

بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های منابع آب با استفاده از الگوریتم چند هدفه MOPSO

میلاذ اسدی^۱، محمدعلی آخوندعلی^۲، آرش آذری^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب دانشگاه شهید چمران، اهواز

۲. استاد، گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشگاه شهید چمران، اهواز

۳. استادیار، گروه مهندسی آب دانشگاه رازی، کرمانشاه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۹/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۰/۶)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از یک ساختار چندهدفه و بهره‌گیری از فرمول‌بندی‌های جدید روشی ارائه شده است که در آن بجای افزایش اطمینان‌پذیری بر اساس تأمین نیاز ۱۰۰ درصد در برخی ماه‌ها بدون توجه به ماه‌های خشک، مقداری از آب ماه‌ها یا فصول پرآب در مخزن ذخیره شده تا با استفاده در ماه‌های کم آب شدت شکست تعدیل گردد. برای این منظور الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) به مدل شبیه‌ساز WEAP متصل گردید. هدف اصلی در چنین ساختاری ارائه راه‌حلی بود که در آن با توجه به ظرفیت بهره‌برداری از مخزن، علاوه بر رسیدن به اطمینان‌پذیری تأمین نیاز قابل قبول در کل دوره، درصد تأمین نیاز در ماه‌های خشک نیز افزایش یابد. در نهایت نتایج در سه سناریوی وضع موجود، توسعه اراضی و سناریوی بهینه‌سازی سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق با نتایج، در سناریوی وضع موجود در کل دوره بجز در چندین ماه وضعیت مطلوب گزارش شد. در سناریوی توسعه اراضی در بسیاری از سال‌های خشک و در تمامی شش سال آخر برنامه‌ریزی در بیش‌تر مصارف، درصد تأمین نیاز در سه تا هشت ماه خشک متوالی برابر صفر و در بقیه سال‌های کم آب، در این ماه‌ها کمتر از پنج درصد بود. اما با اجرای مدل بهینه‌ساز درصد تأمین نیاز در این ماه‌ها به مقدار ۲۸ تا ۶۰ درصد رسید. همچنین در سناریوی بهینه‌سازی سامانه، اطمینان‌پذیری تأمین نیاز برقایی سد مارون و زیست‌محیطی پایین دست بهبود یافت. این پژوهش نشان داد استفاده از راهکار این تحقیق منجر به مدیریت بهتر مخزن و کاهش شدت شکست در تأمین مصارف مختلف در ماه‌های کم آب خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: اطمینان‌پذیری، برقایی، شدت شکست، WEAP، MOPSO

مقدمه

با توجه به کمبود منابع آبی و تغییر در الگوی مصرف به دلیل افزایش جمعیت، بهره‌برداری بهینه از منابع آب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از طرفی به دلیل قرار گرفتن ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک، بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های منابع آب و مدیریت بهتر در شرایط کم آبی ضروری می‌باشد. از جمله ابزارهای مناسب در حوزه مدیریت منابع آب استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب شبیه‌سازی بهینه‌سازی می‌باشد. در روش‌های شبیه‌سازی می‌توان سامانه منابع آب موجود را با تمامی جزئیات مدل نمود و با سرعت بیشتری به یک دید کلی از سامانه مورد نظر رسید و در فرآیند بهینه‌سازی مناسب‌ترین مقدارهای ممکن برای متغیرهای مورد نظر در یک مسئله پیدا شده، به‌طوری‌که به

ازای مقدارهای یافت شده، اهداف مسئله با بهترین مطلوبیت ممکن حاصل شود. در میان روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی توانایی بالایی در حل مسائل خطی، غیر خطی و پیچیده دارند. از جمله الگوریتم‌های مطرح تکاملی می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک^۱ (GA)، جامعه مورچگان^۲ (ACO)، الگوریتم کرم شب تاب^۳ (FA) و الگوریتم ازدحام ذرات^۴ (PSO) اشاره نمود. این الگوریتم‌ها به صورت موفقیت‌آمیز برای مسائل بهره‌برداری بهینه از مخازن به کار برده شده اند. Esat and Hall (1994) با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسئله چهار مخزنه را حل نمودند. Fahmy et al. (1994) از الگوریتم ژنتیک برای بهره‌برداری بهینه از یک سامانه مخزنی استفاده نمودند. Oliveira and Loucks (1997) از الگوریتم ژنتیک برای ارزیابی

1. Genetic Algorithm
2. Ant Colony Optimization Algorithm
3. Firefly Algorithm
4. Particle Swarm Optimization

منحنی‌های فرمان سامانه‌های چند مخزنی استفاده کردند. Jalali *et al.* (2006) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده کردند. Moeini and Afshar (2009) کاربرد الگوریتم مورچگان پیشینه-کمینه را با سه فرمول‌بندی مختلف در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز مورد بررسی قرار دادند. Garousi-Nejad *et al.* (2016) از الگوریتم کرم شب تاب برای بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف کشاورزی و تولید برق استفاده نمودند. هر کدام از این روش‌ها مزیت‌هایی نسبت به هم دارند و محققان به منظور بررسی قابلیت هر کدام از آن‌ها برای حل مسائل بهره‌برداری از مخازن تحقیقاتی را انجام داده اند. از آن دست می توان به ارزیابی کاربرد الگوریتم‌های تکاملی ژنتیک و کلونی مورچگان در بهره‌برداری بهینه از منابع آب توسط Borhani Dariane (2008) and Mortazavi Naeini اشاره نمود که نتایج آن حاکی از برتری الگوریتم ژنتیک بود. تحقیقات صورت گرفته توسط Dariane Zhang *et al.* (2008) نیز موید این امر بود. Zhang *et al.* (2011) برای بهینه‌سازی توان برقی در یک سامانه چند مخزنه از الگوریتم PSO بهبود یافته (IPSO) که از ترکیب الگوریتم‌های PSO و ژنتیک ایجاد شده بود، استفاده نمودند. Azarafza *et al.* (2012) سه نوع الگوریتم PSO، ژنتیک و الگوریتم بازپخت (SA) را به منظور استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری مخزن سد شهرچای مورد مقایسه قرار دادند. نتایج به دست آمده از الگوریتم PSO به صورت موثرتری نسبت به سایر روش‌ها در حل مسئله مخزن شهرچای عمل نمود. Hojati *et al.* (2013) در یک مطالعه موردی برای بهینه‌سازی یک سامانه دو مخزنه در حوضه آبریز قزل‌اوزن، با اهداف پیشینه کردن درآمد حاصل از فروش انرژی نیروگاه و افزایش حجم ذخیره سیلاب در حوضه مذکور، از الگوریتم‌های ژنتیک ساده و چند هدفه NSGA-II استفاده کردند و در نهایت با مقایسه نتایج حاصل، به این نتیجه رسیدند که الگوریتم NSGA-II با یافتن نقاط بهینه بهتر، منجر به دستیابی درآمد بیشتر و حجم ذخیره افزون‌تر در دو مخزن موردنظر شده است. Saber Chenari *et al.* (2013) پس از معرفی دو الگوریتم PSO و ژنتیک کارایی آن‌ها در مسئله بهره‌برداری بهینه مخزن را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم PSO بود. همانطور که از بررسی منابع بر می‌آید الگوریتم ازدحام ذرات الگوریتمی کارآمد در بهره‌برداری بهینه از منابع آب می‌باشد. از سوی دیگر بسیاری از مدل‌ها که برای شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب توسعه داده شده اند از بهینه‌سازی تک دوره‌ای در هر دوره زمانی برای

بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده می‌کنند. از آنجا که بسیاری از مسائل مربوط به منابع آب به صورت غیرخطی هستند لذا اتصال یک مدل بهینه‌ساز قوی مانند الگوریتم‌های تکاملی به آن می‌تواند در این راستا کارآمد باشد. لذا ترکیب روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک روش قدرتمند در حل مسائل بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های منابع آب است که بر اساس آن در هر بار بهینه‌سازی تصمیم‌گیران منابع آب می‌توانند از طریق شبیه‌سازی، نتایج اجرای حالت بهینه را مشاهده کنند تا بتوانند رفتار سامانه تحت این شرایط را تحلیل کرده و میزان حصول اهداف مختلف را ارزیابی نمایند. این روش در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله Shourian *et al.* (2008) یک روش برای طراحی و بهره‌برداری بهینه از بالادست حوضه رودخانه سیروان در ایران ارائه کردند. برای این کار، مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم PSO را با هم ادغام نمودند که در آن هدف پیشینه‌سازی سود حاصل از تأمین آب مورد نیاز بود. Nabi Nejad *et al.* (2013) از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی PSO و مدل تخصیص منابع آب MODSIM با رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع آب حوضه رودخانه اترک استفاده نمودند. Azari *et al.* (2015) با ترکیب مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، یک مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی ارائه نمودند. برای این منظور بر اساس مدل چند هدفه NSGA-II و با اتصال دینامیک مدل‌های WEAP و MODFLOW اهداف پیشینه کردن اطمینان‌پذیری تأمین نیازها و کمینه نمودن افت تراز آب زیرزمینی را مورد ارزیابی قرار دادند. Aboutalebi *et al.* (2015) از ترکیب الگوریتم NSGAII و SVR بر پایه برنامه‌ریزی غیرخطی به منظور بهینه‌سازی قواعد بهره‌برداری ماهانه برای تولید انرژی برقی در مخزن سد کارون ۴ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که ترکیب SVR-NSGAII به منظور محاسبه قواعد بهره‌برداری بهینه برای تولید برقی در زمان واقعی بسیار مناسب است. Ashofteh *et al.* (2015) به منظور استحصال قواعد بهره‌برداری بهینه از مخزن سد آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی تحت شرایط آب و هوایی پایه و تغییر اقلیم از الگوریتم چند هدفه ژنتیک بهره گرفتند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی سامانه در شرایط تغییر اقلیم منجر به بهبود عملکرد مخزن نسبت به عملکرد آن در شرایط آب و هوایی پایه می‌گردد.

