



دانشگاه شاهرود و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره دوم، ۱۳۹۸
۹۷-۱۱۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>
DOI: 10.22069/jwsc.2019.15193.3038

تعیین و آنالیز گسسته‌سازی حجم مخزن سد جامیشان با برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی در توابع هدف مختلف

*سید احسان فاطمی^۱ و هیوا کوهی^۲

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد منابع آب گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی
تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۴

چکیده

سابقه و هدف: امروزه یکی از مشکلات موجود در کشور، کمبود آب می‌باشد و این مسأله، لزوم استفاده از یک مدیریت مناسب منابع آب را بیش از پیش آشکار می‌سازد. یکی از روش‌های استخراج قوانین بهره‌برداری از مخزن، روش برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی (SDP) می‌باشد. در روش (SDP) یکی از مهم‌ترین عوامل برای رسیدن به جواب بهینه، نحوه گسسته‌سازی حجم مخزن و دبی‌های ورودی به مخزن می‌باشد. در این پژوهش، به منظور دستیابی به تعداد گسسته‌سازی بهینه حجم مخزن در روش برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی، با در نظر گرفتن تابع هدف در سه حالت مختلف ($\alpha=0$ ، $\alpha=0.5$ و $\alpha=1$) و ثابت فرض نمودن تعداد کلاس دبی ورودی به مخزن، حالت‌های مختلفی از گسسته‌سازی حجم ذخیره به صورت ۳، ۵، ۷ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی به منظور تعیین کلاس بهینه حجم مخزن سد جامیشان در توابع هدف مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با داشتن سری تاریخی جریان ورودی به سد جامیشان و حجم مفید مخزن، جریان ورودی با روش طول بازه‌های مساوی به ۳ کلاس و حجم مخزن با روش موران به کلاس‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ گسسته‌سازی شد. با تعریف تابع هدف به صورت حداقل‌سازی خسارات سیستم برای هر ترکیب از کلاس جریان و حجم مخزن (k, i) روش برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی انجام شد. با دستیابی به سیاست پایا برای هر دوره، مقادیر رهاسازی، حجم جریان و حجم مخزن به صورت قطعی برای هر دوره محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد در حالت $\alpha=0$ که فقط تامین مجموع نیازهای پایاب سد مدنظر است، کلاس بهینه حجم مخزن برابر $k=7$ انتخاب شد که به‌ازای آن حداقل مقدار در حجم کمبود تامین مشاهده شد. چنانچه تابع هدف $\alpha=1$ باشد (فقط حجم مخزن هدف)، در این حالت حجم مخزن بهینه برابر $k=10$ است که به‌ازای آن اختلاف حجم مخزن از مقدار مطلوب (T_s) از حالت ثابت خارج شد و اولین تغییر کاهشی در آن مشاهده شد. تعیین کلاس بهینه حجم مخزن در حالت $\alpha=1$ متأثر از نوع روش گسسته‌سازی حجم مخزن است که در روش‌های موران و کلاسیک با نتایج یکسان،

* مسئول مکاتبه: e_fatemi78@yahoo.com

k بهینه برابر ۱۰ و در روش ساوارنسکی $k=7$ انتخاب شد. در حالت $\alpha=0/5$ (دو هدف رهاسازی از مخزن و حجم مخزن هدف) حجم مخزن منتخب بر اساس تابع هدف برابر $k=10$ انتخاب شد.

نتیجه‌گیری: در شرایطی که تابع هدف فقط تخصیص و خروجی از مخزن است، کلاس بهینه حجم مخزن در نقطه‌ای اتفاق خواهد افتاد که میزان حجم کمبودها با افزایش کلاس‌بندی مخزن ثابت بماند. در این حالت با تقسیم‌بندی حجم مخزن به ۷ کلاس میزان حجم کمبود ثابت شده و $k=7$ به‌عنوان کلاس بهینه انتخاب شد. در سناریوی دوم، نقطه‌ای به‌عنوان بهترین گسسته‌سازی از حجم مخزن انتخاب شد که بیش‌ترین نزدیکی را با حجم ذخیره مورد نیاز (T_s) داشت، بنابراین در این حالت کلاس بهینه حجم مخزن $k=10$ است. در سناریوی سوم، با انتخاب کلاس ۱۰ برای حجم مخزن، دو هدف حداقل سازی حجم ذخیره و رهاسازی از مقادیر مطلوب بهتر رعایت شد و مقدار تابع هدف در کلاس ۱۰ اولین تغییر کاهشی را از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی، بهره‌برداری مخزن، تابع هدف، گسسته‌سازی حجم مخزن

مقدمه

بهره‌برداری بهینه از مخازن به معنای تخصیص بهینه آب ذخیره شده به مصارف گوناگون، که سد به‌منظور آن‌ها احداث شده است، می‌باشد. برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن مدل‌های متفاوتی وجود دارد. به‌دلیل عدم قطعیت موجود در پارامترهای هیدرولوژیکی استفاده از این مدل‌ها پیچیده‌تر خواهد بود. یکی از روش‌های بهینه‌سازی در بهره‌برداری از مخازن، روش برنامه‌ریزی پویا (DP)^۱ می‌باشد. کاربرد برنامه‌ریزی پویا در بخش منابع آب توسط یاکویتز (۱۹۸۲) مرور شده است (۱۵). طی پژوهش‌های گسترده‌ای که بر روی قابلیت‌های مدل DP انجام شده است، کاربرد DP در حالت قطعی و احتمالاتی برای سیستم‌های تک‌مخزنه منجر به نتایج موفقیت‌آمیزی گردیده است. ساختار احتمالاتی و غیرقطعی مدل‌های (DP) که برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی (SDP)^۲ نامیده می‌شود در مسائل بهره‌برداری از مخزن به‌طور گسترده‌ای کاربرد داشته‌اند (۳). استالریچ و بوراس

(۱۹۹۱) با فرض وابستگی جریان‌های رودخانه‌ای به دوره قبل، از برنامه‌ریزی پویای احتمالی (SDP) برای بهره‌برداری مخزن استفاده نمودند (۱۱). برای بهبود عملکرد مدل‌های (SDP)، تلاش‌ها بر آن بوده است تا تداوم جریان رودخانه و اطلاعات هیدرولوژیکی حوضه را در فرایند مدل‌سازی (SDP) وارد نمایند. در این راستا، لاکس و همکاران (۱۹۸۱) از جریان دوره کنونی به‌عنوان متغیر حالت هیدرولوژیکی استفاده نمودند (۱). دیگر پژوهشگران چون بوراس (۱۹۶۶) و بوتچر (۱۹۶۷) ضمن توسعه مدل، جریان‌های رودخانه را همبسته در نظر گرفتند (۶). ترابی و مباشر (۱۹۷۳) در مطالعات خود بر روی یک مخزن منفرد چندمنظوره، از مدل پویای احتمالاتی استفاده کردند که اهداف آن مخزن تامین آب، تولید انرژی پیک، کنترل سیل و کنترل کیفیت آب می‌باشد (۵). هیونگ و همکاران (۱۹۹۱) و سیو و دنینگر (۱۹۷۴) روی انواع مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی مطالعه و پژوهش نمودند (۷ و ۹). بالیارسینگ (۲۰۱۰) به‌منظور بهره‌برداری بهینه، مدل

1- Dynamic Programming

2- Stochastic Dynamic Programming

مدیریت مخزن داری شکست کم‌تری نسبت به سایر مدل‌های دیگر بوده و نتایج بهتری ارائه می‌دهد (۸). هدف از مطالعه حاضر، گسسته‌سازی حجم مخزن و تعیین تعداد کلاس بهینه حجم مخزن با روش برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک بود، به طوری که میزان کمبود و خسارات سیستم با در نظر گرفتن تابع هدف به حداقل برسد.

