



A Continuous Solution for Optimal Reservoir Operation Problem Using the Constraint-State Technique

L. Jowkarshorijeh^{1*}, A. Ganji²
and M. Homayounfar³

Abstract

A variety of optimization models have been developed in the last decades to solve complex problems in water resources management. Thought that some of these methods are unreliable and do not improve the water resources management problem in reality, it is thus essential to investigate and compare the capabilities of these models. One of the most general and well-known optimization problems in water resources is the Dynamic Programming (DP) which can be solved using continuous and/or discrete solution approaches. Since the discrete solution techniques is computationally burden and inefficient in complex problems, the continuous solution techniques takes much attention recently. In this paper a continuous solution of dynamic programming model, called Constraint State (CS) method is adopted to solve a problem related to reservoir operation and its results are compared with those obtained from two different discrete solution methods, called DP and SDP methods. The reliability of these techniques for reservoir operation is investigated using a set of reliability indices. The results show that the CS solution method can even improve the reliability of system, as a comparison with the SDP method.

Keywords: Reservoirs, optimization, Constraint State, Reliability, Constraint-State Model.

Received: October 13, 2013

Accepted: April 13, 2014

بهره برداری بهینه از مخزن با استفاده از روش پیوسته محدودیت حالت

لیلا جوکار شوریحجه^{۱*}، آرمان گنجی^۲ و مهران همایون فر^۳

چکیده

مخازن یکی از مهمترین سیستم‌های آبی هستند که امروزه نقش مهمی را در پیشرفت و توسعه اجتماعی و اقتصادی جوامع ایفا می‌کنند. روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از مخازن وجود دارند که عموماً در قالب برنامه‌های پویا (DP) ارائه شده است. اما به طور کلی می‌توان مدل‌های موجود را به دو گروه مدل‌های پیوسته و گسسته تقسیم‌بندی کرد. اخیراً مدل‌های پیوسته متعددی به دلیل مشکلات ابعادی مدل‌های پویا (DP) مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان مدل پویای تصادفی پیوسته محدودیت-حالت (CS) را نام برد. این تحقیق قصد دارد تا مقایسه‌ای را میان کارایی مدل‌های پیوسته و گسسته داشته باشد. برای این منظور مدل پویای تصادفی پیوسته محدودیت-حالت (CS) و مدل‌های گسسته برنامه‌ریزی پویا (DP) و برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP) انتخاب شدند. نمودارهای تغییرات حجم مخزن و مقدار رهایی آب از مخزن و نیاز آبی و همچنین شاخص‌های اعتماد پذیری برای مدل‌های مذکور محاسبه و نتایج بدست آمده از سه مدل با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل از مقایسه شاخص‌های اعتمادپذیری مدل‌ها نشان می‌دهد که در مجموع مدل محدودیت-حالت کارایی بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد.

کلمات کلیدی: مخازن، بهینه‌سازی، اعتمادپذیری، مدل محدودیت-حالت.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۱ مهر ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۴ فروردین ۱۳۹۳

1- M.Sc. Student, Desert Region Management, Shiraz University, Shiraz, Iran.
Email: leyla.jokar@gmail.com

2- Faculty Member, Desert Region Management, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Ph.D Candidate, Malaysia University, Kuala Lumpur, Malaysia
*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مدیریت مناطق بیابانی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- عضو هیئت علمی، بخش مدیریت مناطق بیابانی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه مالزی، کوالالامپور، مالزی

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

مخازن یکی از مهمترین سیستم‌های آبی هستند که امروزه نقش مهمی را در پیشرفت و توسعه اجتماعی و اقتصادی جوامع ایفا می‌کنند. مطالعات منابع آبی، در مرحله طراحی و تعیین حجم مخزن سد و نیز در زمان بهره برداری از سد بسیار با اهمیت است (عظیمی سجادی، ۱۳۸۲). در ۶۰ سال اخیر مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفته و از روش‌های مختلف ریاضی برای یافتن سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن استفاده شده است. با پیشرفت و توسعه کامپیوترها کاربرد و استفاده از مدل‌سازی ریاضی نیز در این زمینه گسترده شده و توسعه یافته است. به طور کلی سیاست‌های بهینه بهره برداری از مخازن می‌توانند به صورت ایستا یا پویا باشند (Loucks et al., 1981). مدل‌ها همچنین به دو صورت قطعی و غیر قطعی جهت تولید سیاست بهره برداری از مخازن و منابع آبی بکار گرفته می‌شود (Yeh, 1985; Kelman et al., 1990; Johnson et al., 1993; Karamouz and Vasiliadis, 1992; Neelakantam and Pundarikanthan, 2000; Huang et al., 2002; Karamouz et al., 2003; Choudhari and Raj, 2010; Manca et al., 2010; Homayounfar et al., 2011; Sreekanth et al., 2012; Yang and Yang, 2013).

Yeh (1985) روش‌های مختلف مورد استفاده در مدیریت مخازن را مورد بررسی قرار داده و از بین روش‌های مورد بررسی، برنامه‌ریزی پویا را مناسب‌تر تشخیص داده است. کاربردهای برنامه‌ریزی پویا برای تحلیل منابع آب همچنین توسط Yakowitz, (1982) به تفصیل مرور شده است. مدل‌های پویا به دو دسته گسسته و پیوسته تقسیم می‌شوند (کارآموز و کراچیان، ۱۳۸۷). در مدل‌های گسسته دو مشکل عمده حافظه و زمان مورد نیاز برای محاسبات در رایانه وجود دارد. این مشکل در مطالعات منابع آب نفرین ابعادی نام گرفته است که ناشی از پیچیدگی مدل‌های پویا می‌باشد (برهانی داریان و احمدی علی آباد، ۱۳۸۳) که البته در شرایطی که تعداد مخازن یا ابعاد مسئله زیاد است، اتفاق می‌افتد. در دنیای واقعی مدیریت بهره برداری از مخازن سد می‌تواند بسیار پیچیده باشد. یکی از دلایل این پیچیدگی، وجود تغییرات تصادفی در عناصر مدیریتی سیستم‌های منابع آب است. اولین بار Moran (1954, 1955, 1959) سعی کرد تا این تغییرات تصادفی را در مدیریت مخزن وارد کند. پژوهش‌های او در جهت یافتن راه حل‌های تحلیلی ساده برای توزیع حجم و دیگر متغیرهای وابسته، جریان‌های ورودی و خروجی و توزیع آنها به شکل توابع ریاضی بود. او توانست با به کار بردن محاسبات احتمالاتی، برای اولین بار فرآیند مدیریت مخزن را به شکل پیچیده‌ای مدل‌سازی کند. Prabhu (1958) و Kendall (1957) و Phatarfod (1979) با فرض توزیع گاما برای جریان‌های