Rafiee Anzab *et al.* (2016) یک مدل شبیه‌سازی-

بهینه‌سازی به وسیله اتصال مدل WEAP و الگوریتم PSO

بخصوص در دوره‌های کم آب ارائه گردد. در این ساختار، بر خلاف روش ارائه شده توسط *Rafiee Anzab et al.* (2016)، شبیه ساز WEAP مستقیماً در محیط MATLAB فراخوانی و توسط الگوریتم بهینه‌سازی اجرا می‌گردد. هدف اصلی در چنین ساختاری ارائه راه‌حلی است که در آن با توجه به ظرفیت بهره‌برداری از مخزن، علاوه بر رسیدن به اطمینان‌پذیری تأمین نیاز قابل قبول در کل دوره، درصد تأمین نیاز در ماه‌های خشک نیز افزایش یابد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

سد مخزنی مارون بر روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان و سد مخزنی جره بر روی رودخانه رود زرد در نزدیکی رامهرمز در استان خوزستان و قسمت جنوبی ایران واقع شده‌اند. سد مارون با اهداف تأمین آب کشاورزی شبکه‌های آبیاری و زهکشی بهبهان، جایزان و فجر، رامشیر و شادگان، کنترل سیلاب، تأمین آب شرب شهر بهبهان و تولید انرژی برقی طراحی شده است. رودخانه مارون از کوه‌های نیل و چشمه سارهای دامنه کوه‌های سادات از زاگرس سرچشمه گرفته و پس از طی مسافت ۱۲۰ کیلومتر به دریاچه سد مارون می‌رسد. سپس از طریق تنگ تکاب وارد دشت بهبهان می‌شود و توسط سد انحرافی شهدا و شبکه آبیاری بهبهان، دشت بهبهان و سپس از طریق سد انحرافی جایزان، دشت جایزان و فجر را مشروب می‌کند. در ادامه با پیوستن رودخانه الله به آن نام جراحی به خود گرفته و دشت‌های رامشیر و شادگان را آبرسانی می‌کند. رودخانه الله از به هم پیوستن دو رود اعلا و رود زرد به وجود می‌آید. از سد مخزنی جره برای تأمین نیاز اراضی رامهرمز استفاده می‌شود. جانمایی رودخانه‌ها و مصارف موجود در منطقه در شکل (۱) آمده است.

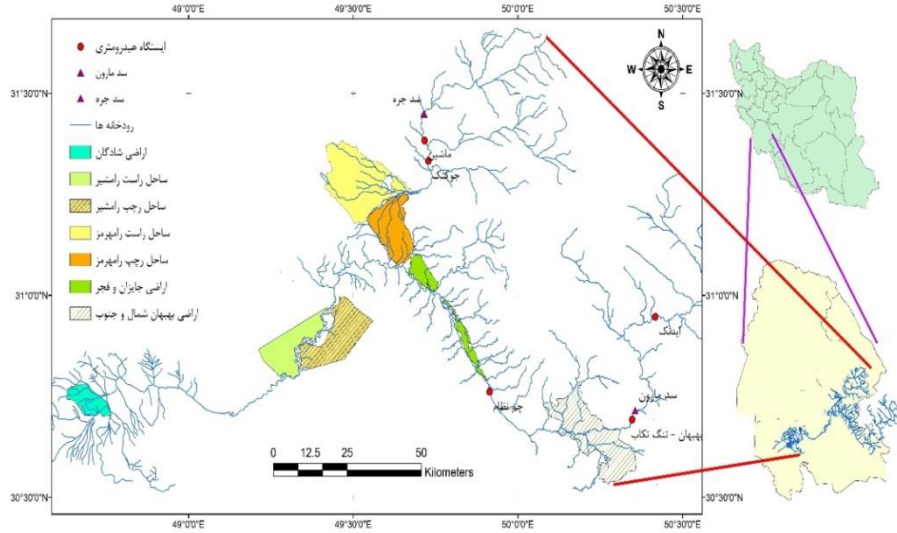
ساختار مدل شبیه ساز WEAP

به منظور مدل‌سازی سامانه منابع آب موجود در منطقه مطالعاتی، ابتدا نقشه‌های پایه منطقه از جمله مسیر رودخانه‌ها، جانمایی منابع و مصارف از جمله سدها، منابع آب زیرزمینی، نیازها و همچنین جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در نرم افزار GIS تهیه گردید و در محیط شبیه‌ساز WEAP فراخوانی شد. سپس اطلاعات مربوط به تمامی منابع و مصارف شامل مشخصات کلی سد و نیروگاه‌ها، مقدار برداشت از آب سطحی و زیرزمینی برای هر کدام از مصارف اعم از شرب و صنعت، کشاورزی، حلقه سنتی و

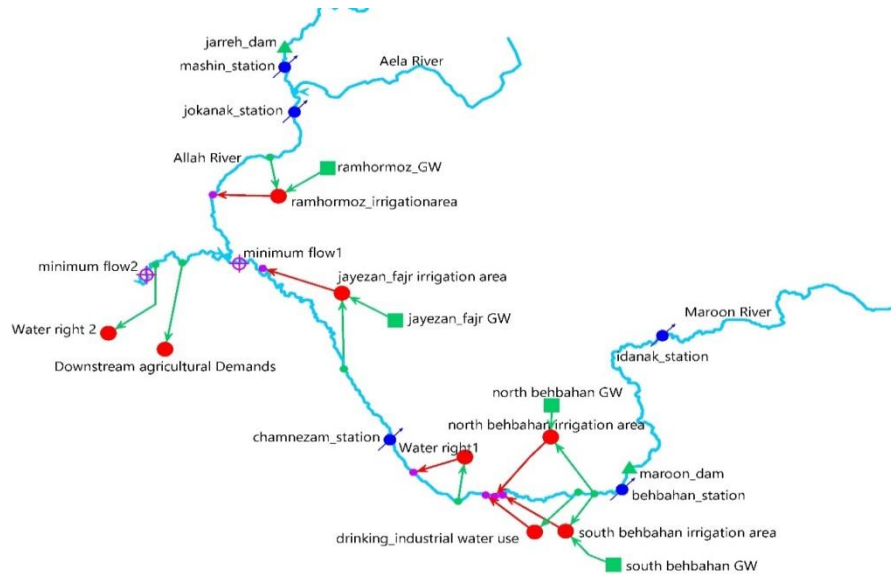
تک‌هدفه با کمک محیط EXCEL به منظور طراحی و بهره‌برداری بهینه برای پروژه انتقال آب کارون به زهره در ایران ارائه کردند. نتایج نشان دادند که پروژه انتقال آب مورد بحث می‌تواند آب مورد نیاز برای توسعه زمین‌های کشاورزی ده دشت و چرام در مناطق توسعه نیافته واقع در استان کهگیلویه را تأمین کند. *Saber Chenari et al.* (2016) از الگوریتم ازدحام ذرات به منظور حل مسئله بهره‌برداری از سد چند منظوره مهاباد بهره گرفتند. نتایج نشان داد که سیاست بهره‌برداری حاصل شده از الگوریتم PSO الگویی مناسب در شرایط خشکی برای مخزن است. *Rezaei et al.* (2016) یک الگوریتم به اسم f-MOPSO به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی توسعه دادند و کاربرد آن را برای حوضه مطالعاتی خود مورد بررسی قرار دادند. در این روش از مدل فازی عصبی برای شبیه‌سازی ارتباط بین لایه‌های مختلف اطلاعاتی استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم توسعه داده شده توسط ایشان توانایی یافتن یک جواب بهینه در میان جواب‌های دیگر در مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ را دارد. بررسی منابع نشان می‌دهد در بیش‌تر تحقیقات انجام شده از الگوریتم‌های تک هدفه بهره گرفته شده است که کارایی کمتری نسبت به ساختارهای چندهدفه دارد. از طرفی مدل‌های ارائه شده قادر به ارائه راهکار مناسب در مدیریت منابع آب موجود در سال‌های خشک یا کم آب نیست. چنین مدل‌هایی تنها برای افزایش اطمینان‌پذیری تأمین نیاز در کل دوره بهره‌برداری طراحی شده است و در آن مجموع ماه‌های تأمین نیاز شده در کل دوره ملاک محاسبه اطمینان‌پذیری تأمین نیاز در کل دوره است. چنین برنامه‌ریزی، توجهی به میزان و مقدار کمبود آب در ماه‌های شکست یا ماه‌های با کمبود آب شدید را ندارد که به هیچ وجه مطلوب مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک نیست. در این پژوهش با استفاده از یک ساختار چندهدفه و استفاده از فرمول‌بندی‌های جدید سعی در ارائه روشی شده است تا بجای افزایش اطمینان‌پذیری بر اساس تأمین نیاز ۱۰۰ درصد در برخی ماه‌ها بدون توجه به ماه‌های خشک، مقداری از آب ماه‌ها یا فصول پرآب در مخزن ذخیره شده تا با استفاده در ماه‌های کم آب شدت شکست تعدیل گردد. لذا جهت نیل به اهداف فوق و به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود در حوضه مارون، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO) به مدل شبیه‌ساز WEAP متصل گردید تا با به‌دست آوردن مقادیر بهینه رهاسازی آب از مخازن سدهای مارون و جره، ساختار جدیدی جهت مدیریت منابع آب

