

مقایسه رویکردهای برنامه‌ریزی پویا، خطی و غیرخطی در بهره‌برداری بهینه از مخزن (مطالعه موردی: خشکسالی سال‌های ۸۰-۱۳۷۷ شبکه‌های کشاورزی زاینده‌رود اصفهان)

صدیقه انوری^۱، سید جمشید موسوی^۲، سعید مرید^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۲۳

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب و وقوع خشکسالی‌های متناوب در کشور، استفاده از سیاست‌های کارآمد در بهره‌برداری از مخازن سدها اهمیت زیادی یافته است. در این خصوص رویکردهای مختلفی را می‌توان اعمال نمود که نوع مدل‌سازی و فرضیات آن‌ها می‌تواند تعیین‌کننده باشد. در این تحقیق، چهار رویکرد مدیریت تخصیص بهینه آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در شبکه زاینده‌رود اصفهان (دوره ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۰-۱۳۷۹) با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی مخزن مورد مقایسه قرار گرفته است. رویکردهای فوق عبارت بودند از: (۱) مدل‌سازی DP با ملاحظه قطعیت جریان ورودی به مخزن و نیاز ثابت آب بخش کشاورزی، (۲) مدل‌سازی SDP با ملاحظه عدم قطعیت جریان ورودی و نیاز ثابت آب کشاورزی، (۳) مدل‌سازی SSDP با ملاحظات مد نظر در رویکرد دوم و (۴) ملاحظه نیاز متغیر کشاورزی با دخالت دادن جزئیات تخصیص آب در مراحل مختلف رشد گیاهی، بین محصولات مختلف و شبکه‌های کشاورزی پایین‌دست با مدل‌های LP و NLP و نیز مدنظر قراردادن قطعیت جریان. نتایج نشان داد از منظر فرایند مدل‌سازی، رویکرد اول و چهارم به ترتیب ساده‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل را به همراه داشتند. از منظر شاخص‌های کارایی مانند اعتمادپذیری (زمانی و کمی)، حداکثر کمبودها و مجموع آن، رویکردهای احتمالاتی که در آن‌ها عدم قطعیت جریان ورودی لحاظ گردیده به ترتیب با مقادیر ۳۸٪، ۱۵۷٪ و ۳۳۰ MCM شاخص‌های نامبرده، عملکرد بهتری نسبت به سایرین داشته و این برتری عملکرد برای رویکرد سوم بارزتر بوده است. مقایسه سود حاصل از رویکردهای بهینه‌سازی تحقیق با سود واقعی بهره‌برداری از سیستم، افزایش ۶۸ تا ۷۳ درصدی متوسط سود را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، DP، SDP، SSDP، LP، NLP، زاینده‌رود

مقدمه

این مقدار تابعی از شرایط اقلیمی و متناسب با آن تغییر می‌کند. تحقیق زو و خان از جمله مواردی است که نیاز کشاورزی را به صورت ثابت ملاحظه کرده است. آن‌ها تخصیص آب و تعیین الگوی کشت را با بهینه‌سازی به روش تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)^۴ و با هدف حداکثرسازی سود، حداقل کردن هزینه متغیر و میزان آب پمپاژ شده، تعیین نمودند (Xevi and Khan., 2005). مرادی و همکاران از مدل LP جهت بهینه‌سازی سطوح کشاورزی محصولات باغی و زراعی با هدف حداکثرسازی سود سالانه استفاده نمودند (Moradi et al., 2007). تحقیقات تیلمنت و کلمن و نیز ژنگ و همکاران از دیگر مواردی است که در آن مسئله تخصیص آب به نیازهای ثابت کشاورزی مد نظر قرار گرفته است (Tilmant and Kelman., 2007; Zhang et al., 2007).

و ننگ و همکاران نیز با ملاحظه نیاز ثابت کشاورزی در کنار اهداف تأمین نیاز شرب، صنعت و زیست محیطی، مدل‌سازی تخصیص بهینه آب را برای حوضه Haihe با مدل ترکیبی از

خشکسالی سال‌های اخیر و صدمات سنگین ناشی از آن، بیش از پیش لزوم توجه به آمادگی برای مدیریت این پدیده را بارزتر می‌سازد. بدیهی است در این شرایط بهره‌برداری بهینه از منابع آبی موجود می‌تواند تا حد زیادی بر کاهش خسارات اثرگذار باشد. برای این بهره‌برداری، رویکردهای مختلفی قابل استفاده هستند و هر یک نیز مدل‌سازی‌های خاص خود را طلب می‌کنند. در ادامه به پاره‌ای از آن‌ها اشاره می‌شود که با توجه به اهمیت مدیریت مصرف آب، بخش کشاورزی بیش‌تر مورد تأکید قرار می‌گیرد. معمولاً در تخصیص بهینه آب آبیاری و مدل‌سازی آن، نیاز کشاورزی به دو شکل ثابت و متغیر ملاحظه می‌شود. متذکر می‌گردد که در نیاز ثابت تقاضای بخش کشاورزی بر مبنای مقداری خاص ارائه می‌گردد، ولی در نیاز متغیر،

۱- فارغ التحصیل دکترای سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر

۳- استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

*- نویسنده مسئول: (Email: morid_sa@modares.ac.ir)

الگوریتم‌های GA^۱ و SA^۲ انجام دادند (Wang et al., 2009).

اما همان‌گونه که اشاره شد، مواردی مانند رشد گیاه، تغییر شرایط هواشناسی و رطوبت خاک، تغییر نیاز آبی بخش کشاورزی را سبب شده و مسئله تخصیص آب را پیچیده‌تر می‌سازد. وجولا و موجودمدار متناسب با دوره‌های رشد محصولات در بازه‌های ده روزه، تخصیص آب بین محصولات مختلف را با هدف حداکثرسازی عملکرد محصولات بهینه نمودند و در این خصوص از مدل DP استفاده کردند. در این تحقیق مقادیر متوسط رطوبت خاک در هر دوره به عنوان حالت سیستم، نیاز متغیر کشاورزی را باعث می‌شد (Vedula and Mujumdar., 1992). در تحقیق دیگری توسط موجودمدار و رامش مقادیر رطوبت خاک برای هر محصول و نیز مقدار تولید محصول نیز برای توصیف حالت سیستم اضافه و نیاز متغیر کشاورزی مدلسازی شد (Mujumdar and Ramesh., 1997).

از آنجائی که حداکثر بودن عملکرد محصولات، به‌تنهایی نمی‌تواند معیاری برای تخصیص اقتصادی منابع آب باشد، در تحقیقات دیگر مسئله نیاز متغیر کشاورزی و سود اقتصادی به‌طور همزمان مد نظر قرار گرفته‌است. به‌طور مثال در تحقیق پاول و همکاران برای مزارع ایالت پنجاب (هند) با استفاده از مدل‌های DP و SDP، مقادیر عمق آبیاری طی مراحل هفتگی رشد گیاهان به نحوی بهینه گردید که عملکرد و سود شبکه‌های کشاورزی حداکثر شود (Paul et al., 2000). رکا و همکاران نیز بهینه‌سازی تخصیص آب و سطح کشت را برای شبکه کشاورزی Bembezar با مدل NLP انجام دادند (Reca et al., 2001). قهرمان و سپاسخواه نیز مسئله نیاز متغیر و تخصیص آب با هدف حداکثر عملکرد و سود اقتصادی را مد نظر قرار دادند (Ghahraman and Sepaskhah., 2002; Ghahraman and Sepaskhah., 2004). لازم به ذکر است در کلیه این تحقیقات، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری با ملاحظه مقادیر از پیش تعیین شده رهاسازی از مخزن انجام شد، لذا اتصال با مدل مخزن در تحقیق مقدسی و همکاران مد نظر قرار گرفت. در این تحقیق طی سه زیرمدل بهینه‌سازی توزیع آب در طول فصل رشد گیاهان، بین محصولات شبکه‌ها و نیز بین شبکه‌های مختلف صورت گرفت و اتصال با مدل مخزن در قالب زیرمدل چهارم یعنی بهینه‌سازی رهاسازی سالانه سهم آب کشاورزی از سد زاینده‌رود اضافه گردید. ارزیابی عملکرد رویکردهای بهینه‌سازی این تحقیق طی دوره خشکسالی حوضه زاینده‌رود، توانست بهبود ۴۲٪ سود کشاورزی را نسبت به رویکرد سنتی که کم‌آبیاری را به‌طور مساوی بین محصولات و شبکه‌های کشاورزی اعمال می‌کرد، به همراه داشته باشد (Moghaddasi et al., 2010).

گذشته از نحوه برخورد با تقاضای بخش کشاورزی، بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب به‌خصوص در شرایط خشکسالی با عدم قطعیت ناشی از جریان‌های ورودی، مواجه می‌گردد. وجولا و مهان برای ملاحظه این عدم قطعیت، سیاست‌های ماهانه بهره‌برداری از مخزن Bhadra با اهداف برقایی و کشاورزی را توسط مدل‌های SDP محاسبه نمودند (Vedula and Mohan., 1990). در تحقیق تیلمنت و کلمن از الگوریتم برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی دوگان (SDDP)^۳ برای تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه با اهداف نیاز ثابت کشاورزی، برقایی، کشتیرانی و ملاحظه عدم قطعیت جریان ورودی استفاده گردید (Tilmant and Kelman., 2007). کلمن و همکاران با ملاحظه اطلاعات کنونی هیدرولوژیکی حوضه در تصمیم‌گیری، عملکرد مدل‌های SDP را ارتقاء بخشیده و مدلی موسوم به برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی نمونه‌گیری (SSDP)^۴ ارائه کردند که عدم قطعیت‌های جریان ورودی به مخزن را به‌طور واقع بینانه‌تر مدنظر قرار می‌دهد. ارزیابی عملکرد این مدل برای تعیین میزان رهاسازی بهینه از مخزن سیستم برقایی رودخانه Feather، نتایج مثبتی را به همراه داشت (Kelman et al., 1990). کیم و همکاران نیز سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از دو سد چندمنظوره در کره جنوبی که اهداف تأمین آب، تسکین سیل و تولید برقایی را بر عهده داشت را با استفاده از مدل‌های SSDP تدوین نمودند (Kim et al., 2007).

با توجه به آنچه آمد، در تحقیق حاضر از رویکردهای قطعی و احتمالاتی مذکور برای تعیین مقادیر بهینه رهاسازی از مخزن در شرایط خشکسالی استفاده شده که عبارتند از: رویکرد اول: لحاظ نیاز ثابت کشاورزی و قطعیت جریان ورودی به مخزن با مدل DP، رویکرد دوم: نیاز ثابت کشاورزی و ملاحظه عدم قطعیت جریان با مدل SDP، رویکرد سوم: مشابه رویکرد دوم ولی با به‌کارگیری مدل SSDP و رویکرد چهارم: احتساب نیاز متغیر کشاورزی و قطعیت جریان ورودی با ملاحظه جزئیات تخصیص آب از سطح مخزن تا مزرعه و استفاده از مدل‌های LP و NLP می‌باشد که این رویکرد با کار مقدسی و همکاران مشابهت دارد (Moghaddasi et al., 2010). ولی تفاوت هدف این تحقیق، بررسی نقش عدم قطعیت‌های جریان در بهره‌برداری از مخزن سد بدون انجام مدل‌سازی پیچیده مورد استفاده در رویکرد چهارم می‌باشد. برای پاسخ به این سوال، اجرای چهار رویکرد نامبرده و مقایسه عملکرد آن‌ها مطرح می‌باشد. در این راستا شبکه و سد زاینده‌رود به عنوان منطقه مطالعاتی و خشکسالی‌های مربوط به دوره ۱۳۷۷ لغایت ۱۳۷۹ جهت بررسی عملکرد رویکردها، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

3- Stochastic Dual Dynamic Programming

4- Sampling Stochastic Dynamic Programming

1- Genetic Algorithm

2- Simulated Annealing

مواد و روش‌ها

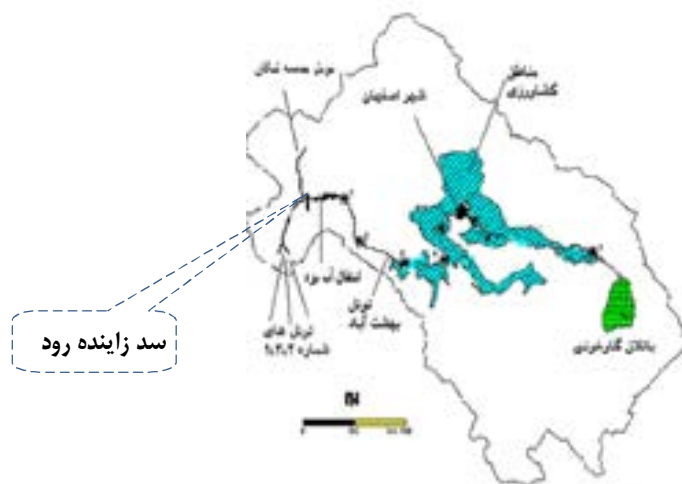
منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران قرار گرفته و جزء مناطق کم آب ایران به‌شمار می‌رود. از نظر موقعیت جغرافیایی این حوضه در محدوده $20^{\circ} 50'$ تا $17^{\circ} 53'$ طول شرقی و $31^{\circ} 08'$ تا $33^{\circ} 44'$ عرض شمالی واقع شده است. رودخانه اصلی این حوضه یعنی زاینده‌رود طولی برابر با ۳۵۰ کیلومتر داشته و از رشته کوه‌های زاگرس سرچشمه و به باطلاق گاوخونی ختم می‌گردد. بر روی این رودخانه سد مخزنی زاینده‌رود با حجم کل ۱۴۵۰ میلیون متر مکعب احداث گردیده که در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان قرار دارد (شکل ۱). در پائین‌دست سد و در طول این رودخانه، شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها و روستاهایی وجود دارند که از آب رودخانه بهره‌برداری می‌کنند. مهم‌ترین شبکه‌های کشاورزی به‌ترتیب از بالا به پائین شامل مهیار، نکوآباد راست و چپ، برخوار، آبشار راست و چپ، رودشت و تعدادی شبکه‌های کوچک می‌باشند. الگو و سطح زیرکشت محصولات زراعی در این شبکه‌های

کشاورزی مطابق جدول (۱) است (Murray-Rust et al., 2004). برای اجرای رویکردهای تحقیق از مقادیر جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود طی سال‌های آبی ۶۲-۱۳۶۱ تا ۸۴-۱۳۸۳ استفاده شده است. حوضه زاینده‌رود طی سال‌های ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۰-۱۳۷۹ خشکسالی‌های شدیدی تجربه کرده است که این مهم اهمیت بهره‌برداری از منابع آب این سیستم را بارزتر می‌سازد (بانک طرح‌های توسعه منابع آب، ۱۳۸۸).

ساختار مدل‌های بهینه‌سازی در رویکردها تخصیص

در این تحقیق مدل‌های LP، SSPD، SDP، DP و NLP برای چهار رویکرد تعیین تخصیص بخش کشاورزی استفاده شده‌اند. یادآوری می‌گردد که مدل LP از ساده‌ترین مدل بهینه‌سازی بوده که توابع هدف و قیود آن، خطی هستند و جواب بهینه آن‌ها جواب سراسری است. در صورتی که یکی از توابع هدف یا قیود مسئله غیرخطی باشند، مدل‌های NLP مطلوبیت دارند. در این مدل‌ها معمولاً تضمینی برای رسیدن به جواب بهینه سراسری وجود ندارد.



شکل ۱- شماتیک منطقه مطالعاتی، موقعیت سد، تونل‌های انتقال آب و شبکه‌های کشاورزی پایین‌دست سد

جدول ۱- سطح زیر کشت محصولات مختلف زراعی در شبکه‌های کشاورزی حوضه زاینده‌رود (هکتار)

| محصولات | گندم | جو | برنج | یونجه | چغندر قند | سیب زمینی |
|----------------|-------|-------|------|-------|-----------|-----------|
| نکوآباد راست | ۵۱۲۲ | ۲۶۶۹ | ۳۶۴۵ | ۱۷۴۷ | - | - |
| نکوآباد چپ | ۱۲۴۷۹ | ۴۷۳۶ | ۳۱۹۲ | ۴۹۷۲ | ۱۴۹۳ | - |
| مهیار | ۱۵۴۲۱ | ۶۲۷۱ | - | ۱۴۶۰ | ۸۴۸ | - |
| برخوار | ۱۰۹۷۴ | ۲۲۵۲ | - | ۲۵۱۲ | ۲۷۸۹ | - |
| آبشار راست | ۷۸۸۴ | ۱۲۲۴ | - | ۲۰۸۲ | ۱۳۷۹ | - |
| آبشار چپ | ۱۳۶۱۲ | ۲۸۰۰ | - | ۳۱۲۳ | ۳۴۶۸ | - |
| رودشت | ۲۸۷۷۱ | ۹۲۴۱ | - | ۴۱۵۶ | - | ۴۸۳۲ |
| سیستم‌های کوچک | ۱۹۶۰۵ | ۱۵۴۶۷ | - | ۳۷۴۱ | ۱۱۸۷ | - |

ورودی به مخزن، استخراج می‌شود. تابع هدف، حداقل کردن خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز آبی بخش کشاورزی است که مطابق زیر به صورت مجذور انحراف از مقادیر نیازهای کشاورزی پایین دست سد زاینده رود، تعریف می‌شود:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{N \times T} \cos t_t = \sum_{t=1}^{N \times T} (D_t - R_t)^2 \quad (1)$$

که D_t تقاضای کشاورزی، R_t رهاسازی از مخزن، $\cos t_t$ میزان جریمه، T تعداد ماه‌های بهره‌برداری، N تعداد سال و t ماه مورد نظر می‌باشد. همچنین معادله بازگشتی مدل DP مورد استفاده به شکل زیر است (Trezos and Yeh., 1987):

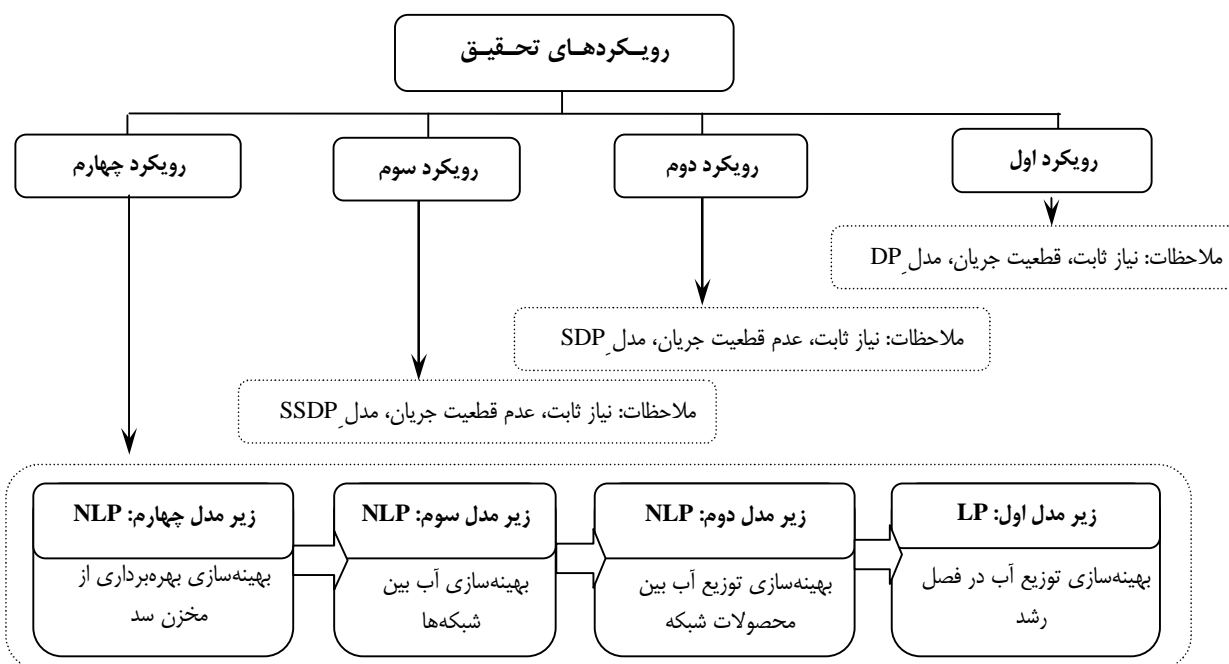
$$f_t^n(S_t) = \min_{R_t} \{ \text{cost}_t(S_t, Q_t, R_t) + f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1}) \} \quad (2)$$

$\forall S_t$ and $t=1, \dots, T, n=1, \dots, N \times T$

که در آن S_t مقادیر گسسته شده ذخیره مخزن در ابتدای دوره t (متغیر حالت)، Q_t متوسط بلندمدت جریان دوره t ، R_t مقادیر گسسته شده رهاسازی از مخزن (متغیر تصمیم)، S_{t+1} ذخیره مخزن در انتهای دوره، $\cos t_t(S_t, Q_t, R_t)$ مقدار تابع هدف و $f_t^n(S_t)$ مقدار تابع هدف از شروع دوره t تا انتهای افق بهره برداری می‌باشند.

مدل DP برای بهینه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری متوالی و مرحله‌ای و در نتیجه مسئله بهره‌برداری از مخزن تطابق خوبی داشته و بر اساس اصل بهینگی بلمن و تبدیل مسئله به مسائل ساده‌تر، عمل می‌کند (Loucks and van Beek., 2005). احتساب عدم قطعیت متغیرهایی نظیر جریان ورودی به مخازن، از مواردی است که به راحتی در این مدل‌ها امکان پذیر است که در این صورت DP به SDP تبدیل می‌شود. مدل‌های SSDP شکل توسعه یافته‌ای SDP هستند که در آن‌ها به جای کلاسه‌بندی داده‌های جریان، از سناریوهای تاریخی جریان به‌طور مستقیم استفاده می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که مزیت آن نسبت به مدل‌های SDP آن است که می‌تواند همبستگی‌های زمانی سری‌های جریان را در سال‌های متوالی بهتر لحاظ نماید. مدل‌های DP و SDP، در صورت همگرایی، جواب بهینه سراسری را ارائه می‌دهند. شرح بیش‌تر مبنای این مدل‌ها را می‌توان در مراجعی نظیر یه، ترزس و یه و لبدی مشاهده نمود (Yeh., 1985; Trezos and Yeh., 1987; Labadie., 2004;). در ادامه به تبیین توابع هدف و قیود سیستم در هر یک از رویکردها پرداخته می‌شود. مؤلفه‌های مورد تأکید در چهار رویکرد، همراه با مدل‌های مربوط در شکل ۲ ارائه شده است. در ادامه شرح بیش‌تر رویکردها ارائه می‌شود:

رویکرد اول: در این رویکرد سیاست‌های بهینه در مقیاس ماهانه با مدل DP، ملاحظه نیاز ثابت کشاورزی و قطعیت جریان



شکل ۲- مؤلفه‌های مورد تأکید در چهار رویکرد مورد استفاده در تحقیق

سناریوی خاص i تا پایان دوره است. احتمال انتقالی $E_{j|i}$ با تئوری بیز^۱ از رابطه (۶) محاسبه می‌شود (کلمن و همکاران، ۱۹۹۰):

$$P[Q_{t+1}(j) | Q_t] = \frac{P[Q_t | Q_{t+1}(j)]P[j]}{\sum_{i=1}^m P[Q_t | Q_{t+1}(i)]P[i]} \quad (6)$$

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 $t+1$ می‌باشند.

بعد از محاسبه سیاست‌های بهینه در مدل‌های SDP، DP و SSDP، با استفاده از داده‌های تاریخی عملکرد آن‌ها شبیه‌سازی شده و معیارهای ارزیابی کارایی مدل‌ها در مقیاس سالانه حاصل می‌شوند. در تمامی مدل‌های فوق، مقادیر گسسته‌سازی شده رهاسازی از مخزن، به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله در نظر گرفته شده است.

رویکرد چهارم: مطابق آنچه در شکل ۲ آمده از مدل‌های LP و NLP برای این رویکرد استفاده شده است. رابطه معمول مدل عبارت است از:

$$\text{Min}_X Z = C^T X \quad (7)$$

$$\text{Subject to } AX \geq b, \quad X \geq 0 \quad (8)$$

که در آن C بردار n بعدی از ضرایب تابع هدف، A ماتریس $m \times n$ از ضرایب قیود مسئله، X بردار n بعدی از متغیرهای تصمیم، T عملگر ترانهاده و b بردار n بعدی از منابع می‌باشند. حال اگر تابع هدف یا قیود مسئله، توابع غیرخطی از متغیرهای طراحی باشند، برنامه ریزی از نوع غیرخطی بوده و مدل‌های NLP مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\text{Min } f(X) \quad (9)$$

$$\text{Subject to: } g(X) = b \quad (10)$$

در این رابطه X بردار متغیرهای تصمیم و بردار b در برگیرنده منابع می‌باشد. بردارهای l و u محدودیت‌های نامساوی و نشان‌دهنده مرزهای بالا و پایین متغیرهای تصمیم هستند. مدل‌سازی این بخش از ۴ زیرمدل تشکیل شده است که جزئیات آن از تحقیق مقدسی و همکاران قابل دسترسی می‌باشد (Moghadasi et al., 2010).

زیرمدل اول: بهینه‌سازی توزیع آب در طول فصل رشد بین گیاهان (SMod.1)

در این زیرمدل، با استفاده از تکنیک LP، کل آب مصرفی هر محصول در فصل رشد در دوره‌های ۱۰ روزه (دور آبیاری) به‌صورت

در شروع محاسبات مقدار $f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1})$ برابر با صفر فرض شده است. در این مدل تنها از یک سناریوی جریان سالانه که برابر با متوسط جریان سناریوهای تاریخی است، برای استخراج سیاست‌های پایدار استفاده می‌شود.

رویکرد دوم: در این رویکرد، مقادیر رهاسازی بهینه با ملاحظه نیاز ثابت کشاورزی، عدم قطعیت جریان ورودی و به‌کارگیری مدل‌های SDP محاسبه می‌شوند. تابع هدف نیز مانند مدل DP، حداقل کردن خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز کشاورزی است. در مدل SDP با کلاسه‌بندی جریان ورودی به مخزن و به‌کارگیری احتمالات شرطی جریان، ماهیت غیرقطعی و مارکوفی جریان، مدل شده و مقدار امید ریاضی تابع هدف در بلندمدت حداقل می‌گردد. رابطه بازگشتی در مدل SDP به‌صورت ذیل می‌باشد (Trezos and Yeh., 1987):

$$f_t^n(S_t, Q_t) = \min_{R_t} \{ \cos t_t(S_t, Q_t(i), R_t) + \sum_j P_{ij}^t f_{t+1}^{n-1}(S_{t+1}, Q_{t+1}(j)) \} \quad (3)$$

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

رویکرد سوم: مؤلفه‌های مدنظر در این رویکرد همانند رویکرد دوم است با این تفاوت که مدل‌سازی آن با مدل‌های SSDP انجام می‌شود. برخلاف مدل‌های SDP که در آن به برآزش تابع چگالی احتمال به متغیر احتمالاتی و تعیین مقادیر شاخص نیاز است، مدل‌های SSDP قادرند سری‌های زمانی جریان رودخانه را به‌طور مستقیم در رابطه بهینه‌سازی وارد کنند. این کار با تعریف سناریوهای جریان (توالی‌های ۱۲ ماهه جریان رودخانه، که به‌صورت مشاهداتی یا تصادفی تولید شده‌اند) انجام می‌شود. برای رسیدن به سیاست بهینه پایدار از رابطه (۴) استفاده می‌گردد (Kelman et al., 1990):

$$f_t(S_t, i) = \text{Cost}_t(S_t, Q_t(i), R_t) + E_{j|i} \times f_{t+1}(S_{t+1}, i) \quad (4)$$

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

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 جاگذاری جریان خروجی بهینه در رابطه (۵) مقدار تابع ارزش آینده (f_{t+1}) بدون در نظر گرفتن احتمالات انتقالی و برای یک سناریوی خاص محاسبه می‌شود:

$$f_t(S_t, i) = \text{Cost}_t(S_t, Q_t(i), R_t) + f_{t+1}(S_{t+1}, i) \quad (5)$$

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

مقدار تابع هدف به‌ازای ذخیره مخزن در دوره t و

زیر مدل چهارم: بهره‌برداری بهینه از مخزن سد (SMod.4)

تخصیص بهینه آب بین سه سال دوره خشکسالی، توسط این زیرمدل صورت می‌گیرد. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از جریان خروجی از مخزن طی این سه سال بوده که به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$MAX \left\{ \sum_{y=1}^Y F_y(Q) \right\} \quad (14)$$

که y تعداد سال‌ها و $F_y(Q)$ تابع عملکرد هر سال به‌ازای آب تخصیص یافته است. برای محاسبه $F_y(Q)$ مدل سوم برای هر سال و به‌ازای دبی‌های مختلف در واقع مقادیر گوناگون آب خروجی از مخزن اجرا گردید تا تابع عملکرد برای هر سال به‌دست آید.

قید مشترک مدیریت مخزن در رویکردها

تغییر حالت سیستم از یک مرحله به مرحله بعد، با استفاده از رابطه پیوستگی مخزن مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - e(S_{t+1}, S_t) \quad (15)$$

که $e(S_t, S_{t+1})$ تلفات تبخیر از سطح مخزن در بازه زمانی t و $t+1$ است و با سعی و خطا محاسبه می‌شود. بعد از محاسبه S_{t+1} در هر مرحله، لازم است که مقادیر آن از نظر فرارگیری در محدوده مجاز حجم ذخیره مخزن، مطابق زیر کنترل شود:

$$S_{\min} \leq S_{t+1} \leq S_{\max} \quad (16)$$

محدوده مقادیر رهاسازی (R_t) از مخزن که متغیر تصمیم تحقیق است نیز مطابق رابطه ذیل می‌باشد:

$$0 \leq R_t \leq S_{\max} - S_{\min} \quad (17)$$

معیارهای کارایی مدل‌های بهینه‌سازی

معیارهایی همانند اعتمادپذیری (زمانی و حجمی)، مجموع کمبود، حداکثر آن و متوسط سود (خسارت) سالانه، برای ارزیابی و انتخاب گزینه‌های طراحی و سیاست‌های بهره‌برداری در محدوده وسیعی از پروژه‌های منابع آبی به کار می‌روند (Canon et al, 2009؛ Kim et al, 2007؛ Eum et al, 2011) و در مقاله حاضر نیز از آن‌ها استفاده شده است.

نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج چهار رویکرد مورد مطالعه براساس شرایط دوره خشکسالی ۱۳۷۹-۱۳۷۷ شبکه زاینده‌رود پرداخته می‌شود و عملکرد آن‌ها براساس معیارهایی کارایی مقایسه می‌گردد.

بهینه توزیع می‌شود. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن عملکرد واقعی محصول در هکتار بوده که به صورت ذیل می‌باشد:

$$MAX: \frac{Y_{ac}}{Y_{\max c}} = 1 - \sum_{g=1}^n Ky_g \left(1 - \frac{ETa_{c,g}}{ET\max_{c,g}} \right) \quad (11)$$

در این رابطه $ETa_{c,g}$ تبخیر و تعرق واقعی محصول C در مرحله رشد g (mm/10day)، $ET\max_{c,g}$ حداکثر تبخیر و تعرق محصول C در هر مرحله رشد (mm/10day)، Ky_g ضریب حساسیت عملکرد نسبت به تنش آبی برای هر گیاه در هر مرحله رشد، n تعداد مراحل رشد، Y_{ac} عملکرد واقعی محصول C و $Y_{\max c}$ حداکثر عملکرد محصول C (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد (Borgand and Grimes, 1986; Allen et al, 1998).

زیر مدل دوم: بهینه‌سازی توزیع آب بین محصولات مختلف در یک شبکه (SMod.2)

در این زیر مدل، کل آب موجود برای یک شبکه بین محصولات مختلف به نحوی توزیع می‌شود، که سود حاصل از تمامی محصولات آن شبکه، حداکثر گردد. این بهینه‌سازی با استفاده از یک مدل NLP و با فرمول‌بندی ذیل انجام می‌شود:

$$MAX \left\{ \sum_{k=1}^K F_k(Q_k) A_k Y_{\max k} P_k \right\} \quad (12)$$

که در آن K تعداد محصولات، $F_k(Q_k)$ تابع عملکرد بین حداکثر عملکرد نسبی و آب تخصیص داده شده، A_k سطح کشت (ha)، $Y_{\max k}$ حداکثر محصول و P درآمد محصول k است. $F_k(Q_k)$ از زیر مدل قبل برآورد می‌گردد. بدین منظور مدل اول برای هر محصول و به‌ازای دبی‌های مختلف اجرا گردید، عملکرد آن به‌ازای دبی‌های مختلف تعیین و تابع عملکرد هر محصول به‌دست آمد.

زیر مدل سوم: بهینه‌سازی توزیع آب بین شبکه‌های مختلف (SMod.3)

در این قسمت کل آب رها شده از مخزن سد به صورت بهینه بین شبکه‌ها توزیع می‌شود. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از کل شبکه‌ها است که با مدل NLP ذیل بهینه می‌شود:

$$MAX \left\{ \sum_{n=1}^N F_n(Q_n) \right\} \quad (13)$$

در این رابطه n تعداد شبکه‌ها و $F_n(Q_n)$ تابع عملکرد هر شبکه به‌ازای آب تخصیص یافته است. برای محاسبه $F_n(Q_n)$ زیر مدل دوم برای هر شبکه و به‌ازای دبی‌های مختلف اجرا می‌شود.

مدل‌سازی رویکردهای مورد استفاده رویکرد اول

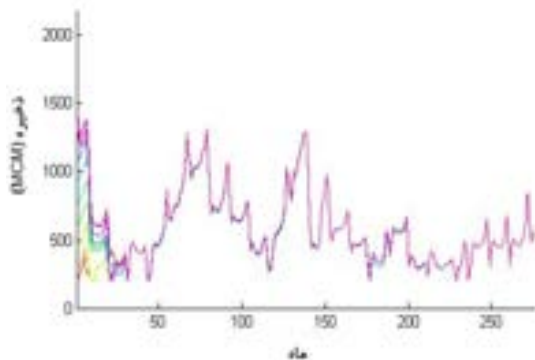
رسیدن مدل به حالت پایدار ادامه می‌یابد. در این حالت، به‌ازای هر گام زمانی t و هر حالت از سیستم، مقادیر تابع هدف سالانه (رابطه ۱۸)، عددی ثابت می‌باشد (Loucks et al, 2005):

$$f_t^{n+T}(S_t, Q_t) - f_t^n(S_t, Q_t) \quad \forall S_t, Q_t, t \in \{1, \dots, T\} \quad (18)$$

لازم به ذکر است که این شرط پایداری در مدل‌های SSDP بایستی به‌ازای هر یک از سناریوهای جریان برقرار باشد.

رویکرد چهارم

برای این بخش در ابتدا زیر مدل اول (SMod.1) برای هر محصول به‌ازای دبی‌های مختلف اجرا و تابع عملکرد هر محصول محاسبه شد. با توجه به اینکه تابع عملکرد محصولات، وابسته به شرایط آب و هوایی و به‌خصوص دمای سالیانه است، مشابهت نسبی شرایط آب و هوایی و دما در آن سه سال (۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۳۷۹-۸۰) سبب شد که این توابع یکسان فرض گردند. در مرحله بعد، بر اساس تابع عملکرد محصولات مختلف درون یک شبکه (خروجی زیرمدل اول)، زیرمدل دوم (SMod.2) ساخته و این مدل به‌ازای دبی‌های متفاوت اجرا گردید تا تابع عملکرد شبکه‌ها محاسبه شود. سپس زیرمدل سوم (SMod.3) بر اساس تابع عملکرد شبکه‌ها و به‌ازای دبی‌های مختلف خروجی از مخزن اجرا و تابع سود مخزن در هر سال تهیه گردید. در نهایت تخصیص بهینه آب بین سه سال دوره خشکسالی، توسط زیرمدل چهارم (SMod.4) صورت می‌گیرد. تبخیر و تعرق واقعی گیاه، تغییرات رطوبت خاک، کل آب آبیاری، مجموع سطح زیرکشت محصولات، از جمله مؤلفه‌هایی هستند که در مدل‌سازی رویکرد چهارم بایستی مدنظر قرار گیرد (Moghadas et al., 2010).



شکل ۳- شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه مدل DP با شروع از ۱۰ حالت مختلف حجم ابتدای دوره

بررسی تأثیر شرایط اولیه بر نتایج رویکردهای اول تا سوم زمان دستیابی به سیاست‌های بهینه مستقل از حجم اولیه مخزن و نیز تأثیر تعداد گسسته‌سازی‌ها بر عملکرد مدل‌ها، از عواملی است

مدل‌سازی این بخش با استفاده از برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP) است. در این مدل و نیز نوع احتمالاتی آن لازم است حجم فعال مخزن به تعدادی کلاس تقسیم گردد (مقادیر شاخص ذخیره‌ای) که در مقاله حاضر با استفاده از روش ساوارانسکی (Kim et al, 2007) و محدوده حجم مفید مخزن سد زاینده‌رود که ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد، تعداد ۲۰ شاخص ذخیره‌ای، محاسبه شده است. همچنین مقادیر متغیر تصمیم مسئله یعنی خروجی از مخزن، بین صفر تا حداکثر میزان مجاز رهاسازی‌ها گسسته‌سازی گردیده است. برای این رویکرد، از متوسط بلندمدت جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود طی سال‌های آبی ۶۲-۱۳۶۱ تا ۸۴-۱۳۸۳ استفاده شده است. برای محاسبه مقادیر تابع هدف در هر مرحله، در صورتی که حجم انتهایی دوره که از رابطه پیوستگی به‌دست می‌آید با مقادیر گسسته‌سازی شده حجم ابتدای دوره بعدی برابر نباشد، از درون‌یابی خطی بین مقادیر حجم ذخیره استفاده می‌شود.

رویکرد دوم

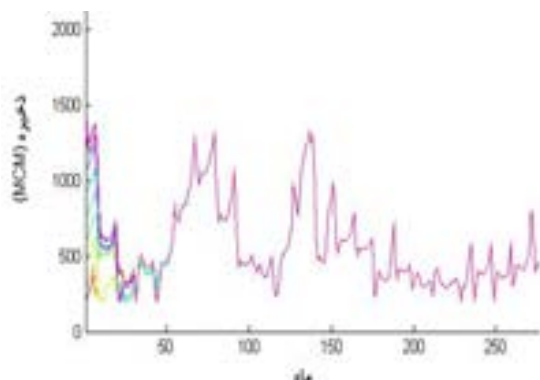
رویکرد دوم با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالاتی (SDP) است که مقادیر شاخص ذخیره‌ای و رهاسازی از مخزن در آن، همانند رویکرد اول می‌باشد. در این رویکرد، علاوه بر حجم ابتدای دوره، متغیر حالت هیدرولوژیکی جریان ورودی به مخزن نیز برای توصیف حالت سیستم به‌کار رفته است (Loucks et al, 2005) هم-چنین از روش فراوانی مساوی برای گسسته‌سازی و تعیین مقادیر شاخص جریان استفاده شده است. بدین صورت که با احتساب ۵ کلاس جریان، دسته‌بندی جریان به‌نحوی انجام گردیده که احتمال وقوع تمامی کلاس‌ها یکسان باشند. در نهایت مقادیر شاخص هر کلاس از میانگین جریان‌های آن کلاس محاسبه می‌شود. احتمالات انتقالی نیز با توجه به تعداد جریان در کلاس i در دوره t و تعداد دفعات انتقال از کلاس i به کلاس j در دوره $t+1$ به‌دست می‌آید.

رویکرد سوم

در این رویکرد که با SSDP مدل‌سازی می‌شود از مقادیر جریان ورودی به مخزن طی سال‌های آبی ۶۲-۱۳۶۱ تا ۸۴-۱۳۸۳ به‌عنوان سناریوهای جریان استفاده شده و احتمال انتقال جریان از یک سناریو به سناریوی دیگر ($P_t[j|i]$) با استفاده از فرمول بیز مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

برای اجرای مدل‌های رویکردهای اول، دوم و سوم (SDP, DP) با فرمول‌بندی بازگشتی، مدل ابتدا از دوره آخر شروع کرده و برای هر حالت سیستم، مقادیر تابع هدف محاسبه می‌شود. این محاسبات تا

۲۰۰ بود با وجود طولانی شدن مدت اجرا نتایج بهتری حاصل گردید.



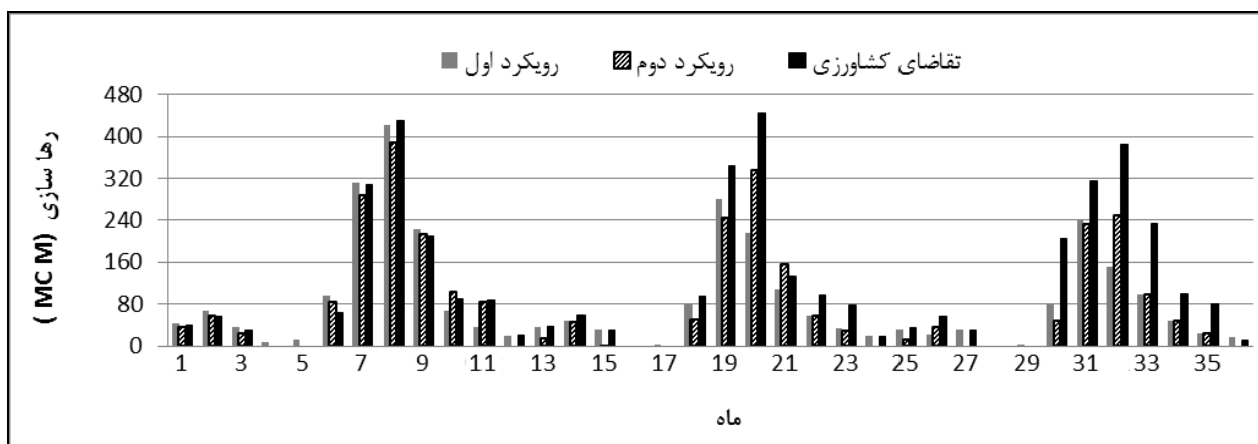
شکل ۴- شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه مدل SDP با شروع از ۱۰ حالت مختلف حجم ابتدای دوره

که در این بخش بدان پرداخته شده است. در این خصوص، شروع شبیه‌سازی‌ها با ۱۰ مقدار مختلف از حجم اولیه مخزن انجام شد و عملکرد سیاست‌های بهینه حاصل از رویکردهای اول و دوم ارزیابی گردید که نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ برای دوره ۲۳ ساله قابل مشاهده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود متغیر ذخیره مخزن با گذشت تقریباً چهار سال از اجرای مدل‌ها براساس سیاست‌های بهینه بهره‌برداری، مستقل از حجم اولیه آن می‌گردد. این امر برای مدل‌های SSDP نیز صادق می‌باشد.

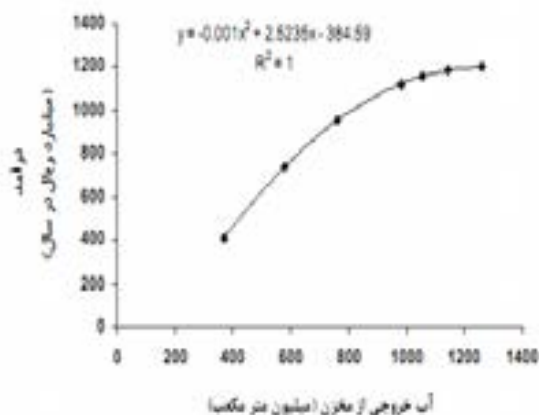
بعد از حصول سیاست‌های بهینه سه رویکرد اول، تأثیر تعداد گسسته‌سازی مقادیر رهاسازی از مخزن بر عملکرد آن‌ها در دوره خشکسالی مورد مطالعه با توجه به مقادیر نیاز شبکه‌های کشاورزی پایین دست سد زاینده‌رود ارزیابی و مقایسه شده است. نمونه این ارزیابی‌ها برای خشکسالی ۸۰-۱۳۷۹ در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است در این شکل‌ها رویکردهای اول و دوم در به ازای تعداد گسسته‌سازی‌های ۲۰ و ۲۰۰ از مقادیر رهاسازی مخزن اجرا گردید. ارقام کمتر نیز بررسی شد و در نهایت زمانی که تعداد گسسته‌سازی‌ها برابر



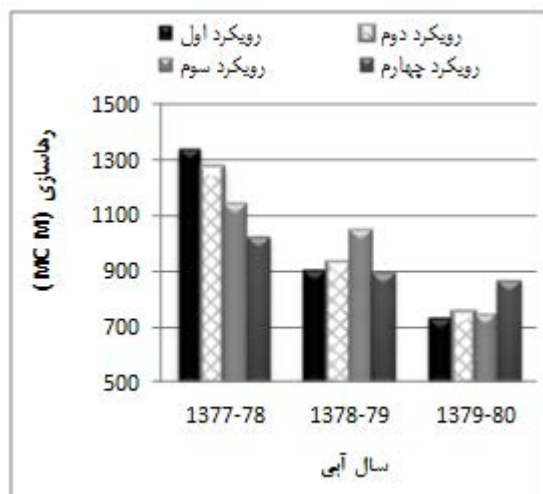
شکل ۵- مقدار رهاسازی ماهانه از مخزن با تعداد گسسته‌سازی‌هایی برابر با ۲۰ عدد برای آخرین سال



شکل ۶- مقدار رهاسازی ماهانه از مخزن با تعداد گسسته‌سازی‌هایی برابر با ۲۰۰ عدد برای آخرین سال



شکل ۷- تابع سود آب اختصاص یافته به شبکه‌های کشاورزی پائین‌دست سد زاینده‌رود



شکل ۸- مقایسه مقادیر رهاسازی از مخزن توسط رویکردهای مطالعه شده در تحقیق

میزان رهاسازی و سود: از منظر رهاسازی از سد، نتایج

حاصل در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با قرارگیری در شرایط خشکسالی مقادیر رهاسازی از مخزن روند کاهشی داشته و در تمامی رویکردها نمود پیدا کرده است. اما در سال‌های دوم و سوم بیش‌تر شده و دلیل آن نبود ذخیره مناسب آبی مانند سال اول می‌باشد. با توجه به شکل ۸، در شروع دوره خشکسالی با توجه به وجود ذخیره کافی در مخزن و نیز این نکته که رویکرد اول بر اساس متوسط بلندمدت جریان، سناریوهای رهاسازی را تولید می‌کند و تأثیر کم‌آبی‌های دوره‌های بعدی را دخالت نمی‌دهد، رهاسازی نسبتاً بیش‌تری نسبت به سایر رویکردها داشته است. در مقابل

همان‌طور که از شکل ۶ پیداست با افزایش تعداد گسسته‌سازی‌های متغیر تصمیم رهاسازی از مخزن، تأمین نیازهای آبی به‌خصوص در ماه‌های مهر تا آذر که مقادیر کم‌تری دارند، وضعیت بهتری پیدا کرده و این در اثر کاهش خطای گسسته‌سازی نتیجه شده است.

نتایج رویکرد سوم

همان‌گونه که اشاره شد در این رویکرد، ابتدا زیرمدل اول (SMod.1) برای هر محصول به‌زای عمق‌های مختلف آبیاری (h بر حسب mm/ha) اجرا و برای مقادیر عملکرد متناظر آن‌ها، تابع عملکرد هر محصول محاسبه گردید که نمونه آن برای محصول گندم در رابطه ذیل ارائه شده است:

$$F(h) = -2.8 \times 10^{-6} h^2 + 0.003587h - 11634068 \quad (19)$$

در مرحله بعد، بر اساس تابع عملکرد محصولات مختلف درون یک شبکه (خروجی زیرمدل اول)، مدل دوم (SMod.2) ساخته و به‌زای مقادیر مختلف دبی‌ها اجرا گردید تا تابع عملکرد شبکه‌ها به‌دست آید (همانند رابطه زیر برای شبکه آبیاری مهیار):

$$F(h) = -8.596 \times 10^{-6} h^2 + 2535h - 3.713 \times 10^{10} \quad (20)$$

در رابطه بالا h آب اختصاص یافته به هر شبکه بر حسب متر مکعب است.

در زیرمدل سوم (SMod.3)، کل آب رها شده از مخزن سد به‌صورت بهینه بین شبکه‌ها به نحوی توزیع می‌شود که سود حاصل از تمامی شبکه‌ها حداکثر گردد. شکل (۷) تابع سود پائین دست حاصل از آب اختصاص یافته از مخزن سد زاینده‌رود به بخش کشاورزی برای دوره خشکسالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نهایتاً زیرمدل چهارم (SMod.4)، خروجی زیرمدل سوم را به‌عنوان تابع سود مخزن در نظر گرفته و با توجه به جریان ورودی سالیانه به سد (به‌ترتیب برای سه سال برابر ۹۷۷/۱۴، ۹۰۹/۸۷ و ۷۶۹/۰۵ میلیون مترمکعب) آب را به‌طور بهینه بین سه سال خشکسالی به بخش کشاورزی تخصیص می‌دهد.

مقایسه نتایج حاصل از رویکردهای مورد مطالعه

در این بخش عملکرد چهار رویکرد تحقیق برای دوره خشکسالی مورد بررسی از منظر مقادیر رهاسازی، سود حاصل از رهاسازی، شاخص‌های کارآیی، توزیع ماهیانه آب و تنش‌های آبی، مورد مقایسه قرار می‌گیرند و نشان داده می‌شود که آن‌ها چه تفاوت‌هایی را در مدیریت خشکسالی می‌توانند داشته باشند. ذخیره مخزن بنا به آمار موجود در ابتدای دوره خشکسالی ۷۰۰ (MCM) بوده است.

کردند که رویکرد چهارم تحقیق حاضر در مقایسه با رویکرد پیشنهادی ایشان، حدود ۵۰ درصد، درآمد سیستم را افزایش می‌دهد. در این بخش نیز با منطقی مشابه با مرجع مورد اشاره، درآمد واقعی دو سال دیگر خشکسالی هم محاسبه شد. نهایتاً درآمد واقعی سیستم برای سال‌های خشکسالی به ترتیب برابر با ۶۷۰/۲۸۳ و ۶۲۵/۲۵۹ و ۶۱۲/۵۰۹ میلیارد ریال محاسبه گردید. مقایسه سود حاصل از به-کارگیری چهار رویکرد در مقایسه با سود واقعی بهره‌برداری از سیستم زاینده‌رود، نشان داد استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی تحقیق، مقادیر متوسط سود سیستم را در دوره سه ساله خشکسالی به ترتیب ۱/۶۸، ۱/۷۲، ۱/۷۳ و ۱/۷۱ برابر افزایش داده است. این مهم، ضرورت استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی را بارزتر می‌سازد.

شاخص‌های کارایی: از نظر شاخص‌های کارایی مانند اعتمادپذیری (زمانی و کمی)، حداکثر کمبودها و مجموع آن و نیز مقادیر سود حاصل از چهار رویکرد، عملکرد آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- مقایسه عملکرد چهار رویکرد تحقیق با استفاده از معیارهای کارایی

| رویکردها | | | | شاخص‌های ارزیابی |
|------------|------------|------------|--------------|-----------------------------|
| رویکرد اول | رویکرد دوم | رویکرد سوم | رویکرد چهارم | |
| ۳۷ | ۳۸ | ۳۸ | ۳۹ | متوسط اعتمادپذیری زمانی (%) |
| ۶۱ | ۶۸ | ۶۸ | ۶۳ | متوسط اعتمادپذیری کمی (%) |
| ۲۵۲ | ۱۵۶ | ۱۵۷ | ۱۷۹ | حداکثر کمبود دوره (MCM) |
| ۵۵۵ | ۳۴۷ | ۳۱۴ | ۵۰۲ | مجموع حداکثر کمبودها (MCM) |
| ۳۲۱۸۳۷ | ۳۲۸۵۸۷۰ | ۳۳۰۶۵۵۶ | ۳۲۷۷۰۹۴ | سود کل دوره (میلیون ریال) |

دهد که مقایسه آن‌ها برای خشکسالی دوره ۱۳۷۷-۷۸ تا ۱۳۷۹-۸۰، در شبکه زاینده‌رود اصفهان صورت پذیرفت. رویکردها عبارت بودند از: (۱) مدل‌سازی DP، بدون ملاحظه عدم قطعیت جریان ورودی و نیاز ثابت شبکه‌های کشاورزی، (۲) مدل‌سازی SDP، با ملاحظه عدم قطعیت جریان ورودی و نیاز ثابت کشاورزی، (۳) مدل‌سازی SSDP با ملاحظات مدنظر در رویکرد دوم و (۴) دخالت جزئیات تخصیص آب در مراحل مختلف رشد گیاهی، بین محصولات مختلف و شبکه‌های کشاورزی پایین‌دست با مدل‌های LP و NLP. نهایتاً در کلیه رویکردها، مقایسه‌ها بر مبنای میزان رهاسازی سد برای بخش کشاورزی و شاخص‌های مربوط صورت گرفتند. نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه هستند:

از منظر فرایند مدل‌سازی که برای رویکردهای مختلف به انجام رسید، رویکرد اول و چهارم به ترتیب ساده‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل را به همراه داشتند. این مراحل در رویکردهای دوم و سوم تقریباً

رویکردهای دیگر و به خصوص نوع چهارم به‌طور محافظه‌کارانه‌تری تخصیص را انجام می‌دهد و این باعث شده که رهاسازی آن نسبت به دو رویکرد قبلی از تغییرات کم‌تری برخوردار باشد. نتیجه این سیاست به خصوص در سال سوم بارزتر می‌باشد.

در رویکرد اول، دوم و سوم هدف، حداقل‌سازی خسارت و در سومی، حداکثرسازی سود است. از این بابت مقادیر مجموع رهاسازی سالیانه در رویکرد اول تا سوم، با استفاده از توابع سود رویکرد چهارم به سود تبدیل شد و نتایج مربوط در شکل ۹ ارائه شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که سود سیستم در چهار رویکرد نیز کم و بیش روند رهاسازی‌ها را دارا هستند.

برای قضاوت در مورد عملکرد رویکردهای استفاده شده در تحقیق، لازم است مقادیر درآمد واقعی شبکه‌ها مبنای مقایسات قرار گیرد. از آنجایی که آمار مستقیمی از این درآمدها برای دوره سه ساله خشکسالی در دسترس نبود، از رویکردی مشابه با آنچه که مقدسی و همکاران پیشنهاد کردند، استفاده گردید (Moghadasi et al., 2010). ایشان بر اساس نحوه توزیع آب در شبکه‌ها، سود واقعی سیستم را برای اولین سال از دوره خشکسالی برآورد کرده و گزارش

مطابق جدول بالا، رویکردهای احتمالاتی دوم و سوم از نظر معیارهای کارایی عمدتاً عملکرد بهتری نسبت به سایرین داشته است. نتایج چهار رویکرد نیز از حیث مقادیر حداکثر کمبود در تأمین نیازهای کشاورزی در شکل ۹ قابل مشاهده هستند.

همان‌طور که از شکل ۱۰ انتظار می‌رفت، با شروع دوره خشکسالی، مقادیر کمبودی که توسط مدل‌ها حاصل می‌شود روند افزایشی داشته است. این کمبود برای رویکرد اول که سیاست‌های مبتنی بر متوسط بلندمدت جریان رودخانه ارائه می‌دهد، بارزتر می‌باشد. در رویکرد چهارم کمبودها به‌طور یکنواخت‌تری بین سال‌های خشکسالی توزیع شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد چهار رویکرد بهینه‌سازی را برای مدیریت تخصیص بهینه آب کشاورزی در شرایط خشکسالی مورد بررسی قرار

منابع آب ایران (<http://dams.wrm.ir>)

مقدسی، م. ۱۳۸۸. راهبردهای بهره‌برداری از مخازن سدها با تأکید بر مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در دوره‌های خشکسالی. پایان‌نامه دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۸۱ ص.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D and Smith, M. 1998. Crop evaporation, Irrigation and Drainage. Paper 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 65-76, 166.

Borg, H and Grimes, W. 1986. Depth development of roots with time: an empirical description, Transactions of American Society of Civil Engineering ASCE. 29:1. 194-197.

Canon, J., Gonzalez, J and Valdes, J. 2010. Reservoir Operation and Water Allocation to Mitigate drought Effects in Crops: A Multilevel Optimization Using the Drought Frequency Index Journal of Water Resources Planning and Management. 135:6. 458-465.

