

## Assessment of Inflow Forecast Uncertainty in Optimal Reservoir Operation

A. B. Dariane<sup>1</sup>, E. Eftekhari Javadi<sup>2</sup>

### Abstract

In this paper, various types of stochastic dynamic programming models (SDP) and also a deterministic dynamic programming (DP) are presented and compared for multipurpose Dez reservoir dam located in southwest of Iran. The impact of inflow forecasting uncertainty in optimum reservoir operation is investigated through two types of stochastic dynamic programming models. SDP models are different based on hydrologic state variable and inflow conditional or non conditional probability assumptions. A simulation model is developed to investigate the achieved optimum policies in different models. So, average of different operation variables and also performance criteria such as reliability, resiliency and vulnerability are used to compare the results. In two SDP models which apply current inflow instead of previous time step inflow as hydrologic state variable, real time simulation is done with forecasted and observed inflows. The effect of forecasting accuracy and different forecasting methods in reservoir operation are also studied. In general, objective function is considered as minimizing the sum squared of two sided deviations from target release and storage. This research shows that lack of attention to inflow forecasting in models which need it and assuming known values could lead us to unreal and false results and mislead us in selecting type of model. On the other hand, it is noticed that forecasting accuracy plays an important role in optimum reservoir operation.

**Keywords:** Stochastic dynamic programming, Forecasting error, Optimization, Simulation, Inflow forecasting, Reservoir operation, Hydropower energy.

## نقش پیش‌بینی جریان ورودی در بهره‌برداری بهینه از مخازن

علیرضا برهانی داریان<sup>۱</sup> و الهام افتخارجوادی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله انواع مدل‌های برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک (SDP) و همچنین برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP) برای سد مخزنی چندمنظوره دز واقع در جنوب غربی ایران ارائه و مقایسه شده‌اند. ارزیابی نقش پیش‌بینی جریان ورودی در بهره‌برداری بهینه از مخازن، با استفاده از دو نوع مدل برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک صورت گرفته است. مدل‌های SDP از نظر نوع متغیر حالت جریان ورودی و به‌کارگیری احتمال شرطی و یا غیرشرطی با هم تفاوت دارند. برای بررسی سیاستهای بهینه به‌دست آمده از مدل‌های مختلف، از مدل شبیه‌سازی استفاده شده است. جهت این منظور و برای مقایسه نتایج حاصل از آن از میانگین پارامترهای مختلف بهره‌برداری و معیارهای ارزیابی از قبیل اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده شده است. در دو مدل SDP که متغیر حالت هیدرولوژیکی جریان ورودی دوره فعلی را به‌جای جریان ورودی دوره قبل به‌کار می‌برند، با استفاده از جریانهای پیش‌بینی شده و مشاهده شده، شبیه‌سازی به‌هنگام انجام شد و همچنین تاثیر دقت پیش‌بینی و انواع روش‌های مختلف پیش‌بینی جریان در بهره‌برداری از مخزن، مورد مطالعه قرار گرفته است. تابع هدف به صورت کلی، حداقل‌سازی مجموع مربعات انحراف دوطرفه از خروجی و ذخیره مطلوب در نظر گرفته شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که عدم توجه به موضوع پیش‌بینی در مدل‌هایی که نیاز به پیش‌بینی جریان دارند و معلوم فرض کردن داده‌ها، نتایجی پرخطا و به دور از واقعیت داشته و فرد را در انتخاب نوع مدل دچار اشتباه می‌کند. از طرف دیگر دقت پیش‌بینی‌ها تاثیر بسزایی در بهره‌برداری بهینه از مخازن دارد.

**کلمات کلیدی:** برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک، خطای پیش‌بینی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، پیش‌بینی جریان ورودی، بهره‌برداری مخزن، انرژی برقابی.

1- Faculty Member, Assistant professor, Department of Water Resources, School of Civil Engineering, K.N.T University of Technology.  
2- M.Sc., Water Resources Management, School of Civil Engineering, K.N.T University of Technology.

۱- استادیار، گروه منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.  
۲- کارشناسی ارشد، رشته مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

جریان ورودی دوره فعلی، متغیر حالت هیدرولوژیکی پیش‌بینی جریان ورودی دوره فعلی را نیز به کار بردند.

پیش‌بینی جریان از مسائل مهم در برخی از مدل‌های برنامه‌ریزی پویای بهره‌برداری از مخازن می‌باشد. تأثیر پیش‌بینی جریان رودخانه در بهره‌برداری از مخزن، به‌طور قابل ملاحظه‌ای برحسب نوع سیستم متغیر است. اما به‌طور کلی با پیش‌بینی بهتر جریان رودخانه، شرایط بهره‌برداری از مخزن بهبود می‌یابد؛ زیرا زمان بیشتری برای تصمیم‌گیری درست‌تر، در اختیار قرار می‌گیرد (Georgakakos, 1989). (Oron et al., 1991) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که حداکثر سود به دست آمده، به روش پیش‌بینی جریان بستگی دارد و خطاهای پیش‌بینی باعث کاهش منافع می‌شوند. به‌طور معمول با گذشت زمان دقت پیش‌بینی افزایش می‌یابد؛ ولی منفعت حاصل از تخصیص هنگامی که تصمیم‌گیری با تأخیر انجام شود، کاهش می‌یابد (Krzysztofowicz, 1986). در سیستم رودخانه Wupper در کشور آلمان، مطالعاتی بر روی یک سیستم دو مخزنه انجام شده و از روش‌های مختلفی مثل آرپما و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی جریان استفاده شده است (Napiorkowski et al., 1999). (Moore and Armstrong, 1976) نشان دادند که با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی و با کاهش عدم اطمینان به میزان ۳۳ درصد که ناشی از بهبود پیش‌بینی‌ها می‌باشد، می‌توان برای کشاورزان منافع زیادی را به وجود آورد. در مطالعه دیگری (Yeh et al., 1982) منافی را که ممکن است با استفاده از پیش‌بینی‌های بلندمدت جریان رودخانه در یک مخزن چند منظوره در کالیفرنیا حاصل شود، ارزیابی نمودند. با پیش‌بینی بهتر جریان رودخانه در مخزن Folsom در کالیفرنیا، می‌توان حداکثر خسارت حاصل از سیل را کاهش داده و میزان سرریز را کم‌نموده و انرژی بیشتری تولید کرد (Carpenter and Georgakakos, 2001) و (Yao and Georgakakos, 2001). پیشرفت‌های اخیر در پیش‌بینی‌های بلند مدت، باعث شده تا پیش‌بینی‌های مفیدتری از جریان رودخانه کلمبیا نسبت به پیش‌بینی‌های گذشته که بر اندازه‌گیری توده برف تکیه دارد، انجام شود. افزایش مدت زمان پیش‌بینی، بهبودهای قابل توجهی را در عملکرد بهره‌برداری از سیستم، به‌خصوص در سال‌هایی که جریان‌های ورودی بیشتر از مقدار میانگین هستند، ایجاد می‌کند. در شرایط فعلی بهره‌برداری، فرض بر این است که تا اطلاعات پیش‌بینی بر مبنای مشاهدات توده برف در دسترس قرار بگیرد، خشکی وجود دارد. بدین معنا که صرفاً نیازهای ضروری تامین شده و از سیاست‌های دوره خشکسالی استفاده می‌شود. این مساله خروج آب از مخزن را برای تولید انرژی غیر پیک در اواخر تابستان و پاییز دچار محدودیت می‌کند. بنابراین

برنامه‌ریزی پویا به‌عنوان رویه‌ای ریاضی برای حل مسایل بهینه‌سازی بیشترین کاربرد را در تحقیقات مدیریت منابع آب به خود اختصاص داده است. بلمن (Bellman) مبتکر و ارایه دهنده روش برنامه‌ریزی پویا آن را یک فرآیند تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای توصیف کرده است (Yakowitz, 1982). این روش نیز همچون سایر روش‌ها به صورت معین و استوکاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های برنامه‌ریزی پویای معین، از یک جریان ورودی معلوم برای تعیین بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده می‌کنند. این گونه مدل‌ها زمانی که از جریان میانگین تاریخی استفاده می‌کنند، منافع سیستم را دست بالا و هزینه‌ها و خسارت‌ها را دست پایین برآورد کرده و خوش‌بینانه می‌باشند (Loucks et al., 1981). به‌همین دلیل مدل‌های معین دارای کاربرد محدودی بوده و نمی‌توانند جایگزین مدل‌های استوکاستیک در منابع آب گردند و تنها به‌عنوان راهنمای اولیه به‌کار می‌روند. برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک با تعریفی از زنجیره مارکوف برای جریان‌های ورودی، روش مناسبی برای محاسبه سیاست‌های بهره‌برداری بهینه سیستم مخازن می‌باشد. Little (1955) از اولین کسانی بود که برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک را در منابع آب توسعه داد. او در مطالعه بر روی یک سیستم تک‌مخزنی فرض کرد که جریان‌های ورودی غیروابسته هستند. دیگر محققین چون (Buras, 1966) و (Butcher, 1967) ضمن توسعه مدل Little (1955) جریان‌های رودخانه را همبسته در نظر گرفتند (Gablinger and Loucks, 1970). (Torabi and Mobasheri, 1973) در مطالعات خود بر روی یک مخزن منفرد چندمنظوره، از برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک استفاده کردند که اهداف آن مخزن تامین آب قطعی، تولید انرژی پیک، کنترل سیل و کنترل کیفیت آب می‌باشد. (Su and Deininger, 1974) و (Huang et al., 1991) روی انواع مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک مطالعه و تحقیق نمودند. یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک، انتخاب متغیر حالت هیدرولوژیکی است. معمول‌ترین انتخاب‌ها عبارت‌اند از: جریان ورودی دوره قبلی، جریان ورودی دوره فعلی و در بعضی مواقع جریان پیش‌بینی‌شده دوره فعلی و یا دوره بعدی (Huang et al., 1991) و (Tejada-Stedinger et al., 1984). (Guibert et al., 1995) بیان می‌کنند که انتخاب متغیر حالت هیدرولوژیکی در مدل SDP بستگی به اطلاعات در دسترس برای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های محاسباتی دارد. در سیستم Shasta-Trinity انواع مختلف برنامه‌ریزی پویا از نظر متغیرهای حالت استفاده شده است. آنها در یکی از مدل‌های SDP علاوه بر

$$S_{t+1} \leq S_t + Q_t - E_t \quad (4)$$

براساس نوع احتمال و نوع جریان ورودی در نظر گرفته شده به عنوان متغیر حالت هیدرولوژیکی، چهار ساختار مختلف برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک، به شرح زیر وجود دارد که با توجه به نوع مدل، مقادیر متغیرهای حالت و تصمیم گسسته می‌شوند. هدف در تمامی مدل‌ها حداقل‌سازی تابع خسارت در نظر گرفته شده است. شرح بیشتر این تابع در ادامه خواهد آمد.

۱- مدل SDP نوع اول - جریان ورودی دوره فعلی به عنوان

متغیر حالت و فرض وابستگی درونی جریان‌ها

۲- مدل SDP نوع دوم - جریان ورودی دوره فعلی به عنوان

متغیر حالت و فرض عدم وابستگی درونی جریان‌ها

۳- مدل SDP نوع سوم - جریان ورودی دوره قبلی به عنوان

متغیر حالت و فرض وابستگی درونی جریان‌ها

۴- مدل SDP نوع چهارم - فرض عدم وابستگی درونی

جریان‌ها

همچنین در تمامی مدل‌ها حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره  $t$  به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است. رابطه بازگشتی مدل SDP نوع اول به صورت زیر خواهد بود:

$$f_t^n(S_t, Q_t) = \min_{S_{t+1}} \left[ Loss_t + \sum_{Q_{t+1}|Q_t} P_{Q_{t+1}|Q_t} \cdot f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1}, Q_{t+1}) \right] \quad (5)$$

$$\forall S_t, \forall Q_t, \forall S_{t+1} \text{ feasible}$$

در اینجا  $S_{t+1}$  متغیر تصمیم حجم ذخیره مخزن در انتهای دوره  $t$  است.  $Loss_t$  و  $P_{Q_{t+1}|Q_t}$  به ترتیب تابع خسارت سیستم در دوره  $t$  و احتمال وقوع شرطی جریان  $Q_{t+1}$  در دوره  $t+1$  به شرط وقوع جریان  $Q_t$  در دوره  $t$  می‌باشند.  $f_t^n(S_t, Q_t)$  مجموع مقدار مورد انتظار خسارت سیستم در  $n$  دوره آخر با ذخیره ابتدای دوره  $S_t$  و جریان ورودی دوره فعلی برابر  $Q_t$  است.

در روند برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک، فرض می‌شود که جریان‌های ورودی گسسته‌سازی شده و احتمال‌های انتقالی این جریان‌ها از یک فرآیند مارکوفی تبعیت نموده و تنها تابعی از دوره قبل باشند. همچنین، میزان این احتمال‌ها در سیکل‌های مختلف تغییر نموده و به همراه تابع هدف از یک سال به سال بعد ثابت بمانند.

چنانچه بین جریان‌های ورودی در دو دوره متوالی همبستگی وجود نداشته یا چنین فرض شود، احتمال انتقالی شرطی تبدیل به احتمال

بیشتر انرژی غیر پیک در بهار و تابستان اتفاق می‌افتد که پیش‌بینی جریان رودخانه، اطلاعات مفیدی را در دسترس قرار می‌دهد. با پیش‌بینی‌های بلندمدت جریان رودخانه می‌توان محدودیت‌های خروجی از ذخیره را در اواخر تابستان و پاییز آزاد کرد و انرژی غیرپیک را به طور متوسط با کاهش سرریز، افزایش داد و این موجب افزایش سود سالانه حاصل از فروش انرژی غیر پیک بدون آنکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مصارف دیگر سیستم بگذارد، می‌شود (Hamlet et al., 2002). از تحقیقی که بر روی تاثیر دقت، طول دوره و روش‌های مختلف پیش‌بینی جریان در بهره‌برداری از مخزن مطالعه کرده‌اند، می‌توان (Yeh et al. (1982) و Mishalani and Palmer (1988) را نام برد.

در این مطالعه انواع مدل‌های برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک و برنامه‌ریزی پویای قطعی برای سد مخزنی چند منظوره در ارائه شده است. در مدل‌های SDP برحسب نوع مدل از متغیر حالت هیدرولوژیکی جریان ورودی دوره فعلی و یا دوره قبلی استفاده گردیده و سیاست‌های بهینه با توجه به تابع هدف به دست آمده‌اند. سپس برای بررسی سیاست‌ها و مقایسه مدل‌ها، از یک مدل شبیه‌سازی استفاده شده و در مدل‌هایی که از متغیر حالت جریان ورودی دوره فعلی استفاده می‌کنند، با استفاده از جریان‌های پیش‌بینی شده شبیه‌سازی به‌هنگام با فرض امکان به‌هنگام سازی در آخر دوره صورت گرفته و تاثیر دقت پیش‌بینی و انواع روش‌های مختلف پیش‌بینی جریان مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌های بهره‌برداری

در این بخش به طرح و معرفی انواع مدل‌های SDP و مدل DP بهره‌برداری از مخازن که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند، پرداخته می‌شود. به طور کلی در سیستم‌های دارای مخزن، چند رابطه اصلی حاکم است. برای شرح این روابط فرض کنید  $S_t$ ،  $Q_t$ ،  $E_t$  و  $R_t$  به ترتیب حجم ذخیره ابتدای دوره  $t$ ، جریان ورودی، میزان تبخیر خالص و خروجی در طول آن دوره باشند. حجم ذخیره انتهای دوره  $t$  یا ابتدای دوره  $t+1$ ،  $S_{t+1}$ ، از رابطه پیوستگی به شرح زیر به دست می‌آید:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - E_t \quad (1)$$

همچنین حدود ذخیره مخزن باید به صورت زیر رعایت شود:

$$S_{t+1} \leq S \max_{t+1} \quad (2)$$

$$S_{t+1} \geq S \min_{t+1} \quad (3)$$

در این روابط  $S \max_{t+1}$  و  $S \min_{t+1}$  به ترتیب حجم ذخیره حداکثر و حداقل در انتهای دوره  $t$  می‌باشند. از رابطه (۱) بدیهی است که حجم ذخیره انتهای دوره باید برابر و یا کمتر از حداکثر ممکن آب موجود در مخزن در انتهای دوره باشد.

و بالاخره، در مدل DP به طور معمول از جریان‌های میانگین هر دوره استفاده می‌شود که رابطه بازگشتی آن به صورت زیر است

$$f_t^n(S_t) = \underset{S_{t+1}}{\text{Min}} [Loss_t + f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1})] \quad (9)$$

$\forall S_t, \forall S_{t+1} \text{ feasible}$

در مدل‌های SDP نوع اول و دوم و DP، اگر میزان حجم ذخیره انتهایی دوره خارج از حد مجاز قرار گیرد، آن حالت غیرمجاز بوده و از روند محاسبات حذف می‌گردد. در مدل‌های SDP نوع اول و دوم به دلیل اینکه متغیر حالت هیدرولوژیکی، جریان ورودی دوره فعلی می‌باشد، در بهره‌برداری واقعی لازم است تا جریان ورودی دوره فعلی پیش‌بینی شود. ولی در مدل نوع سوم به علت در نظر گرفتن جریان ورودی دوره قبل به عنوان متغیر حالت هیدرولوژیکی و در مدل نوع چهارم به دلیل آنکه حجم ذخیره ابتدای دوره تنها متغیر حالت مدل است، نیازی به پیش‌بینی جریان نمی‌باشد. در مدل‌های SDP، نوع متغیر تصمیم تأثیری در سیاست بهینه به دست آمده ندارد. اگر در SDP نوع اول و دوم  $S_{t+1}$  را متغیر تصمیم در نظر بگیریم، از حجم محاسبات بسیار کاسته می‌شود. اما در نوع سوم و چهارم با اینکه حجم محاسبات بالا می‌رود،  $R_t$  باید متغیر تصمیم باشد و این به علت آن است که اگر  $S_{t+1}$  در این دو مدل متغیر تصمیم باشد، برای به دست آوردن جریان خروجی در بهره‌برداری واقعی دوباره احتیاج به پیش‌بینی جریان پیش می‌آید.

در تمامی مدل‌ها رابطه کلی تابع خسارت به صورت زیر است:

$$Loss_t = W_{11} \cdot (R_t - TD_t)^2 + W_{12} \cdot (R_t - TD_t)^2 + W_{21} \cdot (S_t - TS_t)^2 + W_{22} \cdot (S_t - TS_t)^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{if } R_t \leq TD_t & \quad \text{if } R_t > TD_t \\ \text{if } S_t \leq TS_t & \quad \text{if } S_t > TS_t \end{aligned}$$

در این رابطه  $W$  وزنی است که برای هر بخش از تابع خسارت می‌تواند متفاوت باشد. در این مقاله تمامی وزن‌ها مساوی و برابر یک فرض شده‌اند.  $TD_t$  میزان خروجی مطلوب در دوره  $t$  می‌باشد که برابر نیاز در نظر گرفته شده و  $TS_t$  میزان حجم ذخیره مطلوب در ابتدای دوره  $t$  است.  $R_t$  میزان خروجی در دوره  $t$  و  $S_t$  حجم ذخیره ابتدای دوره  $t$  می‌باشد. در مدل‌های SDP نوع سوم و چهارم اگر حجم ذخیره انتهایی دوره در نواحی کمبود یا سرریز قرار بگیرد، خسارت بیشتری در نظر گرفته می‌شود تا از انتخاب شدن این حالت‌ها تا حد امکان جلوگیری کند.

غیرشرطی شده و رابطه بازگشتی SDP نوع دوم به صورت زیر در می‌آید:

$$f_t^n(S_t, Q_t) = \underset{S_{t+1}}{\text{Min}} \left[ Loss_t + \sum_{Q_{t+1}} P_{Q_{t+1}} \cdot f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1}, Q_{t+1}) \right] \quad (6)$$

$\forall S_t, \forall Q_t, \forall S_{t+1} \text{ feasible}$

در این رابطه  $P_{Q(t+1)}$  احتمال وقوع جریان  $Q(t+1)$  در دوره  $t+1$  است.

در صورتی که برای متغیر حالت هیدرولوژیکی از جریان ورودی دوره قبل به جای جریان ورودی دوره فعلی استفاده شود، رابطه بازگشتی SDP نوع سوم به صورت زیر خواهد بود:

$$f_t^n(S_t, Q_{t-1}) = \underset{R_t}{\text{Min}} \left[ \sum_{Q_t} P_{Q_t|Q_{t-1}} \cdot [Loss_t + f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1}, Q_t)] \right] \quad (7)$$

$\forall S_t, \forall Q_{t-1}, \forall R_t$

در اینجا  $R_t$  متغیر تصمیم میزان برداشت در طول دوره  $t$  بوده و  $P_{Q_t|Q_{t-1}}$  احتمال وقوع شرطی جریان  $Q_t$  در دوره  $t$  به شرط وقوع جریان  $Q_{t-1}$  در دوره  $t-1$  است. همچنین،  $f_t^n(S_t, Q_{t-1})$  مجموع مقدار مورد انتظار خسارت سیستم در  $n$  دوره آخر با ذخیره ابتدای دوره  $S_t$  و جریان ورودی دوره قبل  $Q_{t-1}$  می‌باشد.

در حالت مستقل بودن جریان‌ها در دوره فعلی و قبلی، احتمال انتقال شرطی به احتمال غیرشرطی تبدیل شده و رابطه بازگشتی SDP نوع چهارم به صورت زیر خواهد بود:

$$f_t^n(S_t) = \underset{R_t}{\text{Min}} \left[ \sum_{Q_t} P_{Q_t} \cdot [Loss_t + f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1})] \right] \quad (8)$$

$\forall S_t, \forall R_t$

که  $f_t^n(S_t)$  مجموع مقدار مورد انتظار خسارت سیستم در  $n$  دوره باقیمانده، شامل دوره  $t$ ، با ذخیره ابتدای دوره  $S_t$  بوده و  $P_{Q_t}$  احتمال وقوع جریان  $Q_t$  در دوره  $t$  می‌باشد.

در دو مدل SDP نوع سوم و چهارم در مواقعی که حجم ذخیره انتهایی دوره محاسبه شده از رابطه پیوستگی، در نواحی غیرمجاز یعنی ناحیه‌های سرریز یا کمبود قرار بگیرد، حجم ذخیره انتهایی دوره اصلاح می‌شود.

### ۳- معیارهای ارزیابی

در ارزیابی نتایج از معیارهای متفاوتی از قبیل اعتمادپذیری و آسیبپذیری استفاده شده است. در اینجا جهت اجتناب از طولانی شدن مطلب تنها به تعریف دو مورد فوق بسنده می‌شود. برای شرح کاملی از این معیارها می‌توانید به Hashimoto et al. (1982) و یا برهانی (الف ۱۳۸۱) مراجعه کنید.

اعتمادپذیری<sup>۳</sup>،  $\alpha$ ، به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای سنجش عملکرد سیستم، عبارت است از احتمال وقوع حالت‌های مطلوب، رضایتبخش، یا موفق در یک دوره زمانی مشخص که توسط رابطه زیر بیان می‌شود

$$\alpha = \text{Pr ob}[X_t \in S_t] \quad (12)$$

S وضعیت مطلوب یا موفق<sup>۴</sup> را نشان می‌دهد. وضعیت مطلوب زمانی رخ می‌دهد که سیستم نیازها را به طور کامل تامین نماید. در مقابل، چنانچه سیستم نتواند در یک دوره بخشی یا تمامی نیاز را تامین کند، یک دوره شکست و یا غیرمطلوب و یا نارضایتبخش قلمداد می‌شود. وضعیت شکست<sup>۵</sup> را معمولاً با F نشان می‌دهند.

آسیب‌پذیری<sup>۶</sup>، میزان و بزرگی یک شکست را نشان می‌دهد. در مواردی ممکن است احتمال وقوع شکست پایین باشد، اما میزان شکست در بعضی ماه‌ها بسیار بالا و در حد خطرناکی قرار گیرد. عملاً چندین ماه شکست با میزان کم مطلوبتر از شکست در تعداد کمتری از ماه‌ها با میزان بالاست. بدین جهت محاسبه پارامتر آسیب‌پذیری بسیار اهمیت پیدا می‌کند. غالباً آسیب‌پذیری و اعتمادپذیری در تقابل با یکدیگرند. بدین ترتیب که کاهش آسیب‌پذیری با افزایش اعتمادپذیری همراه نیست. بنابر این یافتن یک موازنه منطقی بین این دو در تعیین سیاست بهینه مهم است.

اگر  $\lambda_t$  را مقدار آسیب‌پذیری حداکثر در دوره t تعریف کنیم، آسیب‌پذیری میانگین  $\lambda_{avg}$  و حداکثر  $\lambda_{max}$  در کل دوره از روابط زیر محاسبه خواهد شد:

$$\lambda_t = \begin{cases} \frac{[\max(TD_t - R_{it}), i = 1, 2, \dots, T]}{TD_t} & \text{if } > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$\lambda_{avg} = \frac{\sum_{t=1}^n \lambda_t}{n} \quad (14)$$

$$\lambda_{max} = \text{Max}(\lambda_t) \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

که n تعداد دوره‌ها در یک سال،  $TD_t$  مقدار نیاز در دوره t ام،  $R_{it}$  مقدار تخصیص در دوره t ام از سال ام و T تعداد کل سال‌های شبیه‌سازی می‌باشد.

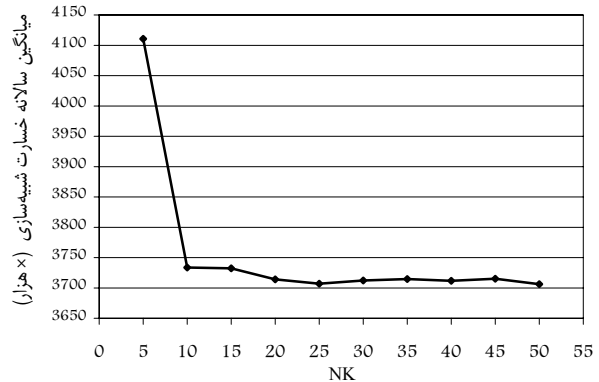
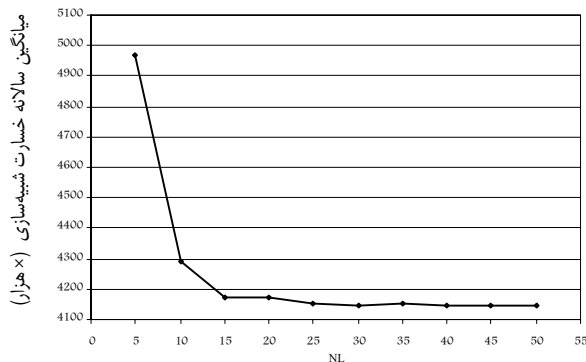
### ۴- مطالعه موردی

به منظور بررسی و مقایسه روش‌های مختلف در ارتباط با موضوع این مقاله از داده‌ها و مشخصات سیستم چندمنظوره سد مخزنی دز استفاده گردیده است. سد دز در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر دزفول و ۲۲ کیلومتری اندیمشک بر روی شاخه اصلی رودخانه دز و در ۱۰۰ کیلومتری بالادست محل اتصال دو رودخانه دز و کارون احداث گردیده است. حجم کل مخزن ۳۴۶۰ میلیون مترمکعب در تراز ۳۵۲ متر بوده و اهداف آن عبارت‌اند از: مهار رودخانه دز برای تامین آب زراعتی دشت‌های بین اندیمشک و هفت‌تپه با وسعتی در حدود ۱۲۵۰۰۰ هکتار، تولید ۵۲۰ مگاوات برق، جلوگیری از طغیان‌های رودخانه و خسارت‌های ناشی از آن و تامین آب مورد نیاز صنایع عظیم خوزستان. آمار ماهانه ورودی به مخزن از سال آبی ۳۶-۱۳۳۵ الی ۷۷-۱۳۷۶ بمدت ۴۲ سال موجود می‌باشد. ولی به غیر از بخش اول بررسی‌ها (شکل‌های ۱ تا ۴ و جدول ۲) در سایر بخش‌های این مقاله، به دلیل محدودیت تحقیقات پیشین در زمینه پیش‌بینی‌های صورت گرفته در حوزه، از آمار سال‌های آبی ۵۱-۱۳۵۰ الی ۷۶-۱۳۷۵ به مدت ۲۶ سال استفاده شده است. سایر اطلاعات نظیر تبخیر، نیاز آبی، ذخیره مطلوب و غیره از گزارش‌های مختلف مهندسی مشاور و شرکت تماب جمع‌آوری شده و در جدول (۱) نشان داده شده است (جهت اطلاع بیشتر به افتخارجوادی (۱۳۸۲) مراجعه کنید).

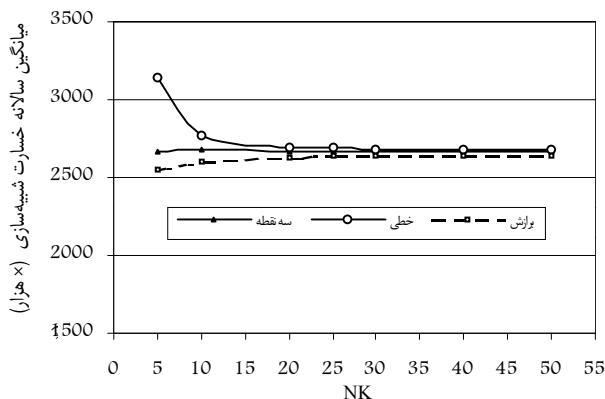
برای کاربرد مدل‌ها ابتدا تغییرات میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی نسبت به تعداد متفاوت شاخص‌ها در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) بررسی شده و با توجه به حداقل نسبی خسارت و زمان محاسبات، تعداد مناسب شاخص‌های گسسته‌سازی انتخاب گردیده است. باید توجه نمود که این بخش از مطالعات صرفاً با استفاده از مدل SDP نوع اول صورت گرفته است؛ لکن بررسی بیشتر نشان می‌دهد که نتایج آن قابل تعمیم به سایر روش‌ها نیز می‌باشد. برای گسسته‌سازی جریان‌های ورودی، از روش فراوانی مساوی استفاده شده و پس از تحلیل حساسیت بر روی تعداد کلاس‌های جریان ورودی، مشخص شده که از تعداد ۵ شاخص جریان به بعد روند کاهش خسارت شیب ملایم‌تری پیدا کرده و با افزایش شاخص‌ها، زمان محاسبات زیاد می‌شود. لذا جریان‌ها در هر دوره در ۵ کلاس دسته‌بندی شده‌اند. برای گسسته‌سازی حجم ذخیره روش موران به کار رفته و میزان ذخیره از حجم حداقل بهره‌برداری تا حجم ذخیره حداکثر برای کنترل سیل در دوره‌های مختلف به ۲۵ شاخص گسسته شده است. در مدل‌های نوع سوم و چهارم هم میزان کل برداشت از ۰ تا ۳۰۰۰ میلیون مترمکعب به ۳۰ شاخص گسسته شده‌اند.

جدول ۱ - برخی از اطلاعات ورودی مورد نیاز مدل

سالانه	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	متوسط ۴۲ ساله جریان های ورودی (mcm)
۸۷۹۹/۹	۲۴۲/۴	۳۳۱/۳	۵۰۱/۵	۸۴۸/۸	۱۵۳۸/۴	۱۷۵۵/۴	۱۱۶۶	۸۲۵/۷	۵۷۱/۷	۵۱۶/۱	۳۰۱/۶	۲۰۰/۴	
۲۱۰۸/۳	۲۷۵/۴	۲۸۰	۲۶۸/۷	۲۷۲/۷	۲۰۸/۶	۱۴۰	۸۵	۷۵/۳	۶۹/۷	۸۸/۱	۱۳۴	۲۱۰/۸	ارتفاع تبحیر (mm)
۴۸۷/۴	۰	۰	۰	۱	۱۷/۲	۷۱/۸	۶۸/۶	۱۰۰/۷	۱۰۳/۵	۸۱	۴۱/۲	۲/۴	ارتفاع بارش (mm)
۶۳۳۳	۶۸۷	۸۴۷	۸۴۳	۷۴۳	۶۵۸	۶۱۳	۴۵۸	۲۵۶	۱۸۴	۲۰۶	۳۵۷	۴۷۱	نیاز کل (mcm)
	۲۷۷۹	۳۰۹۰	۳۲۶۴	۳۳۲۰	۳۹۹۱	۳۴۶۲	۲۰۴۲	۱۸۶۲	۱۸۲۰	۱۸۳۳	۲۰۳۷	۲۳۹۶	حجم ذخیره مطلوب (mcm)
	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	حجم ذخیره حداقل (mcm)
	۳۴۶۰	۳۴۶۰	۳۴۶۰	۳۴۶۰	۳۱۳۳	۲۶۲۵	۲۶۲۵	۲۶۲۵	۲۷۷۹	۳۳۶۹	۳۴۶۰	۳۴۶۰	حجم ذخیره حداکثر (mcm)



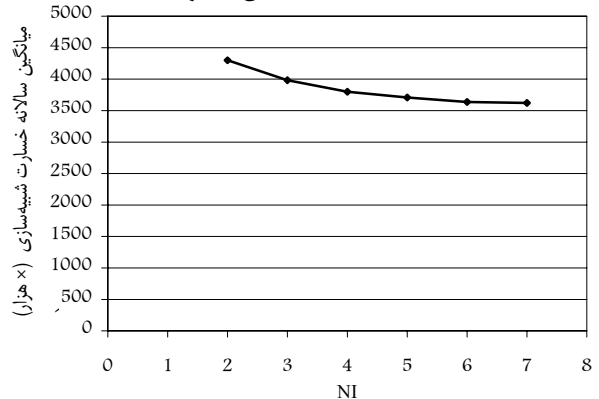
شکل ۳- منحنی تغییرات میانگین سالانه خسارت شبیه سازی نسبت به تعداد شاخص میزان برداشت



شکل ۴- منحنی تغییرات خسارت سالانه مورد انتظار در بهینه سازی نسبت به تعداد شاخص ذخیره

در نیابایی خطی استفاده شود. راه حل دوم آن است که با توجه به تابع هدف مورد مطالعه که یک تابع غیرخطی درجه دوم است، از هر سه نقطه یک منحنی عبور داده شود و برای یافتن مقدار بازگشتی در نقطه مزبور، از آن معادله استفاده شود. در راه حل سوم، بر تمام نقاط گسسته سازی شده، یک معادله درجه دوم برازش داده شده و از آن معادله برای یافتن مقدار بازگشتی نقطه ذکر شده، استفاده می شود. بدین منظور مدل SDP نوع سوم با تعداد شاخص های ذخیره مختلف با سه روش ذکر شده اجرا شده و مقادیر خسارت سالانه مورد انتظار در بهینه سازی به دست آمده اند. همان طور که در شکل (۴) مشاهده

شکل ۱- منحنی تغییرات میانگین سالانه خسارت شبیه سازی نسبت به تعداد شاخص ذخیره



شکل ۲- منحنی تغییرات میانگین سالانه خسارت شبیه سازی نسبت به تعداد شاخص جریان ورودی

اگر فواصل گسسته سازی متغیرهای حالت و تصمیم، مشابه در نظر گرفته نشود و یا تبحیر در معادلات مدل های نوع سوم و چهارم، که متغیر تصمیم در آنها میزان برداشت در دوره t می باشد، وارد گردد ممکن است گاهی حجم ذخیره انتهای دوره محاسبه شده از رابطه پیوستگی برابر با حجم های ذخیره گسسته سازی شده ابتدای دوره بعدی نشود و حجم ذخیره انتهای دوره محاسبه شده، بین دو حجم ذخیره گسسته سازی شده متوالی ابتدای دوره بعد قرار بگیرد، در این صورت باید از یک نوع روش در نیابایی برای محاسبه مقادیر بازگشتی استفاده کرد. یک راه حل این است که در حد فاصل هر دو نقطه، از

می‌شود، در تعداد کم شاخص‌های ذخیره اختلاف میان خسارت به دست آمده از درونیایی خطی با دو مورد دیگر زیاد است. ولی با افزایش تعداد شاخص‌های ذخیره، این اختلاف کم می‌شود. از آنجا که در تعداد ۲۵ شاخص ذخیره، این اختلاف بسیار ناچیز است، برای سادگی محاسبات در ادامه از درونیایی خطی در مدل‌های SDP نوع سوم و چهارم در مواقع لزوم استفاده می‌شود. بدیهی است نتایج فوق محدود به سد مخزنی دز تحت شرایط تعریف شده بوده و ممکن است در مخازن دیگر و یا با تغییر شرایط نتایج متفاوتی بدست آید.

