

# بهینه‌سازی چندهدفه‌ی بهره‌برداری از منابع آب به منظور تعیین نیاز اکوسیستم‌های آبی بر اساس الگوریتم‌های فراکاوشی

Original Article

زهرا گورانی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

سعید شهبانلو\* (دانشیار)

گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی برای برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح تخصیص به منابع و مصارف بالادست تالاب شادگان و تعیین نیاز اکوسیستم پایین دست بوده است. طوری که علاوه بر بهینه‌سازی درصد تأمین نیازهای حوضه در طول دوره بهره‌برداری، میزان شوری جریان ورودی به تالاب شادگان نیز کاهش یابد. ابتدا بر اساس وضع موجود، مدل تهیه شده با عنوان سناریوی مرجع برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۳۹۹ تا سال ۱۴۲۸) توسعه داده شد. برای دست‌یابی به بهترین پاسخ سیستم بر اساس معیارهای کمی و کیفی، عملکرد الگوریتم‌های MOICA و MOPSO با عنوان سناریوی بهینه مقایسه شد و نتایج نشان داد که الگوریتم MOICA، عملکرد بهتری در تأمین نیازهای مختلف و همچنین کاهش شوری جریان ورودی به تالاب شادگان نسبت به الگوریتم MOPSO دارد. با اجرای راه‌حل بهینه‌ی به دست آمده در MOICA، مقدار شوری رودخانه در محل ورودی به تالاب شادگان به خصوص در ماه‌های کم آب در حدود ۵۵٪ کاسته شده است.

واژگان کلیدی: متصل شده شبیه‌ساز - بهینه‌ساز، MOICA، MOPSO، نیاز زیست‌محیطی، تالاب شادگان.

## ۱. مقدمه و تاریخچه‌ی پژوهش

می‌شود. [۱] جهت جلوگیری از نابودی اکوسیستم، ضروری است آب رهاسازی شده از مخازن به منظور تثبیت شرایط اکولوژیکی رودخانه‌ها مدیریت شود. [۲] مفهوم جریان زیست‌محیطی برای تعریف حجم آبی که باید در یک رودخانه باقی بماند، ایجاد شده است. [۳] بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که حیات اکوسیستم‌هایی که با رودخانه در ارتباط‌اند، به صورت مشخص به رژیم جریان رودخانه بستگی دارند. [۴] تخلیه‌ی منابع آب موجود برای مصارف کشاورزی، شرب، صنعت و غیره منجر به تغییرات معناداری در رژیم جریان طبیعی و آثار منفی در زیستگاه آبزیان شده است. [۵] در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در رابطه با برنامه‌ریزی منابع آب حوضه‌ی آبریز به صورت یک‌پارچه با هدف تأمین نیاز زیست‌محیطی برای سلامت اکوسیستم و همچنین بهره‌برداری کمی - کیفی منابع آب انجام شده است. [۶-۷]

برخی از پژوهش‌های اخیر، بدون توجه به تأمین نیازهای زیست‌محیطی انجام شده است. رفیعی انزاب و همکاران (۲۰۱۶)، [۸] به منظور طراحی و بهره‌برداری از پروژه‌ی انتقال آب کارون به زهره در ایران، یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با ترکیب WEAP و الگوریتم تک‌هدفه‌ی PSO توسعه دادند. موسوی و همکاران (۲۰۱۷)، [۹] نیز برای بهره‌برداری و تخصیص آب بین حوضه‌ی بی، یک مدل شبیه‌سازی

بهره‌برداری مرسوم از مخزن، بر روی بهینه‌سازی منافع اجتماعی - اقتصادی تمرکز دارند و توجه کمی را به نیازهای اکوسیستم معطوف می‌دارند. [۱] در این بین، تالاب‌ها همواره در تأمین آب مورد نیاز دچار مشکل هستند و از آن‌جا که همیشه در پایین دست منابع آبی قرار گرفته‌اند، آن‌طور که باید به آب مورد نیاز برای ادامه‌ی حیات خود دست نمی‌یابند. بسیاری از کارشناسان زیست‌محیطی کشور، علت خشک شدن و کاهش کیفیت آب تالاب‌ها را فعالیت‌های انسانی و پدیده‌ی خشکسالی می‌دانند و در همین راستا، یکی از عوامل اصلی در تخریب تالاب‌ها، احداث سد‌هایی است که بر روی رودخانه‌ها ایجاد شده و مقدار زیادی از آب ورودی تالاب‌ها را کاهش داده‌اند. کاهش آب تالاب‌ها، غلظت آلودگی آنها را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب منجر به از بین رفتن اکوسیستم تالاب می‌شود. تغییرات جریان طبیعی آب، نقش حیاتی در حفاظت از سیستم اکولوژیکی رودخانه ایفا می‌کند و بهره‌برداری از مخازن منجر به تغییرات شدید جریان طبیعی آب و کاهش جریان در پایین دست رودخانه

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۳/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۱۶، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2020.55987.2793

## Archive of SID

و نیکولیک و سیمونویچ<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۵)<sup>[۳۱]</sup> از تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)<sup>۱۶</sup> برای تشخیص نتایج بحرانی، تخصیص اولویت‌های مرتبط و تأمین نیاز زیست‌محیطی استفاده کردند. آذری و همکاران (۲۰۱۸)، نیز از الگوریتم چندهدفه‌ی NSGA-II برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای شهدا و گواشان بر اساس قاعده‌ی جیره‌بندی با هدف تأمین نیازهای انسانی و همچنین تخصیص مناسب جریان زیست‌محیطی در رودخانه‌ی رازآور استفاده کردند.<sup>[۳۲]</sup> اعمال قواعد جیره‌بندی مخزن، یکی از راهکارهای کاهش خسارت ناشی از کمبود آب در ماه‌های خشک و تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه در ماه‌های اخیر است.<sup>[۳۳]</sup> بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد در بیشتر آنها توجه کمی به استخراج مقادیر بهینه‌ی جریان زیست‌محیطی برای اکوسیستم‌های آبی صورت گرفته و فقط بر اساس روش‌های هیدرولوژیکی یا هیدرولیکی، جریان زیست‌محیطی به صورت فصلی یا ماهیانه برآورد شده است.<sup>[۳۴-۳۵]</sup>

در پژوهش حاضر سعی شده است که با استفاده از روش بهینه‌سازی و استفاده از توابع چندهدفه، ۱۲ دبی زیست‌محیطی در ماه‌های مختلف سال به دست آید. لذا ارائه‌ی یک معیار ماهیانه‌ی تخصیص جریان زیست‌محیطی بر پایه‌ی معادلات و روابط بهینه‌سازی با توجه به منابع و مصارف منطقه، به جای روش هیدرولوژیکی تانانت (۱۹۷۶) برای بهبود وضعیت کیفی رودخانه، نوآوری پژوهش حاضر به حساب می‌آید.<sup>[۳۶]</sup> در کشورهای در حال توسعه از بین متقاضیان آب، کشاورزی بیشترین سهم را در بین مصارف دارد. با رشد جمعیت علاوه بر مصارف آبیاری، مصارف شهری و صنعتی نیز سبب رقابت بین مصرف‌کنندگان آب می‌شود و با توجه به منافع اقتصادی ناشی از بهره‌وری آب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت، وضعیت کیفی رودخانه، کم‌اهمیت یا نادیده انگاشته می‌شوند. از جمله دریاچه‌های طبیعی عظیمی که به خصوص در سال‌های اخیر در اثر این سیاست‌های نادرست در معرض آسیب جدی قرار گرفته است، تالاب شادگان است. لذا هدف دیگر پژوهش حاضر، بررسی وضع موجود منابع و مصارف در بالادست تالاب شادگان و مقایسه‌ی عملکرد دو الگوریتم چندهدفه‌ی MOPSO و MOICA در بهبود وضعیت کمی - کیفی جریان ورودی به تالاب شادگان و همچنین تأمین نیازهای بیشینه‌ی بالادست بوده است. در مدل متصل شده‌ی شبیه‌ساز - بهینه‌ساز حاضر، که به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است، اهدافی مانند بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف حوضه و کمیته‌سازی میزان تخطی از شوری مجاز رودخانه در محل ورودی به تالاب در طول دوره‌ی بهره‌برداری در مقابل هم قرار گرفته‌اند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. منطقه‌ی مطالعاتی

تالاب شادگان، یکی از تالاب‌های بزرگ ایران است، که در جنوب غربی ایران در جنوب شهر شادگان در استان خوزستان واقع شده است. قسمت اصلی جریان آب شیرین ورودی به تالاب شادگان توسط رودخانه‌ی جراحی تأمین می‌شود. رودخانه‌ی جراحی از به هم پیوستن دو رودخانه‌ی مارون و الله تشکیل شده است. بر اساس اطلاعات اخذ شده از سازمان آب و برق خوزستان، به دلیل توسعه‌ی بخش‌هایی از اراضی کشاورزی رامهرمز، رامشیر و شادگان در مجاورت سه رودخانه‌ی ذکر شده و احداث سدهای مارون و جره بر روی رودخانه‌های مارون و الله، جریان زیست‌محیطی تالاب شادگان در سال‌های اخیر رعایت نمی‌شود. همچنین تخلیه‌ی زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری در رودخانه‌ها باعث شده است تا تالاب منحصر به فرد

