

بهینه سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رویکرد مرتب سازی نامغلوب

ایمان احمدیان فر^۱، آرش ادیب^{۲*}، مهرداد تقیان^۳ و علی حقیقی^۴

- ۱- دانشجوی دکترای عمران-آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز
 ۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز arasshadib@yahoo.com
 ۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین اهواز
 ۴- دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۱

چکیده

برای استخراج سیاست‌های بهینه بهره برداری از سیستم‌های چند مخزنه، اعمال اهداف چندگانه متضاد به صورت همزمان، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این راستا، به ارائه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه شامل اهداف کشاورزی و زیست محیطی در یک سیستم سه سدی منابع آب پرداخته شده است. بدین منظور از تلفیق مدل شبیه ساز سیاست بهره برداری جیره بندی گسسته و مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رویکرد مرتب سازی نامغلوب، استفاده شده است تا شاخص کمبود آب برای تامین اهداف مورد نظر را در طول دوره آماری ۴۸ ساله آبدهی کاهش دهد. معیارهای ارزیابی الگوریتم بهینه ساز شامل شاخص متوسط فاصله بین نقاط و انحراف معیار نقاط جبهه نامغلوب می باشند که با توجه به محاسبات انجام شده مقادیر هر یک به ترتیب معادل ۰/۳۵۷ و ۰/۰۱۱۱ به دست آمد. این نتایج بیانگر کارایی مؤثر این الگوریتم در به دست آوردن جبهه جواب نامغلوب می باشد. همچنین الگوریتم‌های چند هدفه، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه را به جای یک جواب در اختیار کاربر قرار می‌دهند، بنابراین به سهولت تصمیم‌گیری در مورد نحوه تأمین آب اهداف متضاد کشاورزی و زیست محیطی در شرایط مختلف و پیچیده بهره برداری از جمله شرایط خشکسالی کمک می‌نماید.

کلید واژه ها : سیستم چند مخزنه و چند منظوره، الگوریتم بهینه ساز ژنتیک چند هدفه، منحنی فرمان.

Optimization Operation from Storage Dams Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

I. Ahmadianfar¹, A. Adib^{2*}, M. Taghian³ and A. Haghghi⁴

- 1- Ph.D Student, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
 2* - Associate Professor, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
 3- Assistant Professor, Water Engineering Department, Ramin University of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz, Iran.
 4- Associate Professor, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received: 11 June 2014

Accepted: 17 April 2015

Abstract

To derive optimal operation policies from multi-reservoir systems, applying the conflict multiple goals simultaneously is very important. In order to, this paper presents a multi-objective optimization-simulation model, which is consist of agriculture and minimum flow goals in a three dam water resources system. For this purpose, a discrete hedging rule with a non-dominated sorting genetic algorithm has been coupled to minimize the modified shortage index over a series of hydrological record of 48 years. The evaluation metrics are diversity metric and standard deviation, which obtained values of each are equal to 0.357 and 0.0111 respectively. The results

احمدیان فر و همکاران: بهینه سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با...

show the efficient performance of this algorithm to obtain Pareto frontier. Also, multi-objective algorithms present a set of optimum solutions for users instead of a solution, thus it helps to make decision in supplying the conflict goals of agriculture and minimum flow in different and complicate operation conditions such as drought periods easily.

Keywords: Multi-reservoir and multi-purpose, Non-dominated sorting genetic algorithm, Rule curve.

چند مخزنه^۹ معرفی و به کار برده شده‌اند. در سال‌های اخیر استفاده از تحلیل‌های چند هدفه در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. سیستم‌های منابع آب غالباً برای تأمین چندین هدف مختلف که بعضاً برخی از آنها در تضاد با هم هستند باید مدیریت گردند. بهره‌برداری از سیستم‌های چند هدفه منابع آب، یک مسئله تصمیم‌گیری پیچیده با تعداد متغیرهای زیاد و اهداف متعدد می‌باشد که چالش‌های پیش روی تصمیم‌گیران را افزایش می‌دهد. لذا همواره به کارگیری مدل‌های نوین بهینه‌سازی با توانایی‌های متفاوت و کارآمد مورد توجه محققین در این زمینه پژوهشی بوده است. برای تأمین اهداف مختلف یک سیستم با اولویت‌های مختلف، می‌توان سیاست‌های بهره‌برداری خاصی را تعریف کرد. در اینجا ضرورت اتخاذ سیاستی واحد با قابلیت تصمیم‌گیری چند هدفه که اهداف مختلف را به صورت همزمان بهینه کند بیش از پیش نمایان می‌گردد.

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^{۱۰} (NSGA-II)، (دب و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۰، ۲۰۰۲ و دب، ۲۰۰۲)، یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چند هدفه است که کارایی بسیار بالای آن باعث شده که محققین بسیاری را به سمت خود جذب کند. کیم و همکاران^{۱۲} (۲۰۰۶)، الگوریتم NSGA-II را برای بهینه‌سازی یک سیستم چند مخزنه به کار گرفتند. آنها با در نظر گرفتن دو تابع هدف جواب‌های نامغلوب بسیار مفیدی را به دست آوردند که بیانگر کارایی بسیار بالای این الگوریتم در زمینه سیستم‌های تصمیم‌گیری چند هدفه و چند مخزنه می‌باشد. در اینجا می‌توان به تعدادی از محققین دیگر که از الگوریتم NSGA-II در مسائل بهینه‌سازی منابع آب استفاده کردند اشاره کرد، رید و همکاران^{۱۳} (۲۰۰۳)، پراساد و پارک^{۱۴} (۲۰۰۴)، کاپلان و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۵)، یانداموری و همکاران^{۱۶} (۲۰۰۶)، کومار و ردی^{۱۷} (۲۰۰۷) و شیائو^{۱۸} (۲۰۰۹). چانگ و چانگ^{۱۹} (۲۰۰۹)، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی

مقدمه

استفاده از قوانین جیره بندی^۱ در طول دوره خشکسالی یا مشرف به خشکسالی، یک روش معمول در مدیریت منابع آب است. در این روش با وجود آنکه ممکن است امکان تأمین کل نیاز میسر باشد، گاهی تنها قسمتی از آن تأمین می‌گردد. این عمل موجب ذخیره آب و پذیرش یک کمبود کوچک در بازه زمانی جاری برای کاهش کمبودهای شدید در آینده می‌شود که از لحاظ اقتصادی و اجتماعی حائز اهمیت ارزیابی شده است. در خلال دوره های خشکسالی بهره برداران بیشتر تمایل دارند به جای یک کمبود شدید فاجعه انگیز با یک دوره متوالی از کمبودهای کوچک تر مواجه شوند (لاند و رید^۲، ۱۹۹۵). در عمل با کاربرد قاعده جیره بندی، کمبود آب در افق طولانی تری توزیع گشته و راندمان بهره برداری از مخزن بهبود می‌یابد (شی و ریولی^۳، ۱۹۹۴؛ نیلاکانتان و پونداریکانتان^۴، ۲۰۰۰). یکی از سیاست‌های جیره بندی که توسط محققینی از جمله شی و ریولی (۱۹۹۵)، نیلاکانتان و پونداریکانتان (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰)، تو و همکاران^۵ (۲۰۰۳ و ۲۰۰۸) به کار گرفته شد، سیاست جیره بندی گسسته می‌باشد که در این سیاست حجم مخزن به چند منطقه تقسیم می‌شود که هر منطقه دارای یک سیاست بهره برداری با ضرایب جیره بندی متفاوت است. جوی و همکاران^۶ (۲۰۱۳) با ترکیب سیاست پارامتریک با قاعده جیره بندی گسسته برای یک سیستم چند مخزنه سعی در کاهش کمبود آب در طول دوره خشکسالی نمودند. تقیان و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از یک مدل ترکیبی بهینه‌سازی-شبهه سازی به توسعه مدل جیره بندی گسسته از طریق ترکیب آن با منحنی فرمان سنتی متداول در ایران پرداختند. در سال‌های اخیر با توجه به احداث سیستم‌های بزرگ ذخیره آب در کشورهای توسعه یافته و افزایش پروژه‌های اتمام یافته در کشورهای در حال توسعه، بیشترین تمرکز کارهای پژوهشی بر بهبود سیاست‌های بهره‌برداری و افزایش کارایی سیستم‌های موجود بوده است (لبادی^۷، ۲۰۰۴). تاکنون روش‌ها و مدل‌های ریاضی متعددی برای یافتن سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از سیستم‌ها چند هدفه^۸ و

9 - Multi Reservoir

10- Non Dominated Sorting Genetic Algorithm

11- Deb *et al.*

12 - Kim *et al.*

13 - Reed *et al.*

14 - Prasad and Park

15- Kapelan *et al.*

16- Yandamuri *et al.*

17- Kumar and Reddy

18 - Shiao

19 - Chang and Chang

1- Hedging Rule

2- Lund and Reed

3- Shiao and Lee

4- Neelakantan and Pundarikanthan

5- Tu *et al.*

6- Guo *et al.*

7- Labadie

8- Multi Objective

سازی معرفی می‌شوند. در این مطالعه نیازها در سه دسته مختلف هستند که عبارتند از نیاز کشاورزی، شرب و زیست محیطی. الگوریتم‌های تکاملی با دارا بودن مزایای خاص قادر به حل مسائل چند هدفه‌ای هستند که سایر روش‌ها از جمله روش‌های بر مبنای شبیه (روش‌های ریاضی) در حل آنها ناتوان می‌باشند. یکی از الگوریتم‌های چند هدفه پر کاربرد الگوریتم NSGA-II می‌باشد. این الگوریتم نسخه بهبود یافته الگوریتم NSGA می‌باشد که برای کاهش مشکل محاسباتی الگوریتم NSGA ایجاد شده است (دب و همکاران ۲۰۰۰). الگوریتم NSGA-II شامل پنج عملگر است که عبارتند از ایجاد جمعیت اولیه، رتبه بندی، تقاطع، جهش و فاصله ازدحامی. تفاوت اصلی بین NSGA-II و سایر الگوریتم‌های تکاملی در نحوه کارکردن عملگر انتخاب می‌باشد. در این الگوریتم دو عملگر رتبه بندی و فاصله ازدحامی^۴ به عنوان دو عملگر انتخاب استفاده می‌شوند (دب و همکاران، ۲۰۰۰).

در این الگوریتم هر راه حل که با اندیس i مشخص می‌گردد دارای دو مشخصه می‌باشد، اول رتبه غیر مغلوبی راه حل در جمعیت که در حقیقت رتبه جبهه‌ای است که جواب مربوطه در آن قرار گرفته و دوم فاصله ازدحام محلی در جمعیت (di) که بر اساس فاصله نقاط قبلی و بعدی هر جبهه و برای هر نقطه درون آن جبهه به دست می‌آید. با استفاده از این مشخصه‌ها آن راه حلی که در درجه اول رتبه غیر مغلوبی کمتری داشته باشد انتخاب می‌گردد و اگر رتبه غیر مغلوبی دو جواب با هم برابر بود آن جوابی که در تراکم کمتر جمعیتی قرار دارد برنده می‌باشد. شکل (۱) طرح شماتیک تلفیق مدل شبیه سازی و بهینه سازی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

مشخصات محدوده و اطلاعات مورد استفاده

محدوده سیستم منابع آب زهره در سه استان فارس، کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان گسترش داشته است. در این حوزه به عنوان یک دسته بندی کلی از نظر نوع مصرف می‌توان نیازهای آبی را به سه دسته کلی نیازهای شرب و صنعت، نیازهای کیفی و زیست محیطی و نیازهای کشاورزی - آبیاری تقسیم بندی نمود. در شرایط وضع آبی (افق سال ۱۴۰۰)، سیستم منابع آب زهره شامل سه گره سد مخزنی، هفت آبراهه جریان ورودی، نه گره شبکه آبیاری و حقایبه، سه آبراهه انحراف عمومی برای نیازهای شرب و صنعت، هشت گره اتصالی، دو بازه حداقل جریان و تعدادی آبراهه عمومی خواهد بود. مجموع نیازهای مذکور در وضع آبی، بالغ بر ۱۹۵۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که حدود ۱۳ درصد آن به شرب و صنعت، ۱۶ درصد به حق آبه های زیست محیطی و ۷۱ درصد به بخش کشاورزی تخصیص یافته است. آمار آبدهی ماهانه ورودی به سیستم برای دوره آماری ۴۸ ساله مد نظر قرار گرفته است. تغییرات سالانه مجموع آبدهی‌های

نامغلوب برای بهینه کردن بهره برداری از یک سیستم دو مخزنه در تابوان استفاده کردند. آنها از الگوریتم NSGA-II برای حداقل کردن شاخص کمبود در سیستمی با استراتژی بهره برداری به هم پیوسته استفاده کردند و جواب‌های بهینه صفحه پارتو^۱، بهره برداری سازشی را برای دو مخزن مورد نظرشان طوری مشخص کردند که بهبود قابل ملاحظه‌ای در بهره‌برداری از یک سیستم به هم پیوسته حاصل گردید.

در این مطالعه سعی بر گسترش یک مدل بهینه سازی چند هدفه تکاملی شده، که قادر به ارائه منحنی‌های بهره‌برداری از مخازن منابع آب (منحنی‌های فرمان^۲) با رویکرد تأمین اهداف چندگانه باشد. در این راستا با تلفیق یک مدل شبیه ساز با رویکرد جیره بندی گسسته و مدل بهینه ساز چند هدفه الگوریتم ژنتیک (NSGA-II)، سعی در حداقل کردن شاخص‌های کمبود کشاورزی و زیست محیطی سیستم چند مخزنه زهره شده است. در نهایت مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب به دست می‌آید که در اختیار بهره‌برداران قرار می‌گیرند و می‌توانند با توجه به نیاز سیستم هر کدام از این جواب‌ها را انتخاب کنند. برای بررسی کارایی و قابلیت روش به کار رفته در این مطالعه، نتایج حاصله با روش سیاست بهره برداری استاندارد^۳ (SOP) نیز مقایسه شده‌اند.

معرفی سیاست بهره‌برداری و الگوریتم NSGA-II

در طول دوره‌های خشکسالی شدید، عموماً مخازن در رها سازی دبی مطمئن خود دچار شکست می‌شوند. بنابراین، اعمال محدودیتهای آبیاری و جیره بندی برای کاهش موقت سطح نیاز و حفظ ذخیره برای دوره های آبی، یک روش معمول است. چنین کاهشی مانع از کمبودهای بزرگ تر در دوره های بعدی می‌شود. بر این اساس برای حداقل کردن اثر خشکسالی و کاهش کمبود، قاعده جیره بندی از جمله جیره بندی گسسته با استفاده از منحنی‌های فرمان کاربرد بسیاری دارد. در این مطالعه با استفاده از دو منحنی فرمان حجم مفید مخزن به سه ناحیه تقسیم می‌گردد، هرگاه حجم مخزن بالای هر دو منحنی فرمان قرار گرفت کل نیازها تأمین می‌گردد و هرگاه حجم مخزن بین آن دو قرار گرفت مرحله خفیف جیره بندی آغاز می‌گردد و در نهایت هرگاه حجم مخزن پایین تر از هر دو قرار گرفت مرحله شدیدتر جیره بندی اعمال می‌شود.

هدف از تلفیق مدل شبیه سازی و بهینه سازی در این تحقیق تعیین رقوم ماهانه منحنی فرمان برای سدهای مخزنی مورد بررسی و ضرایب جیره بندی نیازهای مختلف در سیستم است. در این شرایط رقوم ماهانه سطح آب در مخزن که معرف منحنی فرمان در هر سد می‌باشند و ضرایب کسر نیاز (جیره بندی، $(0 < \alpha_1 < \alpha_2 < 1)$) به عنوان متغیرهای تصمیم گیری بهینه

1 - Pareto Front

2 - Rule Curve

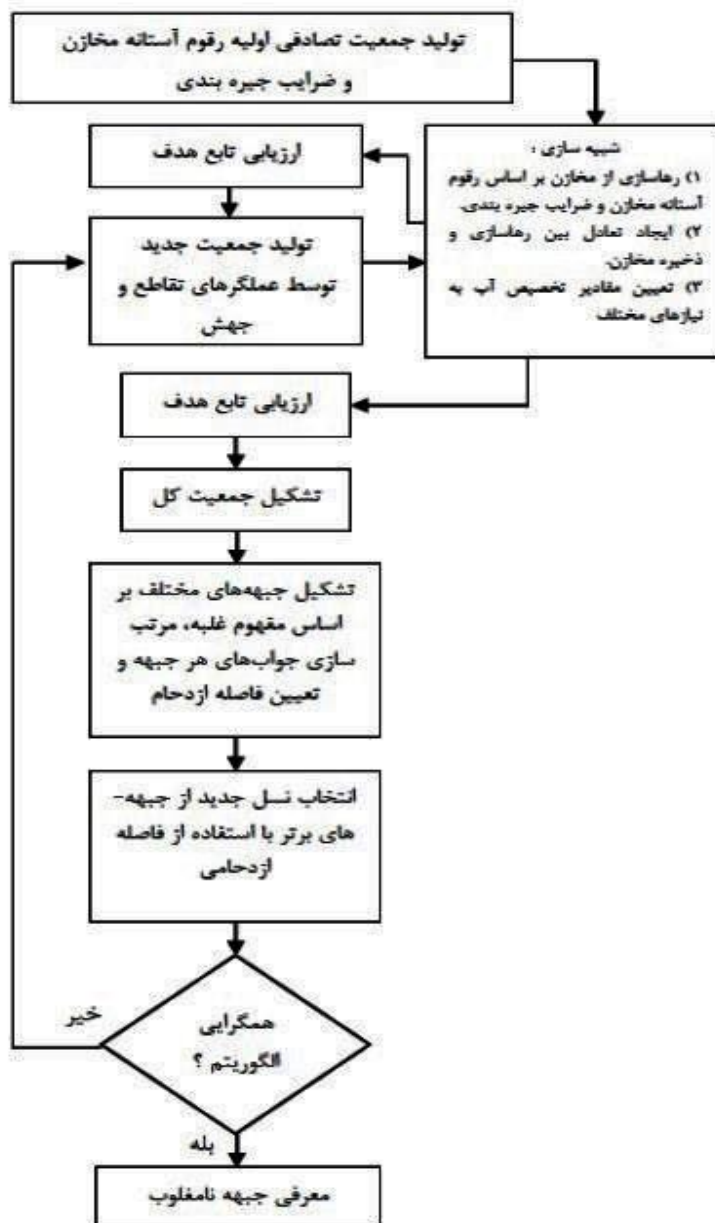
3-Standard Operation Policy

4-Crowding distance

احمدیان فر و همکاران: بهینه سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با...