رودخانه‌ای، پژوهش‌هایی را در زمینه نظریه عدم قطعیت در تحلیل حجم مخزن ارائه دادند. نتیجه چنین تحقیقاتی در نهایت منجر به تولید مدل‌های پویای تصادفی شد. مدل‌های پویای تصادفی در سال‌های اخیر برای در نظر گرفتن بهتر عدم قطعیت و کاهش مشکلات ابعادی، توسعه قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. Fletcher and Ponnambalam (1995) از تحلیل گشتاورهای اول و دوم حجم مخزن برای تخمین عملکرد مخزن و توزیع ذخیره مخزن استفاده کردند و یک مدل بهینه سازی پویا غیر قطعی پیوسته به نام مدل محدودیت-حالت (Constraint-State; CS) را ارائه کردند. Fletcher and Ponnambalam (1998, 2008) و Ganji and Jowkarshorijeh (2012) و جوکار شوریح و گنجی (۱۳۹۰) از این روش در بهره برداری مخازن استفاده کردند. به نظر می‌آید برای رفع مشکل ابعادی مدل‌های گسسته، می‌توان از مدل‌های پیوسته همانند محدودیت-حالت (CS) استفاده نمود، البته به شرط آنکه از نظر راندمان‌های کارایی در سطح مدل‌های گسسته عمل کند. تاکنون مقایسه دقیقی بین کارایی مدل پیوسته‌ی محدودیت-حالت و مدل‌های گسسته موجود انجام نشده است. این تحقیق قصد دارد تا چنین مقایسه‌ای را میان عملکرد مدل پیوسته و مدل‌های گسسته با استفاده از شاخص‌های کارایی انجام دهد. برای این منظور کارایی مدل پیوسته محدودیت-حالت (CS) با مدل‌های گسسته برنامه‌ریزی پویا (DP) و برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)، براساس شاخص‌های اعتمادپذیری مقایسه خواهد شد. اعتمادپذیری نشان دهنده احتمال موفقیت یک سیستم می‌باشد (گنجی و همکاران، ۱۳۸۵). شاخص‌های اعتمادپذیری شمارشی و اعتمادپذیری حجمی مخزن و اعتمادپذیری حجمی در تأمین نیاز، سه شکل متفاوتی از قابلیت اعتماد می‌باشند (Cai, 1999). شکل‌های متفاوتی از معیارهای اعتمادپذیری (حجمی و شمارشی) توسط محققان مختلفی همانند Stedinger and Taylor (1982) و گنجی و همکاران (۱۳۸۵) در مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه، ابتدا تئوری مدل پیوسته CS و نیز مدل SDP توضیح داده خواهد شد، سپس نتایج کاربرد این مدل‌ها در مورد مخزن سد زاینده‌رود با هم مقایسه می‌شوند.

۲- تئوری و روش انجام کار

۲-۱- مدل محدودیت-حالت (CS)

در این بخش با استفاده از توابع مشخصه مخزن، رابطه‌ای برای مدیریت سیستم مخزنی پویا معرفی می‌شود (Fletcher and Ponnambalam, 1995). این رابطه برای بهره‌برداری‌های دوره‌ای همچون سالانه، ماهانه و هفتگی

قابل کاربرد است. در این مطالعه از یک رشته جریان تاریخی مربوط به رودخانه زاینده رود استفاده شده است. سپس احتمال شکست (احتمال سریز شدن یا کمبود در مدت بهره برداری از سیستم) محاسبه می شود. بر اساس تحقیقات Fletcher and Ponnambalam (1995) در ساختار بهینه سازی مدل محدودیت-حالت (CS) که در ادامه ارائه می شود، لازم است میانگین و واریانس حجم مخزن به ترتیب حداکثر و حداقل گردند تا شرایط پویایی و مانایی بوجود آید. با توجه به موارد فوق گام های محاسباتی روش محدودیت-حالت (CS) برای تحلیل و مدل سازی مخزن به شرح زیر است.

اگر u^t خروجی معین و s_t^t حجم مخزن و $E(s^t)$ امید ریاضی حجم مخزن و $E(s^t)^2$ واریانس حجم مخزن در زمان t باشد:

۱- باید معادلات گشتاورهای اول و دوم حجم مخزن، شامل دو معادله غیرخطی با چهار مجهول، $E(s^t)$ و $E(s^{t-1})$ و $E(s^t)^2$ و $E(s^{t-1})^2$ ارائه گردد. برای ارائه این معادلات از استنباط های آماری براساس معادله بیان حجم مخزن استفاده می شود که در زیر به آنها پرداخته خواهد شد.

۲- با در نظر گرفتن شرایط پویایی و مانایی $E(s^t) = E(s^{t-1})$ و $E(s^t)^2 = E(s^{t-1})^2$ معادلات فوق محدودیت های یک مدل بهینه سازی را شکل می دهند. تابع هدف این مدل می تواند حداکثر کردن کارایی مدیریت مخزن باشد.

۳- با حل مدل بهینه سازی، مقادیر $E(s^t)$ و $E(s^t)^2$ حاصل شده و مقدار بهینه رهایی از مخزن با توجه به رفتار تصادفی جریان که در محدودیت های $E(s^t)$ و $E(s^t)^2$ بیان شده، تعیین می شود.

به منظور استنتاج معادلات در گام اول، از توابع شاخص (روابط ۲ و ۳ و ۴) برای سیستم تک مخزنی استفاده می شود. روابط زیر (۱ تا ۱۲) توسط Fletcher and Ponnambalam (1995) ارائه شده اند. عبارت زیر معادله پیوستگی حجم مخزن است که با استفاده از توابع شاخص $I_{[\cdot]}(\cdot)$ برای سیستم تک مخزنی ارائه شده است:

$$s^t = s^{t-1} + \{I^t + \eta_t^t - u^t\} I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t) + \{s^{\min(t)} - s^{t-1}\} I_{(-\infty, s^{\min(t)})}(\hat{s}^t) + \{s^{\max(t)} - s^{t-1}\} I_{(s^{\max(t)}, \infty)}(\hat{s}^t) \quad (1)$$

که در این معادله s^t حجم مخزن در زمان t ، u^t سطح معینی از رهایی، I^t میانگین جریان واقعی ورودی به مخزن و η_t^t مؤلفه

تصادفی جریان ورودی است که دارای میانگین صفر می باشد. $s^{\min(t)}$ و $s^{\max(t)}$ به ترتیب کمترین و بیشترین حجم مجاز مخزن در زمان t می باشند. در اینجا $\hat{s}^t = s^{t-1} + (I^t + \eta_t^t - u^t)$ آب در دسترس در زمان t یا حجم بالقوه مخزن می باشد. تابع شاخص متغیر تصادفی \hat{s}^t (برای مثال $I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)$ ،

خودش یک متغیر تصادفی است و به صورت زیر بیان می شود:

$$I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t) = 1 \text{ for } s^{\min(t)} \leq \hat{s}^t \leq s^{\max(t)} \text{ and} \quad (2)$$

$$I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t) = 0, \text{ otherwise}$$

به طور مشابه مقدار تابع شاخص در سایر دامنه های متغیر \hat{s}^t به صورت زیر تعریف می شود.

$$I_{(-\infty, s^{\min(t)})}(\hat{s}^t) = 1 \text{ for } -\infty < \hat{s}^t < s^{\min(t)} \text{ and} \quad (3)$$

$$0, \text{ otherwise}$$

$$I_{(s^{\max(t)}, \infty)}(\hat{s}^t) = 1 \text{ for } s^{\max(t)} \leq \hat{s}^t \leq \infty \text{ and} \quad (4)$$

$$0, \text{ otherwise}$$

معادلات (۳) و (۴) به ترتیب در شرایطی که $s^{t-1} + I^t - u^t$ کمتر از حجم مرده یا بیشتر از ظرفیت مخزن باشد، مناسب می باشند. بنابراین با توجه به دامنه \hat{s}^t در تابع مشخصه مخزن تنها یکی از توابع شاخص مساوی یک خواهد بود و دیگری صفر می شود. با توجه به تعریف تابع مشخصه مخزن می توان گشتاورهای اول و دوم متغیر حالت مخزن را به صورت زیر نمایش داد:

$$E(s^t) = E(s^{t-1}) + E\{(I^t + \eta_t^t - u^t) I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)\} + E\{(s^{\min(t)} - s^{t-1}) I_{(-\infty, s^{\min(t)})}(\hat{s}^t)\} + E\{(s^{\max(t)} - s^{t-1}) I_{(s^{\max(t)}, \infty)}(\hat{s}^t)\} \quad (5)$$

$$E(s^t)^2 = E(s^{t-1})^2 + E\{[(I^t - u^t)^2 + (\eta_t^t)^2 + 2\eta_t^t(I^t - u^t)] I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(s^t)\} + 2s^{t-1}(I^t + \eta_t^t - u^t) I_{(-\infty, s^{\min(t)})}(\hat{s}^t) + E\{[(s^{\min(t)})^2 - (s^{t-1})^2] I_{(-\infty, s^{\min(t)})}(\hat{s}^t)\} + E\{[(s^{\max(t)})^2 - (s^{t-1})^2] I_{(s^{\max(t)}, \infty)}(\hat{s}^t)\} \quad (6)$$

در ادامه روابط (۵) و (۶) بر اساس تحلیل های آماری و ریاضی به صورت امید ریاضی متغیر تصادفی بر اساس احتمال رخداد متغیر تصادفی بیان می شود. با فرض اینکه جریان های ورودی مستقل هستند و η_t^t مستقل از حجم در دوره قبلی (s^{t-1}) باشد، $E\{I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)\}$ به شرح زیر حاصل می شود:

$$E\{I_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)\} = Pr\{s^{\min(t)} \leq s^t \leq s^{\max(t)}\} = Pr\{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) < \eta_t^t + s^{t-1} \leq s^{\max(t)} - (I^t - u^t)\} \quad (7)$$

$$= \int_{s^{\min(t-1)}}^{s^{\max(t-1)}} \int_{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - s^{t-1}}^{s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - s^{t-1}} f_{\eta_t^t}(\eta_t^t) f_{s^{t-1}}(s^{t-1}) d\eta_t^t ds^{t-1}$$

(۱۲) که در این رابطه $f_{\eta'_i}$ تابع چگالی احتمال مؤلفه تصادفی جریان

ورودی در دوره جاری و $f_{s^{t-1}}$ تابع چگالی احتمال متغیر حالت مخزن در دوره قبلی است.

$$E\{1_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)\} = E\{\Pr(s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - s^{t-1} < \eta'_i \leq s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - s^{t-1})\} \quad (۸)$$

در اینجا امید ریاضی رابطه (۸) از انتگرال بیرونی رابطه (۷) نسبت به متغیر تصادفی s^{t-1} حاصل می‌شود. سپس با استفاده از تقریب مرتبه اول سری تیلور نسبت به $E(s^{t-1})$ ، امید ریاضی به صورت رابطه زیر ساده می‌شود:

$$E\{1_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)\} \approx \Pr\{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1}) < \eta'_i \leq s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})\} \quad (۹)$$

با فرض اینکه η'_i دارای توزیع نرمال و مستقل از زمان باشد، از تابع خطا (Error function) برای محاسبه عددی احتمال رابطه (۹) می‌توان استفاده کرد. بنابراین معادله (۹) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Pr\{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1}) < \eta'_i \leq s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})\} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})}{\sqrt{2(\sigma'_i)^2}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})}{\sqrt{2(\sigma'_i)^2}} \right] \right\} \quad (۱۰)$$

در نهایت امید ریاضی حجم مخزن در رابطه (۵) در هر دوره، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(۱۱)$$

$$E(s^t) = E(s^{t-1}) + \left\{ \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) \right] [I^t - u^t] + \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(-\frac{[s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})]}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) \right] \cdot [s^{\max(t)} - E(s^{t-1})] + \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(-\frac{[s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})]}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) \right] \cdot [s^{\min(t)} - E(s^{t-1})] \right\}$$

همچنین تخمین مرتبه اول سری تیلور برای گشتاور دوم حجم مخزن در معادله (۶) در هر دوره، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E(s^t)^2 = E(s^{t-1})^2 + \left\{ \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) \right] \times [(I^t - u^t)^2 + \operatorname{Var}\eta'_i + 2Es^{t-1}(I^t - u^t)] + \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(-\frac{[s^{\max(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})]}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) \right] \times [(s^{\max(t)})^2 - E(s^{t-1})^2] + \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(-\frac{[s^{\min(t)} - (I^t - u^t) - E(s^{t-1})]}{[2\operatorname{Var}(\eta'_i)]^{1/2}} \right) \right] \times [(s^{\min(t)})^2 - E(s^{t-1})^2] \right\}$$

با توجه به رابطه (۱۱)، احتمال اینکه حجم مخزن بین دو حد مجاز باشد برابر $E\{1_{[s^{\min(t)}, s^{\max(t)}]}(\hat{s}^t)\}$ یا P_{con} ، احتمال سرریز آب از مخزن برابر $E\{1_{[s^{\max(t)}, \infty]}(\hat{s}^t)\}$ یا P_{sp} و احتمال کمبود آب برابر $E\{1_{[-\infty, s^{\min(t)}]}(\hat{s}^t)\}$ یا P_{def} می‌باشد که به ترتیب با عبارتهای اول و دوم و سوم داخل سه جفت کرشه در رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) بیان شده است.

حال باید از یک ساختار بهینه سازی برای مسئله مدیریت مخزن استفاده شود. با توجه به مشکلاتی که در روش‌های بهینه سازی وجود دارد در تحقیق حاضر از ساختار خاصی برای تعریف تابع هدف استفاده شد که در آن مسئله حداکثر کردن میانگین حجم مخزن و حداقل کردن واریانس آن در نظر گرفته شده و همچنین حداقل نمودن اختلاف بین رهایی از مخزن و آب مورد نیاز بررسی می‌شود. تابع هدف پیشنهادی به شرح زیر است.

Objectivefunction=

$$\operatorname{Max} \left\{ \sum \left(\frac{S_m - S_t}{S_{\max} - S_{\min}} - \frac{D_i - u_t}{D_i} - \frac{E(s^t)^2}{K} \right) \right\} \quad (۱۳)$$

در این رابطه S_m متوسط حجم مخزن و S_t حجم مخزن در زمان t ، S_{\max} و S_{\min} به ترتیب بیشترین و کمترین حجم مجاز مخزن، D_i نیاز ماهانه، u_t رهایی از مخزن در زمان t ، $E(s^t)^2$ گشتاور دوم حجم مخزن در زمان t است و با توجه به اینکه حداقل کردن گشتاور دوم یکی از اهداف است، K حداکثر مقدار گشتاور دوم حجم مخزن بر اساس شبیه سازی مخزن می‌باشد.

متغیر تصمیم این مدل بهینه سازی مقدار رهایی از مخزن می‌باشد. در این تحقیق ضمن استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) که توسط Fletcher and Ponnambalam (1995) ارائه شده است محدودیت‌های زیر نیز اضافه گردید:

محدودیت حداکثر و حداقل حجم مخزن:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \quad (۱۴)$$

محدودیت حداکثر و حداقل گشتاور دوم حجم مخزن:

$$E(s^{\max})^2 \leq E(s)^2 \leq E(s^{\min})^2 \quad (15)$$

محدودیت کل آب رها شده:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (16)$$

که در آن u_{\min} و u_{\max} به ترتیب حداکثر و حداقل آب رها شده ماهانه و u مقدار رهایی ماهانه می باشد.

است که وابسته به زمان و تصمیم می باشد. معادله بلمن برای این شرایط به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$(20)$$

$$f_t(s_i) = \max_k \left\{ \sum_{j=1}^m p_{ij}^t(k) [NB(s_i, s_j, k) + f_{t+1}(s_j)] \right\}$$

حاصل استفاده از این روش در بهینه سازی مخزن، تعیین مقدار بهینه رهایی از مخزن برای حالت های مختلف و شرایط مختلف آب ورودی به مخزن است. اطلاعات بیشتر در مورد این روش را می توان در مقالات Cristiano et al. (2006) و Vedula and Mohan (1990) جستجو کرد.

۲-۳- شبیه سازی مقادیر آب رها شده از مخزن سد

به منظور ارزیابی کارایی مدل پیوسته محدودیت-حالت (CS) و مدل های گسسته برنامه ریزی پویا (DP) و برنامه ریزی پویا تصادفی (SDP)، مقادیر شبیه سازی شده ی حجم آب موجود در مخزن و مقدار رهایی از مخزن، با استفاده از معادله انتقال حالت (رابطه ۲۱) محاسبه می گردد.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - Re_t \quad (21)$$

که در این رابطه، I_t مقدار جریان ورودی سالانه یا ماهانه به مخزن سد S_t و S_{t+1} ، حجم ذخیره شده در زمان t و $t+1$ و Re_t مقدار رهایی از مخزن می باشد.

۲-۴- منطقه مورد مطالعه

منطقه ی مورد مطالعه، حوضه رودخانه زاینده رود با مساحت ۴۲۰۰ کیلومتر مربع می باشد. این سد با ماکزیمم حجم مخزن ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب در غرب شهرستان اصفهان واقع شده است. سد مخزنی زاینده رود علاوه بر تأمین نیاز آبی حدود سه میلیون نفر از ساکنان شهر اصفهان، تأمین کننده نیازهای آبی بخش های صنعت و کشاورزی بوده و به منظور تولید انرژی برق آبی نیز استفاده می شود. در این مطالعه از اطلاعات مربوط به حجم ورودی به سد زاینده رود از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۱ (۳۱ سال) استفاده شد. در جدول ۱ میانگین ماهانه حجم ورودی به سد زاینده رود در طول دوره آماری مذکور، آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود، بیشترین مقدار میانگین حجم ورودی در ماه های فروردین و اردیبهشت رخ داده است.

۳- نتایج و بحث

مدل بهینه سازی محدودیت-حالت (CS) که یک مدل پویا غیر

از آنجا که هدف اجرای این مدل رسیدن به یک پایایی در مدیریت مخزن می باشد، انتظار می رود که شرایط مخزن در ابتدای یک سال آبی (یعنی ابتدای ماه اول)، همان شرایط مخزن در انتهای سال آبی (ماه ۱۲) باشد. برای این منظور دو محدودیت به شکل روابط (۱۷) و (۱۸) به مدل وارد می شود.

$$E(S_t) = E(S_{13}) \quad (17)$$

$$E(S_t)^2 = E(S_{13})^2 \quad (18)$$

که در این روابط S_t و S_{13} به ترتیب مقادیر حجم ذخیره در مخزن در ماه های اول دو سال متوالی می باشند. برای حل مدل بهینه سازی فوق از یک روش حل برنامه ریزی غیرخطی Fletcher and Ponnambalam (1995) استفاده گردید.

۲-۲- مدل ساده پویای غیرقطعی

تفاوت عمده مدل های قطعی و غیر قطعی بهره برداری از مخزن در این است که در مدل های غیر قطعی، وضعیت سیستم در مرحله بعد به طور کامل توسط وضعیت فعلی و سیاست بهره برداری اتخاذ شده، قابل تعیین نمی باشد و در واقع یک تابع توزیع احتمالی برای وضعیت آتی سیستم وجود دارد. سیستمی را در نظر بگیرید که بتواند در هر یک از حالت های گسسته $S = \{S_1, \dots, S_j\}$ قرار گیرد. فرض کنید $NB_t(S_i, S_j, k)$ سود خالص سیستم طی دوره t باشد. اگر تصمیم k در مورد سیستم گرفته شده و باعث شود سیستم از حالت S_i حرکت و به حالت S_j برسد، معادله بلمن را به شکل زیر می توان برای حداکثر کرن سود خالص چنین مخزنی استفاده نمود:

$$f_t(s_i) = \max_k [NB(s_i, s_j, k) + f_{t+1}(s_j)] \quad (19)$$

که $f_t(s_i)$ ماکزیمم منافع خالص در دوره t می باشد. غالباً، بدلیل پیشامدهای غیر قطعی مانند بارندگی، حالت بعدی یک تابع قطعی فقط تابعی از حالت و تصمیم فعلی سیستم نیست. برای مدل سازی چنین وضعیتی، باید از قوانین احتمالات استفاده نمود و احتمال انتقال از حالت قبلی به فعلی $(p_{ij}^t(k) = Pr[s^{t+1} = s_j | s^t = s_i])$ را به دست آورد. این همان احتمال انتقال در یک زنجیره مارکف

جدول ۱- مقادیر میانگین ماهانه نیاز و حجم ورودی به مخزن سد زاینده‌رود بر حسب (MCM)

ماه‌های سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میانگین حجم ورودی به سد (MCM)	۳۳۱/۰۱	۳۲۶/۲۱	۲۲۸/۶۵	۱۴۸/۱	۸۷/۱۸	۴۸/۳۵	۴۳/۹۹	۶۱/۴۱	۷۰/۵۳	۶۵/۳۸	۷۵/۹۷	۱۳۳/۰۷
نیاز ماهانه (MCM)	۶۱/۸۵	۱۴۳/۸۵	۲۵۹/۸۵	۲۵۰/۳۵	۲۱۶/۱۵	۱۳۲/۶۵	۸۲/۰۵	۳۵/۵۸	۲۵/۴۸	۲۱/۲۵	۲۳/۰۵	۲۴/۵۵

متر مکعب است. این نشان می‌دهد که مدل SDP در مدیریت مخزن نسبت به روش‌های دیگر شکست کمتری متحمل می‌شود. در ادامه شاخص‌های اعتمادپذیری بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده حجم مخزن و رهایی آب از مخزن محاسبه گردید.

۳-۱-۱- ارزیابی کارایی روش‌های بهینه سازی در مدیریت مخزن بر اساس شاخص‌های اعتماد پذیری

مطابق تعریف اعتمادپذیری عبارت است از عدم وقوع شکست در بهره‌برداری از سیستم در مدت زمان مشخص (Loucks et al., 1981). بر مبنای این تعریف، اعتمادپذیری یا قابلیت اطمینان نقطه مقابل مفهوم ریسک می‌باشد. تعاریف مشابهی برای اعتمادپذیری در منابع آب توسط (Karamouz et al., 2003), Cai (1999), Ganji (2000) ارائه شده است. این شاخص نشان‌دهنده میزان تامین اهداف سیستم است و یکی از مهمترین شاخص‌ها برای بررسی کارایی سیاست‌های بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب در شرایط عادی می‌باشد. سه شکل متفاوت از اعتمادپذیری توسط Cai (1999) به صورت زیر ارائه می‌شود.

۳-۱-۱-۱- شاخص اعتمادپذیری شمارشی (RE_i)

شاخص اعتمادپذیری شمارشی به عنوان یکی از شاخص‌های مؤثر در ارزیابی کارایی مخزن، در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص اعتمادپذیری شمارشی برای کل دوره (ماهانه و سالانه) و یک دوره خاص (ماهانه) به عنوان دو شاخص مؤثر در ارزیابی کارایی مخزن می‌باشند که بر اساس معادله (۲۲) ارائه می‌گردد.

$$RE_i = \left(1 - \frac{m}{n}\right) 100 \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) RE_i مقدار شاخص اعتمادپذیری شمارشی، m تعداد دوره‌هایی که شکست در آنها رخ داده، n تعداد کل دوره‌ها است. نتایج به‌دست آمده توسط رابطه (۲۲) برای مدل‌های ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر سالانه این شاخص برای مدل‌های CS، DP و SDP به ترتیب برابر با ۸۷/۹، ۹۹/۷۳ و ۱۰۰ می‌باشد. این مقادیر و همچنین نتایج جدول ۳ بیانگر این است که مدل SDP از نظر شاخص اعتمادپذیری شمارشی هیچ شکستی را در طول کل دوره متحمل

قطعی پیوسته می‌باشد رفتار تصادفی حجم مخزن را (به جای استفاده از ماتریس احتمال انتقال مارکوف) در قالب معادلات میانگین و واریانس حجم مخزن (معادلات ۵ و ۶) تعریف کرده و به عنوان محدودیت در نظر گرفته و مسئله را به صورت مدل برنامه‌ریزی غیر خطی حل می‌کند که این یکی از نقاط قوت این مدل می‌باشد. این مدل در نهایت دوازده عدد به عنوان رهایی بهینه ارائه می‌دهد. در هنگام شبیه‌سازی حجم مخزن نیز از همین اعداد ثابت استفاده می‌شود که البته این مسئله می‌تواند به عنوان یکی از ضعف‌های این مدل منظور گردد. در مدل‌های گسسته DP و SDP در شرایطی که تعداد مخازن یا ابعاد مسئله زیاد است دو مشکل عمده حافظه و زمان مورد نیاز برای محاسبات در رایانه وجود دارد. این معطل در مطالعات منابع آب نفرین ابعادی نام گرفته است که ناشی از پیچیدگی مدل‌های پویا می‌باشد.

۳-۱-۲- نتایج مدل‌های بهینه سازی

در ادامه و بعد از حل مدل‌های ذکر شده در قسمت‌های قبل، از نتایج آنها برای شبیه‌سازی مدیریت مخزن سد زاینده‌رود در استان اصفهان استفاده گردید. تغییرات شبیه‌سازی شده رهایی از مخزن در مدل‌های CS، SDP و DP به ترتیب در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است. با مقایسه روند تغییرات رهایی از مخزن در مدل‌های ذکر شده، مشاهده می‌شود که این روند در مدل CS (شکل ۱) نسبت به مدل‌های دیگر منظم‌تر بوده و دامنه تغییرات آن از ۱۹ میلیون متر مکعب تا ۴۷۵ میلیون متر مکعب می‌باشد، همچنین این روند با روند تغییرات نیاز آبی ماهانه در دوره شبیه‌سازی، نسبت به مدل‌های دیگر از انطباق بیشتری برخوردار است و این بیانگر این مطلب است که مدل CS در تامین نیاز آبی نسبت به روش‌های دیگر دارای عملکرد بهتری است. تغییرات شبیه‌سازی شده حجم آب ذخیره شده در مخزن در مدل‌های CS، SDP و DP به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. از مقایسه نمودارهای تغییرات حجم مخزن مشاهده می‌شود که روش‌های SDP و DP نسبت به نوسانات زمانی از حساسیت بیشتری در مقایسه با روش CS برخوردار می‌باشند. همچنین مدل SDP نسبت به مدل‌های دیگر دارای گستره‌ی تغییرات کمتری است. حداقل و حداکثر مقدار حجم مخزن در طول دوره شبیه‌سازی در این مدل به ترتیب برابر با ۵۶۶ و ۸۵۳ میلیون

محاسبه گردید. نتایج محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر سالانه این شاخص برای مدل‌های CS، DP و SDP به ترتیب برابر با ۰/۰۱۰۵، ۰/۰۰۰۳ و ۰/۰۰۰۳ می‌باشد. این نتایج بیانگر این است که مدل SDP در زمینه مدیریت مخزن شکست کمتری نسبت به دیگر مدل‌ها متحمل می‌شود.

۳-۱-۱-۳- شاخص اعتمادپذیری حجمی در تأمین نیاز برای کل دوره (RE_v^T)

از جمله شاخص‌های دیگر در ارزیابی کارایی مخزن، شاخص اعتمادپذیری حجمی در تأمین نیاز می‌باشد که توسط رابطه (۲۴) ارائه می‌شود.

$$RE_v^T = \frac{100}{nm} \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{\text{Supplied water (monthly or annual)}}{\text{Demand (monthly or annual)}} \right) \quad (24)$$

در این رابطه RE_v^T شاخص اعتمادپذیری حجمی در تأمین نیاز برای کل دوره، nm طول دوره که به صورت ماهانه یا سالانه می‌تواند ارائه شود. شاخص اعتمادپذیری حجمی برای کل رهایی از مخزن و هر بخش به صورت جداگانه قابل محاسبه می‌باشد. این شاخص ارزیابی، مقدار و شدت شکست‌ها در تأمین نیاز و شدت شکست در حجم مخزن را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده توسط این رابطه به صورت سالانه در جدول ۲ و به صورت ماهانه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای این شاخص می‌توان گفت مدل CS در زمینه تأمین نیاز دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. مقایسه اعداد جدول ۲ نشان می‌دهد که اگرچه تعداد دفعات شکست مدل CS از SDP در مدیریت مخزن بیشتر است اما SDP مقدار کمتری از نیاز پایین دست مخزن را تأمین کرده است و در این زمینه عملکرد ضعیفی نسبت به CS داشته است.

نمی‌شود. این شاخص معیاری از تعداد دفعاتی که یک مخزن در افق طراحی خود پر یا خالی می‌شود، ارائه می‌دهد. اگر چه بالاتر بودن مقدار شاخص اعتمادپذیری شمارشی مناسب است اما باید توجه داشت که این معیار تنها وضعیت حجم مخزن را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر تنها نشان می‌دهد که در طی مدیریت مخزن با چه احتمالی مخزن خالی شده یا سرریز می‌کند. اما در مورد وضعیت تأمین نیاز و شدت شکست‌های مخزن صحبتی نمی‌کند.

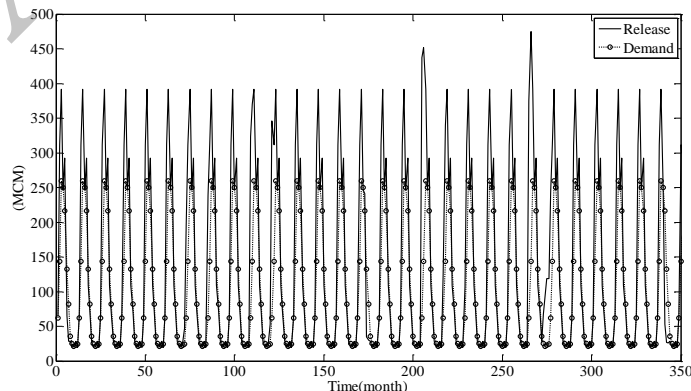
۳-۱-۱-۲- شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن (RE_v^S)

مقادیر کمبود و سرریز در مخزن در طول دوره برنامه‌ریزی به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. در این راستا شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن جهت ارزیابی این پارامتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن توسط رابطه (۲۳) ارائه شده است.

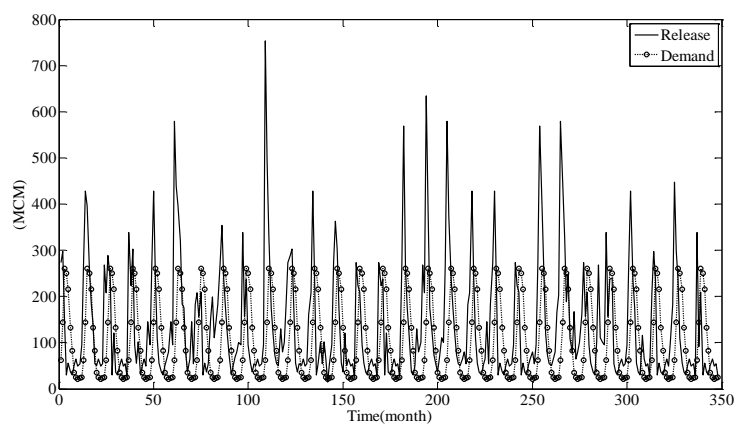
$$RE_v^S = \frac{\text{Total storage shortfall of overflow}}{\text{Total available water in reservoir system during the planning horizon}} \quad (23)$$

در این رابطه RE_v^S شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن برای کل دوره می‌باشد. دامنه تغییرات آن، از مقادیر بزرگتر از صفر تا دو و حتی سه می‌باشد. مقدار صفر برای این شاخص به معنای عدم وقوع شکست یا به عبارتی شاخص اعتمادپذیری حجمی ۱۰۰٪ می‌باشد. همچنین مقادیر بزرگتر از یک، به معنای بزرگتر بودن مجموع مقادیر شکست نسبت به مقادیر آب موجود در مخزن در طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد.

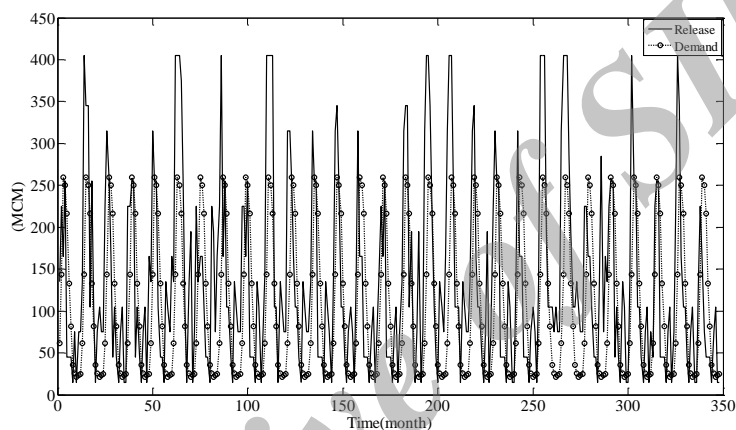
با توجه به مقادیر بهینه حجم آب ذخیره شده در مخزن که از اجرای مدل به دست آمده است، این شاخص برای مدل‌های ارائه شده،



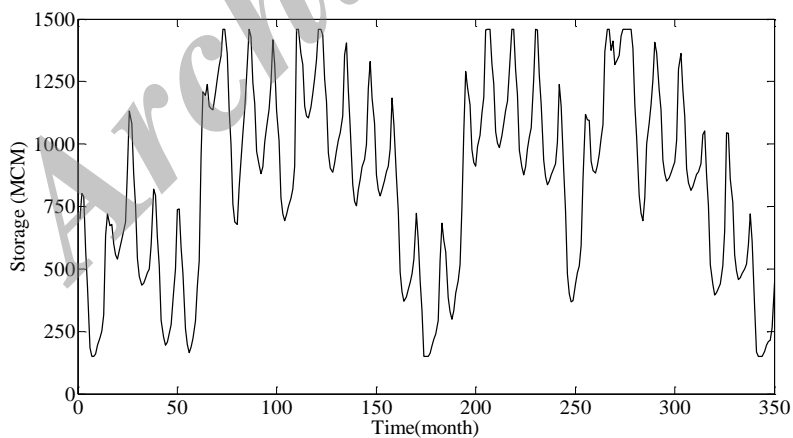
شکل ۱- مقدار رهایی آب از مخزن حاصل از شبیه‌سازی ماهانه مدل محدودیت- حالت (CS)



