

کافی برای ایجاد ظرفیت لازم برای کنترل سیلاب را با توجه به محدودیت‌های سیستم به کنترل‌کننده می‌دهد و این درحالی است که افق کوتاه‌مدت مشابه سایر کنترل‌کننده‌های بدون پیش‌بینی عملکرد مؤثری ندارد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل سیستمی، سیستم‌های آبی، کنترل اتوماتیک سیلاب، کنترل پیش‌بین مدل.

### مقدمه

در سال‌های اخیر به سبب بارش‌های شدید باران، ذوب سریع برف‌ها و افزایش رواناب‌های سیل‌آسا، سیلاب‌های مخربی در مناطق غربی و جنوب غربی کشورمان رخ داده است. کنترل سیل پیچیده است و معمولاً با استفاده از روش‌های مبتنی بر قضاوت و تجربه کاربرهای محلی رودخانه انجام می‌شود [۱۲] که عیب اصلی این روش آن است که قوانین معمولاً بر اساس اندازه‌گیری سطح آب در مخازن و رودخانه‌ها هستند و به‌طور اتوماتیک پیش‌بینی‌های آبی بارندگی و رواناب‌های حوضه رودخانه را در نظر نمی‌گیرند [۵ و ۷]. امروزه در کشورهای پیشرفته، کنترل اتوماتیک سیلاب با استفاده از اطلاعات بلادرنگ سنسورهای مختلف، داده‌های برخط هواشناسی برای پیش‌بینی بارش‌ها و رواناب‌ها و از طریق مخازن ذخیره‌سازی برای ذخیره جریان اضافی رودخانه با استفاده از سازه‌های هیدرولیکی (دریچه‌های سرریز) که به‌وسیله کنترل‌کننده‌های اتوماتیک کنترل می‌شوند، برای کنترل میزان تخلیه در شبکه رودخانه پس از دوره بارندگی شدید، انجام می‌گیرد [۴، ۱۲ و ۱۷]. بدین ترتیب سطح آب مخزن و رودخانه در نقطه تنظیم معین و ایمنی نگه‌داشته می‌شود تا از سرریز و سیلابی شدن نواحی پایین‌دست رودخانه جلوگیری شود. برای دستیابی به سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن، باید تصمیماتی صحیح در مورد رهاسازی و ذخیره آب مخازن در یک دوره زمانی با در نظر گرفتن تغییرات در دبی جریان ورودی و دبی تقاضا و پیش‌بینی بارش و رواناب‌های آینده اتخاذ شود تا مشکلات کم‌آبی و سیلاب در نواحی پایین‌دست به وجود نیاید [۱۴]. سیاست‌های بهره‌برداری بهینه بر اساس تکنیک‌های بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی<sup>۶</sup> (LP) و غیرخطی<sup>۷</sup> (NLP)، برنامه‌ریزی پویا<sup>۸</sup>

## مدل‌سازی دینامیکی سیستم آبی و کنترل پیش‌بین سیلاب در حوزه آبخیز کارون و دز

شهرام آقایی<sup>۱</sup>، محمد زمانی<sup>۲</sup>، سید میثم واصل‌نیا<sup>۳</sup>، غلامحسین مرادی<sup>۴</sup> و

ویسنس پویینگ<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۲۵

DOI: 10.22034/17.63.61

### چکیده

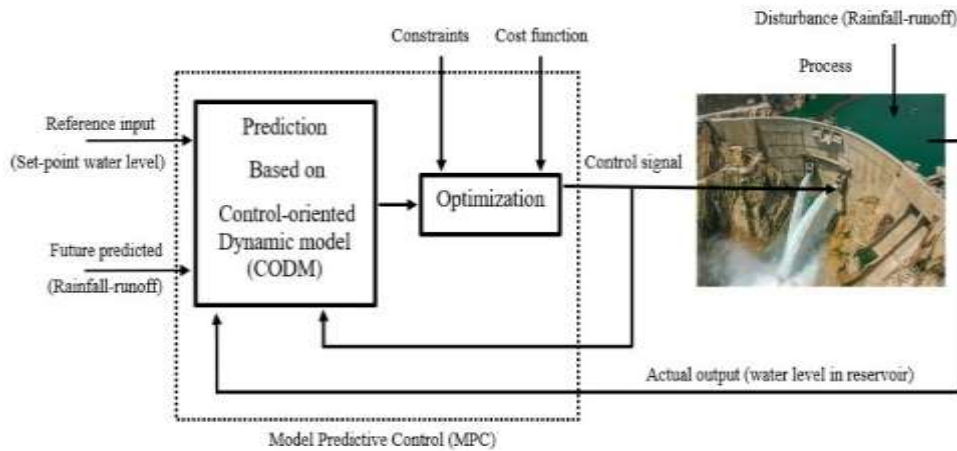
امروزه با کنترل اتوماتیک سیلاب می‌توان ضمن جلوگیری از سرریز شدن سد و سیلابی شدن نواحی پایین‌دست رودخانه، با کنترل ظرفیت ذخیره‌سازی مطلوب تهدیدهای سیلاب را به فرصت‌های بهره‌وری از منابع آب تبدیل نمود. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به دلیل توانایی در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های آبی بارش-رواناب و محدودیت‌های فیزیکی، عملیاتی و ایمنی سیستم آبی، در بازه زمانی مناسبی قبل از سیل‌های مخرب، ظرفیت لازم و بهینه برای مهار سیلاب در سدها ایجاد می‌کند. در این پژوهش ضمن معرفی نحوه مدل‌سازی سیستم آبی با رویکرد کنترلی و بررسی عملکرد کنترل اتوماتیک و بلادرنگ با استفاده از کنترل پیش‌بین سیلاب، مدل‌سازی سیستم رودخانه کارون و دز و شش سد مخزنی با سازه‌های هیدرولیکی مرتبط به عنوان یکی از حوزه‌های سیل‌خیز انجام می‌شود. مدل فضای حالت برای طراحی کنترل پیش‌بین استخراج می‌شود و برنامه بهینه‌سازی برخط کنترل پیش‌بین طراحی و در نرم‌افزار MATLAB برای افق پیش‌بین کوتاه‌مدت هشت ساعت و بلندمدت ۱۰ روز شبیه‌سازی می‌شود. نتایج نشان‌دهنده آن است که افق بلندمدت ۱۰ روز فرصت

- ۱- نویسنده مسئول و دانشیار، گروه الکترونیک و کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، [aghaei@yazd.ac.ir](mailto:aghaei@yazd.ac.ir) مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی و بین‌المللی، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه الکترونیک و کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه الکترونیک و کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۴- دانشیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- ۵- استاد، گروه مهندسی برق، دانشگاه پلی تکنیک کاتالونیا (UPC)، بارسلونا، اسپانیا.

