



How Much Information on Future Streamflows is Utilizable in Design and Operation of Dam Reservoirs?

E. Jahani¹ and S.J. Mousavi^{2*}

Abstract

The problem of analyzing the storage-yield-reliability of surface water reservoirs is a classical problem in water resources engineering. This study explores the effect of the horizon of foresight on future inflows on the minimum reservoir capacity required for meeting a specified yield. The problem was formulated as mixed integer linear programs (MILP). We analyzed the role of perfect foresight assumption on future inflows by formulating the problem as a series of finite-horizon mixed integer linear programs (MILPs), each with a limited, partial foresight. The MILPs were then solved sequentially over a long-run planning horizon for determining the minimum reservoir capacity required for meeting a specified reservoir yield at a certain level of reliability. Although it was generally true that the required reservoir capacity will increase if the foresight on future inflows becomes more limited, the study showed that an opposite result was also possible, depending on the characteristics and hydrology of the system. Moreover, after a certain level of foresight horizon, knowing about the future inflows does not help to get a lower required reservoir capacity. These findings provide insight into the issue of uncertainty of future inflows and their forecasts in design and operation of water reservoir systems.

Keywords Perfect foresight, Partial foresight, Reliability, Reservoir capacity.

Received: October 24, 2016

Accepted: January 3, 2017

تا چه مقدار اطلاع از آینده جریان رودخانه در طراحی و بهره‌برداری از مخازن سدها قابل برنامه‌ریزی است؟

الهه جهانی^۱ و سیدجمشید موسوی^{۲*}

چکیده

ارزیابی تأثیر طول دوره دوربینی از آوردهای آینده رودخانه بر حداقل ظرفیت مخزن مورد نیاز برای تأمین بده‌آب معلوم از مخزن در سطح اعتمادپذیری مشخص موضوع این تحقیق است. این مساله را می‌توان در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP) با سری معلوم از آورد رودخانه فرمول بندی کرد. حل این مدل با سری زمانی بلندمدت با N گام زمانی، نماینده جواب متناظر با اطلاع کامل از آورد رودخانه در افق N گام زمانی آینده می‌باشد. چنانچه طول سری زمانی فوق به $n = \frac{N}{m}$ بازه زمانی تقسیم و n مدل MILP پیاپی، هر یک با m گام زمانی، حل شود، بزرگ‌ترین ظرفیت مخزن به‌دست‌آمده از این n مدل، جواب همین مساله در شرایط اطلاع محدود و نسبی m -ماهه از آوردهای آینده خواهد بود. در این مقاله با مقایسه جواب‌های (ظرفیت مخزن) حاصل از حل مدل‌های فوق در شرایط اطلاع کامل (perfect) و محدود (limited) از آینده جریان، تأثیر طول دوره دوربینی و سطح اعتمادپذیری تأمین نیاز آبی بر ظرفیت مخازن سدها ارزیابی و کمی شده است. همچنین ارتباط این عوامل با پارامترهای مؤثر از جمله نسبت ظرفیت فعال مخزن (Ka) به متوسط جریان ورودی سالانه (μ_Q) و نسبت حداقل نیاز یا بده مطمئن (r_{min}) به μ_Q تحلیل حساسیت شده است. نتایج نشان می‌دهد گرچه با کاهش افق دوربینی، ظرفیت مورد نیاز مخزن افزایش می‌یابد، عکس این نتیجه نیز در برخی شرایط بسته به هیدرولوژی جریان رودخانه و موقعیت دوره‌های خشک در سری جریان محتمل است. همچنین ظرفیت استفاده از آگاهی و اطلاع نسبت به آینده محدود است و از یک افق دوربینی به بعد، آگاهی از آینده دورتر به برنامه‌ریزی برای کاهش بیشتر ظرفیت مورد نیاز مخزن کمک نمی‌کند.

کلمات کلیدی: جریان آینده ورودی به مخزن، دوربینی کامل و نسبی، ظرفیت مخزن، اعتمادپذیری بده مخزن.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۸/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۱۴

1- Former MSc. Student of Water Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: jmosavi@aut.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه

صنعتی امیرکبیر

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

تحلیل ذخیره- بده آب- اعتمادپذیری (SYR) [۱] به منظور طراحی و بهره‌برداری از مخازن سدها یکی از مسائل کلاسیک مهندسی منابع آب است که سابقه آن به شروع استفاده از روش‌های تحلیل سیستم در اوایل دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد. این مسأله در مرحله طراحی به معنی تخمین کمترین ظرفیت مخزن مورد نیاز برای تأمین بده آب معین از آن در سطح اعتمادپذیری مشخص، و در مرحله بهره‌برداری به معنی تعیین حداکثر بده آب قابل استحصال از مخزنی با ابعاد و ارتفاع معلوم در سطح اعتماد معین است (Mousavi et al., 2014). این مسأله یک مسأله تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت هیدرولوژیکی (آورد رودخانه) می‌باشد که در قالب مدل‌های تحلیل سیستم (شبیه‌سازی و بهینه‌سازی) طراحی و بهره‌برداری از مخزن قابل فرمول‌بندی است. هرکدام از این مدل‌ها ویژگی خاص خود را دارند که با توجه به مزایا و کاستی‌های خود و نیز پیچیدگی مسأله به کار گرفته می‌شوند.

ساده‌ترین رویکرد در حل مسأله فوق استفاده از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی و بر اساس سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) [۲] می‌باشد. این روش بدون استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توسط محققین مختلفی مورد توجه قرار گرفته است (Loucks et al., 1981; Simonovic, 1987). در این نوع از سیاست بهره‌برداری اگر میزان آب در دسترس (مجموع ذخیره‌ی موجود و جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی مورد نظر) از مقدار نیاز آبی کمتر باشد، تمام آب موجود از مخزن رها می‌شود. از طرف دیگر چنانچه میزان آب موجود در هر دوره بیش از نیاز باشد، آب اضافی تا زمانی که مخزن پر شود، در مخزن ذخیره خواهد شد و پس از آن آب اضافی سرریز می‌شود. در این رویکرد تأمین نیاز هر دوره با توجه به آب موجود در همان دوره محقق می‌شود. به عبارت دیگر رهاسازی از مخزن به صورت تابعی از مجموع آب ذخیره شده‌ی موجود در مخزن و جریان ورودی در همان دوره تعریف می‌شود. بنابراین پیش‌بینی جریان ورودی آینده به مخزن در تعیین میزان رهاسازی از مخزن نقشی ندارد (Vedula and Mujumdar, 2005).