مواد و روش‌ها

روش برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک از جمله روش‌هایی است که قابلیت رویارویی با مسأله‌های دارای عدم قطعیت را دارد. در برنامه‌ریزی پویا در شرایط عدم قطعیت حجم مخزن و جریان ورودی به مخزن در کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. چون مقدار جریان ورودی به صورت غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود، می‌توان تابع احتمال انتقال آن را با توجه به فرآیند مارکوف مرتبه اول (FMP)^۱ نوشت. هدف نهایی از توضیح مفهوم زنجیره مارکوف و محاسبه‌های احتمال انتقال، محاسبه احتمال وقوع متغیر دارای عدم قطعیت در دوره زمانی بعدی در هر یک از بازه‌های گسسته‌سازی شده است. در حقیقت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود، پیش‌بینی احتمال وقوع متغیر دارای عدم قطعیت در هر یک از بازه‌های گسسته در دوره زمانی بعدی با توجه به شرایط گذشته از جمله مقدار همان متغیر در دوره زمانی فعلی انجام می‌شود. یک فرآیند مارکوف مرتبه اول دارای این ویژگی است که وابستگی مقادیر آینده فرآیند به مقادیر گذشته، فقط به مقادیر اخیر^۲ و نه به مقادیر گذشته یا مشاهدات بستگی دارد و رابطه ریاضی آن به صورت زیر بیان می‌شود:

برنامه‌ریزی پویا در شرایط عدم قطعیت را برای یافتن سیاست بهینه بهره‌برداری توسعه داده و آن را بر روی یک منطقه مورد آزمایش قرار داد (۴). لیو و همکاران (۲۰۱۲) برای بهره‌برداری بهینه از منطقه مطالعاتی خود در چین از برنامه‌ریزی پویا در شرایط عدم قطعیت استفاده نمودند (۱۰). شکری و همکاران (۲۰۱۲) در مخزن سد سفیدرود برای تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن تامین تقاضای آب و عمل فلاشینگ رسوب به صورت هم‌زمان، از برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک استفاده نمودند (۱۲). جعفر و همکاران (۲۰۱۶) از مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی را برای مشخص نمودن دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کارن در جنوب لبنان استفاده کردند. نتایج نشان داد که سیاست بهره‌برداری بدست آمده از برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی میزان شکست ۳ تا ۶ درصد کاهش داده و تولید انرژی برآبی را ۱۵ درصد افزایش می‌دهد. سیاست برگرفته از این مدل قادر بود میزان کمبود سیستم را به کم‌تر از ۱۰ درصد کاهش دهد و تعداد کلاس بهینه برای جریان ورودی بین ۳ تا ۵ کلاس مشخص شد (۷). محمدقاسمی و همکاران (۲۰۱۶) مدیریت آب اختصاص یافته به بخش کشاورزی را در شرایط عدم قطعیت با مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از این سیاست، مدیران در حالت سود خالص مثبت خوش‌بینانه عمل کرده و میزان آب زیادی را به کشاورزان وعده می‌دهند و برعکس در شرایط سود خالص منفی، وعده آب کم‌تری را می‌دهند (۱۳). جوکار شوریجه و همکاران (۲۰۱۴) با مقایسه مدل‌های (DP)، (SDP) و مدل‌های دیگر در زیرحوضه زاینده‌رود دریافتند که مدل (SDP) در

1- First order Markov process

2- Current Values

بهینه (شرایطی که در آن مقدار تابع هدف در سال‌های متفاوت برای دوره‌های زمانی یکسان، ثابت بماند). تحت عنوان $I^*(k, i, t)$ به دست خواهد آمد. با رسیدن به سیاست پایای بهینه و مشخص بودن I^* در هر دوره مقادیر احتمال برای رهاسازی از مخزن، جریان ورودی و حجم مخزن محاسبه می‌شود.

معرفی منطقه مورد مطالعه: سد مخزنی جامیشان در استان کرمانشاه بر روی رودخانه جامیشان در جنوب غربی شهرستان سنقر و کلیایی در نزدیکی ایستگاه هیدرومتری پیرسلیمان با طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۹ دقیقه شرقی و عرض ۳۴ درجه و ۴ دقیقه شمالی احداث گردیده است. این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با حجم مفید ۵۲/۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. اهداف احداث این سد عبارتند از: تنظیم و ذخیره آب رودخانه جامیشان جهت آبیاری حدود ۳۰۰۰ هکتار اراضی دشت دینور و تنظیم حقایبه ۲۲۰۰ هکتار از اراضی دشت چمچمال؛ تامین آب صنایع منطقه؛ کنترل سیلاب و بهبود محیط زیست منطقه می‌باشد. کل ۵۲۰۰ هکتار اراضی، علاوه بر سد جامیشان از آب زیرزمینی نیز استفاده می‌کند و در این پژوهش فقط نیازهای کشاورزی تحت تأثیر سد جامیشان منظور شده است. نیازهای پایاب سد شامل کشاورزی، صنعت و زیست محیطی است که عدد مربوط به نیاز هر ماه یا فصل، حاصل مجموع ۳ نیاز ذکر شده می‌باشد.

$$P_{ij}^t = [Q_{t+1} | Q_t] \quad (1)$$

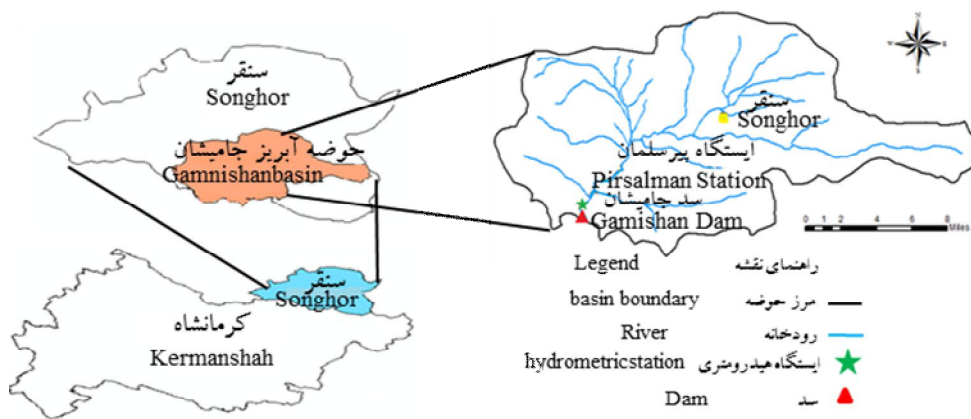
که در آن، P_{ij}^t تابع احتمال انتقال است که نشان‌دهنده میزان احتمال وابستگی دبی وقوع یافته در دوره $t+1$ به وقوع دبی در دوره t ، Q_{t+1} دبی در دوره $t+1$ و Q_t دبی در دوره t است. باید توجه داشت که میزان تابع فوق از طریق سری زمانی ثبت شده به دست می‌آید. با استفاده از رابطه پیوستگی می‌توان نوشت:

$$S_{t+1} = S_{kt} + Q_{it} - E_{klt} - R_{kilt} \quad (2)$$

که در آن، اندیس‌های k و l مربوط به کلاس‌بندی مخزن به ترتیب در ابتدای دوره‌های t و $t+1$ می‌باشند و i مربوط به کلاس‌بندی جریان در دوره t می‌باشد. S_{kt} ذخیره اولیه مخزن، Q_{it} دبی جریان در دوره t ، E_{klt} میزان تبخیر از مخزن متناظر با کلاس‌بندی‌های k و l ، مقدار جریان خروجی در طول دوره t می‌باشد. اگر مقدار بهره‌وری سیستم B_{kilt} باشد و تابع هدف حداقل کردن کاهش مقدار امید ریاضی بهره‌وری سیستم باشد، تابع تکرار مربوط به برنامه‌ریزی پویای استوکاستیکی به صورت زیر می‌باشد:

$$f_t^n(k, i) = \text{Min}[B_{kilt} + \sum_j P_{ij}^t f_{t+1}^{n-1}(l, j)] \quad (3)$$

تابع تکرار در هر مرحله محاسبات محاسبه می‌شود و تا زمانی که میزان اختلاف $f_t^{n+T}(k, i) - f_t^n(k, i)$ مقدار ثابتی شود، ادامه خواهد یافت. پس از ارضای این شرط مقدار سیاست

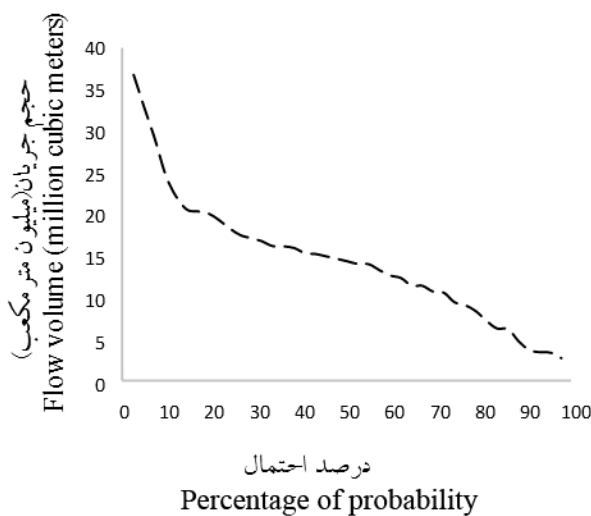


شکل ۱- موقعیت سد جامیشان.