مدل تعریف گردید. در شکل (۲) شماتیک مدل مربوط به منطقه مطالعاتی آورده شده است.

زیست‌محیطی و ... مقدار برگشت آب از هر کدام از مصارف و آبدهی ثبت شده در هر کدام از ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در



شکل ۱. جانمایی رودخانه‌ها، منابع و مصارف در منطقه مطالعاتی



شکل ۲. شماتیک منطقه مطالعاتی در مدل آب سطحی

بهبهان در دوره ۲۰ ساله آتی، از آمار و اطلاعات جمعیتی مربوط به سرشماری‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ و لحاظ نرخ رشد جمعیت در سال‌های آتی مطابق با سند چشم‌انداز ۲۰ ساله آتی (نرخ رشد ۲/۵ درصدی در انتهای افق ۱۴۲۰) و همچنین اطلاعات مربوط به میزان مصرف سرانه در مناطق مذکور استفاده گردید. میزان مصرف سرانه این شهر بر اساس اطلاعات ثبت شده در اداره آب و فاضلاب استان در حدود ۲۲۰ لیتر در روز در نظر گرفته شد. در نهایت با توجه به افزایش جمعیت در هر دوره زمانی نیاز شرب ماهیانه در طول دوره شبیه‌سازی محاسبه شد. در این

سپس اطلاعات بهره‌برداری سدهای مارون و جره شامل ظرفیت مخزن، حجم مخزن در تراز کمینه و بیشینه و مرده، مشخصات نیروگاه و غیره در مدل وارد شد. همچنین مقادیر آبدهی رودخانه مارون و جره در محل ایستگاه‌های واقع بر آن در طول دوره شبیه‌سازی در مدل تعریف شد. مطابق با جدول (۱) نیاز آبی اراضی در شرایط توسعه اراضی مطابق با افق توسعه ۲۰ ساله منطقه براساس الگوی کشت دشت‌ها و سایر پارامترهای مرتبط، محاسبه شده و در مدل تعریف گردید. جهت محاسبه میزان آب مورد نیاز شرب و صنعت شهر

زیست‌محیطی رودخانه در گره‌های مورد نظر طبق روش مذکور در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به اطلاعات تبخیر از سطح آزاد مخازن سدهای مارون و جره و در نظر گرفتن میزان بارندگی روی سطح مخزن سدهای مذکور، تبخیر خالص از سطح آزاد مخازن محاسبه شد که در جدول (۳) نشان داده شده است.

تحقیق برای تعیین جریان زیست‌محیطی، گره‌های مربوط به کمینه جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست رودخانه‌های مارون و جراحی در مدل ایجاد شد. از روش تنانت یا مونتاننا که از جمله روش‌های درجه‌بندی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود، برای تخمین کمینه جریان زیست‌محیطی پایین‌دست بر اساس جریان طبیعی رودخانه استفاده شد. مقادیر کمینه جریان

جدول ۱. میزان نیاز آبی دشت‌های مورد مطالعه در ماه‌های مختلف (میلیون متر مکعب)

نیازها	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر
اراضی رامشیر و شادگان	۱۱/۶۶	۱۰/۶۵	۱۶/۵۳	۱۳/۵۸	۱۸/۶۱	۱۶/۷۳	۱۱/۳۹	۲/۲۳	۳/۷۱	۱۰/۲۰	۱۱/۸۷	۱۲/۳۶
حقابه سنتی جراحی	۳۶/۳۴	۳۳/۱۷	۵۱/۵۱	۴۲/۳۲	۵۷/۹۹	۵۲/۱۳	۳۵/۵۰	۶/۹۴	۱۱/۵۵	۳۱/۷۹	۳۶/۹۷	۳۸/۵۰
حقابه سنتی مارون	۸/۹۵	۴/۹۷	۰/۱۲	۲/۱۰	۳/۰۶	۸/۱۵	۱۰/۵۵	۶/۲۵	۴/۹۸	۷/۷۷	۹/۶۵	۹/۷۴
اراضی جابیزان و فجر	۷/۹۶	۴/۳۱	۳/۰۱	۵/۷۰	۶/۳۸	۱۲/۶۰	۱۳/۲۹	۳/۱۹	۲/۳۵	۷/۰۴	۹/۸۵	۱۰/۱۱
اراضی بهبهان شمال	۱۳/۶۳	۷/۸۵	۰/۸	۳/۶۴	۵/۰۲	۱۲/۴۱	۱۶	۹/۷۵	۷/۹۰	۱۱/۹۶	۱۴/۶۸	۱۴/۸۲
اراضی رامهرمز	۲۳/۸۱	۳۰/۴۶	۱۲/۳۰	۶/۶۱	۲۳/۶۰	۱۲/۲۲	۴/۷۷	۹/۳۱	۲۰/۵۰	۳۷/۹۲	۴۲/۹۴	۱۴/۰۱
اراضی بهبهان جنوب	۱۵/۷۹	۹/۹۵	۱/۰۱	۳/۷۵	۴/۷۸	۱۳/۷۳	۲۰/۰۳	۶۶/۱	۱۲/۶۴	۱۴/۰۵	۱۸/۲۳	۱۷/۶۷

جدول ۲. کمینه جریان زیست‌محیطی رودخانه مارون و جراحی (متر مکعب بر ثانیه)

نام گره	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر
زیست محیطی مارون	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷	۱۰/۳۷
زیست محیطی جراحی	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶	۱۲/۱۶

جدول ۳. میانگین تبخیر خالص از سطح آزاد مخازن مارون و جره (میلی متر)

نام سد	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر
مارون	۱۰۶/۴	۲۳/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جره	۱۳۳/۶	۴۶/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

ذره در نظر گرفته می‌شود که در محیط مساله در حال جست و جوست. در الگوریتم PSO فرآیند با یک مجموعه از جواب‌های تصادفی شروع می‌شود و با ارزیابی تابع برازش بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت تمام ذرات مشخص شده و در مرحله بعد با به روز کردن موقعیت و سرعت هر ذره برای یافتن جواب بهینه در محیط مساله به جست و جو می‌پردازد.