مسأله برنامه‌ریزی بهره‌برداری و طراحی مخازن سدها با توجه به عدم قطعیت موجود در جریان‌های ورودی به آن‌ها اساساً مسأله‌ای تحت شرایط عدم قطعیت و یک مسأله احتمالاتی است. به همین دلیل روش‌های بهینه‌سازی احتمالاتی یا استوکستیک صریح (ESO)

[۳] از دیگر رویکردهای قابل استفاده برای حل مسأله می‌باشند. در این رویکرد عدم قطعیت در سری جریان‌های ورودی به مخزن در آینده از گذر استفاده از توابع احتمالاتی جریان رودخانه به شکل مستقیم و صریح مدل می‌شود. علیرغم آن کاربرد این روش‌ها مستلزم مواجهه با مشکلات و پیچیدگی‌های مختلف، از جمله ضرورت تبدیل قیود احتمالاتی به معادل معین و قطعی این قیود در حضور متغیرهای تصادفی متعدد و هم‌بسته، می‌باشد (Yeh, 1985; Reznicek and Cheng, 1991). در این راستا یکی از معروف‌ترین روش‌ها بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پویای استوکستیک (SDP) [۴] است که عمدتاً بر حل مسأله در مرحله بهره‌برداری و نه طراحی تکیه دارد و علاوه بر آن، با افزایش تعداد مخازن دچار مشکل یا نفرین ابعادی می‌شود (Loucks et al., 1981; Vedula and Mujumdar, 2005). مجموعه پیچیدگی‌ها و مشکلات فوق موجب شده است که همچنان شکاف میان پیشرفت‌های نظری و پیاده‌سازی این روش‌ها در دنیای واقعی موجود باشد (Celeste and Billib, 2009).

در اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ مدل‌های بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی (ISO) [۵] مطرح شد (Simonovic, 1987) که از آن جمله می‌توان به کارهای یانگ اشاره کرد (Young, 1967). در این روش مدل‌های شبیه‌سازی و یا بهینه‌سازی تحت سناریوها و نمونه‌های مختلف و متعدد از فرایند آبدی رودخانه حل می‌شوند. یانگ در مطالعاتش از برنامه‌ریزی پویا برای بهره‌برداری سالانه از مخازن استفاده کرد. پس از آن افرادی همچون جتمار و یانگ (Jettmar and Young, 1975)، کارآموز و هاک (Karamouz and Houck, 1982) و کیم و هئو (Kim and Heo, 2000) به گسترش و تکمیل تحقیقات ارائه شده در این رابطه پرداختند. با وجود پیشرفت در کاربرد روش‌های احتمالاتی صریح، مدل‌های بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی (ISO) کماکان از جذابیت ویژه‌ای در تحلیل سیستم‌های منابع آب و مخازن سدها برخوردارند (Draper and Lund, 2001). مدل‌های ISO، از سناریوهای متعدد از جریان‌های ورودی تاریخی یا مصنوعی به‌عنوان داده‌های ورودی به یک مدل بهینه‌سازی معین استفاده می‌شود (Dembo, 1991; Lund, 1994; Lund, 1995; Jettmar and Young, 1975). در این شرایط، یک سری به اندازه کافی طولانی از آورد رودخانه و جریان ورودی به مخزن، نماینده‌ای از سناریوهای متعدد یکساله فرایند تصادفی جریان ورودی به مخزن خواهد بود.

اعمال سیاست بهره‌برداری [۷]، فرمول‌بندی خواهد شد. در ادامه روش‌شناسی ارزیابی تأثیر دوربینی کامل و نسبی نسبت به جریان‌های آینده بر مساله تحلیل ذخیره- بده آب- اعتمادپذیری با استفاده از مدل‌های MILP تبیین شده و نتایج حاصل عرضه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ذخیره- آبدی- اعتمادپذیری

مساله تحلیل ذخیره- آبدی- اعتمادپذیری مخازن سدها را می‌توان در قالب مدل بهینه‌سازی مقید به شانس (CC) [۸] زیر فرمول‌بندی کرد (Mousavi et al., 2014):

$$\text{Min } K \quad (1)$$

Subject to:

$$S_{m+1} = S_m + Q_m - r_m \quad (2)$$

$$\Pr[r_m \geq r_{\min,m}] \geq \alpha_1 \quad (3)$$

$$\Pr[r_m \leq r_{\max,m}] \geq \alpha_2 \quad (4)$$

$$\Pr[S_m \geq S_{\min,m}] \geq \alpha_3 \quad (5)$$

$$\Pr[S_m \leq K - FCV_m] \geq \alpha_4 \quad (6)$$

در این مدل K ظرفیت مخزن، m اندیس دوره زمانی (به عنوان مثال ماه)، Q_m جریان ورودی تصادفی به مخزن، r_m میزان رهاسازی از مخزن و S_m حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره m می‌باشد. همچنین $S_{\min,m}$ و FCV_m به ترتیب حداقل میزان ذخیره و حجم کنترل سیلاب است. $r_{\min,m}$ و $r_{\max,m}$ نیز حداقل و حداکثر میزان رهاسازی از مخزن می‌باشند. در نهایت $\alpha_{1,m}$ تا $\alpha_{4,m}$ به ترتیب سطوح اعتمادپذیری برآورده شدن قیود احتمالاتی تامین بده آب (نیاز آبی)، حداکثر رهاسازی، حجم ذخیره حداقل و حداکثر مخزن است.

به منظور حل مدل در قالب یک مدل احتمالاتی ضمنی، جریان ورودی به مخزن را در طی چند سال به‌عنوان داده ورودی در نظر می‌گیریم. در این صورت، جریان در سال y ام و در ماه m ام به‌صورت $Q_{m,y}$ نشان داده می‌شود. به همین ترتیب دیگر پارامترهای مدل نیز تغییر می‌کنند. بنابراین برای تک‌تک ماه‌ها و در طول سال‌های مختلف پیای مدل و قیود مربوطه حل می‌شوند.