Figure 1. Location of the Jamishan Dam.

برای انجام این پژوهش، از سری تاریخی جریان ورودی به مخزن سد جامیشان استفاده گردید که منحنی تداوم جریان آن به صورت شکل ۲ می باشد.

در این مدل، ۴ دوره زمانی در نظر گرفته شد. جریان ورودی و حجم ذخیره اول دوره متغیرهای حالت و، جریان خروجی یا هم ارز آن حجم ذخیره آخر دوره متغیرهای تصمیم اند.



شکل ۲- منحنی تداوم جریان رودخانه جامیشان.

Figure 2. Mass curve of the flow of the Jamishan river.

مسأله های مختلف توسعه داده شده اند که چند نمونه از روش های موجود برای گسسته سازی حجم مخزن و یا جریان ورودی به مخزن در ادامه توضیح داده شده است:

همان طور که پیش تر نیز گفته شد، استفاده از روش برنامه ریزی پویا و یا برنامه ریزی پویای احتمالاتی تنها در فضای تصمیم گسسته ممکن است. روش های مختلفی برای گسسته سازی فضای تصمیم

گسسته‌سازی، دامنه تغییرات دسته‌بندی می‌شود و مرکز هر دسته به عنوان شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از انجام عمل گسسته‌سازی، به‌ازای هر مقدار حجم اولیه و هر مقدار ورودی و هر مقدار حجم ثانویه تابع هدف مورد نظر محاسبه می‌شود. **تابع هدف:** تابع هدف به‌صورت حداقل‌سازی خسارات سیستم بیان می‌شود (۱۰ و ۱۵):

$$B_{kilt} = [\alpha(S_{kt} - T_s^t)^2 + (1 - \alpha)(R_{kilt} - T_r^t)^2] \quad (۷)$$

که در آن، S_{kt} ذخیره اولیه مخزن، T_r^t مقدار خروجی هدف در هر دوره، R_{kilt} رهاسازی از مخزن در هر دوره و T_s^t مقدار حجم مخزن هدف در هر دوره است که برابر ۳۰ میلیون مترمکعب لحاظ شده است. برای تعیین کلاس بهینه حجم مخزن، تابع هدف در ۳ سطح و به‌ازای کلاس‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفت:

۱- حالت $\alpha=0$ (فقط رهاسازی از مخزن)

۲- حالت $\alpha=1$ (فقط حجم مخزن هدف)

۳- حالت $\alpha=0.5$ (دو هدف رهاسازی و حجم مخزن هدف)

مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی برای هر کدام از حالات تابع هدف و به‌ازای هر کدام از گسسته‌سازی‌های حجم مخزن اجرا شده است. بر اساس گسسته‌سازی انجام شده، کلاس مربوط به دبی در هر دوره زمانی (فصلی) تعیین شد. با توجه به کلاس‌های موجود ماتریس‌های احتمال انتقال برای هر دوره (فصل) با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط متلب محاسبه شد. روش کار به این صورت بود که جریان ورودی به مخزن به‌عنوان متغیر ورودی در محیط برنامه فراخوانی شده و به یک ماتریس $m \times n$ (m سطر و n ستون) تبدیل شد. سری تاریخی جریان به ماتریس 4×4 تبدیل می‌شود در ادامه با روش طول دسته مساوی، مرکز هر دسته به‌عنوان شاخص آن دسته

گسسته‌سازی حجم مخزن: سه روش کلاسیک، موران^۱ و ساوارنسکی^۲ جهت گسسته‌سازی حجم ذخیره ارائه شده‌اند. در همه این روش‌ها، محدوده حجم فعال مخزن (CAP)^۳ به تعدادی تراز حجم ذخیره (SDN)^۴ تقسیم‌بندی می‌شود. سپس حجم‌های موجود در هر بازه با یک شاخص از پیش تعیین شده (که اغلب میانگین حد بالا یا حد پایین بازه است)، مشخص می‌شوند (۲ و ۱۲). در این مطالعه، برای گسسته‌سازی حجم مخزن از روش موران استفاده شده است که در آن حد بالا و پایین دامنه تغییرات و مرز بالای هر دسته به‌عنوان شاخص‌های حجم مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرند (دامنه تغییرات بر $n-1$ دسته تقسیم می‌شود).

$$S_k = (K-1)\Delta S \quad (۸)$$

$$K = 1, 2, \dots, SDN - 1 \quad (۹)$$

$$\Delta S = \frac{CAP}{SDN - 1} \quad (۱۰)$$

ظرفیت ذخیره حداقل (S_{min}) معادل ۰/۵ میلیون مترمکعب و ظرفیت ذخیره حداکثر (S_{max}) معادل ۵۲/۷ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است.

گسسته‌سازی جریان ورودی: سه روش طول دسته مساوی، فراوانی مساوی و بازه‌ها و زیر بازه‌ها نیز جهت گسسته‌سازی جریان ورودی ارائه شده‌اند. برای گسسته‌سازی دبی ورودی به مخزن، از روش طول دسته مساوی استفاده شده است که در آن بر اساس داده‌های در دسترس ورودی به مخزن، مقدار مینیمم و ماکزیمم این داده‌ها پیدا شده و بر اساس تعداد

- 1- Moran
- 2- Savarenskiy
- 3- Capacity
- 4- Storage Discrete Number

$$PS_{kt} = \sum_i PR_{kit} \quad (12)$$

$$PQ_{it} = \sum_k PR_{kit} \quad (13)$$

با در دست داشتن احتمالات رهاسازی از مخزن، احتمال مربوط به جریان و حجم مخزن با توجه به رابطه‌های ۹ و ۱۰ به دست آمده و در نهایت از ضرب مقدار احتمال در شاخص مربوط به خود، مقدار جریان و حجم مخزن به صورت قطعی محاسبه می‌شود. مقادیر رهاسازی بهینه از مخزن و سیاست‌های تخصیص در هر دوره نیز مشخص می‌شود.

نتایج و بحث

در این مطالعه، با استفاده از ۴۹۲ داده ورودی به مخزن سد جامیشان و با مشخص نمودن منحنی تداوم جریان برای کل دوره، کلاس بهینه حجم مخزن با روش برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی مشخص شد. برای رسیدن به کلاس بهینه برای حجم مخزن مورد نظر تعداد کلاس دبی ورودی جریان برابر ۳ کلاس در نظر گرفته شد. کلاس‌های جریان ورودی برای ۴ دوره فصلی (پاییز، زمستان، بهار و تابستان) که با روش طول بازه مساوی به ۳ کلاس تقسیم شده به صورت جدول ۱ آورده شده است. درایه‌های ماتریس احتمال انتقال برای هر دوره (فصل) با استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه اول محاسبه شد و نتایج در جدول‌های ۲ تا ۵ آمده است. متغیر تصمیم، حجم آب رها شده از مخزن برای تامین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی در انتهای هر فصل است. نیاز آبی (Tr) برای دوره‌های مختلف به صورت جدول ۶ است. با در نظر گرفتن ۳، ۵، ۷ و ۱۰ کلاس، تقسیمات حجم مخزن بر اساس روش موران محاسبه و ارائه شده است.