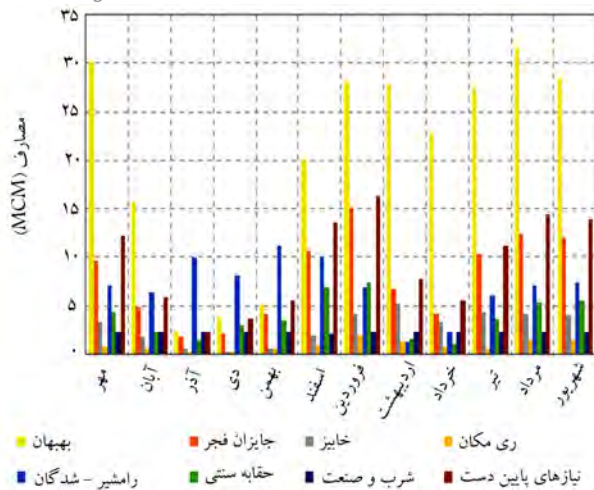
- بهینه‌سازی با ترکیب WEAP با الگوریتم چندهدفه‌ی ازدحام ذرات (MOPSO) با اهداف کمیته‌سازی اندازه‌ی زیرساخت‌های پروژه و بیشینه‌سازی قابلیت تأمین آب مورد نیاز کشاورزی ارائه دادند. همچنین مطالعات زیادی در خصوص استفاده از الگوریتم رقابت استعماری برای بهره‌برداری بهینه از مخازن برای تأمین نیازهای پایین دست انجام شده است.<sup>[۱۲-۱۳]</sup> که در آنها، به معیارها و شاخص‌های کیفیت آب به عنوان یکی از اصول پایه در برنامه‌ریزی منابع آب توجه نشده است. برخی از پژوهشگران برای رفع نقیصه‌ی اخیر، تأمین نیازهای زیست‌محیطی را به عنوان یکی از اهداف یا قیود برنامه‌ریزی در نظر گرفته‌اند. هو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، یک روش بهره‌برداری چندهدفه‌ی زیست‌محیطی<sup>۲</sup> در قالب یک مدل بهینه‌ساز ارائه دادند و به صورت کاربردی در مخزن سد سه دره به کار گرفتند.<sup>[۱۵]</sup>

به منظور ایجاد تعادل بین اهداف اکو - زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی، یک راهبرد محاسباتی توسط چن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) به صورت موردی در مخزن سد Qingshitian در جنوب غربی چین به کار گرفته شده است.<sup>[۱۶]</sup> با ایجاد یک مدل بهینه‌ساز که توسط مائو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در حوضه‌ی رودخانه‌ی یانگ تسه به کار گرفته شد، هم نیاز انسانی (اجتماعی - اقتصادی) و هم نیاز زیست‌محیطی دریاچه‌ی Dongting لحاظ شد. پس از ساختن و بهره‌برداری از سدهای سه دره و گزوبو<sup>۵</sup> (حوضه‌ی روخانه‌ی یانگ تسه)، آثار آنها بر تحولات هیدرولوژیکی در میانه و پایین دست رودخانه‌ی یانگ مورد توجه زیاد است، تعادل بین نیازهای جریان زیست‌محیطی و انسانی یکی از مهم‌ترین مسائل است.<sup>[۱۷]</sup> کای<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ی بی به آثار ساخت و بهره‌برداری از سدهای سه دره و گزوبو در تحولات هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در میانه و پایین دست رودخانه‌ی یانگ توجه نشان دادند.<sup>[۱۸]</sup>

همچنین چن و همکاران (۲۰۱۲)، یک مدل تک‌هدفه که نیازهای آبیاری، کشتیرانی و تأمین شرب را در نظر می‌گرفت، ایجاد کردند که نتیجه‌ی حل مدل مذکور، دستیابی به منفعت مطلوب اجتماعی - اقتصادی به همراه تغییر قابل قبول در جریان رودخانه بوده است.<sup>[۱۹]</sup> وانگ و لو<sup>۷</sup> (۲۰۰۹) از مدل‌های تخمین کمی برای محاسبه‌ی نیاز آب اکولوژیکی EWU<sup>۸</sup> در مقیاس حوضه و همچنین برآورد میزان آب مورد نیاز برای احیاء سطح آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند.<sup>[۲۰]</sup>

سوئن و اهت<sup>۹</sup> (۲۰۰۶) برای ایجاد تعادل بین اکوسیستم و نیازهای انسانی و مدیریت مخزن Shihmen از الگوریتم NSGA-II بهره برده‌اند.<sup>[۲۱]</sup> شیائو و وو<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۷) در پژوهشی که برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی ایجاد شده توسط انحرافات جریان به صورت موردی در تایوان برای سرریز انحرافی Kaoping انجام شد، از روش برنامه‌ریزی سازگار برای تعیین جریان درون رودخانه‌ی استفاده کردند.<sup>[۲۲]</sup> کاردول<sup>۱۱</sup> و همکاران (۱۹۹۶) از چند سناریوی کمیته‌ی جریان ماهیانه برای مطالعه‌ی بین ظرفیت جمعیت ماهی‌ها و مقادیر کمبود آب انسانی استفاده کردند.<sup>[۲۳]</sup> شیائو و وو (۲۰۰۴) از روش RVA<sup>۱۲</sup> برای بررسی آثار هیدرولوژیکی سرریز انحرافی در تایوان استفاده و بر روی تبادل بین تغییرات شاخص هیدرولوژیکی و نیازهای آب انسانی به منظور بهبود زندگی طبیعی گیاهان و جانوران رودخانه تمرکز کردند.<sup>[۲۴]</sup> هما و همکاران (۲۰۰۵)، نیز یک مدل بهینه‌سازی برای جستجوی یک راه حل تبدالی بین منافع اجتماعی - اقتصادی و ابقای جریان طبیعی ایجاد کردند.<sup>[۲۵]</sup> همچنین برخی دیگر از پژوهشگران،<sup>[۲۶-۲۸]</sup> با به کارگیری هیدروگراف اکولوژیکی، که نمایانگر نیاز جریان روانه برای حفاظت از زیستگاه ماهی مورد نظر بوده است، از آن به عنوان یک قید در مدل بهره‌برداری استفاده کردند.

تیسدل<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۰)، هم‌گزینه‌های مدیریتی برای تجدید رژیم جریان زیست‌محیطی در حوضه‌ی Murrumbidgee را مقایسه کرد.<sup>[۲۹]</sup> لو<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴)<sup>[۳۰]</sup>



شکل ۲. متوسط نیاز آبی مصارف مختلف در بالادست تالاب شادگان بر حسب میلیون مترمکعب (MCM) در ماه.

ماهانه‌ی هر یک از مصارف شهری و کشاورزی در محدوده‌ی مطالعاتی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

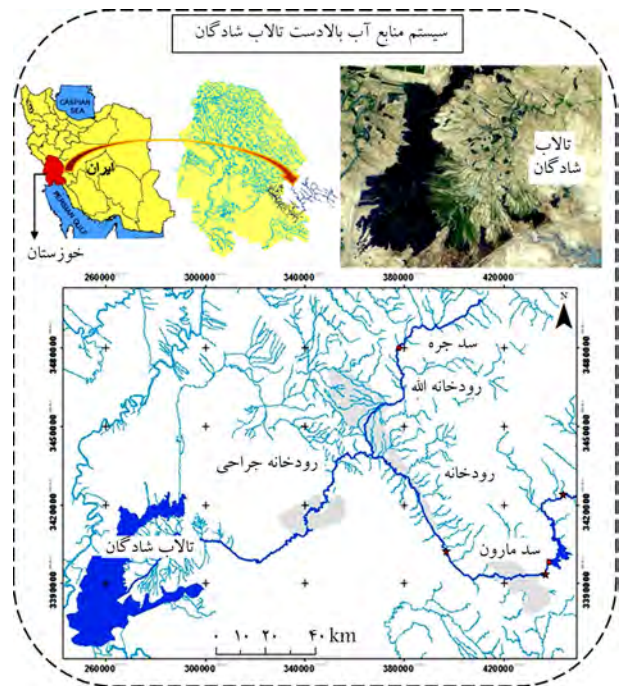
اطلاعات دیگری مانند ایستگاه‌های هیدرومتری، داده‌های مورد نیاز شامل منحنی سطح - حجم - ارتفاع مخازن، تبخیر از مخزن، بارش، حجم مرده و مفید مخازن، تراز نرمال، تراز بیشینه‌ی بهره‌برداری و داده‌های شوری نقاط برگشت آب شرب و کشاورزی در مدل تعریف شده‌اند.

### ۳.۲. تدوین سناریوها

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی وضعیت کمی - کیفی آب رودخانه‌ها به خصوص در محل تخلیه به تالاب شادگان، دو سناریو در نظر گرفته شده است. سناریوی اول با فرض ادامه‌ی وضع موجود بهره‌برداری در طول دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی آتی (سناریوی مرجع) در نظر گرفته شد. سناریوی دوم با عنوان سناریوی بهینه برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سد و رودخانه تعریف شده است، که در آن با اتصال مدل شبیه‌ساز به بدنه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌ساز MOICA و MOPSO سعی شد برای بهبود وضعیت کمی - کیفی رودخانه‌ها در بالادست تالاب شادگان، در ماه‌های مختلف جریان زیست‌محیطی بهینه، که باید برای تالاب شادگان رهاسازی شود، محاسبه و بهترین الگوریتم از بین دو سناریوی اخیر معرفی شود. در نهایت، نتایج حاصل از سناریوی دوم با سناریوی مرجع مقایسه و ارزیابی شده است.

### ۴.۲. بهینه‌سازی سیستم

در پژوهش حاضر، از الگوریتم‌های چندهدفه‌ی MOICA و MOPSO به دلیل داشتن توانایی در حل مسائل پیچیده و ارائه‌ی منحنی تبادل بهینه بین اهداف استفاده شده است. الگوریتم‌های ذکر شده به راحتی می‌توانند مسائلی که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌کنند، یا فضای تصمیم موجه یک‌پارچه‌ی ندارند و یا توابع هدف آنها که پارامترهای تصادفی دارند، را حل کنند. در هر تکرار از الگوریتم‌های MOICA و MOPSO، بهترین جواب‌ها بر اساس ارزش‌گذاری توابع هدف انتخاب و با عنوان مجموعه‌ی ذخیره‌ی بهینه جهت انتقال به مرحله‌ی بعد ذخیره می‌شوند. نقاط ترسیم شده در گراف پارتو همان جواب‌های بهینه‌ی مدل در آخرین تکرار الگوریتم است و محورهای گراف پارتو، توابع هدف مورد نظر هستند.



شکل ۱. موقعیت محدوده‌ی مطالعاتی، سدها، رودخانه‌ها و مصارف بالادست تالاب شادگان.

شادگان در وضعیت بحرانی قرار گیرد. موقعیت رودخانه‌ها، سدها و مصارف موجود در بالادست تالاب شادگان در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

### ۲.۲. مدل شبیه‌سازی آب سطحی

در پژوهش حاضر، از مدل ویپ<sup>۱۷</sup> به عنوان ابزار تحلیلی با قابلیت ارزیابی و مدل‌سازی منابع و مصارف مختلف برای اعمال سناریوهای مدیریتی استفاده شده است.<sup>[۲۷]</sup> پس از ورود اطلاعات منابع و مصارف به مدل به منظور واسنجی و صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی آینده، مدل در بازه‌ی ۵ ساله (۳ سال کالیبراسیون و ۲ سال واسنجی) از مهرماه سال ۱۳۹۱ تا شهریور ۱۳۹۶ اجرا و واسنجی و صحت‌سنجی شد. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی کمی و کیفی مدل از آمار و اطلاعات مربوط به حجم ذخیره‌ی مشاهداتی مخزن سدهای مارون و جرّه و همچنین اطلاعات کمی و کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری چم نظام و جوکنک واقع بر رودخانه‌های مارون و الله استفاده شده است. سپس دوره‌ی شبیه‌سازی ۳۰ ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفته شد. فرایند شبیه‌سازی با تعریف مسئله، معرفی محدوده‌ی مطالعاتی، رودخانه‌ها و سدها، تعیین محل‌های مصرف و منابع آب سطحی و زیرزمینی صورت گرفت. همچنین اطلاعات مربوط به مقدار شوری زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری، که در رودخانه‌ها تخلیه می‌شدند، در مدل وارد شد. از داده‌های ایستگاه ایدنک واقع در بالادست سد به عنوان جریان ورودی به سد مارون استفاده شد. منبع تأمین آب زیرزمینی در سیستم چاه‌های بهره‌برداری موجود در دشت‌های بهبهان شمال و بهبهان جنوب و دشت جازران - فجر بوده است، که در سیستم با عنوان گره‌های آب زیرزمینی به عنوان منبع تأمین آب دوم تعریف شده‌اند. در هر دو سناریو، مقدار آب برگشتی شرب و کشاورزی بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از اداره‌ی آب و فاضلاب و سازمان آب و برق خوزستان به ترتیب به میزان ۸۳ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. مقدار نیاز

۱.۴.۲. الگوریتم چندهدفه‌ی ازدحام ذرات (MOPSO)

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) <sup>۱۸</sup>، یکی از روش‌های الگوریتم‌های هوش جمعی <sup>۱۹</sup> است، که برای حل مسائل تک‌هدفه، در سال ۱۹۵۵ توسط کندی و ابرهارت <sup>۲۰</sup> معرفی شده است. در الگوریتم PSO، هر جواب به صورت یک ذره در نظر گرفته می‌شود، که با توجه به سرعت‌های هر ذره و مجموعه در فضای تصمیم، به سمت نقطه‌ی بهینه حرکت می‌کند و در محیط مسئله در حال جست و جو است. حرکت هر ذره در فرایند اخیر، تحت تأثیر سه عامل موقعیت کنونی ذره، بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن رسیده است (Pbest) و بهترین موقعیتی که بهترین عضو مجموعه تاکنون به آن رسیده (Gbest) است. در هر تکرار متناظر با هر ذره، یک تابع هدف محاسبه می‌شود. در تکرار اول، موقعیت اولیه‌ی هر ذره به عنوان Pbest و ذره‌ی متناظر با بهترین مقدار تابع هدف، به عنوان Gbest انتخاب می‌شود. در تکرارهای بعدی، چنانچه مقدار تابع هدف جدید هر ذره بهتر از مقدار قبلی باشد، موقعیت ذره‌ی جدید به عنوان Pbest انتخاب خواهد شد و در غیر این صورت موقعیت ذره در تکرار قبلی به عنوان Pbest شناخته می‌شود. در مورد Gbest نیز محاسبه‌ی مشابهی صورت می‌گیرد، با این تفاوت که این بار مقایسه بین کلیه‌ی ذرات مجموعه در کل تکرارها انجام خواهد شد. در فرایند تکاملی این الگوریتم، هر ذره رفتار اجتماعی خود را با توجه به رفتار سایر ذرات تکامل می‌بخشد و به سوی مقصد بهینه حرکت می‌کند.

شکل اولیه‌ی الگوریتم PSO، که در سال ۱۹۹۷ توسط کندی و ابرهارت استفاده شده است، مطابق روابط ۱ و ۲ است. اگر در یک مسئله‌ی D بعدی، موقعیت i امین ذره‌ی جمعیت با  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$  در نظر گرفته شود، سرعت ذره‌ی مذکور با  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$  و شماره با n نشان داده شود، آن‌گاه روابط ۱ و ۲ را خواهیم داشت:

$$V_{id}^{n+1} = V_{id}^n + c_1 r_1^n (pbest_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 r_2^n (gbest_{id}^n - X_{id}^n) \quad (۱)$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^n \quad (۲)$$

شی و ابرهارت (۱۹۹۸) نیز برای بهبود در هم‌گرایی الگوریتم PSO، روابط اخیر را به شکل روابط ۳ و ۴ تغییر دادند:

$$V_{id}^{n+1} = \chi [w \cdot V_{id}^n + c_1 r_1^n (pbest_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 r_2^n (gbest_{id}^n - X_{id}^n)] \quad (۳)$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^n \quad (۴)$$

که در آن، پارامتر  $\chi$ ، به نام ثابت انقباض و برای کنترل اندازه‌ی سرعت است، به طوری که مقادیر بزرگ آن باعث افزایش فضای تصمیم خواهد شد و بالعکس.  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب ثابت و مثبتی هستند که عامل وزنی نام دارند و معمولاً بین بازه‌ی ۱/۵ تا ۲/۵ در نظر گرفته می‌شوند. هر چه مقدار ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  بزرگ‌تر باشد، سرعت همگرایی افزایش خواهد یافت و بالعکس.  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی (۰، ۱) هستند. پارامتر  $w$ ، وزن اینرسی نامیده می‌شود که برای کنترل تأثیر سرعت‌های قبلی در همگرایی الگوریتم است و تعادلی بین مقادیر بهینه‌ی کلی و محلی برقرار می‌کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت همگرایی، شدیداً به پارامتر  $w$  بستگی دارد و هر چه پارامتر  $w$  مقدار بیشتری داشته باشد، جستجوی کلی افزایش می‌یابد و از طرفی با کاهش مقدار آن، میزان جستجوی محلی افزایش می‌یابد. مقدار

w در هر تکرار طبق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{Iter_{max}} \quad (۵)$$

که در آن،  $w_{max}$  وزن اینرسی در ابتدای جستجو،  $w_{min}$  وزن اینرسی در انتهای جستجو، n شماره‌ی تکرار فعلی و  $Iter_{max}$  تعداد کل تکرارهاست. همچنین برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم PSO، لازم است مقدار نهایی سرعت ذره به بازه‌ی  $[-V_{max}, V_{max}]$  محدود شود. بعدها الگوریتم MOPSO بر اساس ساختار تک‌هدفه‌ی آن توسعه پیدا کرده است.

۲.۴.۲. الگوریتم چندهدفه‌ی رقابت استعماری (MOICA)

الگوریتم رقابت استعماری توسط آتش‌پزگرگری و لاکس <sup>۲۱</sup> (۲۰۰۷) به عنوان یک الگوریتم جدید معرفی شد. <sup>[۲۸]</sup> الگوریتم رقابت استعماری، یک الگوریتم فراکاشی است که بر اساس تکامل اجتماعی، سیاسی و اقتصادی کشورها، فرایندهایی را به صورت مدون و مرتب ارائه می‌دهد و به کمک آن مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی را در زمینه‌های مختلف از جمله بهینه‌سازی مخزن حل می‌کند. پایه‌های اصلی الگوریتم رقابت استعماری را سیاست همسان‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب تشکیل می‌دهند. <sup>[۹]</sup>

در مسائل بهینه‌سازی، هدف یافتن جواب‌های بهینه بر حسب متغیرهای مسئله است. بنابراین یک آرایه از متغیرهای مسئله که باید بهینه شود، ایجاد می‌شود. در الگوریتم رقابت استعماری، آرایه‌ی مذکور، یک کشور <sup>۲۲</sup> نامیده می‌شود. در مسئله‌ی بهینه‌سازی، Nvar بُعدی یک کشور، یک آرایه‌ی  $1 \times N_{var}$  است، که به صورت رابطه‌ی ۶ است:

$$country = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}] \quad (۶)$$

مقادیر متغیرها در یک کشور، به صورت اعداد اعشاری نمایش داده می‌شوند. هزینه‌ی هر کشور با محاسبه‌ی تابع هزینه‌ها برای متغیرهای  $[p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}]$  مطابق رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$cost_i = f(country_i) = f(p_1, p_2, \dots, p_{N_{var}}) \quad (۷)$$

برای شروع الگوریتم لازم است تعدادی کشور اولیه ایجاد شود (Ncountry). سپس تعدادی از بهترین اعضاء این جمعیت (کشورهای با کمترین مقدار تابع هزینه از لحاظ سیاسی، اقتصادی، فرهنگی و ...) به عنوان امپریالیست انتخاب می‌شود ( $N_{imp}$ ). بقیه‌ی کشورها مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند.

هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی حذف خواهد شد. این حذف شدن به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد. بدین معنی که به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف مستعمرات خود را از دست می‌دهند و امپراطوری‌های قوی‌تر، مستعمرات مذکور را تصاحب می‌کنند و بر قدرت خویش می‌افزایند. در الگوریتم رقابت استعماری، امپراطوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراطوری موجود است. بدین ترتیب در تکرار الگوریتم، یکی یا چند مورد از ضعیف‌ترین مستعمرات، ضعیف‌ترین امپراطوری را برداشته و برای تصاحب مستعمرات اخیر، رقابتی میان کلیه‌ی امپراطوری‌های ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که مستعمرات مذکور لزوماً توسط قوی‌ترین امپراطوری تصاحب نخواهند شد، بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر، احتمال تصاحب بیشتری دارند. برای نشان دادن رقابت میان امپراطوری‌های برای جذب مستعمرات مذکور، ابتدا

به دلیل این که الگوریتم بهینه سازی استفاده شده به دنبال کمیته سازی توابع هدف است، می توان تابع اخیر را به صورت رابطه ی ۱۴ تعریف کرد:

$$F_1 = \text{Minimize} \left( \sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (1 - COV_{zdt}) \right) =$$

$$\text{Minimize} \left( \sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n \left( 1 - \frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}} \right) \right) z \quad (14)$$

که در آن،

$COV_{zdt}$ : درصد تأمین نیاز d در دوره ی t در منطقه ی z به صورت اعشاری؛  
 $TDW_{zdt}$ : حجم کل آب تحویلی به نیاز d در دوره ی t در منطقه ی z؛  
 $MD_{zdt}$ : حجم کل آب مورد نیاز، نیاز d در دوره ی t در منطقه ی z.

۲- کمیته سازی میزان تخطی از مقدار مجاز شوری در رودخانه در طول دوره ی بهره برداری رابطه ی ۱۵:

$$F_2 = \text{Minimize} \left( \sum_{t=1}^n \sum_{p=1}^q \sum_{r=1}^{nr} \left( \frac{EC_{tpr} - \text{Accepted } EC_p}{\text{Accepted } EC_p} \right) \right) \quad (15)$$

که در آن،

$EC_{tpr}$ : مقدار پارامتر EC در هر نقطه ی p در هر دوره ی t در رودخانه ی r؛  
 $\text{Accepted } EC_p$ : مقدار EC مجاز مطابق با استانداردهای موجود؛  
 n: تعداد دوره های زمانی برنامه ریزی؛  
 q: تعداد نقاط بهره برداری در طول رودخانه؛  
 nr: تعداد رودخانه ها. محدودیت ها:  
 محدودیت ها عبارت اند از:

$$TDW_{zdt} = SW_{zdt} + GW_{zdt} \quad (16)$$

که در آن،

$SW_{zdt}$ : حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به نیاز d در دوره ی t در منطقه ی z؛  
 $GW_{zdt}$ : حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به نیاز d در دوره ی t در منطقه ی z.

$$TSW_t = SW_B + SW_{JF} + SW_{DI} + SW_{WRU} + SW_R + SW_{ADD} + SW_{WRD} + SW_{MIN} \quad (17)$$

که در آن،

$TSW_t$ : کل آب سطحی مورد نیاز؛  
 $SW_B$ : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی بهیهان؛  
 $SW_{JF}$ : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی جایزان - فجر؛  
 $SW_{DI}$ : کل آب سطحی برداشت شده برای نیاز شرب و صنعت؛  
 $SW_{WRU}$ : کل آب سطحی برداشت شده برای حقایب سستی بالادست؛  
 $SW_R$ : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی رامهرمز؛  
 $SW_{ADD}$ : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی کشاورزی پایین دست (ری مکان - خاییز - رامشیر و شادگان)؛

احتمال تصاحب هر امپراطوری با توجه به هزینه ی کل نرمال شده ی امپراطوری به صورت رابطه ی ۸ محاسبه می شود:

$$N.T.c_n = T.c_n - \max \{T.c_i\} \quad (8)$$

پس از به دست آوردن هزینه ی کل نرمالیزه شده برای امپراطوری، احتمال تصاحب مستعمره توسط امپراطوری از رابطه ی ۹ به دست می آید:

$$P_{pn} = \left| \frac{N.T.c_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.c_n} \right| \quad (9)$$

برای آن که مستعمرات به صورت تصادفی و با احتمال وابسته به قدرت تصاحب هر امپراطوری بین امپراطوری های تقسیم شوند، باید بردار P به صورت رابطه ی ۱۰ تشکیل شود:

$$P = [P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pN_{imp}}] \quad (10)$$

بردار R، که دارای آرایه هایی با اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت و هم بعد با بردار P در بازه ی [۰ و ۱] تشکیل می شود، مطابق رابطه ی ۱۱ است:

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_{N_{imp}}] \quad (11)$$

بردار D، که از تفاضل بردارهای P و R به دست می آید، به صورت رابطه ی ۱۲ است:

$$D = P - R = [P_{p1} - r_1, \dots, P_{pN_{imp}} - r_{N_{imp}}] \quad (12)$$

پس از محاسبه ی بردار D، مستعمراتی به امپراطوری داده می شوند که اندیس مربوط به آن از بقیه بزرگ تر باشد. در جریان رقابت های استعماری امپراطوری های ضعیف به تدریج سقوط می کنند و مستعمرات شان به دست امپراطوری های قوی تر می افتند. شرط های گوناگونی برای افول یک امپراطوری وجود دارد. مثلاً یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. الگوریتم مورد نظر تا فراهم شدن شرایط مورد نظر و یا به اندازه ی تعداد تکرارهای معین تا رسیدن به جواب بهینه ی نهایی ادامه خواهد یافت. الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه (MOICA) که در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است، توسط عنایتی فر و همکاران (۲۰۱۳) [۲۳] توسعه داده شده است.

### ۳.۴.۲. توابع هدف و قیود مدل بهینه سازی پیشنهادی

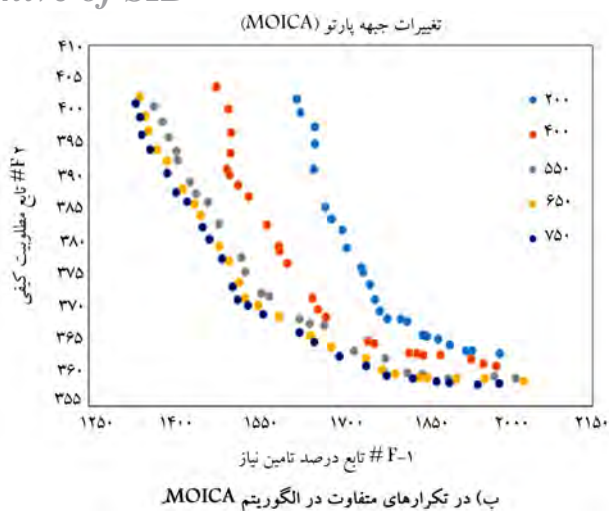
در فرایند بهینه سازی دو تابع هدف، شامل بیشینه سازی درصد تأمین نیازهای طرح و کمیته سازی میزان تخطی از مقدار مجاز شوری در رودخانه در طول دوره ی بهره برداری در مقابل هم قرار گرفتند. جهت بهره برداری بهینه از کل سیستم با توجه به اهداف پیش رو، میزان رهاسازی آب از کل سیستم جهت مصارف زیست محیطی تالاب شادگان در هر ماه (۱۲ متغیر) به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. توابع هدف و قیود در مدل شبیه ساز - بهینه ساز به صورت روابط ۱۳ الی ۱۸ تعریف شده اند:

توابع هدف:

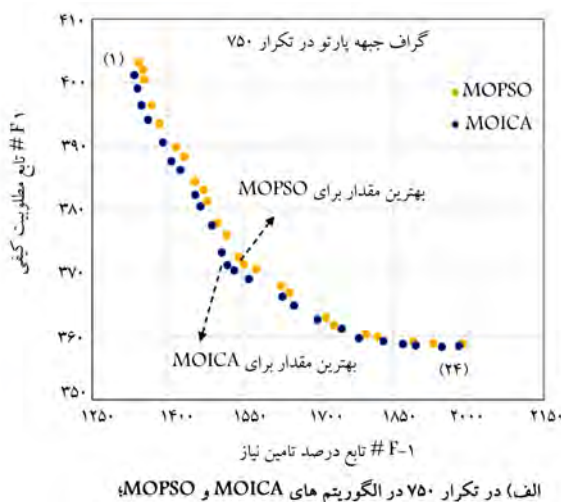
۱- بیشینه سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف در ماه های مختلف رابطه ی ۱۳:

$$F_1 = \text{Maximize} \left( \sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (COV_{zdt}) \right) =$$

$$\text{Maximize} \left( \sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n \left( \frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}} \right) \right) \quad (13)$$



شکل ۳. ب) در تکرارهای متفاوت در الگوریتم MOICA



شکل ۳. الف) در تکرار ۷۵۰ در الگوریتم های MOIPSO و MOICA

شکل ۳. منحنی تبادل بهینه بین اهداف بهینه‌سازی (منحنی پارتو).

تابع بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز مصارف در طی دوره برنامه‌ریزی و کمینه‌سازی تخطی از مقادیر مجاز شوری در طول دوره بهره‌برداری در طول رودخانه‌ها) به دست آمد. منحنی پارتو بر اساس مجموعه‌ی ۲۴ جواب بهینه در آخرین تکرار الگوریتم های MOIPSO و MOICA در شکل ۳ مشاهده می‌شود، که مطابق آن در شکل ۳ - a، الگوریتم MOICA عملکرد بهتری نسبت به MOIPSO دارد و مجموعه جواب بهتری در آخرین تکرار الگوریتم ارائه می‌دهد. از بین ۲۴ جواب به دست آمده در جبهه‌ی پارتو در آخرین تکرار الگوریتم های MOIPSO و MOICA، با توجه به ارزش‌گذاری توابع هدف، به ترتیب جواب‌های ۱۴ و ۱۲، بهترین عملکرد را نسبت به سایر جواب‌ها داشته و به عنوان جواب برتر انتخاب شده‌اند. شکل مذکور نشان می‌دهد بر اساس توابع هدف F1 و F2 (معادلات ۱۴ و ۱۵) جواب شماره‌ی ۱۲ نسبت به جواب ۱۴، نتایج بهتری از نظر تأمین نیازهای کمی و کیفی سیستم ارائه می‌دهد. لذا الگوریتم MOICA به عنوان الگوریتم برتر برای توسعه‌ی مدل متصل شده‌ی شبیه‌ساز - بهینه‌ساز در پژوهش حاضر انتخاب شده است، که در ادامه نتایج حاصل از اجرای آن نسبت به سناریوی مرجع ارائه شده است.

متغیرهای بهینه (مقادیر جریان زیست‌محیطی بهینه در پایین دست رودخانه‌ی جراحی) حاصل از پاسخ شماره‌ی ۱۲ حاصل از الگوریتم MOICA در مدل آب سطحی WEAP وارد و نتایج حاصل از آن بررسی شده است. در ادامه، نتایج حاصل از اجرای این پاسخ بر کل سیستم با عنوان سناریوی بهینه‌ارزایی و با سناریوی رفرنس مقایسه شده است. در شکل ۴، مقادیر بهینه‌ی جریان زیست‌محیطی ماهیانه‌ی رودخانه‌ی جراحی قبل از ورودی به تالاب شادگان مشاهده می‌شود. در شکل ۵، مقدار اطمینان‌پذیری و در شکل ۶، درصد تأمین نیاز هر کدام از مصارف در سناریوهای رفرنس و بهینه مشاهده می‌شود. مطابق با شکل ۵، کمترین مقدار اطمینان‌پذیری مربوط به مصارف Agri#1 و Agri#2 است، که در سناریوهای رفرنس و بهینه به ترتیب در حدود ۹۳/۶ و ۹۱/۱ درصد بوده است. علت این‌که میزان اطمینان‌پذیری نیازها در سناریوی بهینه تا حدودی کمتر شده است، این است که با توجه به چندهدفه بودن تابع هدف در الگوریتم بهینه‌ساز، مقداری از جریان رودخانه برای کاستن از غلظت شوری در طول رودخانه به جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته است. با توجه به اولویت اول جریان زیست‌محیطی نسبت به سایر نیازها، هیچ‌کدام از مصارف دیگر اجازه‌ی برداشت این مقدار دبی را ندارند. از طرفی با توجه به این‌که تابع هدف دوم الگوریتم، بیشینه‌سازی درصد

کل آب سطحی برداشت شده برای حقایبه‌ی سستی پایین دست:  $SWWRD$ ؛  
کل آب سطحی برداشت شده برای نیاز زیست‌محیطی:  $SWMIN$

$$Q_{ct} \leq Q_{c \max} \quad (18)$$

که در آن،

$Q_{ct}$ : دبی کانال اصلی شبکه‌ی c در دوره‌ی t؛

$Q_{c \max}$ : ظرفیت کل انتقال کانال اصلی شبکه‌ی c در دوره‌ی t.

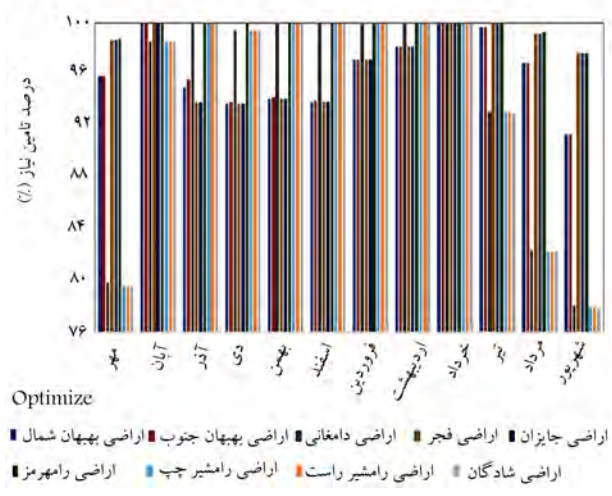
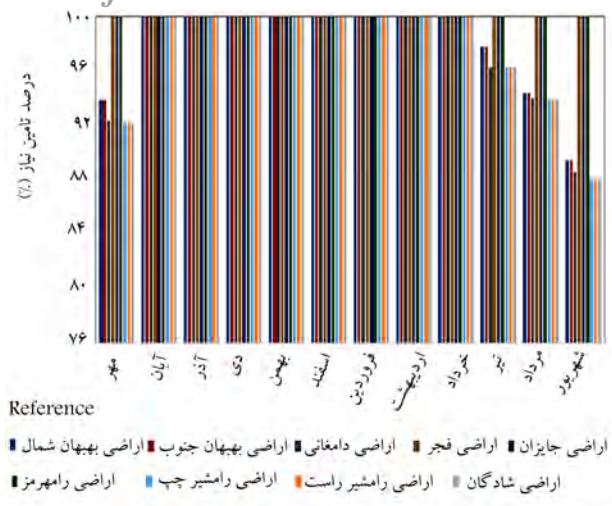
اتصال بین الگوریتم بهینه‌ساز و WEAP توسط یک VB Script، که توسط نویسندگان در محیط متلب ۲۳ توسعه داده شده است، ایجاد شده است. در حالی که رفیعی انزاب و همکاران (۲۰۱۶)، از تابع تک‌هدفه‌ی PSO در اتصال به WEAP برای بهینه‌سازی سیستم در محیط EXCEL استفاده کرده‌اند.<sup>[۱۰]</sup>

در مدل متصل شده شده‌ی شبیه‌ساز - بهینه‌ساز، در هر تکرار الگوریتم، ابتدا توسط الگوریتم بهینه‌ساز، ۱۲ متغیر تصمیم یعنی ۱۲ دبی زیست‌محیطی برای پایین دست رودخانه و قبل از ورود به تالاب بختگان تولید می‌شود. ۱۲ متغیر مذکور به محیط شبیه‌ساز WEAP وارد و رفتار کمی - کیفی سیستم شبیه‌سازی می‌شود. سپس مقادیر توابع هدف با توجه به درصد تأمین نیاز تمامی مصارف و همچنین غلظت شوری در ۴ نقطه‌ی بحرانی ۱، ۲، ۳ و ۴ در کل دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله محاسبه و گراف پارتو ترسیم می‌شود. با توجه به این‌که مقادیر تابع هدف در تکرارهای نخست رضایت‌بخش نیست، الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود و متغیرهای جدید تولید می‌شود و دوباره همین مراحل تکرار می‌شود. این مراحل تا رسیدن به بهترین جواب‌ها و همگرا شده‌ی الگوریتم ادامه می‌یابد.

### ۳. نتایج و بحث

اجراهای مکرر الگوریتم های MOIPSO و MOICA نشان داد برای رسیدن به نتایج بهتر، جمعیت اولیه باید دست‌کم ۲ برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد. در پژوهش حاضر، تعداد جمعیت اولیه در مدل در حدود ۲۴ انتخاب شده است. تعداد تکرار الگوریتم‌های مذکور جهت رسیدن به همگرایی در حدود ۷۵۰ در نظر گرفته شده است. بنابراین برای رسیدن به جواب بهینه، مدل ۱۸۰۰۰ بار اجرا شد و در آخرین تکرار هر الگوریتم منحنی تبادل بهینه (گراف پارتو) بین اهداف بهینه‌سازی



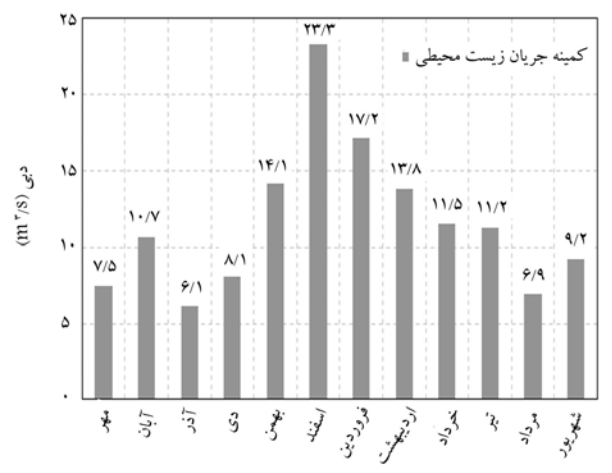


شکل ۶. مقادیر درصد تآمین نیاز هر کدام از مصارف مختلف در سناریوهای مرجع و بهینه (الگوریتم MOICA پاسخ ۱۲).

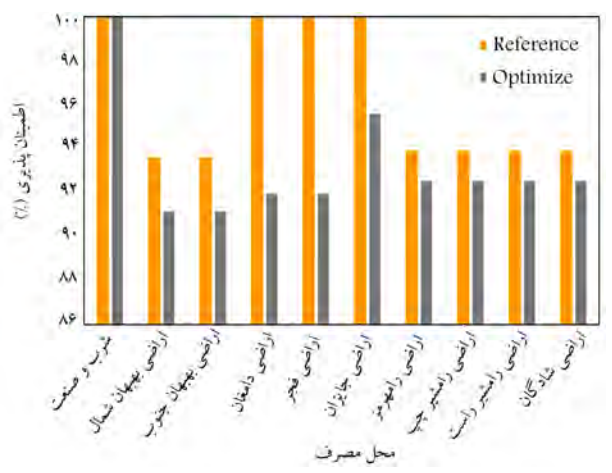
بوده است. در شکل ۷، عملکرد مخزن در دو سناریوی رفرنس و بهینه در طول دوره بهره‌برداری (۳۶۰ ماه) مشاهده می‌شود، که مطابق آن در سناریوی بهینه بر اساس اهداف تعریف شده و با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی، در برخی از ماه‌ها مقدار بیشتری از جریان رهاسازی شده و در برخی از ماه‌ها که نیاز کمتری به رهاسازی جریان برای مصارف پایین دست بوده است، مقداری آب در مخزن سد ذخیره شده است.

همچنین در شکل های ۸ و ۹، وضعیت شوری جریان آب در رودخانه به خصوص در بازه‌های انتهایی و قبل از ورود به تالاب شادگان در سناریوهای رفرنس و بهینه مشاهده می‌شود. برای مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم بهینه‌ساز و بررسی وضعیت شوری رودخانه قبل از ورود به شادگان، ۴ نقطه بر روی رودخانه‌ی جراحی در نظر گرفته شده است، که جانمایی آنها در شکل‌های مذکور نشان داده شده است. ۴ نقطه‌ی اشاره شده، بیشترین میزان شوری را در سناریوی رفرنس در طول دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله (۳۶۰ ماه) داشته‌اند و مکان‌های خوبی برای بررسی عملکرد الگوریتم در کاهش شوری رودخانه به حساب می‌آیند.

مطابق شکل ۸، در سناریوی رفرنس در ۴ نقطه‌ی مذکور، میزان شوری جریان در طول دوره بهره‌برداری در بیشتر ماه‌ها بسیار فراتر از حد استاندارد بوده است.

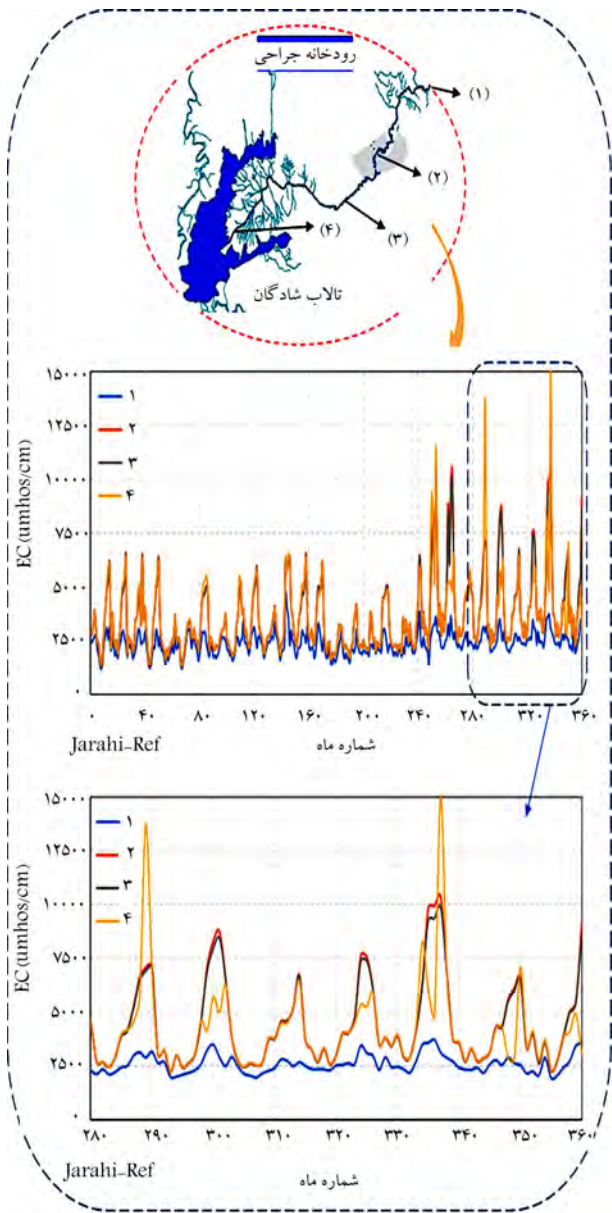


شکل ۴. مقادیر بهینه‌ی جریان زیست محیطی ماهیانه‌ی رودخانه‌ی جراحی قبل از ورودی به تالاب شادگان (بر اساس الگوریتم MOICA پاسخ ۱۲).



شکل ۵. مقادیر اطمینان‌پذیری تآمین نیاز هر کدام از مصارف مختلف در سناریوهای مرجع و بهینه (MOICA پاسخ ۱۲).

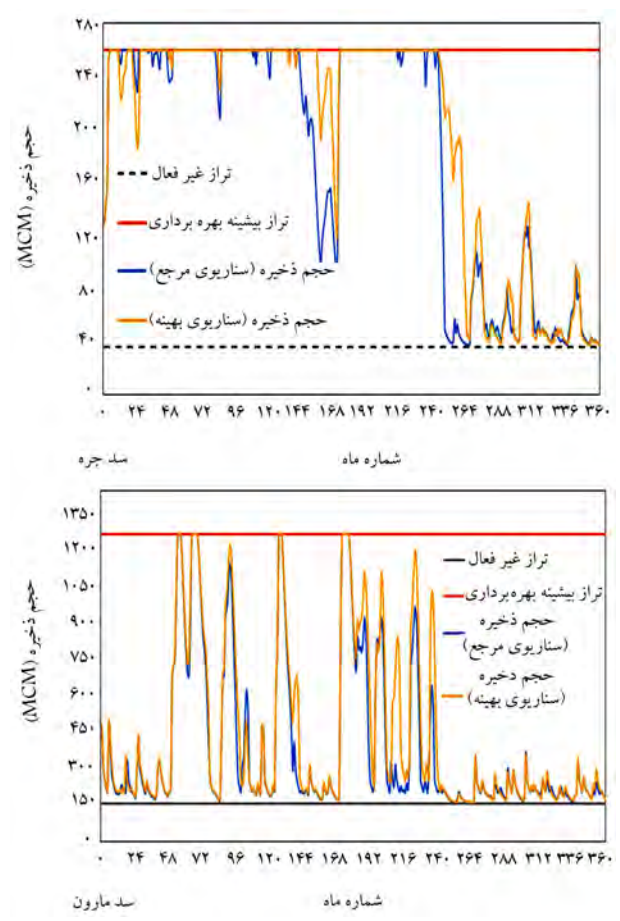
تآمین نیاز مصارف است، مقدار معقولی از جریان رودخانه به جریان زیست محیطی اختصاص یافته است، به طوری که میزان اطمینان‌پذیری تآمین نیازها هم در حد معقول و قابل قبولی باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که در سناریوی بهینه‌ی حاصل از اجرای MOICA، مقدار درصد تآمین نیاز مصارف مختلف در تمامی ماه‌های سال نسبت به سناریوی رفرنس تا حدودی کاهش یافته است. کمترین مقدار درصد تآمین نیاز در سناریوی بهینه مربوط به ماه‌های سپتامبر و اکتبر به میزان ۷۷/۹ و ۷۹/۶ درصد بوده است، که نسبت به سناریوی رفرنس به ترتیب به میزان ۱۰ و ۱۲ درصد کاهش یافته است. اما این کاهش در حد معقول بوده و در سناریوی بهینه، درصد تآمین نیاز در بیشتر ماه‌ها بالای ۸۰٪ بوده است. علت این کاهش نیز اختصاص مقداری از جریان رودخانه در ماه‌های مذکور جهت تآمین نیاز زیست محیطی پایین دست و کاهش شوری جریان ورودی به تالاب شادگان است. زیرا مقدار شوری آب رودخانه در سناریوی رفرنس در حد بحرانی و در برخی از ماه‌ها بسیار فراتر از حد استاندارد بوده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مدل متصل شده‌ی شبیه‌ساز- بهینه‌ساز فقط به دنبال افزایش درصد تآمین نیاز نبوده و علاوه بر در نظر داشتن عوامل کمی در برنامه‌ریزی منابع آب، عوامل کیفی جریان آب را نیز در نظر گرفته و بر اساس هر دو هدف، سعی در پیدا کردن بهترین جواب برای بالا بردن کارایی سیستم



شکل ۸. میزان تغییرات شوری در نقاط مختلف رودخانه‌ی جراحی در طول دوره‌ی بهره‌برداری - سناریوی رفرنس.

در بین آنها، نقطه‌ی ۴ یعنی محل ریزش جریان رودخانه به تالاب شادگان، بدترین وضعیت را داشته است، طوری که در برخی از ماه‌ها شوری جریان به میزان  $15000 \text{ umhos/cm}$  رسیده است، که حدود ۱۵ برابر فراتر از مقدار استاندارد در نظر گرفته شده در این مدل (یعنی  $1000 \text{ umhos/cm}$ ) است. پس از نقطه‌ی ۴، نقاط ۲ و ۳، با بیشترین مقدار شوری، وضعیت بدتری نسبت به نقطه‌ی ۱ یعنی ابتدای رودخانه‌ی جراحی داشته‌اند. این نتایج نشان‌دهنده‌ی سناریوی رفرنس علی‌رغم تأمین نیاز مصارف مختلف در حد قابل قبول، توجهی به تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه به خصوص در بازه‌های انتهایی آن ندارد. در سناریوی رفرنس، مقدار شوری جریان رودخانه در محل ورود به تالاب شادگان در بدترین وضعیت ممکن قرار دارد و این امر اهمیت توسعه‌ی یک مدل بهینه‌ی برنامه‌ریزی کمی - کیفی برای مدیریت مقدار برداشت از رودخانه و کنترل شوری آن را نشان می‌دهد.

در سناریوی بهینه پس از اتصال مدل شبیه‌ساز به الگوریتم MOICA و اجرای مدل متصل شده، مقادیر بهینه‌ی جریان زیست‌محیطی رودخانه برای کاهش غلظت شوری جریان آب ورودی به تالاب شادگان به دست آمده است. مطابق شکل ۹ نیز تغییرات غلظت EC رودخانه در نقاط منتخب ۱ تا ۴ در طول دوره‌ی بهره‌برداری در سناریوی بهینه مشاهده می‌شود، که براساس آن، مقدار شوری جریان آب رودخانه در نقاط ۲ و ۴، بیشترین مقدار را داشته و در برخی از ماه‌ها به

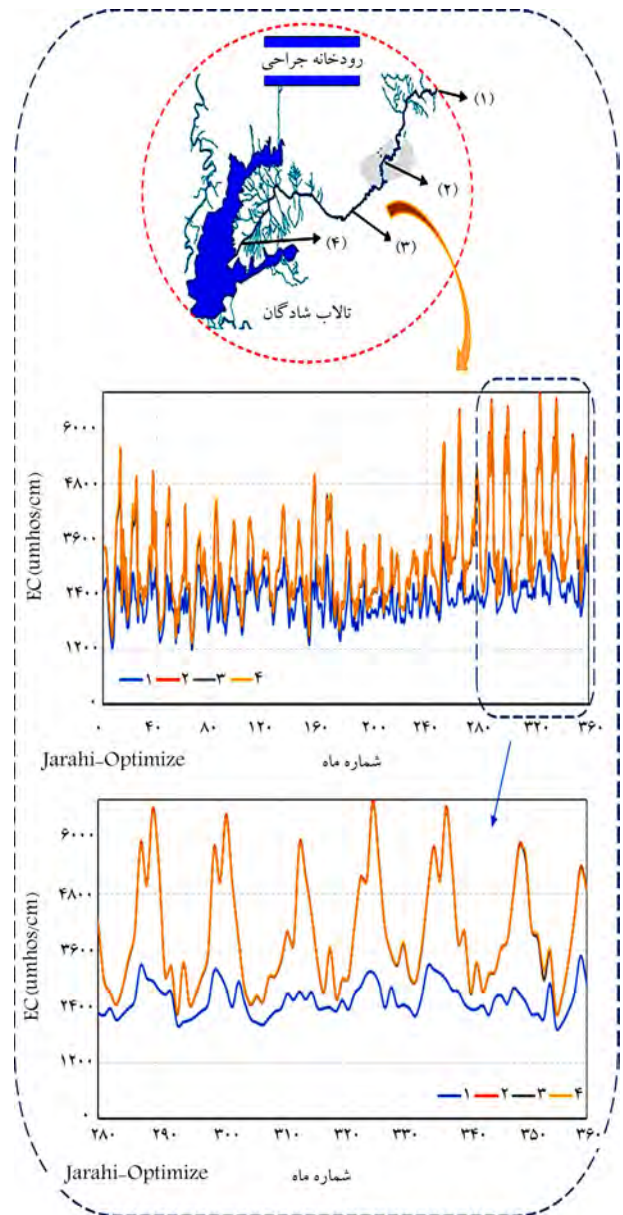


شکل ۷. تغییرات حجم آب ذخیره شده در مخزن سدهای جره و مارون در طول دوره‌ی بهره‌برداری (MCM) در دو سناریوی رفرنس (Ref) و بهینه (MOICA) (پاسخ ۱۱۲).



#### ۴. نتیجه‌گیری

تالاب شادگان به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تالاب‌های ایران در اثر برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب بالادست و همچنین تخلیه‌ی زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری در رودخانه‌ی جراحی واقع در بالادست آن، با کاهش شدید کیفیت آب ورودی به آن مواجه شده است. ادامه‌ی وضع موجود منجر به نابودی کل اکوسیستم تالاب و البته رودخانه‌ی جراحی به عنوان تأمین‌کننده‌ی اصلی آب آن و ایجاد آثار مخرب زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در کل منطقه خواهد شد. لذا تهیه و تدوین مدلی بهینه، که تمامی اجزاء دخیل در بیلابان و برنامه‌ریزی منابع آب بالادست تالاب شادگان را لحاظ کند و علاوه بر تأمین نیازها و مصارف منطقه، به وضعیت کیفی پایین دست نیز توجه کند، امری ضروری است. از این رو در پژوهش حاضر، با هدف تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه‌ی شادگان، از یک مدل متصل شده‌ی شبیه‌ساز - بهینه‌ساز استفاده شده است، که در آن الگوریتم‌های تکاملی MOICA و MOPSO به مدل شبیه‌ساز WEAP متصل شده است. نتایج نشان داد الگوریتم MOICA عملکرد بهتری نسبت به MOPSO دارد و مجموعه جواب بهتری در آخرین تکرار الگوریتم ارائه می‌دهد. لذا به عنوان الگوریتم برتر برای بهره‌برداری بهینه‌ی کمی - کیفی از سیستم انتخاب و به عنوان سناریوی بهینه معرفی شده است. در سناریوی بهینه، میزان جریان زیست‌محیطی ماهیانه‌ی بهینه در طول دوره بهره‌برداری به دست آمد و نتایج حاصل از اجرای آن با سناریوی رفرنس که بر اساس وضع موجود بهره‌برداری پایه‌گذاری شده بود، مقایسه شده و نتایج نشان داده است مدل بهینه‌ساز MOICA، عملکرد خوبی در تأمین نیازهای مختلف و همچنین کاهش شوری جریان ورودی به تالاب شادگان نسبت به سناریوی داشته است. طوری که در سناریوی بهینه، علاوه بر تأمین مناسب نیازها با اطمینان‌پذیری بیش از ۹۱٪ در کل سیستم، مقدار شوری رودخانه در محل ورودی به تالاب شادگان به خصوص در ماه‌های کم آب، در حدود ۵۵٪ کاسته شده است. در سایر نقاط موجود بر روی رودخانه‌ی جراحی نیز مقدار شوری آب به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. نتایج نشان داد که با ترکیب مدل برنامه‌ریزی منابع آب و بهینه‌سازی سیستم بر اساس مدل کمی - کیفی توسعه داده شده می‌توان وضعیت تخصیص آب زیست‌محیطی تالاب را به طور قابل توجهی بهبود بخشید؛ اما این امر به تنهایی تمام مشکل منطقه را حل نخواهد کرد. علی‌رغم این‌که اجرای سناریوی بهینه، بهترین نتیجه را ارائه داده است، ولی در برخی از ماه‌ها همچنان شوری جریان ورودی به تالاب شادگان از حد مجاز فراتر بوده است، که این امر نشان می‌دهد در کنار استفاده از ابزارهای برنامه‌ریزی منابع آب، گزینه‌های مدیریتی مانند کاهش سطح زیر کشت گیاهان پرمصرف و همچنین افزایش بهره‌وری آبیاری نیز باید آزمون شود. مدل متصل شده‌ی پیشنهادی در پژوهش حاضر، برای سایر مناطق مطالعاتی با رویکرد بهره‌برداری کمی - کیفی کاربرد دارد و قادر است نقاط بحرانی رودخانه را از نظر کمی و کیفی شناسایی و راه‌حل‌های بهینه برای بهبود وضعیت رودخانه و همچنین اکوسیستم پایین دست ارائه دهد.