چنانچه تنها قید حداقل رهاسازی (قید ۳) به صورت احتمالاتی در نظر گرفته شود و با در نظر گرفتن اعتمادپذیری تامین بده آب به شکل میانگین بلندمدت و نه فصلی، فرمول‌بندی معادل معین مدل

حل یک مدل بهینه‌سازی قطعی و معین بر اساس سری جریان بلندمدت به‌عنوان ورودی مدل، مستلزم پیش فرض دوربینی و اطلاع کامل [۶] از آورد در واقعیت تصادفی و غیرقطعی رودخانه در آینده است. در این سری هر سال از آمار تاریخی یا مصنوعی یک نمونه محقق شده از فرآیند تصادفی آورد سالانه رودخانه همراه با تغییرات فصلی آن است. این پیش‌فرض ممکن است موجب یک برآورد غیرواقعی و مبتنی بر خوش‌بینی از ظرفیت مورد نیاز مخزن شود؛ چرا که در این مدل بهینه‌سازی (مدل نماینده یک بهره‌بردار ایده‌آل است) از همان ابتدای گام زمانی اول، از افزایش و کاهش جریان ورودی به مخزن تا انتهای سری زمانی اطلاع دارد و زمان‌های وقوع سال‌های خشک و مرطوب را دانسته فرض می‌کند. مثلاً در یک سری زمانی ماهانه ۵۰- ساله، مدل در همان ابتدای ماه اول از تمام ۶۰۰ ماه جریان آینده اطلاع کامل دارد، در این صورت میزان ذخیره و رهاسازی از مخزن در تمامی ماه‌ها با فرض اطلاع کامل از آینده جریان ورودی به مخزن از ابتدا تا انتهای دوره تعیین و تنظیم می‌شود. بنابراین حداکثر استفاده از این امکان را در کاهش ظرفیت مخزن خواهد کرد. در این شرایط قبل از دوره‌های پرآب، ذخیره‌ی آب کاهش و در مقابل، پیش از دوره‌های خشک این ذخیره افزایش می‌یابد. دراپر و لاند (Draper and Lund, 2001) به بررسی تأثیر دوربینی کامل و محدود کردن طول دوره‌ی دوربینی در مدل‌های بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی (ISO) پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که میزان کمبودها و هزینه‌ها در مدل‌های با دوربینی کامل از میزان آورد رودخانه‌ها نسبت به مدل‌های با دوربینی کوتاه‌تر، کمتر تخمین زده می‌شود. بنابراین با محدود کردن طول دوره‌ی دوربینی، ظرفیت مخزن مورد نیاز برای تامین نیاز ثابت افزایش خواهد یافت.

مساله‌ی دوربینی کامل و محدود و تأثیر آن بر جواب مدل‌های مقید به شانس (مدل‌های با محدودیت‌های احتمالاتی) گرچه تا حدودی در سوابق گذشته از جمله مطالعه دراپر و لاند (Draper and Lund, 2001) مطرح شده است، هنوز مطالعه‌ی جامعی روی این موضوع مهم انجام نشده است. مهم‌تر آنکه در این زمینه استفاده از روش‌های سیستماتیک برای کمی‌سازی اثرات آن کمتر مشاهده می‌شود. بنابراین در این تحقیق این موضوع مهم در قالب بررسی درجه تأثیر طول دوره‌ی دوربینی و سطح اعتمادپذیری تأمین نیاز آبی بر ظرفیت بهینه مخزن در تحلیل ذخیره-آبدی- اعتمادپذیری مورد توجه قرار گرفته است. این مساله با استفاده از روش بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی و از گذر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با متغیرهای دو مقدره (MILP)، در قالب نوع ضمنی از یک مدل بهینه‌سازی استوکستیک صریح مقید به شانس و بدون

احتمالاتی مقید به شانس فوق به منظور طراحی بهینه سیستم مخزن به شکل زیر خواهد بود (Mousavi et al., 2014):

Min K

Subject to:

$$r_{m,y} \geq r_{\min,m} \cdot z_{m,y}^{\min} \quad \forall m = 1, \dots, T; \forall y = 1, \dots, N$$

$$\frac{\sum_{y=1}^N \sum_{m=1}^T z_{m,y}^{\min}}{N \cdot T} \geq \alpha \quad (8)$$

$$r_{m,y} \leq r_{\max,m} \quad \forall m = 1, \dots, T; \forall y = 1, \dots, N \quad (9)$$

$$s_{m,y} \geq s_{\min,m} \quad \forall m = 1, \dots, T; \forall y = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$s_{m,y} \leq (K - FCV_m) \quad \forall m = 1, \dots, T; \forall y = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$s_{m+1,y} = s_{m,y} + q_{m,y} - r_{m,y} \quad \forall m = 1, \dots, T; \forall y = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$s_{1,y+1} = s_{m,y} + q_{m,y} - r_{m,y} \quad \forall m = T; \forall y = 1, \dots, N - 1 \quad (13)$$

$$s_{1,1} = s_{m,y} + q_{m,y} - r_{m,y} \quad \forall m = T; \forall y = N \quad (14)$$

مدل فوق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP) با متغیرهای دو مقداره به منظور تعیین کمینه ظرفیت مخزن آب سطحی برای تامین نیازهای فصلی و معلوم آبی $r_{\min,m}$ در سطح اعتماد α می‌باشد. در این مدل N تعداد سال‌ها (افق زمانی) مساله است. زمانی که سری زمانی جریان ورودی ($q_{m,y}$) در طی N سال به‌عنوان داده ورودی به مدل معرفی می‌شود، مدل با فرض دوربینی کامل از میزان آورد رودخانه در آینده به حل مساله می‌پردازد. در ادامه درجه تأثیر پیش‌فرض اطلاع کامل از جریان‌های آینده بر ظرفیت مخزن و شدت و میزان امکان بهره‌مندی از آن در کاهش این ظرفیت ارزیابی خواهد شد.

۲-۲- الگوریتم کار

در راستای دستیابی به هدف مورد نظر و به عبارتی ارزیابی درجه تأثیر فرض اطلاع کامل از جریان‌های آینده بر ظرفیت مخزن و شدت و میزان بهره‌مندی از آن در کاهش این ظرفیت، می‌بایست ظرفیت‌های بدست آمده از مدل MILP ارائه شده در بخش قبل در شرایط دوربینی و اطلاع کامل و نسبی از جریان‌های آینده برآورد و مقایسه شوند.