لحاظ شد. چون در این روش فرض بر برقراری قاعده زنجیره مارکوف بین دبی‌های ورودی است، بنابراین احتمال انتقال بین دوره‌های کلاس‌های مختلف دبی محاسبه شد. در ادامه، با استفاده از تابع تکرار تعریف شده، محاسبات برای حدود ۲۸ دوره به صورت پسر و صورت گرفت که در انتهای محاسبات مقدار I^* مربوط به هر کدام از ۴ دوره و به‌ازای ترکیبات مختلف از k و i به دست آمد. نتیجه محاسبات به صورت n معادله و m مجهول است. با استفاده از روش ماتریس معکوس جواب دستگاه معادلات در محیط برنامه‌نویسی متلب به دست می‌آید. دستگاه معادلات را در قالب ماتریس ضرایب، مجهولات و مقادیر به صورت زیر مرتب شده است:

$$AX=B \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & & a_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$X=A^{-1}B \quad (10)$$

با تشکیل ماتریس فوق در اکسل و وارد نمودن آن‌ها در محیط متلب، ماتریس‌ها آماده و در نهایت دستگاه معادلات حل می‌شوند. در واقع با حل دستگاه فوق مقادیر PR_{kilt} محاسبه شده است. در ادامه برای یک I^* واحد می‌توان مقادیر احتمال مربوط به R_{kit} را به صورت زیر نوشت:

$$PR_{jt+1} = \sum_k \sum_i PR_{kit} P'_{ij} \quad (11)$$

و از طرف دیگر مقادیر مربوط به احتمال جریان ورودی و حجم مخزن نیز از طریق رابطه‌های زیر قابل محاسبه است:

جدول ۱- کلاس‌های جریان ورودی به مخزن سد جامیشان بر حسب میلیون مترمکعب.

Table 1. Input flow classes to Jamishan reservoir in million cubic meters.

تابستان Summer	بهار Spring	زمستان Winter	پاییز Autumn	کلاس Class
Qit	Qit	Qit	Qit	i
1.15	17.0	10.2	6.18	1
2.4	40.3	23.9	19.1	2
4.35	66.1	43.2	37.9	3

جدول ۲- ماتریس احتمال انتقال از دوره ۴ به دوره ۱.

Table 2. The probability matrix of the transition from period 4 to period 1.

دوره t=۱ Period t=1				j	دوره t=۴ Period t=4
3	2	1	i		
0.00	0.00	1.00	1		
0.14	0.14	0.71	2		
0.00	0.00	1.00	3		

جدول ۳- ماتریس احتمال انتقال از دوره ۳ به دوره ۴.

Table 3. The probability matrix of transition from period 3 to period 4.

دوره t=۴ Period t=4				j	دوره t=۳ Period t=3
3	2	1	i		
0.00	0.26	0.74	1		
0.08	0.50	0.42	2		
0.00	0.50	0.50	3		

جدول ۴- ماتریس احتمال انتقال از دوره ۲ به دوره ۳.

Table 4. Transmission matrix from period 2 to period 3.

دوره t=۳ Period t=3				j	دوره t=۲ Period t=2
3	2	1	i		
0.07	0.07	0.87	1		
0.00	0.39	0.61	2		
0.33	0.67	0.00	3		

جدول ۵- ماتریس احتمال انتقال از دوره ۱ به دوره ۲.

Table 5. The probability matrix of transition from period 1 to period 2.

دوره t=2 Period t=2				i \ j	دوره t=1 Period t=1
3	2	1			
0.03	0.57	0.41	1	1	
0.50	0.50	0.00	2	2	
0.50	0.50	0.00	3	3	

جدول ۶- نیاز پایین دست سد جامیشان بر حسب میلیون مترمکعب.

Table 6. Demand downstream Jamishan dam of million cubic meters.

مقدار Amount	نیاز آبی Targets release	فصل Season
5.6	Tr1	پاییز Autumn
1.5	Tr2	زمستان Winter
13.2	Tr3	بهار Spring
20.2	Tr4	تابستان Summer

جدول ۷- تعیین کلاس‌های حجم مخزن به روش موران.

Table 7. Reservoir volume classes by Moran method.

K=3	K=5	K=7	K=10
0.5	0.5	0.5	0.5
26.6	13.6	9.2	6.3
52.7	26.6	17.9	12.1
	39.7	26.6	17.9
	52.7	35.3	23.7
		44	29.5
		52.7	35.3
			41.1
			46.9
			52.7

انجام شد. با داشتن مقادیر نیاز آبی در هر فصل و رهاسازی مربوط به آن، از اختلاف این دو، مقدار حجم کمبود برای هر فصل مشخص شده است.

نتایج حالت اول: با ثابت فرض نمودن تعداد کلاس جریان ورودی و افزایش تعداد کلاس‌های حجم مخزن به صورت ۳، ۵، ۷ و ۱۰ محاسبات حل پس رو با روش برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی برای هر حالت

جدول ۸- سیاست بهره‌برداری بهینه و احتمال هر تصمیم در هر دوره زمانی به ازای گسسته‌سازی حجم مخزن به ۳ و ۵ کلاس

Table 8- Optimal operation policy and the probability of each decision in each time period for the discretion of reservoir volume to grade 3 and 5

K	K,i	t=1			t=2			t=3			t=4					
		PP_{kit}	R_{kit}	PS_{kit}	PQ_{it}	l^*	PR_{kit}	R_{kit}	PS_{kit}	PQ_{it}	l^*	PR_{kit}	R_{kit}	PS_{kit}	PQ_{it}	
K=3	1,1	0.76	6.14	0.90	0.31	10.25	0.37	1	0.54	17.02	0.66	1	0.40	1.10	0.63	
	1,2	0.04	19.06	0.84	0.05	23.89	0.80	2	0.20	13.83	0.76	2	0.14	2.43	0.34	
	1,3	0.04	11.37	0.05	0.04	16.79	0.07	3	0.02	13.14	0.05	1	0.00	4.30	0.02	
	2,1	0.14	5.36	0.90	0.06	9.58	0.37	2	0.11	16.31	0.66	1	0.17	26.67	0.63	
	2,2	0.01	18.28	0.16	0.11	23.22	0.19	3	0.07	13.11	0.20	2	0.13	28.00	0.34	
	2,3	0.01	10.59	0.05	0.03	16.09	0.07	3	0.02	38.88	0.05	2	0.02	3.24	0.02	
	3,1	0.00	4.58	0.90	0.00	8.91	0.37	3	0.00	15.58	0.66	2	0.07	25.62	0.63	
	3,2	0.00	17.50	0.00	0.01	22.56	0.01	3	0.02	38.85	0.04	2	0.07	26.95	0.34	
	3,3	0.00	36.30	0.05	0.01	41.86	0.07	3	0.01	64.62	0.05	2	0.01	28.81	0.02	
K=5	1,1	0.31	6.14	0.90	0.13	10.25	0.37	2	0.11	3.79	0.66	1	0.00	1.10	0.63	
	1,2	0.01	5.82	0.34	0.05	2	0.18	10.67	0.31	0.56	3	0.01	13.83	0.13	2.43	0.00
	1,3	0.01	11.37	0.05	0.01	3.54	0.07	5	0.01	13.14	0.05	1	0.00	4.30	0.02	
	2,1	0.34	Chart Area	0.90	0.14	9.91	0.37	2	0.23	16.66	0.66	1	0.25	13.89	0.63	
	2,2	0.02	5.43	0.38	0.05	3	0.20	10.34	0.36	0.56	4	0.08	13.47	0.32	15.22	0.34
	2,3	0.02	10.98	0.05	0.02	16.42	0.07	5	0.01	25.01	0.05	1	0.00	17.08	0.02	
	3,1	0.23	5.36	0.90	0.09	9.58	0.37	3	0.20	16.30	0.66	2	0.15	13.36	0.63	
	3,2	0.02	5.04	0.27	0.05	4	0.14	10.01	0.26	0.56	5	0.08	13.11	0.29	14.69	0.21
	3,3	0.02	23.84	0.05	0.02	29.31	0.07	5	0.01	38.88	0.05	2	0.00	16.55	0.02	
K=5	4,1	0.02	4/8V	0.90	0.01	9.25	0.37	4	0.09	15.94	0.66	2	0.10	25.14	0.63	
	4,2	0.00	1V/8A	0.02	0.05	5	0.04	9.67	0.07	0.56	5	0.11	25.98	0.22	27.48	0.17
	4,3	0.00	3V/6A	0.05	0.03	42.19	0.07	5	0.02	51.75	0.05	3	0.01	16.03	0.02	
	5,1	0.00	4/eA	0.90	0.00	8.91	0.37	5	0.02	15.58	0.66	3	0.13	25.62	0.63	
	5,2	0.00	3V/6e	0.00	0.05	4	0.00	22.56	0.00	0.56	5	0.01	38.85	0.04	26.95	0.28
5,3	0.00	4/6ee	0.05	0.00	55.07	0.07	5	0.00	64.62	0.05	4	0.02	15.50	0.02		