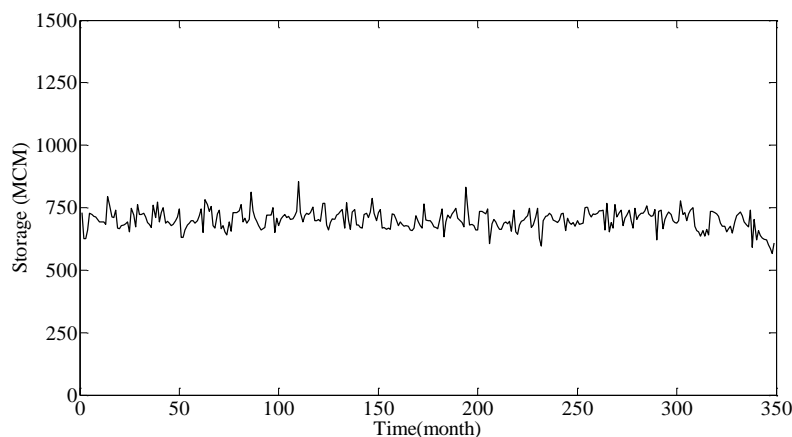
شکل ۲- مقدار رهایی آب از مخزن حاصل از شبیه‌سازی ماهانه مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)



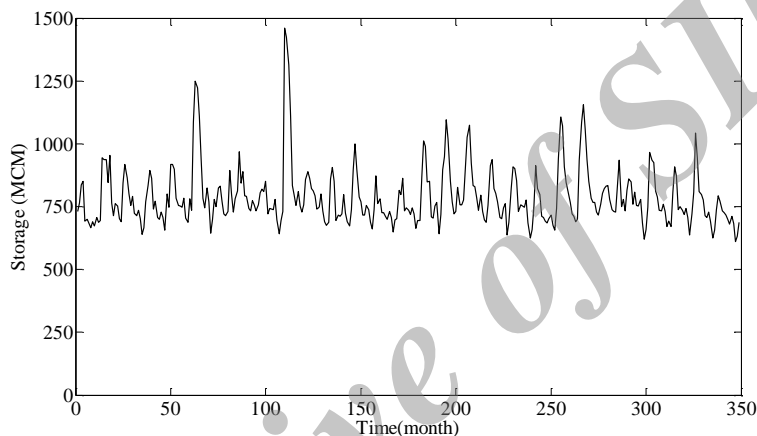
شکل ۳- مقدار رهایی آب از مخزن حاصل از شبیه‌سازی ماهانه مدل برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP)



شکل ۴- تغییرات حجم مخزن حاصل از شبیه‌سازی ماهانه مدل محدودیت- حالت (CS)



شکل ۵- تغییرات حجم مخزن حاصل از شبیه‌سازی ماهانه مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)



شکل ۶- تغییرات حجم مخزن حاصل از شبیه‌سازی ماهانه مدل برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP)

جدول ۲- درصد مقادیر سالانه شاخص‌های اعتمادپذیری

مدل‌ها	محدودیت-حالت	برنامه ریزی پویای قطعی	برنامه ریزی پویای تصادفی
مقادیر اعتمادپذیری شمارشی RE_t (%)	۸۷/۹	۹۹/۷۳	۱۰۰
مقادیر اعتمادپذیری حجمی مخزن RE_v^s	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۰۰۳	۰
مقادیر اعتمادپذیری حجمی مخزن در تامین نیاز RE_v^T (%)	۸۹/۲۴	۸۰/۴۵	۸۱/۲

جدول ۳- درصد مقادیر ماهانه شاخص‌های اعتمادپذیری

شاخص‌ها	مدل‌ها	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
مقادیر ماهانه اعتمادپذیری شمارشی RE_t (%)	محدودیت-حالت	۷۰/۹۶	۹۰/۳۲	۸۳/۸۷	۹۰/۳۲	۸۷/۰۹	۸۳/۸۷	۸۳/۸۷	۹۰/۳۲	۹۳/۵۴	۹۶/۷۷	۹۶/۷۷	۹۰/۳۲
	برنامه ریزی پویای قطعی	۹۶/۷۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
مقادیر ماهانه اعتمادپذیری حجمی در تامین نیاز RE_v^T (%)	محدودیت-حالت	۱۰۰	۱۰۰	۹۳/۲۹	۱۰۰	۷۷/۸۵	۷۵/۴۳	۷۶/۱۱	۸۱/۸۶	۱۰۰	۸۰/۶۹	۸۰/۷	۱۰۰
	برنامه ریزی پویای قطعی	۹۹/۰۶	۹۹/۷۹	۸۸/۰۹	۸۶/۱۸	۴۵/۲۸	۶۳/۳۱	۶۴/۱۹	۴۶/۱۵	۱۰۰	۹۸/۹۹	۸۳/۱۴	۸۹/۲۷
	برنامه ریزی پویای تصادفی	۱۰۰	۹۸/۷۵	۹۱/۳۲	۴۹/۰۹	۴۰/۶۱	۴۲/۸۲	۵۲/۸۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۹۵	۱۰۰	۱۰۰

۴- نتیجه گیری

آب به عنوان یکی از عوامل اساسی و لازم در بخش صنعت، کشاورزی و شهری مطرح است. کمبود و توزیع نامناسب زمانی و مکانی منابع آب باعث بروز اختلافاتی بین بخش‌های مصرف کننده آب شده است. اکثر روش‌های موجود دارای معایبی هستند که از آن جمله می‌توان به ماهیت ایستا و قطعی بودن آنها اشاره کرد. قابل ذکر است که اختلافات و مسائل رقابتی در منابع آب، ماهیت پویا و تصادفی دارند. مدل‌های پویای گسسته‌ی موجود نیز به لحاظ ساختاری برای حل چنین مسائلی به حجم محاسبات وسیعی نیاز دارند. انتخاب روش مناسب باید بر اساس شاخص‌های مختلف صورت گیرد. در این تحقیق سعی شد تا با رسم نمودارهای تغییرات حجم مخزن و مقدار رهایی آب از مخزن و نیاز آبی و همچنین محاسبه شاخص‌های اعتمادپذیری برای سه مدل CS و DP و SDP کارایی این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شود. نتایج حاصل از نمودارهای تغییرات حجم مخزن حاکی از این بود که مدل SDP دارای گستره‌ی تغییرات کمتری بوده و در مدیریت مخزن نسبت به مدل‌های دیگر شکست کمتری متحمل می‌شود. ولی نتایج نمودارهای رهایی آب از مخزن بیانگر این بود که در مدل CS رهایی آب از مخزن با نیاز ماهانه انطباق بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. مقایسه نتایج اعتمادپذیری شمارشی و اعتمادپذیری حجمی در تأمین نیاز نشان می‌دهد که اگرچه مقدار اعتمادپذیری شمارشی مخزن در دو روش DP و SDP بیشتر است، ولی مقادیر سالانه و ماهانه شاخص اعتمادپذیری حجمی مخزن در تأمین نیاز در مدل CS بیشتر می‌باشد. این مورد حاکی از این است که اگرچه تعداد شکست در مدل CS نسبت به مدل‌های DP و SDP بیشتر است (شاخص اعتمادپذیری شمارشی را مشاهده نمایید) ولی اندازه این شکست‌ها کم بوده و این مدل می‌تواند بهتر از مدل‌های DP و SDP نیاز را تأمین کند. لذا با توجه به اهمیت بحث تأمین نیاز آبی در مدیریت منابع آب و همچنین برای رفع مشکل ابعادی مدل‌های گسسته، پیشنهاد می‌شود از مدل پیوسته محدودیت حالت (CS) در مسائل بهینه‌سازی مخزن استفاده شود.