سیستم در شکل (۳) نشان داده شده است. سایر اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق شامل مقادیر سطح، حجم و ارتفاع مخازن با رسوب گذاری، آب های برگشتی ماهانه از شبکه ها و تبخیر ماهانه از سطح آزاد مخازن هستند.

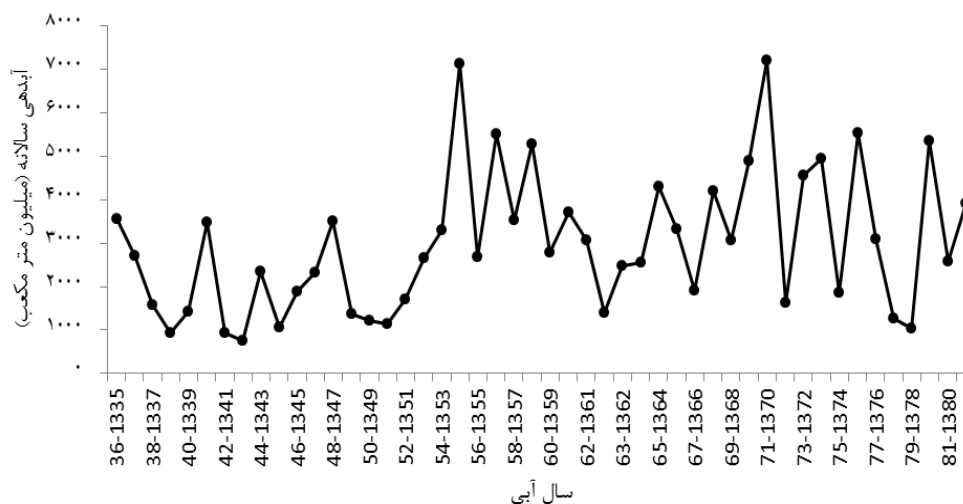
ورودی، مطابق شکل (۲) نشان داده شده است. در این آمار، دوره های خشکسالی شدید قابل ملاحظه است که برای ارزیابی جامع مدل به کار رفته در این تحقیق، حائز اهمیت می باشد. خلاصه مشخصات سدهای مخزنی در جدول (۱) و پیکربندی شماتیک



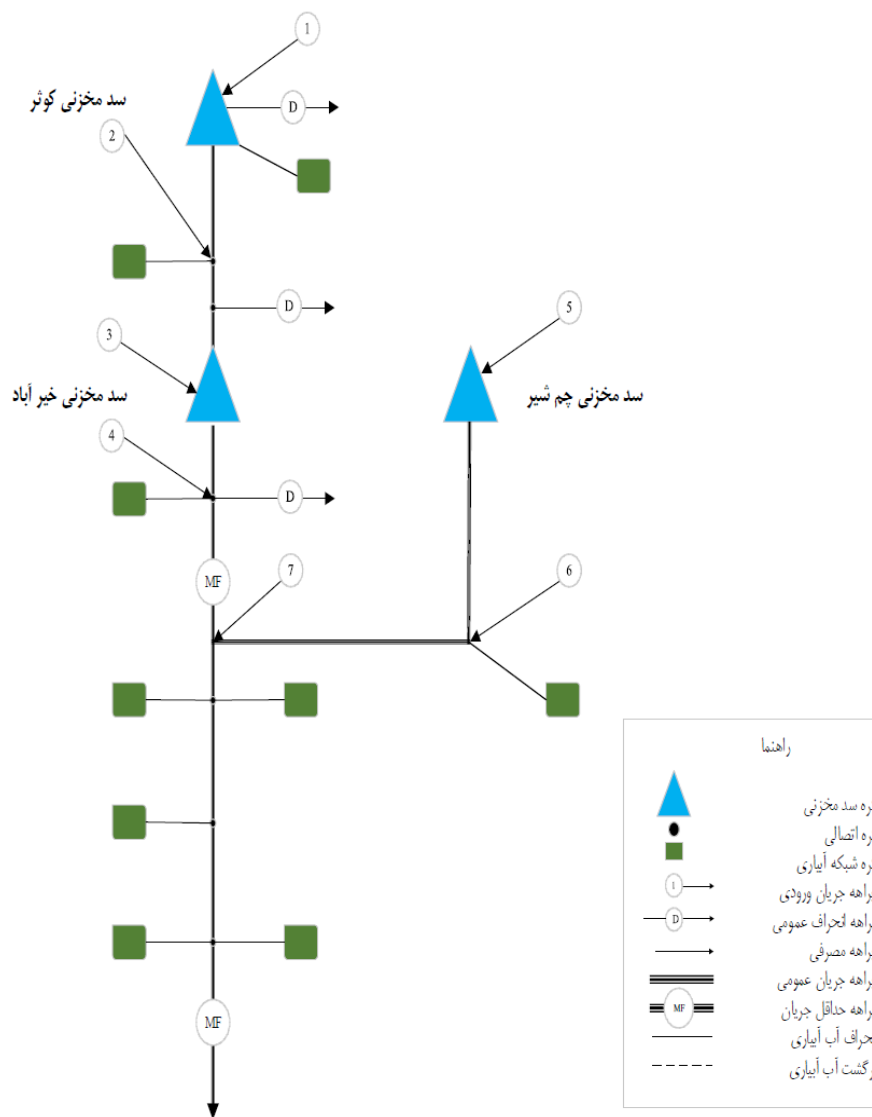
شکل ۱- تلفیق مدل شبیه ساز و بهینه ساز چند هدفه NSGA-II

جدول ۱- مشخصات سدهای مخزنی مورد بررسی

سد	رقوم نرمال	رقوم حداقل بهره برداری	حجم کل مخزن	حجم مفید مخزن
کوثر	۶۲۵	۵۸۰	۵۶۷	۴۹۲/۸
خیرآباد	۲۵۹/۶	۲۳۸	۱۰۷	۱۰۶/۳
چم شیر	۵۹۸	۵۲۰	۱۶۸۱	۱۶۲۸/۸

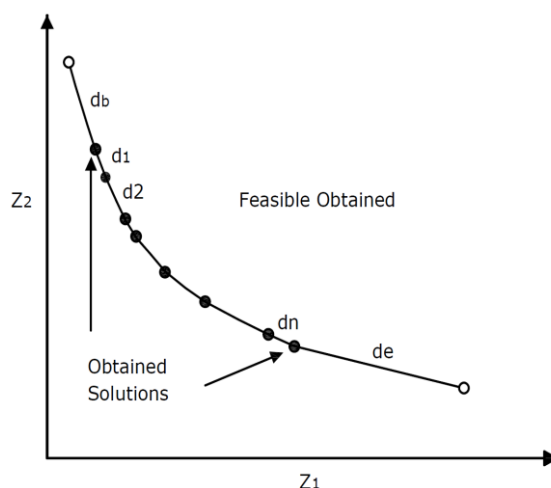


شکل ۲- تغییرات سالانه مجموع آبدهی‌های ورودی



شکل ۳- پیکربندی حوضه آبریز زهره

احمدیان فر و همکاران: بهینه سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با...



شکل ۴- نمایش پارامترهای شاخص معیار تصمیم گیری

جدول ۲- معیارهای ارزش یابی الگوریتم NSGA-II

تعداد اجرا	شاخص	معیار تصمیم گیری	انحراف معیار فواصل
۰/۰۱۳۳	۱	۰/۳۶۴	۰/۰۱۳۳
۰/۰۲۰۶	۲	۰/۳۶۶	۰/۰۲۰۶
۰/۰۱۱۱	۳	۰/۳۶۸	۰/۰۱۱۱
۰/۰۲۲۶	۴	۰/۳۶۲	۰/۰۲۲۶
۰/۰۱۱۳	۵	۰/۳۵۷	۰/۰۱۱۳

جریان ورودی اشاره شده کل نیاز شرب قابل تأمین می‌باشد و نیازی به محاسبه شاخص اصلاح کمبود برای آن نمی‌باشد. بنابراین دو تابع هدف وجود دارد که در زیر آورده شده‌اند:

$$\text{Minimize: } Z_1 = MSI_a = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{TS_t}{TD_t} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Minimize: } Z_2 = MSI_e = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{TS_t}{TD_t} \right)^2 \quad (3)$$

در روابط فوق، MSI_a و MSI_e : به ترتیب معرف شاخص اصلاح کمبود برای نیازهای کشاورزی و زیست محیطی می‌باشند. در سیستم مذکور، منحنی‌های فرمان ماهانه سدهای چم شیر، کوثر و خیرآباد شامل ۲۴ مختصات برای هر سد و همچنین ضرایب جیره بندی نیازها (دو عدد برای هر نوع نیاز) بایستی بهینه شوند و لذا تعداد متغیرهای تصمیم گیری در مسأله حاضر ۷۶ عدد می‌باشد.

تابع هدف و قیود

در مسائل بهره‌برداری مخازن، تابع هدف را می‌توان به صورت‌های مختلف تعریف کرد. در یک مسئله بهره‌برداری، هدف کمینه سازی میزان کمبود اعمال شده به یک نیاز مشخص است. برای حداقل کردن میزان و توزیع کمبود در نیازهای مصرفی می‌توان شاخص کمبود اصلاح شده سو و چنگ^۱ (۲۰۰۲) را به کار برد که توسط سایر محققین نیز بکار رفته است (چانگ و همکاران^۲، ۲۰۰۵، تو و همکاران، ۲۰۰۸):

$$MSI = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{TS_t}{TD_t} \right)^2 \quad (1)$$

در این رابطه، TS_t : میزان کل کمبود در دوره زمانی t ، TD_t : میزان کل نیاز در دوره زمانی t ، T : تعداد کل دوره‌های زمانی (ماه) و MSI : شاخص اصلاح شده کمبود است. در این مطالعه دو شاخص در نظر گرفته شده است: شاخص اصلاح شده کمبود برای نیاز کشاورزی و شاخص اصلاح شده کمبود برای نیاز زیست محیطی. قابل ذکر است که در این سیستم و با توجه به

$$d_i = \text{Min}_j \left(\sum_k^M |f_k^i(x) - f_k^j(x)| \right) \quad (7)$$

$$i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,N-1$$

که در آن $f_k^j(x)$: نشان دهنده هدف k ام نقطه j ام و M : تعداد اهداف می‌باشد. اندیس j شمارنده نقاط مجموعه به دست آمده می باشد که فاصله آنها از نقطه i ام همین مجموعه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب d_i برابر است با حداقل فاصله بین نقطه i ام و سایر نقاط. سپس با استفاده از رابطه (۸) معیار S که در واقع انحراف معیار فواصل به دست آمده می‌باشد محاسبه می‌گردد:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^P (\bar{d} - d_i)^2} \quad (8)$$

در رابطه بالا P : تعداد اعضای مجموعه به دست آمده (جبهه نامغلوب)، \bar{d} : میانگین فواصلی که با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شده است، می‌باشد. هرچه انحراف معیار فواصل کمتر باشد، توزیع مجموعه جواب به دست آمده مناسب‌تر می‌باشد. معیار پراکندگی تعریف شده در واقع مقدار پخش شدن جواب‌های به دست آمده را بیان می‌کند. در اینجا هدف رسیدن به جبهه پارتویی است که تمام ناحیه بهینه پارتو را پوشش دهند. با محاسبه فاصله بین نقاط جبهه پارتو نامغلوب و اندازه گیری متوسط آنها معیار تصمیم گیری DM^T از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$DM = \frac{d_b + d_e + \sum_{i=1}^{n-1} |d_i - \bar{d}|}{d_b + d_e + (n-1)\bar{d}} \quad (9)$$

در اینجا، پارامتر d_b و d_e : فاصله بین نقاط ابتدایی و انتهایی نقاط جبهه پارتو نامغلوب می‌باشند. n : تعداد نقاط جبهه و \bar{d} : متوسط فاصله بین نقاط است. یک توزیع مناسب، زمانی به دست می‌آید که d_i معادل با \bar{d} و $d_b = d_e = 0$ باشد. بنابراین بهترین مقدار برای معیار تصمیم گیری باتوجه به توضیحات داده شده معادل با صفر می‌باشد. در شکل (۴) پارامترهای معیار تصمیم گیری نشان داده شده اند.

نتایج و بحث

هدف از این مطالعه توسعه یک مدل شبیه سازی- بهینه سازی چند هدفه برای یک سیستم منابع آب چند مخزنه و چند هدفه می‌باشد، که در این راستا از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با

اکثر مسایل بهینه سازی مقید می‌باشند، بنابراین لازم است علاوه بر تابع هدف، قیود مسأله نیز تعریف شوند. قیود موجب می‌گردند تا برخی از جواب‌ها غیر شدنی باشند و بنابراین لازم است با اعمال مکانیزمی مطابق با روند الگوریتم ژنتیک فضای جستجو را به فضای شدنی ترغیب نمود. قیود مسأله بهره برداری ساده از مخزن به صورت رابطه پیوستگی، حداکثر و حداقل حجم مخزن تعریف می‌گردند. به طور کلی می‌توان قیود مسأله را به شکل زیر تعریف نمود:

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

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (5)$$

$$Sp_t = S_t + Q_t - S_{\max}, \quad \text{if } (S_t + Q_t > S_{\max})$$

$$Sp_t = 0, \quad \text{Otherwise} \quad (6)$$

که در روابط فوق، S_t : مقدار حجم مخزن در دوره t ، S_{t+1} : مقدار حجم مخزن در دوره $t+1$ ، Q_t : مقدار آب ورودی به مخزن در دوره زمانی t ، R_t : مقدار آب رها شده از مخزن در دوره زمانی t ، E_t : مقدار حجم تبخیر در دوره زمانی t ، Sp_t : مقدار حجم سرریز در دوره زمانی t و S_{\min} و S_{\max} : به ترتیب مقدار حجم حداقل و حداکثر ذخیره مخزن می‌باشند.

معیارهای مقایسه مجموعه جواب‌ها

در الگوریتم‌های تک هدفه بهینه سازی، مقایسه جواب‌ها از طریق تابع هدف صورت می‌گیرد، اما در الگوریتم‌های چند هدفه، چون تعداد جواب‌های ارائه شده بیش از یک می‌باشد استفاده از تابع هدف به عنوان معیار مقایسه منطقی نمی‌باشد. بر این اساس برای بررسی کارایی و سنجش الگوریتم NSGA-II چندین معیار وجود دارد که در ادامه بدان اشاره می‌گردد، در الگوریتم‌های چند هدفه مشخصاتی نظیر مجاورت مناسب مجموعه جواب‌ها با مجموعه جواب اصلی، توزیع مناسب آن‌ها و تعداد اعضای مجموعه جواب‌ها، از جمله مواردی هستند که تعیین مجموعه جواب برتر با توجه به آنها امکان پذیر می‌گردد.

اسکات^۱ (۱۹۹۵) از معیار فاصله گذاری برای اندازه‌گیری فاصله بین نقاط مجموعه جواب به دست آمده استفاده کرد. بدین ترتیب چنان چه مجموعه جواب به دست آمده دارای N نقطه باشد، فاصله نقطه i ام این مجموعه از سایر نقاط مجموعه با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید:

هدف زیست محیطی و کشاورزی صورت گرفته است ولی در نقطه انتهایی تا حد خیلی زیادی هدف زیست محیطی بهبود یافته است و هدف کشاورزی دچار کمبود زیادی شده است بدین ترتیب برای برقراری تعادل مطلوب نقطه ابتدایی انتخاب گردید. به عبارتی با وجود اینکه اولویت اول با هدف زیست محیطی است ولی هدف کشاورزی نیز نباید دچار کمبود زیادی شود.

نتایج نقطه انتخاب شده شامل :

مقادیر شاخص کمبود درازمدت برای نیازهای مختلف بر اساس کل دوره آماری مورد بررسی (جدول ۳).

مجموع مقادیر شاخص سالانه کمبود نیازهای کشاورزی و زیست محیطی که در جدول (۴) نمایش داده شده است.

منحنی فرمان بهره برداری در سدهای خیرآباد، کوثر و چم شیر بر اساس دوره درازمدت آماری، مطابق شکل های (۶)، (۷) و (۸).

ضرایب جیره بندی مطابق جدول (۵).

در جدول (۶) نتایج دو روش جیره بندی و سیاست بهره برداری استاندارد برای نشان دادن کارایی الگوریتم NSGA-II ارائه شده است. همانطور که مشخص است مقادیر شاخص کمبود به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شد. توابع هدف و قیود در نظر گرفته شده شامل رابطه های (۲) تا (۶) می باشند و مدل مورد نظر برای دوره آماری ۴۸ ساله آینده در سیستم زهره استفاده شده است. عملگرهای الگوریتم ژنتیک که در بهینه سازی این سیستم در نظر گرفته شده اند به قرار ذیل هستند: اندازه جمعیت : ۱۰۰، تعداد نسل (تعداد تکرار) ۱۰۰۰، نرخ تقاطع ۰/۸ و نرخ جهش ۰/۱-۰/۰۱ می باشد. برای نشان دادن کارایی الگوریتم NSGA-II در جدول (۲) مقادیر معیارهای معرفی شده به ازای پنج اجرای مختلف ارائه شده است.

در شکل (۵) جبهه پارتو برای توابع هدف ذکر شده ارائه شده است. در این تحقیق تأمین نیاز زیست محیطی در اولویت اول و تأمین نیاز کشاورزی در اولویت دوم قرار دارد (قابل ذکر است که نیاز شرب به طور ۱۰۰ درصد تأمین می شود). براین اساس، از بین جواب های جبهه پارتو جوابی که به این موضوع توجه داشته و توابع هدف مورد نظر را نیز تا حد امکان حداقل نماید انتخاب گردیده است. در این راستا با توجه به شکل (۵) نقطه ابتدایی با مختصات (۰/۳۱، ۴/۰۲) انتخاب گردید. با توجه با اینکه در نقطه انتهایی با مختصات (۴/۸۵، ۰/۰۵) شاخص کمبود زیست محیطی کاهش قابل ملاحظه ای داشته است و شاخص کمبود کشاورزی افزایش یافته است لذا از تحلیل آن با در نظر گرفتن هدف تحقیق صرف نظر شده است. در واقع در نقطه ابتدایی تعادل مطلوبی بین

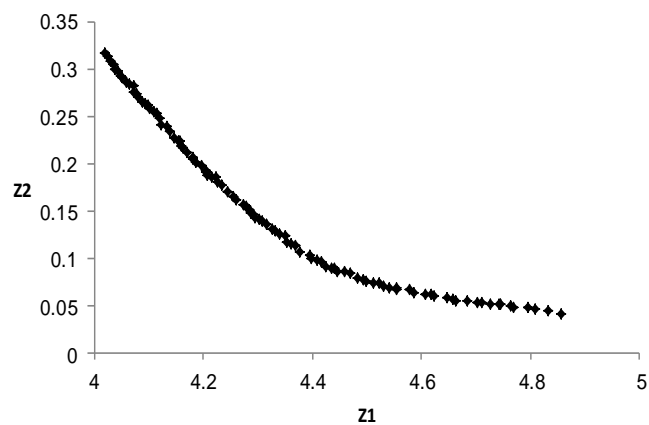
جدول ۳- مقادیر شاخص اصلاح شده کمبود درازمدت نیازهای مختلف

سال های کمبود	تابع هدف (زیست محیطی)	تابع هدف (کشاورزی)
۰	۰	۳۷
۴/۱۵	۰	۳۸
۱۲/۲۰	۰/۶۶	۳۹
۲۶/۲۰	۱/۲۳	۴۰
۴۶/۵۵	۲/۴۰	۴۱
۵۲/۴۰	۵/۱۰	۴۲
۱۹/۴۲	۴/۱۶	۴۳
۱۰/۱۸	۰/۵۲	۴۴
۷/۸۶	۰/۴۵	۴۵
۱/۹۴	۰	۴۶
۲/۹۶	۰	۴۹
۱/۳۰	۰	۵۰
۴/۲۰	۰/۱۱	۷۹
۲/۹۷	۰/۱۱	۸۰

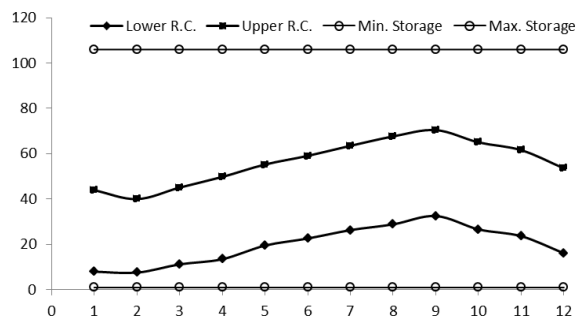
جدول ۴- مقادیر شاخص سالانه کمبود

مقادیر شاخص اصلاح کمبود (MSI)

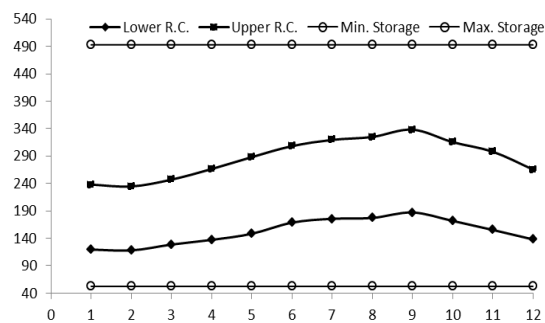
کشاورزی	زیست محیطی
۴/۰۲	۰/۳۱



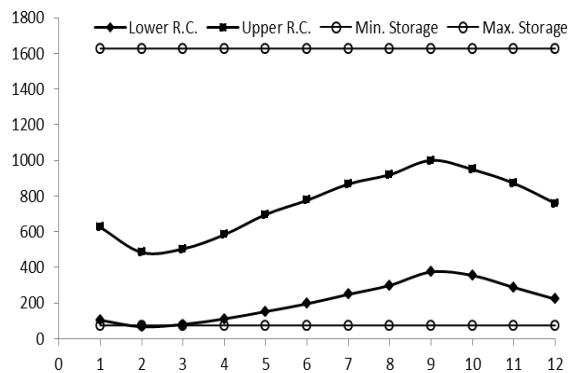
شکل ۵- جبهه پارتو بهینه به دست آمده توسط الگوریتم NSGA-II



شکل ۶- منحنی فرمان بهره‌برداری بهینه سد خیر آباد



شکل ۷- منحنی فرمان بهره‌برداری بهینه سد کوثر



شکل ۸- منحنی فرمان بهره‌برداری بهینه سد چم شیر

احمدیان فر و همکاران: بهینه سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با...

جدول ۶- مقایسه تابع هدف دو روش جیره بندی و سیاست بهره برداری استاندارد

سال‌های کمبود	۳۸	۳۹	۴۰	۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۹	۵۰	۷۹	۸۰
سیاست جیره بندی	۴/۱۵	۱۲/۸۶	۲۷/۴۳	۴۸/۹۶	۵۷/۴۹	۲۳/۵۸	۱۰/۷۰	۸/۳۰	۱/۹۴	۲/۹۶	۱/۳۰	۴/۳۱	۳/۰۸
سیاست بهره برداری استاندارد	۰	۲۷/۱۷	۵۷/۸۴	۸۶/۲۷	۹۴/۸۶	۲۴/۴۷	۱۸/۸۱	۱۷/۷۶	۰	۰	۰	۰	۵/۸۵

مرتب سازی نامغلوب استفاده شده است. برای نشان دادن قابلیت ها و کارایی سیستم بهینه ساز چندهدفه مورد نظر، سیستم سه مخزنی سدهای کوثر، خیرآباد و چم شیر بر روی رودخانه زهره مد نظر قرار گرفت. مسئله مورد نظر جزء مسائل غیر خطی با تعداد متغیرهای زیاد، کاملاً غیر محدب و پیچیده است. سیاست بهره- برداری در نظر گرفته شده در این مطالعه، سیاست بهره‌برداری با استفاده از منحنی فرمان به انضمام جیره بندی برای دوره آماری دراز مدت است. مدل توسعه یافته در این تحقیق، سعی بر یافتن یک سیاست بهینه مدیریت مخزن با اهداف کمینه کردن شاخص کمبود درازمدت مربوط به نیازهای زیست محیطی و کشاورزی دارد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب یک جبهه پارتو نامغلوب بهینه را برای اهداف فوق، ایجاد می‌کند. منحنی پارتو اطلاعات بسیار مناسبی در اختیار سیستم‌های مدیریتی پیچیده قرار می‌دهد و می‌تواند تصمیم گیرندگان را در انتخاب سیاست‌های مدیریتی مطابق با شرایط اجتماعی، اقتصادی و شرایط دیگر که تصمیم‌گیری را پیچیده و مشکل می‌کنند راهنمایی کند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب توانایی قابل قبولی برای به دست آوردن یک جبهه پارتو با پراکندگی یکنواخت و پوشش مناسب دارد. معیارهای ارزیابی این جبهه شامل شاخص معیار تصمیم‌گیری و انحراف معیار فواصل می‌باشند که با توجه به محاسبات صورت گرفته مقادیر هر کدام به ترتیب معادل ۰/۳۵۷ و ۰/۱۱۱ می‌باشند که بیانگر کارایی بسیار مناسب این الگوریتم در به دست آوردن جبهه پارتو بین توابع هدف ذکر شده می‌باشد. در نهایت جهت بررسی کارایی روش مورد مطالعه نتایج حاصل شده با نتایج به دست آمده توسط سیاست بهره برداری استاندارد که یک روش مینا برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب است نیز مقایسه شده است. مقایسه انجام شده بیانگر توانایی بالای مدل شبیه ساز- بهینه ساز چند هدفه به کار گرفته برای کاهش اثر خشکسالی می‌باشد.

شکل‌های (۴)، (۷) و (۸) در واقع بیانگر منحنی‌های فرمان بهره برداری استخراج شده از فرایند بهره برداری می‌باشند، و برای ارائه به بهره‌برداران به دست آمده‌اند، این منحنی‌ها حجم مخزن را به سه ناحیه تقسیم می‌کنند، در بالاترین سطح (بالای منحنی بالایی) میزان رهاسازی برابر نیاز می‌باشد، در بین منحنی فرمان بالایی و پایینی اولین مرحله و به عبارتی مرحله خفیف جیره بندی را بیان می‌کند، و در پایین‌ترین سطح (زیر منحنی پایینی) شدیدترین حالت جیره بندی را نشان می‌دهد. در مورد شکل (۸) که منحنی‌های فرمان سد چمشیر را نشان می‌دهد می‌توان گفت، سد چمشیر با توجه به زیاد بودن حجم مخزن آن، در واقع سهم زیادی در تأمین نیازهای پایین دست و نیازهای مشترک با سدهای دیگر دارد (نیازهای کشاورزی و زیست محیطی در پایین دست سدها)، و با توجه به اینکه در این حوضه مطالعاتی در بعضی از سال‌ها خشکسالی بسیار شدید و طولانی وجود دارد (سال ۱۳۳۸ تا ۱۳۴۵) بنا بر این در این سال‌ها حجم مخزن بسیار کم می‌باشد، بر این اساس می‌توان از قبل متصور شد که منحنی فرمان پایینی که در شرایط خشکسالی شدید وارد عمل می‌شود در بعضی از نقاط حتی با حجم حداقل مخزن برابر باشد. همچنین با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که در سال‌های (۱۳۳۸ تا ۱۳۴۵) جریان ورودی به سدها خیلی کم است و خشکسالی زیاد و طولانی مدتی وجود دارد.

نتیجه گیری

در نظر گرفتن اهداف چندگانه و متضاد در کنار یکدیگر و به صورت هم زمان، در مطالعات سیستم‌های منابع آب اهمیت بسیار بالایی دارد. الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه برای کنترل کردن چند هدف با ضرایب اهمیت متفاوت، کاربرد بسیاری دارد. از آن جا که سیستم‌های پیچیده منابع آب با چندین مخزن و اهداف متفاوت نیازمند استخراج سیاست‌های بهینه بهره برداری مناسب هستند، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با

منابع

- 1- Chang, LC. and FJ. Chang. 2009. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. Journal of Hydrology, 337(1): 12–20.

- 2- Chang, FJ., Chen, L. and LC. Chang. 2005. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes*, 19(11): 2277–2289.
- 3- Deb, K. 2002. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley and Sons Ltd. Chichester, U.K.
- 4- Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and T. Meyarivan. 2000. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective: NSGA-II. In: *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*, pp. 846–858.
- 5- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and T. Meyarivan. 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6 (2):182–197.
- 6- Guo, X., Hu, T., Zeng, X. and X. Li. 2013. Extension of parametric rule with the hedging rule for managing multi-reservoir system during droughts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 139(2): 139-148.
- 7- Hsu, NS. and KW. Cheng. 2002. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning. *Water Resource Planning and Management*, ASCE, 128(2): 102–112.
- 8- Kapelan, ZS. Savic, DA. and GA. Walters. 2005. Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty. *Water Resources Research*, 41(11):W11407.
- 9- Kim, T., Heo, JH. And CS. Jeong. 2006. Multi-reservoir system optimization in the Han river basin using multi-objective genetic algorithms. *Hydrological Processes*, 20 (9): 2057–2075.
- 10- Kumar, DN. and MJ. Reddy. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 133(3): 192–201.
- 11- Labadie, JW. 2004. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 130(2): 93–111.
- 12- Lund, JR. and RU. Reed. 1995. Drought water rationing and transferable rations. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 121(6):429–437.
- 13- Neelakantan, TR. and NV. Pundarikanthan. 1999. Hedging rule optimization for water supply reservoirs system. *Water Resource Management*, 13(6): 409–426.
- 14- Neelakantan, TR. and NV. Pundarikanthan. 2000. Neural network based simulation -optimization model for reservoir operation. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 126(2): 57–64.
- 15- Prasad, TD. and NS. Park. 2004. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 130(1): 73–82.
- 16- Reed, P., Minsker, BS. and DE. Goldberg. 2003. Simplifying multiobjective optimization: An automated design methodology for the nondominated sorted genetic algorithm-II. *Water Resources Research*, 39(7):1196.
- 17- Schott, J. 1995. *Fault tolerant design using single and multi-criteria genetic algorithm*. Master's Thesis., Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- 18- Shiao, JT. 2009. Optimization of reservoir hedging rules using multiobjective genetic algorithm. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 135(5): 355-363.
- 19- Shih, JS. and C. ReVelle. 1994. Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 120(5): 613–629.

احمدیان فر و همکاران: بهینه سازی بهره برداری از سدهای مخزنی با...

- 20-Shih, JS. and C. ReVelle. 1995. Water supply operations during drought: A discrete hedging rule. *European Journal of Operational Research*, 82(1): 163–175.
- 21-Taghian, M., Rosbjerg, D., Haghghi, A. and H. Madsen. 2014. Optimization of conventional rule curves coupled with hedging rules for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 140(5): 693-698.
- 22-Tu, MY. Hsu, NS., Tsai, FTC. and WWG. Yeh. 2008. Optimization of hedging rules for reservoir operations. *Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE*, 134(1): 3–13.
- 23-Tu, MY., Hsu, NS. and WWG. Yeh. 2003. Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. *Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE*, 129(2): 86–97.
- 25- Yandamuri, SR., Srinivasan, K. and SM. Bhallamudi. 2006. Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II. *Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE*, 132(3):133–143.