در یک مسئله D بعدی موقعیت i امین ذره در جمعیت با $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ و سرعت این ذره را با $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ نمایش می‌دهند اگر شماره تکرار را با n نمایش دهیم خواهیم داشت :

ساختار مدل بهینه ساز چند هدفه پیشنهادی

در این تحقیق از مدل الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ (MOPSO) استفاده گردید که به صورت چندهدفه تدوین شده است. الگوریتم تک‌هدفه PSO یکی از روش‌های الگوریتم‌های هوش تجمعی^۲ می باشد که Kennedy and Eberhart (1995) آن را معرفی نمودند. Coello Coello et al. (2004) برای اولین بار الگوریتم چندهدفه MOPSO را معرفی کردند. اساس این الگوریتم بر جستجو و تکرار در محیط مساله استوار است. در این الگوریتم هر جواب به صورت یک پرنده یا

1. Multi Objective Particle Swarm Optimization
2. Swarm Intelligence

$$F_1 = \text{Minimize} \left(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (1 - COV_{zdt}) \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

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

که در این فرمول :

COV_{zdt} : درصد تأمین نیاز d در دوره t در منطقه z به صورت اعشاری

TDW_{zdt} : حجم کل آب تحویلی به نیاز d در دوره t در منطقه z

MD_{zdt} : حجم کل آب مورد نیاز، نیاز d در دوره t در منطقه z

۲- کمینه نمودن میزان تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن:

$$F_2 = \text{Minimize} \left(\sum_{R=1}^k \sum_{t=1}^n \text{Max} \left(\left(1 - \frac{S_{tR}}{S_{minR}} \right), 0 \right) \right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن:

S_{tR} : حجم مخزن سد R در تراز نرمال در دوره t

S_{minR} : حجم مخزن سد R در تراز کمینه در دوره t

محدودیت‌ها :

$$TDW_{zdt} = SW_{zdt} + GW_{zdt} \quad (\text{رابطه ۷})$$

SW_{zdt} : حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به نیاز d در دوره t در منطقه z

GW_{zdt} : حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به نیاز d در دوره t در منطقه z

$$TSW_t = SW_{NB} + SW_{SB} + SW_{DI} + SW_{WRU} + SW_R + SW_{ADD} + SW_{WRD} + SW_{MIN} \quad (\text{رابطه ۸})$$

TSW_t : کل آب سطحی مورد نیاز

SW_{NB} : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی شمال بهبهان

SW_{SB} : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی جنوب بهبهان

SW_{DI} : کل آب سطحی برداشت شده برای نیاز شرب و صنعت

SW_{WRU} : کل آب سطحی برداشت شده برای حقابه سنتی بالادست

SW_R : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی رامهرمز

SW_{ADD} : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی کشاورزی پایین دست

$$V_{id}^{n+1} = \chi \cdot [w \cdot V_{id}^n + c_1 r_1^n (pbest_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 r_2^n (gbest_d^n - X_{id}^n)] \quad (\text{رابطه ۱})$$

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

که در روابط (۱) و (۲) χ ثابت انقباض نام دارد، c_1 و c_2 ضرایب ثابت و مثبت می‌باشند که معمولاً مقدار آن‌ها بین ۱/۵ تا ۲ در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰،۱) می‌باشند. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم مقدار نهایی سرعت ذره در بازه $[-V_{max}, V_{max}]$ محدود می‌شود. پارامتر w وزن اینرسی نامیده می‌شود که برای کنترل تأثیر سرعت‌های قبلی در همگرایی الگوریتم می‌باشد. در واقع تعادلی بین اکتشافات کلی و محلی برقرار می‌کند. می‌توان گفت که همگرایی شدیداً به این پارامتر بستگی دارد و بهتر است به صورت دینامیک تعریف شود. هر چه این مقدار بیشتر باشد جستجوی کلی افزایش می‌یابد و هر چه مقدار آن کم باشد میزان جستجوی محلی افزایش می‌یابد. مقدار w در هر تکرار طبق رابطه (۳) تعریف می‌گردد.

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{Iter_{max}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه (۳) w_{max} وزن اینرسی در ابتدای جست و جو، w_{min} وزن اینرسی در انتهای جست و جو، n شماره تکرار فعلی و $Iter_{max}$ تعداد کل تکرارها می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد مدل بهینه‌ساز این تحقیق به صورت چندهدفه تعریف شد که در آن تابع هدف اول بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف در مقابل تابع هدف دوم یعنی کمینه‌سازی میزان تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن قرار گرفت. توابع هدف و قیود در این تحقیق به صورت زیر تعریف شدند. توابع هدف:

۱- بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف:

$$F_1 = \text{Maximize} \left(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (COV_{zdt}) \right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

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

به دلیل این که الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده به دنبال کمینه کردن توابع هدف است می‌توان تابع فوق را به صورت زیر تعریف نمود:

گرفته شد که از این پس سناریوی وضع موجود نامیده می‌شود. با توجه به شروع و اجرای برخی طرح‌های توسعه‌ای منطقه که در یک سال اخیر اجرایی شده و یا وارد فاز اجرا شده‌اند، سناریوی دوم با در نظر گرفتن توسعه اراضی تحت پوشش سدها مطابق با چشم انداز ۲۰ ساله منطقه (سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ تا سال ۱۵-۱۴۱۴) تعریف گردید که در این پژوهش با عنوان سناریوی توسعه اراضی شناخته می‌شود. در این سناریو با توجه به افق برنامه‌ریزی ۲۰ ساله و شرایط توسعه‌ای که توسط ارگان‌های ذیربط مانند سازمان آب و برق خوزستان در نظر گرفته شده است. توسعه اراضی با در نظر گرفتن افزایش ۲۸۲۵ و ۶۰۰۰ هکتاری به ترتیب در سطح اراضی بهبهان و رامهرمز در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به طرح‌های توسعه‌ای و اجرای پروژه‌های کاداستر و یکپارچگی اراضی رامشیر و شادگان و تکمیل شبکه‌های آن‌ها در سال‌های آتی، میزان توسعه اراضی در آن‌ها مجموعاً در حدود ۶۲۴۰ هکتار در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است با توجه به اجرای شبکه‌های فوق‌الذکر به دلیل پیشگیری از تبعات اجتماعی و جلوگیری از ایجاد معارض در منطقه، میزان توسعه حقایبه‌های سنتی در محل بعد از تلاقی مارون و الله بر روی رودخانه جراحی حدود ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. در این سناریو در مناطق تحت پوشش سدها تخصیص آب شرب و صنعت به عنوان اولویت اول، نیاز زیست محیطی به عنوان اولویت دوم و نیاز کشاورزی دشت‌ها به عنوان اولویت سوم در نظر گرفته شد. همچنین عدم تخطی از تراز حداقل بهره‌برداری سد به عنوان قید در مدل تعریف شد که سامانه در تمام ماه‌ها ملزم به رعایت آن است.

سناریوی سوم که از این پس با عنوان سناریوی بهینه-ساز سامانه شناخته می‌شود بر اساس سناریوی توسعه اراضی پایه‌گذاری شده و اولویت‌های تخصیص در آن مشابه این سناریو در نظر گرفته شد. با این تفاوت که در این سناریو با هدف عملکرد بهتر سامانه، میزان آب رهاسازی شده در شرایط توسعه اراضی با استفاده از الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات بهینه گردید. همچنین در این سناریو سامانه مجاز به تخطی از تراز حداقل بهره‌برداری در ماه‌های با کم آبی شدید است ولی بخاطر اینکه تراز آب در این ماه‌ها به تراز مرده نزدیک نشود یکی از توابع هدف میزان تخطی را در طول دوره بهره‌برداری کمینه می‌کند.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به سناریوهای وضع موجود و توسعه اراضی درصد تأمین نیازها و میزان اطمینان‌پذیری تأمین نیازها در این

SW_{WRD} : کل آب سطحی برداشت شده برای حقایبه سنتی پایین دست

SW_{MIN} : کل آب سطحی برداشت شده برای نیاز زیست-محیطی

$$Q_{ct} \leq Q_{cmax} \quad (\text{رابطه ۹})$$

Q_{ct} : دبی کانال اصلی شبکه c در دوره t

Q_{cmax} : ظرفیت کل انتقال کانال اصلی شبکه c در دوره t

در این تحقیق جهت بهره‌برداری بهینه از سامانه، میزان رهاسازی آب از مخزن در هر ماه به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. اما با توجه به تعداد زیاد متغیرهای پیش رو و حجم بالای محاسبات، در بدنه مدل بهینه‌سازی MOPSO، از ضرایب رهاسازی جریان که به صورت دو ماهه در نظر گرفته شد، استفاده گردید. بر اساس این ضرایب، در هر دوره دو ماهه درصدی از حجم آب موجود در مخزن جهت تأمین نیاز مصارف پایین دست رها می‌گردد و مابقی جهت مدیریت بهتر مخزن بخصوص در شرایط کم آبی ذخیره می‌گردد. لذا با توجه به اعمال این ضرایب به صورت دو ماهه، تعداد ۱۲۰ متغیر تصمیم‌گیری در کل دوره بهره‌برداری ۲۰ ساله آبی (۹۶-۱۳۹۵ تا ۱۵-۱۴۱۴) در نظر گرفته شد.

ساختار مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

در این تحقیق الگوریتم تجمع ذرات چندهدفه (MOPSO) در نرم افزار MATLAB نوشته شده و به مدل WEAP متصل گردید. در این مدل اتصال یافته ابتدا توسط الگوریتم MOPSO بر اساس محدودیت‌های نوشته شده در مدل، مقادیر متغیرهای تصمیم ایجاد شده و وارد مدل شبیه ساز WEAP گشته و مدل اجرا می‌گردد. سپس نتایج حاصل از آن بر اساس توابع هدف تعریف شده توسط مدل بهینه‌ساز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و منحنی تبادل اهداف ترسیم می‌گردد. در صورت عدم تأمین اهداف مورد نظر، دوباره مدل بهینه‌ساز اجرا شده و جمعیت جدیدی تولید شده و وارد مدل شبیه‌ساز می‌گردد و این چرخه تا رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه ادامه می‌یابد. شرط توقف در این الگوریتم پس از اجراهای مختلف برنامه، در نهایت رسیدن به تعداد تکرار ۴۰۰ تعریف گردید.