در مدل‌های SDP نوع سوم و چهارم که متغیر تصمیم میزان برداشت می‌باشد، حدود پایین و بالای میزان برداشت در مدل بهینه‌سازی با توجه به آمار تاریخی میزان کل خروجی، در ماه‌های مختلف متفاوت در نظر گرفته شده و برداشت بین این مقادیر حداقل و حداکثر گسسته‌سازی شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد نتایج به دست آمده از قبیل میانگین خسارت، سرریز، کمبود و انرژی تولیدی تفاوت چندانی با حالتی که در همه ماه‌ها میزان برداشت به طور ثابت بین صفر تا ۳۰۰۰ میلیون مترمکعب گسسته‌سازی شده، نمی‌کند؛ بلکه آسیب‌پذیری حداکثر ماهانه اندکی افزایش نیز نشان می‌دهد. علت این افزایش می‌تواند کم شدن محدوده گسسته‌سازی میزان برداشت در ماه‌های مختلف در حالت حدود متغیر باشد؛ زیرا در این صورت امکان حذف حالت‌های مناسب‌تر وجود دارد. لذا در مدل‌ها، حدود میزان برداشت در ماه‌های مختلف یکسان در نظر گرفته شده است.

در جدول (۳) نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مدل‌های مختلف ارایه شده است. به طوری که در این جدول از نتایج دراز مدت شبیه‌سازی با آمار تاریخی (پیش‌بینی کامل) مشاهده می‌شود در مجموع SDP نوع اول و دوم در غالب معیارها نسبتاً برتر از مدل‌های SDP نوع

سوم و چهارم و DP عمل می‌کنند. میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی، سرریز و کمبود نیاز آبی این دو مدل بهتر از مدل‌های دیگر است با این استثنا که مدل SDP نوع چهارم دارای کمبود آبی کمتری است. لکن با دقت در جدول مشخص می‌شود که هزینه این برتری، تولید انرژی برقی کمتر توسط این مدل است. همچنین، مدل‌های SDP نوع اول و دوم کمتر در وضعیت تخلیه یا پر بودن کامل مخزن قرار می‌گیرند. اما، به طوری که قبلاً نیز اشاره شد، مدل‌های SDP نوع اول و دوم در عمل نیاز به پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن دارند. بنابراین، نتیجه‌گیری فوق مبتنی بر قطعی فرض نمودن جریان‌های ورودی بوده و غیر واقعی است. زیرا در عمل هیچ روشی وجود ندارد که بتواند جریان ماهانه را با دقت و صد درصد پیش‌بینی کند. بررسی بیشتر جدول (۳) و مقایسه میانگین خسارت‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در مرحله بهینه‌سازی، مدل DP برآورد بسیار پایین‌تری از خسارت نسبت به مرحله شبیه‌سازی دارد. نسبت خسارت شبیه‌سازی به بهینه‌سازی در مدل DP برابر ۵/۴ است در حالی که در سایر مدل‌ها این نسبت کمتر از نصف این مقدار می‌باشد. مدل‌های SDP نوع ۱ الی ۴ به ترتیب با نسبت ۱/۶، ۱/۸، ۱/۹، و ۲/۰ برآورد نسبتاً مناسب‌تری از خسارت در مرحله بهینه‌سازی ارایه می‌کنند. در واقع، در بین خسارت‌های حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی، مدل DP کمترین مقدار را نشان می‌دهد در حالی که در شبیه‌سازی دراز مدت با آمار تاریخی بیشترین مقدار خسارت را دارا است. این نکته نشان می‌دهد که مدل DP برآورد دست بالا و بسیار خوشبینانه‌ای در مرحله بهینه‌سازی دارد. علاوه بر آن، مدل DP دارای بیشترین مقدار کمبود میانگین در بین مدل‌های دیگر است. آسیب‌پذیری حداکثر این مدل نیز بالاتر از سایر مدل‌ها می‌باشد.

جدول ۲- مقایسه نتایج بهره‌برداری مدل‌ها با بکار بردن حدود ثابت و متغیر برای میزان برداشت در ماه‌های مختلف

SDP4		SDP3		نتایج بهره‌برداری
حدود متغیر	حدود ثابت	حدود متغیر	حدود ثابت	
۴/۶۶۲	۴/۶۸۴	۴/۱۴۲	۴/۱۴۳	میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (۱۰ <sup>۶</sup> )
۶۱۳	۶۱۶	۶۲۱	۶۲۵	میانگین سالانه سرریز (mcm)
۶۵۸	۶۵۶	۶۹۲	۶۷۷	میانگین سالانه کمبود نیاز آبی (mcm)
۲۶۴۷	۲۶۳۹	۲۶۲۸	۲۶۲۸	میانگین سالانه انرژی تولیدی (GWH)
۰/۷۹۸	۰/۷۲۲	۰/۷۱۹	۰/۶۸۶	آسیب‌پذیری حداکثر ماهانه در تامین نیاز آبی

جدول ۳ - مقایسه نتایج بهره‌برداری مدل‌ها در سد مخزنی دز

DP	SDP4	SDP3	SDP2	SDP1	نتایج بهره‌برداری
۱/۰۸	۲/۶۱	۲/۶۹	۲/۵۱	۲/۹۱	خسارت سالانه مورد انتظار بهینه‌سازی (۱۰ <sup>۶</sup> )
۵/۷۹	۵/۳۱	۵/۰۶	۴/۵۹	۴/۵۴	میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (۱۰ <sup>۶</sup> )
۵/۴	۲	۱/۹	۱/۸	۱/۶	نسبت خسارت شبیه‌سازی به بهینه‌سازی
۵۸۳	۴۳۱	۴۵۶	۴۴۱	۴۴۶	میانگین سالانه کمبود نیاز آبی (mcm)
۲۸۷۶	۲۸۸۵	۲۸۶۷	۲۹۱۵	۲۹۰۴	میانگین سالانه انرژی تولیدی (GWH)
۹۶۵	۹۶۶	۹۵۸	۹۶۷	۹۶۱	میانگین سالانه انرژی پیک تولیدی (GWH)
۶۲۵	۷۶۱	۷۷۵	۶۲۴	۶۰۰	میانگین سالانه سرریز (mcm)
۰/۷۶۹	۰/۷۵۳	۰/۷۲۴	۰/۷۲۴	۰/۷۳۴	اعتماد پذیری زمانی ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۹۰۸	۰/۹۳۲	۰/۹۲۸	۰/۹۳	۰/۹۲۹	اعتماد پذیری کمی ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۲۷۸	۰/۳۲۵	۰/۳۲۶	۰/۲۹۱	۰/۳۳۷	برگشت پذیری ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۲۵۸	۰/۲۴۱	۰/۳۳	۰/۲۳۶	۰/۲۷۲	آسیب پذیری میانگین ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۸۹۲	۰/۵۸۲	۰/۵۸۲	۰/۴۷۵	۰/۵۸۴	آسیب پذیری حداکثر ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۰۴۷	۰/۰۲۴۱	۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۱۹	۰/۰۲۱۹	مجموع نسبی یکطرفه مربع انحرافات از نیاز مطلوب ماهانه
۷/۰۵	۰/۹۶	۰/۳۲	۰	۰	درصد زمانی خالی بودن مخزن به صورت ماهانه
۱۲/۸	۲۵	۲۴/۷	۱۰/۶	۱۰/۹	درصد زمانی پر بودن مخزن به صورت ماهانه

### ۵- ارزیابی خطای پیش‌بینی

روش، طیفی مناسب از عملکردها را در برگرفته و نتایج آن‌ها تحلیل جامعی برای ارزیابی رویه‌های مختلف پیش‌بینی بدست می‌دهد. مضافاً، در این تحقیق برای بررسی و تحلیل تاثیر خطای پیش‌بینی از دو رویه پیش‌بینی مصنوعی و کاربردی استفاده شد. در رویه اول، سری‌های مختلف پیش‌بینی مصنوعی جریان رودخانه با بکارگیری رابطه (۱۵) و اعمال کنترل بر روی خطاها تولید می‌شود (Yeh et al. (1982) و Mishalani and Palmer (1988). در رویه دوم، با استفاده از نتایج تحقیقات پیشین بر روی حوزه آبریز دز ضاهرپور (۱۳۸۱) و برهانی (ب ۱۳۸۱) عملکرد روش‌های پیش‌بینی کاربردی نظیر مدل‌های برفایی و آریما بررسی می‌گردد. در واقع روش اول یک روش غیرکاربردی است که صرفاً جهت تحلیل و روشن نمودن زوایای مختلف مسئله استفاده شده است. در این روش با اعمال کنترل بر کیفیت و دقت پیش‌بینی‌ها، تحلیل و ارزیابی سیستم با استفاده از مدل شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد

$$F_j = I_j + \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot I_j \quad (16)$$

در این رابطه،  $\sigma$  ضریب عدم قطعیت پیش‌بینی است که مقدار صفر آن بیانگر پیش‌بینی کامل می‌باشد.  $I_j$  و  $F_j$  به ترتیب جریان تاریخی و پیش‌بینی شده در دوره  $j$  می‌باشند،  $\varepsilon_j$  عدد تصادفی در ماه  $j$ ام است که دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس واحد می‌باشد. (Lettenmaier (1984) شاخص ساده‌ای بنام ضریب

بررسی زوایای مختلف مسئله در مدل‌های شبیه‌سازی از چهار روش مختلف برای تعیین تاثیر پیش‌بینی‌ها استفاده شد. ۱- شبیه‌سازی بهنگام با جریان‌های پیش‌بینی شده ۲- شبیه‌سازی با جریان‌های پیش‌بینی بدون بهنگام‌سازی ۳- شبیه‌سازی با میانگین ماهانه جریان‌های تاریخی (پیش‌بینی صفر) و ۴- شبیه‌سازی با آمار تاریخی (پیش‌بینی صد درصد). در این مطالعه در شبیه‌سازی بهنگام، در ابتدای هر ماه جریان ورودی به مدل مورد نظر پیش‌بینی گردیده و برای تعیین سیاست بهره‌برداری آن دوره مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس، در انتهای آن ماه با توجه به ورودی واقعی (جریان تاریخی) شرایط انتهایی یا ابتدای دوره بعد اصلاح می‌شود و بدین ترتیب این بهنگام‌سازی برای کل ماه‌های شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. این رویه، روند کلی مدل‌های شبیه‌سازی همراه با پیش‌بینی را نشان می‌دهند. در روش دوم، مشابه روش فوق عمل می‌شود با این تفاوت که بهنگام‌سازی بر اساس شرایط واقعی صورت نمی‌پذیرد. بدین ترتیب، خطاهای مدل در هر ماه اصلاح نشده و بر روی هم انباشته می‌شود. در روش سوم، سیستم فاقد هرگونه مدل پیش‌بینی است و به ناچار از میانگین ماهانه جریان‌های تاریخی در هر دوره استفاده می‌کند؛ لکن مشابه روش اول بهنگام‌سازی صورت می‌پذیرد. بالاخره در روش چهارم فرض بر داشتن یک مدل کامل است که پیش‌بینی‌های آن بدون خطا بوده و کاملاً منطبق بر ورودی‌های تاریخی می‌باشد. در این روش آمار تاریخی برابر ورودی‌های پیش‌بینی شده در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است چنین مدلی واقعیت خارجی ندارد. این چهار



پیش‌بینی،  $Cp$ ، برای محاسبه کیفیت پیش‌بینی جریان‌های ورودی معرفی نموده است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Cp = 1 - \frac{E(\tilde{X}_t - X_t)^2}{\sigma_{\Delta_t}^2} \quad (17)$$

که  $X_t$  و  $\tilde{X}_t$  به ترتیب جریان ورودی واقعی و پیش‌بینی شده در دوره  $t$  بوده و  $E(\cdot)$  تابع امید ریاضی می‌باشد.  $\sigma_{\Delta_t}^2$  واریانس جریان رودخانه برای گام زمانی مشابه است که از آمار ثبت شده به دست می‌آید و  $\Delta_t$  طول هر بازه زمانی است.

به طور معمول، ضریب پیش‌بینی از صفر تا یک تغییر می‌کند که عدد یک نشان دهنده پیش‌بینی کامل است و عدد صفر برای جریان‌های پیش‌بینی شده برابر میانگین جریان‌های تاریخی به دست می‌آید. البته ممکن است در مواردی به دلیل پیش‌بینی بسیار نامناسب که معمولاً حاصل ساختار غلط مدل است، ضریب پیش‌بینی منفی شود. در این موارد می‌توان ساختار مدل را اصلاح نموده و یا در نهایت از میانگین‌های درازمدت، با ضریب پیش‌بینی صفر، به جای جریان‌های پیش‌بینی شده استفاده نمود.

