m}^{\max} , q_{u-m}^{\min} , q_{u-m} به ترتیب دبی خروجی قابل تنظیم از کنترل کننده m ، کمینه ظرفیت کنترل کننده m و بیشینه ظرفیت کنترل کننده m است.

۲-۳- گره‌ها: گره در محل انشعاب و ادغام جریان آب وجود دارد. بر اساس اصل پاستگی، دبی ورودی و دبی خروجی در هر گره باید برابر باشد، که به صورت قید در معادلات وارد شود.

$$\sum_i^n q_{in-n} = \sum_j^n q_{out-n} \quad (7)$$

که در معادله (۷)، q_{out-n} , q_{in-n} به ترتیب دبی ورودی به گره m از ورودی j و دبی خروجی از گره m از خروجی i است.

۲-۴- مصرف: این بخش، مصارف هر کدام از اشتراک‌ها را مشخص می‌کند و به عنوان اغتشاشات در معادلات کنترل پیش‌بین منظور می‌شود. در ادامه تابع هدف تعریف شده برای خط انتقال زربنه رود به تبریز آورده شده است.

۳-۳- توابع هدف

در این تحقیق، دو هدف، کمینه کردن اختلاف حجم موجود در مخازن بین راهی خط انتقال از حجم هدف و کاهش نوسان در ایستگاه‌های پمپاژ، بعنوان توابع هدف کمینه‌سازی در نظر گرفته شده که در ادامه به شرح جزئیات هر کدام از این اهداف پرداخته می‌شود.

$$J = w_1 \sum_{i=0}^{N_p} J_1(k+i) + w_2 \sum_{i=0}^{N_p} J_2(k+i) \quad (8)$$

که در معادله (۸) w_1 و w_2 ضرایب وزنی، J_1 و J_2 به ترتیب مربوط به حفظ حجم مطلوب در مخازن و کاهش نوسان و N_p افق پیش‌بینی می‌باشد. در این تحقیق با توجه مدت زمانی شبیه‌سازی و داده‌های در دسترس، همچنین با توجه به مطالعه انجام شده [3] افق پیش‌بینی (N_p) ۱۵ روز (نصف یک ماه) در نظر گرفته شده است.

۲-۳-۱- حفظ حجم مطلوب در مخازن: بر طبق اهداف سازمان‌های متولی در عین حال که همه‌ی مصارف مورد نیاز انشعابات در طول خط انتقال باید تامین گردد، همواره باید یک حجم مطلوبی در مخازن برای مقابله با شرایط بحرانی مثل قطعی برق و یا ترکیدگی بخشی از خط لوله حفظ گردد. تابع مورد نظر برای این هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$J_1 = (v(k) - v_{\text{reff}})^T (v(k) - v_{\text{reff}}) \quad (9)$$

در معادله (۹)، V و V_{reff} به ترتیب حجم ذخیره شده در مخازن و حجم مطلوب برای مخازن در طول خط انتقال می‌باشد.

۲-۳-۲- کمینه کردن نوسان پمپاژ در ایستگاه‌ها: به منظور پیشگیری از آسیب وارده به دستگاه‌های پمپاژ و استهلاک آن‌ها، باید از تغییر ناگهانی پمپاژ در ایستگاه‌ها جلوگیری کرد. تابع مورد نظر برای این هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$J_2 = \Delta q_u^T \Delta q_u \Rightarrow \Delta q_u = q_u(k+1) - q_u(k) \quad (10)$$

که در معادله (۱۰)، q_u جریان پمپاژ شده در ایستگاه‌ها می‌باشد.