سناریوهای مورد بررسی

قبل از شروع فرآیند بهینه‌سازی، سه سناریوی مدیریتی در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد تا در ادامه نتایج آن‌ها با هم مقایسه گردد. در هر سه سناریو طول دوره شبیه‌سازی ۲۰ سال در نظر گرفته شد. سناریوی نخست بر اساس وضع موجود بهره‌برداری و رهاسازی جریان مطابق با دستورالعمل قبل در نظر

سناریوها مطابق با جدول‌های (۴) و (۵) برای مصارف مختلف توسط مدل محاسبه گردید. مطابق با جدول‌های (۴) و (۵) به دلیل تعیین اولویت بالاتر برای نیاز شرب، در هر دو سناریو نیاز شرب و صنعت در تمامی ماه‌ها به‌طور کامل تأمین می‌شود.

جدول ۴. میانگین شاخص‌های درصد تأمین و اعتمادپذیری نیازها (سناریوی وضع موجود)

اطمینان پذیری	درصد تأمین نیاز											نیازها	
	شرب	صنعت	کشاورزی	زیست محیطی	تأمین	اعتمادپذیری	تأمین	اعتمادپذیری	تأمین	اعتمادپذیری	تأمین		اعتمادپذیری
۸۳/۸	۶۰	۷۰/۴	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۷/۱	۹۶/۵	۹۰/۷	۹۱/۶	۶۸	۶۰	اراضی رامشیر و شادگان
۸۳/۸	۶۰	۷۰/۴	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۷/۱	۹۶/۵	۹۰/۷	۹۱/۶	۶۸	۶۰	حقابه سنتی جراحی
۸۶/۳	۶۰/۱	۷۰/۱	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۹۵/۳	۸۴/۱	۶۰/۵	حقابه سنتی مارون
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	شرب و صنعت بهبهان
۸۲/۹	۶۲/۴	۷۰/۳	۹۵/۳	۹۶	۹۵/۸	۹۵/۲	۹۵/۲	۹۵/۴	۹۱/۲	۹۲/۶	۶۸/۸	۶۲/۳	اراضی جایزان و فجر
۸۲/۹	۶۲/۴	۷۰/۲	۹۵/۳	۹۵/۴	۹۵/۴	۹۵/۲	۹۵/۲	۹۵/۶	۹۱/۶	۹۷/۸	۶۸/۲	۶۲/۳	اراضی بهبهان شمال
۸۳/۸	۸۳/۲	۷۲/۴	۸۲/۳	۹۷/۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۹	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۷۴/۷	اراضی رامهرمز
۸۲/۹	۶۲/۴	۷۰/۲	۹۵/۳	۹۵/۴	۹۵/۴	۹۵/۲	۹۵/۲	۹۵/۶	۹۱/۵	۹۶/۳	۶۸/۱	۶۲/۳	اراضی بهبهان جنوب
۸۸/۸	۷۱/۵	۸۹/۴	۹۵/۹	۹۶/۴	۹۷/۶	۹۹/۳	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۳	۹۷/۸	۹۶	۸۴/۸	زیست محیطی مارون
۸۷/۹	۷۱/۵	۸۸/۶	۹۵/۸	۹۶/۳	۹۷/۶	۹۹/۶	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۷	۹۷/۸	۹۶/۱	۸۴/۲	زیست محیطی جراحی
۹۳/۳	۹۱/۴	۹۸/۱	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۱	۹۹/۱	۹۱/۷	نیاز برقایی مارون

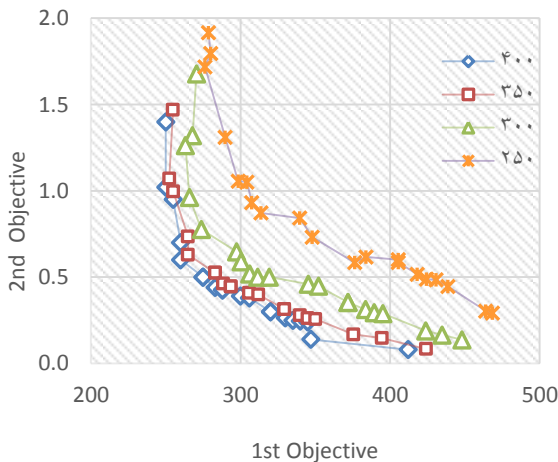
جدول ۵. میانگین شاخص‌های درصد تأمین و اعتمادپذیری نیازها (سناریوی توسعه اراضی)

اطمینان پذیری	درصد تأمین نیاز											نیازها	
	شرب	صنعت	کشاورزی	زیست محیطی	تأمین	اعتمادپذیری	تأمین	اعتمادپذیری	تأمین	اعتمادپذیری	تأمین		اعتمادپذیری
۷۸/۳	۵۵	۶۰	۷۳	۸۶	۹۰	۹۳/۱	۹۶/۴	۹۶/۱	۸۹/۷	۹۱/۱	۶۶/۷	۶۰	اراضی رامشیر و شادگان
۷۸/۳	۵۵	۶۰	۷۳	۸۶	۹۰	۹۳/۱	۹۶/۴	۹۶/۱	۸۹/۷	۹۱/۱	۶۶/۷	۶۰	حقابه سنتی جراحی
۸۲/۱	۵۵	۶۰	۷۵	۹۰	۹۰	۹۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۹۵/۳	۸۲	۶۰	حقابه سنتی مارون
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	شرب و صنعت بهبهان
۷۷/۱	۵۷/۳	۶۰/۲	۷۲/۱	۸۷/۲	۹۱/۳	۹۰/۳	۹۱/۴	۹۵/۳	۸۶/۳	۹۲/۲	۶۸/۲	۶۱/۹	اراضی جایزان و فجر
۷۷/۱	۵۷/۳	۶۰/۲	۷۱/۸	۸۵/۶	۹۰/۶	۹۰/۴	۹۱/۴	۹۵/۵	۸۷	۹۶/۵	۶۷/۷	۶۱/۹	اراضی بهبهان شمال
۷۹/۲	۸۰	۶۶/۵	۷۰/۸	۹۱/۱	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۹	۹۶/۷	۱۰۰	۹۹/۱	۸۶/۷	۷۲/۲	اراضی رامهرمز
۷۷/۱	۵۷/۳	۶۰/۲	۷۱/۸	۸۵/۵	۹۰/۶	۹۰/۳	۹۱/۴	۹۵/۵	۸۶/۸	۹۵/۲	۶۷/۶	۶۱/۹	اراضی بهبهان جنوب
۸۴/۲	۶۵/۳	۷۱/۹	۸۵/۳	۹۲/۸	۹۵/۴	۹۹/۳	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۳	۹۷/۸	۹۶	۸۲/۸	زیست محیطی مارون
۸۳/۳	۶۵/۳	۷۲/۱	۸۴/۵	۹۲/۷	۹۵/۷	۹۹/۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۵	۹۷/۸	۹۶	۸۲	زیست محیطی جراحی
۹۰/۴	۸۹/۹	۹۵/۷	۹۶/۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۱	۹۹/۱	۹۱/۱	نیاز برقایی مارون

موجود و توسعه اراضی مربوط به مردادماه به ترتیب به میزان ۷۲/۴ و ۶۶/۵ درصد می‌باشد. در ماه‌های دیگر تقریباً نیازها با درصدهای تأمین مناسبی تأمین می‌شوند. وضعیت تأمین نیاز زیست محیطی در سناریوی وضع موجود در تمامی ماه‌ها بجز شهریور مطلوب می‌باشد. در سناریوی توسعه اراضی به دلیل تعریف اولویت تخصیص بالاتر نیاز زیست محیطی نسبت به کشاورزی در مدل، این نیاز حتی در ماه‌های کم‌آبی مانند مرداد و شهریورماه درصد تأمین بالاتری (حدود ۶۵ تا ۷۲ درصد)

در این سناریوها کم‌ترین میزان متوسط درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی حوضه مارون و جراحی مربوط به ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و آبان می‌باشد. بطوری‌که بیش‌تر نیازها در شهریور ماه در سناریوی وضع موجود درصد تأمین بین ۶۰ تا ۶۲/۴ و در توسعه اراضی درصد تأمین بین ۵۵ تا ۵۷ درصد دارند و از این نظر اراضی رامشیر و شادگان و حقابه سنتی جراحی در بدترین وضعیت قرار دارند. کم‌ترین متوسط درصد تأمین اراضی رامهرمز در حوضه الله نیز در سناریوهای وضع

پس از انجام بهینه‌سازی، با توجه به اندازه جمعیت ۲۴۰ و اجرای مدل MOPSO برای ۴۰۰ تکرار، در مدت ۱۴ روز و ۱۰ ساعت و ۴۷ دقیقه جواب‌های نزدیک به بهینه حاصل شد و منحنی تبادل بهینه (گراف پارتو^۱) بین اهداف بهینه‌سازی (تابع بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز مصارف و تابع کمینه‌سازی تخطی از تراز حداقل بهره‌برداری مخزن) به دست آمد. برای مشاهده نحوه همگرایی الگوریتم، منحنی تبادل اهداف در تکرارهای متفاوت در مقایسه با آخرین تکرار در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. منحنی تبادل اهداف بهینه‌سازی (منحنی پارتو) در تکرارهای متفاوت

مطابق با روش MOPSO، در هر تکرار بهترین جواب‌ها بر اساس ارزش‌گذاری توابع هدف انتخاب می‌شوند و تحت عنوان مجموعه ذخیره بهینه^۲ جهت انتقال به مرحله بعد ذخیره می‌گردند. نقاط به شکل ستاره ترسیم شده در گراف پارتو همان جواب‌های بهینه مدل بوده و دایره‌های سیاه نشان دهنده آخرین جمعیت تولید شده در فضای تصمیم مسئله در آخرین تکرار است. محورهای این گراف توابع هدف مورد نظر می‌باشند. این منحنی بر اساس مجموعه ۲۰ جواب بهینه بر اساس توابع هدف F_1 و F_2 در آخرین تکرار در شکل (۴) نشان داده شده است.

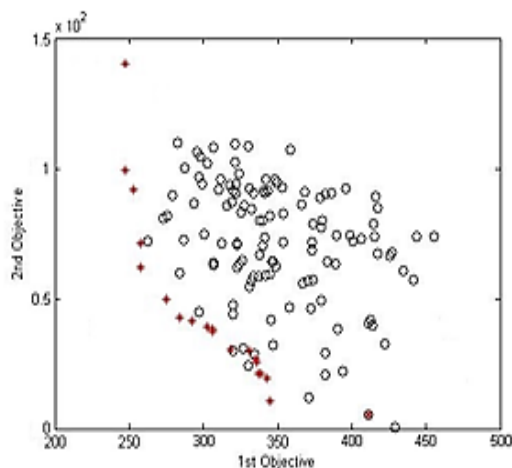
در آخرین تکرار مدل، ۲۰ جواب بهینه ارائه شد که از بین آن‌ها با توجه به ارزش‌گذاری توابع هدف، راه حلی که دارای کم‌ترین میزان جریمه ناشی از تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن و بیش‌ترین میزان درصد تأمین نیاز بود به عنوان جواب برتر انتخاب شد. سپس این متغیرهای بهینه در مدل آب سطحی WEAP وارد شد. پس از انجام مراحل بهینه‌سازی در این سناریو متوسط درصد تأمین نیازها و میزان اطمینان‌پذیری

نسبت به اراضی کشاورزی منطقه دارد اما همچنان رضایت بخش نیست. درصد تأمین نیاز برقابی در هر دو سناریو در بیش‌تر ماه‌ها بیش از ۹۰ درصد است که بسیار مطلوب ارزیابی می‌گردد. در شرایط وضع موجود درصد تأمین نیاز اکثر نیازها بیش از ۸۰ درصد بوده که نشان می‌دهد منطقه از این نظر در شرایط قابل قبولی قرار دارد. اما در سناریوی توسعه اراضی که با توجه به اجرایی شدن طرح‌های توسعه‌ای جدید در منطقه تهیه شده، اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای کشاورزی و حبابه سنتی غالباً به زیر ۸۰ درصد رسید. به غیر از حبابه سنتی مارون و نیاز شرب و صنعت که هر کدام به ترتیب ۸۲ و ۱۰۰ درصد اوقات تأمین می‌شوند سایر نیازها در میان ۷۷ تا ۷۹ درصد اوقات تأمین می‌گردند که در جدول (۵) قابل مشاهده است. اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای زیست‌محیطی مارون و جراحی نیز تقریباً به یک میزان و به ترتیب حدود ۸۴ و ۸۳ درصد می‌باشد. اطمینان‌پذیری تأمین نیاز برقابی سد مارون نیز در حدود ۹۰ درصد محاسبه شد. اما نکته قابل توجه در این سناریو وجود ماه‌های خشک متوالی با درصد تأمین صفر یا کمتر از ۶ درصد در طول دوره ۲۰ ساله بهره‌برداری است که باعث ایجاد تبعات اجتماعی و خسارات گسترده اقتصادی در منطقه‌ای که اشتغال و درآمد بیش از ۱۲۰ هزار نفر مردم منطقه به کشاورزی گره خورده است خواهد شد. لذا سناریوی ارائه شده در ادامه تحقیق به دنبال راهکاری برای تعدیل شدت شکست در چنین شرایطی می‌باشد.

نتایج حاصل از سناریوی بهینه‌سازی سامانه

همان‌طور که گفته شد فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم چندهدفه MOPSO انجام شد. در این فرایند تعداد ۱۲۰ متغیر تصمیم‌گیری به عنوان درصد آب رهاسازی شده از مخزن به صورت دوره‌های ۲ ماهه، در طول دوره بهره‌برداری ۲۰ ساله آبی تحت شرایط توسعه اراضی در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن تابع چندهدفه جهت دسترسی به جواب‌های نزدیک به بهینه، این متغیرها بهینه گردیدند. اجراهای مکرر مدل نشان داد برای رسیدن به نتایج بهتر، جمعیت اولیه ذرات باید حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد که در این تحقیق تعداد جمعیت اولیه در مدل در حدود ۲۴۰ انتخاب شد. در مراحل اولیه، انتخاب جمعیت بیشتر، سرعت همگرایی را به شدت افزایش داد. لذا در نهایت به دلیل جلوگیری از صرف زمان زیاد، مدل با همین تعداد جمعیت اجرا شد. با توجه به پیچیدگی مسأله و تعداد متغیرهای زیاد، تعداد تکرار الگوریتم جهت رسیدن به همگرایی در حدود ۴۰۰ در نظر گرفته شد. در نهایت

1. Pareto-optimal Front
2. Repository



شکل ۴. منحنی تبادل بهینه بین اهداف بهینه‌سازی (منحنی پارتو) در تکرار ۴۰۰

تأمین نیازها مطابق با جدول (۶) برای مصارف مختلف توسط مدل محاسبه گردید.

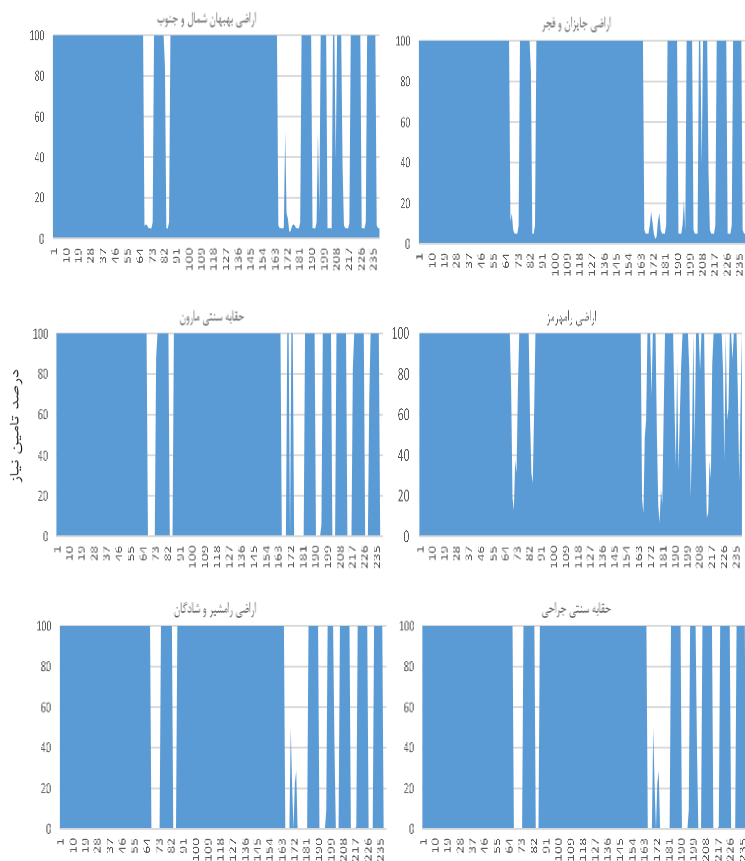
مطابق با این جدول در این سناریو نیاز شرب و صنعت در تمامی ماه‌ها به طور کامل تأمین می‌شود. همچنین متوسط درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی حوضه مارون و جراحی مربوط به ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و آبان حدود ۷۰/۴ تا ۸۲/۸ درصد است و نسبت به سناریوی قبل حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد ارتقاء یافته است که قابل توجه بوده و نشان از کاهش شدت شکست در این ماه‌های کم آب دارد. میزان تأمین نیاز تیرماه نیز حدود ۷ درصد افزایش یافته است. در سایر ماه‌ها میزان تأمین نیاز کاملاً رضایت بخش بوده و بین ۸۸ تا ۱۰۰ درصد است.