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.

Ghahraman, B and Sepaskhah, A.R. 2002. Optimal allocation of water from a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping pattern. Irrigation Science. 21: 127-137.

Ghahraman, B and Sepaskhah, A.R. 2004. Linear and Non-Linear Optimization Models for Allocation of a Limited Water Supply. Irrigation and Drainage. 53: 39-54.

Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E and Yuan, Sun-Quan 1990. Sampling Stochastic Dynamic Programming Applied To Reservoir Operation. Water Resource Research. 26:3. 447-454.

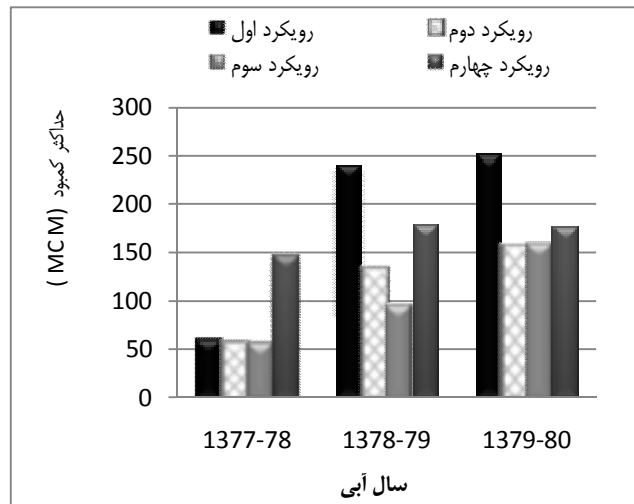
Kim, Y.O., Eum, H., Lee, E.G and Ko, I.H. 2007. Optimizing Operational Policies of a Korean Multireservoir System Using Sampling Stochastic Dynamic Programming with Ensemble Streamflow Prediction. Journal Of Water Resources Planning And Management. 133:1. 4-14.

Labadie, J.W. 2004. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. Journal of Water Resources Planning And Management. 130: 93-111.

Loucks, D.P and van Beek, E. 2005. Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications, UNESCO, Paris.

Moghaddasi, M., Morid, S., Araghinejad, S and Agha Alikhani, M. 2010. Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: the 1999 drought in the zayandeh rud irrigation system (iran). Journal of Irrigation and Drainage. 59:4. 377-387.

مشابه بودند. طبیعی است که این فرایند مدل‌سازی نقش تعیین‌کننده‌ای در زمان اجرای رویکردها خواهد داشت به نحوی که از حیث سرعت همگرایی و رسیدن به جواب بهینه سراسری، رویکردهای اول و چهارم به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین زمان اجرا را داشته‌اند. لازم به ذکر است که مدل‌سازی NLP مورد استفاده در رویکرد چهارم، به جواب بهینه سراسری نرسید که این یکی از محدودیت‌های کاربردی این رویکرد محسوب می‌شود.



شکل ۹- مقایسه حداکثر کمبود سالانه ناشی از چهار رویکرد طی سالهای خشکسالی

از منظر شاخص‌های کارایی مانند اعتمادپذیری (زمانی و کمی)، حداکثر کمبودها و مجموع آن، رویکردهای احتمالاتی که در آنها عدم قطعیت جریان ورودی لحاظ گردیده عملکرد بهتری نسبت به سایرین داشته است. این برتری عملکرد برای رویکرد سوم بارزتر بوده است. هم‌چنین مقایسه سود به‌دست آمده از اجرای رویکردهای بهینه‌سازی تحقیق با سود واقعی بهره‌برداری از سیستم نشان داد که به‌کارگیری این رویکردها، باعث افزایش ۶۸ تا ۷۳ درصدی متوسط سود در دوره سه ساله خشکسالی می‌شوند.

از حیث توزیع مقادیر کاهش رهاسازی (کمبودها) بین سال‌های خشکسالی، رویکرد چهارم نسبت به سایرین اندکی بهتر عمل کرده و تنش‌های آبی را با نوسانات کم‌تری بین سال‌های خشکسالی توزیع کرده است.

منابع

بانک طرح‌های توسعه منابع آب. ۱۳۸۸. شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. شرکت سهامی مدیریت

- Trezos, T and Yeh, W.W.G. 1987. Use of stochastic dynamic programming for reservoir management. *Journal of Water Resources Research*. 23:6:983-996.
- Vedula, S and Mohan, S. 1990. Real-time multipurpose reservoir operation: a case study. *Journal of Hydrological Sciences*. 35:4:447-462
- Vedula, S and Mujumdar, P.P. 1992. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops, *Water Resources Research*. 28:1. 1-9.
- Wang, X., Sun, Y., Song, L and Mei, C. 2009. An eco-environmental water demand based model for optimizing water resources using hybrid genetic simulated annealing algorithms, Part I. Model development. *Journal of Environmental Management* 90: 2628-2635.
- Xevi, E. and Khan, S. 2005. A multi-objective optimization approach to water management. *Journal of Environmental Management*. 77: 269-277.
- Yeh, W. 1985. Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, *Water Resources Research*. 21:12. 1797-1818.
- Zhang, Q., Maeda, S and Kawachi, T. 2007. Stochastic multiobjective optimization model for allocating irrigation water to paddy fields. *Paddy Water Environment*. 5:93-99.
- Moradi, M.J., Bozorgh Haddad, O.W., Karney, B and Marino, A. M. 2007. Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas. *Journal of Agricultural Water Management*. 90: 149-159.
- Mujumdar, P. P and Ramesh, T.S.V. 1997. Real-time reservoir operation for irrigation. *Journal of Water Resources Research*. 33:5:1157-1164.
- Murray-Rust, H., Droogers, P and Heydari, N. 2004. Water for future: linking irrigation and water allocation in the zayandeh Rud basin, Iran, International Water Management Institute. IAERI-IWMI Research Report 6
- Paul, S., Sudhindra, N.P and Kumar, D.N. 2000. Optimal irrigation allocation: A multilevel approach, *ASCE: Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126: 149-154.
- Reca, J., Roldan, J., Alcaide, M., Lopez, R and Camacho, E. 2001. Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems, I. Description of the model. *Journal of Agricultural water Management*. 48: 103-116.
- Tilmant, A and Kelman, R. 2007. A stochastic approach to analyze trade-offs and risks associated with large-scale water resources systems. *Journal of Water Resources Research*, 43:6:1-11.

Comparison of Dynamic, linear and Nonlinear Programming Approaches in Optimal Operation of Reservoir (Case study: the 1998-2000 Droughts of Zayandeh Rud Agricultural System)

S. Anvari¹, S. J. Mousavi², S. Morid^{*3}

Received: Feb. 13, 2014

Accepted: Oct. 15, 2014

Abstract

Application of efficient policies to operate dam reservoirs is of great importance due to water shortages and frequent droughts in the country. For this, different approaches can be implemented, which are based on different modeling systems. The present paper aims to compare some of these approaches for optimal water allocation in Zayandeh Rud agricultural system during 1998-2000 droughts using some evaluation criterion. The mentioned approaches include: 1) dynamic programming (DP) considering constant agricultural water demand and no uncertainty in inflows, 2) stochastic DP (SDP) with constant agricultural demand and uncertainty in inflows and 3) Sampling SDP (SSDP) considering constant demand and inflow uncertainties and 4) variable agricultural water demand with respect to crop types, growing stages, irrigation systems using linear and non-linear programming (LP and NLP) modeling and no uncertainty in inflows. Results showed the first and fourth approaches had the simplest and most complicated modeling process, respectively. However, with respect to some efficiency indices like temporal and volumetric reliability, maximum as well as total shortages, the stochastic approaches i.e. the second and third ones outperformed respectively equal to 38%, 68%, 157 and 330 MCM. This superiority was considerable especially for the third modeling approach. The comparison of net benefit values from optimization approaches as well as real obtained one for Zayandeh Rud system showed the optimization approach could increase the benefit from 68% to 73%.

Keywords: Optimization, DP, SDP, SSDP, LP, NLP, Zayandeh Rud

1- Ph.D. Graduate of Water Structure Engineering, Tarbiat Modares University

2- Associate Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

3- Professor, Faculty of Agricultural, Tarbiat Modares University

(* - Corresponding Author Email: morid_sa@modares.ac.ir)