جدول ۹- سیاست بهربرداری بهینه و احتمال هر تصمیم در هر دوره زمانی به ازای گسسته‌سازی حجم مخزن به ۷ کلاس

Table 9- Optimal operation policy and the probability of each decision in each time period for the discretion of reservoir volume to grade 7

T	K	K,j	I*	t=1			t=2			t=3			t=4					
				PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	
K=7	1,1	1	0.22	6.14	0.2	0.90	2	0.09	1.43	0.35	2	0.00	8.20	0.66	1	0.00	1.10	0.63
		2	0.01	10.23	4	0.05	3	0.13	6.27	0.23	4	0.00	13.83	0.00	1	0.00	2.43	0.34
		4	0.01	11.37	4	0.05	5	0.01	7.95	0.07	7	0.00	13.14	0.05	1	0.00	4.30	0.02
	2,1	2	0.25	5.88	0.2	0.90	3	0.10	1.21	0.35	3	0.08	7.96	0.66	1	0.00	9.62	0.63
		3	0.01	9.97	6	0.05	4	0.14	6.05	0.25	5	0.01	13.59	0.09	1	0.00	10.96	0.34
		5	0.01	11.11	6	0.05	5	0.01	16.53	0.07	7	0.01	21.72	0.05	1	0.00	12.82	0.02
	3,1	3	0.17	5.62	0.1	0.90	4	0.07	0.99	0.35	3	0.16	16.54	0.66	1	0.18	18.15	0.63
		4	0.01	9.71	9	0.05	5	0.10	5.82	0.17	6	0.06	13.35	.23	1	0.06	19.48	0.34
		5	0.01	19.68	9	0.05	5	0.01	25.12	0.07	7	0.01	30.30	0.05	1	0.00	21.34	0.02
	4,1	4	0.25	5.36	0.2	0.90	5	0.10	0.77	0.37	4	0.15	16.30	0.66	2	0.11	17.80	0.63
		5	0.02	9.45	9	0.05	6	0.15	5.60	0.27	7	0.06	13.11	0.21	2	0.04	19.13	0.34
		5	0.02	28.25	9	0.05	5	0.02	33.71	0.07	7	0.00	38.88	0.05	2	0.00	20.99	0.02
	5,1	5	0.02	5.10	0.0	0.90	6	0.01	0.55	0.35	5	0.15	16.06	0.66	2	0.11	26.32	0.63
		5	0.00	18.02	2	0.05	7	0.04	5.38	0.08	7	0.09	21.09	0.27	3	0.04	18.78	0.34
		5	0.00	36.82	2	0.05	5	0.03	42.30	0.07	7	0.03	47.46	0.05	3	0.00	20.64	0.02
6,1	6	0.00	4.84	0.0	0.90	7	0.00	0.32	0.37	6	0.10	15.82	0.66	3	0.10	25.97	0.63	
	5	0.00	26.59	0	0.05	7	0.00	13.97	0.00	7	0.06	30.27	0.16	3	0.05	27.30	0.34	
	5	0.00	45.39	0	0.05	5	0.00	50.89	0.07	7	0.00	56.04	0.05	4	0.00	20.29	0.02	
7,1	6	0.00	13.41	0.0	0.90	7	0.00	8.91	0.37	7	0.03	15.58	0.66	4	0.14	25.62	0.63	
	5	0.00	35.16	0	0.05	7	0.00	22.56	0.00	7	0.02	38.85	0.04	4	0.15	26.95	0.34	
	5	0.00	53.96	0	0.05	5	0.00	59.48	0.07	7	0.00	64.62	0.05	5	0.02	19.94	0.02	

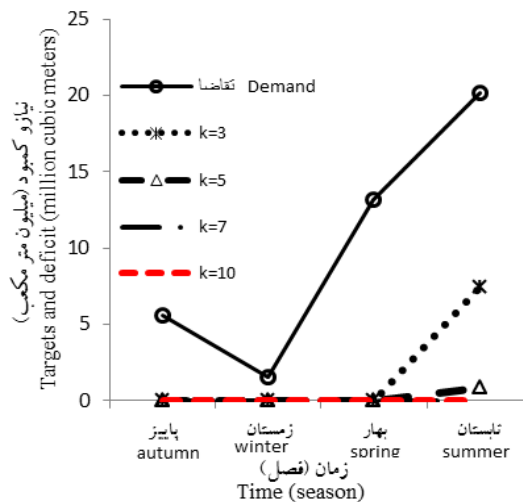
جدول ۱۰- سیاست بهره‌برداری بهینه و احتمال هر تصمیم و حالت در هر دوره زمانی به ازای گسسته‌سازی حجم معزن به ۱۰ کلاس

Table 10- Optimal operation policy and the probability of each decision in each time period for the discretion of reservoir volume to grade 10