در این بررسی، مقدار  $\sigma$  از صفر تا  $0.90$  در رابطه  $\sigma$  تغییر داده شده و جریان‌های ورودی پیش‌بینی شده‌اند. در پیش‌بینی کامل ( $\sigma = 0$ )، ضریب پیش‌بینی برابر یک می‌باشد و با افزایش  $\sigma$  تا  $90$  درصد و کاهش دقت پیش‌بینی، ضریب پیش‌بینی کم شده و به مقدار  $4/33$ -

می‌رسد. به علت یکسان بودن روند دو مدل SDP نوع اول و دوم در نحوه مقایسه نتایج چهار نوع روش شبیه‌سازی با هم، نتایج مربوط به SDP نوع اول در حالت شبیه‌سازی با روش‌های مختلف در جدول (۴) و در حالت شبیه‌سازی با روش‌های ۱ و ۲ در شکل‌های (۵) الی (۱۰) به عنوان نمونه آورده شده است. شکل‌های (۵)، (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که با افزایش  $\sigma$  پارامترهایی نظیر میانگین سالانه خسارت، خطای تابع خسارت و خطای میزان خروجی افزایش می‌یابند و مقادیر آنها در شبیه‌سازی با جریان‌های پیش‌بینی شده (روش ۲) بیشتر از شبیه‌سازی بهنگام (روش ۱) است. خطای تابع خسارت و میزان خروجی از روابط زیر محاسبه شده و برابرند با اختلاف مقادیر شبیه‌سازی با جریان‌های پیش‌بینی و تاریخی.

$$ER_t = |R_{ot} - R_{ht}| \quad (18)$$

$$ELoss_t = |Loss_{ot} - Loss_{ht}| \quad (19)$$

$$Loss_{ot} = (R_{ot} - TD_t)^2 + (S_{ot} - TS_t)^2 \quad (20)$$

$$Loss_{ht} = (R_{ht} - TD_t)^2 + (S_{ht} - TS_t)^2 \quad (21)$$

که  $ER_t$  و  $ELoss_t$  به ترتیب خطای میزان برداشت و تابع خسارت می‌باشند. اندیس‌های  $o$  و  $h$  به ترتیب نشان‌دهنده محاسبات حاصل از شبیه‌سازی با جریان‌های پیش‌بینی و تاریخی می‌باشند. سایر علائم مشابه قبل است.

جدول ۴ - مقایسه نتایج شبیه‌سازی بهنگام با افزایش  $\sigma$  در مدل SDP نوع اول

روش ۴	روش ۳ میانگین تاریخی	روش ۱ (درصد افزایش $\sigma$ - ضریب پیش‌بینی)									نتایج بهره‌برداری
		۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	
$\sigma=0$		-۴/۳۲	-۲/۳۴	-۲/۴۱	-۱/۵۵	-۰/۷۸	-۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۷۱	۰/۹۳	
$Cp=1$											
۴/۵۴	۶/۰۵	۶/۶۷	۶/۲۹	۶/۰۱	۵/۹	۵/۸۹	۵/۶۷	۵/۳۴	۵/۰۱	۴/۶۱	میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی ( $10^6$ )
۴۴۶	۶۳۱	۸۹۱	۸۱۹	۷۸۹	۷۷۷	۷۶۴	۷۰۷	۶۳۱	۵۷۳	۴۷۳	میانگین سالانه کمبود نیاز آبی (mcm)
۲۹۰۴	۲۸۵۵	۲۷۲۳	۲۷۵۴	۲۷۷۲	۲۷۷۷	۲۷۸۱	۲۸۰۶	۲۸۳۷	۲۸۵۸	۲۸۹۹	میانگین سالانه انرژی تولیدی (GWH)
۹۶۱	۹۶۴	۹۲۵	۹۳۲	۹۴۲	۹۴۳	۹۴۸	۹۵۱	۹۵۶	۹۵۶	۹۶۰	میانگین سالانه انرژی پیک تولیدی (GWH)
۶۰۰	۶۲۲	۶۱۱	۶۱۱	۶۰۳	۵۹۸	۵۹۸	۵۹۴	۶۰۱	۶۰۸	۵۶۹	میانگین سالانه سرریز (mcm)
۰/۷۳۴	۰/۷۷۹	۰/۶۴۴	۰/۶۵۴	۰/۶۵۷	۰/۶۴۷	۰/۶۵۱	۰/۶۷۳	۰/۶۸۹	۰/۶۸۶	۰/۷۲۴	اعتماد پذیری زمانی ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۹۲۹	۰/۹	۰/۸۵۹	۰/۸۷	۰/۸۷۵	۰/۸۷۷	۰/۸۷۹	۰/۸۸۸	۰/۹	۰/۹۰۹	۰/۹۲۵	اعتماد پذیری کمی ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۳۳۷	۰/۳۰۴	۰/۴۱۴	۰/۳۸۹	۰/۳۵۵	۰/۳۵۵	۰/۳۵۸	۰/۳۵۳	۰/۳۲	۰/۳۲۷	۰/۳۶	برگشت پذیری ماهانه در تامین نیاز آبی
۰/۲۷۲	۰/۲۵۶	۰/۲۲۸	۰/۲۷۲	۰/۲۶۷	۰/۲۶۰	۰/۲۶۹	۰/۲۳۱	۰/۳۷۷	۰/۳۵۹	۰/۳۲۹	آسیب‌پذیری میانگین ماهانه در تامین نیاز آبی (mcm)
۰/۵۸۴	۰/۸۹۶	۰/۹۷۳	۰/۹۷۳	۰/۹۲۵	۰/۹۲۵	۰/۹۰۴	۰/۹۰۴	۰/۹۰۴	۰/۷۷۹	۰/۷۷۹	آسیب‌پذیری حداکثر ماهانه در تامین نیاز آبی (mcm)
.	۶/۴۱	۵/۷۷	۵/۱۳	۴/۸۱	۴/۴۹	۴/۴۹	۳/۸۵	۳/۲۱	۱/۹۲	۰/۳۲	درصد زمانی خالی بودن مخزن به صورت ماهانه
۱۰/۹	۱۲/۵	۱۳/۷۸	۱۳/۷۸	۱۳/۴۶	۱۴/۱	۱۳/۷۸	۱۳/۱۴	۱۲/۸۲	۱۲/۸۲	۱۱/۲۲	درصد زمانی پر بودن مخزن به صورت ماهانه
.	۱۸۴۲	۲۴۵۸	۲۳۰۸	۲۱۳۶	۲۰۵۹	۱۹۸۱	۱۸۳۴	۱۵۶۵	۱۲۴۰	۷۷۸	میانگین سالانه خطای میزان خروجی (mcm)
.	۲/۵۵	۲/۰۵	۲/۶۹	۲/۳۸	۲/۲۳	۲/۲	۲	۱/۵۶	۱/۱۷	۰/۶۴	میانگین سالانه خطای تابع خسارت ( $10^6$ )

ادامه جدول ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی بهنگام با افزایش  $\sigma$  در مدل SDP نوع اول

روش ۲									نتایج بهره‌برداری
۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	
-۴/۳۲	-۳/۳۴	-۲/۴۱	-۱/۵۵	-۰/۷۸	-۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۷۱	Cp=۰/۹۳	
۲۰/۴۷	۱۷/۴۱	۱۴/۷۳	۱۲/۶۵	۱۰/۶	۸/۵۸	۶/۹۱	۵/۸۲	۴/۸۴	میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (۱۰ <sup>۶</sup> )
۱۱۶۴	۱۰۶۳	۱۰۰۱	۹۴۷	۸۱۹	۷۱۲	۶۴۲	۵۴۷	۴۵۶	میانگین سالانه کمبود نیاز آبی (mcm)
۲۵۸۰	۲۶۲۶	۲۶۶۷	۲۶۹۸	۲۷۵۳	۲۸۱۲	۲۸۵۸	۲۸۸۸	۲۹۱۷	میانگین سالانه انرژی تولیدی (GWH)
۸۹۸	۹۰۳	۹۰۸	۹۱۱	۹۲۳	۹۳۵	۹۴۳	۹۵۳	۹۵۹	میانگین سالانه انرژی پیک تولیدی (GWH)
۳۰۱۶	۲۶۲۶	۲۳۴۲	۱۹۴۸	۱۶۴۸	۱۳۰۶	۱۰۲۵	۸۵۷	۶۵۵	میانگین سالانه سرریز (mcm)
-۰/۵۹	-۰/۶۱۹	-۰/۶۳۱	-۰/۶۳۱	-۰/۶۵۱	-۰/۶۶۳	-۰/۷۰۲	-۰/۷۳۱	-۰/۷۴۷	اعتماد پذیری زمانی ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۸۱۶	-۰/۸۳۲	-۰/۸۴۲	-۰/۸۵	-۰/۸۶۹	-۰/۸۸۷	-۰/۸۹۸	-۰/۹۱۳	-۰/۹۲۸	اعتماد پذیری کمی ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۳۲	-۰/۳۲۸	-۰/۳۳۹	-۰/۳۲۲	-۰/۳۱۲	-۰/۳۰۴	-۰/۲۸	-۰/۳۲۲	-۰/۳۱۶	برگشت پذیری ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۷۹۱	-۰/۷۸۵	-۰/۷۸	-۰/۷۷۴	-۰/۷۴۱	-۰/۶۶۳	-۰/۵۶۱	-۰/۴۲۲	-۰/۳۵	آسیب‌پذیری میانگین ماهانه در تامین نیاز آبی (mcm)
-۰/۹۹۷	-۰/۹۹۵	-۰/۹۹۵	-۰/۹۹۵	-۰/۹۹۵	-۰/۹۹۵	-۰/۹۶۵	-۰/۷۲۸	-۰/۷۳۱	آسیب‌پذیری حداکثر ماهانه در تامین نیاز آبی (mcm)
۱/۲۸	۰/۶۴	۰/۶۴	-۰/۳۲	.	.	.	-۰/۲۲	.	درصد زمانی خالی بودن مخزن به صورت ماهانه
۱۹/۸۷	۱۹/۲۳	۱۸/۹۱	۱۶/۳۵	۱۵/۰۶	۱۲/۷۶	۱۲/۴۶	۱۲/۵	۱۲/۸۲	درصد زمانی پر بودن مخزن به صورت ماهانه
۶۶۶۱	۶۰۰۳	۵۲۵۱	۴۷۹۶	۴۱۷۰	۳۳۷۹	۲۶۳۳	۱۹۰۹	۱۱۱۳	میانگین سالانه خطای میزان خروجی (mcm)
۱۹/۰۴	۱۵/۹۸	۱۳/۲۶	۱۱/۱	۹/۰۲	۶/۸	۴/۷۱	۳/۰۵	۱/۴۸	میانگین سالانه خطای تابع خسارت (۱۰ <sup>۶</sup> )

شکل‌های (۵) تا (۱۰) بخوبی نقش بهنگام‌سازی را آشکار می‌کند. از طرف دیگر، به طوری که ملاحظه می‌شود روند کاهش کیفیت معیارهای ارزیابی با کاهش دقت پیش‌بینی‌ها در تمامی موارد قابل توجه بوده و قابل اغماض نیست. در ادامه با استفاده از پیش‌بینی‌های واقعی که در حوزه صورت گرفته است به نقش و تاثیر این‌گونه پیش‌بینی‌ها در مدل‌های بهره‌برداری پرداخته خواهد شد.