فرض کنید طول دوره‌ی بهره‌برداری از طرح و به عبارتی عمر مفید طرح همان ۵۰ سال باشد؛ علیرغم آن در شرایط اطلاع محدود و نسبی از آینده جریان می‌خواهیم مدل بهینه‌سازی از همان ابتدای دوره‌ی اول نسبت به جریان تمام آینده ۵۰- ساله خود اطلاع نداشته باشد. بنابراین طول دوره‌ی اجرای مدل همان ۵۰ سال باقی خواهد ماند، ولی اجرای مثلاً ۵ مدل ۱۰- ساله پیاپی و پشت سر هم بدین معنی است که در هر یک از مدل‌های ۱۰- ساله، مدل بهینه‌سازی صرفاً از جریان‌های ۱۰ سال بعد (و نه ۵۰ سال بعد) اطلاع خواهد داشت. به همین شکل اجرای ۵۰ مدل تک- ساله پیاپی بدین معنی است که ضمن حفظ افق برنامه‌ریزی ۵۰- ساله، افق دوربینی نسبت به جریان‌های آینده در هر یک از مدل‌های تک- ساله به یک سال محدود شده است. به عبارت دیگر مفهوم پیش‌آگاهی یا دوربینی نسبی [۹] با این روش پیاده‌سازی و شبیه‌سازی خواهد شد.

با توجه به مطالب فوق یک سری مصنوعی ۵۰- ساله از جریان‌های مستقل ماهانه ورودی به مخزن با فرض توزیع نرمال با در نظر گرفتن اطلاعات هیدرولوژیکی موجود در جدول ۱ ساخته می‌شود. سپس سری مذکور به سناریوهای متفاوت (۵ دوره ۱۰- ساله، ۱۰ دوره ۵- ساله، ۲۵ دوره ۲- ساله، ۵۰ دوره ۱- ساله و ...) تقسیم می‌گردد. در ادامه هر دوره‌ی زمانی کوتاه شده، به‌صورت جداگانه به منظور یافتن ظرفیت بهینه مورد نیاز مخزن به مدل معرفی شده و مدل به شکل پیاپی برای هر دوره اجرا و حل می‌شود. نهایتاً از بین ظرفیت‌های مخزن بدست آمده برای هر سری محدود شده، بزرگ‌ترین عدد به‌عنوان ظرفیت مورد نیاز مخزن در کل دوره انتخاب خواهد شد. به عنوان مثال در تقسیم‌بندی دوره ۵۰- ساله به ۲۵ دوره‌ی ۲- ساله، هر یک از سری دوره‌های ۲- ساله به ترتیب و به‌صورت مجزا به عنوان ورودی به مخزن، در مدل استفاده می‌شود و مدل بهینه‌سازی، حداقل ظرفیت مخزن مورد نیاز را برای هر یک از این دوره‌های ۲- ساله برآورد می‌کند. پس از یافتن ظرفیت مخزن برای هر دوره ۲- ساله، بیشینه حجم بدست آمده در میان ۲۵ دوره، ظرفیت بهینه کل دوره‌ی ۵۰- ساله، ولی با اطلاع محدود ۲- ساله از آینده، خواهد بود. قابل ذکر است که در اجراهای پیاپی از مدل‌های MILP ۲- ساله، حجم ذخیره‌ی ابتدای هر دوره برابر با حجم آب موجود در انتهای دوره قبل در نظر گرفته می‌شود. تنها در اولین سری است که حجم ذخیره مخزن ابتدای دوره توسط مدل بهینه‌سازی تعیین می‌گردد.

پس از بررسی تأثیر طول دوره‌ی دوربینی و سطح اعتمادپذیری تأمین نیاز آبی بر ظرفیت مخزن، نسبت به تعدادی از پارامترهای تأثیرگذار

بر عملکرد سیستم مخزن، یعنی نسبت‌های ظرفیت فعال مخزن (ka) (ظرفیت کل مخزن منهای مجموع حجم ذخیره‌ی حداقل و حجم کنترل سیلاب) و حداقل رهاسازی مورد نیاز از مخزن (r_{min}) به میانگین سالانه‌ی جریان ورودی (μ_Q)، تحلیل حساسیت انجام خواهد شد.

۳- نتایج

مدل‌های بهینه‌سازی پیاپی با درجات مختلف از دوربینی نسبی (۱ سال تا ۵۰ سال) به ازای مقادیر مختلف از سطوح اعتمادپذیری براساس اطلاعات و داده‌های ورودی جدول ۱ اجرا شد. نتایج بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است که در آن، ظرفیت مخزن برای شرایط متفاوت از تقسیم‌بندی کل دوره‌ی بهره‌برداری به دوره‌های کوچک‌تر در سطوح اعتمادپذیری میانگین مختلف گزارش شده است. در دوره‌های دوربینی بررسی شده در جدول ۲، دوره‌های ۳، ۴، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۵ و ۳۰-ساله نیز مشاهده می‌شود. این در صورتی است که دوره‌ی کامل ۵۰-ساله به هیچ‌کدام از این اعداد بخش‌پذیر نیست. بنابراین با فرض تکرار سری زمانی ۵۰-ساله، طول بازه آخر نیز با سایر بازه‌ها برابر در نظر گرفته شد.

شکل ۱ تغییرات ظرفیت مورد نیاز مخزن را نسبت به طول دوره‌ی دوربینی در سطوح اعتمادپذیری مختلف نشان می‌دهد. در برخی از سناریوها، پاسخ بدست آمده در حداقل یک دوره‌ی با دوربینی نسبی از کل دوره‌ی برنامه‌ریزی ۵۰-ساله غیرموجه و ناشدنی بوده است. این امر بیانگر نیاز به یک ظرفیت مخزن بی‌نهایت تلقی می‌گردد.

همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۱ دیده می‌شود، با بزرگ‌تر شدن طول دوره دوربینی، ظرفیت مخزن کاهش می‌یابد. این نتیجه قابل انتظار است؛ چرا که طبیعتاً با افزایش افق اطلاع از آینده، مدل

بهینه‌سازی (جایگزین خیره‌ترین بهره بردار) حداکثر استفاده از این دوربینی را خواهد کرد و با برنامه‌ریزی بلندمدت‌تر، ظرفیت مورد نیاز مخزن را تا جای ممکن کاهش خواهد داد. نتیجه بیان شده در حالت کلی صحیح و منطقی است. علیرغم آن در برخی موارد داشتن اطلاع نسبت به آینده از یک حد بیشتر دیگر نمی‌تواند کمکی به بهبود بیشتر شرایط بهره‌برداری از مخزن و در نتیجه کاهش ظرفیت مورد نیاز مخزن نماید. در نتیجه با افزایش افق دوربینی از میزان آورد رودخانه، ظرفیت مورد نیاز مخزن تغییر نخواهد کرد. به بیان دیگر افزایش اطلاع از میزان جریان ورودی در آینده از یک افق دوربینی معین به بعد کمکی در کاهش ظرفیت مخزن مورد نیاز نمی‌کند. همچنین در برخی حالات ممکن است با کاهش افق دوربینی، ظرفیت مخزن کاهش یابد. برای مثال در شکل ۱ در سطح اعتمادپذیری ۱۰۰٪ با افزایش طول دوره دوربینی از ۲/۵- ساله به ۳- ساله، ظرفیت مخزن از ۱۹۸۲۷ به بی‌نهایت افزایش یافته است.