K \ T	t=1										t=2										t=3										t=4									
	K _i	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}	I*	PR _{kit}	R _{kit}	PS _{kit}	PQ _{kit}									
1,1	1	1	0.02	6.18	0.90	0.02	2	0.01	4.48	0.37	3	0.00	5.46	0.66	1	0.00	1.15	0.63																						
	2	3	0.00	7.50	0.02	0.05	5	0.01	0.73	0.02	0.56	6	0.00	11.33	0.00	0.29	1	0.00	2.49	0.00	0.00	0.02																		
	3	6	0.00	8.90	0.05	0.05	6	0.00	14.23	0.07	10	0.00	13.90	0.05	1	0.00	4.35	0.02																						
2,1	2	2	0.04	6.18	0.90	0.04	3	0.01	4.48	0.37	3	0.01	11.26	0.66	1	0.00	6.95	0.63																						
	4	4	0.00	7.50	0.04	0.05	6	0.02	0.73	0.04	0.56	6	0.00	17.13	0.01	0.29	1	0.00	8.29	0.00	0.00	0.34																		
	7	7	0.00	8.90	0.05	0.05	6	0.00	20.03	0.07	10	0.00	19.70	0.05	1	0.00	10.15	0.02																						
3,1	3	3	0.11	6.18	0.90	0.12	4	0.04	4.48	0.37	4	0.01	11.26	0.66	1	0.00	12.75	0.63																						
	5	5	0.00	7.50	0.02	0.05	7	0.06	0.73	0.11	0.56	7	0.00	17.13	0.01	0.29	1	0.00	14.09	0.01	0.00	0.34																		
	7	7	0.00	14.70	0.05	0.05	6	0.00	25.83	0.07	10	0.00	25.50	0.05	1	0.00	15.95	0.02																						
4,1	4	4	0.24	6.18	0.90	0.25	5	0.10	4.48	0.37	5	0.04	11.26	0.66	1	0.01	18.55	0.63																						
	6	6	0.01	7.50	0.05	0.05	7	0.13	0.73	0.24	0.56	8	0.00	17.13	0.04	0.29	1	0.00	19.89	0.01	0.00	0.34																		
	7	7	0.01	20.50	0.05	0.05	6	0.01	31.63	0.07	10	0.00	31.30	0.05	1	0.00	15.95	0.02																						
5,1	5	5	0.04	6.18	0.90	0.06	6	0.02	4.48	0.37	5	0.09	11.26	0.66	2	0.03	18.55	0.63																						
	7	7	0.01	7.50	0.02	0.05	8	0.03	0.73	0.05	0.56	9	0.01	17.13	0.11	0.29	2	0.01	19.89	0.04	0.00	0.34																		
	7	7	0.01	26.30	0.05	0.05	6	0.00	37.43	0.07	10	0.01	37.10	0.05	2	0.00	21.75	0.02																						
6,1	6	6	0.29	6.18	0.90	0.29	7	0.12	4.48	0.37	6	0.03	17.06	0.66	3	0.09	18.55	0.63																						
	7	7	0.00	13.30	0.05	0.05	9	0.17	0.72	0.29	0.56	10	0.06	17.13	0.11	0.29	3	0.03	19.89	0.12	0.00	0.34																		
	7	7	0.00	23.10	0.05	0.05	6	0.01	20.03	0.07	10	0.03	42.90	0.05	3	0.00	21.75	0.02																						
7,1	7	7	0.17	6.18	0.90	0.24	8	0.07	4.48	0.37	7	0.14	17.06	0.66	3	0.10	18.55	0.63																						
	7	7	0.03	19.10	0.05	0.05	10	0.14	6.52	0.26	0.56	10	0.03	22.93	0.18	0.29	4	0.04	19.89	0.14	0.00	0.34																		
	7	7	0.03	37.90	0.05	0.05	6	0.05	49.03	0.07	10	0.01	48.70	0.05	4	0.00	21.75	0.02																						
8,1	8	8	0.00	6.18	0.90	0.00	9	0.00	4.48	0.37	8	0.14	17.06	0.66	4	0.11	24.35	0.63																						
	7	7	0.00	24.90	0.00	0.05	10	0.00	12.33	0.00	0.56	10	0.06	28.73	0.21	0.29	4	0.04	19.89	0.15	0.00	0.34																		
	7	7	0.00	43.70	0.05	0.05	6	0.00	54.83	0.07	10	0.00	54.50	0.05	5	0.00	21.75	0.02																						
9,1	9	9	0.00	6.18	0.90	0.00	10	0.00	4.48	0.37	9	0.02	17.06	0.66	5	0.02	24.35	0.63																						
	7	7	0.00	30.70	0.00	0.05	10	0.00	18.13	0.00	0.56	10	0.01	34.53	0.03	0.29	5	0.01	19.89	0.03	0.00	0.34																		
	7	7	0.00	49.50	0.05	0.05	6	0.00	60.63	0.07	10	0.00	60.30	0.05	6	0.00	21.75	0.02																						
10,1	9	9	0.00	11.98	0.90	0.00	10	0.00	10.28	0.37	10	0.19	17.06	0.66	6	0.28	24.35	0.63																						
	7	7	0.00	36.50	0.00	0.05	10	0.00	23.93	0.00	0.56	10	0.12	40.33	0.31	0.29	6	0.21	19.89	0.15	0.00	0.34																		
	7	7	0.00	55.30	0.05	0.05	6	0.00	66.43	0.07	10	0.00	66.10	0.05	7	0.02	21.75	0.02																						

برای هر فصل مشخص شده است. نتایج اجرای مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی برای حالتی که مقدار ضریب وزنی α در تابع هدف برابر صفر باشد (فقط تأمین مجموع نیازهای پایاب سد)، در قالب شکل ۳ آورده شده است.

از مجموع حاصل ضرب اعداد مربوط به رهاسازی و مقادیر احتمال متناظر با آن مقدار آب رهاسازی شده برای هر دوره (فصل) محاسبه شده است. حال با داشتن مقادیر نیاز آبی در هر فصل و رهاسازی مربوط به آن، از اختلاف این دو مقدار کمبود اتفاق افتاده



شکل ۳- نیاز و کمبود به‌ازای گسسته‌سازی مختلف حجم مخزن.

Figure 3. Demand and deficiency for the different discretion of reservoir volume.

دستیابی به حجم مخزن بهینه با مقادیر ضریب وزنی α برابر ۰/۵ یا ۱ نیز اجرا شد. نتایج به‌دست آمده برای دو حالت نیز مشابه $\alpha=0$ بوده و از کلاس ۷ به بعد کمبود و رهاسازی از مخزن ثابت شده است. در نهایت با توجه به نتایج منتج از شکل ۳ کلاس حجم مخزن ۷ به‌عنوان کلاس بهینه برای حجم مخزن سد جامیشان انتخاب می‌شود که مقدار حجم هر کلاس ۰/۵، ۹/۲، ۱۷/۹، ۲۶/۶، ۳۵/۳، ۴۴ و ۵۲/۷ میلیون مترمکعب می‌باشد.

نتایج حالت دوم: در این حالت ضریب ثابت α در تابع هدف برابر ۱ است. در روند حل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی برای این حالت فقط هدف حداقل‌سازی حجم ذخیره مخزن از مقدار مطلوب آن ($T_s=30$) مد نظر قرار گرفته است.

با توجه به شکل ۳ با تقسیم حجم مخزن به ۳ کلاس میزان کمبود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سایر کلاس‌های مخزن بالا است و با افزایش تعداد کلاس مخزن این کمبود به‌تدریج کم‌تر شده و در نهایت با تقسیم نمودن حجم مخزن به ۷ کلاس و بیش‌تر میزان کمبود ثابت شده و به عدد صفر خواهد رسید. بدین معنی که با بالا رفتن تعداد کلاس‌های حجم مخزن از ۷ به بعد تاثیر کلاس حجم مخزن در سیاست رهاسازی از بین رفته و حجم آب رهاسازی از مخزن ثابت می‌ماند. در واقع با افزایش تعداد کلاس حجم مخزن، کلاس‌های ۳ تا ۷ جریانی که ثابت بوده، وارد بازه‌هایی با حجم کم‌تر شده و در نتیجه رهاسازی از مخزن بیش‌تر و متعاقب آن کمبود کم‌تری اتفاق خواهد افتاد. مدل پویای احتمالاتی به‌منظور

جدول ۱۱- حجم مخزن در ابتدای دوره به‌ازای تعداد کلاس حجم مخزن.

Table 11. Initial storage volume for the number of class reservoir.

کلاس‌بندی حجم مخزن Discretization of storage volume	k=۳	k=۵	k=۷	k=۱۰
حجم مخزن در ابتدا دوره Initial storage volume	۲۶/۶	۲۶/۶	۲۶/۶	۲۹/۵

شد. در روش ساوارنسکی مقادیر حجم مخزن در کلاس‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ به‌ترتیب برابر ۵۲/۲، ۳۴/۸، ۳۱/۳ و ۳۲/۵ میلیون مترمکعب خواهد بود. مقدار ۳۱/۳ کم‌ترین اختلاف را با مقدار T_s دارد که مربوط به حالت $k=۷$ می‌باشد بنابراین در روش ساوارنسکی کلاس بهینه حجم مخزن ۷ است. در روش کلاسیک نیز مقادیر حجم مخزن در کلاس‌های مذکور به‌ترتیب برابر ۲۶/۱، ۲۶/۱، ۳۳/۳ و ۲۸/۷ میلیون مترمکعب می‌باشد که حداقل اختلاف حجم مخزن با T_s در کلاس $k=۱۰$ مشاهده شد. روش‌های کلاسیک و موران در گسسته‌سازی حجم مخزن به‌منظور تعیین k بهینه دارای نتایج یکسانی می‌باشند. بنابراین در حالت $\alpha=۱$ (حداقل‌سازی اختلاف حجم مخزن از T_s) برای تعیین k بهینه مخزن، علاوه بر تابع هدف باید در انتخاب نوع روش گسسته‌سازی مخزن نیز دقت نمود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با تقسیم‌بندی حجم مخزن به ۱۰ کلاس ($k=۱۰$)، حجم ذخیره مخزن از حالت ثابت خارج شده و حداقل اختلاف ممکن را با مقدار مطلوبش ($T_s=۳۰$) دارد. اگر تعداد گسسته‌سازی‌ها از ۱۰ کلاس بیشتر شود، حجم مخزن از مقدار T_s بیشتر می‌شود. بنابراین کلاس بهینه حجم مخزن با توجه به تابع هدف (حداقل‌سازی حجم ذخیره از مقدار T_s) $k=۱۰$ است که به‌ترتیب شامل مقادیر ۰/۵، ۶/۳، ۱۲/۱، ۱۷/۹، ۲۳/۷، ۲۹/۵، ۳۵/۳، ۴۱/۱، ۴۶/۹ و ۵۲/۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. با توجه به این‌که T_s وابستگی شدیدی به نوع روش گسسته‌سازی حجم مخزن دارد، محاسبه بهترین مقدار گسسته‌سازی حجم مخزن در حالات ۳، ۵، ۷ و ۱۰ کلاس در روش‌های کلاس‌بندی کلاسیک، ساوارنسکی و موران به‌ترتیب برابر ۱۰، ۷ و ۱۰ محاسبه خواهد

جدول ۱۲- کلاس‌های حجم مخزن به روش کلاسیک، ساوارنسکی و موران.

