

## مقایسه عملکرد مدل‌های DP، SDP و SSDP در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن‌های آبی چندمنظوره (مطالعه موردی: مخزن سد زاینده‌رود)

صدیقه انوری<sup>۱</sup>، سید جمشید موسوی<sup>۲</sup> و سعید مرید<sup>۳\*</sup>

### چکیده

مدل‌های برنامه‌ریزی پویا ابزاری مناسب برای تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن‌های سدها، به‌خصوص در مواجهه با محدودیت و عدم قطعیت در منابع آبی هستند. در این مقاله، عملکرد طیف متنوعی از این مدل‌ها شامل برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP)، برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با کلاسه‌بندی جریان (SDP\_Class)، برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی مبتنی بر سناریوهای تاریخی جریان (SDP\_Scenario) و برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با نمونه‌گیری (SSDP) در سیستم چندمنظوره سد زاینده‌رود ارزیابی و مقایسه شده است. ابتدا سیاست‌های بهینه بهره‌برداری در شرایط نیاز ثابت کشاورزی و سپس ملاحظه همزمان نیازهای کشاورزی و برقایی در کنار تأمین نیازهای شرب، صنعت و زیست‌محیطی، در نظر گرفته شد و در نهایت عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و معیارهای کارایی همانند اعتمادپذیری زمانی و کمی، بیشینه و میانگین کمبود و نیز زمان اجرای مدل‌ها ارزیابی شد. نتایج برتری محسوس مدل‌های SDP و SSDP را در مقایسه با مدل‌های DP نشان داد. این برتری عملکرد برای مدل SSDP و نیز شرایط حدی کم‌آبی‌ها بارزتر بود. با وجود عملکرد بهتر مدل SSDP، بار محاسباتی و زمان اجرای آن بیشتر بود که روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی متغیرها و برنامه‌نویسی برداری شده، توانست تأثیر زیادی در کاهش زمان اجرای تمامی مدل‌ها و به‌خصوص SSDP داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، برداری‌سازی، پیش‌تخصیص‌دهی، سد زاینده‌رود، DP، SDP و SSDP.

**ارجاع:** انوری ص. موسوی س. ج. و مرید س. ۱۳۹۴. مقایسه عملکرد مدل‌های DP، SDP و SSDP در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن‌های آبی چندمنظوره (مطالعه موردی: مخزن سد زاینده‌رود). مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۱۱۱-۱۲۱.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- دانشیار گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده عمران، دانشگاه امیرکبیر.

۳- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

\* نویسنده مسئول: [morid\\_sa@modares.ac.ir](mailto:morid_sa@modares.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۳۰

## مقدمه

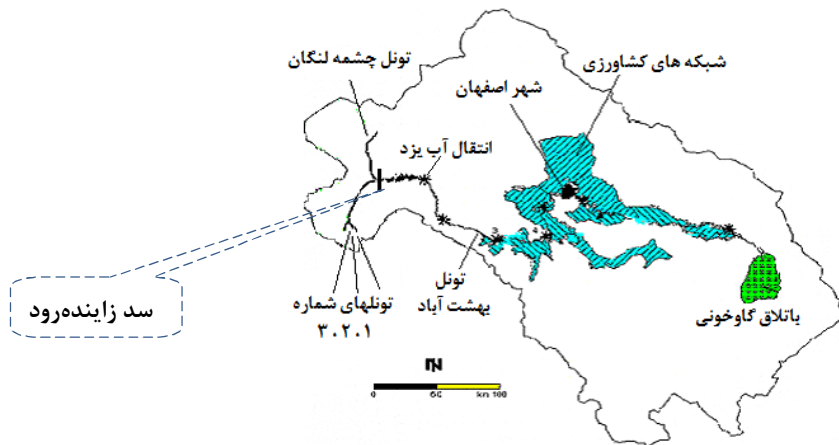
روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن‌های سدها، به سه دسته روش‌های ریاضی (مدل‌های برنامه‌ریزی خطی (LP) و غیرخطی (NLP))، روش‌های عددی (مدل‌های برنامه‌ریزی پویا (DP)) و روش‌های جستجوی تصادفی (الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO)) قابل طبقه‌بندی هستند (سمینویچ، ۲۰۰۹). از بین آن‌ها مدل LP به دلیل سادگی و حصول جواب بهینه سراسری، بیشترین سابقه را در مدیریت مخزن‌های سدها داشته است. در صورتی که تابع هدف یا قیدهای مسئله غیرخطی باشند، مدل‌های NLP مطلوب‌ترند که در آن‌ها تضمینی برای رسیدن به جواب بهینه سراسری وجود ندارد (لبدی، ۲۰۰۴ و لاکس و ونیک، ۲۰۰۵). مدل‌های DP به دلیل انطباق مناسب آن‌ها برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری متوالی و مرحله‌ای در بهره‌برداری از مخزن، مورد توجه هستند. ضمن اینکه احتساب عدم قطعیت متغیرهای احتمالاتی مسئله، نظیر جریان‌های ورودی از دیگر ویژگی‌های بسیار مفید آن‌ها است که ساختار احتمالاتی آن‌ها را تحت عنوان برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی (SDP) به وجود می‌آورد (وجولا و موجودمدار، ۲۰۰۵). چگونگی مدل‌سازی عدم قطعیت جریان در فرمول‌بندی SDP ضمن احتساب همبستگی‌های زمانی جریان در دوره‌های مختلف، یکی از جنبه‌های مطرح در بررسی عملکرد مدل‌های SDP است. به طور کلی این امر در قالب افزودن متغیر حالت هیدرولوژیک به مجموعه متغیرهای حالت مدل تحقق می‌یابد. برای بهبود عملکرد SDP، تلاش‌ها بر آن بوده تا تداوم جریان رودخانه و اطلاعات هیدرولوژیکی حوضه را در فرآیند مدل‌سازی وارد کنند. در این راستا لاکس و همکاران (۱۹۸۱) از جریان‌های دوره کنونی، به‌عنوان متغیر حالت هیدرولوژیکی استفاده کردند. پژوهش‌های دیگر در زمینه ارتقاء عملکرد SDP با ملاحظه اطلاعات هیدرولوژیکی حوضه در تصمیم‌گیری، سبب ارائه مدلی شد که کلمن و همکاران (۱۹۹۰) آن را برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی با نمونه‌گیری (SSDP) نامیدند و با بهره‌گیری از آن، میزان رهاسازی بهینه از مخزن سیستم برقایی رودخانه فدر را تعیین کردند. علاوه بر موارد نامبرده که سیر تکامل مدل‌های DP را نشان داد، در پژوهش‌های محدودی عملکرد آن‌ها در بهره‌برداری از مخزن‌های چندمنظوره مورد بررسی و