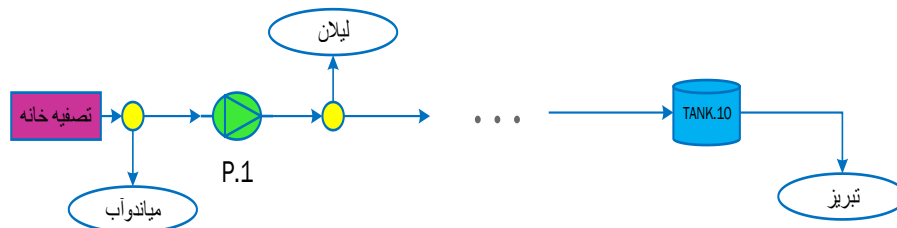
۳. محدوده مطالعاتی

در این تحقیق هدف طراحی یک کنترل کننده پیش‌بین برای خط انتقال آب از محل بند نوروزلو روی زربنه رود به تبریز است. تاسیسات آبرسانی زربنه رود، یکی از تاسیسات زیربنایی برای استان آذربایجان شرقی می‌باشد که عمده آب شرب شهر تبریز و چندین شهر مهم استان و همچنین صنایع عمده استان را تامین می‌نماید [13]. این تاسیسات شامل خط انتقال، ایستگاه‌های پمپاژ و تصفیه‌خانه می‌باشد، که کار تصفیه و انتقال آب آشامیدنی به میزان ۵ مترمکعب در ثانیه را انجام می‌دهند. با بهره‌برداری و نگهداری از این تاسیسات آب شهرهای تبریز، آذرشهر، ایلخچی، شبستر، بناب، گوغان،

میان‌دوآب، چهار برج و چندین مجتمع روستایی و صنایع مهمی از جمله نیروگاه حرارتی سهند، نیروگاه حرارتی تبریز، پتروشیمی تبریز، صنایع فولاد سازی و سایر مراکز مصرف تامین می‌گردد. به منظور انتقال آب از مبدأ به مقصد تبریز، یک رشته خط لوله، به طول ۱۸۰ کیلومتر (۱۱۷ کیلومتر بتنی و ۶۳ کیلومتر فولادی) طراحی شده است. آغاز بهره‌برداری این طرح سال ۱۳۷۸ می‌باشد. این خط، آب خام را از آبگیر سمت راست کانال نوروزلو تا تصفیه‌خانه و سپس آب تصفیه‌شده را از تصفیه‌خانه به تبریز منتقل می‌کند. در هر تلمبه‌خانه، ۵ تلمبه در حال کار بوده و یک دستگاه تلمبه آماده به کار می‌باشد. تلمبه‌ها دارای ظرفیتی از ۶۴۰ تا ۱۱۰۰ لیتر بر ثانیه می‌باشند و ارتفاع رانشی بالغ بر ۹۰ تا ۱۴۰ متر را ایجاد می‌نمایند [14]. با توجه به اینکه خط انتقال آبرسانی زرينه رود به صورت سری طراحی شده است. ایجاد هرگونه آسیب و خرابی در بخشی از مسیر، کل خط انتقال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با این شرایط در حال حاضر بدون خط پشتیبان، آبرسانی جمعیت ۳ میلیون نفری از استان آذربایجان شرقی را برعهده دارد. همچنین خط انتقال در محدوده حوضه دریاچه ارومیه واقع شده است و باید همواره مسائل زیست محیطی مربوط به دریاچه در تغییر مسیر از رود به خط انتقال در نظر گرفته شود. لذا اهمیت توجه به راهکارهای مدیریتی و کنترلی در این خط انتقال، در سال‌های اخیر که کشور با بحران کم آبی مواجه شده است، پررنگ تر جلوه کرده و به یکی از چالش‌های مهم سازمان‌های متولی تبدیل شده است. بنابراین بهبود مدیریت و کنترل بهره‌برداری این خط انتقال در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است. شایان ذکر است که در این تحقیق به دلیل مسائل امنیتی مربوط به خطوط انتقال آب شرب و محدودیت‌ها، داده‌های شبیه سازی بعد از تصفیه‌خانه مطالعه شده که شامل ۱۰ مخزن، ۴ ایستگاه پمپاژ و ۲۴ اشتراک می‌باشد.