پی نوشت‌ها

- 1- Dynamic Programming (DP)
- 2- Constraint-State (CS)
- 3- Stochastic Dynamic Programming (SDP)

۵- مراجع

برهانی داریان ع، احمدی علی‌آباد م (۱۳۸۳) تدوین مدل بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با استفاده از روش

کریدور در DP. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، سال ۱۵، شماره ۴: ۲۰۳-۲۲۷.

جوکار شوریجه ل، گنجی آ (۱۳۹۰) ارزیابی و تعیین ریسک در تأمین آب از مخزن سد زاینده‌رود. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران، ۱۳-۱۴ اردیبهشت.

عظیمی سجادی گ (۱۳۸۲) ارزیابی کاربرد مدل‌های قطعی و استوکاستیک پویا در بهره‌برداری از مخزن. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

کارآموز م، کراچیان ر (۱۳۸۷) برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۴۰۰ صفحه.

گنجی آ، خلیلی د، همایونفر م (۱۳۸۵) تأثیر عدم اطمینان بر معیارهای مخاطره در مدیریت مخزن. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۲، شماره ۳: ۱۳-۲۶.

Cai X (1999) Modeling Framework for Sustainable Water Resources Management. University of Texas at Austin, United States.

Choudhari SA, Raj PA (2010) Multiobjective Multi-reservoir Operation in Fuzzy Environment. Journal of Water Resources Management 24(10):2057-2073.

Cristiano C, Victoria CPC, Aihong W (2006) Optimization of a large-scale water reservoir network by stochastic dynamic programming with efficient state space discretization. Journal of European Journal of Operational Research 171:1139-1151.

Fletcher SG, Ponnambalam K (1995) Estimation of reservoir yield and storage distribution using moments analysis. Journal of Hydrology 182:259-275.

Fletcher S G, Ponnambalam K (1998) A constrained state formulation for the stochastic control of multi-reservoir systems. Journal of Water Resources Research 34(2):257-270.

Fletcher S, Ponnambalam K (2008) Stochastic control of reservoir systems using indicator functions: New enhancements. Journal of Water Resources Research 44(12):1-10.

Ganji A (2000) Streamflow modelling and analysis of Mollasadra and Salman Farsi reservoirs using time series models of SPIGOT. M.S. Thesis, Shiraz, Iran, 388p.

Ganji A, Jowkarshorijeh L (2012) Advance first order second moment (AFOSM) method for single

- Moran PAP (1955) A probability theory of dams and storage systems: Modifications of the release rules. *Journal of Australian Journal of Applied Science* 6:117-130.
- Moran PAP (1959) *The theory of storage*. Methuen, London.
- Neelakantam TR, Pundarikanthan NV (2000) Neural network based simulation operation model for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 126(2):57-64.
- Phatarfod RM (1979) The bottomless dam. *Journal of Hydrology* 40:337-36.
- Prabhu NU (1958) On the integral equation for the finite dam. *Journal of The Quarterly Journal of Mathematics* 9(2):183-188.
- Sreekanth J, Datta B, Mohapatra PK (2012) Optimal short-term reservoir operation with integrated Long-term goals. *Journal of Water Resources Management* 26(10):2833-2850.
- Stedinger JR, Talor MR (1982) Synthetic streamflow generation (Model verification and validation). *Journal of Water Resources Research* 18(4):909-917.
- Vedua S, Mohan S (1990) Real-time multipurpose reservoir operation: a case study. *Journal of Hydrological Sciences Journal / Journal des Sciences Hydrologiques* 35(4):447-462.
- Yang W, Yang Z (2013) Development of a long-term, ecologically oriented dam release plan for the lake baiyangdian sub-basin, Northern China. *Journal of Water Resources Management* 27:485-506.
- Yakowitz S (1982) Dynamic programming applications in water resources. *Journal of Water Resources Research* 18(4):673-696.
- Yeh WWG (1985) Reservoir management and operations models: a state of the art review. *Journal of Water Resources Research* 21(12):1797-1818.
- reservoir operation reliability analysis: a case study. *Journal of Stochastic Environmental Research & Risk Assessment* 26(1):33-42.
- Homayounfar M, Ganji A, Martinez CJ (2011) A novel solution for stochastic dynamic game of water allocation from a reservoir using collocation method. *Journal of Water Resources Management* 25(13):3427-3444.
- Huang WC, Yuan LC, Lee CM (2002) Linking genetic algorithms with stochastic dynamic programming to long term operation of a multi-reservoir. *Journal of Water Resources Research* 38(12):401-409.
- Johnson SA, Stedinger JR, Shoemaker CA, Li Y, Tegada-Guibert JA (1993) Numerical solution of continuous-state dynamic programs using linear and spline interpolation. *Journal of Journal of Operational Research* 41(3):484-500.
- Karamouz M, Szidarovszky F, Zahraie B (2003) *Water Resources System and Analysis*. Lewis publishers, Boca Raton, Florida.
- Karamouz M, Vasiliadis HV (1992) Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecast. *Journal of Water Resources Research* 28(5):1337-1344.
- Kelman J, Stedinger JR, Cooper LA, Hsu E, Yang SQ (1990) Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation. *Journal of Water Resources Research* 26(3):447-454.
- Kendall DG (1957) Some problems in the theory of dams. *Journal of the Royal Statistical Society* 19(2):207-212.
- Loucks DP, Stedinger JR, Haith DA (1981) *Water resources system planning and analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Manca A, Sechi GM, Zuddas P (2010) Water Supply network optimisation using equal flow algorithms. *Journal of Water Resources Management* 24(13):3665-3678.
- Moran PAP (1954) Probability theory of dams and storage systems. *Journal of Australian journal of applied science* 5:116-124.