مقایسه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال موسوی و همکاران (۲۰۰۴)، مدل SDP بر مبنای متغیرهای حالت فازی (FSDP) را با SDP مقایسه کردند. کیم و همکاران (۲۰۰۷) عملکرد مدل‌های DP و SSDP (مبتنی بر سناریوهای تاریخی و پیش‌بینی) را در بهره‌برداری از دو سد چندمنظوره در کره جنوبی ارزیابی و عملکرد بهتر SSDP را گزارش کردند. برای بهره‌برداری بهینه از این سیستم در شرایط خشکسالی، اوم و همکاران (۲۰۱۱) از SSDP مبتنی بر پیش‌بینی‌های گروهی جریان (ESP) و سناریوهای تاریخی همراه با قواعد محدود کننده، استفاده و عملکرد SSDP در ترکیب با ESP را مثبت گزارش کردند.

با وجود کاربرد منفرد انواع مختلف مدل‌های برنامه‌ریزی پویا، مقایسه عملکرد آن‌ها برای یک سیستم چندمنظوره واقعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مهم هدف این مقاله را رقم می‌زند و در آن عملکرد مدل‌های برنامه‌ریزی پویای قطعی و احتمالاتی شامل DP و SDP (در دو قالب مبتنی بر کلاسه‌بندی جریان (SDP\_Class) و سناریوهای جریان (SDP\_Scenario)) و SSDP در تدوین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری چندمنظوره از مخزن سد زاینده‌رود مقایسه می‌شود. این مقایسه‌ها در قالب بررسی اثربخشی عامل‌هایی همانند تأثیر شرایط اولیه مخزن، معیارهای کارایی و عملکرد مدل‌ها در مواجهه با شرایط حدی انجام شد. مقایسه هزینه‌های محاسباتی این مدل‌ها و تأثیر استفاده از روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی و برنامه‌نویسی برداری بر عملکرد آن‌ها، از دیگر موردهایی است که در این ارزیابی مدنظر قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

**منطقه مطالعاتی:** حوضه آبریز زاینده رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران قرار دارد. رودخانه اصلی این حوضه یعنی زاینده‌رود طولی برابر با ۳۵۰ کیلومتر داشته که روی آن سد مخزنی زاینده‌رود با حجم کل ۱۴۵۰ میلیون مترمکعب احداث شده است (شکل ۱). در پایین‌دست سد و در طول این رودخانه شبکه‌های کشاورزی شامل مهیار، نکوآباد راست و چپ، برخوار، آبشار راست و چپ، رودشت و تعدادی شبکه‌های کوچک قرار دارند (بانک طرح‌های توسعه منابع آب، ۱۳۸۸).



شکل ۱- موقعیت سد زایندهرود و شبکه های کشاورزی پایین دست آن

ضریب کارکرد نیروگاه  $(PF=0.25)$  و رقوم پایاب به طور ثابت برابر ۱۹۷۸ متر در نظر گرفته شده است (بانک طرح های توسعه منابع آب، ۱۳۸۸).

در جدول ۱ نیز، مقادیر نیاز ماهانه شرب، صنعت و زیست محیطی پایین دست سد و همچنین مقادیر ماهانه تبخیر از سطح مخزن ارائه شده است. همچنین ظرفیت نصب<sup>۱</sup> نیروگاه  $(ICap=55 \text{ MWh})$ ، راندمان  $(Eff=0.95)$ ،

جدول ۱- نیازهای ماهانه شرب، صنعت و زیست محیطی و تبخیر از دریاچه مخزن (میرید و همکاران، ۲۰۰۴)

آمار	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
نیاز شرب، صنعت و زیست محیطی (MCM)	۲۱	۳۵	۳۰	۱۷	۱۷	۲۶	۴۸	۶۶	۷۱	۵۷	۵۷	۴۱
تبخیر ماهانه (m)	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۲۴	۰/۳۴	۰/۴	۰/۳۹	۰/۳۱

مجذور انحراف از نیازهای کشاورزی و برقی بر طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\text{Min: } loss_t = \left( \frac{D_t - R_t}{D_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{E_f - E_t}{E_f} \right)^2 \quad (2)$$

که  $E_f$  مقدار نیاز انرژی مطمئن ماهانه و  $E_t$  مقدار انرژی تولیدی در ماه  $t$  است. لازم به ذکر است، که  $E_f$  مقدار انرژی است که در یک زمان معین، سیستم تولید آن را تضمین می کند و از حاصل ضرب حداکثر توان تولیدی برای یک ماه در ضریب کارکرد نیروگاه، حاصل می شود.

(ب) **قیدها:** تغییر حالت سیستم از یک مرحله به مرحله بعد با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می شود. مقادیر  $S_{t+1}$  و رهاسازی ماهانه  $(R_t)$  نیز به ترتیب باید در رابطه های ۴ و ۵ صادق باشند:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - \epsilon(S_{t+1}, S_t) \quad (3)$$

$$S_{\min} \leq S_{t+1} \leq S_{\max} \quad (4)$$

$$R_{\min t} \leq R_t \leq R_{\max} \quad (5)$$

**فرمول بندی مدلها:** در این مقاله تابع هدف، حداقل کردن میزان خسارت است که در ادامه، رابطه های آن برای دو بخش بهینه سازی تخصیص آب کشاورزی و تخصیص توأم کشاورزی و برقی، به طور جداگانه ارائه می شود. نیازهای شرب، صنعت و زیست محیطی نیز، به صورت قیدی با ۱۰۰ درصد تأمین، در هر دو بخش در نظر گرفته شده اند.

**الف) تابع هدف:** در بخش اول یعنی ملاحظه نیاز کشاورزی، تابع هدف، حداقل کردن مجذور انحراف از مقادیر نیازهای کشاورزی پایین دست سد زایندهرود است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Min: } loss_t = \left( \frac{D_t - R_t}{D_{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

که در آن  $D_t$  تقاضای کشاورزی،  $R_t$  مقدار رهاسازی از مخزن،  $D_{\max}$  حداکثر تقاضای کشاورزی و  $loss_t$  میزان خسارت در ماه  $t$  است. در بخش دوم، که نیاز برقی نیز مد نظر است، میزان خسارت ناشی از عدم تأمین، به صورت

رابطه بهینه‌سازی وارد کنند. این کار با تعریف سناریوهای جریان (توالی‌های ۱۲ ماهه جریان رودخانه- که به صورت مشاهداتی یا تصادفی تولید شده‌اند) انجام می‌شود. برای رسیدن به سیاست بهینه پایدار از رابطه ۸ استفاده می‌شود (کلمن و همکاران، ۱۹۹۰):

$$\min_{R_t} \{loss(S_t, Q_t(i), R_t) + E_{j|i} [f_{t+1}(S_{t+1}, j)]\} \quad (۸)$$

$$\forall S_t, i, t \in \{1, \dots, T\}$$

که در آن  $i$  شمارنده سناریوی جریان ورودی به مخزن و  $Q_t(i)$  جریان دوره  $t$  از سناریوی  $i$  است.  $E_{j|i}$  احتمال اینکه جریان‌های سناریوی  $i$  در دوره  $t$  با جریان‌های سناریوی  $j$  در دوره  $t+1$  دنبال شوند. در مرحله بعد با جایگذاری جریان خروجی بهینه در رابطه ۹ مقدار تابع ارزش آینده ( $f_{t+1}$ ) بدون در نظر گرفتن احتمالات انتقالی و برای یک سناریوی خاص محاسبه می‌شود:

$$f_t(S_t, i) = loss(S_t, Q_t(i), R_t) + f_{t+1}(S_{t+1}, i) \quad (۹)$$

$$\forall S_t, i, t \in \{1, \dots, T\}$$

$f_t(S_t, i)$  مقدار تابع هدف به ازای ذخیره مخزن در دوره  $t$  و سناریوی خاص  $i$  تا پایان دوره است. احتمال انتقالی  $E_{j|i}$  با تئوری بیز<sup>۱</sup> از رابطه زیر محاسبه می‌شود (کلمن و همکاران، ۱۹۹۰):

$$P[Q_{t+1}(j) | Q_t] = \frac{P[Q_t | Q_{t+1}(j)]P[j]}{\sum_{i=1}^m P[Q_t | Q_{t+1}(i)]P[i]} \quad (۱۰)$$

که در آن  $P[i]$  و  $P[j]$  به ترتیب احتمال وقوع سناریوهای  $i$  و  $j$  هستند.  $Q_t$  و  $Q_{t+1}$  به ترتیب جریان‌های تاریخی در دوره‌های  $t$  و  $t+1$  هستند.

**مدل SDP بر مبنای سناریوهای جریان ورودی (SDP\_Scenario):** همانند مدل SSDP، در این مدل نیز از سناریوهای جریان ورودی به مخزن به عنوان متغیر حالت هیدرولوژیکی استفاده می‌شود با این تفاوت که فرمول‌بندی تابع بازگشتی آن، مشابه مدل SDP از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$f_t(S_t, i) = \min_{R_t} \{loss(S_t, Q_t(i), R_t) + E_{j|i} [f_{t+1}(S_{t+1}, j)]\} \quad (۱۱)$$

که  $i$  شمارنده سناریوی جریان و  $Q_t(i)$  جریان دوره  $t$  از سناریوی  $i$  است. تعاریف  $E_{j|i}$ ،  $i$  و  $j$  همانند مدل SSDP است. جزئیات بیشتر در مورد نحوه محاسبه احتمالات انتقال در این مدل‌ها، در مراجع کلمن و همکاران

که در آن  $S_t$  و  $S_{t+1}$  ذخیره مخزن به ترتیب در دوره‌های  $t$  و  $t+1$ ،  $Q_t$  جریان ورودی،  $R_t$  میزان رهاسازی از مخزن و  $e(S_{t+1}, S_t)$  هدررفت تبخیر از سطح مخزن در بازه زمانی  $t$  و  $t+1$  است. همچنین  $S_{\min}$  و  $S_{\max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه حجم ذخیره مخزن و  $R_{\min}$  کمینه میزان رهاسازی است که براساس حداقل نیازهای شرب، صنعت و زیست‌محیطی در پایین دست سد تعریف می‌شود.  $R_{\max}$  نیز بیشینه ظرفیت تخلیه کننده‌ها است. بر این اساس معادلات بازگشتی هر یک از مدل‌های تحت بررسی به شکل زیر قابل تبیین است:

**مدل DP:** در این مدل، بر طبق رابطه ۶ فقط از یک سناریوی جریان سالانه که برابر با متوسط جریان سناریوهای تاریخی است برای استخراج سیاست‌های پایدار استفاده می‌شود (لاکس و همکاران، ۱۹۸۱).

$$f_t(S_t) = \min_{R_t} \{loss(S_t, Q_t, R_t) + f_{t+1}(S_{t+1})\} \quad (۶)$$

که  $f_t$  مقدار گسسته شده ذخیره مخزن در ابتدای دوره  $t$ ،  $Q_t$  متوسط بلندمدت جریان،  $R_t$  مقدار گسسته شده رهاسازی از مخزن،  $f_{t+1}$  ذخیره مخزن در انتهای دوره،  $loss(S_t, Q_t, R_t)$  مقدار تابع هدف در دوره  $t$  و  $f_t(S_t)$  مقدار تابع هدف از شروع دوره  $t$  تا انتهای افق بهره‌برداری هستند.

**مدل SDP با کلاسه‌بندی جریان ورودی (SDP\_Class):** در این مدل با کلاسه‌بندی جریان ورودی به مخزن و به کارگیری احتمالات شرطی، ماهیت غیرقطعی و مارکوفی جریان، مدل شده و بر طبق رابطه ۷ مقدار امید ریاضی تابع هدف در بلندمدت کمینه می‌شود (لاکس و همکاران، ۱۹۸۱).

$$f_t(S_t, Q_t) = \min_{R_t} \{loss(S_t, Q_t(i), R_t) + \sum_j P_{ij}^t f_{t+1}(S_{t+1}, Q_{t+1}(j))\} \quad (۷)$$

که در آن  $Q_t(i)$  شاخص جریان کلاس  $i$  و دوره  $t$ ،  $P_{ij}^t$  احتمالات شرطی انتقال از کلاس  $i$  جریان در دوره  $t$  به کلاس  $j$  جریان دوره  $t+1$  است که از روش زنجیره مارکوف مرتبه یک محاسبه می‌شود.

**مدل SSDP:** برخلاف مدل‌های SDP که در آن به برآزش یک تابع چگالی احتمال به متغیر احتمالاتی و تعیین مقادیر شاخص نیاز است، مدل‌های SSDP می‌توانند سری‌های زمانی جریان رودخانه را به طور مستقیم در

را به نحوی تغییر می‌دهد که زمان اجرای کمتری داشته باشند. در این پژوهش، با به کارگیری توابع آماده در MATLAB که سهولت برنامه‌نویسی در آن را فراهم می‌کند، مشکل زمان اجرای مدل‌های بهینه‌سازی با به کارگیری تکنیک‌های مذکور تا حد زیادی حل شد.

**پایاده‌سازی مدل‌های بهینه‌سازی:** در این بخش به شرح پایاده‌سازی مدل‌های مورد استفاده پرداخته می‌شود. اولین گام، تعیین تعداد شاخص‌های حجم ذخیره مخزن و رهاسازی است. حجم ذخیره با روش ساوارانسی (کیم و همکاران، ۲۰۰۷) به ۱۰ شاخص و مقادیر رهاسازی از مخزن، به ۲۰ عدد گسسته‌سازی شد. لازم به ذکر است که تعداد و مقادیر این گسسته‌سازی‌ها برای تمامی مدل‌ها، مشابه در نظر گرفته شد. برای اجرای مدل DP، از متوسط بلند مدت جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود استفاده شد. اما برای ساخت مدل‌های SDP\_Class علاوه بر حجم ابتدای دوره، متغیر حالت هیدرولوژیکی جریان ورودی به مخزن نیز برای تعریف حالت سیستم به کار رفته است. همچنین از روش فراوانی مساوی برای گسسته‌سازی و تعیین ۵ مقدار شاخص جریان استفاده شد. در ادامه برای مدل‌های SDP\_Scenario و SSDP نیز، متغیر حالت هیدرولوژیکی جریان ورودی به مخزن که به‌عنوان متغیر احتمالاتی مسئله مدنظر است، به‌صورت سناریوهای ۱۲ ماهه استفاده شد.

**شبیه‌سازی نتایج و معیارهای کارایی:** برای ارزیابی عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی، سیاست‌های حاصل از آن‌ها با آمار تاریخی جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود طی دوره ۳۳ ساله (۵۱-۱۳۵۰ تا ۸۳-۱۳۸۲) شبیه‌سازی و عملکردشان با معیارهای کارایی ارزیابی شد. همچنین برای ارزیابی بیشتر، سری ۲۰۰ ساله‌ای از جریان نیز تولید شده که مدل‌ها را با شرایط حدی بیشتری روبرو می‌کند. تولید سری مصنوعی داده‌ها با نرم‌افزار SIMLAB، برازش یک مدل آماری به داده‌های تاریخی و ارائه ماتریس همبستگی داده‌های ماهانه انجام شد. معیارهای کارایی مورد استفاده شامل اعتمادپذیری<sup>۵</sup> (زمانی و کمی)، بیشینه کمبود، خسارت و هزینه‌های محاسباتی بود که در پژوهش‌های مشابه برای ارزیابی و انتخاب گزینه‌های طراحی و سیاست‌های بهره‌برداری در مدیریت منابع آب استفاده شده‌اند (اوم و همکاران، ۲۰۱۱). اعتمادپذیری،

(۱۹۹۰)، فابر و استدینجر (۲۰۰۱) و البرزی (۱۳۸۵) آورده شده است.

در تمامی مدل‌های نامبرده، گسسته‌سازی حجم ذخیره مخزن با استفاده از روش ساوارانسی انجام شد که در آن هر کدام از نواحی ( $Z$ )<sup>۱</sup> بصورت یک بازه مشخص می‌شود و شاخص هر ناحیه مساوی با حجم مخزن در مرکز آن بازه است. علاوه بر این حجم‌های بیشینه ( $S_{min}$ ) و کمینه ( $S_{max}$ ) مخزن به‌عنوان حالت‌های جداگانه و با طول بازه صفر در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین:

$$Z = SDN - 2, \Delta S = \frac{S_{max}}{Z} \quad (12)$$

$$S(k) = \frac{2k-3}{2} \Delta S, k = 2, \dots, SDN-1 \quad (13)$$

که  $Z$  تعداد نواحی،  $SDN$  تعداد شاخص‌های ذخیره‌ای مخزن،  $\Delta S$  تغییرات ذخیره و  $S(k)$  معرف  $k$  امین شاخص ذخیره است.

استفاده از روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی<sup>۲</sup> و برداری کردن<sup>۳</sup>: در اجرای مدل‌های برنامه‌ریزی پویا به خصوص نوع احتمالاتی آن‌ها که با افزایش تعداد متغیرهای حالت همراه است، زمان اجرای مدل‌ها نقش مهمی در مطلوب بودن استفاده از آن‌ها دارد. از طرفی ماهیت فرمول‌بندی مدل‌های SDP و به‌خصوص SSDP که مبتنی بر ارزیابی سناریوهای مختلف جریان می‌باشند با بهره‌مندی از امکانات پردازش و محاسبات موازی سازگاری دارد. در زبان‌های برنامه‌نویسی مبتنی بر محاسبات ماتریسی (مانند MATLAB) این قابلیت سبب می‌شود تا بتوان با عملیات برداری و ماتریسی که اصطلاحاً روش برنامه‌نویسی برداری شده نامیده می‌شود، زمان انجام محاسبات را به طور چشمگیری کاهش داد. برداری‌سازی عبارت است از عملیاتی که طی آن می‌توان حلقه‌های تکرار و شرطی<sup>۴</sup> را به عملیات معادل برداری و ماتریسی تبدیل کرد. از طرف دیگر پیش‌تخصیص‌دهی متغیرها، این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان قبل از شروع محاسبات اصلی برنامه، ابعاد متغیرهایی با ساختار برداری، ماتریسی و سلولی را با ماتریس‌های صفر و یک تعیین کرد. قابل ذکر است که به کارگیری این روش‌ها تأثیری در نتایج مدل‌های بهینه‌سازی نداشته و فقط الگوریتم برنامه‌نویسی مدل‌های بهینه‌سازی

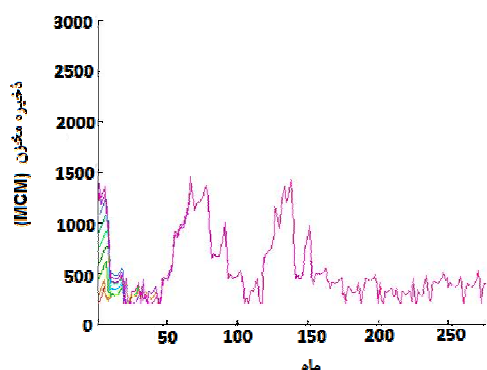
1- Zones

2- Preallocation

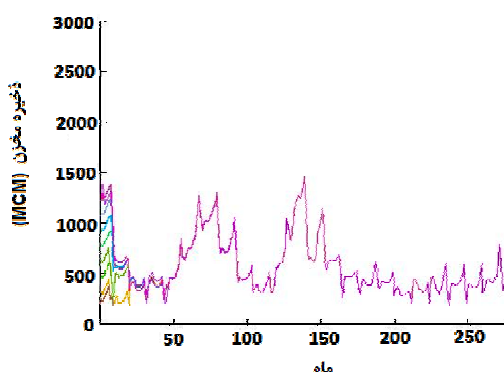
3- Vectorization

4- For and While Loops

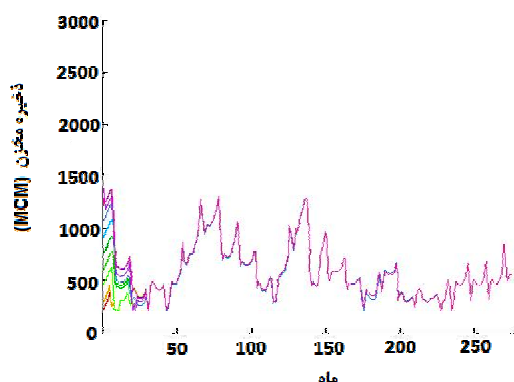
پایداری در تمامی مدل‌ها به طور تقریبی یکسان بوده است.



شکل ۲- شبیه‌سازی سیاست‌های مدل DP با شروع از ۱۰ حالت مختلف حجم ابتدای دوره



شکل ۳- شبیه‌سازی سیاست‌های مدل SDP\_Class با شروع از ۱۰ حالت مختلف حجم ابتدای دوره



شکل ۴- شبیه‌سازی سیاست‌های مدل SSDP با شروع از ۱۰ حالت مختلف حجم ابتدای دوره

فراوانی نسبی عدم شکست است. به طور معمول آستانه شکست براساس نیاز آبی پایین دست ( $D_t$ ) تعریف می‌شود. خروجی‌های سیستم به دو مجموعه مقادیر رضایت‌بخش ( $S$ ) و نارضایت‌بخش ( $F$ )، تقسیم می‌شوند. اعتمادپذیری زمانی سیستم ( $\alpha_t$ )، یعنی احتمال آنکه سیستم در حالت  $S$  باشد:

$$\alpha_t = \frac{\sum_{t=1}^T Z_t}{T \times Y} \quad Z_t = \begin{cases} 1, & \text{if } R_t \geq D_t, (X_t \in S) \\ 0, & \text{otherwise } (X_t \in F) \end{cases} \quad (14)$$

$T$  کل ماه‌های بهره‌برداری،  $Y$  سال‌های شبیه‌سازی و  $Z_t$  مجموع مقادیر موفقیت (یک) یا شکست (صفر) در تأمین نیاز پایین دست است. اعتمادپذیری کمی ( $\alpha_Q$ ) نیز با دیدن مقادیر رهاسازی در هر ماه ( $R_t$ ) و  $D_t$  با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_Q = \frac{\sum_{t=1}^T R_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad (15)$$

## نتایج و بحث

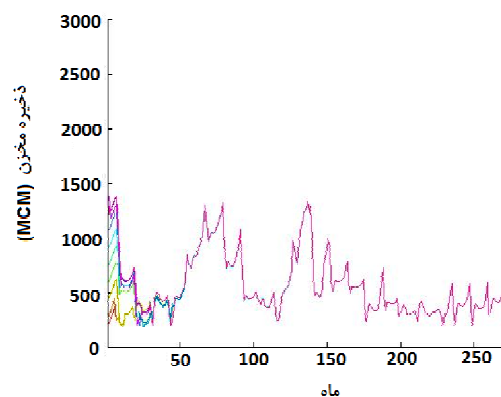
در این بخش، عملکرد مدل‌های بهینه‌سازی مورد بررسی از نظر شرایط اولیه مخزن، معیارهای کارایی، تأثیر افزایش شاخص ذخیره‌ای، دیدن تمامی نیازهای پایین دست سد و تأثیر به کارگیری روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی و برنامه‌نویسی برداری بر زمان اجرای مدل‌ها بررسی و ارزیابی شده است.