6. Linear Programming (LP)

7. Non-Linear Programming (NLP)

8. Dynamic Programming (DP)



شکل ۱ - طرح کلی کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC  
 Fig1 . Schematic of Automatic flood control based on MPC

از پارامترهای ورودی کنترلی، پیش‌بینی می‌شود. با بهینه‌سازی تابع هدف، دنباله سیگنال‌های کنترلی محاسبه می‌شود. نمونه اول دنباله متناظر با زمان نمونه‌برداری فعلی به محرک‌های کنترلی مانند دریچه‌های سرریزها و پمپ‌ها، اعمال و از سایر نمونه‌ها چشم‌پوشی می‌شود. در زمان نمونه‌برداری بعدی با اندازه‌گیری مجدد خروجی و دریافت پیش‌بینی‌های جدید از اغتشاشات، این فرآیند تکرار می‌شود. در پژوهشی که توسط پویبگ و همکاران [۱۸] انجام شده است، کنترل و مدیریت بهینه سیستم رودخانه آروس<sup>۳</sup> در جنوب غربی فرانسه، مبتنی بر کنترل پیش‌بین متشکل از یک مدل دینامیکی با رویکرد کنترلی شامل مدل جریان بالادست و جریان پایین‌دست هر حوضچه کانال رودخانه، مدل بارش-رواناب<sup>۴</sup> برای پیش‌بینی جریان آب باران ورودی به هر حوضچه رودخانه و مدل تقاضای آب برای مصارف کشاورزی با هدف تضمین برقراری جریان زیست‌محیطی در امتداد رودخانه بررسی شده است. در این پژوهش هدف از کنترل دبی خروجی سد به‌وسیله MPC، اطمینان از دبی جریان حداقلی در رودخانه آروس و رهاسازی تدریجی آب برای جلوگیری از بارگذاری بیش‌ازحد در شبکه آب‌رسانی و سیلابی شدن نواحی پایین‌دست رودخانه بود. در پژوهشی دیگر مدیریت بهینه سیستم آبی رودخانه گوادیانا<sup>۵</sup> در پرتغال، مبتنی بر MPC توسط [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است و از کنترل پیش‌بین برای ایجاد راهبردهای کنترل جریان از منابع به مصرف‌کننده و مناطق آبیاری و همچنین برای مواجهه با نیازهای مصرفی آینده با جریان‌های مناسب، بهینه‌سازی اهداف عملیاتی مانند دبی مناسب و ایمن در رودخانه، تضمین برقراری جریان رودخانه و پایداری کنترل جریان در محرک‌ها استفاده شده است. در تمامی این مطالعات برای کاهش خطر سیلاب در پایین‌دست رودخانه از کنترل پیش‌بین برای کنترل سطح آب مخازن و رودخانه‌ها استفاده شده است.

(DP)، نظریه کنترل پیش‌بین و تکنیک‌های هوش مصنوعی برای بهره‌برداری صحیح از مخازن استفاده شده‌اند [۷ و ۱۲]. رویکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل<sup>۱</sup> (MbPC) - از این پس به اختصار کنترل پیش‌بین (MPC) گفته خواهد شد- با استفاده از یک مدل دینامیکی سیستم، رفتار آینده سیستم را پیش‌بینی کرده و در قالب بهینه‌سازی برخط و با تضمین محدودیت‌های سیستم، قوانین بهینه کنترلی را تعیین می‌کند. این فرآیند با اندازه‌گیری متغیرهای مهم سیستم در هر زمان نمونه‌برداری تکرار می‌شود [۲۱]. به دلیل ویژگی پیش‌بینی و لحاظ کردن عینی محدودیت‌های<sup>۲</sup> فیزیکی و عملیاتی سیستم‌های آبی مانند سطوح ایمنی و سطوح سیلاب، عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات آبی (مانند پیش‌بینی‌های بارش و رواناب) به‌طور گسترده در مدیریت سیستم‌های آبی و کنترل سیستم‌های آب‌رسانی برای تنظیم شبکه‌های آبی در موضوعات مختلف مانند تنظیم سطح آب در کانال‌های روباز، مدیریت بهره‌برداری سیستم‌های منابع آب، مدیریت کیفیت آب و همچنین برای کنترل سیلاب رودخانه‌ها استفاده می‌شود [۱۰، ۱۱ و ۱۴].

در مدیریت بهره‌برداری از منابع آب مبتنی بر راهبردهای کنترل بالادرنگ و برخط کنترل پیش‌بین، پارامترهای کنترلی و اجرایی از طریق الگوریتم بهینه‌سازی برخط MPC تولید می‌شوند. با استخراج راهبردهای کنترل بالادرنگ (نقاط تنظیم) و بهینه‌سازی برخط، تعداد زیادی پارامتر کنترلی و اجرایی برای پیکربندی مؤثر کل سیستم آبی در اختیار مدیر بهره‌برداری قرار می‌گیرد و از این طریق امکان بررسی اثرات سیاست‌های بهره‌برداری مختلف قبل از اجرای آن‌ها فراهم می‌شود [۷ و ۱۷].

شکل (۱) طرح کلی کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC را نشان می‌دهد. با اندازه‌گیری خروجی فعلی و پیش‌بینی اغتشاشات، حالت‌های آینده سیستم با استفاده از مدل دینامیکی، بر اساس دنباله‌ای

3. Arros  
 4. Runoff-Rainfall  
 5. Guadiana

1. Model based Predictive Control (MbPC) or Model Predictive Control (MPC)  
 2. Constraints

سدهای مخزنی به عنوان مهم‌ترین ابزار کنترل و تنظیم سیلاب حوزه‌های سیل‌خیز ایران برای کاهش خطر سیلاب ناشی از بارندگی‌های شدید و ذوب سریع برف و همچنین برای اهداف مختلفی مانند تأمین آب مورد نیاز برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شهری و تولید انرژی برق‌آبی طراحی و ساخته شده‌اند. در طول سال‌های گذشته این اهداف متفاوت باعث اختلافات مربوط به کنترل ذخیره‌سازی و رهاسازی آب و یک مسئله دشوار برای بهره‌برداران و کاربرهای مخزن به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده است. بهره‌برداری صحیح از مخازن نیازمند رویکردی مبتنی بر ایجاد مصالحه بین کنترل سیلاب و ذخیره آب با کنترل رهاسازی در تمام فصول سال و توجه به کمبود آب در پایان فصل‌های سیلابی دارد [۱۲]. با وجود اختصاص یافتن حجم قابل‌توجهی از مخازن سدها در ایران برای کنترل سیلاب، به علت ترس از وقوع سیلاب و عدم اطمینان از تخلیه کامل سیلاب برای ایجاد ظرفیت مناسب برای سیل‌های احتمالی بعدی، کارایی این سدها کاهش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

متأسفانه تا به حال مطالعات مؤثری در راستای بررسی عملکرد مخازن چندمنظوره مبتنی بر کنترل‌کننده‌های اتوماتیک در سیستم‌های آبی بزرگ‌مقیاس به منظور کنترل اتوماتیک سیلاب در ایران انجام نشده است [۶ و ۱۲]. پژوهش حاضر با درک این ضرورت، به بررسی پیش‌نیازهای یک سیستم کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC پرداخته تا ادبیات کنترل سیلاب در ایران را پایه‌گذاری کند. در این راستا با انتخاب حوزه آبخیز کارون و دز و مدل‌سازی سیستم آبی با رویکرد کنترلی - که با مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی پیشین متفاوت است - مقدمات بررسی عملکرد کنترل پیش‌بین فراهم شده است. در انتها با طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، نشان داده می‌شود که این کنترل‌کننده با افق پیش‌بین کافی، با داشتن اطلاعات پیش‌بینی بارش شدید با تخلیه به موقع مخازن، ظرفیت کافی برای مهار سیلاب را ایجاد می‌کند.

## مواد و روش‌ها

### حوضه مورد پژوهش (حوزه آبخیز کارون و دز)

سیستم آبی مورد مطالعه در این پژوهش شامل دو رودخانه پر آب کارون و دز و شش سد مخزنی در دست بهره‌برداری از بین سدهای احداث شده بر روی مسیر طولانی و پر پیچ‌وخم هر دو رودخانه است. حوزه آبخیز کارون و دز، ارتفاعات زیادی را در بر می‌گیرد و تعداد زیادی سیستم‌های آبرسانی و شبکه‌های آبیاری و نیروگاه‌های آبی را در خود جای داده است. در هر دو حوزه آبخیز، در فصل پاییز و زمستان، بخش قابل‌توجهی از ریزش‌ها به صورت برف می‌بارد. بارش‌های شدید باعث تشدید ذوب برف‌ها و افزایش رواناب‌ها می‌شود و سیلاب‌های زیادی را در دشت خوزستان جاری می‌نماید و منجر به آسیب به سازه‌های سدهای در حال ساخت و مناطق آسیب‌پذیر سیلاب‌دشت‌ها می‌شود.

## مدل‌سازی سیستم آبی با دیدگاه کنترلی

یک سیستم RTAC مبتنی بر MPC، نیازمند استفاده از یک مدل دینامیکی کنترل محور (CODM) از سیستم آبی است. برای جلوگیری از پیچیدگی‌های ریاضی بازدارنده با صرف‌نظر از برخی جزئیات غیرخطی رفتارهای هیدرولوژیکی، یک مدل CODM به اندازه کافی دقیق مناسب است [۱۶]. مدل بسیار دقیق باعث هزینه‌های بالای محاسباتی شده و محاسبات و پیاده‌سازی سیستم کنترل را با مشکل مواجه می‌کند. از بسته‌های نرم‌افزاری با مدل‌های هیدرولوژیکی متفاوت برای طراحی RTAC سیستم‌های آبی به کمک کنترل پیش‌بین به صورت مستقیم نمی‌توان استفاده کرد. لذا ابتدا با لحاظ اهداف کنترلی مدنظر (از قبیل نقطه تراز مطلوب سطح آب، سطح سیلاب و سطح ایمن) برای سیستم آبی مورد مطالعه و به کمک معادلات سنت‌ونانت<sup>۱</sup>، به مدل‌سازی ریاضی کانال رودخانه پرداخته می‌شود. مدل‌سازی سازه‌های هیدرولیکی و شرایط مرزی رودخانه نیز بر اساس معادلات ریاضی انجام می‌گیرد. از آنجایی که معمولاً مدیریت رودخانه‌ها از طریق اعمال محدودیت‌هایی روی جریان و سطح آب عملی می‌شود [۵]، باید پیش‌بینی‌های بارش-رواناب و جریان‌های ورودی و خروجی در سراسر رودخانه در نظر گرفته شوند. برای پیش‌بینی جریان‌های ورودی به رودخانه به مدل‌های هیدرولوژیکی با قابلیت ایجاد ارتباط بین جریان‌های رودخانه و بارش‌ها نیاز است [۴ و ۱۲]. سیستم کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC، با دریافت اطلاعات پیش‌بینی هواشناسی و خروجی مدل بارش-رواناب و استفاده از آن به عنوان اختلال در طول افق پیش‌بینی خود، با پیش‌بینی تغییرات سطح آب مخازن در آینده، سعی در جبران اثر اختلال دارد.

### مدل‌سازی کانال روباز رودخانه

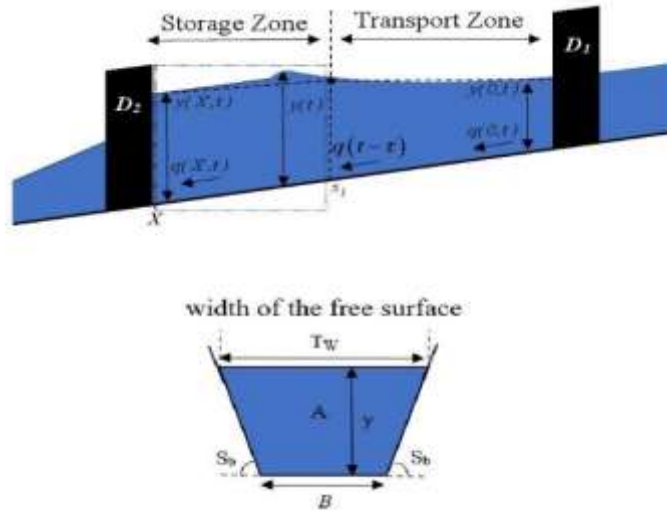
در مدل‌سازی دینامیکی کانال‌های روباز رودخانه، دینامیک‌های موردنظر، سطح و دبی آب هستند [۵]. مدل‌سازی سیستم رودخانه بر اساس معادلات هیدرودینامیکی سنت‌ونانت که مبتنی بر اصول فیزیکی بقای جرم و انرژی هستند، امکان توصیف دقیق جریان کانال باز و رفتار غیرخطی سیستم را با جزئیات کامل دارند. معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی سنت‌ونانت، مبتنی بر معادله پیوستگی<sup>۳</sup> طبق رابطه (۱) و معادله مقدار حرکت<sup>۴</sup> یا معادله دینامیکی طبق رابطه (۲) هستند [۱۶].

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/A}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_b - S_f) \quad (2)$$

$A(x,t)$  مساحت سطح مقطع ناحیه مرطوب برحسب  $(m^2)$  دبی گذرا از ناحیه  $A$  برحسب  $(\frac{m^3}{s})$ ،  $Y(x,t)$  عمق آب برحسب متر،

1. Control-Oriented Dynamic Model (CODM)
2. Saint-Venant Equations
3. Continuity equation
4. Momentum equation



شکل ۲ - تقسیم یک کانال به دو بخش و سطح مقطع دوزنقه‌ای شکل  
 Fig 2. Distribution of a canal into two zones and the trapezoidal cross section

زمانی انتقال (مدت زمان رسیدن دبی خروجی سد بالادست به سد پایین دست آن) برای توصیف رفتار فرکانس پایین سیستم در حوزه فرکانس استفاده می‌شود و این یعنی رفتار سیستم، شبیه مخزنی در حال پر و یا خالی شدن است. سطح آب مخزن با استفاده از رابطه ۳ بیان می‌شود [۱۳].

$$y(s) = \frac{K_{IDZ1}s+1}{A_e IDZs} e^{-\tau IDZs} q_{in}(s) - \frac{K_{IDZ2}s+1}{A_e IDZs} q_{out}(s) \quad (3)$$

مطابق شکل (۲)، عبارت اول رابطه (۳) مربوط به اثر دبی جریان بالادست بر سطح آب مخزن و عبارت دوم اثر دبی خروجی مخزن بر سطح آب مخزن هستند. دبی جریان بالادست و دبی خروجی از مخزن هر دو برحسب مترمکعب بر ثانیه هستند.  $k_{IDZ1}$  و پارامترهای مربوط به صفر محاسبه شده ویژگی‌های کانال رودخانه را شامل می‌شود.

صفرهای صورت رابطه (۳) در واقع برای مدل‌سازی نوسانات سریع سطح آب در اثر تلاطم جریان آب ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است.  $\tau_{IDZ}$  تأخیر زمانی و  $A_e IDZ$  تقریب مساحت سطح مخزن است و برابر با  $A_e IDZ = T_w L$  است. بنابراین مدل IDZ شامل انتگرال‌گیر با بهره  $(\frac{1}{A_e IDZ})$  و صفر  $(\frac{1}{K_{IDZ1}}, i=1,2)$  است و مدل توسط متغیرهایی با اثر فوری و تأخیری توصیف می‌شود [۸]. با توجه به معادلات سنت و نانت روابط (۱) و (۲)،  $\tau_{IDZ}$  طبق رابطه (۴) برحسب دقیقه به دست می‌آید [۲۰].

$$\tau_{IDZ} = 0.0167 \left( \frac{n}{\sqrt{s}} \right)^3 X B^2 B q^{\frac{-2}{3}} \quad (4)$$

پارامترهای مدل سیستم مورد پژوهش، یعنی ضریب مانینگ  $n=0.025$  شیب بستر  $s=0.00011$  و  $\bar{q}=500$  ( $\frac{m^3}{s}$ ) (متوسط دبی رودخانه) در نظر گرفته شده‌اند. تأخیرهای انتقال سیستم مطابق جدول (۱) محاسبه شده است.

$S_f(x,t)$  شیب اصطکاک،  $S_b$  شیب کف،  $B$  پهنای بستر برحسب متر و  $g$  شتاب گرانشی برحسب  $(\frac{m}{s^2})$  است. معادلات ریاضی (۱) و (۲) از نوع معادلات دیفرانسیل جزئی هستند و نمی‌توانند به صورت مستقیم در معادله نویسی مسئله بهینه‌سازی برای MPC پیاده‌سازی شوند. یک مدل خطی می‌تواند طراحی کنترل‌کننده را آسان‌تر کند. لذا در این پژوهش برای ساده‌سازی مسئله بهینه‌سازی برخط برای کنترل‌کننده، مدل سیستم رودخانه براساس مدل IDZ که از خطی‌سازی معادلات سنت و نانت و تقریب ریاضی ماتریس انتقال سنت و نانت استخراج و برای باز تولید پاسخ کانال سیستم در هر حالت جریان طراحی می‌شود، در نظر گرفته شده است. این روش مدل‌سازی سیستم رودخانه توسط لیتریکو [۱۶] با جزئیات کامل بیان شده است. مدل IDZ در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده از تأسیسات آزمایشی مرکز کنترل هیدرولیک و کانال دانشگاه اوورا، پرتغال تأیید شده است [۱۳].

شکل (۲) که برای توصیف مدل IDZ ارائه شده است، یک بازه کانال روباز رودخانه بین دو سد آبخاری و  $D_2$  با دو بخش انتقال و ذخیره آب را نشان می‌دهد. بر همین اساس دینامیک‌های یک کانال رودخانه شامل دو بخش است، بخش بالادست (مسیر رودخانه) که در آن جریان حالت یکنواخت دارد و بخش پایین دست (مخزن) که جریان تحت تأثیر برگشت آب یا اثر پنگاب<sup>۲</sup> قرار می‌گیرد [۸]. در شکل (۲)، متغیر اصلی دبی خروجی  $q(X,t)$  از سد برحسب  $(\frac{m^3}{s})$  و سطح آب مخزن پشت سد برحسب متر هستند.  $X$  طول بازه کانال رودخانه و  $T_w$  عرض سطح آزاد ناحیه مرطوب است. بخش انتقال (جریان یکنواخت) و بخش مخزن به صورت جداگانه مدل‌سازی و سپس هر دو مدل ادغام می‌شوند. در این مدل از انتگرال‌گیر (که نشان‌دهنده چگونگی تغییر حجم با توجه به تغییر سطح آب) و تأخیر

1. Integrator Delay Zero (IDZ)
2. Backwater effect

جدول (۲) ویژگی‌های حجم مخزن، تراز نرمال مخزن و حداکثر دبی خروجی از مخزن و نیروگاه برای هر سد سیستم مورد پژوهش را نشان می‌دهد. برخی از این مشخصات به‌عنوان محدودیت‌های عملیاتی سیستم در نظر گرفته می‌شوند که هرگز نباید نقض شوند. سیستم آبی مورد پژوهش به‌صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. اولین سد بالادست، سد کارون چهار (D<sub>k4</sub>) و سپس به ترتیب سد کارون سه (D<sub>k3</sub>) سد کارون یک (D<sub>k1</sub>) سد مسجدسلیمان (D<sub>ms</sub>) و سد گتوند (D<sub>go</sub>) آخرین سد احداث شده بر روی مسیر رود کارون و سد دز (D<sub>d</sub>) بر روی مسیر رودخانه دز می‌باشند. مدل دینامیکی سیستم بر اساس روش مدل‌سازی IDZ، با محدودیت‌ها (جدول (۲)) و پارامترهای مشخص، مطابق با رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} A_{k4} \frac{dy_{k4}(t)}{dt} &= -q_{k4}(t) + q_{dk4}, \\ A_{k3} \frac{dy_{k3}(t)}{dt} &= q_{k4}(t - \tau_{k4}) - q_{k3}(t) + q_{dk3}, \\ A_{k1} \frac{dy_{k1}(t)}{dt} &= q_{k3}(t - \tau_{k3}) - q_{k1}(t) + q_{dk1}, \\ A_{ms} \frac{dy_{ms}(t)}{dt} &= q_{k1}(t - \tau_{k1}) - q_{ms}(t) + q_{dms}, \\ A_{go} \frac{dy_{go}(t)}{dt} &= q_{ms}(t - \tau_{ms}) - q_{go}(t) + q_{dgo}, \\ A_d \frac{dy_d(t)}{dt} &= -q_d(t) + q_{da}, \\ q_{pf}(t) &= q_{go}(t) + q_d(t) + q_{at}, \end{aligned}$$

subject to,

$$\begin{aligned} 0 \leq q_{k4} \leq 8650, \quad 0 \leq q_{k3} \leq 13345 \quad \left(\frac{m^3}{s}\right), \\ 0 \leq q_{k1} \leq 22500, \quad 0 \leq q_{ms} \leq 21700 \quad \left(\frac{m^3}{s}\right), \\ 0 \leq q_{go} \leq 17500, \quad 0 \leq q_d \leq 6000 \quad \left(\frac{m^3}{s}\right), \\ 1025 \leq y_{k4} \leq 1032, \quad 845 \leq y_{k3} \leq 851.5 \quad (m), \\ 525 \leq y_{k1} \leq 533, \quad 369 \leq y_{ms} \leq 375 \quad (m), \\ 234 \leq y_{go} \leq 244, \quad 345 \leq y_d \leq 352 \quad (m). \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، دبی خروجی سد  $i$  را نشان می‌دهد که برای هر سد با اندیس نام آن سد مشخص شده است و  $q_{d_i}(t)$  دبی جریان‌های ورودی و بارش-رواناب در حدفاصل هر سد با سد قبلی است. همچنین  $q_{pf}(t)$  دبی ورودی به خلیج فارس، حاصل جمع دبی خروجی سد گتوند و سد دز به همراه اختلال ورودی‌های جانبی و بارش-رواناب است  $V_i = A_i y_i$  معرف حجم آب در مخزن سد  $i$  با فرض ساده‌ترین شکل مخزن به‌صورت مکعبی با مساحت سطح  $A_i$  فرض شده است و با این فرض سمت چپ معادله به  $A_i \frac{dy_i(t)}{dt}$  معادل  $\frac{dV_i(t)}{dt}$  لحاظ شده است [۲۰].

به منظور طراحی سیستم کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC، لازم است مدل رابطه (۵) به صورت مدل فضای حالت گسسته زمان، به‌عنوان مدل داخلی MPC، تبدیل شود. فرم کلی یک مدل فضای حالت خطی زمان گسسته به‌صورت رابطه ۶ است [۷].

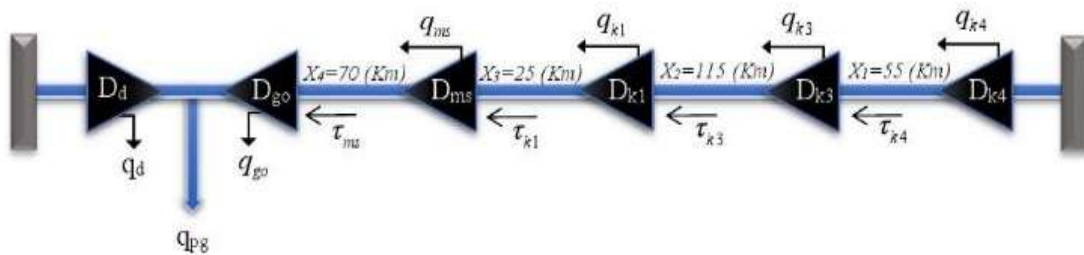
$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Hd(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن  $k$  شمارنده گام‌های زمانی، بردار حالت، بردار ورودی کنترلی، بردار اغتشاش و بردار  $y$  خروجی تحت کنترل است. ماتریس‌های  $A, B, C, H$  ماتریس‌هایی با ابعاد مناسب می‌باشند. مدل فضای حالت زمان گسسته سیستم مورد پژوهش، رابطه (۵)، به‌صورت رابطه ۷ قابل بیان است:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} I_6 & -I \\ 0 & I_6 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} f(k) + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} d(k) \\ z(k) &= [I_6 \quad 0] x(k) \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن  $x(k) = [y^T(k) \quad q^T(k-1)]^T \in R^{12}$  حالت‌های سیستم شامل بردار تراز کنون، سطح آب و بردار دبی خروجی سدها در گام زمانی قبل،  $u(k) = q(k) - q(k-1) \in R^6$  ورودی سیستم شامل بردار تغییرات دبی خروجی سدها،  $f(k) = q(k-\tau) \in R^4$  بردار دبی خروجی تأخیریافته مرتبط با سدهای بالادستی،  $d(k) = q_d(k) \in R^6$  ورودی اختلالات شامل دبی جریان‌های ورودی و بارش-رواناب در حدفاصل هر سد با سد قبلی و  $z(k)$  خروجی سیستم است.

در رابطه (۷)،  $I \in R^{6 \times 6}$  یک ماتریس قطری با عناصر قطر اصلی به‌صورت  $\frac{T_s}{A_i}$  به ازای  $i=1, \dots, 6$  و زمان نمونه‌برداری  $T_s$  تعریف می‌شود و  $\tilde{T} = \text{diag}\{\frac{T_s}{A_i}\}_{i=2, \dots, 5}$  زیرماتریسی از آن است.



شکل ۳- شماتیک سدهای آبخیز مهم در دست بهره‌برداری بر روی مسیر رودخانه کارون و دز  
Fig 3. Schematic of the important waterfall dams in operation on the Karun and Dez rivers

جدول ۱- تأخیرهای زمانی انتقال برای سد بالادست تا سد پایین دست خود

Table 1. Transfer time delay for upstream dam to its downstream dam

تأخیر زمانی انتقال Transfer time delay	طول رودخانه Length of river (Km)	زمان Time (minutes)	زمان Time (day)
$\tau_{k4}$	55	1762	1.2236
$\tau_{k3}$	115	3684	2.5585
$\tau_{k1}$	25	801	0.5562
$\tau_{ms}$	70	2242	1.5573

جدول ۲- مشخصات ظرفیت ذخیره سازی، تراز نرمال و دبی تخلیه مخازن و نیروگاه

Table 2. characterization of Storage capacity, normal elevation and outflow discharges from reservoirs and of hydropower plant

نام سد یا مخزن Name of dam or reservoir	ظرفیت مخزن Reservoir capacity ( $m^3$ )	تراز نرمال مخزن Reservoir normal elevation (m)	حداکثر دبی خروجی سد Maximum outflow discharge of dam ( $\frac{m^3}{s}$ )	حداکثر دبی خروجی نیروگاه Maximum outflow discharge of hydropower plant ( $\frac{m^3}{s}$ )
کارون چهار Karun Four	2279	1025	8650	648
کارون سه Karun Three	3000	845	13345	1376
کارون یک Karun One	3139	532	22500	1408
مسجد سلیمان Masjed-Soleyman	2615	369	21700	1520
گتوند علیا Gotvand-Olia	4500	230	17500	1544
دز Dez	3300	290	6000	350

### (MPC) کنترل پیش بین

هدف کنترلی MPC در سیستم آبی مورد پژوهش، تثبیت تراز سطح آب سدها بر روی مقدار نرمال در حضور محدودیت های معرفی شده در رابطه (۵) به همراه پیش بینی های آینده بارش ها و رواناب های حوزه آبخیز به منظور ایجاد ظرفیت مناسب برای کنترل و ذخیره سیلاب است. MPC برای به دست آوردن قانون کنترلی، یک فرآیند بهینه سازی در یک بازه زمانی پیش بینی  $[k, k+\lambda]$  انجام می دهد، که در آن  $k$  لحظه زمان حال و  $\lambda$  افق پیش بینی است. در نمودار جریانیه شکل (۴) گام به گام مراحل کنترل پیش بین بیان شده است. کنترل پیش بین بر اساس مدل رابطه (۷)، مقادیر خروجی آینده را به صورت یک تابع هزینه از شرایط فعلی و سیگنال های کنترلی آینده، پیش بینی می کند. تابع هزینه مطابق با رابطه (۸)، شامل هزینه هایی از قبیل خطای تنظیم سطح آب و حرکت سازه های هیدرولیکی (محرک ها) است که به دلیل وجود محدودیت هایی از قبیل بیشینه سطح آب مخزن و بیشینه جریان آب در کانال ها (بیشینه دبی خروجی مخزن) و سایر محدودیت های عملیاتی و ایمنی یا راهبردی مربوط به اقلیم منطقه، به صورت افق محدود محاسبه می شود [۲ و ۳].

$$\min J = u(k), u(k+1), \dots, u(k+N_p+1)$$

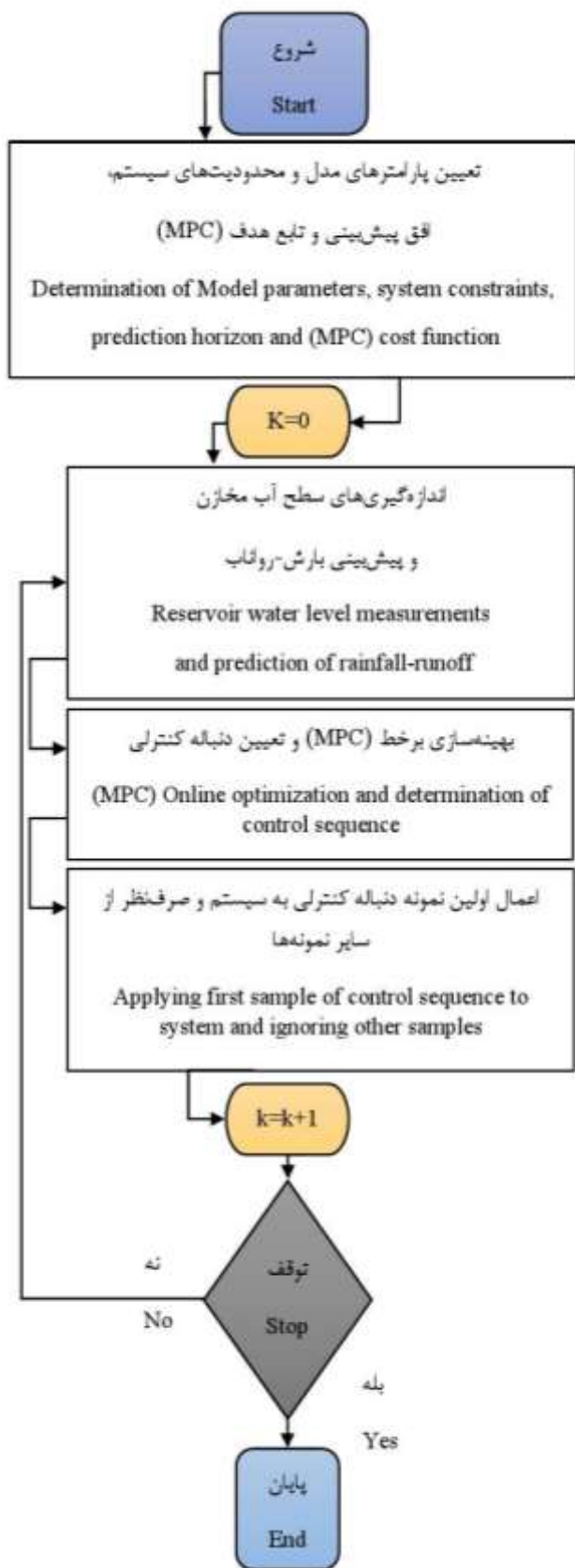
$$\sum_{i=1}^{\lambda} \{e^T(k+i|k) Q e(k+i|k) + u(k+i-1|k)^T R u(k+i-1|k)\}$$

Subject to:

$$Y^{\min} \leq y(k) \leq Y^{\max}$$

$$U^{\min} \leq u(k) \leq U^{\max} \quad (8)$$

که در آن  $T$  بلانویس به معنای ترانزپوز،  $Q$  ماتریس وزن دهی برای خطای سطح آب،  $R$  ماتریس وزن دهی ورودی مدل (تغییر دبی آب عبوری از دریچه) است.  $e(k+j|k)$  پیش بینی خطای بین ارتفاع پیش بینی شده آب  $y(k+j)$  نسبت به مقدار مطلوب آن، در طول افق پیش بینی است. بردار  $u(k)$  متغیر سطح آب مخازن، بردار  $u(k)$  متغیر کنترلی تغییر در دبی خروجی دریچه و  $Q$  و  $R$  ماتریس های وزنی هستند که به عنوان اهمیت نسبی اهداف فرعی در فرآیند بهینه سازی تعریف می شوند. کنترل پیش بین یک بهینه سازی برخط با افق کران دار است که در هر بار بهینه سازی تابع هزینه رابطه (۸)، دنباله ورودی بهینه  $\{u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+\lambda-1|k)\}$  در طول افق بهینه سازی حاصل می شود [۲، ۳ و ۲۱]. اولین نمونه این دنباله کنترلی یعنی  $u(k|k)$  در حالی که مابقی نادیده گرفته می شوند، به دریچه ها ارسال می شود. در زمان نمونه برداری بعدی، سیگنال های سیستم با استفاده از اندازه گیری ها به روزرسانی می شود و فرآیند بهینه سازی با مقادیر جدید تکرار می شود.



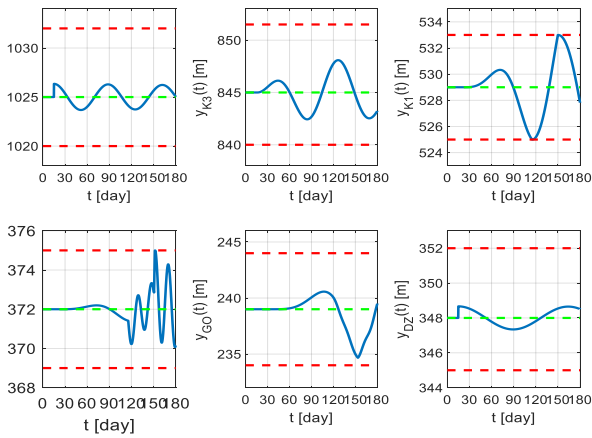
شکل ۴- نمودار جریان‌یابی الگوریتم MPC  
Fig 4. Flowchart of MPC algorithm

در حالت کلی برای پیاده‌سازی MPC در سیستم مورد پژوهش، در هر گام زمانی به مقادیر پیش‌بینی شده از دو بردار  $f(k)$  و  $d(k)$  و به ازای طول افق پیش‌بینی نیاز است. برای این منظور می‌توان به ترتیب از نتایج پیش‌بینی گام زمانی قبل و داده‌های هواشناسی بهره برد. بنابراین در این بخش، یک سناریو برای بررسی عملکرد این راهبرد کنترلی در نظر گرفته شده است و برای حل بهینه‌سازی برخط و تضمین حل‌پذیری آن در هر گام نمونه‌برداری از ساختار آبخاری و روند بهینه‌سازی مشابه ارائه شده در مقاله [۱] استفاده شده است.

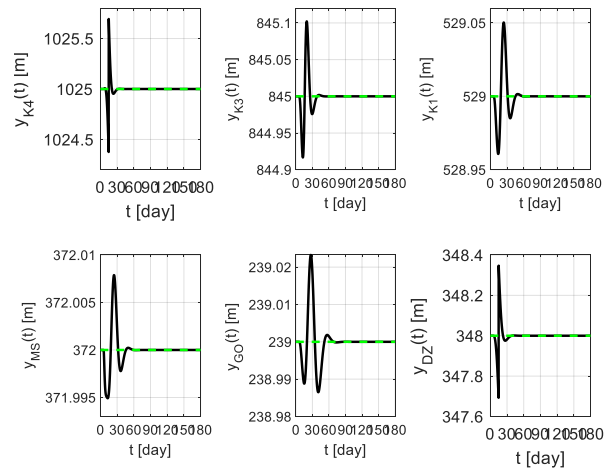
## نتایج و بحث

در این بخش، سیستم کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC طراحی شده برای یک دوره ۱۸۰ روزه شبیه‌سازی می‌شود. زمان نمونه‌برداری چهار ساعت در نظر گرفته شده است. برای شرایط اولیه سیستم، وضعیت عادی سدها مدنظر است به طوری که مقدار دبی ورودی و خروجی هر سد یکسان باشد. این مقادیر برآمده از میزان دبی متوسط رودخانه در وضعیت عادی در فصول پربارش است که برای هر سد معادل  $500 \left(\frac{m^3}{s}\right)$  در نظر گرفته می‌شود. فرض بر آن است که در دو ساعت ابتدایی روز پانزدهم، حوضه رود کارون و دز تحت بارندگی نسبتاً شدیدی قرار دارد به طوری که باعث افزایش دبی ورودی آب به هر کدام از سدهای کارون چهار و دز به میزان  $3000 \left(\frac{m^3}{s}\right)$  میشود. برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی رابطه (۸)، افق پیش‌بینی در دو حالت  $\lambda_1 = 2T_s$  افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت (معادل هشت ساعت) و  $\lambda_2 = 60T_s$  افق پیش‌بینی بلندمدت (معادل ۱۰ روز) مفروض است و ماتریس‌های وزنی به صورت  $Q=I_6$  و  $R=0.01I_6$  انتخاب شده‌اند. به منظور شبیه‌سازی این سیستم از نرم‌افزار MATLAB و جعبه‌ابزار YALMIP استفاده شده است که نتایج آن توسط شکل‌های (۵) تا (۷) ارائه شده‌اند. از مقایسه ترازهای سطح آب در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که در افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت، توانایی پیش‌بینی تأثیر بارش در افقی کوتاه‌مدت بر روی تراز وجود دارد که فرصت اتخاذ تصمیم مناسب کنترلی برای ایجاد ظرفیت مناسب را ایجاد نمی‌کند. بنابراین تا روز پانزدهم تراز تمام مخازن روی تراز عادی نگه‌داشته می‌شود.

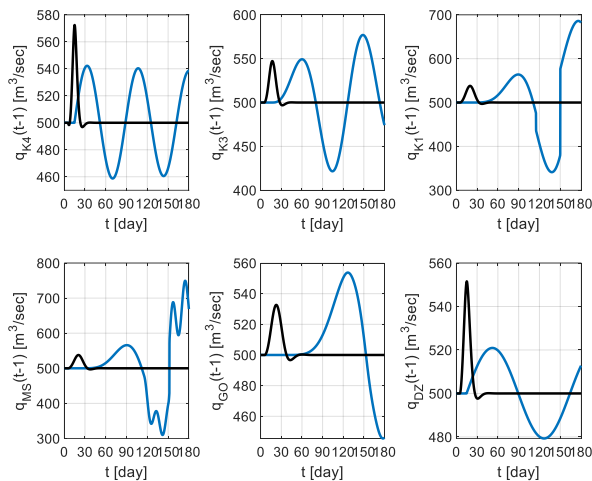
در افق پیش‌بینی بلندمدت، از آنجایی که مدل پیش‌بینی می‌کند قرار است در روز پانزدهم سیلاب شدیدی رخ دهد، کنترل‌کننده مرکزی از چند روز قبل به تمامی مخازن که تراز آن‌ها روی تراز عادی قرار دارد، دستور کاهش تراز مخزن را می‌دهد و فرصت کافی برای ایجاد ظرفیت مهار حجم بارش را به خوبی ایجاد می‌کند. در این حالت نه تنها تراز سطح آب مخازن از حد بالایی تجاوز نکرده است بلکه با حداقل تلاطم و تغییرات، تأثیر بارش مدیریت شده و وضعیت سدها در مدت زمان کوتاهی در سطح مطلوب استقرار یافته است. در این حالت کنترل‌کننده مرکزی تصمیم می‌گیرد در فاصله زمانی مناسبی قبل از وقوع سیلاب تراز مخازن را پایین آورده تا



شکل ۶- تراز آب برای افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت (خط آبی) نسبت به تراز عادی (خط‌چین سبز) و محدوده مجاز (خط‌چین قرمز)  
 Fig 6. The elevation of water level for short prediction horizon (blue line) respect to normal elevation (green-dashed line) and allowed range (red-dashed line)



شکل ۵- تراز آب برای افق پیش‌بینی بلندمدت (خط مشکی) نسبت به تراز عادی (خط سبز)  
 Fig 5. The elevation of water level for long prediction horizon (black line) respect to normal elevation (green line)



شکل ۷- دبی خروجی برای افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت (خط آبی) و بلندمدت (خط مشکی)  
 Fig 7. Outflow debi for short prediction horizon (blue line) and long prediction horizon (black line)

تدریجی دبی آب مخازن، علاوه بر آن که از بارگذاری بیش از حد در کانال رودخانه جلوگیری می‌شود، کنترل سیلاب نواحی پایین‌دست به خوبی ممکن می‌شود. این در حالی است که برای افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت، دبی آب خروجی علاوه بر رفتار دینامیکی نامطلوب و تهدیدات ناپایداری، تغییرات رفتار درجه رهاسازی آب به لحاظ مکانیکی مطلوب نبوده و با استهلاک زیادی روبرو خواهد شد. با مقایسه دبی خروجی مخزن برای افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت، این نتیجه مهم بدست می‌آید که کنترل پیش‌بین با افق پیش‌بینی بلندمدت مناسب و ایجاد فرصت و ظرفیت کافی قبل از بارش، تخلیه مخازن با روندی مطلوب در روزهای قبل از وقوع سیلاب صورت گرفته است. در این حالت دبی خروجی مخازن تغییرات شدیدی ندارد که این موضوع با توجه به عملکرد نیروگاه‌های

هنگام وقوع سیلاب ظرفیت مناسب در همه‌ی مخازن ایجاد شود. برای افق پیش‌بینی بلندمدت، پس از چند روز تراز مخازن بر روی مقدار تراز عادی آن‌ها تثبیت می‌شود در حالی که برای افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت تراز مخازن اطراف تراز عادی آن‌ها متلاطم است و رفته رفته بر دامنه تلاطم‌ها افزوده می‌شود. باتوجه به شکل (۷)، دبی خروجی از هیچ کدام از سدها از حداکثر ظرفیت دبی تخلیه درجه‌های آن‌ها بیشتر نیست و این یعنی کنترل‌کننده پیش‌بین با کنترل میزان تخلیه در طی مدت زمانی مناسب قبل از بارش، از تخلیه یکباره که منجر به رهاسازی دبی زیادی می‌شود جلوگیری می‌نماید. این موضوع در زمینه کنترل اتوماتیک سیلاب بسیار حائز اهمیت است. به ازای افق پیش‌بینی بلندمدت، حداکثر دبی خروجی از مخازن مقدار قابل قبولی دارد و با رهاسازی



احداث شده در سدها، بسیار مهم است و باعث تداخل در برنامه کاری نیروگاهها نمی‌شود. بنابراین با لحاظ افق پیش‌بینی مناسب و ایجاد ظرفیت مناسب عملکردی در واکنش به بارش‌های آتی، عملکرد واقعی و کارایی مطلوب کنترل پیش‌بین در کنترل سیلاب و مدیریت سیستم آبی نشان داده می‌شود.

رفتار متلاطم و نامطلوب حاصل در کنترل پیش‌بین با افق کوچک به دلیل افق پیش‌بینی ناکافی اتفاق می‌افتد و در عین حال استفاده از کنترل پیش‌بین همچنان سعی در مراقبت از محدودیت‌ها دارد. سناریوی شبیه‌سازی با افق کوچک در واقع نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های دیگر که توانایی پیش‌بینی و مدیریت محدودیت‌ها را ندارند، ناکام مانده و سیلاب بر عملکرد آن‌ها غلبه خواهد کرد. نتایج این شبیه‌سازی و تداوم رفتارهای نوسانی خروجی همچنین نشان از امکان ناپایداری دینامیکی عملکرد سدها دارد که با افزایش زمان شبیه‌سازی‌ها می‌تواند خود را نشان داده و سرریزها و سیلاب‌های متناوب حتی مدت‌ها بعد از اتمام بارش و عواقب غیرقابل جبرانی را باعث شود. این در حالی است که در افق پیش‌بینی بلندمدت، دبی خروجی سدها تقریباً از روز ششم - یعنی اولین زمانی که پیش‌بینی سیلاب وارد افق پیش‌بینی می‌شود - شروع به افزایش می‌کند. بدین ترتیب با رسیدن به زمان وقوع سیلاب، با توجه به ظرفیت ایجاد شده در مخازن، تراز سطح آب برای هیچ‌کدام از سدها حتی به محدوده مجاز نزدیک نمی‌شود و این مدیریت برای سدهای پایین‌دستی و کم‌حجم بسیار مهم است.

این مقایسه به مقایسه کنترل دستی و کنترل اتوماتیک مناسب قابل توسعه است. به این صورت که مشابه کنترل با افق پیش‌بین کوتاه، در کنترل دستی تصمیم‌گیری‌های دقیق برای کنترل و بازگرداندن وضعیت سدها به حالت عادی نیز در ادامه با مشکلاتی همراه است. لذا کنترل اتوماتیک با قابلیت پیش‌بینی به ازای افق مناسب این مزیت را نسبت به حالت دستی دارد تا علاوه بر پیشگیری به‌موقع از صدمات احتمالی ناشی از وقوع سیلاب، مدیریت صحیحی را نیز بر ذخایر با ارزش آبی داشته و از خطاهای انسانی و محاسبات نادقیق تا حد امکان دوری جست. نتایج حاصل در این پژوهش و نقش کنترل پیش‌بین در ایجاد ظرفیت مخازن در فرصت مقتضی برای جلوگیری از سرریز شدن سدها و سیلابی شدن رودخانه در اثر بارش شدید، با نتایج پژوهش‌های دیگر مبتنی بر کنترل پیش‌بین سیلاب از جمله [۱۰، ۱۴، ۱۵ و ۱۹] همخوانی داشته و موفق عمل می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی روش‌های نوین کنترل اتوماتیک و بلادرنگ سیلاب مبتنی بر کنترل پیش‌بین و نمونه‌های موفق پیاده‌سازی شده در جهان، ضرورت و امکان‌سنجی کنترل اتوماتیک سیلاب در ایران مورد بررسی قرار گرفته و زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی این روش‌ها برای حوزه آبخیز کارون و دز بررسی شده است. نتایج نشان داد که:

۱- روش‌های کنترل سیلاب مرسوم در سیستم‌های مخازن چندمنظوره در ایران که بر اساس تصمیمات فردی کاربرها در ایستگاه‌های کاری یارانه‌ای انجام می‌گیرد قابل‌اعتماد نبوده و امکان تبدیل تهدید سیلاب به فرصت بهره‌وری از آن را فراهم نمی‌کنند.

۲- در سیستم کنترل اتوماتیک سیلاب پیشنهادی در این پژوهش، به کمک سیستم پشتیبانی از تصمیم، با ارائه یک برنامه زمان‌بندی بهینه و با لحاظ پیش‌بینی‌های آتی بارش-رواناب حوزه آبخیز و جریان‌های ورودی نامعین، محدودیت‌های فیزیکی، عملیاتی و ایمنی سیستم آبی، میزان و زمان باز و بسته شدن به‌موقع و هوشمند سازه‌های هیدرولیکی که به‌وسیله MPC کنترل می‌شوند، تعیین می‌شود.

۳- هدف کنترلی کنترل بلادرنگ و برخط تراز سطح آب مخازن (حجم مطلوب و ایمن ذخیره‌سازی) و تراز سطح آب رودخانه (سطح مطلوب و ایمن) با رویکرد کنترل اتوماتیک سیلاب مبتنی بر MPC به خوبی محقق می‌شود. بنابراین، عملکرد مخازن چندمنظوره بالادست حوزه آبخیز رود کارون و دز طوری تعیین می‌شود که سیلاب در پایین‌دست، مخصوصاً نواحی پایین‌دست سد گتوند، به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد.

۴- رویکرد مدیریت اتوماتیک سطح مطلوب موسوم به مدیریت ورودی مرجع [۱، ۲، ۳ و ۲۱]، نیز می‌تواند از طریق تغییر مجازی و موقت سطح مطلوب مخازن در بهبود عملکرد کنترل‌کننده مفید واقع شود که در تحقیقات آتی مورد نظر قرار خواهد گرفت.

## تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی و بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است.

## منابع

1. Aghaei, S., Daeichian, A., & Puig, V. (2020). Hierarchical Decentralized Reference Governor using Dynamic Constraint Tightening for Constrained Cascade Systems. In Journal of the Franklin Institute (Vol. 357). <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.09.040>.
2. Aghaei, S., Sheikholeslam, F., Farina, M., & Scattolini, R. (2013). An MPC-based reference governor approach for offset-free control of constrained linear systems. International Journal of Control, 86(9), 1534-1539. <https://doi.org/10.1080/00207179.2013.789142>.
3. Ahmadzadeh, H. R., Aghaei, S., & Puig, V. (2023). A supervisory control scheme for uncertain constrained time-delay discrete-time linear systems. Journal of the Franklin Institute, 360(13), 10337-10364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j>

article\_86132.html (In Persian).

13. Horváth, K., Galvis, E., Rodellar, J., & Valentín, M. G. (2014). Experimental comparison of canal models for control purposes using simulation and laboratory experiments. *Journal of Hydroinformatics*, 16(6), 1390–1408. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.110>.
14. Lin, N. M., Rutten, M., & Tian, X. (2018). Flood mitigation through optimal operation of a multi-reservoir system by using model predictive control: A case study in Myanmar. *Water (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101371>.
15. Lin, N. M., Tian, X., Rutten, M., Abraham, E., Maestre, J. M., & van de Giesen, N. (2020). Multi-objective model predictive control for real-time operation of a multi-reservoir system. *Water (Switzerland)*, 12(7), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w12071898>.
16. Litrico, X., & Fromion, V. (2004). Analytical approximation of open-channel flow for controller design. *Applied Mathematical Modelling*, 28(7), 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2003.10.014>.
17. Puig, V., Ocampo-Martinez, C., Romera, J., Quevedo, J., Negenborn, R., Rodríguez, P., & De Campos, S. (2012). Model predictive control of combined irrigation and water supply systems: Application to the Guadiana River. *Proceedings of 2012 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2012*, 85–90. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2012.6204896>.
18. Puig, V., Romera, J., Quevedo, J., Cardona, C. M., Salterain, A., Ayesa, E., Irizar, I., Castro, A., Lujan, M., Charbonnaud, P., Chiron, P., & Trouvat, J. L. (2009). Optimal predictive control of water transport systems: Arrêt- Darré/Arros case study. *Water Science and Technology*, 60(8), 2125–2133. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.525>
19. Romera, J., Ocampo-Martinez, C., Puig, V., & Quevedo, J. (2013). Flooding management using hybrid model predictive control: Application to the Spanish Ebro River. *Journal of Hydroinformatics*, 15(2), 366–380. <https://doi.org/10.2166/hydro.2012.164>
20. Wong, T. S. (2001). Formulas for time of travel in channel with upstream inflow. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6, 416–422.
21. Zare, I., Aghaei, S., & Puig, V. (2020). A Supervisory Active Fault Tolerant Control Framework for Constrained Linear Systems. *2020 European Control Conference (ECC)*, 2027–2032. <https://doi.org/10.23919/ECC51009.2020.9143801>.
22. jfranklin.2023.07.025
23. Castelletti, A., Ficchi, A., Cominola, A., Segovia, P., Giuliani, M., Wu, W., Lucia, S., Ocampo-Martinez, C., De Schutter, B., & Maestre, J. M. (2023). Model Predictive Control of water resources systems: A review and research agenda. *Annual Reviews in Control*, 55, 442–465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.013>
24. Chen, J., Guo, S., Li, Y., Liu, P., & Zhou, Y. (2013). Joint Operation and Dynamic Control of Flood Limiting Water Levels for Cascade Reservoirs. *Water Resources Management*, 27(3), 749–763. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0213-z>.
25. Ashrafi, S. M., & Mahmoudi, M. (2019). Developing a semi-distributed decision support system for great Karun water resources system. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 6(1), 16–24.
26. Chiang, P. K., & Willems, P. (2015). Combine Evolutionary Optimization with Model Predictive Control in Real-time Flood Control of a River System. *Water Resources Management*, 29(8), 2527–2542. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0955-5>.
27. Clemmens, A. J., Tian, X., van Overloop, P.-J., & Litrico, X. (2017). Integrator Delay Zero Model for Design of Upstream Water-Level Controllers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(3), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jir.1943-4774.0000997](https://doi.org/10.1061/(asce)jir.1943-4774.0000997).
28. Ficchi, A., Raso, L., Dorchie, D., Pianosi, F., Malaterre, P.-O., Van Overloop, P.-J., & Jay-Allemand, M. (2016). Optimal Operation of the Multireservoir System in the Seine River Basin Using Deterministic and Ensemble Forecasts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(1), 05015005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000571](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000571).
29. Gong, Y., Liu, P., Cheng, L., Chen, G., Zhou, Y., Zhang, X., & Xu, W. (2020). Determining dynamic water level control boundaries for a multi-reservoir system during flood seasons with considering channel storage. *Journal of Flood Risk Management*, 13(1), 1–17. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12586>.
30. Gbadega, P. A., & Sun, Y. (2022). A hybrid constrained Particle Swarm Optimization-Model Predictive Control (CPSO-MPC) algorithm for storage energy management optimization problem in micro-grid. *Energy Reports*, 8, 692–708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.035>
31. Javansalehi, M., Zarghami, M., & Keighobadi, J. (2019). Utilization of Model Predictive Control to Improve Optimization – Simulation Models for Managing Water Transfer Systems: Case Study of Zarinehrood Water Transfer Line to Tabriz. *Iran-Water Resources Research*, 15(4), 18–34. <http://www.iwrr.ir/>

## Dynamic Modeling of Water System and Predictive Flood Control in Karun and Dez Catchment Basins

Sh. Aghaei<sup>1\*</sup>, M. Zamani<sup>2</sup>, M. Vaselnia<sup>3</sup>, Gh. Moradi<sup>4</sup> and V. Puig<sup>5</sup>

Received: 24-01-2023

Accepted: 15-05-2023

### Abstract

Automatic flood control approach can prevent dam overtopping and downstream flooding. Doing so, in addition to controlling the optimal storage capacity, flood threats will turn into opportunities for water resources systems. Model-based Predictive Control (MPC), can take the future predicted rainfall runoff, physical and operational constraints, and safety limitations of the water system into account. In a suitable timeframe before destructive floods, MPC creates essential and optimal capacity in the dam's reservoir to contain floods. In this research, water system modeling method is studied by a control-oriented approach, and the flood automatic control operation using a model predictive control approach. To this end, modeling of the Karun and Dez river system containing six reservoir dams is considered as the case study to model and simulate under the designed MPC. The state space model will extract to design and apply the predictive controller for two scenarios of prediction horizon (10 days and eight hour) in MATLAB software. The results will show that enough long prediction horizon gives the controller enough time to create the necessary capacity for flood control according to the system constraints, while a short prediction horizon, similar to other controllers without predicting, does not have an effective performance.

**Keywords:** *Automatic flood control, Model predictive control, System analysis, Water systems.*

1. Corresponding Author and Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. Email: aghaei@yazd.ac.ir; Center for International Scientific Studies and Collaboration (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.

2. M.Sc. student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

3. Graduated of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

4. Associate Professor, Department of Environmental Science, School of Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.

5. Professor, Department of Electrical Engineering, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain.