Developing a Water Quantity-Quality Equitable Allocation Model in River-Reservoir Systems: Application of Scenario Optimization Technique

S. H. Afzali[1], N. Taleb Beydokhti[2], A. Poya[3], M.R. Nikoo[4]

1. Assist. Prof. of Civil-Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran
(Corresponding Author) (+98 71) 36133497 afzali@shirazu.ac.ir
2. Prof. of Civil-Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran
3. Former Graduate Student of Civil-Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran
4. Assist. Prof. of Civil-Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran

(Received Apr. 11, 2016 Accepted May 21, 2017)

To cite this article :
Afzali, S.H., Taleb Bidokhti, N., Poya, A., Nikoo, M.R., 2018, "Developing a water quantity-quality equitable allocation model in river-reservoir systems: application of scenario optimization technique" Journal of Water and Wastewater, 29(2), 68-84. Doi: 10.22093/wwj.2017. 34336.1991. (In Persian)

Abstract

Water quantity-quality equitable allocation model in river-reservoir systems provides the possibility of decision making on the amount of allocated water by considering the hydrological, economical, and environmental effects. Water allocation is done according to three criteria, namely equity, efficiency, and sustainability by considering uncertainties in hydrological parameters. In this method, at first a water quantity-quality allocation model was developed in GAMS optimization model based on the mentioned three criteria. Scenarios were built based on scenario optimization technique by identifying the uncertainties in the model inputs. Water was allocated using the initial model for each sub-scenario. Afterward, water allocation in each scenario was obtained by the tracking model. To assess the applicability of the proposed method, it was applied to Roodbal river basin in south-east of Fars province, south of Iran. After analyzing basic data, upstream inflow and TDS concentration were identified as the uncertain input and the most critical quality parameter respectively. Due to the existing uncertainty, three scenarios of wet, normal and dry year were built. The results of using the proposed model showed that 100 percent of the users' demands are supplied in wet and normal years and 61 percent in dry years. The volume of reservoir was always more than minimum volume (35 MCM) and TDS concentration was lower than 1000 mg/L (TDS water quality standard). The value of these three criteria were also at their highest possible. Based on the results of the model, the Roodbad River-Reservoir system faces no problem in supplying agricultural water demands in wet and normal years. Therefor, water can be stored in wet and normal years to be used during dry years. In dry years, water is allocated to the users in a way that the mentioned criteria have the maximum values and the reservoir storage doesn't reach the minimum value except for the last month of the optimization period.

Keywords: Water Quality-quantity Allocation, Equity, River-Reservoir Systems, Optimization of Scenarios

Archive of SID

www.SID.ir

 dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.34336.1991

تدوین مدل تخصیص عادلانه کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن: کاربرد روش بهینه‌سازی سناریوها

سید حسین افضلی[۱]، ناصر طالب‌بیدختی[۲]، عاطفه پویا[۳]، محمدرضا نیکو[۴]

۱- استادیار بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
(نویسنده مسئول) ۳۶۱۳۳۴۹۷ (۰۷۱) afazli@shirazu.ac.ir
۲- استاد بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز
۴- استادیار بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

(دریافت ۹۵/۱/۲۳ پذیرش ۹۶/۲/۳۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
افضلی، س.ح.، طالب‌بیدختی، ن.، پویا، ع.، نیکو، م.ر.، ۱۳۹۷، " تدوین مدل تخصیص عادلانه کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن: کاربرد روش بهینه‌سازی سناریوها"، مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۲)، ۸۴-۶۸. **Doi: 10.22093/wwj.2017.34336.1991**

چکیده

مدل تخصیص عادلانه کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن امکان تصمیم‌گیری در مورد مقدار تخصیص آب را با لحاظ اثرات بلندمدت جنبه‌های هیدرولوژیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی، فراهم می‌نماید. تخصیص آب بر اساس سه معیار عدالت، بهره‌وری و پایداری، با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در پارامترهای هیدرولوژیکی انجام می‌شود. در این روش، ابتدا مدلی برای تخصیص کمّی- کیفی بر اساس سه معیار ذکر شده در مدل بهینه‌سازی GAMS توسعه داده شد. با شناسایی عدم قطعیت موجود در داده‌های ورودی، بر مبنای روش بهینه‌سازی سناریو، سناریوسازی انجام شد. برای هر زیرسناریو، مقدار تخصیص آب به‌وسیله مدل ابتدایی تعیین شد و سپس به‌وسیله مدل ردیاب، مقدار تخصیص آب در هر سناریو به‌دست آمد. کارایی روش پیشنهادی برای سیستم رودخانه-مخزن رودبال، در حوضه آبریز رودخانه رودبال در جنوب شرقی استان فارس واقع در جنوب ایران، ارزیابی شد. پس از بررسی‌های انجام شده مشخص شد، پارامتر دارای عدم قطعیت در منطقه، میزان آورد رودخانه و بحرانی‌ترین پارامتر کیفی، غلظت TDS است. با توجه به عدم قطعیت موجود، سه سناریو ترسالی، نرمال و خشکسالی ایجاد شد. نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل پیشنهادی نشان می‌دهد در سال‌های تر و نرمال ۱۰۰ درصد و در سال‌های خشکسالی نیز به‌طور میانگین ۶۱ درصد نیاز آبران تأمین می‌شود. حجم مخزن نیز همواره بیش از کمترین حجم ممکن (۳۵ میلیون متر مکعب) و مقدار TDS در نقاط کنترلی کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر (مقدار استاندارد) می‌باشد. مقدار سه معیار در نظر گرفته شده نیز بالاترین مقدار ممکن می‌باشند. براساس نتایج حاصله، سیستم رودخانه-مخزن رودبال، در تأمین نیاز آبران بخش کشاورزی، در سال‌های تر و نرمال مشکلی ندارد و لذا می‌توان در این سال‌ها آب را به‌منظور استفاده در سال‌های خشک، ذخیره‌سازی نمود. در سال‌های خشک، تخصیص آب بین آبران به گونه‌ای صورت گرفته است که شاخص‌های یاد شده دارای بیشترین مقدار باشند و در ضمن حجم ذخیره مخزن به جز در ماه‌های پایانی افق بهینه‌سازی به مقدار حداقل نرسد.

واژه‌های کلیدی: تخصیص کمّی و کیفی آب، عدالت، سیستم‌های رودخانه-مخزن، بهینه‌سازی سناریوها

۱- مقدمه

امروزه رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر مدیریت عرضه با هدف بیشینه‌سازی میزان عرضه آب، جای خود را به رویکردهایی داده است که عواملی مانند کیفیت آب، عدالت، سود اقتصادی و پایداری در سیستم را در نظر می‌گیرد (Zheng et al. 2011). از طرفی در نظر گرفتن این عوامل در روند تخصیص منابع آب، به‌دلیل وجود عدم‌قطعیت در عوامل مذکور و همچنین وجود ذینفعان متعدد در یک حوضه آبریز باعث می‌شود اعمال یک رویکرد جامع و پایدار

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.34336.1991

در بهره‌برداری از منابع آبی حوضه آبریز، امری پیچیده و دشوار باشد.

عدم‌قطعیت یکی از عوامل تأثیرگذار و اجتناب‌ناپذیر در تصمیم‌گیری است و نادیده گرفتن آن در مسائل آبی می‌تواند پیامدهای زیانباری داشته باشد (Loucks et al. 2005). تاکنون پژوهشگران زیادی سعی نموده‌اند با به‌کارگیری رویکردهایی همچون رویکرد فازی[1]، برنامه‌ریزی تصادفی[2] و برنامه‌ریزی بازه‌ای[3] عدم‌قطعیت در مسائل حوضه مدیریت منابع آب را در نظر بگیرند (Fu et al. 2014). پژوهش‌های نسبتاً محدودی در زمینه تخصیص همزمان کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن انجام گرفته است (Kerachian & Karamouz 2007; Nikoo et al. 2013; 2014; Tavakoli et al. 2014; 2015).

سناریوها به‌عنوان یک ابزار مهم برای بررسی عدم‌قطعیت‌های آینده در یک سیستم هماهنگ و پیوسته استفاده می‌شوند. سناریوها توانایی لحاظ کردن عدم‌قطعیت موجود در برخی از عوامل مانند آب و هوا، محیط زیست و اقتصاد که در عملکرد سیستم آبی تأثیرگذارند، را دارند (Gallopin & Rijsberman 2000; Alcamo & Gllaopin 2009).

در مطالعات دانگ و همکاران جزییات بیشتری در مورد استفاده از سناریوها در مدیریت منابع آب به‌دست آمده است (Dong et al. 2013). با توجه به کارایی سناریوها در مدل کردن عدم‌قطعیت موجود در مسائل مدیریتی، در پژوهش حاضر نیز از رویکرد در نظر گرفتن عدم‌قطعیت با استفاده از سناریوهای محتمل و بر مبنای بهینه‌سازی سناریوها استفاده شد.

تاکنون در تخصیص همزمان کمّی و کیفی در سیستم‌های مخزن- رودخانه، از معیارهای عدالت محور در تخصیص بهینه آب که از ضروریات اعمال کاربردی نتایج مدل است و نیز رویکرد بهینه‌سازی سناریوها استفاده نشده است. در این پژوهش، ساختار جدیدی برای تخصیص همزمان کمّی و کیفی در سیستم‌های مخزن- رودخانه براساس سه معیار عدالت، پایداری و بهره‌وری و همچنین با منظور نمودن عدم‌قطعیت‌ها با رویکرد بهینه‌سازی سناریوها ارائه شده است. در این پژوهش، برای اولین بار یک مدل بهینه‌سازی تخصیص غیرقطعی همزمان کمّی و کیفی منابع آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن بر مبنای روش بهینه‌سازی سناریو، مدل بهینه‌سازی GAMS و با لحاظ سه معیار عدالت، بهره‌وری و پایداری تدوین شد. مدل کمّی و کیفی برای تخصیص آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن در قالب یک مدل بهینه‌سازی ریاضی فرمول‌بندی و پیشنهاد شد. مهم‌ترین نوآوری و تفاوت کار این پژوهش در قیاس با سایر پژوهش‌ها را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

استفاده از رویکرد بهینه‌سازی سناریوها در تخصیص همزمان کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن؛

رویکرد عدالت محور در تخصیص آب با لحاظ همزمان معیارهای پایداری و بهره‌وری در تخصیص کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن؛

در بخش کشاورزی، تخصیص ندادن هیچ مقدار آب، در یک ماه به یک آببر نمی‌تواند منطقی باشد زیرا پروسه آبیاری یک پروسه پیوسته است و نقص در یک قسمت آن می‌تواند کل برداشت محصول کشت‌شده را تحت‌الشعاع قرار دهد. این موضوع در بسیاری از مدل‌سازی‌ها نادیده گرفته می‌شود. در این پژوهش، این موضوع مورد توجه قرار گرفته است.

در این مدل ابتدا با رویکرد تخصیص همزمان کمّی و کیفی آب، براساس سه شاخص یاد شده تلاش شد ضمن تخصیص بهینه آب بین آبران، بار آلودگی واردشده توسط آنها که متأثر از مقدار آب تخصیص داده شده است، به‌گونه‌ای باشد که استانداردهای زیست‌محیطی نیز تأمین شود. سپس با لحاظ سناریوهای مختلف محتمل برای پارامترهای غیر قطعی اصلی و تدوین مدل بهینه‌سازی ردیاب، عدم‌قطعیت موجود در پارامترهای هیدرولوژیکی با استفاده از روش بهینه‌سازی سناریوها لحاظ شدند. بررسی کارایی روش پیشنهادی در سیستم رودخانه- مخزن رودبال واقع در حوضه آبریز رودخانه رودبال در استان فارس، نشان‌دهنده کارایی مناسب آن برای تخصیص همزمان کمّی و کیفی آب با لحاظ عدم‌قطعیت‌های هیدرولوژیکی بوده است.

۲- ساختار مدل پیشنهادی

فلوچارت روش پیشنهادی به‌منظور تدوین مدل بهینه‌سازی سناریویی تخصیص عادلانه کمّی و کیفی آب در سیستم‌های مخزن- رودخانه، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در

[1] Fuzzy Programming
[2] Stochastic Programming
[3] Interval Programming

Archive of SID

www.SID.ir

شکل ۱ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی، شامل سه گام اصلی است. در مرحله اول باید داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری شوند، همچنین با توجه به داده‌ها و اطلاعات موجود، آنالیز حساسیت و قضاوت مهندسی در مورد انتخاب بار آلودگی شاخص، انجام شود و پارامترهای دارای عدم قطعیت، شناسایی و مشخص شوند. داده‌هایمورد نیاز در مدل شامل مقدار و کیفیت ماهانه آورد رودخانه در محل احداث مخزن (سد)، مقدار تبخیر و بارش بر سطح مخزن، منحنی سطح- حجم- ارتفاع مخزن، تعداد آبران و مقدار ماهیانه نیاز آبی آنها، مقدار فاضلاب یا زه‌آب بازگشتی به رودخانه و کیفیت آن، الگوی کشت و مساحت اراضی کشاورزی، تابع سود ناشی از مصرف آب برای آبران کشاورزی و مشخصات خروجی‌ها و دریچه‌های سد است. در مرحله دوم، مدل کمّی و کیفی عدالت، کارایی و پایداری، آب را به‌گونه‌ای میان آبران توزیع می‌کند که علاوه بر رعایت این شاخص‌ها، جریان در رودخانه، در تمامی مسیر دارای استاندارد کیفی لازم باشد.

در مرحله بعد، مدل غیرقطعی تخصیص کمی و کیفی اولیه با استفاده از روش بهینه‌سازی سناریوها تدوین شد. به این ترتیب که براساس پارامترهای دارای عدم‌قطعیت که در مرحله اول شناسایی شده‌اند، روش سناریوسازی انتخاب و سناریوها ساخته می‌شوند. پس از اجرای مدل تخصیص قطعی برای هر یک از سناریوها، مدل ردیاب

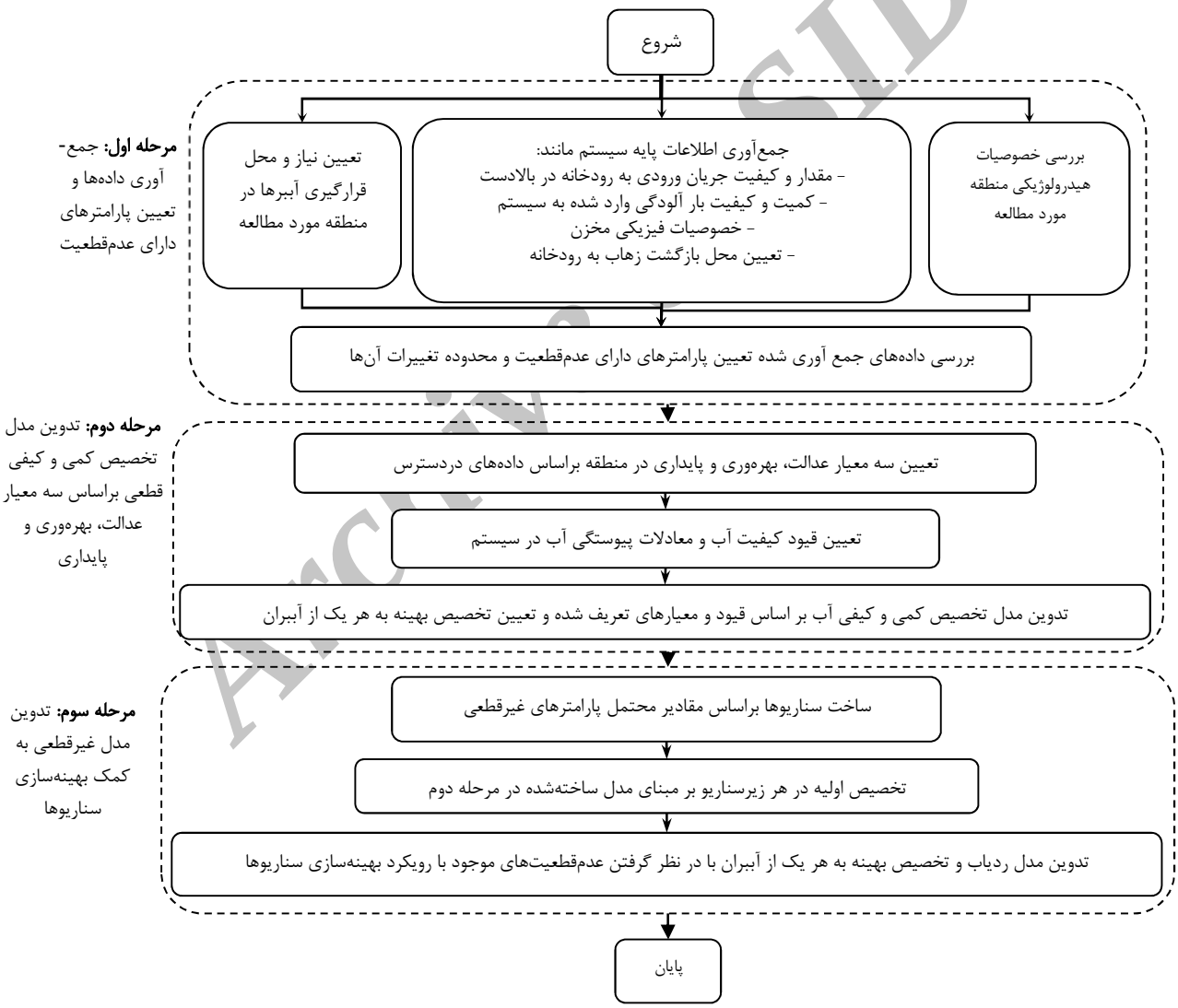

Fig. 1. Flowchart of the proposed method to develop scenario optimization model for water quantity-quality equitable allocation in river-reservoir systems

شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی برای تدوین مدل بهینه‌سازی سناریویی تخصیص عادلانه کمی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.34336.1991

ساخته می‌شود و تخصیص کمّی و کیفی با لحاظ عدم‌قطعیت صورت می‌پذیرد.

۲-۱- مدل بهینه‌سازی تخصیص عادلانه کمّی و کیفی آب

هدف از این مدل، تعیین مقدار تخصیص اولیه آب به آبران بر پایه رعایت سه شاخص عدالت، کارایی و پایداری با توجه به استانداردهای زیست‌محیطی است. این شاخص‌ها سه جنبه اصلی در سیاست تخصیص منابع آب می‌باشند که اعمال این معیارها به‌صورت مستقیم در عمل مشکل است. در این پژوهش تلاش شد شاخص‌های مذکور با توجه به پژوهش‌های اخیر و با در نظر گرفتن شرایط منطقه مورد مطالعه، تعریف شوند.

۲-۱-۱- معیار عدالت

عدالت، معیاری اساسی در تخصیص آب است (Richard 2002; Syme et al. 2008).

معیار عدالت در تخصیص آب، بیان‌کننده رضایت‌مندی هر یک از آبران از لحاظ اقتصادی و اجتماعی از میزان آب تخصیصی است. برای مثال آب تخصیصی به هر آبر باید بتواند نیازهای اولیه، ضروری یا بهداشتی آبران را تأمین کند (United Nations 2002). در ضمن باید مقدار مناسبی آب برای بخش کشاورزی با سود اقتصادی مناسب برای کشاورزان در نظر گرفته شود (Richard 2002; Syme et al. 2008). در اکثر تعاریف ارائه شده برای عدالت در پژوهش‌های پیشین، سه عامل جمعیت، سود اقتصادی و سطح اراضی کشاورزی در نظر گرفته شده است (Zheng et al. 2011).

در این پژوهش با توجه به اهمیت مسئله کارآفرینی و تأمین نیازهای آبی، اهمیت هر بخش، از نظر جمعیت ساکن در آن یکسان در نظر گرفته شد. بنابراین عامل جمعیت در تعریف شاخص عدالت منظور نشد و براساس آنچه ژنگ و همکاران توصیه نموده‌اند، شاخص عدالت به شکل زیر تعریف شد (Zheng et al. 2011).

$$FP_{i,m}=\frac{RAA_{i,m}}{DA_{i,m}}\left(A_i/\sum_i A_i+b_i/\sum_i b_i\right) \qquad (۱)$$

که در این معادله

$DA_{i,m}$ و $RAA_{i,m}$، به‌ترتیب مقدار نیاز و آب تخصیص یافته به آبر iام در ماه mام می‌باشند. A_i و b_i نیز به‌ترتیب مساحت زمین کشاورزی و سود حاصل از برداشت محصول به ازای هر متر مکعب آب در واحد سطح زمین کشاورزی آبر iام، هستند. $FP_{i,m}$ نیز نشان‌دهنده شاخص عدالت برای آبر (کشاورز) iام در ماه mام می‌باشد.

۲-۱-۲- بهره‌وری

برای محاسبه بهره‌وری در مدل بهینه‌سازی تخصیص آب از معادله ارائه شده توسط ژنگ و همکاران استفاده شد (Zheng et al. 2011).

(۲)

$$EP=\frac{\sum_i\left(\sum_m RAA_{i,m}/\sum_m DA_{i,m}\right)\cdot b_i.A_i)-\sum_i\left(\sum_m RAA_{i,m}/\sum_m DA_{i,m}\right)\cdot \min b_i.A_i)}{\sum_i\left(\sum_m DA_{i,m}/\sum_m DA_{i,m}\right)\cdot \max b_i.A_i)-\sum_i\left(\sum_m DA_{i,m}/\sum_m DA_{i,m}\right)\cdot \min b_i.A_i)}$$

که در این معادله

EP، شاخص بهره‌وری (کارایی) است. $\min b_i$ و $\max b_i$ نیز به‌ترتیب، حداقل و حداکثر سود حاصل از برداشت محصول به ازای تأمین نیاز آبی در واحد سطح زمین کشاورزی، بین آبرهای مختلف می‌باشند.

۲-۱-۳- پایداری

در این پژوهش، شاخص پایداری با توجه به اهمیت حقابه زیست‌محیطی، به‌صورت نسبت تخصیص آب به بخش محیط زیست به نیاز محیط‌زیستی لحاظ شده است. با توجه به این که به‌منظور توسعه و بهره‌برداری پایدار از منابع آبی، لازم است تلاش در جهت تأمین حداکثری حقابه زیست‌محیطی صورت گیرد، حداکثرسازی این شاخص در این پژوهش، به منزله لحاظ پایداری در تعیین سیاست‌های تخصیص آب در نظر گرفته شد.

$$SP_m=AEF_m/EF_m \qquad (۳)$$

$$AEF_m\le EF_m \qquad (۴)$$

که در معادلات بالا

Archive of SID

www.SID.ir

SP_m، EF_m و AEF_m به‌ترتیب، شاخص پایداری، مقدار نیاز حقابه محیط‌زیستی و مقدار تخصیص داده‌شده به حقابه محیط‌زیستی در ماه m ام هستند.

۲-۱-۴- مدل شبیه‌سازی کیفیت آب

TDS به‌عنوان متغیر کیفی آب شاخص منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. چنانچه k نقطه برای کنترل و پایش کیفیت آب رودخانه وجود داشته باشد، per مجموعه نقاط برداشت قبل از نقطه کنترل اول و bet مجموعه نقاط برداشت بین نقطه j و j−1 باشد، غلظت TDS به شکل زیر محاسبه می‌شود (Nikoo 2011)

$$Q_{1,m} = \overline{Q}_m - \sum_{i\in per}(1-\alpha_i)RAA_{i,m} \quad (۵)$$

$$Q_{j,m} = Q_{j-1,m} - \sum_{i\in bet}(1-\alpha_i)RAA_{i,m} \qquad j = 2,...,k \quad (۶)$$

$$C_{1.m} = \frac{(\overline{Q}_m - \sum_{i\in per} RAA_{i,m})\times C_{up,m} + \sum_{i\in per}(\alpha_i RAA_{i,m}\times cd_{i,m})}{Q_1} \quad (۷)$$

$$C_{j,m} = \frac{Q_{j-1,m}\times C_{j-1,m} + \sum_{i\in bet}(\alpha_i RAA_{i,m}\times cd_{i,m})}{Q_{j-1,m}} \quad (۸)$$

$$C_{j,m} \le C_s \quad (۹)$$

که در معادلات بالا

$Q_{j,m}$ مقدار دبی رودخانه در نقطه j در ماه m ام (میلیون مترمکعب)، $\overline{Q}_m$ مقدار آب در دسترس در بالادست رودخانه در ماه m ام برحسب میلیون مترمکعب، α_i درصد زه‌آب برگشتی از آب تخصیص داده شده به آببر i ام، $C_{j,m}$ غلظت بار آلودگی TDS در نقطه j برحسب میلی‌گرم در لیتر، $C_{up,m}$ غلظت بار آلودگی TDS در بالادست رودخانه برحسب میلی‌گرم در لیتر و $cd_{i,m}$ غلظت آلودگی در زه‌آب بازگشتی توسط آببر i ام که محل برگشت زه‌آب آن قبل از نقطه j است. همچنین C_s غلظت استاندارد متغیر کیفی شاخص TDS، هزار میلی‌گرم در لیتر است (Nikoo 2011). لازم به ذکر است که ابتدا متناسب با محل قرارگیری نقطه کنترل کیفی، دبی جریان و غلظت بار آلودگی TDS در نقطه مورد نظر محاسبه می‌شود و سپس غلظت محاسبه شده با غلظت استاندارد مقایسه و کنترل می‌شود.

۲-۱-۵- مدل بهینه‌سازی قطعی تخصیص عادلانه کمّی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن

در روش پیشنهادی، تخصیص اولیه حقابه‌ها بر اساس سه معیار ذکر شده در بخش‌های قبل، متناسب با میزان نیازهای آبی ماهانه آببران انجام شد. به این منظور، ابتدا عملکرد سیستم رودخانه- مخزن در قالب تابع هدف و قیودی که در ادامه ارائه شده است، فرمول‌بندی شد و سپس با کدنویسی در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS، مدل بهینه‌سازی تدوین شد. این مدل برای دوره‌های بهینه‌سازی سه‌ساله در سناریوهای مختلف با تابع هدف حداکثرسازی سه شاخص کارایی، عدالت و پایداری اجرا شده است. قیود مدل، شامل معادلات پیوستگی آب در مخزن سد و رودخانه، مشخصات فیزیکی سیستم، قیود کیفیت آب و قیود مربوط به تأمین حداقل نیاز آببران کشاورزی و جریان محیط‌زیستی در رودخانه پایین‌دست مخزن می‌باشند. متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی، مقدار ماهانه آب تخصیصی به آببرهای مختلف می‌باشند. تابع هدف و قیود مدل بهینه‌سازی در معادلات زیر ارائه شده‌اند

$$\text{Maximize} \quad Z = \sum_m (w_1\cdot SP_m + w_2\cdot \sum_i FP_{i,m} + w_3\cdot \frac{S_m}{S_{max}}) + w_4\cdot EP \quad (۱۰)$$

Subject to:

$$S_{m+1} = S_m + I_m + P_m - R_m - E_m - SW_m \quad (۱۱)$$

$$S^{min} \le S_m \le S^{max} \quad (۱۲)$$

$$S_1 = S^{normal} \quad (۱۳)$$

$$R_m \le \sum_i DA_{i,m} + DD_m + ID_m + EF_m \quad (۱۴)$$

$$R_m = \sum_i RAA_{i,m} + DD_m + ID_m + AEF_m \quad (۱۵)$$

$$\overline{Q}_m = R_m - DD_m - ID_m \quad (۱۶)$$

Archive of SID

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.34336.1991

$$RAA_{i,m} \geq 0.2 \times DA_{i,m} \quad (۱۷)$$

$$C_{j,m} \leq C_{s,m} \qquad j=1,2,...,k \quad (۱۸)$$

$$Q_{j,m} \geq AEF \quad (۱۹)$$

$$RAA_{i,m} \leq DA_{i,m} \quad (۲۰)$$

که در معادلات بالا

i اندیس مربوط به آبیران کشاورزی، m اندیس مربوط به شمارنده ماه، W_j ضریب اهمیت شاخص j ام، S_m حجم ذخیره مخزن در ماه m ام، I_m حجم آورد رودخانه به مخزن در ماه m ام، P_m حجم بارش بر روی سطح مخزن در ماه m ام، R_m حجم آب رها شده از مخزن در ماه m ام، SW_m حجم رها شده از سرریز در ماه m ام، E_m حجم تبخیر از مخزن در ماه m ام، DD_m نیاز شرب در ماه m ام، ID_m نیاز صنعت در ماه m ام، S^{max} حجم حداکثر مخزن، S^{min} حجم حداقل مخزن و S^{normal} حجم تراز نرمال مخزن است.

حجم آب رها شده از سرریز سد زمانی بیشتر از صفر است که حجم مخزن، حجم حداکثر باشد. این قید به‌صورت حداکثر نمودن، نسبت حجم مخزن به حجم حداکثر در تابع هدف کنترل می‌شود. این نگرش جدید در مدل‌سازی عملکرد دریچه‌ها، باعث سادگی مدل و در نتیجه آسانی حل آن با استفاده از ماژول بهینه‌سازی NLP[1] می‌شود و نیازی به استفاده از ماژول بهینه‌سازی DNLP[2] در نرم‌افزار GAMS که روندی پیچیده و زمان‌بر دارد، نیست. در واقع، ماژول بهینه‌سازی DNLP، برای مدل‌های با توابع ناپیوسته و مشتق‌ناپذیر است. این در حالی است که ماژول‌هایی مثل NLP برای مسائل غیر خطی ولی با توابع نسبتاً خوب هستند. در این پژوهش، با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه باید تحت هر شرایطی نیاز شرب و صنعت تأمین شود، بنابراین آب جاری در رودخانه به شکل معادله ۱۶ لحاظ و مدل شد و قیدی به شکل معادله ۱۷ نیز در نظر گرفته شد تا حداقل نیاز کشاورزی در هر شرایطی تأمین شود.

[1] Nonlinear Programming (NLP)
[2] Nonlinear Programming with Discontinuous Derivatives (DNLP)

۲-۲- روش بهینه‌سازی سناریو

یک رویکرد عمومی برای حل مدل‌های غیرقطعی این است که سناریوهای مختلفی را برای ضرایب تصادفی آن مدل در نظر گرفته و اقدام به حل آن کنند (Dembo 1991). روش بهینه‌سازی سناریوها از روش‌های سنتی حل مسائل غیرقطعی متفاوت است. در واقع این روش، یک چارچوب برای مدل‌سازی است. ضمن این که در آن انعطاف‌پذیری بیشتری نیز در دست مدل‌کننده برای مدل‌سازی وجود دارد که معمولاً از یک مسئله به مسئله دیگر می‌تواند تغییر کند.

۲-۲-۱- ساختار عمومی مدل بهینه‌سازی با استفاده از سناریوها

تمام مسائل بهینه‌سازی در حالت کلی به صورت زیر مدل می‌شوند (Dembo 1991)

$$\begin{aligned} &\text{Min } Z = C^T X \\ &\text{s.t. } A^U X = b^U \\ &\quad A^D X = b^D \end{aligned} \quad (۲۱)$$

که در آن

$Z = C^T X$ تابع هدف، $A^U X = b^U$ قیود غیرقطعی و $A^D X = b^D$ قیود قطعی مسئله بهینه‌سازی هستند. همچنین، C یعنی پارامترهای تابع هدف نیز می‌تواند غیرقطعی باشد (C^U). برای حل مدل بالا به این شکل عمل می‌شود که برای هر سناریو، b^U یا A^U و یا C^U خاص آن سناریو در نظر گرفته شده و مسئله به‌صورت زیرمسئله‌های بزرگ‌شده مدل می‌شود

$$\begin{aligned} &\text{Min } Z^S = C^{TS} X^S \\ &\text{s.t. } A^S X^S = b^S \qquad s=1,2,...,S \\ &\quad A^D X^S = b^D \end{aligned} \quad (۲۲)$$

جواب‌های به‌دست آمده از مسئله بالا، یعنی Z^S و X^S، برای سناریوی S بهینه هستند(S معرف تعداد سناریوهاست)، اما در واقعیت و برای مسئله واقعی الزاماً بهینه نیستند. اگر Z بهینه با Z^* و X بهینه با X^* مشخص شود، آنگاه اگر قرار باشد Z^* بهینه شود و در عین حال X^* هم به‌طور متوسط تمام سناریوها را بهینه کند، رویکردی مناسب برای اعمال این هدف، استفاده از روش

Archive of SID

www.SID.ir

حداقل‌سازی انحراف از مربعات[1] است. یعنی در مرحله دوم، می‌توان با استفاده از مدل بهینه‌سازی زیر به هدف بالا رسید

$$\text{Min} \sum_S P_S \times (Z^* - Z^S)^2 + \sum_S P_S \times \sum_i \sum_j (a_{ij} X^* - b_i^S)^2 \quad (۲۳)$$
$$\text{s.t.} \quad A^D X^* = b^D$$

که در معادله بالا

P_S احتمال وقوع سناریوی S است. برای توجیه مدل دوم، می‌توان گفت که اگر جواب بهینه، یعنی X^* در توابع $A^S X^*$ و $C^{TS} X^*$ قرار بگیرد الزاماً با مقادیر b^S و Z^S برابر نمی‌شود و به میزانی از b^S و Z^S انحراف خواهند داشت. در اصل، جواب بهینه X^* نسبت به سناریوهای مختلف یک انحراف به‌صورت $A^S X^* - b^S = \delta^S$ و همین‌طور $C^{TS} X^* - Z^S = \theta^S$ ایجاد خواهد کرد. هدف از تدوین مدل بهینه‌سازی دوم که مدل ردیاب[2] نام دارد، کم‌کردن مربعات δ^S و θ^S است. به این صورت که X^* بهینه‌ای را پیدا می‌کند تا در عین حال که شرط اصلی و قطعی ($A^D X^* = b^D$) را ارضا می‌کند به‌طور نسبی، تمام قیود غیرقطعی دیگر را نیز به نوعی مد نظر قرار می‌دهد

$$\text{Min} \sum_S P_S \times [\langle \theta^S \rangle + \langle \delta^S \rangle]$$
$$\text{where}$$
$$\langle \theta \rangle = \theta^T . \theta \quad (۲۴)$$
$$\langle \delta \rangle = \delta^T . \delta$$
$$\text{s.t.} \quad A^D X^* = b^D$$

جزئیات بیشتر در مورد مسائل غیر خطی و مسائل بهینه‌سازی با چندین تابع هدف را می‌توان در منابع یافت (Dembo 1991).

روش در پیش گرفته شده در این پژوهش، برای برخورد با مسئله عدم قطعیت، ویرایشی منحصربفرد از تئوری تحلیل سناریوها است. با توجه به آن که زیر مسئله‌ها دارای قیود نامساوی هستند، در مدل ردیاب از یک متغیر جانبی برای در نظر گرفتن پارامتری که دارای عدم‌قطعیت است، استفاده شد و با توجه به ساختار مدل، چند قید برای تعیین این متغیر کمکی در نظر گرفته شد. در تابع هدف مدل ردیاب نیز تغییراتی با توجه به اهداف مدل اصلی اعمال شده است.

[1] Least Square
[2] Tracking model

۲-۲-۲- روش سناریوسازی

روش‌های معمول سناریوسازی عبارت‌اند از روش سناریوهای موازی، روش درخت سناریوها، روش دمبو[3] و روش ISM[4] (Dembo 1991). در این پژوهش به‌منظور سناریوسازی از شاخص بارش استاندارد (SPI[5]) استفاده شد. به‌وسیله این شاخص که در ادامه توضیح داده می‌شود سناریوهای خشک‌سالی، ترسالی و نرمال ساخته شده‌اند.

۲-۳- مدل بهینه‌سازی غیرقطعی تخصیص کمّی و کیفی آب برمبنای روش بهینه‌سازی سناریوها

مقدار مربوط به داده‌های آورد رودخانه دارای طیف گسترده‌ای بودند؛ زیرا برخی از سال‌ها در دوره خشک‌سالی بودند و مقدار بارش بسیار ناچیز بوده است و برخی سال‌ها بالعکس. یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در مدل تخصیص آب از مخزن، مقدار جریان ورودی مخزن است؛ به گونه‌ای که در صورت تغییر در آن در دوره‌های بعد از برنامه‌ریزی، نتایج مدل از نظر قابلیت اطمینان به‌ویژه در بلندمدت با سوالات جدی مواجه می‌شود (Nikoo et al. 2012; Karimi 2010). به همین دلیل تصمیم گرفته شد در این مدل، عدم قطعیت در مقدار آورد لحاظ شود. عدم قطعیت آوردها با استفاده از رویکرد جدیدی در بهینه‌سازی سناریوها، وارد مدل شد. در این رویکرد نسبت توان چهارم یا دوم اختلاف بین تصمیم، از تصمیم برای هر سناریو در بخش‌های مختلف مدل، به میانگین آن تصمیم حداقل می‌شود. در رویکرد تحلیل (بهینه‌سازی) سناریوها، پس از شناخت عدم‌قطعیت باید سناریوسازی نمود. در این پژوهش، ابتدا با توجه به مقدار بارش در منطقه شاخص SPI برای سال‌های مختلف براساس روش ارائه شده توسط کارآموز و عراقی‌نژاد در سال ۱۳۸۹ محاسبه شد. سپس با توجه به نتیجه شاخص SPI و جدول ۱، سه تیپ سناریو اصلی خشک‌سالی، ترسالی و نرمال ساخته شدند و هرکدام از سناریوها به‌ترتیب به زیرسناریوهای خشک‌سالی شدید، متوسط و ضعیف، نرمال و نزدیک به نرمال، ترسالی شدید، متوسط و ضعیف، شکسته شد (Karamouz & Araghinezhad 2010).

[3] Dembo
[4] Index Sequential Modeling
[5] Standardized Precipitation Index (SPI)

Archive of SID

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.34336.1991

جدول ۱- وضعیت خشکسالی براساس شاخص SPI (Karamouz & Araghinezhad 2010)

Table 1. Drought condition according to SPI (Karamouz & Araghinezhad 2010)

Situation of climatic drought	SPI
Too intense drought	-3
Intense drought	-2.5
Average drought	-2
Poor drought	-1.5
Close to normal	-1
Normal	-0.5 to +0.5
Close to normal	1
Poor wet year	1.5
Average wet year	2
Intense wet year	2.5
Too intense wet year	3

مدل قطعی ساخته شده در قسمت قبل برای هر یک از زیرسناریوها حل و پاسخ آنها ذخیره شد. این مدل‌ها، زیرمسئله نامیده می‌شوند. با توجه به ساختار زیرمسئله، برخی از قیود به‌دلیل وجود پارامترهای غیرقطعی، دارای عدم‌قطعیت می‌باشند که این قیود به‌صورت نامساوی بیان می‌شوند. با توجه به این موضوع تصمیم گرفته شد از متغیر جانبی جانشین آورد به مخزن در تابع هدف مدل ردیاب[1] استفاده شود. برای کنترل مقدار انتخاب شده برای این متغیر در روند بهینه‌سازی، حد بالای آن برابر با میانگین آورد و حد پایین آن برابر با حداقل آورد در سناریوهای مختلف قرار داده شد. مدل ردیاب در رویکرد بهینه‌سازی سناریوها به‌منظور تعیین بهترین رویکرد بهینه‌سازی با لحاظ وقوع حالات مختلف، استفاده می‌شود. مدل ردیاب، برای یافتن بهترین راه حل از بین تمام راه حل‌های بهینه برای هر سناریو به کار می‌رود و به اصطلاح پاسخ بهینه یا راه حلی را ارائه می‌کند که حداقل مجموع فاصله از پاسخ بهینه تک تک زیرسناریوها را داشته باشد. در این پژوهش، مدل ردیاب در قالب ساختار زیر ارائه شد

$$\text{Min} \quad Z_{s.opt.} = \sum_{sn}\left(\frac{Z^* - Z_{sn}}{\bar{Z}}\right)^4 + \sum_{sn,m}\left(\frac{I^*_m - I_{sn,m}}{\bar{I}_m}\right)^2 + \sum_{i,m}\left(\frac{r^*_{i,m} - r^{max}}{r^{max}}\right)^2 \qquad (۲۵)$$

Subject to:

$$S^*_{m+1} = S^*_m + I^*_m + P_m - R_m - E_m - SW_m \qquad (۲۶)$$

$$S^{min} \le S^* \le S^{max} \qquad (۲۷)$$

$$S^*_1 = S^{normal} \qquad (۲۸)$$

$$R_m \le \sum_i DA_{i,m} + DD_m + ID_m + EF_m \qquad (۲۹)$$

$$R_m = \sum_i RAA_{i,m} + DD_m + ID_m + AEF_m \qquad (۳۰)$$

$$\bar{Q}_m = R_m - DD_m - ID_m \qquad (۳۱)$$

$$RAA_{i,m} \le 0.2 \times DA_{i,m} \qquad (۳۲)$$

$$C_j \le C_s \qquad j = 1,2,...,k \qquad (۳۳)$$

$$Q_{j,m} \ge AEF_m \qquad (۳۴)$$

$$RAA_{i,m} \le DA_{i,m} \qquad (۳۵)$$

$$(I_m)_{min} \le I^*_m \le \bar{I}_m \qquad (۳۶)$$

(۳۷)

$$Z^* = \sum_m (w_1 \cdot SP_m + w_2 \cdot \sum_i FP_{i,m} + w_3 \cdot \frac{S^*_m}{S^*_{max}}) + w_4 \cdot EP$$

که در معادلات بالا اندیس " * " متغیر در مدل ردیاب و اندیس sn شمارنده سناریو است. همچنین، I^* متغیر کمکی جانشین آورد در مدل ردیاب، $r_{i,m}$ نسبت مقدار آب تخصیص داده شده ($RAA_{i,m}$) به مقدار نیاز هر آبر ($DA_{i,m}$)، r^{max} حداکثر مقدار ممکن برای r، $\bar{Z}$ میانگین Z و $\bar{I}_m$ میانگین آورد به رودخانه در هر ماه به ازای سناریوهای مختلف است.

۳- منطقه مورد مطالعه

استان فارس یکی از مهم‌ترین استان‌های کشور در تولید محصولات کشاورزی است. با توسعه کشاورزی در این استان و با توجه به نیاز

[1] Tracking model

Archive of SID
www.SID.ir

هرچه بیشتر به آب، توجه سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران بخش آب بیش از پیش به سمت نحوه مدیریت منابع آب این استان جلب شده است (Mojarrad 2011). منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل سد و رودخانه رودبال است که در نزدیکی شهرستان داراب در شرق استان فارس، قرار دارد.

متأسفانه در سال‌های اخیر با توجه به خشک‌سالی، آب رودخانه به‌شدت کم شده و کیفیت آب آن نیز به‌دلیل ورود آلودگی‌ها به آن و همچنین، کاهش آورد رودخانه، کاهش یافته است. پس از بررسی متغیرهای کیفی منطقه مورد مطالعه در داده‌های کیفیت آب نمونه‌گیری شده توسط سازمان آب منطقه‌ای فارس، مشخص شد بحرانی‌ترین پارامتر کیفی آب که در طی مدت مشخص، نوسان کرده و بیش از حد استاندارد است، شاخص کیفی TDS است. در شکل ۲، متوسط غلظت TDS در سه نقطه کنترلی برای یک دوره یک‌ساله ارائه شده است.

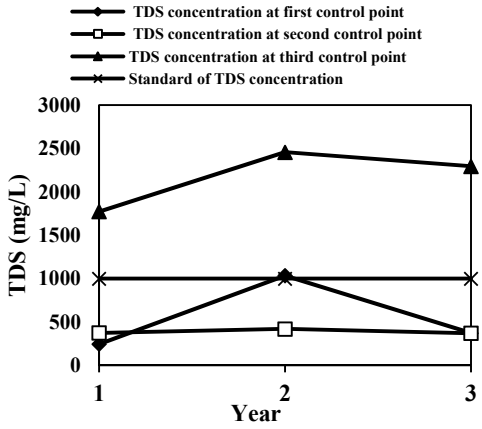

Fig. 2. TDS variations in Khordad at three QC points (2005-2007)

شکل ۲- تغییرات متغیر کیفی TDS در ماه خرداد در سه نقطه کنترل کیفیت (۱۳۸۴-۱۳۸۶)

سد رودبال از نوع خاکی، سنگریزه‌ای با هسته رسی است و ۸۳ متر ارتفاع دارد. حجم تراز نرمال سد رودبال ۸۲ میلیون متر مکعب است. در جدول ۲ مشخصات منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد رودبال با توجه به اطلاعات موجود، براساس نقشه‌برداری‌های انجام شده در محدوده مخزن ارائه شده است و در آن نیاز آبی شبکه آبیاری که در حین احداث سد رودبال در منطقه ایجاد شده است و نیاز آبی بخش کشاورزی سنتی که از قدیم به‌صورت حقابه‌بر از رودخانه آب مورد نیاز خود را تأمین می‌نمودند، در نظر گرفته شده است (Ab-Niroo consulting Engineers 2000).

در شکل ۳ آبران بخش کشاورزی که در این پژوهش در نظر گرفته شدند، به‌صورت شماتیک نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این پژوهش، نیاز آبی بخش‌های شرب و صنعت، با توجه به استراتژیک بودن تأمین این نیازها و مقدار کم آن نسبت به نیاز بخش کشاورزی، به صورت کامل، تأمین شده است. در این شکل محل برداشت و بازگشت زه‌آب هر یک از آبران نیز مشخص شده است. حال با توجه به شرایط منطقه و اهمیت موضوع، تخصیص بهینه و کنترل شده منابع آب در سیستم مخزن-رودخانه رودبال با لحاظ همزمان کمیت و کیفیت آب، امری ضروری است. اطلاعات بیشتر در مورد منطقه مورد مطالعه، در مراجع قابل دسترسی است (Pouya 2013).

جدول ۲- مقادیر سطح و حجم مخزن سد رودبال در ترازهای مختلف آب در مخزن سد

Table 2. Area and volume of Roodbal dam reservoir at different water levels

Level (m)	Area (km^2)	Volume (MCM)
1311	0	0
1320	0.03	0.464
1330	0.409	2.855
1340	0.797	8.776
1350	1.315	19.228
1360	1.899	35.211
1370	2.533	57.393
1380	3.291	86.537

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به‌کارگیری مدل پیشنهادی در تخصیص کمّی و کیفی منابع آب سطحی در حوضه رودخانه رودبال ارائه شده است. مقدار شاخص SPI منطقه براساس مقدار بارش در منطقه، برای سی و پنج سال تعیین شده است. در جدول ۳، مقدار شاخص SPI دوازده ماهه، ارائه شده است.

شاخص SPI منطقه نشان می‌دهد دوره‌های خشک‌سالی در منطقه کوتاه مدت است؛ بر این اساس دوره‌های سه ساله برای هر یک از سناریوها انتخاب شد. بر مبنای شاخص SPI منطقه، سه تیپ سناریو به شکل زیر درنظر گرفته شد:

- تیپ خشک: خشک‌سالی ضعیف، خشک‌سالی متوسط، خشک‌سالی شدید

Archive of SID
www.SID.ir

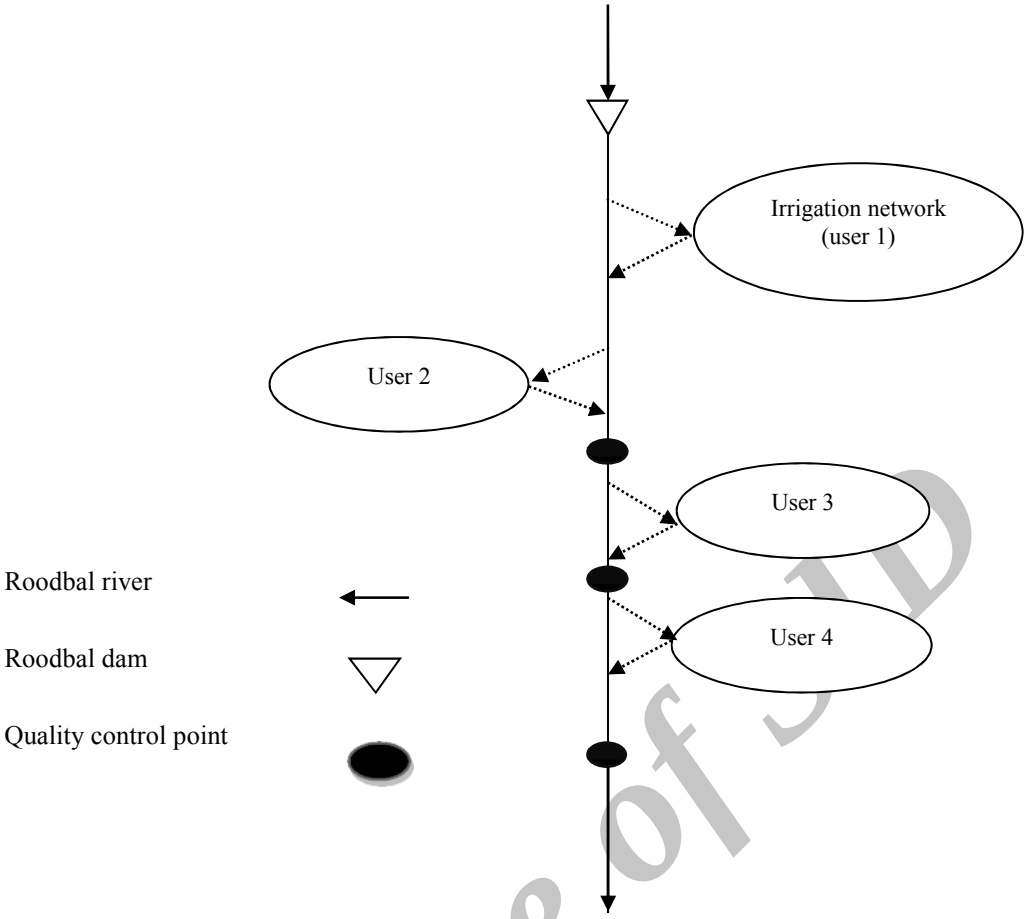

Fig. 3. Schematic of agricultural water users in the studied area

شکل ۳- شماتیک آبران کشاورزی منطقه

- تیپ نرمال: نرمال، نزدیک به نرمال

- تیپ تر: ترسالی متوسط، ترسالی شدید، ترسالی بسیار شدید

با توجه به آن که در سال‌های تر و نرمال، معمولاً مشکلی در تأمین نیازها وجود ندارد، سیاست تخصیص در این سال‌ها بر مبنای ذخیره‌سازی آب برای سال‌های خشک است. به‌طوری که در سال‌های خشک تأمین نیازهای آبران و نیاز محیط‌زیستی در اولویت است. وزن‌های موجود در تابع هدف مدل تخصیص کمّی و کیفی اولیه، همانطور که مشخص است بنابر اهمیت شاخص‌ها در سیاست‌های تصمیم‌گیری به‌منظور تخصیص منابع آب قابل تعیین است. در اینجا نیز با توجه به گزارش‌های موجود درگیری‌های متعددی بر سر تخصیص عادلانه آب بین آبران منطقه وجود داشته است. به‌همین دلیل سعی شد که وزن‌ها به گونه‌ای اتخاذ شوند که شاخص عدالت در تابع هدف بیشترین سهم را داشته باشد. در سناریوهای تیپ خشک نیز برای افزایش پایداری سیستم، حداقل تأمین نیاز محیط‌زیستی، برابر با شصت درصد نیاز محیط‌زیستی قرار داده شده است. با در نظر گرفتن این قید، مدل تهیه شده در GAMS، جستجوی خود را برای جواب بهینه‌ای که در آن تخصیص نیاز محیط‌زیستی برابر با مقدار ۶۰ درصد از نیاز یا بیشتر از آن باشد، انجام می‌دهد. لازم به ذکر است در سناریو خشک با توجه به قیود تعریف شده، اهمیت وزن‌ها در تخصیص مشهود نیست. اما در سناریو نرمال با تغییر وزن‌ها می‌توان تغییر در عملکرد مدل را مشاهده نمود. در جدول ۴ نمونه‌ای از این تغییرات در زیر سناریو نزدیک به نرمال ارائه شده است. در اینجا همان طور که اشاره شد در نهایت وزن‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که شاخص عدالت پر اهمیت‌ترین المان در تابع هدف باشد. البته باید توجه داشت المان سوم در تابع هدف ($w_3.\frac{S_m}{S_{max}}$) بنا به روش حل انتخاب شده صرفاً با هدف کنترل میزان سرریز و حجم مخزن است؛ به‌همین دلیل وزن بسیار کوچکی به آن اختصاص داده شد تا تأثیری

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳- مقدار شاخص SPI در منطقه مورد مطالعه (۱۳۵۴-۱۳۸۸)

Tabel 3. SPI in study area (1975-2009)

Year	SPI	Situation of climatic drought
1	-2.31	Intense drought
2	-0.38	Normal
3	0.39	Normal
4	1.53	Average drought
5	0.15	Normal
6	-0.27	Normal
7	0.1	Normal
8	0.9	Close to normal
9	-0.34	Normal
10	0.71	Close to normal
11	0.33	Normal
12	-0.69	Close to normal
13	-1.14	Poor drough
14	-0.57	Close to normal
15	0.71	Close to normal
16	-0.16	Normal
17	-0.76	Close to normal
18	-0.72	Close to normal
19	0.29	Normal
20	0.29	Normal
21	2.56	Too intense wet year
22	-0.4	Normal
23	0.37	Normal
24	2.26	Average wet year
25	0.03	Normal
26	0.3	Normal
27	0.26	Normal
28	-2.31	Average drought
29	-1.12	Poor drough
30	-0.38	Normal
31	0.41	Normal
32	0.1	Normal
33	0.78	Close to normal
34	-1.31	Poor drough
35	0.37	Normal

بر روند تخصیص نگذارد و تنها یک عامل کنترلی در حل درست مسئله باشد. در شکل‌های ۴-a و ۴-b، عملکرد مخزن سد رودبال در دو حالت بهینه‌سازی شده برای سناریوی ترسالی و خشک‌سالی ارائه شده است.

با بررسی نمودارها می‌توان دریافت با افزایش آورد به مخزن، مقدار آب رها شده و درصد تأمین نیاز افزایش می‌یابد.

در سال‌های تر و نرمال، بر اساس سیاست اعمال شده، سیستم به گونه‌ای عمل می‌کند تا حجم مخزن به حجم حداکثر خود برسد. در سال‌های خشک نیز با کاهش آورد رودخانه مقدار تأمین نیاز و حجم مخزن نیز کاهش یافته است. البته از آنجایی که برنامه به‌صورت چند دوره‌ای عمل می‌کند، مقدار بهینه رها شده را به گونه‌ای انتخاب می‌کند که در سال‌های بعدی نیز سیستم دچار کمترین مشکل شود. هیچگاه برای تأمین نیازها، حجم مخزن به‌مقدار حداقل نمی‌رسد مگر در ماه‌های پایانی افق طرح. در شکل‌های ۵-a تا ۵-d نیز مقدار تأمین نیاز آبران یک تا چهار ارائه شده است. شکل‌ها نیز گویای این امر هستند و می‌توان دید که سیستم، تأمین نیاز آبران بخش کشاورزی را با اولویت آبر یک (شبکه آبیاری)، چهار، سه و دو به ترتیب انجام می‌دهد.

شکل ۶ مقدار TDS در سه نقطه کنترلی در سناریو خشک را نشان می‌دهد. همان گونه که انتظار می‌رفت، مقدار TDS، کنترل شده و کمتر از مقدار مجاز است. نقطه سوم در محلی قرار گرفته است که تمام زه‌آب بازگشتی وارد رودخانه می‌شود و با توجه به آن که مقدار TDS موجود در آب، وابسته به غلظت بار آلودگی وارد شده است، این نقطه از حساسیت بالاتری برخوردار است و غلظت TDS در این نقطه نسبت به سایر نقاط بالاتر است. در سایر نقاط در ماه‌هایی مانند فروردین که مقدار TDS در زه‌آب بازگشتی و بالادست سیستم بیشتر است، مقدار TDS بحرانی است.

به‌منظور بررسی عملکرد مدل در برابر عدم قطعیت در نظر گرفته شده، مقدار تابع هدف Z در مدل قطعی و مدل ردیاب مورد بررسی قرار گرفت. برای مثال این مقدار در سناریو خشک پس از تخصیص به‌وسیله مدل ردیاب برابر با ۳۳/۲۸۱ است. از آنجایی که عدم قطعیت در نظر گرفته شده مرتبط با آورد رودخانه است، چنانچه داده‌های آورد با روش مرسوم میانگین‌گیری اصلاح شود و از مدل قطعی برای تخصیص استفاده شود، مقدار تابع هدف برابر با ۳۶/۸۷۶ به‌دست می‌آید. با توجه به پراکندگی داده‌های آورد، مقدار به‌دست آمده در مدل غیرقطعی بیانگر آن است که این مدل عملکرد بهتری برای پوشش طیف گسترده داده‌ها دارد و مدل می‌تواند اثر عدم قطعیت در داده‌ها را بهتر در نظر بگیرد.

در ادامه نتایج مربوط به‌مقدارتخصیص‌ها در مدل تخصیص کمّی و کیفی ارائه شده است. به‌عنوان نمونه، مقدار تخصیص داده شده به هر یک از آبران، در سناریو خشک طی سال اول و سوم در جدول ۵ و مقادیر شاخص پایداری و بهره‌وری و عدالت برای سال اول در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل از کاربرد مدل پیشنهادی در حوضه آبریز رودخانه رودبال، نشان می‌دهد مدل پیشنهادی ضمن حفظ کیفیت آب در حد مطلوب و نیز در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مهم موجود در سیستم، توانایی تخصیص همزمان کمّی و کیفی از سیستم رودخانه-مخزن را دارد.

Archive

www.SID.ir

جدول ۴- مقدار تغییر شاخص‌های عدالت، پایداری و بهره‌وری ناشی از تغییر وزن توابع هدف در سال اول

Table 4. Changes in equity, efficiency and sustainability due to different weights of objective functions in first year

Year	Month (Persian Calendar)	If, W_1=0.5, W_2=0.32, W_3=0.05 and W_4=0.13		
		index Equity (User 3, FP)	Efficiency index (EP)	Sustainability index (SP)
1	Farvardin	0.302	1	0.397
	Ordibehsht	0.339	1	
	Khordad	0.283	1	
Year	**Month**	**If W_1=0.7, W_2=0.12, W3 = 0.05 and W_4=0.13**		
		index Equity (User 3, FP)	**Efficiency index (EP)**	**Sustainability index (SP)**
2	Farvardin	0.302	1	0.356
	Ordibehsht	0.283	1	
	Khordad	0.283	1	
Year	**Month**	***If W_1=0.3, W_2=0.52, W_3 = 0.05 and W_4=0.13**		
		index Equity (User 3, FP)	**Efficiency index (EP)**	**Sustainability index (SP)**
3	Farvardin	0.377	0.7	0.417
	Ordibehsht	0.377	1	
	Khordad	0.377	0.9	

* The coefficients are considered in intial quantity- quality allocation model

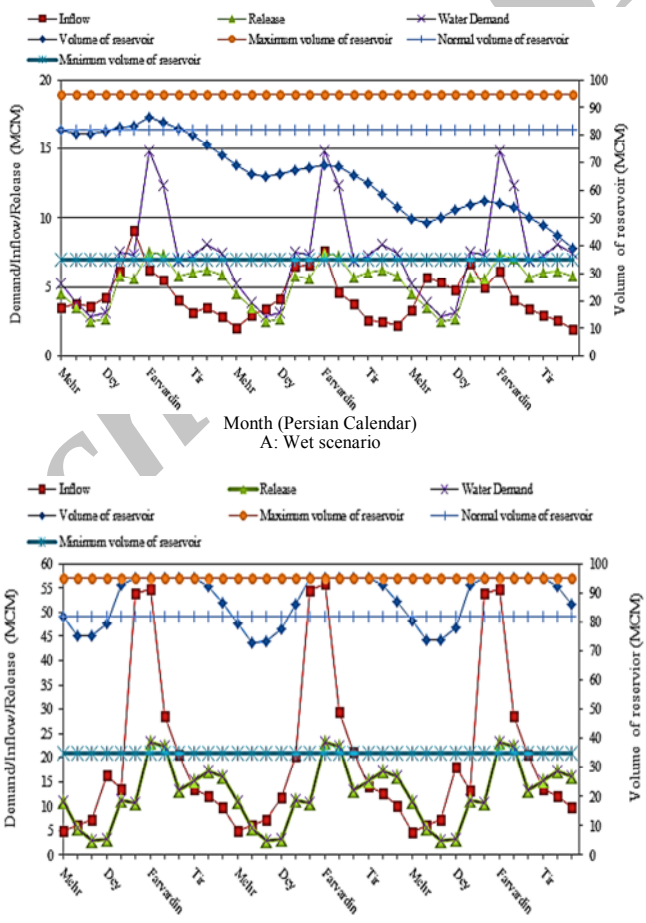

Fig.4. Performance of reservoir a) Wet scenario and b) Dry scenario

شکل ۴- عملکرد مخزن در دو سناریو a) ترسالی و b) خشک‌سالی

www.SID.ir

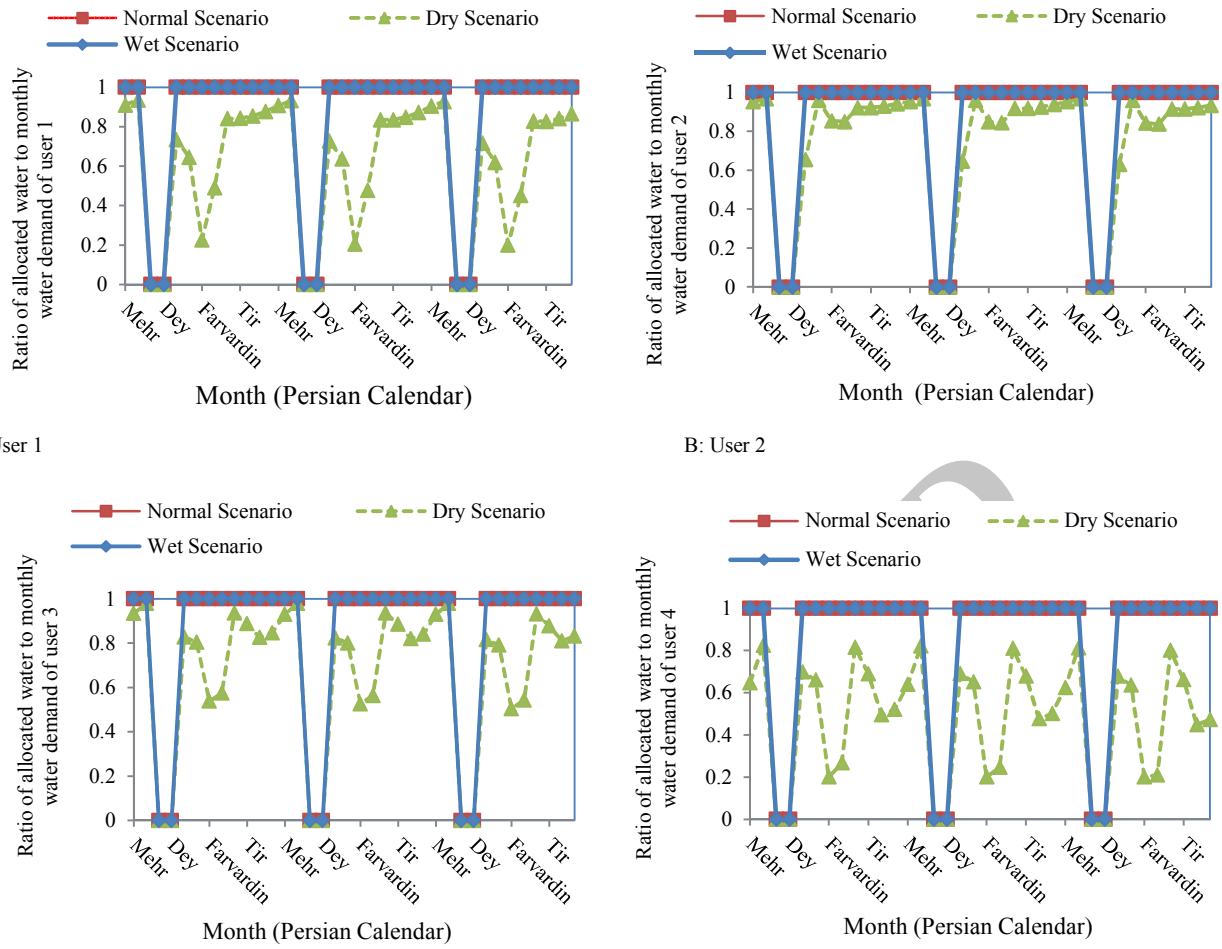

Fig.5. Ratio of allocated water to water demand for each user (users 1 to 4)

شکل ۵- نسبت مقدار آب تخصیص داده شده به نیاز آبی در آبیران اول تا چهارم

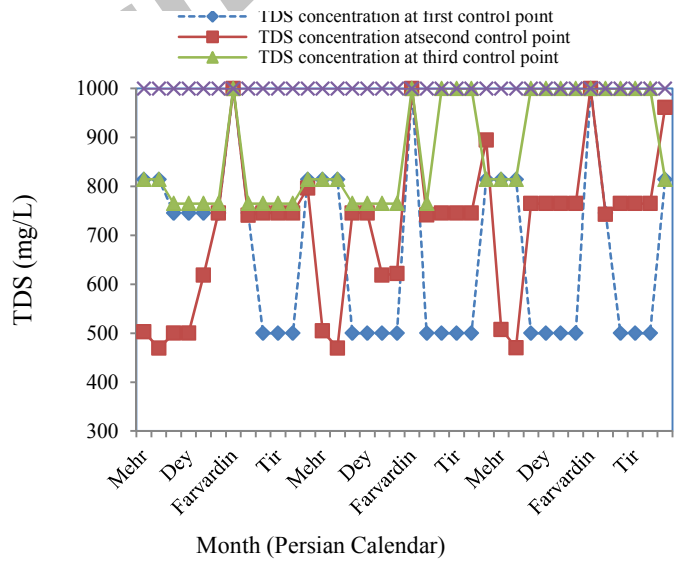

Fig. 6. TDS variations at different QC points in dry scenario

شکل ۶- تغییرات TDS در نقاط کنترل کیفی مختلف در سناریو خشک‌سالی

www.SID.ir

جدول ۵- مقدار آب تخصیص داده شده به آببران ۱ تا ۴ برمبنای تخصیص عادلانه آب در سناریو خشک (MCM)

Tabel 5. Water allocated to each user based on equity allocation in dry scenario (MCM)

Year	Month (Persian Calendar)	User 1	User 2	User 3	User 4	Year	User 1	User 2	User 3	User 4
1	Mehr	0.313	0.161	0.238	0.867	3	0.311	0.161	0.237	0.836
	Aban	0.234	0.119	0.047	0.548		0.232	0.119	0.047	0.54
	Azar	0	0	0	0		0	0	0	0
	Dey	0	0	0	0		0	0	0	0
	Bahman	0.74	0.857	0.542	0.798		0.721	0.825	0.534	0.774
	Esfand	0.868	0.142	0.595	0.851		0.834	0.142	0.585	0.819
	Farvardin	0.661	0.472	0.941	0.606		0.586	0.466	0.882	0.606
	Ordibehsht	0.944	0.485	0.923	0.739		0.869	0.478	0.871	0.582
	Khordad	0.507	0.273	0.229	0.566		0.499	0.271	0.228	0.556
	Tir	0.501	0.27	0.371	0.805		0.492	0.268	0.367	0.773
	Mordad	0.466	0.249	0.538	0.935		0.459	0.247	0.528	0.845
	Shahrivar	0.4	0.211	0.485	0.93		0.395	0.209	0.476	0.844

جدول ۶- مقدار شاخص‌های عدالت، پایداری و بهره‌وری در سال اول (سناریو خشک)

Tabel 6. Equity, efficiency and sustainability indices in the first year (dry scenario)

Year	Month (Persian Calendar)	Equity index (User 1, FP)	Equity index (User 2, FP)	Equity index (User 3, FP)	Equity index (User 4, FP)	Efficiency index (EP)	Sustainability index (SP)
1	Mehr	0.4	0.26	0.35	0.47	0.6	0.19
	Aban	0.41	0.26	0.37	0.6	0.6	
	Azar	0	0	0	0	1	
	Dey	0	0	0	0	1	
	Bahman	0.32	0.18	0.31	0.51	0.6	
	Esfand	0.28	0.26	0.3	0.48	0.6	
	Farvardin	0.1	0.23	0.2	0.14	0.6	
	Ordibehsht	0.21	0.23	0.22	0.19	0.6	
	Khordad	0.37	0.25	0.35	0.59	0.6	
	Tir	0.37	0.25	0.34	0.5	0.6	
	Mordad	0.37	0.25	0.31	0.36	0.6	
	Shahrivar	0.38	0.26	0.32	0.38	0.6	

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توجه به اهمیت موضوع تخصیص عادلانه منابع آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن در شرایط عدم‌قطعیت، یک مدل بهینه‌سازی تخصیص غیرقطعی همزمان کمّی و کیفی منابع آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن برمبنای روش بهینه‌سازی سناریوها و با استفاده از مدل بهینه‌سازی GAMS تدوین شد. این مدل، امکان تصمیم‌گیری در مورد مقدار تخصیص آب به متقاضیان را با لحاظ اثرات بلندمدت خصوصیات هیدرولوژیکی، اقتصادی و محیط‌زیستی، در قالب سه معیار عدالت، بهره‌وری و پایداری، با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در پارامتر هیدرولوژیکی جریان ورودی به مخزن سد را برای دست‌اندرکاران بخش آب برای سیستم رودخانه- مخزن رودبال فراهم آورده است. نتایج مدل تخصیص کمّی و کیفی عادلانه پیشنهادی نشان می‌دهد که سیستم رودخانه-مخزن رودبال، در تأمین نیاز آببران بخش کشاورزی، در سال‌های تر و نرمال مشکلی ندارد و لذا می‌توان در این سال‌ها آب را به‌منظور استفاده در سال‌های خشک، ذخیره‌سازی نمود. مطابق نتایج حاصله در این پژوهش، در سال‌های خشک که سیستم با کمبود آب مواجه است، تخصیص آب بین آببران بر اساس شاخص عدالت و بهره‌وری، به گونه‌ای صورت گرفته است که تأمین نیاز آبری که ضریب سود بیشتر نسبت به سایر آببران دارد در اولویت قرار بگیرد. البته از آنجایی که برنامه به‌صورت بهینه‌سازی چند دوره‌ای عمل می‌کند، مدل، مقدار بهینه آب رها شده از مخزن سد رودبال را به گونه‌ای انتخاب می‌کند که در سال‌های بعدی نیز، سیستم تا حد امکان دچار کمترین مشکل شود. همچنین نتایج بررسی عملکرد مدل پیشنهادی

Archive of SID
www.SID.ir

این پژوهش، نشان داد که مدل مذکور، هیچگاه برای تأمین نیازها، حجم مخزن سد رودبال را، جز در ماه‌های پایانی افق طرح برنامه‌ریزی، به مقدار حداقل نمی‌رساند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که رویکرد پیشنهادی در این پژوهش، عملکرد مناسبی در تخصیص عادلانه آب با لحاظ همزمان کمیت و کیفیت آب در سیستم‌های رودخانه-مخزن و با لحاظ عدم‌قطعیت‌ها دارد.

به‌منظور مطالعات بیشتر پیشنهاد می‌شود با لحاظ گروداران مختلف درگیر در منطقه مورد مطالعه، سیاست‌های تخصیص با رویکردهای لحاظ چانه‌زنی و رفع اختلاف تا حد ممکن بین گروداران مختلف تعیین شود. همچنین مدل پیشنهادی با لحاظ متغیرهای کیفی بیشتر برای حالت‌های تخصیص با چند شاخص بار آلودگی توسعه داده شوند.

References

Ab-Niroo Consulting Engineers., 2000, *Review of the report of the water resources planning and performance of the Roodbal dam based on the water volumes allocated for different consumption sections*, Ministry of Energy, Tehran, Iran. (In Persian)

Alcomo, J. & Gollopim, G., 2009, *Building and generation of world water scenarios : Water in changing world*, The United Nations World Water Development Report 3, United Nations World Water Assessment Programme (WWAP).

Dong, C., Schoups, G. & Giesen, N., 2013, "Scenario development for water resource planning and management : A review", *Technological Forecasting and Social Change*, 80 (4), 749-761.

Dembo, R. S., 1991, "Scenario optimization", *Annals of Operations Research*, 30(1), 63-80.

Fu, Y. H., Guo, P., Fang, S. & Li, M., 2014, "Optional water resources planning based on interval-parameter two stage stochastic", *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering*, 30 (5), 73-81.

Gallopin, G. C. & Rijsberman, F., 2000, "Three global water scenarios", *International Journal of Water*, 1(1), 16-40.

Karamouz, M. & Araghinezhad, Sh., 2010, *Advanced hydrology*, University of Amir Kabir Technology, Tehran. (In Persian)

Karimi, A., 2010, "Optimum water allocation modeling at basin scale by integration of waterbasin hydrologic and socio-economic properties and their uncertainties", PhD Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)

Kerachian, R. & Karamouz, M., 2007, "A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir river systems", *Advances in Water Resources*, 30(4), 866-882.

Loucks, D. P., Van Beek, E., Stadinger, J. R., Dijkman, J. P. & Villars, M.T., 2005, *Water resources system planning and management: An introduction to methods and applications*, UNESCO, Paris.

Mojarrad, M., 2011, "Study of well head protection area for a well set from the aquifer of the Bayza and Zarghan basin", MSc Thesis, University of Shiraz, Iran. (In Persian)

Nikoo, M. R., 2011, "Developing a stochastic model for water and waste load allocation in river basins: Application of Game Theory", PhD Thesis, University of Tehran, Iran. (In Persian)

Nikoo, M. R., Karimi, A. & Kerachian, R., 2013, "Optimal long-term operation of reservoir-river systems under hydrologic uncertainties: Application of interval programming", *Water Resource Managment*, 27(11), 3865-3883.

Nikoo, M.R., Kerachian, R. & Karimi, A., 2012, "A nonlinear interval model for water and waste load allocations in river basins", *Water Resources Management*, 26 (10), 2911-2926.

Nikoo, M. R., Kerachian, R., Karimi, A., Azadnia, A. A. & Jafarzadegan, K., 2014, "Optimal water and waste load allocation in reservoir–river systems: A case study", *Environmental Earth Sciences Journal*, 71(9), 4127-4142.

Archive of SID

www.SID.ir

Pouya, A., 2013, "Developing a water quantity- quality allocation model in river basins: Application of Game Theory", MSc. Thesis, University of Shiraz, Iran. (In Persian)

Richard, T., 2002, "Estimates of the damage costs of climate change. Part 1: Benchmark Estimates", *Environ. Resour. Econ.*, 21(1), 47-73.

Syme, G. J., Porter, N. B., Goeft, U. & Kington, E.A., 2008, "Integrating social well being into assessments of water policy: Meeting the challenge for decision makers", *Water Pol.*, 10(4), 323-343.

Tavakoli, A., Kerachian, R., Nikoo, M. R., Soltani, M. & Malakpour Estalaki, S., 2014, "Water and waste load allocation in rivers with emphasis on agricultural return flows: Application of fractional factorial analysis", *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(9), 5935-5949.

Tavakoli, A., Nikoo, M. R., Kerachian, R. & Soltani, M., 2015, "River water quality management considering agricultural return flows: Application of a non-linear two-stage stochastic fuzzy programming", *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(4), 158-187. DOI: 10.1007/s10661-015-4263-6.

United Nations, 2002, "Global challenges global opportunity: Trends in sustainable development", available from <http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit_docs/criticaltrends_1408. pdf.> Accessed August 21, 2013.

Zheng, H., Wang, Z., Hu, S. & Wei, Y., 2011, "A comparative study of the performance of public water rights allocation in China", *Water Resource Management*, 26(5), 1107-1123.

Archive of SID

www.SID.ir