۳-۱- طراحی کنترل کننده پیش‌بین

به طور کلی باید در نظر داشت، در طراحی کنترل کننده برای سیستم‌های آبی از مدل فضای حالت که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیونی دارند به جهت بیان مدل داخلی استفاده کرد. به دلیل بزرگ و پیچیده بودن ماتریس‌ها، مدل فضای حالت فقط برای اولین مخزن مسیر که در محل ایستگاه شماره ۱ واقع شده، ارائه شده است.



شکل ۲- خط انتقال آب زرينه رود به تبریز

$$v_1(k+1) = v_1(k) + [\Delta t \quad -\Delta t] \begin{bmatrix} q_{u1}(k) \\ q_{u2}(k) \end{bmatrix} - [\Delta t][d_1(k)] \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، $v_1(k)$ حجم آب ذخیره شده در مخزن در گام زمانی k می‌باشد. همچنین $q_{u1}(k)$ ، $q_{u2}(k)$ به ترتیب جریان پمپاژ شده به مخزن و جریان پمپاژ شده از مخزن بوده که متغیرهای کنترلی در کنترل کننده پیش‌بین هستند. $d_1(k)$ تقاضای شهر میاندوآب و Δt گام زمانی کنترل می‌باشد. در این تحقیق بر اساس آمار داده‌های ثبت شده، یک روز در نظر گرفته شده است.

بدین ترتیب مدل فضای حالت برای کل مسیر که شامل ۱۰ مخزن است نوشته شد و ماتریس‌های $A_{150 \times 10}$ ، $B_{150 \times 150}$ ، $C_{150 \times 150}$ ، $D_{150 \times 1}$ به دست آمدند. سرانجام با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم و تعریف V_{reft} به عنوان عمق هدف، با جایگذاری معادله ۹ و معادله ۱۰ در معادله ۸ و تبدیل معادلات به دست آمده به فرم ماتریسی فضای حالت، تابع هدف به صورت زیر نوشته شده است.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } J &= \left(A.v(k) + BQ - C - V_{\text{reff}} \right)^T w_1 \left(A.v(k) + BQ - CD - V_{\text{reff}} \right) + \Delta Q^T w_2 \Delta Q \\ J &= 2 * \left(v(k)^T A^T w_1 B - D^T C^T w_2 B - V_{\text{reff}}^T w_1 B - Q_{\text{reff}}^T w_2 \right) Q + Q^T \left(B^T w_1 B + w_2 \right) Q \\ \text{Subject to : } A.v(k) + BQ - CD &< V_{\text{max}} &\Rightarrow BQ < V_{\text{max}} - A.v(k) + CD \\ A.v(k) + BQ - CD &> V_{\text{min}} &\Rightarrow -BQ < -V_{\text{min}} + A.v(k) - CD \\ Q &< Q_{\text{max}} \\ -Q &< -Q_{\text{min}} \end{aligned} \quad (12)$$

در معادله (۱۲) A, B, C ماتریس‌های سیستم با ضرایب مناسب با توجه به ماهیت مسئله می‌باشند. $v(k)$ ماتریس حجم در گام زمانی k ، Q ماتریس دبی پمپاژ و D ماتریس مصارف است، w_1, w_2 ماتریس‌های وزن و همچنین $Q_{\text{reff}}, Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}, V_{\text{min}}, V_{\text{max}}$ ، به ترتیب ماتریس دبی پمپاژ در گام زمانی قبلی، بیشینه ظرفیت پمپاژ، کمینه ظرفیت پمپاژ، بیشینه ظرفیت مخازن و کمینه ظرفیت مخازن می‌باشند. معادله (۱۲) با استفاده از برنامه ریزی درجه دوم در نرم افزار MATLAB که به صورت Quadratic Programming تعریف شده حل می‌شود. برای حل مساله برنامه‌ریزی درجه دوم در متلب باید از دستور quadprog.m function استفاده کرد. که به صورت اختصار با تایپ دستور quadprog.m فراخوانی می‌شود. دستور کلی این روش به صورت زیر می‌باشد.