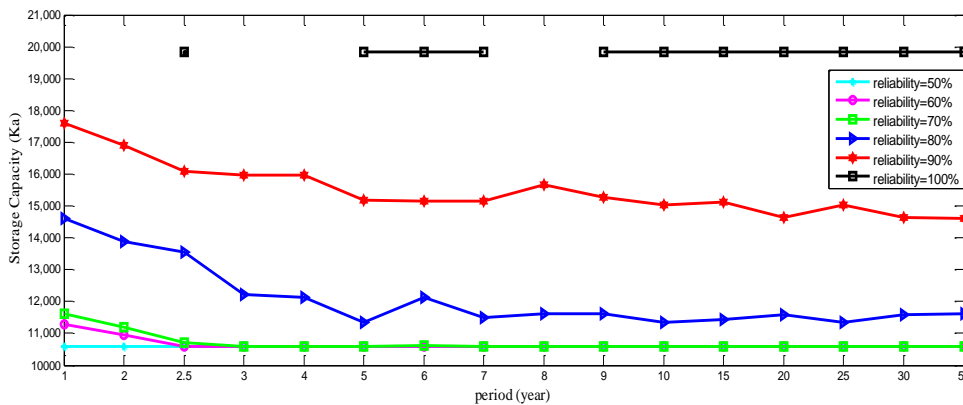
بررسی علت جواب ظاهراً غیرعادی فوق‌گویی این واقعیت است که علاوه بر طول و افق دوره‌ی دوربینی نسبت به آینده، عامل ترتیب و موقعیت دوره‌های خشک در کل سری زمانی هم در ظرفیت مورد نیاز مخزن مؤثر است؛ به‌گونه‌ای که باعث می‌شود حتی برای برخی دوربینی‌های بزرگ‌تر، ظرفیت بیشتری مورد نیاز باشد. در واقع لازم است برای تأمین نیاز در در ماه‌هایی که میزان آورد رودخانه در چند ماه متوالی کاهش می‌یابد، مخزن از چند ماه قبل ذخیره‌سازی را شروع کند. بدین ترتیب هرچه میزان کمبود در ماه‌های خشک بیشتر باشد، میزان پیش‌ذخیره‌سازی و در نتیجه ظرفیت مخزن بزرگ‌تری برای تأمین نیاز و عبور از این دوره‌های خشک مورد نیاز خواهد بود. برای مثال در سطح اعتماد ۱۰۰٪، در آغاز دوره‌ی خشک و شروع تخلیه مخزن اگر تا انتهای دوره خشک مخزن کاملاً تخلیه شود، با شروع دوره‌ی بهره‌برداری بعدی اگر دوره‌ی بعدی نیز با ماه‌های

جدول ۱- اطلاعات هیدرولوژیکی و مشخصات مخزن (واحد تمامی داده‌ها میلیون مترمکعب [TCM] می‌باشد)

ماه	ژانویه	فوریه	مارچ	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
میانگین سالانه جریان ورودی (μ_{Q_t})	۵۳۷۰	۴۱۳۶	۵۲۷۰	۹۸۹۲	۲۰۲۳۰	۱۶۲۰۰	۳۱۵۲	۷۵۳	۵۵۸	۷۶۳	۱۳۳۷	۱۶۴۳
انحراف معیار جریان ورودی (σ_{Q_t})	۱۷۶۵	۱۳۰۶	۱۳۰۲	۳۰۰۶	۶۵۴۸	۵۴۲۰	۱۰۰۸	۲۴۰	۱۷۱	۲۱۲	۴۲۱	۵۱۲
حداقل رهاسازی مورد نیاز از مخزن (r_{min})	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
حداکثر میزان رهاسازی از مخزن (r_{max})	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰
حداقل میزان ذخیره‌سازی (s_{min})	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
حجم کنترل سیلاب (FCV)	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰

جدول ۲- ظرفیت بهینه مخزن در افق‌های دوربینی و سطوح اعتمادپذیری مختلف برای نیاز آبی $(r_{min}=3000)$

Free Policy							
سطوح اعتمادپذیری						$r_{min} = 3000$	$S_{min} = 1500$
۱۰۰٪	۹۰٪	۸۰٪	۷۰٪	۶۰٪	۵۰٪	طول دوره دوربینی	
---	۱۷۶۰۹	۱۴۶۰۹	۱۱۶۰۹	۱۱۲۸۲	۱۰۵۷۸	۱- ساله	
---	۱۶۸۹۱	۱۳۸۹۱	۱۱۱۸۱	۱۰۹۶۰	۱۰۵۷۸	۲- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۶۰۸۵	۱۳۵۶۱	۱۰۷۰۰	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۲/۵- ساله	
---	۱۵۹۷۴	۱۲۲۰۷	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۳- ساله	
---	۱۵۹۷۴	۱۲۱۴۳	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۴- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۱۸۹	۱۱۳۵۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۵- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۱۴۳	۱۲۱۳۳	۱۰۶۲۶	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۶- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۱۴۳	۱۱۵۰۲	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۷- ساله	
---	۱۵۶۷۲	۱۱۶۲۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۸- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۲۸۱	۱۱۶۰۹	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۹- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۰۲۵	۱۱۳۵۳	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۱۳۳	۱۱۴۴۲	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۵- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۴۶۲۸	۱۱۵۹۷	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۲۰- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۵۰۲۵	۱۱۳۵۳	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۲۵- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۴۶۲۸	۱۱۵۹۷	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۳۰- ساله	
۱۹۸۲۷	۱۴۶۰۹	۱۱۶۲۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	دوربینی کامل (دوره ۵۰- ساله)	
۲/۳۱	۱/۴	۰/۸۹	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	نسبت ظرفیت فعال به میانگین آورد $A = ka/\mu_Q$	
۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	نسبت نیاز به میانگین آورد $B = r_{min}/\mu_Q$	



شکل ۱- تغییرات ظرفیت مخزن در افق‌های دوربینی و سطوح اعتمادپذیری مختلف برای نیاز آبی $(r_{min}=3000)$