Table 12. Reservoir volume classes in classical, Savarenskiy and Moran methods.

روش موران Moran method				روش ساوارنسکی Savarenskiy method				روش کلاسیک Classic method			
K=3	K=5	K=7	K=10	K=3	K=5	K=7	K=10	K=3	K=5	K=7	K=10
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	8.7	5.2	3.7	2.6
26.6	13.6	9.2	6.3	52.2	17.4	10.4	6.5	26.1	15.7	11.1	7.8
52.7	26.6	17.9	12.1	52.7	34.8	20.9	13.0	43.5	26.1	18.5	13.1
	39.7	26.6	17.9		52.2	31.3	19.5		36.5	25.9	18.3
	52.7	35.3	23.7		52.7	41.8	26.0		46.1	33.3	23.5
		44	29.5			52.2	32.5			40.7	28.7
		52.7	35.3			52.7	39.0			48.1	33.1
			41.1				45.5				39.2
			46.9				52.2				44.4
			52.7				52.7				49.6

نتایج کلی کلاس‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ به‌ازای هر ۳ حالت تابع هدف در جدول ۱۳ ارائه شده است.

نتایج حالت سوم: اگر $\alpha=0/5$ باشد، دو هدف رهاسازی از مخزن و حجم ذخیره هدف (T_s) مدنظر قرار می‌گیرد. مشابه حالت‌های $\alpha=0$ و $\alpha=1$ برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی برای هر کدام از حالات گسسته حجم مخزن اجرا شد.

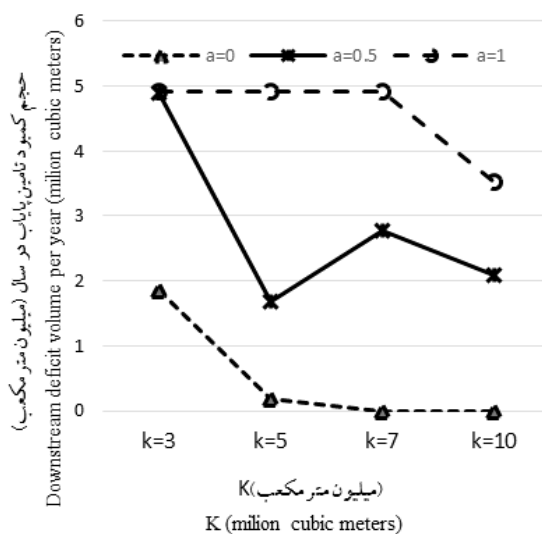
جدول ۱۳- تعیین کلاس‌های حجم مخزن در توابع هدف مختلف.

Table 13. Determining reservoir volume classes in different target functions.

		k=3	k=5	k=7	k=10
$\alpha=0$	S_t	8.8	20.6	23.9	33.0
	$ S_t - T_s $	21.2	9.4	6.1	3.0
	$ R_t - T_r $	1.9	0.2	0.0	0.0
	B_{kilt}	3.4	0.0	0.0	0.0
$\alpha=0.5$	S_t	26.6	27.0	30.8	28.2
	$ S_t - T_s $	3.4	3.0	0.8	1.8
	$ R_t - T_r $	4.9	1.7	2.8	2.1
	B_{kilt}	17.8	5.8	4.2	3.8
$\alpha=1$	S_t	26.6	26.6	26.6	29.5
	$ S_t - T_s $	3.4	3.4	3.4	0.5
	$ R_t - T_r $	4.1	4.1	4.1	3.5
	B_{kilt}	11.7	11.7	11.7	0.25

مختلف است که در ۳ سطح مختلف تابع هدف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارهای مربوط به $\alpha=0/5$ ، $\alpha=1$ و $\alpha=0$ به‌ترتیب در $k=5$ ، $k=10$ و $k=7$ حداقل مقدار کمبود را دارند، که این کلاس‌ها از نقطه‌نظر کمبود تامین نیاز پایاب سد بهینه می‌باشند.

نتایج حاصل از جدول ۱۳ نشان می‌دهد که در $\alpha=0/5$ اگر براساس حجم کمبود در تامین نیاز پایاب سد ($|R_t - T_r|$)، حجم مخزن بهینه تعیین شود، کلاس ۵ با داشتن کم‌ترین مقدار کمبود (۱/۷ میلیون مترمکعب) کلاس منتخب خواهد بود. شکل ۴ نیز حجم کمبود تامین نیاز پایاب سد به‌ازای کلاس‌های

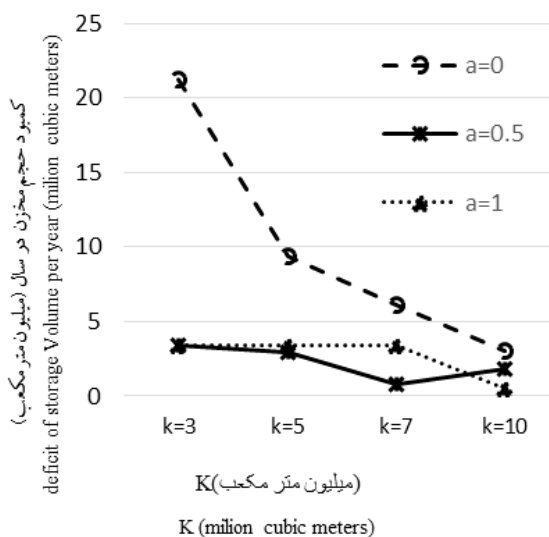


شکل ۴- کمبود تامین نیاز به ازای کلاس‌های مختلف.

Figure 4. Downstream deficit volume for Different Classes.

مترمکعب از T_s کلاس بهینه حجم مخزن خواهد بود و در حالت‌های $\alpha=0$ و $\alpha=1$ کلاس‌های بهینه مخزن برابر ۱۰ می‌باشد.

از طرفی اگر تعیین کلاس منتخب حجم مخزن بر اساس حداقل مقدار حجم مخزن از مقدار مطلوب $(|S_t - T_s|)$ باشد، با توجه به شکل ۵ در حالت $\alpha=0/5$ کلاس ۷ با مقدار اختلاف ۰/۸ میلیون



شکل ۵- کمبود حجم مخزن به ازای کلاس‌های مختلف.

Figure 5. Deficit of storage volume for different classes.

سرانجام مقدار کمبود ثابت شده و به عدد صفر می‌رسد. در واقع چنانچه تابع هدف فقط تخصیص و خروجی از مخزن باشد، تعیین گسسته‌سازی بهینه حجم مخزن در نقطه‌ای اتفاق افتاد که میزان حجم کمبودها با افزایش کلاسه‌بندی تغییر نکرد و ثابت ماند. در نهایت با توجه به نتایج، کلاسه حجم مخزن ۷ به‌عنوان کلاس بهینه برای حجم مخزن سد جامیشان در حالت $\alpha=0$ انتخاب شد. در شرایطی که تابع هدف $\alpha=1$ (حداقل‌سازی حجم مخزن از مقدار مطلوب) باشد نقطه‌ای به‌عنوان بهترین گسسته‌سازی از حجم مخزن انتخاب شد که بیش‌ترین نزدیکی را با حجم ذخیره مورد نیاز (T_s) داشت. بنابراین در حالت $\alpha=1$ کلاس بهینه حجم مخزن $k=10$ است. در این شرایط تعیین k بهینه به روش گسسته‌سازی مخزن نیز بستگی داشته، به‌طوری‌که نتایج گسسته‌سازی روش‌های موران و کلاسیک در تعیین حجم بهینه مخزن یکسان بوده و برای روش ساوارنسکی متفاوت می‌باشد. در شرایطی که $\alpha=0.5$ باشد در یک روش خاص گسسته‌سازی حجم مخزن، اگر نزدیکی جواب‌ها به T_s ملاک انتخاب حجم مخزن بهینه باشد با حالتی که کمبودها ملاک قرار گیرد نتیجه متفاوتی خواهد داشت. بنابراین بهترین ملاک برای این حالت در نظر گرفتن تابع هدف است. با انتخاب کلاس ۱۰ برای حجم مخزن، دو هدف حداقل‌سازی حجم ذخیره و رهاسازی از مقادیر مطلوب بهتر رعایت شده و تابع در کلاس ۱۰ اولین تغییر کاهشی را از خود نشان داد.