جدول ۶. میانگین شاخص‌های درصد تأمین و اطمینان‌پذیری نیازها (سناریوی بهینه‌سازی سامانه)

نیازها	درصد تأمین نیاز												
	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	
اراضی رامشیر و شادگان	۷۱/۳	۷۰/۵	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۹	۹۲/۷	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۷	۷۵/۱
حقابه سنتی جراحی	۷۱/۳	۷۰/۵	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۹	۹۲/۷	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۷	۷۵/۱
حقابه سنتی مارون	۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۹	۹۵/۹	۹۱/۹	۹۲/۸	۸۲/۸	۷۵/۱
شرب و صنعت بهبهان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
اراضی جایزان و فجر	۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۸	۷۵/۱
اراضی بهبهان شمال	۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۸	۷۵/۱
اراضی رامهرمز	۸۰/۴	۹۲/۸	۷۸	۷۹/۲	۹۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴	۹۶/۱	۱۰۰	۹۹/۷	۹۲/۷	۸۲/۲
اراضی بهبهان جنوب	۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۸	۷۵/۱
زیست محیطی مارون	۸۲/۹	۷۷/۵	۸۵/۶	۸۷/۷	۹۲/۲	۹۵	۹۸/۲	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴	۹۷/۹	۹۷/۷	۸۹/۲
زیست محیطی جراحی	۸۶/۳	۸۰/۱	۸۷/۵	۸۷/۸	۹۲/۷	۹۶/۴	۹۹/۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۲	۱۰۰	۹۲/۹
نیاز برقایی مارون	۹۶/۳	۹۷/۵	۹۸/۱	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴	۹۹/۴	۹۴/۸

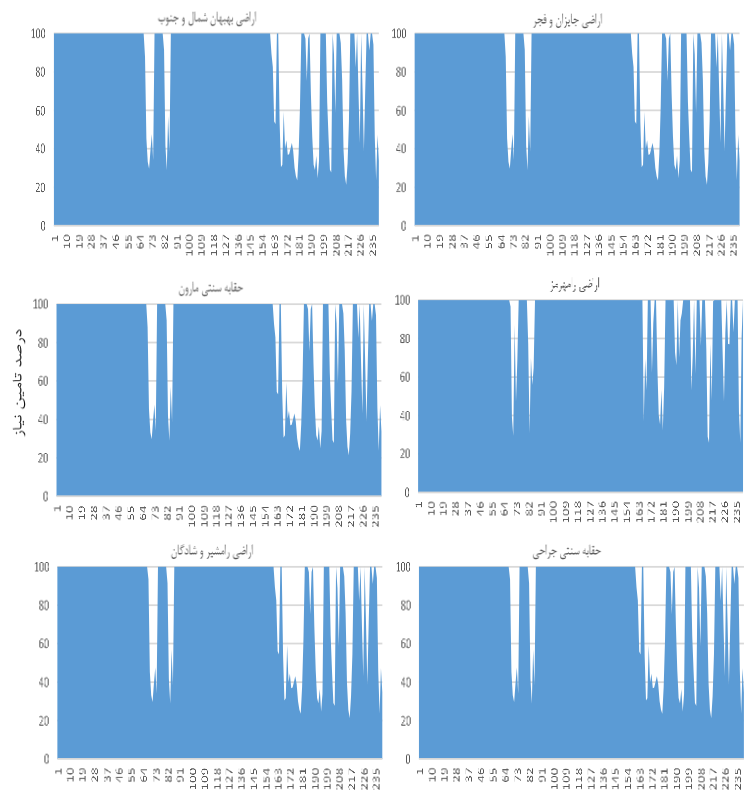
شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵) مشخص است در بسیاری از سال‌های خشک و در تمامی سال‌های آخر برنامه‌ریزی (۱۴۰۹ تا ۱۴۱۵) در بیش‌تر مصارف بخصوص اراضی رامشیر و شادگان و حقابه‌های سنتی مارون و جراحی درصد تأمین نیاز در سه تا هشت ماه خشک متوالی صفر است. در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز به ترتیب در هفت و سه ماه متوالی درصد تأمین این نیاز صفر می‌باشد. در بقیه سال‌های خشک درصد تأمین نیاز این ماه‌ها کمتر از پنج درصد است. این امر خسارات جبران ناپذیر اقتصادی و تبعات منفی اجتماعی در منطقه به دنبال خواهد داشت.

نکته قابل توجه این است که مدل بهینه‌ساز تعریف شده سعی در کاهش شدت شکست در ماه‌های کم‌آب داشته لذا مطابق با نتایج به‌دست آمده مقداری از آب در ماه‌های پرآب بهمن تا فروردین در مخزن ذخیره شده و بسته به میزان کمبود بین ماه‌های کم آب بخصوص مرداد تا آبان تقسیم گشته است. پس مقدار درصد تأمین نیاز ماه‌های پر آب مقداری کاهش داشته است اما همچنان از درصد تأمین بسیار خوبی برخوردار است. جهت بررسی و مقایسه این موضوع، درصد تأمین نیازهای کشاورزی محدوده مطالعاتی در کل دوره برنامه‌ریزی (۲۴۰ ماه) در دو سناریوی توسعه اراضی و بهینه‌سازی سامانه به ترتیب در



ماه‌های بهره‌برداری

شکل ۵. درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی مارون و جراحی در ماه‌های بهره‌برداری - سناریوی توسعه اراضی



ماه‌های بهره‌برداری

شکل ۶. درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی مارون و جراحی در ماه‌های بهره‌برداری - سناریوی بهینه‌سازی سامانه

مطابق با شکل (۶) با اجرای مدل بهینه‌ساز درصد تأمین نیاز در ماه‌هایی که در سناریوی قبل صفر درصد بود به مقدار ۲۸ تا ۶۰ درصد می‌رسد و در بیش‌تر ماه‌های خشک حدود ۴۵ درصد است. این امر نشان می‌دهد که مدل بهینه‌ساز به خوبی توانسته شدت شکست را در بدترین حالت و در سال‌هایی با سه تا هشت ماه خشک متوالی که درصد تأمین صفر بوده را کاهش دهد. این موضوع به دلیل رویکرد مدل بهینه‌ساز با توجه به توابع هدف تعریف شده در آن در ذخیره‌سازی از آب در ماه‌های پرآب و جیره‌بندی آن در ماه‌های کم آب می‌باشد. از طرفی این امر باعث شده اطمینان‌پذیری تأمین نیاز در کل دوره حدود ۶ تا ۷ درصد کاهش یافته و بخصوص در مصارف کشاورزی از حدود ۷۸/۳ به ۷۱/۳ درصد برسد. با توجه به این که در این مدل اطمینان‌پذیری از نسبت تعداد ماه‌هایی که درصد تأمین ۱۰۰ درصد است به کل ماه‌های دوره برنامه‌ریزی محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به اعمال جیره‌بندی در مدل مقداری از نیاز در ماه‌های پرآب ذخیره‌گشته تا در ماه‌های کم آب مصرف شود لذا درصد تأمین ماه‌های پرآب کمتر از ۱۰۰ درصد می‌شود لذا در کل دوره اطمینان‌پذیری پایین می‌آید. درصد تأمین نیاز برقابی نیز در این سناریو در بیش‌تر ماه‌ها بیش از ۹۵ درصد است که بسیار مطلوب بوده و دست‌کم ۵ درصد افزایش را نسبت به سناریوی قبل نشان می‌دهد. اطمینان‌پذیری تأمین نیاز برقابی سد مارون نیز در حدود ۹۶ درصد محاسبه شد. درصد تأمین نیاز زیست‌محیطی در ماه‌های کم آب مرداد تا مهر حدود ۷ تا ۱۵ درصد بیش‌تر شده است. همچنین اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای زیست‌محیطی مارون و جراحی نیز به ترتیب حدود ۸۳ و ۸۶ درصد می‌باشد که قابل قبول بوده و حدود ۳ تا ۵ درصد بهبود یافته است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد در صورت ادامه سیاست بهره‌برداری بر اساس وضع موجود اکثر نیازها و مصارف در دو حوضه سدهای مارون و جره در حد قابل قبولی تأمین می‌گردد. اما با اجرایی شدن طرح‌ها و پروژه‌های جدید که برخی از آنها در شرف بهره‌برداری قرار دارند، سامانه در تأمین مصارف بخصوص در ماه‌های کم آب مشکل جدی خواهد داشت. این شرایط نیاز به طراحی الگویی مناسب برای بهره‌برداری بهتر و مناسب‌تر جهت نیل به اهداف مورد نظر دارد. در این پژوهش با استفاده از یک ساختار چندهدفه و بهره‌گیری از فرمول‌بندی‌های جدید روشی ارائه شده است که در آن بجای افزایش اطمینان‌پذیری بر اساس تأمین نیاز ۱۰۰ درصد در برخی ماه‌ها بدون توجه به