این امکان برای مدل وجود دارد که در این دوره‌های خشک متوالی نیاز حداقل تأمین نشود و ضرورتاً آب بیشتری از مخزن برداشت نشود. البته تعداد دفعاتی که چنین امکان و انعطافی قابل استفاده و بهره‌برداری است به سطح اعتمادپذیری مجاز و تعداد دفعات قبلی که از این امکان استفاده شده است، بستگی دارد. بنابراین اگر سطح

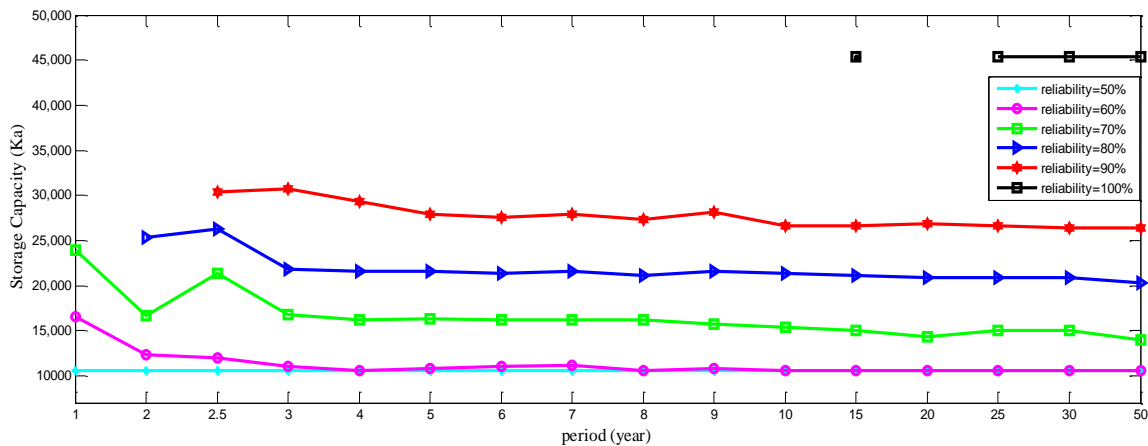
خشک شروع شود، چون مخزن از قبل کاملاً تخلیه شده بوده است نیاز آبی قابل تأمین نیست و به عبارتی برداشت بیشتر از مخزن میسر نخواهد بود. بنابراین مدل دوره‌ی بعد ناشدنی (بدون جواب) خواهد شد. این عامل در سطوح اعتمادپذیری کوچکتر اثر کمتری خواهد داشت؛ چرا که در سطح اعتمادپذیری کوچکتر از ۱، در شرایط فوق

آب کافی در مخزن برای جبران آن نیز وجود ندارد. نتایج ارایه شده همچنین نسبت به دو پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد سیستم ارزیابی شده اند در این ارتباط دو پارامتر A، نسبت ظرفیت فعال مخزن (ka) (ظرفیت بدست آمده در شرایط دوربینی کامل ۵۰- ساله منهای مجموع حجم ذخیره‌ی حداقل (S_{min}) و حجم کنترل سیلاب (FCV)) به میانگین سالانه‌ی جریان ورودی (μ_Q) ($A = ka/\mu_Q$) و B، نسبت حداقل میزان رهاسازی از مخزن یا همان نیاز آبی (r_{min}) به میانگین سالانه‌ی جریان ورودی (μ_Q) انتخاب شده‌اند. این پارامترها به شکل نسبی عملکرد برون‌سالی و درونسالی مخزن را کمی می‌کنند، چراکه موضوع تحت بررسی در این مقاله، یعنی طول دوره و افقی از آینده جریان ورودی به مخزن که پیش‌آگاهی و اطلاع از جریان در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن قابل استفاده است، به این پارامترها وابسته است. جدول ۳ و شکل‌های ۲ و ۳ نمونه‌ای از نتایج بدست آمده را با توجه به حداقل میزان رهاسازی ارایه می‌کنند. در این موارد حداقل میزان رهاسازی از مخزن از ۳۰۰۰ به ۵۰۰۰ واحد افزایش یافته است.

اعتماد به اندازه کافی کوچک باشد (تعداد دوره‌های مجاز شکست بیشتر باشد) و از تمام این دوره‌های شکست مجاز هم در دوره‌های خشک قبل استفاده نشده باشد، مدل دوره‌ی بعد لزوماً ناشدنی و بدون جواب نخواهد شد. بنابراین ضرورتاً یک نقطه پرش در ظرفیت مخزن، مانند آنچه در سطح اعتماد صددرصد توضیح داده شد، رخ نخواهد داد. به عبارت دیگر به دلیل عدم وجود انعطاف‌پذیری در امکان برآورده نکردن نیاز در دوره‌های خشک در سطوح اعتمادپذیری بالاتر (نزدیک به ۱) و موقعیت و توالی این دوره‌ها، سیستم ممکن است در یک دوره برنامه‌ریزی خاص امکان عبور سالم از شرایط نامطلوب خشک را نیابد (مدل بهینه‌سازی ناشدنی و بدون جواب شود)، لیکن در سطوح اعتمادپذیری پایین‌تر سیستم عملاً امکان فرار از شرایط نامطلوب فوق را خواهد داشت؛ چراکه امکان چشم‌پوشی از تأمین نیاز آبی در این دوره‌ها را دارد. به عنوان مثال در اعتمادپذیری ۵۰ درصد با در نظر گرفتن کل دوره‌ی ۵۰- ساله، از مجموع ۶۰۰ دوره زمانی، سیستم می‌تواند در ۳۰۰ ماه نیاز آبی را تأمین نماید و برداشتی از مخزن نداشته باشد. این ۳۰۰ دوره، ماه‌هایی خواهند بود که جریان ورودی به مخزن کم است و ضمناً

جدول ۳- ظرفیت بهینه مخزن در افق‌های دوربینی و سطوح اعتمادپذیری مختلف برای نیاز آبی $(r_{min}=5000)$