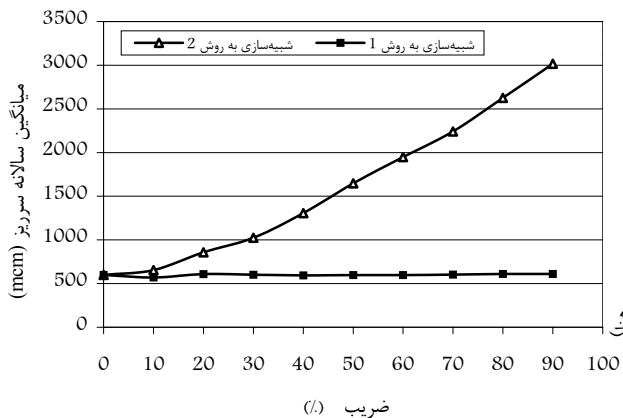
برای مقایسه روش‌های کاربردی پیش‌بینی جریان، از روش‌های پیش‌بینی برفابی و آریما که توسط ضاهرپور (۱۳۸۱) و برهانی (۱۳۸۱) بر روی حوزه آبریز در انجام شده است استفاده گردید. از آنجاکه در روش‌های برفابی در این حوزه، جریان تنها در ۶ ماه فروردین تا شهریور پیش‌بینی شده است، بنابراین، میانگین پارامترها و معیارهای ارزیابی برای ۶ ماه مذکور محاسبه و با پارامترهای روش پیش‌بینی آماری آریما و پیش‌بینی ۱۰۰ درصد جریان (آمار تاریخی) در همان ۶ ماه مقایسه شده‌اند (جدول ۵). در این قسمت از سه روش پیش‌بینی برفابی استفاده شده که عبارت‌اند از: روش مدل‌سازی متداول، روش تیسن و روش منطقه‌بندی تصاویر که ضرایب پیش‌بینی آنها به ترتیب عبارت‌اند از: ۰/۵۸، ۰/۵۵ و ۰/۵۹. روش آریما دارای ضریب پیش‌بینی ۰/۲۸ است. در شبیه‌سازی بهنگام در بین روش‌های مختلف، روش پیش‌بینی آریما که دارای ضریب پیش‌بینی کمتری است، بیشترین میانگین کمبود، انحراف نسبی یکطرفه، سرریز و خسارت و کمترین انرژی تولیدی ۶ ماهه را در هر دو مدل SDP نوع اول و دوم داشته و در مجموع نامناسبترین عملکرد را نشان می‌دهد. در بین سه روش برفابی، روش تیسن که ضریب پیش‌بینی کمتری نسبت به دو مدل دیگر برفابی دارد، دارای میانگین خسارت، کمبود و انحراف نسبی یکطرفه بیشتری می‌باشد و از نظر انرژی تولیدی و سرریز کم و بیش مانند دو مدل دیگر برفابی

میزان بالای این خطاها حاکی از ضعف مدل پیش‌بینی است. در حالتی که بدون بهنگام‌سازی از جریان‌های پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی استفاده شده است (روش ۲)، با افزایش مقدار  $\sigma$ ، در بیشتر موارد میانگین سالانه انرژی تولیدی کاهش یافته و میانگین سالانه کمبود و سرریز افزایش نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که روش دوم یک رویه عملی نبوده و تنها جهت مقایسه به کار رفته است تا مشخص شود که اگر بهنگام‌سازی صورت نگیرد و به جریان‌های واقعی توجهی نشده و تنها با جریان‌های پیش‌بینی شده شبیه‌سازی ادامه یابد، چه نتایجی حاصل خواهد شد. در شبیه‌سازی بهنگام (روش ۱) نیز با توجه به افزایش  $\sigma$ ، مانند حالت قبل، میانگین سالانه کمبود افزایش یافته و انرژی تولیدی کاهش می‌یابد. در اینجا سرریز دارای نوسان‌های کمی است. همچنین با افزایش  $\sigma$ ، مقادیر اعتمادپذیری کمی از ۰/۹۲۹ تا ۰/۸۵۹ کاهش و آسیب‌پذیری حداکثر ماهانه از ۰/۵۸۴ تا ۰/۹۷۳ افزایش یافته است.

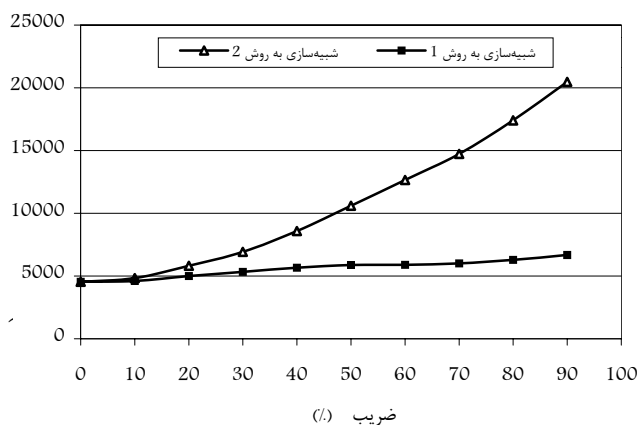
مقایسه روش سوم، که از میانگین‌های تاریخی جریان ماهانه به جای پیش‌بینی هر ماه استفاده نموده و دارای ضریب پیش‌بینی صفر است، با سایر نتایج نشان می‌دهد که میانگین خسارت سالانه این روش بسیار بالاتر از موارد مشابه در روش ۱ است. مضافاً آنکه این روش دارای آسیب‌پذیری حداکثر ماهانه نسبتاً بالایی می‌باشد که با دفعات بیشتری از تخلیه کامل مخزن همراه است. لکن، مقایسه روش‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که موضوع بهنگام‌سازی یکی از پارامترهای اساسی در بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌باشد. بدین ترتیب که در بیشتر موارد روش ۳، که فاقد هرگونه پیش‌بینی است و تنها با بهنگام‌سازی میانگین جریان‌های تاریخی عمل می‌کند، برتر از روش ۲، که دارای مدل پیش‌بینی بوده ولی فاقد بهنگام‌سازی است، عمل می‌کند. علاوه‌براین، اختلاف موجود در عملکرد روش‌های ۱ و ۲ در

عمل کرده است. دو روش مدل‌سازی متداول و منطقه‌بندی تصاویر هم که دارای ضریب پیش‌بینی یکسانی می‌باشند، عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. در حالت استفاده از آمار تاریخی (پیش‌بینی ۱۰۰ درصد جریان)، بیشترین انرژی تولیدی و اعتمادپذیری کمی و کمترین

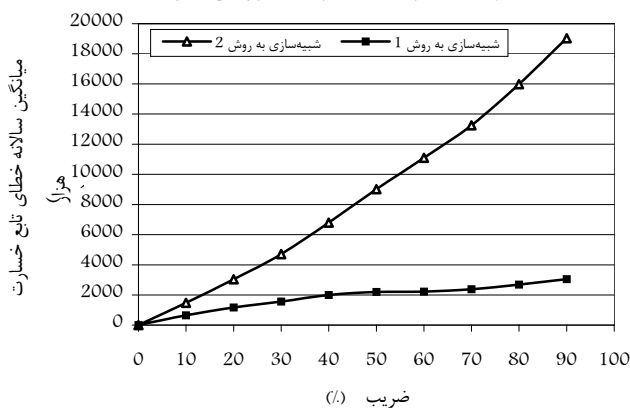
عمل کرده است. دو روش مدل‌سازی متداول و منطقه‌بندی تصاویر هم که دارای ضریب پیش‌بینی یکسانی می‌باشند، عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. در حالت استفاده از آمار تاریخی (پیش‌بینی ۱۰۰ درصد جریان)، بیشترین انرژی تولیدی و اعتمادپذیری کمی و کمترین



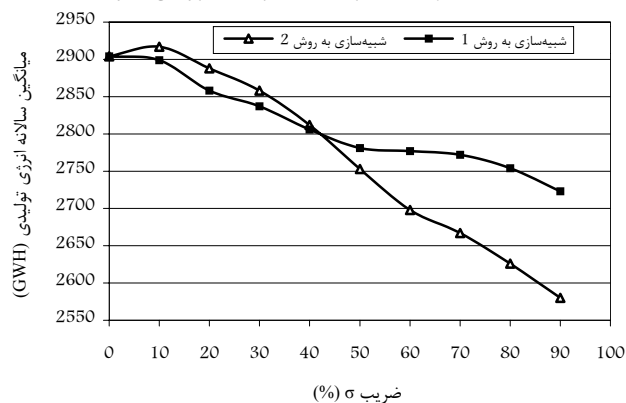
شکل ۴- منحنی تغییرات میانگین سالانه سرریز نسبت به ضریب  $\sigma$  در شبیه‌سازی به روش ۱ و ۲



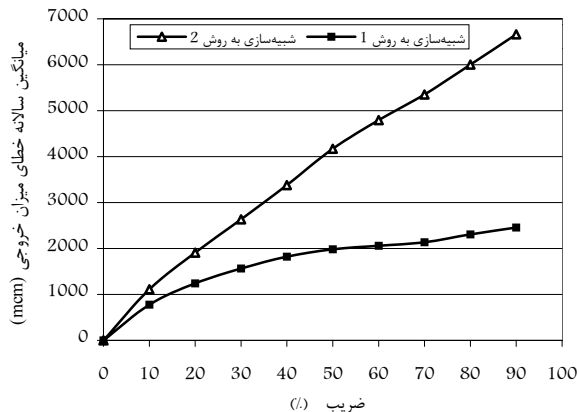
شکل ۵- منحنی تغییرات میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی نسبت به ضریب  $\sigma$  در شبیه‌سازی به روش ۱ و ۲



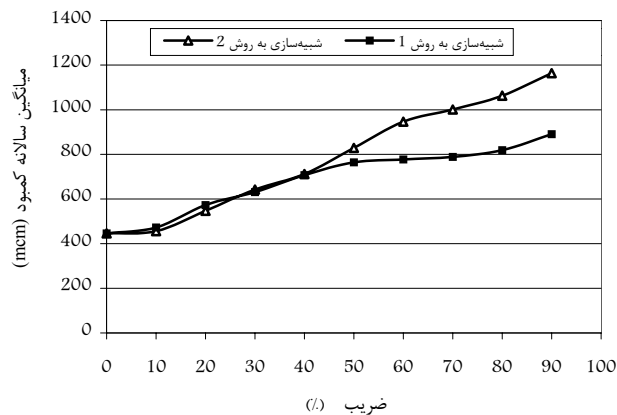
شکل ۶- منحنی تغییرات میانگین سالانه خطای تابع خسارت نسبت به ضریب  $\sigma$  در شبیه‌سازی به روش ۱ و ۲



شکل ۷- منحنی تغییرات میانگین سالانه انرژی تولیدی نسبت به ضریب  $\sigma$  در شبیه‌سازی به روش ۱ و ۲



شکل ۸- منحنی تغییرات میانگین سالانه میزان خروجی نسبت به ضریب  $\sigma$  در شبیه‌سازی به روش ۱ و ۲



شکل ۹- منحنی تغییرات میانگین سالانه کمبود نسبت به ضریب  $\sigma$  در شبیه‌سازی به روش ۱ و ۲

یا عدم تغییر در تولید انرژی کل و پیک در صورت استفاده از جریان‌های پیش‌بینی می‌باشد. همچنین، اعتمادپذیری زمانی با آمار پیش‌بینی افزایش نشان می‌دهد که با توجه به روند افزایش آسیب‌پذیری حداکثر و میانگین قابل انتظار است.

مقایسه نتایج مدل‌های SDP نوع ۱ و ۲ در جدول (۵) و شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب عدم قطعیت  $\sigma$  و کاهش ضریب پیش‌بینی  $C_p$ ، خسارت به سود SDP نوع ۲ تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، برتری نسبی SDP نوع ۱ در این مورد صرفاً در پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیق است.

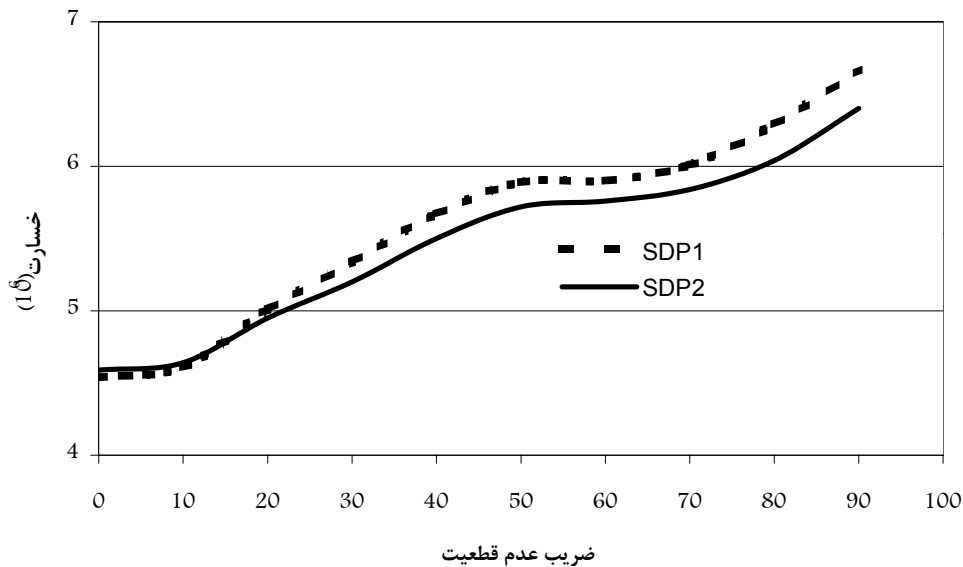
میانگین ۶ ماهه خسارت شبیه‌سازی مدل SDP نوع اول با جریان پیش‌بینی شده نسبت به آمار تاریخی، در بهترین حالت ۱۷ درصد افزایش نشان می‌دهد. این درحالی است که میانگین ۶ ماهه کمبود نیاز آبی این مدل از ۴۰۴ میلیون مترمکعب در حالت استفاده از آمار تاریخی به ۵۷۵ میلیون مترمکعب در صورت بکارگیری روش مدل‌سازی متداول برای پیش‌بینی جریان افزایش می‌یابد که رقم قابل توجهی در حدود ۴۲ درصد افزایش کمبود می‌باشد. مضافاً آنکه، در صورت استفاده از مدل‌های پیش‌بینی با کاهش نسبی اعتمادپذیری کمی و افزایش شدید آسیب‌پذیری حداکثر و میانگین روبرو خواهیم بود. نکته قابل توجه در این نتایج، کاهش بسیار اندک

جدول ۵- مقایسه نتایج بهره‌برداری مدل‌ها با روش‌های مختلف پیش‌بینی جریان در مدل‌های SDP نوع اول و دوم - دوره ۶ ماهه

نتایج بهره‌برداری		آمار تاریخی		منطقه‌بندی تصاویر		مدل‌سازی متداول		تیسن		آریما	
		$C_p=1$		$\sigma=0.09$		$\sigma=0.08$		$\sigma=0.05$		$\sigma=0.28$	
		SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	SDP2	SDP1
میانگین ۶ ماهه خسارت شبیه‌سازی (۱۰ <sup>۶</sup> )		۲/۳۲	۲/۲۵	۲/۷۲	۲/۶۴	۲/۷۱	۲/۶۳	۲/۷۷	۲/۷۱	۲/۹۱	۲/۹۱
میانگین ۶ ماهه کمبود نیاز آبی (mcm)		۴۲۱	۴۰۴	۵۸۵	۵۸۵	۵۷۸	۵۷۵	۵۹۳	۵۹۹	۶۴۳	۶۳۸
میانگین ۶ ماهه انرژی تولیدی (GWH)		۱۶۸۳	۱۶۹۰	۱۶۳۲	۱۶۳۸	۱۶۳۱	۱۶۳۶	۱۶۲۹	۱۶۳۱	۱۶۰۱	۱۶۰۷
میانگین ۶ ماهه انرژی پیک تولیدی (GWH)		۴۹۳	۴۹۳	۴۸۹	۴۹۰	۴۸۹	۴۸۷	۴۸۷	۴۸۵	۴۸۶	۴۸۹
میانگین ۶ ماهه سرریز (mcm)		۴۳۰	۴۲۲	۳۹۵	۴۰۷	۳۹۵	۴۰۷	۴۰۵	۳۹۳	۴۳۳	۴۳۳
اعتماد پذیری زمانی ماهانه در تامین نیاز آبی		-۰/۴۸۷	-۰/۵۳۸	-۰/۴۸۱	-۰/۴۵۵	-۰/۵	-۰/۴۵۵	-۰/۵	-۰/۵۵۱	-۰/۵۱۹	-۰/۵۳۶
اعتماد پذیری کمی ماهانه در تامین نیاز آبی		-۰/۹۰۸	-۰/۹۰۸	-۰/۸۶۷	-۰/۸۶۷	-۰/۸۶۸	-۰/۸۶۹	-۰/۸۶۵	-۰/۸۶۴	-۰/۸۵۴	-۰/۸۵۵
برگشت پذیری ماهانه در تامین نیاز آبی		-۰/۲۷۵	-۰/۲۷۸	-۰/۲۷۳	-۰/۲۶۸	-۰/۲۸۲	-۰/۲۵۴	-۰/۲۶۹	-۰/۲۷۱	-۰/۲۹۳	-۰/۲۹۷
آسیب پذیری میانگین ماهانه در تامین نیاز آبی		-۰/۳۴۸	-۰/۳۴۸	-۰/۵۱۷	-۰/۵۲۲	-۰/۵۰۵	-۰/۵۳۳	-۰/۵۳۴	-۰/۵۳۸	-۰/۵۷	-۰/۵۴۲
آسیب پذیری حداکثر ماهانه در تامین نیاز آبی		-۰/۴۴۵	-۰/۴۴۵	-۰/۹۰۳	-۰/۸۷۴	-۰/۹۰۳	-۰/۸۷۴	-۰/۹۰۵	-۰/۸۷۴	-۰/۸۷۷	-۰/۷۹۳
مجموع نسبی یکطرفه مربع انحرافات از نیاز مطلوب ماهانه		-۰/۲۴۳	-۰/۲۴۳	-۰/۵۴۹	-۰/۵۴۲	-۰/۵۵۱	-۰/۵۶۸	-۰/۵۹۴	-۰/۶۲	-۰/۶۵۹	-۰/۶۳۵
درصد زمانی خالی بودن مخزن به صورت ماهانه		.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
درصد زمانی پر بودن مخزن به صورت ماهانه		۱۸/۵۹	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	۱۵/۲۸	۱۷/۳۱	۱۶/۶۷	۱۷/۳۱	۱۷/۹۵	۱۶/۰۳	۱۴/۷۴

جدول ۶- مقایسه نتایج بهره‌برداری مدل‌ها در شبیه‌سازی بهنگام انواع مدل‌های SDP و DP

سایر مدل‌ها			مدل‌های با پیش‌بینی										نتایج بهره‌برداری
DP	SDP4	SDP3	میانگین تاریخی		آریما		$\sigma = 30$		$\sigma = 10$		آمار تاریخی		
			SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	SDP2	SDP1	
۵/۷۹	۵/۳۱	۵/۰۶	۵/۹۶	۶/۰۵	۵/۵۸	۵/۶۲	۵/۲۰	۵/۳۴	۴/۶۴	۴/۶۱	۴/۵۹	۴/۵۴	میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (۱۰ <sup>۶</sup> )
۵۸۳	۴۳۱	۴۵۶	۶۲۶	۶۳۱	۶۵۹	۶۸۱	۵۹۳	۶۳۱	۴۵۷	۴۷۳	۴۴۱	۴۴۶	میانگین سالانه کمبود نیاز آبی (mcm)
۲۸۷۶	۲۸۸۵	۲۸۶۷	۲۸۵۸	۲۸۵۵	۲۸۱۹	۲۸۰۰	۲۸۵۲	۲۸۳۷	۲۹۰۴	۲۸۹۹	۲۹۱۵	۲۹۰۴	میانگین سالانه انرژی تولیدی (GWH)
۹۶۵	۹۶۶	۹۵۸	۹۶۴	۹۶۴	۹۶۱	۹۵۶	۹۶۶	۹۵۶	۹۶۷	۹۶۰	۹۶۷	۹۶۱	میانگین سالانه انرژی پیک تولیدی (GWH)
۶۲۵	۷۶۱	۷۷۵	۶۳۹	۶۲۲	۶۵۷	۶۵۳	۶۰۹	۶۰۱	۶۰۰	۵۶۹	۶۲۴	۶۰۰	میانگین سالانه سرریز (mcm)
-۰/۷۶۹	-۰/۷۵۳	-۰/۷۲۴	-۰/۷۴۷	-۰/۷۷۹	-۰/۷۴۴	-۰/۷۳۱	-۰/۷۲۸	-۰/۶۸۹	-۰/۷۲۸	-۰/۷۲۴	-۰/۷۳۴	-۰/۷۳۴	اعتماد پذیری زمانی ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۹۰۸	-۰/۹۳۲	-۰/۹۲۸	-۰/۹۰۱	-۰/۹	-۰/۸۹۶	-۰/۸۹۲	-۰/۹۰۶	-۰/۹	-۰/۹۲۸	-۰/۹۲۵	-۰/۹۳	-۰/۹۲۹	اعتماد پذیری کمی ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۲۷۸	-۰/۳۲۵	-۰/۳۲۶	-۰/۲۹۱	-۰/۳۰۴	-۰/۳۲۵	-۰/۳۴۵	-۰/۲۹۴	-۰/۳۲	-۰/۳۱۸	-۰/۳۶	-۰/۲۹۱	-۰/۳۳۷	برگشت پذیری ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۲۵۸	-۰/۲۴۱	-۰/۲۳	-۰/۲۵۵	-۰/۲۵۶	-۰/۳۲۱	-۰/۴	-۰/۲۷۹	-۰/۳۷۷	-۰/۲۲۹	-۰/۲۲۹	-۰/۲۳۶	-۰/۲۷۲	آسیب پذیری میانگین ماهانه در تامین نیاز آبی
-۰/۸۹۲	-۰/۵۸۲	-۰/۵۸۲	-۰/۹۸۲	-۰/۸۹۶	-۰/۷۹۳	-۰/۸۷۷	-۰/۶۳۳	-۰/۹۰۴	-۰/۴۷۵	-۰/۷۷۹	-۰/۴۷۵	-۰/۵۸۴	آسیب پذیری حداکثر ماهانه در تامین نیاز آبی
۷/۰۵	-۰/۹۶	-۰/۲۳	۳/۸۵	۶/۴۱	۲/۲۴	۳/۸۵	-۰/۶۴	۳/۲۱	.	-۰/۳۲	.	.	درصد زمانی خالی بودن مخزن به صورت ماهانه
۱۲/۸	۲۵	۲۴/۷	۱۳/۵	۱۲/۵	۱۱/۲	۱۱/۵	۱۱/۵	۱۲/۸	۱۱/۲	۱۱/۲	۱۰/۶	۱۰/۹	درصد زمانی پر بودن مخزن به صورت ماهانه



شکل (۱۱): مقایسه روند میانگین خسارت سالانه نسبت به تغییرات ضریب  $\sigma$  در مدل‌های SDP نوع ۱ و ۲

### ۶- مقایسه نتایج

برای ارزیابی تاثیر پیش‌بینی‌ها در عملکرد شبیه‌سازی بهنگام مدل‌های SDP نوع اول و دوم و مقایسه آنها با سایر مدل‌ها، از مدل پیش‌بینی مصنوعی (رابطه ۱۵) با ضریب عدم قطعیت ۱۰ و ۳۰ درصد، آمار میانگین تاریخی به جای پیش‌بینی و پیش‌بینی‌های مدل آریمای، که همه دارای پیش‌بینی ۱۲ ماهه و طول ۲۶ ساله برای سد مخزنی دز می‌باشند، استفاده گردید. بکارگیری ضرایب ۱۰ و ۳۰ درصد برای  $\sigma$  جهت نشان دادن پیش‌بینی‌های خوب و متوسط می‌باشد. در اینجا امکان استفاده از مدل‌های برفابی، بدلیل محدود بودن آنها به ۶ ماه از سال، وجود نداشت.

به طوری که در جدول (۶) مشاهده می‌شود در حالتی که طبق روش‌های معمول از پیش‌بینی صد درصد (آمار تاریخی) برای اجرای مدل‌های SDP نوع ۱ و ۲ استفاده کنیم در غالب معیارها این دو مدل، (با برتری نسبی مدل اول از نظر خسارت)، بهتر از سایر مدل‌های SDP و DP عمل می‌کنند. لکن با در نظر گرفتن عدم قطعیت در جریان‌ها، همان‌طور که قبلاً نیز نشان داده شد روند تنزلی در کیفیت نتایج مدل‌های SDP نوع ۱ و ۲ شروع می‌شود. چنانچه، ضریب عدم قطعیت برابر ۱۰ درصد فرض شود هنوز برتری نسبی با مدل‌های SDP دو نوع اول است. اما، با افزایش  $\sigma$  به مقدار ۳۰٪ پارامترهای مهمی همچون میانگین سالانه خسارت، کمبود، انرژی کل و پیک، اعتمادپذیری زمانی و کمی، آسیب‌پذیری میانگین و حداکثر در مدل‌های SDP سوم و چهارم، (با برتری نسبی SDP نوع سوم از نظر خسارت)، بهتر از مدل‌های نوع اول و دوم است. در این سطح از پیش‌بینی‌ها، حتی مدل DP در معیارهای مهمی چون کمبود، انرژی کل و پیک، اعتمادپذیری زمانی و کمی و آسیب‌پذیری

میانگین برتر از مدل‌های SDP نوع ۱ یا ۲ بوده ولی هنوز خسارت آن بیشتر از SDP نوع ۱ یا ۲ می‌باشد.

آریمای یکی از رایج‌ترین روش‌های پیش‌بینی جریان است که در این مخزن نتایج خوبی داشته و بعضاً بهتر از مدل‌های برفابی بوده است برهانی (ب۱۳۸۱). لکن محاسبه ضریب پیش‌بینی این مدل طبق روش لنتمایر نشان داد که علی‌رغم معیارهای رایج در ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها، مدل آریمای کمترین مقدار ضریب Cp بوده و عملکرد حاصل از پیش‌بینی‌های این روش نیز در بهره‌برداری از مخزن غالباً نامناسب و ضعیف می‌باشد. به طوری که مدل‌های SDP نوع ۱ و ۲ در صورت استفاده از این روش در غالب معیارهای ارزیابی عملکرد ضعیفی را نشان می‌دهند. با استفاده از میانگین‌های تاریخی به جای پیش‌بینی‌ها، بیشترین آسیب‌پذیری حداکثر و میانگین سالانه خسارت حاصل می‌شود؛ لذا نمی‌توان آن را روش مناسبی دانست.

بنابراین، واضح است که اولاً بکارگیری جریان‌های تاریخی جهت ارزیابی مدل‌هایی همچون SDP نوع اول و دوم که در عمل باید از جریان‌های پیش‌بینی شده استفاده کنند صحیح نمی‌باشد و ممکن است منجر به استنباط نادرستی شود. ثانیاً، برتری نسبی مدل‌های SDP نوع ۱ و ۲ در این مخزن صرفاً با استفاده از جریان‌های تاریخی برقرار بوده و در صورت استفاده از جریان‌های پیش‌بینی شده این مدل‌ها بتدریج برتری خود را از دست می‌دهند. از طرفی، نتایج همچنین نشان می‌دهند که در مقایسه مدل‌های نوع اول با دوم و نوع سوم با چهارم، برتری نسبی با مدل‌های نوع اول (در حالت پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیق) و سوم از نظر میزان خسارت می‌باشد که هر دو از احتمال شرطی در ساختار خود استفاده می‌کنند. ولی با

کاهش کیفیت پیش‌بینی‌ها، خسارت مدل نوع اول بیشتر از نوع دوم می‌شود. بدیهی است اگرچه کلیات نتایج بدست آمده در این تحقیق عام می‌باشد، لکن جایگاه دقیق هر مقایسه بستگی به خصوصیات سیستم مورد مطالعه و روش‌های مورد استفاده داشته و ممکن است در هر مورد تفاوت‌هایی داشته باشد.

## ۷- جمع‌بندی

در این تحقیق با استفاده از روش‌های مختلف پیش‌بینی جریان، تاثیر پیش‌بینی‌ها بر عملکرد مدل‌های SDP نوع اول و دوم بررسی شده و شبیه‌سازی بهنگام با فرض امکان بهنگام‌سازی در انتهای دوره (ماه) صورت گرفته است. همچنین عملکرد مدل‌های SDP نوع سوم و چهارم و مدل DP ارزیابی شده و نتایج زیر بدست آمد:

۱- روش‌های پیش‌بینی در عملکرد مدل‌های مبتنی بر جریان‌های پیش‌بینی تاثیر مهم و بسزایی دارند.

۲- مقادیر خسارت حاصل از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در مدل DP تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم دارند. خسارت‌های سالانه مورد انتظار بهینه‌سازی بسیار کمتر از میانگین سالانه خسارت‌های شبیه‌سازی هستند. این بدان معنی است که مدل برنامه‌ریزی پویای قطعی با استفاده از میانگین جریان‌های تاریخی، در بهینه‌سازی خسارت‌ها را دست پایین برآورد کرده و بسیار خوش‌بینانه عمل می‌کند.

۳- مدل قطعی برنامه‌ریزی پویا به دلیل در نظر نگرفتن طبیعت استوکاستیک جریان ورودی، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مدل‌های برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک دارد.

۴- بهبود در نتایج بهره‌برداری از مخزن، در صورت متفاوت در نظر گرفتن حدود متغیر تصمیم برداشت، در مدل‌های SDP نوع سوم و چهارم، ناچیز است.

۵- در شبیه‌سازی به‌نگام با افزایش خطای پیش‌بینی، میزان خسارت و کمبود افزایش و مقدار انرژی تولیدی، کاهش می‌یابد.

۶- بهنگام‌سازی، فرآیند مهمی در بهره‌برداری از مخازن در حالت استفاده از جریان‌های پیش‌بینی شده است. در صورتی که در شبیه‌سازی به جریان‌های واقعی توجهی نشود و تنها با جریان‌های پیش‌بینی شده شبیه‌سازی ادامه یابد، میانگین خسارت، کمبود و سرریز افزایش و مقدار انرژی تولیدی کاهش می‌یابد. در این حالت مقادیر خسارت و خطای میزان خروجی و تابع خسارت، بسیار بیشتر از شبیه‌سازی بهنگام می‌باشد.

۷- در صورتی که از جریان‌های تاریخی یعنی پیش‌بینی صد درصد جریان استفاده شود، دو مدل SDP نوع اول و دوم که از جریان‌های ورودی دوره فعلی به عنوان متغیر حالت

هیدرولوژیکی استفاده می‌کنند، نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر داشته‌اند. نکته قابل ذکر این است که مدل‌های SDP نوع اول و دوم با فرض دقت پیش‌بینی صد درصد اجرا شده‌اند، لذا نتایج حاصل نمی‌تواند به درستی منعکس کننده واقعیت باشد، زیرا خطای پیش‌بینی در این محاسبات لحاظ نشده‌اند. چنانچه این خطاها لحاظ شوند، عملکرد این دو مدل به مراتب ضعیف‌تر خواهد شد.

۸- تا زمانی که پیش‌بینی‌های خوبی در دسترس باشد، استفاده از مدل‌های SDP نوع اول و دوم عملکرد بهتری دارد. با ضعیف‌تر شدن پیش‌بینی، نتایج مدل‌ها به هم نزدیک شده و در پیش‌بینی‌های ضعیف عملکرد مدل‌های نوع سوم و چهارم نسبتاً بهتر خواهد بود.

۹- انتخاب مدل SDP مناسب‌تر بستگی به کیفیت جریان‌های پیش‌بینی، شرایط هیدرولوژیکی و خصوصیات سیستم منابع آب دارد.

۱۰- در این تحقیق مقایسه مدل‌های نوع اول با دوم و نوع سوم با چهارم نشان می‌دهد که برتری نسبی با مدل‌های نوع اول (در حالت پیش‌بینی‌های نسبتاً دقیق) و سوم از نظر میزان خسارت می‌باشد که هر دو از احتمال شرطی در ساختار خود استفاده می‌کنند. ولی با کاهش کیفیت پیش‌بینی‌ها، خسارت مدل نوع اول بیشتر از نوع دوم می‌شود.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Stochastic Dynamic Programming
- 2- Dynamic Programming
- 3- Reliability
- 4- Success
- 5- Failure
- 6- Vulnerability

## ۸- مراجع

افتخارچوادی، ا. (۱۳۸۲)، "نقش پیش‌بینی جریان ورودی در بهره‌برداری بهینه از مخازن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

برهانی، ع. (الف ۱۳۸۱)، "تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن در دوره‌های خشک"، معاونت پژوهشی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

برهانی، ع. (ب ۱۳۸۱)، "تهیه مدل پیش‌بینی جریان رودخانه در حوزه آبریز دز تا محل سد دز"، سازمان مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو.

- Mishalani, R.N. and R.N. Palmer, (1988). "Forecast Uncertainty in Water Supply Reservoir Operation", *Water Resour. Bul.*, 24(6): pp.1237-1245.
- Moore, L.J. and J.M. Armstrong, (1976). "The use of Linear Programming Techniques for Estimating the Benefits from Increased Accuracy of Water Supply Forecasts", *Water Resour. Res.*, 12(4): pp.629-639.
- Napiorkowski, J.J., A. Kozlowski and T. Terlikowski, (1999). "Influence of Inflow Prediction on Performance of Water Reservoir System", *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, Vol.2, eds. : Dragan Savic & Godfrey Walters, Research Studies Press Ltd.
- Oron, G., A. Mehrez and G. Rabinowitz, (1991). "Forecasting in Optimizing Dual System for Energy Generation and Irrigation", *J. Water Resour. Plan. & Manag.*, 117(3): pp. 287-300.
- Stedinger, R. Jery, Bola F.Sule and Daniel P.Loucks, (1984). "Stochastic Dynamic Programming Models for Reservoir Operation Optimization", *Water Resour Res.*, Vol.20, No.11, pp.1499-1505.
- Su Y. S. and R. A. Deininger, (1974). "Modeling the Regulation of Lake Superior Under Uncertainty of Future Water Supplies", *Water Resour. Res.*, 10(1): pp. 11-25.
- Tejada-Guibert, Alberto J., Sharon A.Johnson and Jery R.Stedinger, (1995). "The Value of Hydrologic Information in Stochastic Dynamic Programming Models of a Multireservoir System", *Water Resour. Res.*, Vol.31, No.10, pp.2571-2579.
- Torabi, M. and F. Mobasheri, (1973). "A Stochastic Dynamic Programming Model for the Optimum Operation of a Multi-Purpose Reservoir", *Water Resour. Bul.*, 9(6): pp.1089-1099.
- Yakowitz, S., (1982). "Dynamic Programming Applications in Water Resources", *Water Resour. Res.*, 18(4): pp.673-696.
- Yao, H. and A. Georgakakos, (2001). "Assessment of Folsom Lake Response to Historical and Potential Future Climate Scenarios: 2. Reservoir Management", *J. Hydro.*, Vol.249, pp.176-196.
- Yeh, W-G. William, L. Becker, and R. Zettlemoyer, (1982). "Worth of inflow forecast for reservoir operation", *J. Water Resour. Plan. & Manag.*, 108, pp. 257-269.
- ضاهریپور، ج، (۱۳۸۱)، "تهیه مدل ذوب برف حوزه آبریز به کمک سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)". پایان نامه کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- Carpenter, M. T. and K. P. Georgakakos, (2001). "Assessment of Folsom Lake Response to Historical and Potential Future Climate Scenarios: 1. Forecasting", *J. Hydro.*, Vol. 249, pp. 148-175.
- Faber, A.B. and J. R. Stedinger, (2001). "Reservoir Optimization Using Sampling SDP With Ensemble Streamflow Prediction (ESP) Forecasts", *J. Hydro.*, 249 (1-4): pp.113-133.
- Gablinger, M. and D. P. Loucks, (1970). "Markov Models for Flow Regulation", *J. Hydra. Div.*, 96(HY1): pp. 165-181.
- Georgakakos, P. A., (1989). "The Value of Streamflow Forecasting in Reservoir Operation", *Water Resour. Bul.*, 25(4): pp. 789-800.
- Hamlet F. A., D. Huppert and, D.P. Lettenmaier, (2002). "Economic Value of Long-Lead Streamflow Forecasts for Columbia River Hydropower", *J. Water Resour. Plan. & Manag.*, 128(2): pp. 91-101.
- Hashimoto, T., J. R. Stedinger and, D.P. Loucks, (1982). "Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation", *Water Resour. Res.*, 18(1): pp.14-20.
- Huang, W.-C., R. Harboe and J. J. Bogardi, (1991). "Testing Stochastic Dynamic Programming Models Conditioned on Observed or Forecasted Inflows", *J. Water Resour. Plan. & Manag.*, 117(1): pp.28-36.
- Krzysztofowicz, R., (1986). "Optimal Water Supply Planning Based on Seasonal Runoff Forecasts", *Water Resour. Res.*, 22(3): pp.313-321.
- Lettenmaier, P. D., (1984). "Synthetic Streamflow Forecast Generation", *J. Hydra. Eng.*, 110(3): pp. 277-289.
- Little D.C. John, (1955). "The Use of Storage Water in a Hydroelectric System", *J. Oper. Res. Soc. of America*, 3(2): pp.187-197.
- Loucks, R. J., Stedinger, D. P. and D. A. Haith, (1981). "Water Resources System Planning and Analysis". Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۷ آبان ۱۳۸۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۷ خرداد ۱۳۸۴