ماه‌های خشک، مقداری از آب ماه‌ها یا فصول پرآب در مخزن ذخیره شده و با استفاده در ماه‌های کم آب شدت شکست تعدیل گردید. در این ساختار برخلاف الگوریتم تک‌هدفه ارائه شده توسط Rafiee Anzab *et al.* (2016)، از یک تابع چندهدفه بهره گرفته شده و همچنین بجای استفاده از نرم افزار اکسل برای اجرای اتوماتیک WEAP، با استفاده از کدنویسی در محیط متلب و همچنین یک میان برنامه در محیط ویژوال بیسیک ساختار بهینه‌ساز (MOPSO) و شبیه‌ساز (WEAP) به هم متصل شد. پس از انجام بهینه‌سازی، با توجه به اندازه جمعیت ۲۴۰ و اجرای مدل MOPSO برای ۴۰۰ تکرار، در مدت ۱۴ روز و ۱۰ ساعت و ۴۷ دقیقه جواب‌های نزدیک به بهینه حاصل شد. نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌ساز نشان داد میانگین درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی حوضه مارون و جراحی مربوط به ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و آبان حدود ۷۰/۴ تا ۸۲/۸ درصد بوده که نسبت به سناریوی توسعه اراضی حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد ارتقاء یافته است. مطابق با نتایج در سناریوی توسعه اراضی در بسیاری از سال‌های خشک و در تمامی سال‌های آخر برنامه‌ریزی (۱۴۰۹ تا ۱۴۱۵) در بیش‌تر مصارف بخصوص اراضی رامشیر و شادگان و حقایبه‌های سنتی مارون و جراحی درصد تأمین نیاز در سه تا هشت ماه خشک متوالی صفر است. در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ نیز به ترتیب در هفت و سه ماه متوالی درصد تأمین این نیاز صفر می‌باشد. همچنین در بقیه سال‌های خشک درصد تأمین نیاز این ماه‌ها کمتر از پنج درصد است که این شرایط به هیچ وجه مطلوب نبود. اما با اجرای مدل بهینه‌ساز درصد تأمین نیاز در ماه‌هایی که در سناریوی قبل صفر درصد بود به مقدار ۲۸ تا ۶۰ درصد رسید و در بیش‌تر ماه‌های خشک حدود ۴۵ درصد محاسبه شد. این امر نشان داد که مدل بهینه‌ساز به خوبی توانسته شدت شکست را در بدترین حالت و در سال‌هایی با سه تا هشت ماه خشک متوالی کاهش دهد. این موضوع به دلیل رویکرد مدل بهینه‌ساز با توجه به توابع هدف تعریف شده در آن در ذخیره‌سازی از آب در ماه‌های پرآب و جیره‌بندی آن در ماه‌های کم آب بود. نتایج نشان داد با توجه به اعمال جیره‌بندی در مدل، مقداری از نیاز در ماه‌های پرآب ذخیره‌گشته تا در ماه‌های کم آب مصرف شود لذا درصد تأمین ماه‌های پرآب کمتر از ۱۰۰ درصد می‌شود لذا در کل دوره اطمینان‌پذیری پایین می‌آید. در سناریوی بهینه‌سازی سامانه اطمینان‌پذیری تأمین نیاز برقابی سد مارون در حدود ۹۶ درصد محاسبه شد که نسبت به سناریوی توسعه اراضی کمی بهبود یافت. درصد تأمین نیاز زیست‌محیطی در ماه‌های کم آب مرداد تا مهر حدود ۷ تا ۱۵ درصد بیشتر شد. همچنین

اقلیم خشک که به ناچار در چند ماه از سال با کم‌آبی شدید مواجه هستیم راهکار مناسبی نبوده و منجر به ایجاد خسارات مالی و تبعات اجتماعی جبران‌ناپذیر می‌گردد. در عوض استفاده از راهکار این تحقیق منجر به مدیریت بهتر مخزن و کاهش شدت شکست در تأمین مصارف در ماه‌های کم‌آب خواهد شد.

REFERENCES

- Aboutalebi, M., Bozorg Haddad, O. and Loáiciga H.A. (2015). Optimal Monthly Reservoir Operation Rules for Hydropower Generation Derived with SVR-NSGAI. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(11), 04015029-9.
- Ashofteh, P. S, Bozorg Haddad, O. and Loáiciga H.A. (2015). Evaluation of Climatic-Change Impacts on Multiobjective Reservoir Operation with Multiobjective Genetic Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(11), 04015030-9.
- Azarafza, H., Rezaei, H., Behmanesh, J. and Besharat, S. (2012). Results Comparison of Employing PSO, GA and SA Algorithms in Optimizing Reservoir Operation (Case Study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). *Journal of Water and Soil*, 26(5), 1101-1108. (In Farsi)
- Azari, A., Akhoond-Ali, A.M., Radmanesh, F. and Haghighi, A. (2015). Groundwater-Surface Water Interaction Simulation in Terms of Integrated Water Resource Management (Case Study: Dez Plain). *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 38(2), 33-47. (In Farsi)
- Borhani Dariane, A. and Mortazavi Naeini, S.A. (2008). Comparison of Heuristic Methods Applied for Optimal Operation of Water Resources. *Water and Waste Water*, 19(4), 57-66. (In Farsi)
- Coello C. A., Pulido G. T. and Lechuga M. S. (2004). Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation Journal*, 8(3)
- Dariane, A.B. and Moradi, A.M. (2008). Reservoir Operating by Ant Colony Optimization for Continuous Domains (ACO_R) Case Study: Dez Reservoir. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 2(7), 136-140
- Esat, V. and Hall, M.J. (1994). Water resources system optimization using genetic algorithms. *Hydroinformatics '94*, In: *Proceedings 1st International Conference on Hydroinformatics*, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 225-231.
- Fahmy, H.S., King, J.P., Wentzel, M.W. and Seton, J.A. (1994). Economic optimization of river management using genetic algorithms. Paper No. 943034, *ASAE 1994 International Summer Meeting*, American Society Of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich
- Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H.A. and Mariño, M.A. (2016). Application of the Firefly Algorithm to Optimal Operation of Reservoirs with the Purpose of Irrigation Supply and Hydropower Production, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(10)
- Hojati, A., Farid-Hoseini, A., Ghahreman, B. and Alizadeh, A. (2013) Comparison of heuristic techniques in multi-objective optimization of water resources systems. *Iran Water and Environmental Engineering*, 1(2): 9-14.
- Jalali, M.R., Afshar, A. and Marino, M.A. (2006). Reservoir Operation by Ant Colony Optimization Algorithms. *Iranian Journal of Science & Technology*, 30(B1), 107-117
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1942-1945.
- Moeini, R., Afshar, M.H. (2009). Application of an Ant Colony Optimization Algorithm for Optimal Operation of Reservoirs: A Comparativ Study of Three Proposed Formulations. *Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering*, 16(4), 273-285
- Nabi Nejad, Sh. and Mousavi, S.J. (2013). Simulation-optimization for Basin-wide Optimum Water Allocation Considering System's Performance and Equity Measures. *Water and Waste Water*, Vol. 24, Number 2 (86), 70-79 (In Farsi)
- Oliveira, R. and Loucks, D. (1997). Operating rules for multireservoir systems. *Water Resource Research*, 33(4), 839-852.
- Rafiee Anzab, N., Mousavi, S.J., Roustab, B.A. and Kim, J.H. (2016). Simulation Optimization for Optimal Sizing of Water Transfer Systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA2015)* 382, 365-375.
- Rezaei, F., Safavi, H. R., Mirchi, A. and Madani K. (2016). f-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Journal of Hydro-environment Research*, 14 (2016), 1-18.
- Saber Chenari, K., Abghari, H., Erfanian, M. and Gholizadeh, S. (2013). Short-term model of optimization operation of water resources using particle swarm optimization and compared with genetic algorithm. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, No. 97, 63-72 (In Farsi)

SaberChenari, K., Abghari, H. and Tabari, H. (2016). Application of PSO algorithm in short-term optimization of reservoir operation. *Environmental Monitoring and Assessment*, (2016) 188-667.

Shourian,m., Mousavi,S.J. and Tahershamsi,A., (2008). Basin-wide Water Resources Planning by

Integrating PSO Algorithm and MODSIM. *Water Resources Management* 22,1347-1366

Zhang,J., Wu, Z., Cheng,C. and Zhang,S. (2011) Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. *Water Science and Engineering*, 4(1), 61-73