Free Policy							
سطوح اعتمادپذیری						$r_{min} = 5000$	$S_{min} = 1500$
۱۰۰٪	۹۰٪	۸۰٪	۷۰٪	۶۰٪	۵۰٪	طول دوره دوربینی	
---	---	---	۲۳۹۸۲	۱۶۵۹۶	۱۰۵۷۸	۱- ساله	
---	---	۲۵۳۵۵	۱۶۷۰۸	۱۲۳۱۲	۱۰۵۷۸	۲- ساله	
---	۳۰۳۵۵	۲۶۲۹۵	۲۱۲۹۵	۱۲۰۱۱	۱۰۵۷۸	۲/۵- ساله	
---	۳۰۷۱۵	۲۱۸۱۵	۱۶۸۱۵	۱۱۰۰۶	۱۰۵۷۸	۳- ساله	
---	۲۹۳۵۳	۲۱۶۲۴	۱۶۱۶۰	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۴- ساله	
---	۲۷۹۱۲	۲۱۶۰۰	۱۶۲۹۵	۱۰۷۶۲	۱۰۵۷۸	۵- ساله	
---	۲۷۵۲۶	۲۱۲۹۵	۱۶۱۶۰	۱۱۰۰۶	۱۰۵۷۸	۶- ساله	
---	۲۷۹۱۲	۲۱۶۲۴	۱۶۱۶۶	۱۱۱۶۰	۱۰۵۷۸	۷- ساله	
---	۲۷۲۷۹	۲۱۱۶۶	۱۶۱۶۰	۱۰۶۰۱	۱۰۵۷۸	۸- ساله	
---	۲۸۲۰۰	۲۱۵۹۹	۱۵۶۸۹	۱۰۷۸۶	۱۰۵۷۸	۹- ساله	
---	۲۶۶۰۰	۲۱۲۹۵	۱۵۳۴۶	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۱۰- ساله	
۴۵۴۰۵	۲۶۶۲۴	۲۱۱۶۶	۱۵۰۲۵	۱۰۶۲۰	۱۰۵۷۸	۱۵- ساله	
---	۲۶۸۱۵	۲۰۹۱۲	۱۴۳۷۴	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۲۰- ساله	
۴۵۴۰۵	۲۶۵۹۹	۲۰۹۱۲	۱۵۰۲۵	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۲۵- ساله	
۴۵۴۰۵	۲۶۳۶۶	۲۰۹۱۲	۱۵۰۲۵	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	۳۰- ساله	
۴۵۴۰۵	۲۶۳۶۶	۲۰۳۵۵	۱۳۹۸۲	۱۰۵۷۸	۱۰۵۷۸	دوربینی کامل (دوره ۵۰- ساله)	
۶/۷۴	۳/۴۴	۲/۴۰	۱/۳۰	۰/۷۱	۰/۷۱	نسبت ظرفیت فعال به میانگین آورد $A = ka/\mu_Q$	
۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	نسبت نیاز به میانگین آورد $B = r_{min}/\mu_Q$	



شکل ۲- تغییرات ظرفیت مخزن در افق‌های دوربینی و سطوح اعتمادپذیری مختلف برای نیاز آبی $(r_{min}=5000)$ 5000

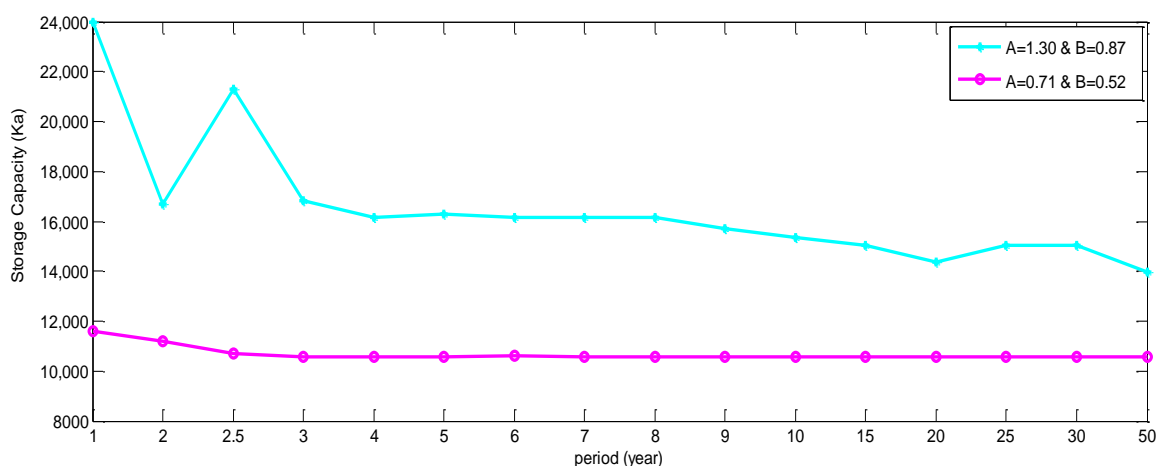
شیب نمودار افزایش می‌یابد. این افزایش با کوتاه شدن طول دوره‌ی دوربینی و برای دوره‌های ۱- ساله و ۲- ساله شدت می‌یابد.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر طول دوره‌ی پیش‌آگاهی یا دوربینی از میزان آورد آینده رودخانه بر ظرفیت بهینه مخزن مورد نیاز برای تأمین نیاز معین در سطح اعتماد مشخص مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مساله تعیین ظرفیت بهینه مخزن در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP) با متغیرهای دو مقداره فرمول‌بندی شد. در ادامه اثر طول دوره و افق اطلاع از جریان‌های آینده بر حجم ذخیره بهینه مخزن با حل مدل‌های MILP با اطلاع محدود و نسبی از آینده میسر شد.

همان‌طور که از جداول و نمودارهای ارائه شده برمی‌آید، با افزایش دو نسبت $A = \frac{ka}{\mu_Q}$ و $B = \frac{r_{min}}{\mu_Q}$ در یک سطح اعتمادپذیری ثابت، حساسیت مدل نسبت به کوتاه شدن طول دوره‌های دوربینی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر شدت تغییرات ظرفیت مخزن همراه با کاهش طول دوره‌ی دوربینی بیشتر می‌شود. هرچه این دو نسبت بزرگتر شوند، محدود کردن طول دوره‌ی دوربینی تأثیر بیشتری بر افزایش ظرفیت مخزن خواهد داشت. در مقابل هر چه این دو نسبت کمتر باشند، کوتاه شدن طول دوره‌ی دوربینی اثر کمتری بر تعیین حجم مخزن خواهد داشت.

شکل ۳ تغییرات ظرفیت مخزن را نسبت به طول دوره‌ی دوربینی برای سطح اعتمادپذیری ثابت ۷۰ درصد به ازای نسبت‌های مختلف A و B نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دو نسبت فوق،



شکل ۳- تغییرات ظرفیت مخزن در برابر طول دوره‌ی دوربینی در سطح اعتمادپذیری ۷۰ درصد در مقادیر مختلف از نسبت‌های A و B

جریان‌های واقعی غیرنرمال و همبسته زمانی اقدام نمود. علیرغم آن روش‌شناسی و نتایج آرایه شده در این تحقیق در افزایش درک بهره‌بردار و تحلیل‌گر سیستم از نقش عدم قطعیت جریان و پیش‌بینی آن در مدل‌های بهره‌برداری و طراحی مخازن سدها حائز اهمیت است.