$$[Q]=\text{quadprog}(H,f,A,a,B,b,Lb,Ub,Q0,\text{option}) \quad (13)$$

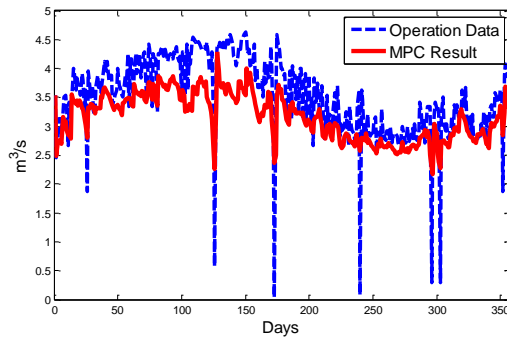
در رابطه ۱۳ Q و H و f و A و a و B و b و Lb و Ub و $Q0$ و option به ترتیب پاسخ بهینه، ماتریس هسین تابع هدف، بردار ضریب قسمت خطی تابع هدف، ماتریس ضرایب قیود نامساوی، ماتریس سمت راست قیود نامساوی، ماتریس ضرایب قیود مساوی، ماتریس سمت راست نامساوی، کران بالای متغیر، کران پایین متغیر، مقدار اولیه (ضروری نیست)، تنظیمات انتخاب نوع روش حل الگوریتم می‌باشند.

۴. نتایج

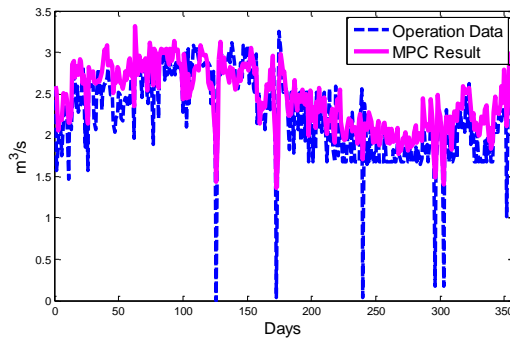
در این تحقیق کنترل کننده بر اساس مدل ریاضی خط انتقال در بخش ۲ و به همراه داده‌های جمع آوری شده از اتاق کنترل مرکزی خط انتقال زربینه رود به تیریز طراحی گردید. طراحی کنترل کننده پیش‌بین با افق پیش‌بین ۱۵ روز و گام کنترل ۱ روز به مدت ۳۵۵ روز شبیه‌سازی شده است. همچنین بهینه سازی بر اساس برنامه‌ریزی درجه دوم quadprog و با استفاده از روش حل نقطه میانی در نرم افزار MATLAB برنامه‌نویسی گردید. لازم به ذکر است که اهمیت اهداف استفاده شده در این تحقیق با وزن آن‌ها مشخص می‌شود، لذا با همفکری اتاق کنترل و تهیه پرسشنامه‌هایی از کارشناسان در بخش‌های آب و منطقه‌ای و شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، گروه وزنی $W_1=0.7$ برای حفظ حجم مطلوب در مخازن و $W_2=0.3$ برای کاهش نوسان در ایستگاه‌های پمپاژ ضرایب وزنی مناسب اعلام شد. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل پیش‌بین در مخازن که کنترل گر به دنبال تنظیم حجم آب در مجاورت یک حجم هدف است از خطای مطلق تجمعی [15] استفاده شده است.

$$\text{IAE}(\%) = \left(\frac{\Delta t}{T} \sum_0^n (|y_t - y_{\text{target}}|) \right) * 100 \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، IAE ، y_{target} ، T ، Δt ، به ترتیب درصد خطای مطلق تجمعی، حجم هدف، حجم ذخیره شده در مخزن محاسبه شده توسط کنترل کننده در گام زمانی t ، مدت شبیه سازی و گام زمانی کنترل می‌باشند. همچنین برای ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل پیش‌بین در ایستگاه‌های پمپاژ که به دنبال کاهش نوسان است از تعریف انحراف معیار استاندارد استفاده شده است.



شکل ۳- پمپاژ آب در ایستگاه شماره ۱
در دو حالت داده‌های اپراتوری و محاسباتی



شکل ۴- پمپاژ آب در ایستگاه شماره ۳
در دو حالت داده‌های اپراتوری و محاسباتی

در این تحقیق هدف آن بود که با طراحی یک کنترل کننده، ضمن تامین تمامی مصارف خط انتقال، استراتژی بهینه برای پمپاژ از ایستگاه‌ها تعیین شود. به نحوی که میزان نوسان در ایستگاه‌های پمپاژ کاهش یافته و در طول مدت شبیه سازی حجم ایمنی در مخازن حفظ شود. لذا با توجه به جدول شماره ۱ که انحراف معیار بین جریان پمپاژ شده توسط اپراتور با انحراف معیار جریان محاسبه شده توسط الگوریتم کنترل پیش‌بین را نشان می‌دهد، الگوریتم کنترل پیش‌بین به خوبی توانسته با حفظ قیود موجود در شبکه که مربوط به کمینه و بیشینه ظرفیت پمپاژ ایستگاه‌ها می‌باشد. نوسان در این ایستگاه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. به طوری که نوسان پمپاژ در ایستگاه شماره ۱ به میزان ۳۲٪، در ایستگاه شماره ۲ به میزان ۳۱٪، در ایستگاه شماره ۳ به میزان ۲۱٪ و در نهایت در ایستگاه شماره ۴ به میزان ۳۹٪ در طول مدت شبیه سازی کاهش یافته است.

جدول ۱- مقایسه انحراف معیار جریان پمپاژ شده (مترمکعب بر ثانیه) توسط اپراتور با جریان محاسبه شده توسط الگوریتم کنترل پیش‌بین در هر ایستگاه در مدت زمان شبیه‌سازی

ایستگاه پمپاژ	۱	۲	۳	۴
انحراف معیار جریان اپراتور	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۵۱	۰/۵۶
انحراف معیار جریان الگوریتم کنترل پیش‌بین	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۳۴

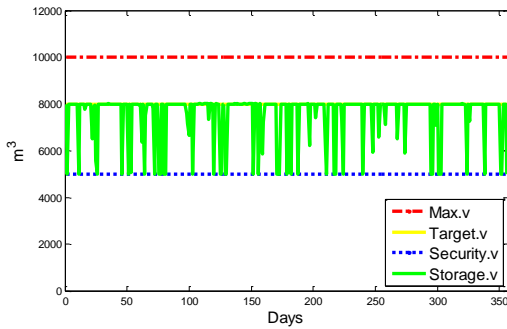
همچنین با توجه به مطالب عنوان شده در بخش ۲-۲، الگوریتم کنترل کننده پیش‌بین دارای بخش بهینه سازی می‌باشد که سعی می‌کند پاسخ بهینه را برای ارضای اهداف سیستم تعیین کند. با توجه به جدول شماره ۲ که مجموع کل دبی پمپاژ شده از هر ایستگاه در طول ۳۵۵ روز را نشان می‌دهد، مشخص است که کنترل کننده به جز ایستگاه شماره ۳ توانسته مجموع دبی پمپاژ در ایستگاه‌های شماره ۱، ۲ و ۴ را به ترتیب ۱۰٪، ۸٪ و ۱۴٪ کاسته و در نتیجه بهینه کند.

جدول ۲- حجم آب پمپاژ شده (مترمکعب) توسط اپراتور و محاسبه شده با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین در هر ایستگاه در مدت زمان شبیه‌سازی

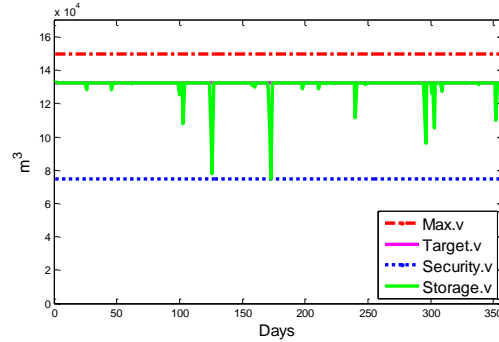
ایستگاه شماره ۱		ایستگاه شماره ۲		ایستگاه شماره ۳		ایستگاه شماره ۴	
اپراتور	کنترل پیش‌بین	اپراتور	کنترل پیش‌بین	اپراتور	کنترل پیش‌بین	اپراتور	کنترل پیش‌بین
۱۲۵۱/۷۱	۱۱۲۳/۹۱	۱۰۶۹/۰۴	۹۷۶/۹۶	۸۰۳/۲۸	۸۵۹/۵۶	۸۷۶/۵۰	۷۵۱/۳۴

در ادامه نتایج مربوط به مخازن ارائه شده و عملکرد کنترل کننده پیش‌بین بررسی خواهد شد. به دلیل زیاد بودن تعداد مخازن دو مخزن برای نمونه آورده شده است، اما خطای مطلق تجمعی تمامی مخازن در جدول شماره ۳ مشخص می‌باشد. شکل شماره ۵ و شکل شماره ۶ به ترتیب حجم آب ذخیره شده در مخازن شماره ۴ و شماره ۱۰ را نشان می‌دهند. همان طوری که از شکل‌ها مشخص است کنترل‌گر پیش‌بین به خوبی توانسته ضمن رعایت قیود موجود که مربوط به کمینه و بیشینه ظرفیت حجم مخازن می‌باشد، در کل طول شبیه سازی رعایت کرده و حجم ذخیره شده را با کمترین اختلاف در

مجاورت حجم هدف نگه دارد. مطابق جدول ۳، کنترل کننده پیش بین موفق شده است، حجم آب ذخیره شده در مخازن را در طول مدت شبیه سازی به خوبی در محدوده حجم هدف نگه دارد به طوری که کمترین خطا مربوط به مخزن شماره ۱۰ با درصد خطای مطلق تجمعی ۳/۶۴ و بیشترین خطا مربوط به مخزن شماره ۵ با درصد خطای مطلق تجمعی ۲۳/۰۷ می باشد.



شکل ۵ - حجم آب ذخیره شده در مخزن شماره ۴

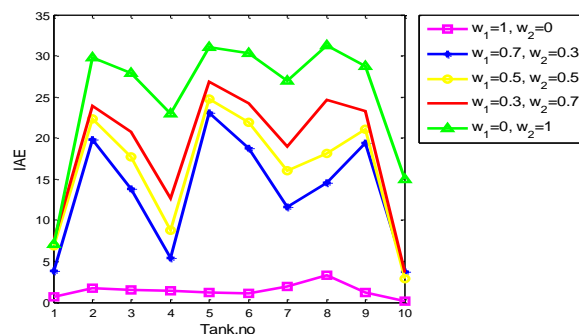


شکل ۶ - حجم آب ذخیره شده در مخزن شماره ۱۰

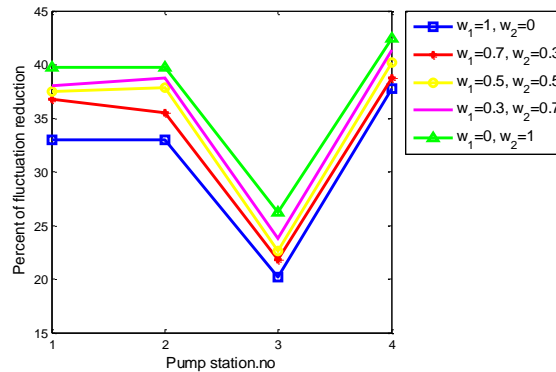
جدول ۳- خطای مطلق تجمعی در مخازن بین راهی از حجم هدف معین در مدت زمان شبیه سازی

شماره مخزن	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
خطای مطلق تجمعی	۳/۸۲	۱۹/۸۱	۱۳/۸۱	۵/۳۹	۲۳/۰۷	۱۸/۷۵	۱۱/۶۵	۱۴/۵۱	۱۹/۳۴	۳/۶۴

۴-۱- **تحلیل حساسیت:** این نتایج بر اساس وزن های اعلام شده از طرف تصمیم گیران می باشد و در واقع نمی توان تغییرات زیادی در این وزن ها اعمال کرد. ولی با تغییر جزئی در وزن معیارها، محاسبات تغییر اساسی در نتایج را نشان می دهند. شکل شماره ۷ خطای مطلق تجمعی در مخازن را از حجم هدف تعریف شده برای کنترل کننده نشان می دهد. همان طوری که از شکل مشخص است هرچه w_1 که وزن مربوط به حفظ حجم مخازن در یک تراز مشخص است نسبت به w_2 که وزن اختصاص داده شده به کاهش نوسان در ایستگاهها می باشد کمتر می شود، میزان انحراف حجم در مخازن از حجم هدف بیشتر شده و خطا افزایش می یابد. همچنین در شکل شماره ۸ انحراف معیار آب محاسبه شده برای پمپاژ توسط کنترل کننده ارائه شده است. نتایج نشان می دهند، در این حالت هرچه وزن هدف دوم (w_2) یعنی کاهش نوسان در ایستگاهها بیشتر می شود. کنترل کننده با تنظیم حجم آب مخازن در مجاورت کمترین حجم مجاز که به صورت قید برای کنترل کننده تعریف شده است. سعی در کاهش پمپاژ و کاهش نوسان در ایستگاهها دارد. از نتایج اشکال ۷ و ۸ مشخص است کنترل کننده پیش بین انعطاف پذیری مناسبی با توجه به تغییر اولویت هر کدام از اهداف در تابع هدف دارد و با تغییر هر کدام از وزن های مرتبط با اهداف قادر است ضمن رعایت تمامی قیود سیستم، پاسخ بهینه برای هر حالت را تعیین کند.



شکل ۷ - درصد خطای مطلق تجمعی مخازن در وزن های مختلف برای دو هدف



شکل ۸- درصد کاهش نوسان پمپاژ در هر ایستگاه در وزن‌های مختلف برای دو هدف

۵. جمع بندی

کشور ایران به دلیل نازل بودن ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی آن، در زمره کشورهای خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد. در این شرایط به دلیل رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های اقتصادی تقاضا برای آب روز به روز افزایش می‌یابد. نظری به تاریخ کشور نشان می‌دهد، برای تعدیل مشکلات ناشی از محدودیت منابع آب، ابتکارات و ابداعات متنوعی در زمینه بهره‌برداری از منابع آبی در ابعاد سازه‌ای و مدیریتی مورد توجه بوده است. از جمله این اقدامات سازه‌ای می‌توان به احداث سدهای مخزنی و انحرافی و ساخت خطوط انتقال اشاره کرد. در شرایط کنونی بهره‌مندی از روش‌های کنترلی پیشرفته مانند روش ارائه شده در این تحقیق می‌تواند نقش چشمگیری در مدیریت و کنترل پایدار بر روی چرخه آب شهری داشته باشد. در راستای تحقق این مهم در این تحقیق سعی شده که یک کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل به منظور مدیریت شبکه آبرسانی فاز اول زربنه رود طراحی و ارائه شود. همانطور که از نتایج بخش ۴ مشخص است کنترل‌کننده پیش‌بین توانایی قابل توجهی در کنترل شبکه‌های پیچیده و گسترده‌ای همچون خط انتقال آب را دارد و قادر است ضمن رعایت تمامی محدودیت‌های موجود در سیستم، به میزان قابل توجه و با سرعت بالا سیستم کنترلی را به اهداف همگرا کند. در این تحقیق دو هدف عمده که اغلب در مدیریت خط انتقال آب مهم هستند بررسی گردید. نتایج نشان دادند کنترل‌کننده پیش‌بین می‌تواند ضمن تامین همه‌ی مصارف انشعابات و حفظ حجم ایمن در مخازن، نوسان در ایستگاه‌های پمپاژ را به طور متوسط ۳۳٪ کاهش دهد. دبی کل پمپاژ شده نیز با توجه به محدودیت‌ها و اهداف به طور متوسط در طول خط انتقال ۶/۲۸٪ در مدت زمان شبیه‌سازی کاهش یافت. نتایج این تحقیق می‌تواند بعنوان یک راهکار مدیریتی جهت ارتقا مدیریت بهره‌برداری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین بعنوان یک ایده کاربردی در پروژه‌های جدید همانند طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین برای خط انتقال فاز دوم زربنه رود که در دست احداث می‌باشد، در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که اهداف مدیریت خط می‌توانند بر اساس اولویت‌های سازمان متولی متفاوت باشند. در تحقیقات آتی، سعی خواهد شد با در نظر گرفتن هزینه مربوط به تصفیه و پمپاژ آب در طول خط انتقال بعنوان سومین هدف عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل بررسی گردد.

۶. قدردانی

نویسندگان این تحقیق از همکاری و هم‌فکری اعضای اتاق کنترل خط انتقال زربنه رود بالخصوص آقای مهندس مجتبی جلیل زاده معاون بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی کمال سپاسگزاری را دارند.

۷. مراجع

1. Van Overloop P.J (2006) Model Predictive Control on Open Water Systems. IOSPress, Delft University Press
2. Ocampo-Martinez C, Puig V, Cembrano G, Creus R, and Minoves M (2009) Improving water management efficiency by using optimization-based control strategies, The Barcelona Case Study, Water Science and Technology: Water Supply 9(5):565-575
3. Blanco Barjas T, Willems P, Chiang PK, Cauwenberghs K, De Moor B, and Berlamont J (2010) Flood regulation by means of model predictive control. Intelligent Infrastructures, 407-437: Springer
4. Puig V, Ocampo-Martinez C, Romera J, Quevedo J, Negenborn R, Rodríguez P, and de Campos S (2012) Model predictive control of combined irrigation and water supply systems: Application to the Guadiana River. Paper presented at the Networking, Sensing and Control (ICNSC), 9th IEEE International Conference, Beijing, China, 85-90
5. Han H, Qian H, and Qiao J (2014) Nonlinear multiobjective model-predictive control scheme for wastewater treatment process. Journal of Process Control 24(3):47-59
6. Zhang R, Liu A, Yu L, and Zhang W (2015) Distributed model predictive control based on nash optimality for large scale irrigation systems. IFAC-PapersOnLine 48, 8: 551-55
7. Sun C, Morley M, Savic D, Cembrano G, and Zhang Z (2015) Combining model predictive control with constraint-satisfaction formulation for the operative pumping control in water networks. Procedia Engineering 119: 963-972
8. Wanjiru E. M, Zhang K and Xia X (2016) Model predictive control strategy of energy-water management in urban households. Applied Energy 179:821-831
9. Liu Y, Ganigué R, Sharma K, and Yuan Z (2016) Event-driven model predictive control of sewage pumping stations for sulfide mitigation in sewer networks. Water Research 98:376-383
10. Camacho E.F and Bordons Alba C (2013.) Model Predictive Control. Springer Science & Business Media
11. Cannon M (2015) C21 Model Predictive Control. University of Oxford, Oxford, Tech. Rep
12. Ocampo-Martinez C, Puig V, Cembrano G, and Quevedo J (2013) Application of predictive control strategies to the management of complex networks in the urban water cycle [Applications of Control]. IEEE Control Systems 33(1):15-41
<http://www.azarwater.ir> (۲۰۱۷)
۱۳. سایت اداره آب و منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی (۲۰۱۷)
14. Zarghami M, Hajykazemian H (2013) Urban water resources planning by using a modified particle swarm optimization algorithm. Resources, Conservation and Recycling 70:1-8
15. Clemmens AJ, Kacerek TF, Grawitz B, and Schuurmans W (1998) Test cases for canal control algorithms, Journal of Irrigation and Drainage engineering 124, 23-30