بنابراین، تعیین k بهینه در $\alpha=0.5$ باید بر اساس تابع هدف باشد که حداقل‌سازی کمبود در هر دو هدف مذکور را شامل می‌شود. با این تفاسیر در $k=10$ اولین تغییر در کاهش مقدار خسارت سیستم (مجموع کل کمبودها) اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است خارج از شرایط حدی $\alpha=0$ و $\alpha=1$ ، برای هر ضریبی از تابع هدف ما بین این دو مقدار ($0 < \alpha < 1$) در تعیین کلاس بهینه مخزن باید تابع هدف را در نظر گرفت و از روی آن قضاوت نمود.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه برای تعیین کلاس بهینه حجم مخزن در برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی (SDP)، تعداد کلاس دبی ورودی ثابت و برابر $i=3$ در نظر گرفته شد. همچنین تابع هدف در ۳ حالت با ضرایب وزنی متفاوت و حالت‌های مختلفی از حجم ذخیره به‌صورت $k=3, k=5, k=7, k=10$ مورد بررسی قرار گرفت. با حل روند برنامه‌ریزی پویا احتمالاتی، ماتریس احتمال انتقال با قاعده زنجیره مارکوف مرتبه اول برای هر فصل به‌طور جداگانه محاسبه شد. در سناریوی اول تابع هدف ضریب ثابت α برابر صفر در نظر گرفته شد (فقط خروجی مخزن). با انجام محاسبات در محیط نرم‌افزاری اکسل و متلب با افزایش تعداد کلاس حجم مخزن در روش SDP، میزان کمبود در آب رهاسازی شده برای بخش کشاورزی کاهش می‌یابد و در کلاس حجم مخزن ۷

منابع

- Anvari, S., Mosavi, S.J., and Morid, S. 2015. Comparison of Performance of Models DP, SDP and SSDP in Optimizing the Utilization of Multifunctional Water Purification. Iranian Water Research. 9: 1. 121-111. (In Persian)
- Bozorg Hadad, O. 2014. Water Resources Systems Optimization. Tehran University press, 412p. (In Persian)
- Baliarsingh, F. 2010. Optimal reservoir operation by stochastic dynamic programming-A case study. Inter. J. Earth Sci. Engin. 3: 2. 258-263.
- Estalrich, J., and Buras, N. 1991. Alternative specifications of state variables in stochastic-dynamic-programming models of reservoir operation. Applied mathematics and computation. 44: 2. 143-155.

5. Gablinger, M., and Loucks, D.P. 1970. Markov models for flow regulation. *J. Hydr. Engin.* 96: 1. 165-181.
6. Huang, W.C., Harboe, R., and Bogardi, J.J. 1991. Testing stochastic dynamic programming models conditioned on observed or forecasted inflows. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 117: 1. 28-36.
7. Jaafar, H.H., Al-Awar, F., and Ahmad, F. 2016. Effect of inflow class selection on multi-objective reservoir operation using stochastic dynamic programming. *Arabi. J. Sci. Engin.* 41: 12. 4911-4926.
8. Jowkarshorijeh, L., Ganji, A., and Homayounfar, M. 2014. A Continuous Solution for Optimal Reservoir Operation Problem Using the Constraint-State Technique. *Iran-Water Resour. Res. J.* 10: 2. 1735-2347.
9. Mohammad Ghasemi, M., SHahraki, J., and Sabouhi Sabouni, M. 2016. Optimization model of hirmand river basin water resources in the Agricultural Sector Using Stochastic Dynamic Programming under Uncertainty Conditions. *Inter. J. Agric. Manage. Dev.* 6: 2. 163-171.
10. Pan, L., Jingfei, Z., Liping, L., and Yan, S. 2012. Optimal reservoir operation using stochastic dynamic programming. *J. Water Resour. Prot.* 4: 342-345.
11. Su, S.Y., and Deininger, R.A. 1974. Modeling the regulation of Lake Superior under uncertainty of future water supplies. *Water resources research* 10: 1. 11-25.
12. Shokri, A., Haddad, O.B., and Mariño, M.A. 2012. Reservoir operation for simultaneously meeting water demand and sediment flushing: Stochastic dynamic programming approach with two uncertainties. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 139: 3. 277-289.
13. Torabi, M., and Mobasheri, F. 1973. A Stochastic dynamic programming model for the optimum operation of a multi-purpose reservoir. *Jawra J. Amer. Water Resour. Assoc.* 9: 6. 1089-1099.
14. Vedula, S., and Mujumdar, P.P. 2005. *Water resources systems: modelling techniques and analysis.* Tata McGraw-Hill, New delhi, 279p.
15. Yakowitz, S. 1982. Dynamic programming applications in water resources. *Water resources research.* 18: 4. 673-696.



Determination and analysis of reservoir storage discretization in Jamishan dam using stochastic dynamic programming with different objective functions

*S.E. Fatemi¹ and H. Koochi²

¹Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Razi University,

²M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, Razi University

Received: 06.10.2018; Accepted: 02.03.2019

Abstract

Background and Objectives: Nowadays, water scarcity is one of the current issue in Iran. And this issue more than ever reveals the needs for an appropriate water resources management. Stochastic Dynamic programming (SDP) is one of the extracting methods to obtain the reservoir operation rules. In this method, one of the most important factors to find the optimal solution is discretization of the storage capacity and reservoir inflow. In this research, to achieve optimal storage discretization by SDP method and considering tree types of objective function ($\alpha = 0$, $\alpha = 0.5$, $\alpha = 1$) with the constant reservoir inflow classes, some storage classes (3, 5, 7 and 10) are analyzed.

Materials and Methods: In this study, the SDP model has been used to find the optimal storage of Jamishan reservoir by any objective functions. By having historical reservoir inflow time series and storage volume, reservoir inflow and storage are discretized into 3 classes with equal length intervals method and also 3, 5, 7 and 10 classes with Moran method, respectively. This method is applied by considering objective function as a minimization of system damage for each combination of the reservoir inflow and storage classes (k, i). By achieving the steady policy at each period, the amount of reservoir Inflow, storage and release are deterministically defined.

Results: The results showed that in case of $\alpha = 0$, the optimal storage capacity considering just downstream water supply of demands as an objective function, is $k = 7$ and there is minimum water deficit. In addition, this would be 10 classes in case of $\alpha = 1$, which the amount of difference between reservoir storage and its desirable would be changed from constant value and the first decreasing change would be appear. Obtaining reservoir storage classes is also affected by method of discretization since this value is obtained 10 for classic and Moran method with the same result and 7 in Savarenskiy method. That is selected $k = 10$ based on the equal objective function in case of $\alpha = 0.5$ considered two objectives of reservoir release storage volume simultaneously as well.

Conclusion: Since the objective function is only reservoir release and water allocation, the optimal reservoir storage class would occur at the point where the water deficit is constant by increasing the number of storage classifications which $k = 7$ is the optimal class in this case. In the second scenario the best discretized class of the reservoir storage is the point which has the closest vicinity to the target storage (T_s). So, in this case, $k = 10$ is the optimum reservoir storage. In the third scenario, by choosing $k = 10$, two goals minimizing the amount of storage and release from the desired values, are well regarded in this case and also the first decreasing changes is happened in $k = 10$.

Keywords: Objective function, Reservoir operation, Reservoir storage discretization, Stochastic Dynamic programming

* Corresponding Author; Email: e_fatemi78@yahoo.com

Arci