شکل ۹. میزان تغییرات شوری در نقاط مختلف رودخانه‌ی جراحی در طول دوره بهره‌برداری - سناریوی بهینه (MOICA (پاسخ ۱۲)).

نیاز مصارف مختلف در حد قابل قبول و با اطمینان‌پذیری بالا، منجر به کاهش ۵۵ درصدی شوری جریان ورودی به تالاب بختگان به خصوص در ماه‌های کم آب شده است..

#### پانویس‌ها

1. Hu
2. A multi-objective environmental reservoir operation methodology

3. Chen
4. Mao
5. three gorges and gezhouba dams
6. Cai
7. Wang & Lu

8. ecological water use
9. Suen & Eheart
10. Shiau & Wu
11. Cardwell
12. range of variation
13. Tisdell
14. Luo
15. Nikolic & Simonovic
16. multi-criteria decision analysis
17. WEAP
18. partical swarm optimization
19. swarm intelligence
20. Kennedy and Eberhart
21. Atashpaz-Gargar & Lucas
22. country
23. MATLAB

### (References) منابع

1. Jager, H.I. and Smith, B.T. "Sustainable reservoir operation: can we generate hydropower and preserve ecosystem values", *River Research and Applications*, **24**(3) pp. 340-352 (2008).
2. LeRoy, P.N., Allan, J.D., Bain, M.B. and et al. "The natural flow regime A paradigm for river conservation and restoration", *BioScience*, **47**(11), pp. 769-784 (1997).
3. Arthington, A., Stuart, B., Robert, J.N. and et al. "The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems", *Ecological Applications*, **16**(4), pp. 1311-1318 (2006).
4. King, J., Brown, C. and Sabet, H. "A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers", *River Research and Applications*, **19**(5-6), pp. 619-39 (2003).
5. Whiting, P.J. "Streamflow necessary for environmental maintenance", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **30**, pp. 181-206 (2002).
6. Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N. and et al. "Water in a changing world", *Ecological Applications*, **10**(3), pp. 689-710 (2016).
7. Azari, A., Akhond Ali, E.M., Radmanesh, F. and et al. "Management of quality and pollution of river in integrated operation conditions for surface water and groundwater resources (Dez dam to Qir dam reach)", *7th national conference and exhibition of environment, Tehran University* (2014) (in Persian).
8. Akbarpour, M., Ibrahimi, K. and Hourfer, E. "Integrated operation from surface water and groundwater resources with qualitative and quantitative approach (Case study: Yazd-Ardakan plain)", *5th conference of water resources management of Iran, Tehran, Iranian society of science and engineering of water resources, Shahid Beheshti University* (2013) (in Persian).
9. Bazargan-Lari, M., Kerachian, R., Sedghi, H. and et al. "Developing probabilistic operating rules for real-time conjunctive use of surface and groundwater resources: application of support vector machines", *Water and Wastewater*, **21**(4), pp. 54-69 (2011) (in Persian).
10. Rafiee Anzab, N., Mousavi, S.J., Asl-Rousta, B. and et al. "Simulation optimization for optimal sizing of water transfer systems", *Harmony Search Algorithm*, **382**, pp. 365-375 (Springer, 2016).
11. Mousavi, S.J., Anzab, N.R., Asl-Rousta, B. and et al. "Multi-objective optimization-simulation for reliability-based inter-basin water allocation", *Water Resources Management*, **31**(9), pp. 1-20 (2017).
12. Shenava, N. and Shourian, M. "Optimal reservoir operation with water supply enhancement and flood mitigation objectives using an optimization-simulation approach", *Water Resources Management*, **32**(13), pp. 4393-4407 (2018).
13. Karamouz, M., Nazif, S., Sherafat, M. and et al. "Development of an optimal reservoir operation scheme using extended evolutionary computing algorithms based on conflict resolution approach: A case study", *Water Resources Management*, **28**(11), pp. 3539-3554 (Springer, 2014).
14. Afshar, A., Emami Skardi, M.J. and Masoumi, F. "Optimizing water supply and hydropower reservoir operation rule curves: An imperialist competitive algorithm approach", *Engineering Optimization*, **47**(9), pp. 1208-1225 (2015).
15. Hu, M., Huang, G.H., Sun, W. and et al. "Optimization and evaluation of environmental operations for three gorges reservoir", *Water Resources Management*, **30**(10), pp. 3553-3576 (2016).
16. Chen, D., Chen, Q., Leon, A.S. and et al. "A Genetic algorithm parallel strategy for optimizing the operation of reservoir with multiple eco-environmental objectives", *Water Resources Management*, **30**(7), pp. 2127-2142 (2016).
17. Mao, J., Zhang, P., Dai, L. and et al. "Optimal operation of a multi-reservoir system for environmental water demand of a river-connected lake", *Hydrology Research*, **47**(s1), pp. 206-224 (2016).
18. Cai, W., Zhang, L., Zhu, X. and et al. "Optimized reservoir operation to balance human and environmental requirements: A case study for the three gorges and gezhouba dams, yangtze river basin", *Ecological Informatics, China*, **18**, pp. 40-48 (2013).
19. Chen, Q., Chen, D., Han, R. and et al. "Optimizing the operation of the qingshitan reservoir in the lijiang river for multiple human interests and quasi-natural flow maintenance", *Journal of Environmental Sciences*, **24**(11), pp. 1923-1928 (2012).
20. Wang, R. and Lu, X. "Quantitative estimation models and their application of ecological water use at a basin scale", *Water Resources Management*, **23**, pp. 1351 (2009).
21. Suen, J. and Eheart, J.W. "Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow Regime", *Water Resources Research*, **42**, pp. 1-9 (2006).
22. Shiau, J. and Wu, F. "Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime", *Water Resources Research*, **43**(8), pp. 1-12 (2007).
23. Cardwell, H., Jager, H.I. and Sale, M.J. "Designing in-stream flows to satisfy fish and human water needs",

- Journal of Water Resources Planning and Management*, **22**(5), pp. 356-363 (1996).
24. Shiau, J. and Wu, F. "Assessment of hydrologic alterations caused by CHI-CHI diversion weir in CHOU-SHUI creek, taiwan: opporyunities for restoring natural flow conditions", *River Research and Applications*, bf 20(4), pp. 401-412 (2004).
  25. Homa, E.S., Vogel, R.M., Smith, M.P. and et al. "An optimization approach for balancing human and ecological flow needs", *World Water and Environmental Resources Congress*, pp. 1-12 (2005).
  26. Chen, Q., Chen, D., Han, R. and et al. "Optimizing the operation of the qingshitan reservoir in the lijiang river for multiple human interests and quasi-natural flow maintenance", *Journal of Environmental Sciences*, **24**(11), pp. 1923-1928 (2012).
  27. Chen, D., Huang, G., Chen, Q. and et al. "Implementing eco-friendly reservoir operation by using genetic algorithm with dynamic mutation", *International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment*, **6330**, pp. 509-516 (2010).
  28. Li, R., Chen, Q. and Duan, C. "Ecological hydrograph based on schizothorax chongi habitat conservation in the dewatered river channel between jinping cascaded dams", *Sci. China Technol. Sci.*, **54**, pp. 54-63 (2011).
  29. Tisdell, J. "Acquiring water for environmental use in australia: an analysis of policy options", *Water Resources Management*, **24**, pp. 1515-1530 (2010).
  30. Luo, J., Chen, C. and Xie, J. "Multi-objective immune algorithm with preference-based selection for reservoir flood control operation", *Water Resources Management*, **29**, pp. 1447-1466 (2014).
  31. Nikolic, V.V. and Simonovic, S.P. "Multi-method modeling framework for support of integrated water resources management", *Environmental Processes*, **2**, pp. 461-483 (2015).
  32. Azari, A., Hamzeh, S. and Naderi, S. "Multi-objective optimization of the reservoir system operation by using the hedging policy", *Water Resources Management*, **32**(6), pp. 2061-2078 (2018).
  33. Zeinali, M., Azari, A. and Heidari, M.M. "Multi-objective optimization for water resource management in low flow areas based on a coupled surface water-groundwater model", *Journal of Water Resources Planning and Management*, **146**(5), 04020020 (2020).
  34. Ahmadianfar, I., Adib, A. and Salarijazi, M. "Optimizing multireservoir operation: hybrid of bat algorithm and differential evolution", *Journal of Water Resources Planning and Management*, **142**(2), 05015010 (2015).
  35. Carpitella, S., Brentan, B., Montalvo, I. and et al. "Multi-criteria analysis applied to multi-objective optimal pump scheduling in water systems", *Water Supply*, **19** (8), pp. 2338-2346 (2019).
  36. Tennant, D.L. "Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources", *Fisheries*, **1**(4), pp. 6-10 (1976).
  37. Sieber, J. and Purkey, D. "User guide for WEAP", *Stockholm Environment Institute, U.S. Center* (2015).
  38. Atashpaz-Gargari, E. and Lucas, C. "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *IEEE congress on evolutionary computation*, pp. 4661-4667 (2007).