**شرایط اولیه مخزن:** در شروع بهره‌برداری، ذخیره اولیه مخزن از نظر پر یا خالی بودن، نقش مهمی در مقادیر رهاسازی از آن و در نتیجه ذخیره دوره‌های بعدی دارد. ولی بعد از گذشت چند دوره بهره‌برداری، رفتار ذخیره مخزن مستقل از ذخیره اولیه خواهد شد. برای بررسی تأثیر شرایط ذخیره اولیه مخزن بر مقادیر آن در گام‌های زمانی آینده، شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه، با ۱۰ مقدار مختلف از حجم ذخیره اولیه انجام شد که نتایج آن برای مدل‌های مورد بررسی در شکل‌های ۲ تا ۵ آورده شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود با گذشت نزدیک به چهار سال از اجرای سیاست‌های بهینه بهره‌برداری، متغیر ذخیره مخزن، مستقل از حجم اولیه مخزن می‌شود. لذا نتایج این بخش نشان داد که شرایط اولیه و رسیدن به حالت

داشته‌اند. از بین مدل‌های احتمالاتی نیز SSDP در مقایسه با انواع SDP شاخص‌های کارایی بهتری داشته است. این اختلاف به‌خصوص در شاخص‌های میانگین کمبود سالانه، ملموس‌تر است.

سطر آخر جدول ۲ زمان اجرای مدل‌ها را نشان می‌دهد که به ترتیب DP و SSDP کمترین و بیشترین زمان اجرا را داشته‌اند. در ادامه برای ارزیابی عملکرد سیاست‌های بهینه در مواجهه با شرایط حدی و به‌خصوص خشکسالی‌ها، نتایج برای دوره ۲۰۰ ساله تولید شده، تکرار شد که نتایج در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول دیده می‌شود که در این حالت متوسط کمبود سالانه و بیشینه ماهانه افزایش یافته است. در این شرایط تفاوت عملکرد مدل‌های غیرقطعی SDP و SSDP و برتری آن‌ها بر مدل قطعی DP به طور بارزتری مشخص شده است. همچنین SSDP در مقایسه با SDP عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۵- شبیه‌سازی سیاست‌های مدل SDP\_Scenario با شروع از ۱۰ حالت مختلف حجم ابتدای دوره

معیارهای کارایی: پس از اجرای مدل‌ها و شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه حاصل از آن‌ها طی دوره آماری، شاخص‌های کارایی محاسبه و مقادیر آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به این جدول، هر دو مدل غیرقطعی SDP و SSDP نسبت به نوع قطعی DP عملکرد بهتری

جدول ۲- نتایج مدل‌های DP، SDP و SSDP با به کارگیری سری جریان تاریخی

SSDP	SDP_Scenario	SDP_Class	DP	مدل‌ها	معیارهای کارایی
۷۳	۷۱	۷۰	۶۷		اعتمادپذیری زمانی (%)
۶۲	۶۱	۶۰	۵۹		اعتمادپذیری کمی (%)
۵۷۵	۵۸۹	۵۹۰	۵۹۶		میانگین کمبود سالانه (MCM)
۳۳۴	۳۳۵	۳۳۵	۳۶۳		حداکثر کمبود (MCM)
۵۰۱۶۰	۵۰۲۲۶	۵۲۳۹۱	۶۱۸۳۷		میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (بدون بعد)
زمان اجرای مدل‌ها					
۳۵/۷ دقیقه	۱۷/۸ دقیقه	۱/۵ دقیقه	۹/۸ ثانیه		عدم پیش‌تخصیص دهی و برداری سازی

جدول ۳- نتایج مدل‌های DP، SDP و SSDP با به کارگیری سری ۲۰۰ ساله جریان تولیدی

SSDP	SDP_Scenario	SDP_Class	DP	معیارهای کارایی	مدل‌ها
۷۵	۷۱	۷۱	۶۸		اعتمادپذیری زمانی (%)
۵۹	۵۸	۵۷	۵۵		اعتمادپذیری کمی (%)
۶۰۳	۶۲۰	۶۲۷	۶۷۱		میانگین کمبود سالانه (MCM)
۴۹۵	۵۱۳	۵۱۳	۵۱۸		حداکثر کمبود (MCM)
۵۶۱۱۹	۵۷۹۹۸	۵۹۵۵۷	۹۵۴۷۲		میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (بدون بعد)
زمان اجرای مدل‌ها					
۳۵/۷ دقیقه	۱۷/۸ دقیقه	۱/۵ دقیقه	۹/۸ ثانیه		عدم پیش‌تخصیص دهی و برداری سازی

عملکرد مثبت و تقریباً مشابهی از خود نشان دادند. به‌عنوان نمونه میزان خسارت بهینه‌سازی در تمامی آن‌ها به طور متوسط حدود ۱۵ درصد کم شد. همچنین نتایج معیارهای کارایی و نیز درصد تغییرات میانگین خسارت شبیه‌سازی، برای دوره ۲۰۰ ساله و تعداد شاخص‌های نامبرده، در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان از مثبت بودن تأثیر افزایش شاخص‌های ذخیره‌ای بر معیارهای کارایی مدل‌ها دارد.

تأثیر افزایش شاخص ذخیره‌ای در عملکرد مدل‌ها: همان‌طور که اشاره شد در مدل‌هایی از جنس DP (قطعی و احتمالاتی) متغیرهای پیوسته حالت و تصمیم مسئله، به متغیرهای گسسته‌ای تبدیل و سیاست‌های بهینه به ازای مقادیر خاصی از آن‌ها به دست می‌آید. بنابراین، برای کاهش خطای ناشی از گسسته‌سازی حجم ذخیره مخزن، شاخص ذخیره‌ای از ۱۰ به ۵۰ افزایش یافت. نتایج نشان داد که تمامی مدل‌ها در برابر افزایش تعداد این شاخص،

جدول ۴- نتایج مدل‌های بهینه‌سازی با افزایش تعداد شاخص ذخیره‌ای حجم مخزن از ۱۰ به ۵۰ عدد

SSDP	SDP_Scenario	SDP_Class	DP	مدل‌ها				
				معیارهای کارایی				
۱۰	۵۰	۱۰	۵۰	۱۰	۵۰	تعداد شاخص ذخیره حجم مخزن		
۷۵	۷۶	۷۱	۷۴	۷۱	۷۳	اعتمادپذیری زمانی (%)		
۵۹	۶۳	۵۸	۶۱	۵۷	۶۰	اعتمادپذیری کمی (%)		
۶۰۳	۶۰۰	۶۲۰	۶۰۶	۶۲۷	۶۰۸	میانگین کمبود سالانه (MCM)		
۴۹۵	۴۵۱	۵۱۳	۴۵۸	۵۱۳	۵۰۹	حداکثر کمبود (MCM)		
۵۶۱۱۹	۵۴۹۱۵	۵۷۹۹۸	۵۶۷۰۷	۵۹۵۵۷	۵۸۵۳۱	میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (بدون بعد)		
۲/۱		۲/۲		۱/۱۷		تغییرات میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (%)		
زمان اجرای مدل‌ها								
۳۵/۷	۲/۲۷	۱۷/۸ دقیقه	۱/۰۱	۱/۵	۸/۳۵	۹/۸	۵۹/۳	عدم پیش‌تخصیص دهی و برداری‌سازی
	ساعت	۵	ساعت	دقیقه	دقیقه	ثانیه	ثانیه	

در نظر گرفته است. نتایج شبیه‌سازی این سیاست‌ها برای سری ۲۰۰ ساله ساخته شده از جریان ورودی، در جدول ۵ ارائه شده است.

تدوین سیاست‌های بهینه با دیدن تمامی نیازها: در این بخش برای تدوین سیاست‌های بهینه، تأمین برقابی در کنار نیازهای کشاورزی، شرب، صنعت و زیست‌محیطی

جدول ۵- نتایج مدل‌های بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تمامی نیازها

SSDP	SDP_Scenario	SDP_Class	DP	مدل‌ها		
				معیارهای کارایی		
۶۵	۶۵	۶۳	۶۲			اعتمادپذیری زمانی (%)
۵۷	۵۵	۵۴	۴۹			اعتمادپذیری کمی (%)
۱۳۱۵۴۰	۱۴۱۱۴۵	۱۴۴۲۳۴	۱۵۲۵۲۳			میانگین کمبود سالانه (MCM)
۲۵۳	۳۱۳	۲۸۸	۳۱۳			حداکثر کمبود (MCM)
۱۱۹۹۶۰	۱۲۶۷۶۵	۱۲۹۵۰۹	۱۴۶۷۴۸			میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی (بدون بعد)
زمان اجرای مدل‌ها						
۳۵/۷ دقیقه	۱۷/۸ دقیقه	۱/۵ دقیقه	۹/۸ ثانیه			عدم پیش‌تخصیص دهی و برداری‌سازی

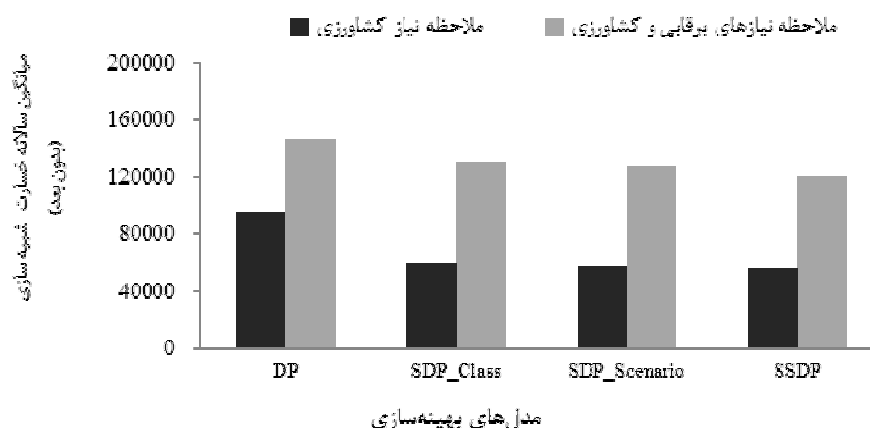
سالانه خسارت شبیه‌سازی برای حالتی که سیاست‌های بهینه با و بدون احتساب نیاز برقابی تدوین و شبیه‌سازی

براساس نتایج جدول، از نظر شاخص‌های کارایی، مدل‌های SSDP بهترین عملکرد را داشته است. در شکل ۶ میانگین



شده و در این بین مدل قطعی DP بیشترین مقادیر خسارت را داشته است.

شده‌اند، آمده است. دیده می‌شود که عدم تأمین نیاز برقایی در تمامی مدل‌ها، باعث افزایش خسارت سالانه



شکل ۶- میانگین سالانه خسارت شبیه‌سازی با و بدون دیدن نیاز برقایی

ذکر شده برنامه‌نویسی به خوبی توانسته زمان اجرای مدل‌ها را کاهش دهد. این امر به‌خصوص با بزرگتر شدن ابعاد مسئله (افزایش تعداد گسسته‌سازی‌های حجم مخزن از ۱۰ به ۵۰ عدد) بارزتر می‌باشد. به‌عنوان نمونه زمان اجرای \$\$SDP با تعداد شاخص ۵۰ از ۲/۳ ساعت به ۵/۵ دقیقه کم شده است. شایان ذکر است که کلیه محاسبات این پژوهش با رایانه ۲ هسته‌ای، پنتیوم ۴ (۲/۸ گیگا هرتز) و حافظه ۴ گیگا بایت انجام شده است.

ارزیابی روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی و برنامه‌نویسی برداری در کاهش زمان اجرای مدل‌ها: با وجود نتایج مثبت مدل‌های SDP و بخصوص نوع \$\$SDP، هزینه‌های محاسباتی و زمان اجرای این مدل‌ها خیلی بالا بود. به طوری که برای اجرای آن با تعداد شاخص ذخیره‌ای برابر با ۵۰، زمان محاسبات به بیش از ۲ ساعت می‌رسید. برای رفع این مشکل، روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی و برنامه‌نویسی برداری ارزیابی شد که نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های

جدول ۶- تأثیر روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی و برنامه‌نویسی برداری بر زمان اجرای مدل‌های بهینه‌سازی

تعداد شاخص ذخیره مخزن	مدل‌ها				نحوه برنامه‌نویسی
	\$\$SDP\$	\$SDP\_Scenario\$	\$SDP\_Class\$	DP	
۱۰ شاخص	۳۵/۷ دقیقه	۱۷/۸ دقیقه	۱/۵ دقیقه	۹/۸ ثانیه	عدم پیش‌تخصیص‌دهی و برداری‌سازی
	۵۵/۵ ثانیه	۳۲ ثانیه	۳/۲ ثانیه	۰/۶ ثانیه	وجود پیش‌تخصیص‌دهی و برداری‌سازی
	۳۹	۳۳	۲۸	۱۸	نسبت زمان اجرای مدل‌ها
۵۰ شاخص	۲/۲۷ ساعت	۱/۰۱ ساعت	۸/۴ دقیقه	۵۹/۳ ثانیه	عدم پیش‌تخصیص‌دهی و برداری‌سازی
	۵/۵ دقیقه	۲/۸ دقیقه	۲۵/۵ ثانیه	۳/۳ ثانیه	وجود پیش‌تخصیص‌دهی و برداری‌سازی
	۲۵	۲۱	۲۰	۱۷	نسبت زمان اجرای مدل‌ها

## نتیجه‌گیری

این پژوهش تلاشی بود تا عملکرد انواع قطعی و احتمالاتی مدل‌های برنامه‌ریزی پویا شامل DP، SDP\_Class، SDP\_Scenario و SSDP را برای تدوین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن سد زاینده‌رود، ارزیابی کند. در این راستا ابتدا برای تمامی مدل‌ها کدنویسی لازم انجام شد. سپس مقایسه‌ها در قالب بررسی معیارهای مختلفی انجام شد که شامل تأثیر شرایط اولیه مخزن، معیارهای کارایی، تأثیر افزایش شاخص ذخیره‌ای، دیدن تمامی نیازهای پایین‌دست سد و تأثیر به کارگیری روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی و برنامه‌نویسی برداری بر زمان اجرای مدل‌ها بود. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- بررسی شرایط اولیه مخزن و شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه حاصل از چهار مدل بهینه‌سازی، نشان داد که تمامی مدل‌ها بعد از گذشت نزدیک به ۴ سال، رفتاری مستقل از حجم اولیه دارند و در این خصوص تفاوت زیادی دیده نمی‌شود.
- از نظر معیارهای کارایی، عملکرد مدل‌های احتمالاتی SDP و SSDP بهتر از مدل قطعی DP بود. این برتری عملکرد به‌خصوص برای سری‌های زمانی ساختگی که در آن مدل‌ها با شرایط حدی‌تر کم‌آبی مواجه بودند، برتر خود را نشان می‌داد و در خصوص مدل SSDP بهتر بود.
- عملکرد تمامی مدل‌ها در مراحل بهینه‌سازی و نیز شبیه‌سازی نسبت به افزایش تعداد شاخص ذخیره‌ای حجم مخزن از ۱۰ به ۵۰ عدد، مثبت و به طور تقریبی مشابه بود. به‌عنوان مثال متوسط کاهش مقادیر میانگین خسارت بهینه‌سازی در تمامی آن‌ها حدود ۱۵ درصد بود.
- باوجود عملکرد مناسب مدل SSDP، هزینه محاسباتی آن بسیار بالا بود به طوری که در مواردی زمان اجرای آن ۱۳۸ برابر DP بود. بدین منظور بازنگری در کد برنامه‌ها با روش‌های پیش‌تخصیص‌دهی متغیرها و برنامه‌نویسی برداری صورت گرفت که نتایج قابل توجه بود، به طوری که در مدل SSDP زمان محاسبات را از حدود از ۲/۳ ساعت به ۵/۵ دقیقه کم کرد. بدین ترتیب استفاده از این روش‌ها به ویژه برای سیستم‌های چندمخزنه که بار محاسباتی و زمان اجرای مدل‌ها به شدت افزایش می‌یابد، قابل پیشنهاد است.

## منابع

۱. البرزی آ. ۱۳۸۵. مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنی به روش SSDP، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، گرایش مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. ۱۰۰ ص.
۲. بانک طرح‌های توسعه منابع آب. ۱۳۸۸. شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا.
3. Eum H. Kim Y. O. and Palmer R. 2011. Optimal Drought Management Using Sampling Stochastic Dynamic Programming with a Hedging Rule. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 137(1): 113-122.
4. Faber B. A. and Stedinger J. R. 2001. Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology*. 249: 113-133.
5. Kelman J. Stedinger J. R. Cooper L.A. Hsu E. and Yuan S. 1990. Sampling Stochastic Dynamic Programming Applied To Reservoir Operation. *Water Resource Research*. 26(3): 447-454.
6. Kim Y. O. Eum H. Lee E. G. and Ko I. H. 2007. Optimizing Operational Policies of a Korean Multireservoir System Using Sampling Stochastic Dynamic Programming with Ensemble Streamflow Prediction. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 133(1): 4-14.
7. Labadie J. W. 2004. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review, *Journal Water Resources Planning Management*. 130:93-111.
8. Loucks D. P. Stedinger J. R. and Haith D. A. 1981. *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 128 p.
9. Loucks D. P. and van Beek E. 2005. *Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications*, UNESCO, Paris. 690 p.
10. Morid S. Massah A. R. Agha Alikhani M. and Mohammadi K. 2004. Chapter 6: Maintaining Sustainable Agriculture under Climate Change: Zayandeh Rud Basin (Iran). *Book of Climate Change in Contrasting River basins (Adaptation Strategies for Water, Food and Environment)*, CABI Publishing. 17 p.
11. Mousavi S. J. Karamouz M. and Menhadj M. B. 2004b. Fuzzy- State Stochastic Dynamic Programming For Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130(6): 460-470.
12. Simonovic S. P. 2009. *Managing Water*

Resources: Methods and Tools for a systems Approach. Published jointly by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 7, place de Fontenoy, 75007 Paris, France, and Earthscan, Dunstan House, 14a St Cross Street, London EC1N 8XA, United Kingdom. 625 p.

13. Vedula S. and Mujumdar P. 2005. Water Resources Systems: Modelling Techniques and Analysis, Tata McGraw-Hill. 279 p.