۵- تشکر و قدردانی

این مقاله نسخه تکمیل و داوری شده مقاله ارائه شده در ششمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران می‌باشد. این کنفرانس در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵ در شهر سنجید برگزار شد.

پی‌نوشت‌ها

- [1] SYR: Storage-Yield-Reliability
- [2] SOP: Standard Operating Policy
- [3] ESO: Explicit Stochastic Optimization
- [4] SDP: Stochastic Dynamic Programming
- [5] ISO: Implicit Stochastic Optimization
- [6] Perfect Foresight: اطلاع کامل
- [7] Free Policy: بدون سیاست بهره‌برداری
- [8] CC: Chance Constrained
- [9] Partial Foresight: دوربینی نسبی

۶- مراجع

- Celeste AB, Billib M (2009) Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Journal of Advances in Water Resources* 32(9):1429-1443
- Dembo RS (1991) Scenario optimization. *Journal of Annals of Operations Research* 30(1):63-80
- Draper AJ and Lund JR (2001) Implicit Stochastic Optimization with Limited Foresight for Reservoir Systems. California: University of California Davis
- Jahani E, Mousavi SJ, Afsharian Zade N, Kim JH (2016) Assessing the role of foresight on future streamflows in storage-yield-reliability analysis of surface water reservoirs. In: Proc. of the 12th International Conference on Hydroinformatics
- Jettmar RU, Young GK (1975) Hydrologic estimation and economic regret. *Journal of Water Resources Research*. 11(5):648-656
- Karamouz M, Houck M.H (1982) Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization. *Journal of Water Resources Research* 18(5):1337-1344

در واقع حل مدل با سری زمانی بلندمدت با N گام زمانی، نماینده جواب متناظر با اطلاع کامل از آورد رودخانه در افق N گام زمانی آینده می‌باشد. در مقابل حل n مدل MILP پیاپی، هر یک با m گام زمانی، و انتخاب بزرگ‌ترین ظرفیت مخزن به دست آمده از این n مدل، جواب مساله در شرایط اطلاع محدود و نسبی m -ماهه از آوردهای آینده خواهد بود.

نتایج نشان داد که با محدود کردن طول دوره‌ی اطلاع نسبت به جریان ورودی به مخزن در آینده، ظرفیت مورد نیاز مخزن برای تأمین نیاز مشخص افزایش می‌یابد. همچنین گرچه در حالت کلی با کوتاه‌تر شدن طول دوره دوربینی ظرفیت مخزن بیشتر می‌شود، روند افزایش ظرفیت مخزن با کاهش افق دوربینی یک روند کاملاً یکنواخت نیست. در این رابطه اولاً از یک سطح معین از اطلاع نسبت به جریان‌های آینده به بعد، دوربینی و اطلاع بیشتر از آینده، ناشی از دیگر محدودیت‌های هیدرولوژیک، قابل استفاده و برنامه‌ریزی نیست. ثانیاً بسته به توالی و طول دوره‌های خشک و موقعت آن‌ها در سری زمانی آورد رودخانه، روند کاهش ظرفیت مورد نیاز مخزن با افزایش دوربینی می‌تواند معکوس گردد.

با بررسی تأثیر سطح اعتمادپذیری در حل مساله چنین نتیجه شد که هرچه سطح اعتمادپذیری تأمین نیاز بزرگ‌تر باشد، کوتاه شدن طول دوره‌ی دوربینی تأثیر بیشتری بر افزایش ظرفیت مخزن خواهد گذاشت. برای مثال در سطح اعتمادپذیری ۹۰ درصد و بالاتر، ممکن است با کاهش دوربینی، به یک مساله با ظرفیت نامحدود مواجه شویم. علت این امر به چگونگی قرار گرفتن، موقعیت، تعداد و بزرگی دوره‌های خشک از یک طرف، و نبود انعطاف در امکان شکست (عدم تأمین نیاز) در این دوره‌ها به سبب سطح اعتماد مورد انتظار بالا از طرف دیگر مربوط می‌شود. این نکته قابل ذکر است که در یک سطح اعتمادپذیری ثابت، با افزایش نسبت حجم فعال مخزن به آورد میانگین (A) و نسبت نیاز آبی به آورد میانگین (B)، حساسیت مدل نسبت به کوتاه شدن طول دوره‌ی دوربینی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب با محدود کردن طول دوره‌ی دوربینی ظرفیت مخزن بزرگ‌تری نسبت به ظرفیت مورد نیاز برای دوربینی کامل، مورد نیاز است.

در نهایت یادآور می‌شود که با توجه به نتیجه بدست آمده در اهمیت موقعت دوره‌های خشک در سری زمانی آورد رودخانه و تأثیر آن بر نتیجه، لازم است ضمن آزاد کردن فرضیات ساده کننده نرمال و مستقل بودن متغیرهای جریان، نسبت به تکمیل این مطالعه برای

- the role of reliability constraints and operating policies. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 28(8):2051-2061.
- Reznicek K, Cheng TCE (1991) Stochastic modeling of reservoir operations. *European Journal of Operations Research*, 50(3):235-248
- Simonovic S (1987) The implicit stochastic model for reservoir yield optimization. *Journal of Water Resources Research* 23(12):2159-2165
- Vedula S, Mujumdar PP (2005) Water resources systems. Tata McGraw-Hill
- Yeh WW-G (1985) Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Research* 21(12):1797-1818
- Young GK (1967) Finding reservoir operation rules. *Journal of Hydraulic Engineering* 91(6):297-321
- Kim T, Heo J-H (2000) Application of implicit stochastic optimization in the Han River basin. In: Proc. of the fourth international conference on hydro science and engineering, Seoul, Korea: Korean Society of Water Resources
- Loucks DP, Stedinger JR, Haith DA (1981) Water resources systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- Lund JR (1994) Operating rules from HEC prescriptive reservoir model results for the missouri river system. Report PR-22, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA
- Lund JR (1995) Preliminary Operating Rules for the Columbia River System from HEC-PRM Results. Report PR-26, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA
- Mousavi SJ, Alizadeh H, Ponnambalam K (2014) Storage-yield analysis of surface water reservoirs: