



## Utilization of Model Predictive Control to Improve Optimization- Simulation Models for Managing Water Transfer Systems: Case Study of Zarinerood Water Transfer Line to Tabriz

M. Javan Salehi<sup>1\*</sup>, M. Zarghami<sup>2</sup>, and J. Keighobadi<sup>3</sup>

### Abstract

This paper studies the performance of Model Predictive Control (MPC) algorithm in improving the management of reservoirs in water transfer line. MPC is an optimal modern control which due to its proper function against sudden disturbances has been developed for engineering control problems. One of the main capabilities of the predictive control algorithm is the prediction modeling of the system in optimization function. This feature makes the designed controller for the system, with aware of the condition of system, in the future intervals, set the appropriate inputs to get the system's goals. In this research with using a predictive control algorithm while applying the constraints regarding reservoir and pump stations capacity, an optimal controller is designed for the Zarinerood water transfer line to Tabriz. This network contains a total pipe length of 180 kms with 24 branches which is known as the largest transfer line in the Middle East. In this research the designed controller has been solved for the two objective functions, maintaining the safety water in the reservoirs and reducing the fluctuations in the pump stations. To evaluate the predictive control algorithm performance, the results of the MPC were compared with operator data (observed) and another control method called linear quadratic integral control algorithm (LQI). The obtained results show that the predictive control has been able to perform better than operator data and linear quadratic integral control. While yields high capability to satisfy all constraints while fluctuations in pumping stations have been decreased about 22% and the water in the reservoir tanks maintain the lowest error in the vicinity of the desired volume. Furthermore, the total amount of pumped water over the length of the transmission line has been decreased by 8% which indicates the better performance of the proposed controller.

**Keywords:** Model Predictive Control, Water Transfer Line, Simulation, Optimization, Linear Quadratic Integral Control Algorithm.

Received: December 23, 2017

Accepted: April 19, 2019

## توسعه کاربرد مدل کنترل پیش‌بین برای بهبود مدل‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی در مدیریت سامانه‌های انتقال آب: مطالعه موردی خط انتقال آب زرینه‌رود به تبریز

مریم جوان صالحی<sup>۱\*</sup>، مهدی زرغامی<sup>۲</sup> و جعفر کیقبادی<sup>۳</sup>

### چکیده

این مقاله به بررسی استفاده از روش کنترل پیش‌بین به منظور بهبود مدیریت حجم آب ذخیره‌شده در مخازن خطوط انتقال آب می‌پردازد. کنترل پیش‌بین از مدل‌های کنترل مدرن است که به دلیل عملکرد مناسب آن نسبت به تغییرات ناگهانی مدل، در سامانه‌های مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. از قابلیت‌های اصلی کنترل پیش‌بین، مدل‌سازی پیش‌بین سیستم در تابع بهینه‌سازی است، این ویژگی باعث می‌شود کنترل‌کننده با آگاهی از شرایط سیستم در بازه‌های آتی، ورودی مناسب برای رسیدن به خروجی مطلوب را تنظیم کند. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین و در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت پمپاژ ایستگاه‌ها و مخازن، یک کنترل‌کننده بهینه برای خط انتقال آب زرینه‌رود طراحی شد. این خط به طول ۱۸۰ کیلومتر، شامل ۲۴ انشعاب بوده و بزرگ‌ترین خط انتقال آب خاورمیانه است. در این تحقیق، کنترل‌کننده برای خط انتقال به صورت تابعی دو هدفه، حفظ حجم ایمن آب ذخیره‌شده در مخازن و کاهش نوسان جریان در ایستگاه‌های پمپاژ طراحی گردید. نتایج حاصل از اعمال روش کنترل پیش‌بین با داده‌های اپراتوری و همچنین روشی دیگر به نام روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، الگوریتم کنترل پیش‌بین به خوبی توانست ضمن عملکرد بهتر نسبت به داده‌های اپراتوری و روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی، قیود موجود در سامانه را ارضا کرده و نوسان پمپاژ را ۲۲٪ کاهش دهد. همچنین حجم آب ذخیره‌شده مخازن را با کمترین انحراف در مجاورت حجم مطلوب حفظ کند. از طرفی الگوریتم پیشنهادی موجب می‌شود، نیاز به پمپاژ آب برای رسیدن به میزان تخصیص ۸٪ از طریق بهینه‌سازی کاهش یابد.

**کلمات کلیدی:** کنترل پیش‌بین، خط انتقال آب، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، کنترل انتگرالی خطی درجه دوم.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱/۳۰

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Iran. Email: salehimaryam94@yahoo.com

2- Professor, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Iran. Email: mzarghami@tabrizu.ac.ir

3- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Iran. Email: keighobadi@tabrizu.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

کنترل کننده می‌رساند تا شیر کنترلی مجدداً تنظیم شود. خطای سیستم کنترل حلقه بسته کمتر و مقاومت آن در برابر عوامل مزاحم بسیار زیاد است. بخش اصلی سیستم حلقه بسته، بازخورد آن است. بازخورد باعث می‌شود کنترل کننده بتواند با توجه به خروجی در هر لحظه، عمل کنترلی خود را تنظیم کند (Ogata, 1970).

نوع سوم از کنترل کننده‌ها، حالت بهبود یافته کنترل حلقه بسته می‌باشند، کنترل کننده‌های بهینه بازخورد نام دارند. این کنترل کننده‌ها برای رساندن پاسخ سیستم به نقطه مرجع مطلوب، با تشکیل تابع بهینه‌سازی و اختصاص جریمه برای هر یک از پارامترها، دستورات مناسب بهینه را برای رساندن سیستم به اهداف مورد نظر تعیین می‌کنند (Van Overloop, 2006).

کنترل پیش‌بین<sup>۴</sup> (MPC) یک روش کنترلی بازخوردی بهینه است که از روش‌های کنترل هوشمند بوده و با استفاده از مدل‌های ریاضی، سیستم‌های پیچیده را مدل‌سازی کرده و با تشکیل تابع هزینه، سیستم را به سمت اهداف مورد نظر همگرا می‌کند. مهم‌ترین مزیت کنترل پیش‌بین، مدل‌سازی پیش‌بین سیستم کنترلی به جهت جبران تغییرات ناگهانی و عدم قطعیت‌هایی است که مدل سیستم کنترلی با آن مواجه است. در واقع، الگوریتم کنترل پیش‌بین با پیش‌بینی شرایط آینده سیستم در تابع بهینه‌سازی عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های کنترلی، مخصوصاً بهینه‌سازی با سیستم حلقه باز، دارد (Hoseini Pishrobat and Keighobadi, 2016). اما یکی دیگر از مزیت‌های کنترل پیش‌بین قابل فهم بودن روند طراحی کنترل کننده برای یک سیستم حتی برای افرادی با دانش کم از علم کنترل می‌باشد. الگوریتم کنترل پیش‌بین از جمله انعطاف‌پذیرترین روش‌های طراحی کنترل کننده می‌باشد که قادر است ضمن در نظر گرفتن تمامی متغیرهای موجود در سیستم، محدودیت‌های موجود بر روی ورودی‌های سیستم را نیز در نظر گرفته و استراتژی بهینه را برای رسیدن به هدف سیستم تعیین کند (Camacho, 2013). کنترل پیش‌بین یکی از ابزارهای بسیار مهم و قابل اعتماد برای طراحی مدل کنترل بهینه در سیستم‌های آبی با مقیاس بزرگ می‌باشد (Puig et al., 2012). در ادامه به چند مورد از مطالعات انجام شده در زمینه طراحی کنترل کننده پیش‌بین برای سازه‌های آبی با مقیاس بزرگ اشاره شده است:

رودخانه دمر واقع در غرب کشور بلژیک، سالیان متوالی به دلیل بارش‌های سنگین تحت تأثیر خسارات جبران‌ناپذیری در منطقه قرار داشت. در سال ۱۹۹۸ سازمان‌های متولی آن حوضه تصمیم به استفاده از سازه‌های هیدرولیکی در مسیر رودخانه برای کنترل سیلاب حاصل

پیچیدگی مسأله تأمین آب کافی برای مشترکین خطوط انتقال آب باعث شده که مدیریت تأمین آب به یک چالش کنترلی تبدیل شود. لذا در این تحقیق سعی شده است، با طراحی کنترل کننده‌ای هوشمند بر روی مدل شبیه‌سازی خط انتقال زربینه‌رود به تبریز، ضمن تأمین مصرف‌های انشعابات در طول مسیر با تنظیم دبی پمپاژ شده از ایستگاه‌های پمپاژ، حجم آب ذخیره‌شده در مخازن در مجاورت حجمی مطلوب حفظ شود (Rezapour Tabari and Mazak Mari, 2016). تأمین، انتقال و توزیع آب اغلب جداگانه و با روش‌های مختلف توسط مسئولین کنترل می‌شود. در بیشتر سیستم‌های خط انتقال، کنترل بر اساس مشاهدات تجربی و قضاوت متخصصین انجام می‌گیرد، این کار در سیستم‌های بزرگ مقیاس کاری بسیار پیچیده و سخت است (Zarghami and Hajykazemian, 2013). در سال‌های اخیر با رشد علم و فناوری، سازمان‌های کنترل کننده سعی در استفاده از مدل‌های ریاضی جهت مدیریت و کنترل بهینه سازه‌های کنترلی با استفاده از مدل‌های ریاضی هوشمند کرده‌اند (Van Overloop, 2006). سیستم‌های کنترلی از جنبه‌های مختلف دسته‌بندی می‌شوند. از جمله می‌توان به سیستم‌های حلقه باز<sup>۱</sup> و حلقه بسته<sup>۲</sup> اشاره کرد. نام دیگر سیستم کنترل حلقه بسته، سیستم کنترل بازخورد<sup>۳</sup> می‌باشد. روش کنترلی حلقه باز که در واقع همان روش بهینه‌سازی متداول است، در این روش، سیستم کنترل کننده از مقدار خروجی در هر لحظه اطلاعی ندارد و فقط براساس حل یک تابع هزینه، مقادیر ورودی سیستم را به منظور نزدیک کردن خروجی سیستم به مقدار مطلوب محاسبه می‌کند. این روش در کنترل سیستم‌های پیچیده که تحت تأثیر تغییرات ناگهانی هستند، مانند خطوط انتقال آب که با تغییر آبی مصرف در یکی از انشعابات، کل سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد، کارایی مناسبی ندارد (Khaki Sedigh, 2012).

لازم به ذکر است که در حال حاضر خط انتقال زربینه‌رود به شهر تبریز که در این مقاله به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده، به این شیوه کنترل می‌شود. اما در روش کنترلی حلقه بسته طراحی سیستم به گونه‌ای انجام می‌شود، که خروجی سیستم در یک افق مشخص پیش‌بینی شده و در هر مرحله محاسباتی، مقادیر آن با استفاده از حلقه بازخورد به مدل ارسال می‌شود، تا کنترل کننده از وضعیت جدید سیستم با توجه به ورودی‌های جدید مطلع شود و دستورات کنترلی مناسبی را مجدداً تنظیم کند. به سیستم کنترلی حلقه بسته، سیستم بازخورد نیز گفته می‌شود. سیستم‌هایی که به روش حلقه بسته کنترل می‌شوند، در مقابل عواملی مانند تغییر ناگهانی میزان مصرف یا نشتی مخزن، سیستم سریع تغییرات حجم مخزن را اندازه گرفته و به اطلاع

از این بارش‌ها گرفتند، اما در اثر سیلی که در سال ۲۰۰۲ در منطقه رخ داد، متوجه شدند که تنها وجود سازه‌های هیدرولیکی بدون استفاده از روش‌های کنترل خودکار و مدرن کافی نیست. لذا Blanco et al. (2010)، با استفاده از الگوریتم کنترل کننده پیش‌بین یک کنترل کننده خودکار برای سازه‌های منطقه طراحی کردند و با مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم خود و داده‌های مشاهداتی ثابت کردند که استفاده از الگوریتم مذکور به میزان قابل توجهی می‌تواند خطرات ناشی از اغتشاشات ناگهانی همانند سیل را به‌خوبی کنترل کند. Puig et al. (2012)، یک کنترل کننده پیش‌بین برای رودخانه گوآدیانا در پرتغال طراحی کردند. این سامانه که شامل ۱۳ سد در مسیر رودخانه است و نیازهای شرب و کشاورزی منطقه را تأمین می‌کند. به دلیل اغتشاشات زیاد در منطقه از جمله تغییر ناگهانی مصرف آب در بخش کشاورزی، حفظ تراز آب در این سدها در یک تراز ایمن به یک چالش بزرگ تبدیل شده بود. در مطالعه مذکور، موفقیت کنترل کننده پیش‌بین در پیش‌بینی و کنترل این اغتشاشات و حفظ حجم ایمن در سدها بررسی و نشان داده شده است. Ocampo-Martinez et al. (2013)، برای شبکه آب شرب شهری بارسلونا یک کنترل کننده پیش‌بین ساعتی به‌منظور تعیین زمان مناسب پمپاژ در ایستگاه‌ها با توجه به مصارف طراحی کردند و نشان دادند که با بهره‌گیری از روش‌های کنترل خودکار و مدرن در مدیریت شبکه آب شرب شهری می‌توان پمپاژ آب برای شهر بارسلونا را تا ۴۰ درصد کاهش داد و با تعیین زمان مناسب تغییر پمپاژ به میزان ۱۰ درصد در مصرف برق صرفه‌جویی کرد.

تا سال ۲۰۱۳ عملکرد کنترل کننده پیش‌بین تنها بر روی کنترل کمیت آب بررسی شده بود که Xu et al. (2013)، یک کنترل کننده پیش‌بین ترکیبی از کنترل کمیت و کیفیت آب، مربوط به کنترل ذرات معلق در آب، در دانشگاه دلفت هلند طراحی کردند. در این تحقیق در صورتی که کیفیت آب در حد استاندارد باشد، تنها بخش کنترل کمیت مدل عمل می‌کند، اما در صورتی که کیفیت آب در حد قابل قبول نباشد. ابتدا با تنظیم میزان رقیق کننده وارد بر آب، کیفیت آب کنترل شده، سپس کنترل کمیت آب صورت می‌گیرد. کنترل کننده طراحی شده در این مقاله به دلیل پیچیده بودن، زمان محاسباتی بسیار زیادی دارد. اما نتایج به‌دست‌آمده رضایت‌بخش بوده و انعطاف‌پذیری کنترل کننده پیش‌بین در بررسی مسائل چندهدفه نشان داده شده است. در ادامه Maestre et al. (2013)، با طرح مسأله آسیب‌پذیری سیستم‌های آبی روباز که تحت تأثیر عدم قطعیت‌های بزرگ از جمله بارش‌های غیرقابل پیش‌بینی می‌باشند، یک کنترل کننده پیش‌بین برای کنترل تراز آب در سیستم‌های زهکش شهری ارائه کردند و نشان دادند که استفاده از یک روش کنترل مدرن در مدیریت و کنترل سیستم‌های آبی روباز می‌تواند تا حد بسیار زیادی آسیب‌پذیری این‌گونه سیستم‌ها

را کاهش دهد. Hashemi et al. (2013)، به بررسی کارایی استراتژی الگوریتم کنترل پیش‌بین بهبود فرآیند بهره‌برداری ذخیره درون مسیری جهت در کانال اصلی آبیاری پرداخته‌اند. در این مطالعه از روش کنترل مدرن پیش‌بین، با توانایی پیش‌بینی اغتشاشات جریان ناشی از آبیگری در کانال اصلی استفاده شده است. نتایج نشان دادند که کنترل‌گر پیش‌بین به‌خوبی از ظرفیت ذخیره درون‌مسیری کانال اصلی بهره برده است. همچنین، بر اساس نتایج شاخص‌های ارزیابی، تنها در یک بازه و برای مدتی کوتاه، رقوم سطح آب از محدوده حداکثر مجاز تجاوز کرده ولی در سایر بازه‌ها در طول مدت شبیه‌سازی تخطی از رقوم حداکثر و حداقل دیده نشده است. Lozoya et al. (2014)، یک کنترل کننده پیش‌بین طراحی و ارائه کردند که با کنترل رطوبت خاک و پارامترهای آب و هوایی، حجم آب لازم برای گیاهان را تعیین می‌کند. ایشان با مقایسه نتایج حاصل از کنترل‌گر با سایر روش‌های سنتی کنترل آبیاری، نشان دادند که مدل کنترل پیش‌بین ارائه‌شده با کمترین مصرف آب بهترین عملکرد را در حفظ رطوبت خاک دارد.

همچنین، Zhang et al. (2015)، از کنترل کننده پیش‌بین برای حفظ حجم آب مخازن موجود در یک سیستم آبیاری استفاده کردند. آن‌ها با تعریف معادله پیوستگی جرم برای مخازن و به کمک الگوریتم کنترل کننده پیش‌بین توانستند یک راهکار مناسب برای تنظیم سیستم آبیاری به‌منظور حفظ حجم آب موجود در مخازن که تحت تأثیر تغییرات جوی ناگهانی بود، ارائه کنند. در ادامه Wanjiru et al. (2016)، مطالعه‌ای روی مدیریت آب در مصارف شهری انجام دادند. هدف آن‌ها از این تحقیق بررسی عملکرد کنترل سیستم‌های آبی به دو روش حلقه باز و روش حلقه بسته کنترل پیش‌بین بود که نتایج نشان داد، مدل کنترل حلقه باز برای سیستم‌های بدون اغتشاش و مصارف ثابت گزینه مناسب و مدل کنترل پیش‌بین حلقه بسته برای مواردی که تغییر الگوی مصرف وجود دارد گزینه مناسبی است. اخیراً Liu et al. (2016)، یک مدل کنترل پیش‌بین برای کنترل سولفید مورد استفاده در شبکه‌های فاضلاب ارائه کردند. در این مقاله ابتدا با استفاده از یک مدل فضای حالت غلظت مواد شیمیایی موجود در شبکه فاضلاب پیش‌بینی شده و سپس با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین یک استراتژی برای تعیین غلظت مناسب سولفید به‌صورت ساعتی در شبکه تصفیه مشخص گردید. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش کنترل پیش‌بین و روش سنتی نشان دادند، این روش، ضمن برآورد اهداف شبکه، قادر به کاهش قابل توجه میزان سولفید مورد استفاده در شبکه نیز می‌باشد.

با توجه به پیشینه ارائه شده و اهمیت توجه به راهکارهای مدیریتی و کنترلی که در تأمین و انتقال آب شرب شهری وجود دارد، متأسفانه

تاکنون مطالعات مؤثری به جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های هوشمند بر روی شبکه تولید و انتقال آب با مقیاس کلان به‌خصوص در ایران ملاحظه نشده است. بنابراین در راستای تحقق این مهم، هدف از تحقیق حاضر، بررسی میزان بهبود فرآیند پمپاژ آب در یک خط انتقال با بهره‌گیری از روش مدرن کنترل پیش‌بین می‌باشد. برای این منظور یک کنترل‌کننده هوشمند پیش‌بین برای خط انتقال آب زربینه‌رود به تبریز طراحی شد. خط انتقال آب زربینه‌رود، مهم‌ترین شریان حیاتی استان آذربایجان شرقی محسوب می‌شود. چرا که علاوه بر تأمین ۶۰ درصد نیاز کل آب شرب استان، گردش بخش عظیمی از چرخه صنعتی این استان را بر عهده دارد. این در حالی است که در حال حاضر این خط به روش کنترلی حلقه باز و بدون بهره‌گیری از روش‌های مدرن و پیشرفته کنترل می‌شود. روش‌های بهره‌برداری سنتی رایج در سیستم‌های خط انتقال آب به جهت دارا نبودن قابلیت بهره‌گیری از مدل ریاضی جهت پیش‌بینی شرایط آینده و اعمال محدودیت‌های بهره‌برداری بر سازه‌های کنترلی همچون مخازن بین‌راهی عملکرد مناسبی ندارند. به‌طوری‌که در چندین مورد به دلیل نداشتن سیستم پیش‌بینی در کنترل خط انتقال مذکور، با تغییر ناگهانی مصرف در یکی از انشعاب‌ها، مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ با خطر جدی مواجه شده‌اند. بنابراین این خط انتقال نیازمند روش‌های نوین در مدیریت و کنترل می‌باشند. همچنین در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد سامانه کنترل پیش‌بین طراحی شده برای خط انتقال زربینه‌رود ضمن مقایسه نتایج حاصل از کنترل پیش‌بین، با داده‌های جمع‌آوری شده از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، یک کنترل‌کننده حلقه بسته دیگر به نام الگوریتم کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی<sup>۵</sup> (LQI)، برای سیستم طراحی شد تا قدرت کنترل پیش‌بین برای کنترل سیستم‌های آبی در مقابل سایر روش‌های کنترلی مقایسه گردد. در روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی، کنترل‌کننده با توجه به مدلی که برای سیستم ارائه شده، ارتباط بین ورودی و خروجی را با یک ضریب بازخورد تعیین کرده و در ادامه سعی دارد تا سیستم کنترلی را در یک حالت ماندگار با توجه به هدف تنظیم کند. عمده ضعف روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی عدم پیش‌بینی شرایط آینده سیستم کنترلی در بازه‌های زمانی آتی است که در سیستم‌هایی پیچیده مانند خطوط انتقال آب باعث می‌شود، عملکرد ضعیف‌تری داشته باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات خط انتقال زربینه‌رود به تبریز (مطالعه موردی)  
در این تحقیق هدف طراحی یک کنترل‌کننده با کمک الگوریتم کنترل پیش‌بین برای خط انتقال آب زربینه‌رود به تبریز از محل بند نوروزلو، روی زربینه‌رود به تبریز است. تأسیسات آبرسانی زربینه‌رود 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 تأسیسات آب شهرهای تبریز، آذرشهر، ایلخچی، شبستر، بناب، میاندوآب، چهار برج و چندین مجتمع روستایی و صنایع مهمی از جمله نیروگاه حرارتی سهند، نیروگاه حرارتی تبریز، پتروشیمی تبریز و سایر مراکز مصرف تأمین می‌گردد. به‌منظور 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 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. با توجه به اینکه خط انتقال زربینه‌رود به‌صورت سری طراحی شده است، ایجاد هرگونه آسیب و خرابی در بخشی از مسیر، کل خط انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با این شرایط در حال حاضر بدون خط پشتیبان، آبرسانی جمعیت ۳ میلیون نفری از استان آذربایجان شرقی را بر عهده دارد (Zarghami and Hajykazemian, 2013). لازم به ذکر است که خط دوم به‌عنوان خط پشتیبان از جنس فولادی در حال ساخت می‌باشد. نمکی بودن مسیر خط انتقال زربینه‌رود به تبریز، باعث بروز نگرانی‌های دیگر مانند ترکیدگی لوله‌های این خط در اثر بتن شده است. تعمیر ترکیدگی لوله‌های این خط به‌طور معمول بیش از ظرفیت آبرسانی مخازن آب تبریز زمان می‌برد و در صورتی که حجم ایمنی آب در مخازن بین‌راهی ذخیره نشده باشد برای ساعاتی از روز، افت فشار و یا قطع شدن آب اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. لذا اهمیت توجه به راهکارهای مدیریتی و کنترلی در این خط انتقال، در سال‌های اخیر که کشور با بحران کم‌آبی مواجه شده است، پررنگ‌تر جلوه کرده و به یکی از چالش‌های مهم سازمان‌های متولی تبدیل شده است. به همین دلیل، مسأله مهمی که در حال حاضر شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی در مورد خط انتقال زربینه‌رود مواجه است، حفظ حجم مشخص آب ذخیره‌شده در مخازن بین‌راهی ضمن کاهش تغییر جهش دار جریان در ایستگاه‌های پمپاژ می‌باشد. با توجه به موفقیت روش کنترل پیش‌بین در سیستم‌های آبی با مقیاس بزرگ، نویسندگان این تحقیق سعی کردند با کمک‌گیری از علم کنترل و الگوریتم‌های موجود، کنترل‌کننده‌ای مدرن برای خط انتقال زربینه‌رود به تبریز طراحی کنند. طراحی به‌گونه‌ای انجام گرفته است که ضمن تأمین مصارف انشعابات در طول مسیر، با تنظیم مقدار دبی پمپاژ شده در ایستگاه‌ها، سیستم را به سمت اهداف ذکرشده هدایت کند و از آسیب‌های احتمالی بکاهد.

## ۲-۲- شبیه سازی مدل خط انتقال آب زرینه رود به تبریز

در این بخش نحوه شبیه سازی معادلات خط انتقال زرینه رود به تبریز ارائه شده است. خط انتقال آب یک مجموعه پیوسته از اجزای مختلف شامل ایستگاه های پمپاژ، مخازن ذخیره آب و دریچه های کنترلی به منظور تأمین آب مصرف کننده می باشد (Ghajarnia et al., 2011). خط انتقال آب زرینه رود به تبریز یک مجموعه پیوسته از اجزای مختلف است که در شکل ۱ نشان داده شده است. خط انتقال زرینه رود به تبریز شامل ۱۰ مخزن می باشد، ظرفیت مخزن شماره یک ۲۰,۰۰۰ مترمکعب است که در محل ایستگاه پمپاژ شماره یک واقع شده، مخزن شماره ده، ۱۵۰,۰۰۰ مترمکعب (دو مخزن هر کدام ۷۵۰۰۰ مترمکعب) و بقیه مخازن ۱۰,۰۰۰ مترمکعب می باشند.

## ۲-۲-۱- مخازن ذخیره

مخازن ذخیره خط انتقال مورد مطالعه، به منظور ذخیره آب در یک تراز مناسب برای تأمین تقاضای مصرف کننده ها می باشند، لذا برای هر مخزن ذخیره خط انتقال زرینه رود معادله حالت پیوستگی به شکل زمان گسسته معادله (۱) تعریف شد:

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

در این رابطه،  $V(t)$ ،  $q_{in}$ ،  $q_{out}$  به ترتیب حجم مخزن  $n$ ام، دبی ورودی به مخزن  $n$ ام و دبی خروجی از مخزن  $n$ ام در هر گام زمانی  $t$  است. در ادامه معادله (۱)، برای تمامی مخازن کل مسیر که شامل ۱۰ مخزن است، نوشته شد.

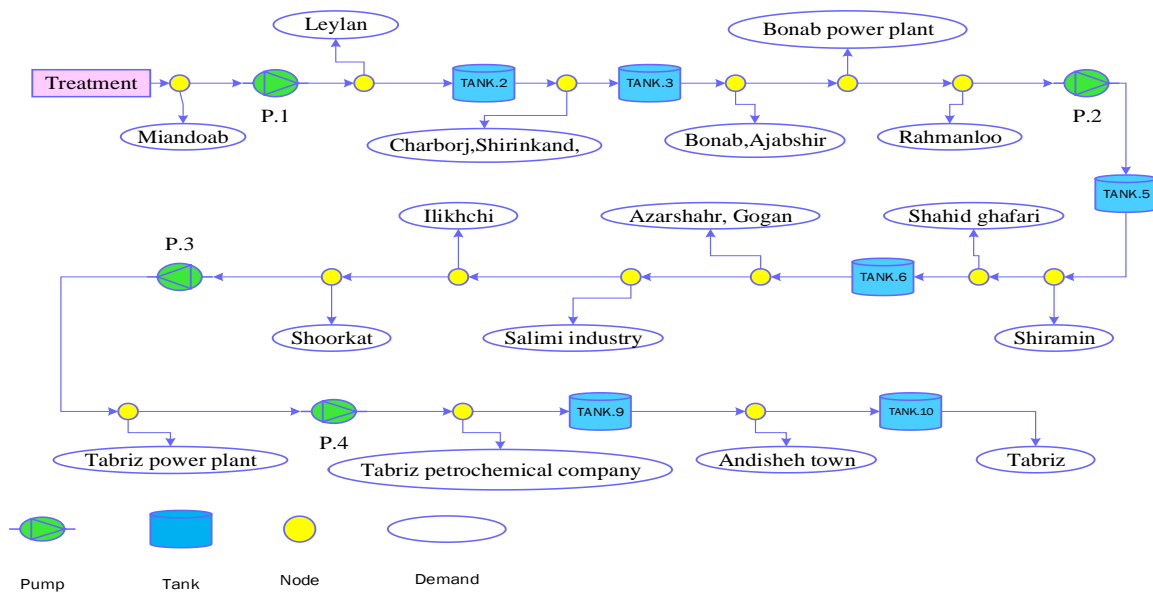


Fig. 1- A Schematic diagram of Zarinehrud water transfer line to Tabriz

شکل ۱- طرح شماتیک خط آبرسانی از زرینه رود به تبریز

$$\begin{bmatrix} v_1(t+1|t) \\ v_2(t+1|t) \\ \vdots \\ v_{10}(t+1|t) \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \text{eye}(10,10) \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_{10}(t) \end{bmatrix}_{10 \times 1} + \begin{bmatrix} \Delta t & -\Delta t & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta t & -\Delta t & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta t \end{bmatrix}_{10 \times 10} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \\ \vdots \\ q_{10}(t) \end{bmatrix}_{10 \times 1} - \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Delta t & \Delta t \end{bmatrix}_{10 \times 10} \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \\ \vdots \\ d_{10}(t) \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad (2)$$

شماره دو و جریان پمپاژ شده به مخزن شماره ده می باشد.  $d_1(t)$  نیز جریان مصرفی انشعاب میان دو آب،  $d_2(t)$  جریان مصرفی انشعاب لیلان و  $d_{10}(t)$  جریان مصرفی انشعاب تبریز است.  $\Delta t$  نیز گام زمانی می باشد، که در این تحقیق به صورت روزانه در نظر گرفته شده است.

در معادله (۲)،  $v_1(t)$ ،  $v_2(t)$  و  $v_{10}(t)$  حجم آب ذخیره شده در مخزن شماره یک، دو و ده در گام زمانی  $t$  می باشند.  $q_1(t)$  و  $q_2(t)$  به ترتیب جریان پمپاژ شده به مخزن شماره یک و جریان پمپاژ شده از مخزن شماره یک بوده، همچنین  $q_2(t)$ ،  $q_3(t)$  و  $q_{10}(t)$  به ترتیب جریان پمپاژ شده به مخزن شماره دو، جریان پمپاژ شده از مخزن

### ۲-۲-۲- ایستگاه‌های پمپاژ خط انتقال زرينه‌رود به تبريز

دبی خروجی قابل تنظیم از ایستگاه‌های پمپاژ خط انتقال، همان متغیرهایی هستند که در سیستم کنترلی این مطالعه باید برای رسیدن به هدف تنظیم شود، هر بخش از این ایستگاه‌های دارای ظرفیت بیشینه و کمینه می‌باشند که به‌عنوان قیود در سیستم مدنظر قرار گرفته‌اند.

(۳)

در معادله (۳)،  $q_{u-m}^{\max}$ ،  $q_{u-m}$ ،  $q_{u-m}^{\min}$  به ترتیب دبی خروجی قابل تنظیم از ایستگاه  $lm$ ، کمینه ظرفیت ایستگاه  $lm$  و بیشینه ظرفیت ایستگاه  $lm$  است.

### ۳-۲-۲- گره‌ها

گره در محل انشعاب و ادغام جریان آب وجود دارد. بر اساس اصل پایستگی، دبی ورودی و دبی خروجی در هر گره باید برابر باشد، که به‌صورت قید در معادلات وارد شود.

$$\sum_i^n q_{in-n} = \sum_j^n q_{out-n} \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $q_{out-n}$ ،  $q_{in-n}$  به ترتیب دبی ورودی به گره  $lm$  از ورودی  $j$  و دبی خروجی از گره  $lm$  از خروجی  $j$  است.

### ۴-۲-۲- مصرف

این بخش، مصارف هرکدام از اشتراک‌ها را در خط انتقال زرينه‌رود مشخص می‌کند و به‌عنوان اغتشاشات<sup>۶</sup> (تغییرات ناگهانی) در معادلات کنترلی سیستم منظور می‌شود. به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از این

تحقیق با روش کنترلی حاضر در اتاق کنترل خط انتقال زرينه‌رود به تبريز مصارف انشعابات روزانه سال ۱۳۹۴ از ماه فروردین تا اسفند برای اعمال به مدل جمع‌آوری شد.

### ۳- پیاده‌سازی الگوریتم کنترل پیش‌بین بر روی مدل شبیه‌سازی شده خط انتقال آب زرينه‌رود به تبريز

در ادامه به نحوه‌ی طراحی کنترلی پیش‌بین، برای خط انتقال زرينه‌رود می‌پردازیم. تئوری کنترلی پیش‌بین دارای سه گام اصلی مدل‌سازی پیش‌بین سیستم، تعیین تابع هدف بر اساس مدل به‌دست‌آمده و اصل افق کاهنده<sup>۷</sup> به‌منظور مقاوم‌سازی<sup>۸</sup> مدل در برابر تغییرات ناگهانی ناشی از عدم قطعیت می‌باشد. هرکدام از این سه بخش جداگانه توضیح داده شده است.

### ۳-۱- مدل‌سازی پیش‌بین معادلات خط انتقال آب زرينه‌رود به تبريز در الگوریتم کنترل پیش‌بین

اولین گام در طراحی کنترلی پیش‌بین تعیین یک مدل پیش‌بین برای سیستم مورد نظر است. در واقع خروجی‌های آینده سیستم برای یک افق مشخص که افق پیش‌بینی<sup>۹</sup> ( $N_p$ ) نامیده می‌شود با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده برای سیستم در هر گام زمانی  $t$  پیش‌بینی می‌شوند. این خروجی‌های پیش‌بینی شده در مدل خط انتقال آب زرينه‌رود حجم ذخیره‌شده در مخازن می‌باشد که وابسته به خروجی‌های سیستم در گام زمانی گذشته و همچنین ورودی سیستم که همان جریان پمپاژ شده از ایستگاه‌ها است، در زمان گذشته و آینده خواهد بود. لذا با در نظر گرفتن رابطه (۲)، معادله پیش‌بین خط انتقال مورد نظر به‌صورت معادله (۵) تشکیل داده می‌شوند:

$$V(t+1|t) = \begin{bmatrix} v_1(t+1|t) \\ v_2(t+1|t) \\ \vdots \\ v_{10}(t+1|t) \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad V(t|t) = \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_{10}(t) \end{bmatrix}_{10 \times 1}$$

$$Q(t|t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \\ \vdots \\ q_{10}(t) \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad D(t|t) = \begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \\ \vdots \\ d_{10}(t) \end{bmatrix}_{10 \times 1}$$

$$B = \begin{bmatrix} \Delta t & -\Delta t & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta t & -\Delta t & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta t \end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

$$C = \begin{bmatrix} \Delta t & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Delta t & \Delta t \end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

$$A = \text{eye}(10,10)$$

در ادامه می‌توان نوشت:

$$V(t+1|t) = AV(t) + BQ(t|t) + CD(t|t)$$

$$V(t+2|t) = A^2V(t) + ABQ(t|t) + BQ(t+1|t) + ACD(t|t) + CD(t+1|t)$$

$$V(t+3|t) = A^3V(t) + A^2BQ(t|t) + ABQ(t+1|t) + BQ(t+2|t) + A^2CD(t|t) + ACD(t+1|t) + BD(t+2|t)$$

$$V(t+N_p|t) = A^{N_p}V(t) + A^{N_p-1}BQ(t|t) + \dots + ABQ(t+N_p-2|t) + BQ(t+N_p-1|t) + A^{N_p-1}CD(t|t) + \dots + ACD(t+N_p-2|t) + CD(t+N_p-1|t) \quad (5)$$

ایستگاه) و  $V(t)$  ماتریس حالت سیستم (حجم آب ذخیره شده در مخازن) در هر گام زمانی  $t$  می باشد.  $A_u, B_u, C_u$  ماتریس های ضرایب سیستم می باشند. بدین صورت توسط معادله (۶)، مدل پیش بین سیستم خط انتقال زرينه رود به دست آمد. یعنی مدلی که با آگاهی از خروجی سیستم در گذشته و ورودی سیستم در گذشته و آینده، خروجی سیستم را در آینده پیش بینی می کند.

### ۳-۲- مدل بهینه سازی برای کنترل پیش بین

#### ۳-۲-۱- تشکیل تابع های هدف

در گام دوم طراحی کنترل پیش بین، به منظور نزدیک کردن هرچه بیشتر خروجی سیستم به مسیر مرجع تابع هدف، تشکیل می شود. به همین منظور، با تعریف  $V_{\text{reff}}$  به عنوان حجم مطلوب، هدف اول برای خط انتقال مذکور به صورت معادله (۷) تعریف شد:

$$\text{Min } J_1 = (A_u V(t) + B_u Q + C_u D) - V_{\text{reff}} \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $V(t)$ ،  $Q$ ،  $D$ ،  $V_{\text{reff}}$  که به ترتیب، ماتریس حجم آب ذخیره شده در مخازن خط انتقال زرينه رود، ماتریس دبی ورودی به مخازن، ماتریس مصارف و ماتریس حجم هدف آب ذخیره شده در مخازن را نشان می دهد.  $\Delta t$  نیز گام زمانی می باشد.

به منظور پیشگیری از آسیب وارده به دستگاه های پمپاژ و استهلاک آنها، باید از تغییر ناگهانی و جهش دار دبی عبوری در ایستگاه های پمپاژ خط انتقال زرينه رود جلوگیری کرد. در واقع کنترل کننده نباید ورودی هایی با نوسان زیاد را برای سیستم تولید کند. لذا هدف دوم برای خط انتقال مذکور به فرم میزان تغییر دبی در هر گام زمانی طبق معادله (۸) تعریف گردید:

$$\text{Min } J_2 = \Delta Q^T \Delta Q \Rightarrow \Delta Q = Q(t+1|t) - Q(t|t) \quad (8)$$

این معادلات را می توان در یک فرم فشرده تر به صورت ماتریس نوشت. این معادله در تئوری کنترل با عنوان معادله فضای حالت<sup>۱</sup> سیستم کنترلی که در این تحقیق خط انتقال زرينه رود مد نظر می باشد، معروف است:

$$V(t+1|t) = A V(t) + B Q(t) + C D(t) \quad (6)$$

به طوری که:

$$V(t) = [V(t|t) \quad V(t+1|t) \quad \dots \quad V(t+N_p-1|t)]^T$$

$$Q = [Q(t|t) \quad Q(t+1|t) \quad \dots \quad Q(t+N_p-1|t)]^T$$

$$D = [D(t|t) \quad D(t+1|t) \quad \dots \quad D(t+N_p-1|t)]^T$$

$$A_u = [A \quad A^2 \quad \dots \quad A^{N_p}]^T$$

$$B_u = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A^{N_p-1}B & A^{N_p-1}B & \dots & B \end{bmatrix}$$

$$C_u = \begin{bmatrix} C & 0 & \dots & 0 \\ AC & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A^{N_p-1}C & A^{N_p-1}C & \dots & C \end{bmatrix}$$

در معادله (۶) ماتریس  $D$  اغتشاشات وارد بر سیستم در طول افق پیش بینی  $N_p$  را مشخص می کند (مصارف هر اشتراک). همچنین ماتریس  $Q$  ماتریس کنترلی (ماتریس نتایج، دبی آب پمپاژ شده از هر

در معادله (۹)  $A_{u_{150 \times 10}}$ ،  $B_{u_{150 \times 150}}$  و  $C_{u_{150 \times 150}}$  ماتریس‌های ضرایب سیستم خط انتقال زربنه‌رود به تبریز می‌باشند.  $v(t)_{10 \times 1}$  ماتریس حجم در گام زمانی  $t$ ،  $Q_{150 \times 1}$  ماتریس دبی پمپاژ و  $D_{150 \times 1}$  ماتریس مصارف است.  $w_1$ ،  $w_2$ ،  $Q_{\max}$ ،  $Q_{\min}$ ،  $Q_{\text{reff}}$  و همچنین  $V_{\min}$ ،  $V_{\max}$  به ترتیب ماتریس‌های دبی پمپاژ در گام زمانی قبلی، بیشینه ظرفیت پمپاژ، کمینه ظرفیت پمپاژ، بیشینه ظرفیت مخازن و کمینه ظرفیت مخازن می‌باشند. در ادامه این تحقیق رابطه (۹) با استفاده از روش برنامه‌ریزی درجه دوم<sup>۱۱</sup> حل شد. بدین منظور دو رابطه هشتم (H) و لاگرانژین (f) به همراه قیود به فرم رابطه (۱۰) تشکیل شد، و با استفاده از روش حل نقطه میانی در نرم‌افزار MATLAB کد نویسی گردید. از جمله مزیت حل به روش برنامه‌ریزی درجه دوم با معادلات خطی، تضمین بهینه‌سازی محدب است که باعث می‌شود تمامی جواب حاصله بهینه سراسری باشد (Leigh, 2004).

### ۳-۳- مفهوم افق کاهش‌ی در الگوریتم کنترل پیش‌بین

افق کاهش‌ی به این معناست که در الگوریتم کنترل پیش‌بین در هر تکرار به تعداد گام زمانی افق پیش‌بینی، ورودی سیستم کنترلی که در این تحقیق همان دبی پمپاژ شده توسط ایستگاه‌های پمپاژ خط انتقال است، محاسبه می‌شود. ولی فقط اولین المان  $Q(t)$  به مدل ارسال می‌شود، درحالی‌که ورودی‌های کنترل شده بعدی دور ریخته می‌شود.

در معادله (۸)،  $Q(t|t)$  جریان پمپاژ شده از ایستگاه پمپاژ در گام زمانی  $t$  و  $Q(t+1|t)$  جریان پمپاژ شده از ایستگاه پمپاژ در گام زمانی  $t+1$  می‌باشد.

### ۳-۲- محدودیت‌های سیستم

قیود ممکن است ماهیت فیزیکی داشته باشند و یا مربوط به یک مشخصه بهره‌برداری باشند. به‌عنوان مثال، در سیستم‌های آبی، سازه‌ها ظرفیت محدود و معینی دارند و کنترل‌کننده‌ها مجاز به نقض این محدودیت‌های فیزیکی نیستند. در این تحقیق دو نوع محدودیت مربوط به ظرفیت مخازن در مسیر و ظرفیت پمپاژ ایستگاه‌ها وجود دارد که به‌عنوان قیود سخت در تابع هدف منظور می‌شوند.

بدیهی است که، تأمین برخی از اهداف می‌تواند سبب اختلال در اهداف دیگر باشد. برای مثال، کاهش نوسان تغییرات جریان عبوری، بر حجم آب اثر گذاشته و آن را از حجم مطلوب دور خواهد کرد. که با اختصاص امتیاز نسبی به هر کدام از این اهداف اولویت آن‌ها در تابع هدف تعیین می‌شود (Camacho et al., 2013). در نهایت، تابع هدف به‌صورت معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } J = \left( A_u \cdot v(t) + B_u Q - C_u D - V_{\text{reff}} \right)^T w_1 \left( A_u \cdot v(t) + B_u Q - C_u D - V_{\text{reff}} \right) + \Delta Q^T w_2 \Delta Q$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} A_u \cdot v(t) + B_u Q - C_u D \leq V_{\max} & \Rightarrow B_u Q < V_{\max} - A_u v(t) + C_u D \\ A_u \cdot v(t) + B_u Q - C_u D \geq V_{\min} & \Rightarrow -B_u Q < -V_{\min} + A_u v(t) - C_u D \\ Q \leq Q_{\max} \\ Q \geq Q_{\min} \\ A_u \cdot v(t) + B_u Q - C_u D = v(t+1) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} H = \frac{\partial^2 J}{\partial Q^2} = 2 * \left( B_u^T w_1 B_u + w_2 \right) \\ f = \frac{\partial J}{\partial Q} = 2 * \left( v(t)^T A_u^T w_1 B_u - D^T C_u^T w_2 B_u - V_{\text{reff}}^T w_1 B_u - Q^T w_2 \right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} B_u Q \leq V_{\max} - A_u V_{\text{in}} + C_u D \\ -B_u Q \leq -V_{\min} + A_u V_{\text{in}} - C_u D \\ Q \leq Q_{\max} \\ Q \geq Q_{\min} \\ A_u \cdot v(t) + B_u Q - C_u D = v(t+1) \end{cases}$$



اندازه‌گیری‌های اخیر تضمین می‌نماید، کنترل پیش‌بین مانند سیستم بازخورد عمل کند (Cannon, 2015).

$$Q(t|t) = [Q(0|t) \quad Q(1|t) \quad \dots \quad Q(N_p-1|t)] \quad (11)$$

$$Q_{MPC} = Q^*(0|t)$$

در معادله (۱۱)،  $Q^*$  اولین گام از افق پیش‌بینی است که در تکرار بعدی به محاسبات اعمال می‌شود. در نهایت مراحل الگوریتم پیشنهادی کنترل پیش‌بین در شکل ۲ آمده است.

در زمان نمونه‌برداری بعدی خروجی سیستم که همان حجم آب ذخیره‌شده در مخازن است، در گام زمانی  $t+1$  با توجه به  $Q(t|t)$  معلوم بوده و محاسبات کنترلی بر اساس مقدار جدید تکرار و نتایج به‌روز می‌شوند. لذا  $Q(t+1|t+1)$  به‌دلیل اطلاعات جدید با استفاده از یک مفهوم خزشی محاسبه می‌شود. این شیوه به کنترل آنالاین مشهور است، سبب پیش‌بینی نزدیک به واقعیت با کمترین خطای ممکن می‌گردد (Azizi and Keighobadi, 2017). در حقیقت استفاده از

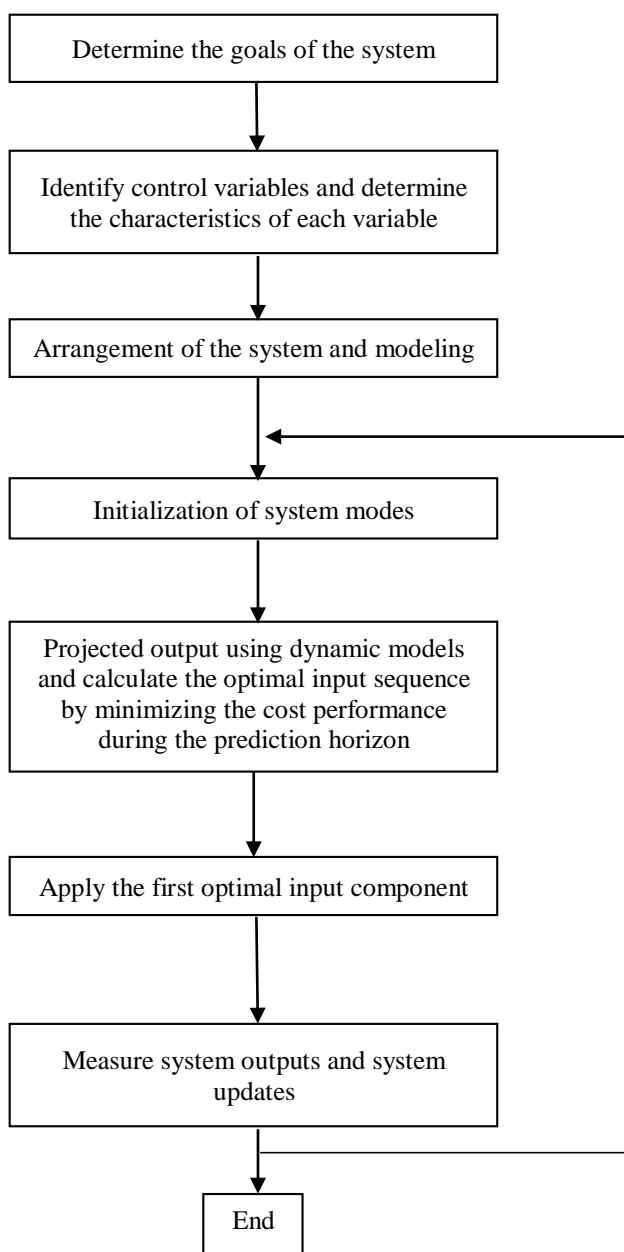


Fig. 2- Flowchart of MPC for a system

شکل ۲- فلوچارت طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین برای یک سیستم

برای اجرای الگوریتم کنترل پیش‌بین، ساختار پایه‌ای موجود در شکل ۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

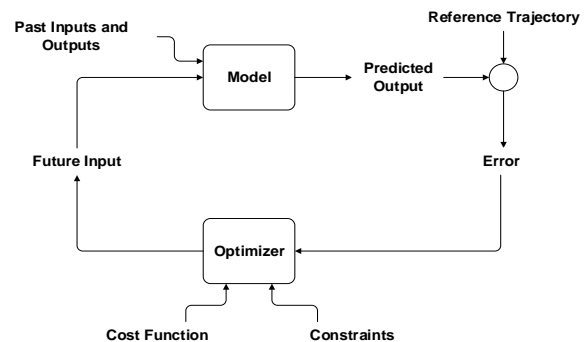


Fig. 3- A Schematic diagram of MPC (Camacho, 2013)

شکل ۳- طرح شماتیک الگوریتم کنترل پیش‌بین (Camacho, 2013)

خطی، معادله ریگاتی یک معادله دیفرانسیلی مرتبه اول است که با در نظر گرفتن معادله‌ی فضای حالت سیستم کنترلی مورد نظر به دست آمده می‌آید. لذا برای محاسبه ضریب بازخورد ابتدا باید یک معادله فضای حالت برای سیستم کنترلی به شکل معادله (۱۳) تعریف کرد:

$$X(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \quad (13)$$

در معادله (۱۳)،  $x(t)$  خرجی سیستم کنترلی و  $u(t)$  ورودی سیستم کنترلی است. معادله جبری ریگاتی در روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی به صورت معادله (۱۴) مابین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تعیین می‌شود:

$$A^T S + SA - (SB)R^{-1}(B^T S + Q) = 0 \quad (14)$$

$$K = R^{-1}(B^T S)$$

در معادله (۱۴)،  $A$  و  $B$  به ترتیب ماتریس ضرایب خروجی و ورودی سیستم می‌باشند.  $R$  و  $Q$  ماتریس‌های ضرایب وزنی متغیرهای ورودی و خروجی سیستم را تعیین می‌کند. در این تحقیق برای حل معادله (۱۴) و به دست آوردن ماتریس بهره روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی از نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید که معادله (۱۴) را با داشتن مقادیر اولیه حالت سیستم  $(x)$  حل می‌کند. به‌طور کلی برای اجرای این روش، ساختار پایه‌ای موجود در شکل ۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این تحقیق برای اعمال روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی معادله فضای حالت برای خط انتقال زیرین‌رود به تبریز به صورت  $V(t+1) = AV(t) + BQ(t) + CD(t)$  تعریف شده است. با اصلاح به شکل معادله (۱۵) حل شد.

$$V(t+1) = AV(t) + BQ(t) + CD(t)$$

$$V(t+1) = AV(t) + \eta U$$

$$\eta = [B \ C] \quad (15)$$

$$U = [Q(t) \ D(t)]^T$$

لازم به ذکر است، از آنجایی که هدف مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله یعنی الگوریتم کنترل پیش‌بین با روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی می‌باشد.

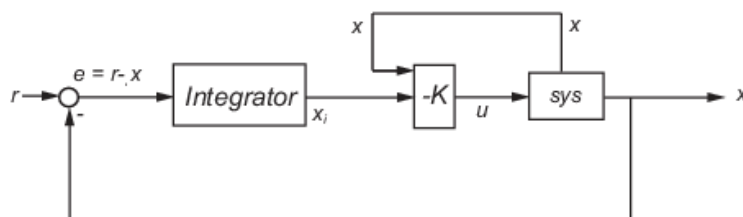


Fig. 4- A Schematic diagram of LQI (Freidland, 1986)

شکل ۴- طرح شماتیک الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی (Freidland, 1986)

#### ۴- پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی

##### بر مدل شبیه‌سازی شده خط انتقال آب زیرین‌رود به تبریز

روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی یکی دیگر از روش‌های کنترلی بازخورد بهینه است. ایده اصلی در طراحی این کنترل‌کننده بدین صورت است که، کنترل‌کننده یک ارتباط خطی بین ورودی، خروجی سیستم و خطای مابین خروجی و مقدار مطلوب به شکل معادله (۱۲) تشکیل می‌دهد و ورودی سیستم کنترلی را محاسبه می‌کند:

$$u(t) = -k * [x(t); e(t)]$$

$$(12)$$

$$e(t) = x(t) - x_{reff}$$

در معادله (۱۲)،  $x(k)$  خروجی سیستم کنترلی و  $u(k)$  ورودی سیستم کنترلی است.  $e(t)$  نیز خطای خروجی سیستم با مقدار مطلوب آن می‌باشد. در واقع کنترل‌کننده با تنظیم مقدار ورودی، سعی در کاهش انحراف مابین خروجی سیستم و مقدار مطلوب دارد.  $k$  بهره سیستم یا همان ضریب بازخورد سیستم کنترلی می‌باشد. در معادله (۱۲)،  $k$  ماتریس بهره کنترلی است و از طریق حل معادله ریگاتی به دست می‌آید (Freidland, 1986). در روش کنترلی انتگرالی درجه دوم

انتقال زرينه‌رود به تبريز و با استفاده از معادلات بخش ۳ که بر اساس الگوريتم کنترل پيش‌بين به دست آمد، برای خط انتقال در نرم‌افزار MATLAB کد نویسی گردید. طراحی کنترل‌کننده پيش‌بين با افق پيش‌بين ۱۵ روز با استناد به (Puig et al., 2012) در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، با همفکری اتاق کنترل در شرکت آب و منطقه‌ای و شرکت مه‌اب قدس به‌عنوان بهره‌بردار، گروه وزنی ( $W_1=0.70$ ) و شرکت مه‌اب قدس به‌عنوان بهره‌بردار، گروه وزنی ( $W_2=0.30$ ) متولی اعلام شد. نتایج حاصل از اعمال الگوريتم کنترل پيش‌بين برای این گروه وزنی در ادامه آورده شده است.

شکل ۵، پروفیل آب ذخیره‌شده در دو مخزن به‌صورت نمونه ارائه شده، به‌طوری که شکل (A)، مخزن شماره ۶ و شکل (B)، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن شماره ۱۰ را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، حجم آب ذخیره‌شده در مخازن (Storage.V) با استفاده از روش کنترل پيش‌بين محاسبه شده است.

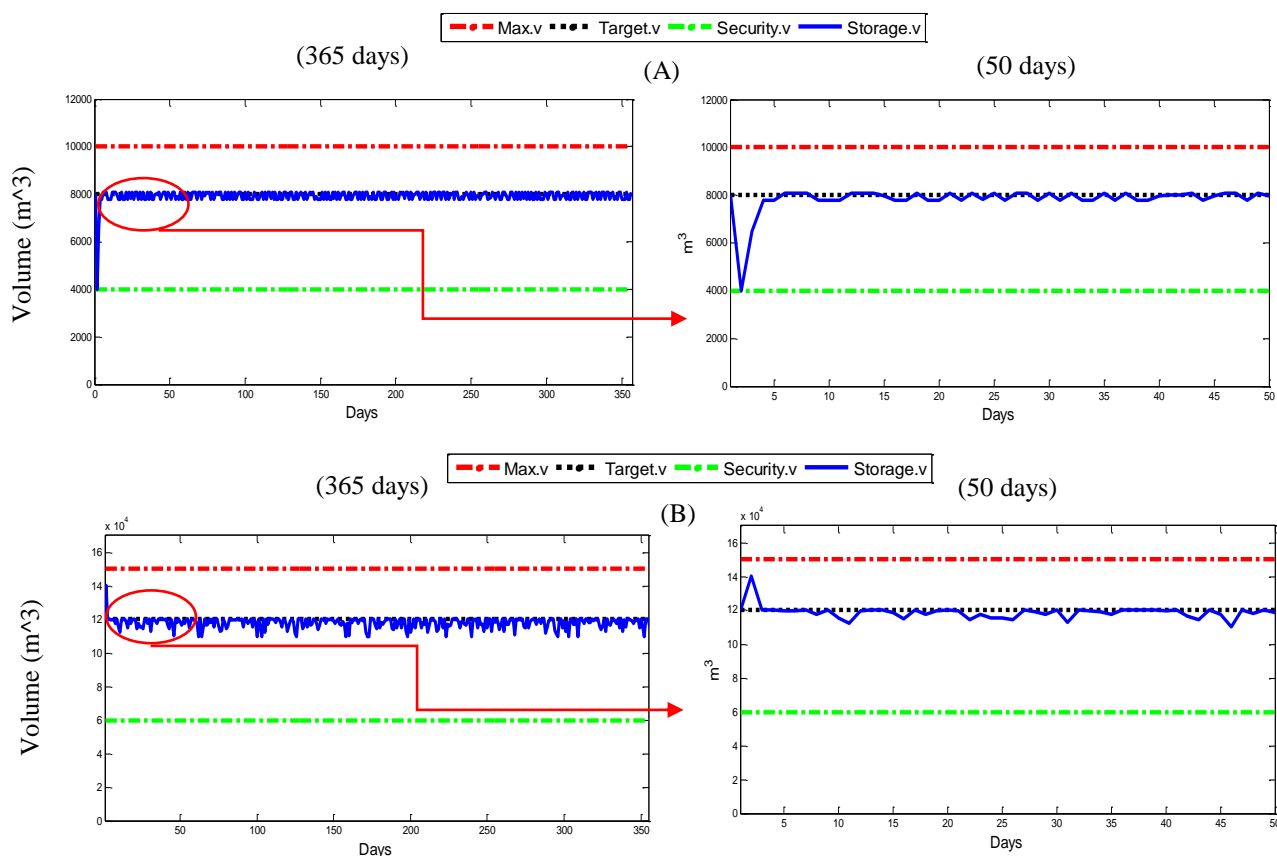
ماتریس‌های ضرایب وزنی Q و R یکسان در هر دو الگوريتم کنترل پيش‌بين با روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی در نظر گرفته شده‌اند. لذا در نظر گرفتن روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی، ورودی سیستم که همان دبی پمپاژ شده در ایستگاه‌های خط انتقال زرينه‌رود به تبريز می‌باشد، از طریق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$Q(t|t) = -k * [V(t|t); V(t|t) - V_{\text{reff}}] \quad (16)$$

در معادله (۱۶)،  $V(t|t)$ ،  $Q(t|t)$ ،  $V(t|t) - V_{\text{reff}}$ ،  $k$  و به ترتیب دبی پمپاژ محاسبه‌شده توسط روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی در گام زمانی  $t$ ، حجم آب ذخیره‌شده در مخازن در گام زمانی  $t$ ، انحراف حجم آب ذخیره‌شده در مخازن از مقدار مطلوب و ماتریس بهره (بازخورد) سیستم کنترلی می‌باشند.

## ۵- نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده پيش‌بين بر خط انتقال زرينه‌رود

در این تحقیق کنترل پيش‌بين بر اساس مدل شبیه‌سازی شده خط



**Fig. 5- Volume evaluation of two reservoirs. Graph A corresponds with the reservoir No.6 and graph B shows the stored water in the reservoir No.10. In both graph, left graph is related to 365 days while right graph is related to zoom scale 50 day.**

شکل ۵- وضعیت حجم آب ذخیره‌شده در مخزن شماره ۶ (A) و مخزن شماره ۱۰ (B). در هر دو شکل، شکل سمت چپ مربوط است به کل دوره مدل‌سازی ۳۶۵ روز و شکل سمت راست بزرگ‌نمایی شده برای ۵۰ روز است.

از رابطه (۱۷) برای تمامی مخازن محاسبه گردید که در جدول ۱ ارائه شده است.

$$IAE(\%) = \left( \frac{\sum_{t=0}^n (|v(t) - v_{\text{reff}}|)}{T} \right) * 100 \quad (17)$$

در معادله (۱۵)،  $IAE$ ،  $v_{\text{reff}}$ ،  $v(t)$ ، به ترتیب درصد خطای مطلق تجمعی، حجم هدف، حجم آب ذخیره شده در مخزن که توسط کنترل کننده در گام زمانی  $t$  محاسبه شده می باشد. همچنین  $T$  و  $\Delta t$  مدت زمان طراحی و گام زمانی کنترل می باشند.

بر اساس نتایج جدول ۱ برای گروه وزنی ( $W_1=0.70$ ,  $W_2=0.30$ ) مشخص است، کنترل پیش بین موفق شده، حجم آب ذخیره شده در مخازن را در طول مدت طراحی به خوبی در محدوده حجم هدف نگه دارد، به طوری که کمترین خطا مربوط به مخزن شماره ۵ با درصد خطای مطلق تجمعی  $0.14$  و بیشترین خطا مربوط به مخزن شماره ۸ با درصد خطای مطلق تجمعی  $9.22$  می باشد. این نتایج به دست آمده گویای توانایی بالای کنترل پیش بین در پیاده سازی استراتژی بهره برداری بهینه در طول خط انتقال است. شکل ۶ میزان دبی عبوری از ایستگاه های پمپاژ در طول مسیر خط انتقال را در دو حالت داده های اپراتوری که پمپاژ روزانه از ایستگاه ها در سال ۱۳۹۴ از ماه فروردین تا اسفند می باشد و نتایج حاصل از اعمال کنترل پیش بین نشان داده شده است.

همان طوری که ذکر شد، یکی از اهداف مهم مدیریت خط انتقال زربینه رود حفظ حجم مشخصی آب در مخازن می باشد تا در مواقع بحرانی همچون قطعی ناگهانی برق منجر به قطع شدن آبی آب اشتراک های موجود در طول مسیر منجر نشود و میزان آسیب وارده را کم کند. این حجم ها که از شرکت آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی به میزان  $80\%$  حجم مخازن اعلام شد، با عنوان ( $Target.V$ ) در شکل ۵ مشخص شده است. این حجم به عنوان  $V_{\text{reff}}$  برای الگوریتم کنترل پیش بین تعریف گردید. همچنین جهت جلوگیری از صفر شدن حجم آب ذخیره شده در مخازن، طبق اطلاعات جمع آوری شده از شرکت مذکور حجم دیگری به میزان  $4\%$  حجم مخازن، با عنوان ( $Security.V$ ) در نظر گرفته شده که باید در مخازن حفظ گردد. ماکزیم ظرفیت مخازن نیز با عنوان ( $Max.V$ ) نشان داده شده است. این دو حجم یعنی ( $Security.V$ ) و ( $Max.V$ ) نیز به عنوان قیود برای کنترل پیش بین تعریف شدند. همان طوری که از شکل ۵ مشخص است، کنترل پیش بین توانسته در تمامی مخازن بین راهی قیودی که به صورت قیود سخت (حجم ماکزیم آب ذخیره شده در مخزن و حجم مینیمم آب ذخیره شده در مخزن) به محاسبات اعمال شده اند را به خوبی ارضا کند، به طوری که کوچک ترین تجاوزی از این دو محدوده در هیچ کدام از مخازن رخ ندهد، همچنین حجم آب ذخیره شده را با کمترین انحراف در مجاورت حجم هدف نگه دارد. برای بررسی بیشتر این موضوع درصد خطای مطلق تجمعی با استفاده

Table 1- Integral absolute magnitude error of target volume in tanks

جدول ۱- خطای مطلق تجمعی در مخازن بین راهی از حجم هدف معین

Weights	Reservoir. no									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$w_1=0.70, w_2=0.30$	6.78	0.62	4.78	7.95	0.14	4.49	6.43	9.22	3.77	3.05

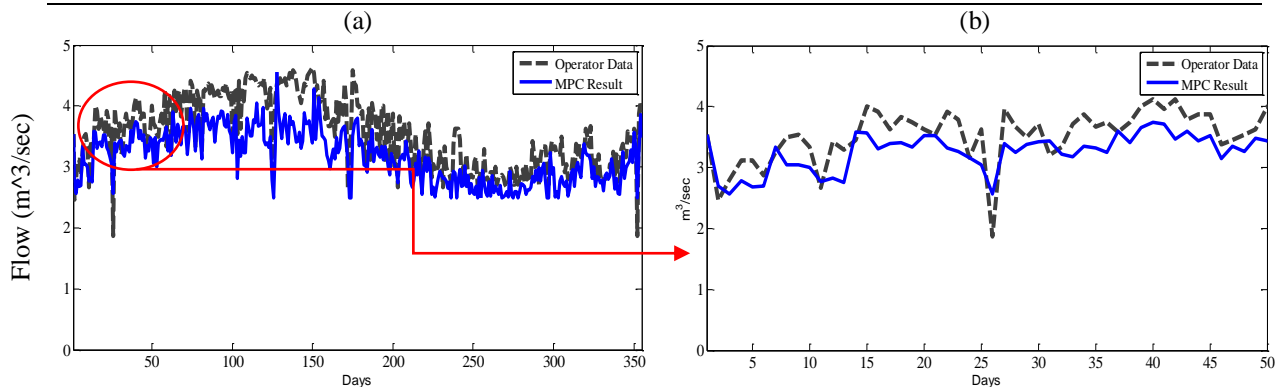


Fig. 6- Flow through pump station 1 for operated amounts and results of MPC. Graph (a) is related to 365 days while graph (b) is related to zoom scale 50 day.

شکل ۶- دبی عبوری از ایستگاه پمپاژ شماره ۱ در دو حالت آمار اپراتوری و نتایج الگوریتم کنترل پیش بین، شکل (a) مربوط است به کل دوره مدل سازی ۳۶۵ روز و شکل (b) بزرگ نمایی شده برای ۵۰ روز است.

۵-۱- مقایسه رفتار مدل مبتنی بر کنترل پیش‌بین نسبت به مدل الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی و مقادیر مشاهداتی در ادامه نتایج حاصل از اعمال الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی ارائه شده و با روش کنترل پیش‌بین مقایسه شده است. با توجه به این که مدت‌زمان کنترلی در این تحقیق یک سال یعنی ۳۶۵ روز با گام‌های روزانه است، به‌منظور بزرگنمایی نتایج عملکرد کنترل‌کننده‌ها، شکل‌ها در بازه زمانی ۵۰ روز ارائه شده است. و نتایج ۳۶۵ روز در ارزیابی که در جداول ۱ و ۲ ارائه شده، در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷، پروفیل آب ذخیره‌شده در دو مخزن توسط الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی در مقایسه عملکرد الگوریتم کنترل پیش‌بین ترسیم شده است. به‌طوری که شکل (A)، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن شماره ۶ و شکل (B)، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن شماره ۱۰ نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، حجم آب ذخیره‌شده در مخازن (Storage) در دو روش کنترل پیش‌بین (Storage.v.MPC) و روش کنترلی درجه دوم خطی (Storage.v.LQI) نشان داده شده است. همچنین محدوده مجاز توسط (Max.v) و (Security.v) مشخص شده، حجم مطلوب نیز (Target.v) می‌باشد.

همان‌طوری که از شکل‌ها کاملاً مشخص است درعین حال که کنترل پیش‌بین با قدرت بسیار بالایی توانسته با تنظیم دبی ورودی به مخازن، حجم آب ذخیره‌شده را در یک مقدار مطلوب پایدار کند. الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی انحراف نسبتاً زیادی را داشته است که مرتبط با الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی می‌باشد؛ زیرا بر اساس توضیحاتی که برای کنترل پیش‌بین در بخش دوم ارائه شد، این الگوریتم کنترلی با تشکیل یک افق پیش‌بینی مناسب برای سیستم، پاسخ سیستم را طی افق پیش‌بینی محاسبه کرده و توسط حلقه بازخورد این شرایط را به الگوریتم کنترل پیش‌بین اطلاع می‌دهد تا کنترل‌کننده تنظیمات مناسب را با توجه به شرایط سیستم در هر گام زمانی محاسبه کند.

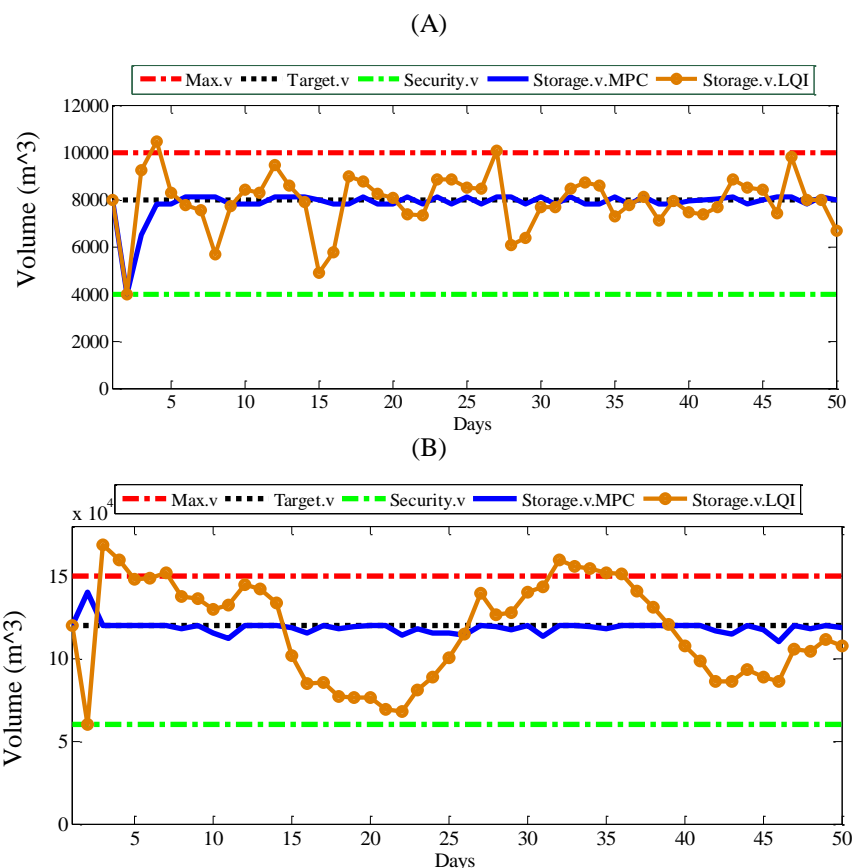
در شکل ۶ دبی عبوری محاسبه‌شده توسط روش کنترل پیش‌بین در مقایسه با داده‌های اپراتوری در ایستگاه اول ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، کنترل‌کننده به‌خوبی توانسته قیود موجود در شبکه که مربوط به کمینه و بیشینه ظرفیت پمپاژ ایستگاه‌ها می‌باشد را به‌خوبی رعایت کند و در هیچ گام زمانی تخطی از قیود مشاهده نمی‌شود. در ادامه عملکرد روش کنترل پیش‌بین در بهره‌برداری خط انتقال توسط انحراف معیار استاندارد محاسبه شده است، بر این اساس انحراف معیار استاندارد برای پروفیل دبی جریان توسط اپراتور ۰/۵۸ و برای پروفیل دبی جریان که توسط کنترل‌کننده محاسبه شده ۰/۴۶ می‌باشد، بنابراین کنترل پیش‌بین در ایستگاه شماره اول توانسته به میزان ۲۱٪، نوسان پمپاژ را کاهش دهد. که این خود در بهره‌وری و کاهش استهلاک پمپ‌ها بسیار مهم است. از طرفی بر اساس نتایج، مجموع دبی پمپاژ شده در طول مدت طراحی توسط اپراتور ۱۲۶۶ و توسط الگوریتم کنترل پیش‌بین ۱۱۲۳ مترمکعب در ثانیه می‌باشد، لذا کنترل پیش‌بین در این ایستگاه ضمن رعایت تمامی قیود و تأمین آب اشتراک‌های طول مسیر، توانسته مجموع پمپاژ آب را به مقدار ۸٪ کاهش دهد که مقدار قابل توجهی است.

در جدول ۲، عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین در برابر روش کنترلی حاضر اتاق کنترل خط انتقال زربنده‌رود به تبریز برای ایستگاه‌های پمپاژ ارائه شده است. همان‌طوری که از جدول مشخص است دبی پمپاژ محاسبه‌شده برای ایستگاه‌های پمپاژ توسط کنترل پیش‌بین، نوسان کمتری نسبت به کنترل حاضر دارد. به‌طوری که کنترل پیش‌بین توانسته به‌طور متوسط ۲۲/۵٪ نوسان جریان را کاهش دهد، بعلاوه با کمک بهره‌گیری از روند بهینه‌سازی در حین محاسبات کنترلی مجموع دبی پمپاژ شده در طول خط انتقال را ۸٪ کاهش یافته است. نتایج این بخش توانایی بالای الگوریتم پیشنهادی در کاهش نوسان جریان در ایستگاه‌های پمپاژ و همچنین بهینه کردن مجموع دبی عبوری را در طول مدت طراحی نشان داد.

**Table 2- Model Predictive Control Performance Results in four pump station. This table shows the total pumped water from the pump stations and the standard deviation for the flow profile of the pumped water by the current data against the MPC controller.**

جدول ۲ - عملکرد کنترل پیش‌بین در چهار ایستگاه. در این جدول مجموع دبی پمپاژ شده و انحراف معیار جریان در ایستگاه‌ها در دو حالت نتایج کنترل پیش‌بین و داده‌های جمع‌آوری شده مقایسه شده است.

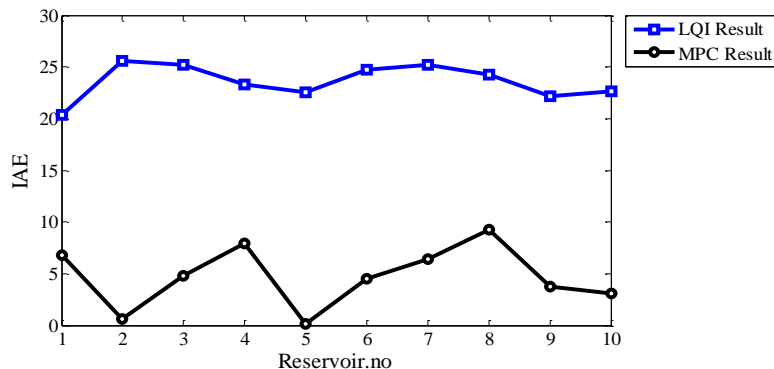
Pump station. No	Current Control		MPC Control	
	Total pumped water	Standard deviation	Total pumped water	Standard deviation
1	1226	0.58	1123	0.46
2	1080	0.57	965	0.42
3	813	0.44	758	0.39
4	888	0.48	796	0.33
Average			-%8.75	-%22.5



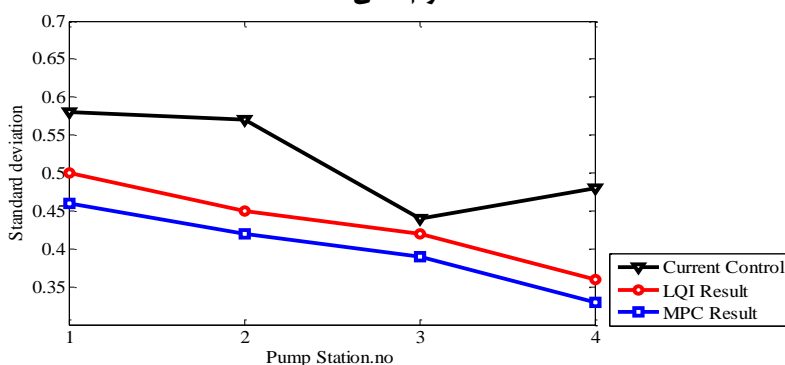
**Fig. 7- Volume of water stored in tank 6 (A), and tank 10 (B), for results of LQI and results of MPC**  
 شکل ۷- حجم آب ذخیره شده در مخازن شماره ۶ (A)، مخزن شماره ۱۰ (B)، در دو حالت نتایج الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی و نتایج الگوریتم کنترل پیش بین

نکته دوم که باید در مورد ارجحیت کنترل کننده کنترل پیش بین نسبت به الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی مدنظر قرار گیرد. امکان تعریف محدودیت های موجود در سیستم برای کنترل پیش بین می باشد که در بخش دوم به طور کامل توضیح داده شد. متأسفانه این امکان در الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی وجود ندارد و اگر به شکل ۷ دقت شود مشخص است که در برخی از گام های زمانی کنترلی حجم ذخیره شده در مخازن آب از محدوده ی مجاز تخطی کرده است. در ادامه درصد خطای مطلق تجمعی برای تمامی مخازن در الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی محاسبه گردید که در شکل ۸ ارائه شده است. همان طوری که از شکل ۸ مشخص است، انحراف الگوریتم کنترل پیش بین در تنظیم آب ذخیره ذخیره شده در مخازن در مجاورت مقدار مطلوب خیلی کمتر از الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی می باشد. به طوری که بیشترین خطا در الگوریتم کنترل پیش بین زیر ۱۰٪ بوده در حالی که در الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی کمترین خطا نزدیک ۲۰٪ است. در ادامه وضعیت ایستگاه های پمپاژ در دو روش کنترلی ارائه شده بررسی می شود.

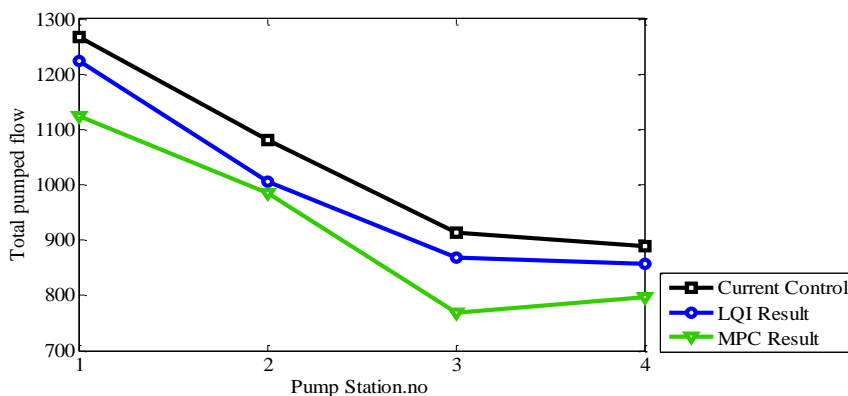
در الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی هم اگر چه این حلقه باز خورد برای سیستم تعریف شده اما به دلیل اینکه در هر گام کنترلی فقط اطلاعات مربوط به همان لحظه سیستم را در اختیار دارد و از شرایط آینده پیش بینی ندارد، این امر باعث می شود عملکرد این کنترل کننده در سیستم های با مقیاس بزرگ مانند خطوط انتقال آب که تحت تأثیر مصارف انشعاب ها، با تغییرات زیاد و عدم قطعیت بالایی مواجه هستند، کارایی خوبی نداشته باشند. همین امر باعث می شود الگوریتم کنترل پیش بین نسبت به الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی در سیستم هایی که عدم قطعیت بالایی دارند و تحت تأثیر تغییرات ناگهانی در طول زمان شبیه سازی می باشند بهتر عمل کند. هر چند ممکن است این نوع کنترل کننده برای سیستم هایی با مقیاس کوچک بهتر از کنترل پیش بین عمل کند. چرا که یکی از مشکلات کنترل کننده کنترل پیش بین زمان اجرای برنامه می باشد و هر چه سیستم بزرگ تر می شود زمان اجرا طولانی تر خواهد بود.



**Fig. 8-** Integral absolute magnitude error of target volume in tanks for two algorithm of MPC and LQI  
 شکل ۸- خطای مطلق تجمعی در مخازن بین‌راهی از حجم هدف معین در دو الگوریتم کنترل پیش‌بین و الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی



**Fig. 9-** Standard deviation for the flow profile of the pumped water by the current control, MPC controller and LQI controller  
 شکل ۹- انحراف معیار دبی پمپاژ در ایستگاه‌ها در سه حالت داده‌های اپراتوری، نتایج حاصل از اعمال الگوریتم کنترل پیش‌بین و الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی



**Fig. 10-** Total pumped flow by the current control, MPC controller and LQI controller  
 شکل ۱۰- مجموع دبی پمپاژ شده برای سه حالت داده‌های اپراتوری، نتایج حاصل از اعمال الگوریتم کنترل پیش‌بین و الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی

مهم بوده و نوسان بالا و تغییر جهش دار جریان سبب استهلاک و آسیب دیدگی شیرهای کنترلی خط انتقال و حتی لوله‌ها می‌شود. شکل ۹ و ۱۰ مقدار انحراف معیار جریان و مجموع دبی پمپاژ شده در طول یک سال در هر ۴ ایستگاه خط انتقال را در سه حالت داده‌های اپراتوری

همان‌طوری که در بخش طرح مسأله بیان شد، تغییرات ناگهانی که در اثر میزان مصارف انشعاب‌ها خط انتقال زرينه‌رود مواجه است منجر به تغییر ناگهانی در میزان دبی پمپاژ در ایستگاه‌ها می‌شود که این مسئله در آسیب رساندن به سیستم مکانیکی دستگاه‌های پمپاژ بسیار

که از سیستم حلقه باز برای کنترل خط انتقال استفاده می‌کنند و دو روش حلقه بسته کنترل پیش‌بین و کنترل درجه دوم خطی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت نشان می‌دهد.

از شکل ۹ و ۱۰ مشخص است که به‌طور کلی عملکرد کنترل‌کننده‌های حلقه بسته که در این تحقیق ارائه شد بهتر از روش کنترلی است که در حال حاضر توسط اتاق کنترل خط انتقال زربینه‌رود به تبریز استفاده می‌شود. همچنین در بین دو روش کنترل حلقه بسته نیز نوسان کنترل پیش‌بین به مراتب کمتر از الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی می‌باشد. ضعف عملکرد الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی در کنترل سیستم خط انتقال بدین علت است که الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی به کاربر امکان تعریف قیود نیز در این روش بر روی ورودی‌های سیستم وجود ندارد که عمده‌ترین مشکل را در کنترل سیستم‌های با مقیاس بزرگ مانند سیستم‌های آبی که شامل محدود کننده‌های بسیاری هستند را ایجاد می‌کند. در صورتی که الگوریتم کنترل پیش‌بین با بهره‌گیری از علم بهینه‌سازی توانسته این ضعف کنترل‌کننده الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی را جبران کند و این امکان را به کاربر می‌دهد تا بتواند محدوده ورودی سیستم و نوع تابع هدف را به‌دلخواه تنظیم کند. لذا برای کنترل سیستم‌هایی پیچیده و با مقیاس بزرگ مانند خطوط انتقال آب، کنترل پیش‌بین بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله به مسأله‌ی بهبود مدیریت و کنترل خط انتقال آب به روش مدرن پرداخته است. روش‌های بهره‌برداری سنتی رایج در سیستم‌های خط انتقال آب به جهت دارا نبودن قابلیت بهره‌گیری از مدل ریاضی سیستم جهت پیش‌بینی شرایط آینده و اعمال محدودیت‌های بهره‌برداری بر سازه‌های کنترلی همچون مخازن بین‌راهی عملکرد مناسبی ندارند. لذا در این تحقیق با استفاده از الگوریتم مدرن و هوشمند کنترل پیش‌بین به‌عنوان تکنیکی که به ما اجازه می‌دهد تا یک مدیریت جامع چند متغیره به همراه محدودیت‌های موجود در سیستم مورد نظر انجام شود، یک کنترل‌کننده برای خط انتقال زربینه‌رود به تبریز طراحی شد. الگوریتم کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن دینامیک سیستم به‌صورت فضای حالت و با روند پیش‌بین نظارتی، یک استراتژی بهینه برای دبی عبوری از ایستگاه‌های پمپاژ را مشخص می‌کند. بر اساس، نتایج 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

تعریف‌شده همگرا کند. در این تحقیق دو هدف عمده که اغلب در مدیریت خط انتقال آب مهم هستند بررسی گردید. نتایج نشان دادند که کنترل‌کننده پیش‌بین می‌تواند ضمن تأمین همه‌ی مصارف انشعاب‌ها و حفظ حجم ایمن در مخازن، نوسان در ایستگاه‌های پمپاژ را به‌طور متوسط ۲۲٪ کاهش دهد که مقدار قابل توجهی است و می‌تواند تا حد بسیار زیادی از آسیب‌های وارده به سیستم پمپاژ و استهلاک آن‌ها به دلیل تغییر ناگهانی دبی جریان جلوگیری کند. همچنین بر اساس نتایج، با اعمال مدل کنترل پیش‌بین به خط مذکور، درصد خطای مطلق تجمعی از حجم مطلوب تعریف‌شده در مخازن بین‌راهی به‌طور متوسط کمتر از ۱۰٪ به دست آمد که نتیجه قابل قبولی است. از طرفی الگوریتم کنترل پیش‌بین به کمک بهینه‌سازی، دبی عبوری در طول مدت طراحی را ۸٪ کاهش دهد. برای بررسی بیشتر کنترل‌کننده پیشنهادی در این تحقیق علاوه بر مقایسه نتایج حاصل با داده‌های اپراتوری، یک روش دیگر کنترلی با نام روش کنترلی انتگرالی درجه دوم خطی برای خط انتقال زربینه‌رود به تبریز طراحی و نتایج حاصل با کنترل پیش‌بین مقایسه گردید. که نتایج نشان دادند، الگوریتم کنترل پیش‌بین، با استفاده از مدل‌سازی پیش‌بین خط انتقال زربینه‌رود در تابع بهینه‌سازی در سیستم‌هایی با مقیاس بزرگ همچون خط انتقال زربینه‌رود به تبریز که تغییرات ناگهانی در بخش مصارف مواجه هستند عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم کنترلی درجه دوم خطی و روش بهینه‌سازی متداول که یک نوع کنترل حلقه باز بوده و در حال حاضر توسط شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی استفاده می‌شود، دارد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی جهت ارتقا مدیریت بهره‌برداری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به‌عنوان یک ایده کاربردی در پروژه‌های جدید همانند طراحی کنترل‌کننده برای خط انتقال فاز دوم زربینه‌رود 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 به‌عنوان سومین هدف عملکرد و این بار با بهره‌گیری از الگوریتم کنترل پیش‌بین در حالت انتگرال‌گیر عملکرد کنترل‌کننده بررسی گردد.

## ۷- تشکر

نویسندگان این تحقیق از همکاری و هم‌فکری اعضای اتاق کنترل خط انتقال زربینه‌رود، شرکت مهندسی مشاور مه‌باد قدس و به‌خصوص آقای مهندس مجتبی جلیل‌زاده معاون محترم بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی کمال سپاسگزاری را دارند.



stations for sulfide mitigation in sewer networks. *Water Research* 98:376-383

Lozoya C, Mendoza C, Mejia L Quintana J, Mendoza G, Bustillos M, Arras O, and Solis L (2014) Model predictive control for closed-loop irrigation. *IFAC Proceedings* 47:4429-4434

Maestre J, Raso L, Van Overloop P, and De Schutter B (2013). Distributed tree-based model predictive control on a drainage water system. *Journal of Hydroinformatics* 15:335-347

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. *IEEE Control Systems* 33(1):15-41

Ogata K (1970) *Modern control engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs

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. 9th IEEE International Conference, Beijing China, 11-14 April

Rezapour Tabari M and Mazak Mari M (2016) A simulation-optimization approach for reducing seepage rate in water conveyance canals. *Iran-Water Resources Research* 11(3):17-30 (In Persian)

Van Overloop P J (2006) *Model predictive control on open water systems*. IOSPress Delft University Press

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

Xu M, van Overloop P J, and Van De Giesen N (2013) Model reduction in model predictive control of combined water quantity and quality in open channels. *Environmental Modelling & Software* 42:72-87

Zarghami M, Hajykazemian H (2013) Urban water resources planning by using a modified particle swarm optimization algorithm. *Resources Conservation and Recycling* 70:1-8

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, 8:551-555

- 1- Open Loop System
- 2- Closed Loop System
- 3- Feedback Control
- 4- Model Predictive Control (MPC)
- 5- Linear Quadratic Integral Control (LQI)
- 6- Disturbance
- 7- Receding Horizon
- 8- Robust Control
- 9- Prediction Horizon
- 10- State Space Model
- 11- Quadratic Programming

## ۸- مراجع

Azizi M and Keighobadi J (2017) Point stabilization of nonholonomic spherical mobile robot using nonlinear model predictive control. *Robotics and Autonomous Systems* 98:347-359

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

Camacho E F and Bordons Alba C (2013) *Model predictive control*. Springer-Verlag London, 405P

Cannon M (2015) *Model predictive control*. University of Oxford Press, Oxford

Friedland B (1986) *Control system design: An introduction to state-space methods*. McGraw-Hill Book Company, New York, 528P

Ghajarnia N, Bozorg Haddad O and Kouchakzadeh S (2011) Multi objective dynamic design of water distribution networks. *Iran-Water Resources Research* 7(3):21-40 (In Persian)

Hashemi S M, Monem M J, and Van Overloop P J (2013) Improving the operation of main irrigation canal using in-line storage operational strategy and applying Model Predictive Control (MPC). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 6:342:352

Hosseini Pishrobat M and Keighobadi J (2016) Force-balancing model predictive control of MEMS vibratory gyroscope sensor. *Journal of Mechanical Engineering Science* 230:3055-3065

Khaki Sedigh A (2012) *Linear control systems*. Payam Noor University Press, 475P (In Persian)

Leigh J R (2004) *Control theory*. the Institution of Engineering and Technology, London, UK, 269P

Liu Y, Ganigué R, Sharma K, and Yuan Z (2016) Event-driven model predictive control of sewage pumping