Arch

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و پنجم، شماره پنجم، ۱۳۹۷
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2018.12334.2691

تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از مخزن به‌صورت چندهدفه در راستای توسعه پایدار

سید یونس حسینی[۱]، *مهدی ناصری[۲] و صادق صادقی طبس[۳]

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه بیرجند، [۲]استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند،
[۳]دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۲۰

چکیده

سابقه و هدف: مسائل بهره‌برداری از مخزن دارای اهداف مختلف و متنوع هستند که به ندرت منتهی به یک جواب بهینه می‌شوند و معمولاً در آن‌ها مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه (پارتو) موجود است. حل مسائل فوق در گذشته تنها با کاربرد روش‌های ساده‌کننده میسر بوده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از ضرایب وزنی برای اهداف مختلف و تبدیل آن‌ها به یک تابع هدف استفاده کرد. اما در سال‌های اخیر با توسعه الگوریتم‌های چند هدفه تکامل‌گرا، ابزار مناسبی برای حل آن‌ها فراهم شده است. در این راستا، هدف پژوهش حاضر، بررسی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO، SPEA-II و NSGA-II در مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از مدل‌های بهره‌برداری LDR، N-LDR جهت تولید پاسخ‌های بهینه پارتو در راستای توسعه پایدار و مقایسه نتایج با سیاست بهره‌برداری SOP است.

مواد و روش‌ها: جهت نیل به هدف مذکور، ابتدا روش‌های بهینه‌سازی MOPSO، NSGA-II و SPEA-II برای هر یک از توابع استاندارد خانواده ZDT با شرایط یکسان (تعداد جمعیت و تعداد اجرا برابر) مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از توابع استاندارد خانواده ZDT، مدل‌های بهره‌برداری از مخزن LDR، NLDR و SOP در محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شده و با روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه تلفیق گردیدند. برای هر یک از دو مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی (LDR و NLDR) دو تابع هدف بدین‌شرح تعریف گردید، تابع هدف اول کمینه‌سازی مجموع درصد کمبودهای برآورد نشده و تابع هدف دوم بیشینه‌سازی اعتمادپذیری که بیشینه آن در شرایط بهره‌برداری SOP حاصل می‌گردد. مدل‌های بهره‌برداری از مخزن برای یک دوره ۳۷ ساله از سال ۱۳۵۶ تا ۱۳۹۲، جهت یافتن ضرایب مربوطه در هر دو مدل خطی و غیرخطی، در شرایط یکسان برای هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه به تعداد ۵۰۰۰ تکرار اجرا گردید و جبهه پارتو بهینه حاصل شد.

* مسئول مکاتبه: mnaseri@birjand.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

یافته‌ها: با بررسی نتایج حاصله مشاهده شد روش SPEA-II در مدل بهره‌برداری NLDR به نتایج مناسب‌تری دست یافته است بنابراین از میان پاسخ‌های جبهه پارتوی بهینه حاصله از این روش، سه پاسخ به عنوان نمونه (با استفاده از معیارهای مختلف) انتخاب گردید و شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و MSI برای سه پاسخ مذکور محاسبه شد. با مقایسه مقادیر توابع هدف و سایر معیارهای توسعه پایدار در پاسخ NLDR-C و شرایط می‌توان مشاهده نمود با به‌کارگیری مدل بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان با میزان کمبود کم‌تر (MSI ۲۱/۷۶ نسبت به ۵۵) تقریباً به ماکزیمم اعتمادپذیری (اعتمادپذیری در شرایط SOP) دست یافت. حال آن‌که در پاسخ NLDR-A کم‌ترین میزان کمبود (MSI برابر ۱۳/۰۲) به نسبت سایر پاسخ‌های نمونه و سیاست SOP به چشم می‌خورد.

نتیجه‌گیری: با توجه به یافته‌های پژوهش مشاهده شد روش بهینه‌سازی SPEA-II در تمامی توابع استاندارد خانواده ZDT به جبهه پارتوی مطلوب‌تری نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی دست یافته است. همچنین این روش در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی دارای جبهه کامل‌تری از جواب‌های پارتو می‌باشد که این امر نشان از کارایی این روش بهینه‌سازی در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه دارد. همچنین در رابطه با مدل‌های بهره‌برداری LDR و NLDR با تعداد تکرار یکسان، مشاهده شد مدل بهره‌برداری غیرخطی نتایج بهتری از خود نشان داده است که این امر می‌تواند به‌دلیل درجه آزادی بیش‌تر رابطه غیرخطی در تعیین منحنی فرمان رهاسازی مخزن سد باشد. در این پژوهش مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه (بهینه پارتو) جهت برآورده نمودن اهداف مذکور ارائه گردید. اما انتخاب بهترین گزینه به عنوان سیاست بهینه بهره‌برداری بر عهده مسئولین امر و سیاست‌گذاران مربوطه است تا با لحاظ نمودن معیارهای اقتصادی، اجتماعی و پیامدهای زیست‌محیطی، بهترین جواب بهینه از میان سایر جواب‌های بهینه پارتو گزیده و منحنی‌فرمان متناظر با جواب منتخب تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، توسعه پایدار، سد نهرین طبس، سیاست بهینه بهره‌برداری

مقدمه

منابع آب سطحی در ایران سهم عمده‌ای را در تامین نیاز آبی بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت دارا می‌باشند. در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت، رشد تقاضا، محدودیت منابع آب و هزینه‌های کلان مهار و تامین آب با اجرای طرح‌های جدید توسعه منابع آب، موجب شده که مدیریت بهره‌برداری از منابع و امکانات موجود بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. به این منظور، مدیران جهت برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب به‌خصوص مخازن سدها به عنوان یکی از سازه‌های آبی ذخیره‌کننده منابع آب سطحی و رواناب‌ها، نیاز به اتخاذ سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن را دارند. میزان آبدهی رودخانه‌ها که از اصلی‌ترین منابع آب سطحی به‌شمار می‌روند، در طول سال تغییرات بسیاری دارد. بنابراین آبدهی رودخانه و نیازها از نظر زمانی با یکدیگر همخوانی ندارند و اعتمادپذیری تامین آب بدین‌صورت به‌شدت کاهش می‌یابد که ممکن است خسارات زیادی به بخش‌های مصرف‌کننده آب وارد آورد. از این‌رو جهت استفاده مناسب و کاهش ریسک باید از سدهای مخزنی به عنوان مخازن ذخیره آب استفاده نمود. علاوه بر احداث سد، چگونگی بهره‌برداری از سدهای مخزنی نیز باید به‌نحوی انجام شود که با توجه به دبی ورودی به سد، هندسه مخزن، شرایط آب و

www.SID.ir

Archive of SID

هوایی و نوع مصرف کم‌ترین کمبود را در طول دوره بهره‌برداری داشته باشیم. در طراحی حجم مورد نیاز مخزن از سیاست بهره‌برداری استاندارد بر مبنای اعتمادپذیری استفاده می شود. در بهره‌برداری از مخزن بر اساس روش شبیه‌سازی SOP[1] میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می شود. هنگامی‌که مخزن نتواند نیاز را به‌طور کامل تامین کند، درصدی از آن را تامین می‌کند. در این سیاست میزان کمبود کل به حداقل می‌رسد، ولی شدت کمبودها زیاد است. برای سدهای با نیاز شرب و کشاورزی تعیین سیاست بهره‌برداری که بتواند شدت کمبودها را کنترل کند و از به وجود آمدن شرایط بحرانی جلوگیری کند، ضروری است (۱۲).

سیاست بهره‌برداری با منحنی فرمان بیان می‌شود. بر اساس منحنی فرمان در صورتی‌که حجم ذخیره مخزن از حدی پایین‌تر باشد، جهت جلوگیری از شرایط بحرانی، درصدی از نیاز آن ماه از مخزن آزاد می‌گردد. بدین‌صورت از مواجه شدن با خسارات جدی جلوگیری شده و از شدت کمبودها کاسته می‌شود (۱۸ و ۲۰). در این حالت ممکن است تعداد کمبودها زیاد شود ولی از شدت آن‌ها کاسته می‌شود. مدل‌های مختلف بهینه‌سازی جهت تهیه منحنی فرمان یا تعیین سیاست‌های خروجی از مخزن، بر اساس حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره و پیش‌بینی حجم جریان ورودی به مخزن در طول دوره وجود دارد. از بین این مدل‌ها، مدل‌های آبدهی[2] بهره‌برداری خطی[3] و بهره‌برداری غیرخطی[4] قادر هستند که منحنی فرمان و سیاست بهره‌برداری را به حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره ارتباط دهند. بسیاری از قواعد بهره‌برداری از مخزن را می‌توان در مطالعات باور و همکاران (۱۹۶۲) یافت (۵). طبری و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی سیاست بهینه برداشت از منابع آب را بر پایه نظرات و سیاست‌های تصمیم‌گیران تامین آب تعیین نمودند (۲۵). نتایج نشان از کارایی بالای سیاست ارائه شده در جهت بهبود پتانسیل‌های آبی منطقه و جلوگیری از تلفات بی‌رویه آب داشت. آذرانفر و شهسواری (۲۰۰۶)، کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری مدل جیره‌بندی را در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری سد مخزنی کمندان پیشنهاد کردند (۳).

خلف و شکراللهی (۲۰۰۸)، در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری به روش مدل آبدهی و به تکنیک شبیه‌سازی در سد مخزنی بالارود به این نتیجه دست یافتند که با تکنیک شبیه‌سازی هم می‌توان مدل آبدهی را حل نمود (۱۶). عمادی (۲۰۰۹) در بررسی اعتمادپذیری تامین آب توسط سدهای مخزنی با استفاده از روش بهره‌برداری استاندارد به نتایج زیر دست یافت:

۱- در روش SOP تعداد ماه‌های کمبود کم می‌باشد.

۲- کمبودهای ایجاد شده در روش SOP بسیار شدید می‌باشد که اگر سیستم واقعا با آن مواجه شود زیان‌های جبران‌ناپذیری ایجاد خواهد شد.

۳- در روش SOP مقدار کمبود کل به حداقل می‌رسد که به‌دلیل کاهش حجم تبخیر به‌دلیل پایین نگه داشته شدن سطح آب مخزن در این روش می‌باشد.

٤- این روش در طراحی و به‌دست آوردن حجم مخزن و تراز نرمال مفید است.

۵- جهت تعدیل میزان کمبود و کاهش خسارت باید از سیاست‌های دیگر بهره‌برداری که دارای انعطاف‌پذیری بیش‌تری می‌باشد در دوره بهره‌برداری استفاده شود (۹).

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی نیاز به بهینه شدن در بیش از یک تابع هدف دارند. این

1- Standard Operation Policy (SOP)
2- Yield Model
3- Linear Decision Rule (LDR)
4- Non-Linear Decision Rule (NLDR)

www.SID.ir

Archive of SID

مسائل، مسائل بهینه‌سازی چندهدفه نامیده می‌شوند. در این گونه مسائل برای هر دسته از متغیرهای ورودی، چندین تابع هدف وجود دارد. پیدا کردن جواب بهینه در چنین فضایی برای روش‌هایی بر پایه گرادیان کاری دشوار است. یکی از روش‌هایی که کارایی خود را در حل بسیاری از مسائل چندهدفه نشان داده است و در بسیاری از الگوریتم های چندهدفه مورد استفاده قرار گرفته است، روش مبتنی بر پارتو می‌باشد. یک مفهوم مهم در روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر پارتو مفهوم غالب بودن است. جواب i بر جواب j غالب می‌باشد اگر دو شرط زیر برقرار باشد:

۱- جواب i از دید هیچ‌یک از توابع هدف از جواب j بدتر نباشد.

۲- جواب i حداقل در یکی از توابع هدف از جواب j بهتر باشد.

مجموعه همه جواب‌هایی که دو شرط بالا را داشته باشند، جبهه پارتو نامیده می‌شود. الگوریتم هایی مانند NSGA-II[1]، MOPSO[2] و SPEA-II[3] بر پایه مفهوم پارتو استوار شده‌اند.

روش‌های متعددی توسط پژوهشگران مختلف برای بهره‌برداری بهینه از مخازن چندگانه چندهدفه توسعه داده شده است. سئولو و همکاران (۲۰۰٤) جهت توسعه روش PSO در حل مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتمی پیشنهاد دادند که در آن از یک مخزن ثانویه ذرات استفاده می‌کند که این ذرات بعداً توسط ذرات دیگر در راستای هدایت به جواب بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد (۷).

ردی و کومار (۲۰۰۷)، برای حل مسائل چندهدفه بهره‌برداری از مخزن مدل EM-MOPSO را پیشنهاد کردند. این نوع از PSO نیز برای یافتن راه‌حل مناسب از بهینه پارتو استفاده می‌کند (۲۲). برای این کار یک آرشیو خارجی با اندازه متغیر را به‌کار بردند. بالتر و فونتان (۲۰۰۸)، استفاده از الگوریتم MOPSO را از سه جنبه بررسی کردند، در این روش از یک آرشیو خارجی جهت ذخیره جواب‌های غیرمغلوب استفاده گردید. همچنین از یک روش شراکت جواب‌ها برای گستردگی جواب‌ها و یک عملگر جهش برای بهبود جست وجوی کلی استفاده نمودند. نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از روش قید ε با بهینه‌سازی غیرخطی (ε-NLP) مقایسه گردید (٤). لیو (۲۰۰۹)، با استفاده از اپراتورهای به‌کار رفته در NSGA-II (رتبه‌بندی غیرپست، مرتب کردن بر اساس معیار فاصله شلوغی[4] و تکنیک نخبه‌گرایی) و همچنین یک اپراتور جهش در PSO، پارامترهای مدل مفهومی بارش- رواناب را بهینه‌سازی کرد (۱۷). همچنین این بهینه‌سازی با الگوریتم NSGA-II نیز انجام شد و نتایج با هم مقایسه شدند. نتایج به‌دست آمده بیانگر بهتر بودن تنوع جواب‌های غیرپست حاصل از مدل MOPSO بود. فلاح‌مهدی‌پور و همکاران (۲۰۱۱) در مسأله بهره‌برداری از سامانه چندمخزنه به‌صورت چندهدفه، سه روش مبتنی بر الگوریتم PSO را مورد بررسی قرار دادند. جهت ارزیابی روش‌های مذکور، مسائل استاندارد[5] ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده قرار گرفت. پس از تعیین بهترین روش بهینه‌سازی چندهدفه، روش مربوطه برای حل مسأله بهره‌برداری چندمخزنه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد روش مذکور در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری چندمخزنه از کارایی بالایی برخوردار است (۱۰).

1- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
2- Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
3- Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA-II)
4- Crowding Distance
5- Benchmark Problems

www.SID.ir

Archive of SID

طبری (۲۰۱۲)، مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ای به‌منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص با توجه به محدودیت‌های موجود و با هدف حداکثر نمودن تامین نیازهای آبی داخل حوضه و افزایش آب انتقالی از حوضه کلاس به حوضه گدار (دریاچه ارومیه) و همچنین کاهش آب خروجی از مرز را ارائه داد (۲٤). نتایج نشان داد با اعمال برنامه‌های بهینه بهره‌برداری می‌توان حجم قابل‌توجهی از منابع آبی داخل حوضه را به‌منظور احیای منابع آبی به برون از حوضه انتقال داد و از خروج آب توسط رودخانه‌های مرزی به‌میزان زیادی جلوگیری نمود. قیمایر و ردی (۲۰۱۳)، از الگوریتم PSO جهت استخراج سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از یک سامانه تک‌مخزنه برق آبی با تابع هدف کمینه کردن مجموع سالانه مجذور اختلاف انرژی برق آبی تولیدی از انرژی برق آی مطلوب، استفاده کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن شرایط متفاوت هیدرولوژی، سیاست‌های بهره‌برداری را برای سال‌های خشک، تر و نرمال به‌صورت جداگانه استخراج نمودند. همچنین نتایج نشان داد استفاده از سیاست‌های بهینه حاصل از این پژوهش، سبب افزایش سه درصدی تولید انرژی برق آبی نسبت به حالتی که در طراحی برنامه‌ریزی شده بود، می‌گردد (۱۱).

طبری و سلطانی (۲۰۱۳)، در پژوهشی یک مدل چندهدفه که در آن به‌طور هم‌زمان حداقل اطمینان‌پذیری تامین نیازهای آبی سیستم، حداکثر و هزینه‌های مرتبط با عدم تامین نیاز، احیای آبخوان، تخطی از ظرفیت مخزن در حال بهره‌برداری و اولویت‌های تخصیص حداقل می‌گردد را توسعه دادند (۲٦). نتایج نشان داد که مدل NSGA-II در مدت زمان بسیار کم‌تری قادر به ارائه مقادیر بهینه تخصیص خواهد بود. آزادنیا و زهرایی (۲۰۱۰)، از الگوریتم MOPSO-DC در بهره‌برداری از سد سفیدرود با دو تابع هدف، حداقل‌سازی عدم نیاز پایین‌دست و کاهش خسارت ناشی از خروجی نامناسب استفاده نمودند. در این الگوریتم از یک آرشیو خارجی ذخیره جواب‌های غیرپست استفاده شده است (۲). صادقی‌طبس و همکاران (۲۰۱۵)، بهینه‌سازی ضرایب مدل جیره‌بندی[1] بهره‌برداری از مخزن سد طالقان را به‌صورت چندهدفه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در میان روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده روش AMALGAM[2] به‌دلیل پیوستگی و نزدیک‌تر بودن نسبی جبهه پارتو تولیدی به نقطه ایده‌آل از کارایی بهتری برخوردار است (۲۳). احمدیانفر و همکاران (۲۰۱٦)، یک مدل شبیه‌سازی ماهیانه (جیره‌بندی) که با یک مدل بهینه‌سازی فراکاوشی (MOPSO) تلفیق گردیده را ارائه دادند. مدل ارائه شده روی سیستم چندمخزنه زهره واقع در جنوب ایران مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل بهینه‌سازی دو هدف تامین نیاز حداقل و تامین نیاز کشاورزی در یک دوره طولانی گنجانده شد. نتایج نشان داد با به‌کارگیری مدل مذکور شاخص MSI به‌میزان ۳٤ و ۲۱ درصد به‌ترتیب در تامین نیاز حداقل و تامین نیاز کشاورزی بهبود یافته است (۱).

از آن‌جا که مخزن سد یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین منابع ذخیره‌سازی آب سطحی است، بنابراین بهره‌برداری بهینه از این سامانه‌ها از جایگاه و اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، بررسی و توسعه روش‌های موجود در بهینه‌سازی مسائل بهره‌برداری از سامانه مخازن همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. بنابراین، با توجه به ضرورت بهره‌برداری از این سامانه‌ها، پژوهش حاضر به ارزیابی

1- Hedging Rule
2- A Multi-Algorithm, Genetically Adaptive Multi-objective (AMALGAM)

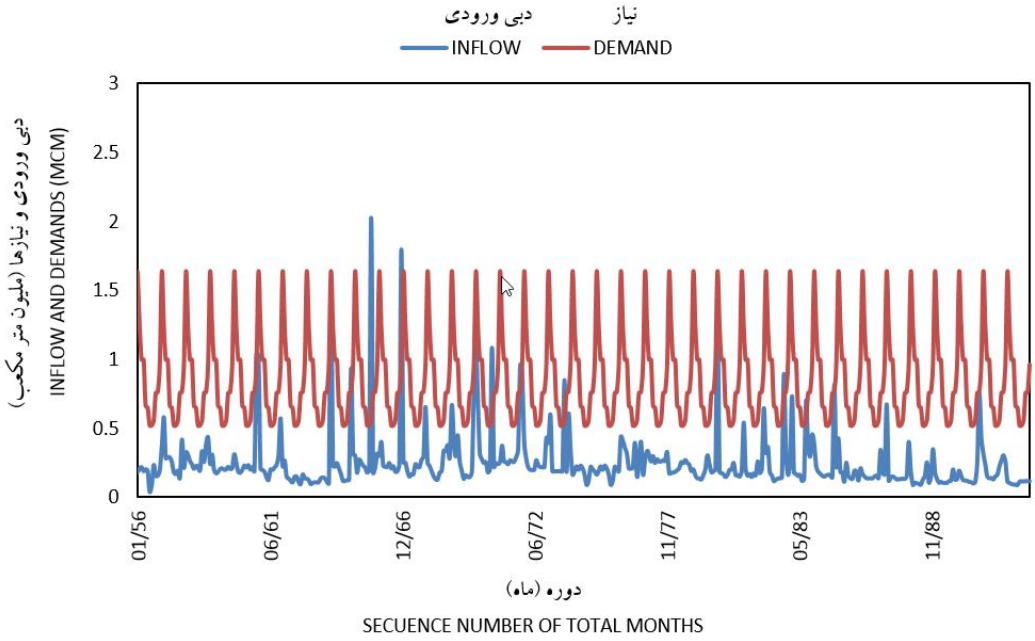
www.SID.ir

Archive of SID

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه فراکاوشی در تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از مخزن سد نهرین با استفاده از مدل‌های بهره‌برداری خطی و غیرخطی می‌باشد. در این پژوهش علاوه بر بهینه‌سازی ضرایب مدل بهره‌برداری مخزن با هدف حداقل کردن شاخص اصلاح‌شده کمبود که در پژوهش‌های قبلی متداول بوده است، به‌طور هم‌زمان به بیشینه‌سازی اعتمادپذیری تامین نیازها در راستای توسعه پایدار نیز پرداخته شد. بنابراین با توجه به این‌که اهداف فوق متناقض با یکدیگر هستند به‌جای یک جواب بهینه، با مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه مواجه هستیم. جهت حل مسأله فوق، از الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند NSGA-II، MOPSO و SPEA-II استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: جهت حل مدل و تدوین یک سیاست بهره‌برداری مخزن به روش خطی و غیرخطی، از مشخصات مخزن سد نهرین و نیازهای شرب و کشاورزی آن استفاده گردید. سد ذخیره‌ای نهرین در ناحیه شمال استان یزد در ۲۱ کیلومتری شرق شهرستان طبس و در موقعیت جغرافیایی ۵۷ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این سد از نوع خاکی با هسته مرکزی رسی است که با ارتفاع ٤٨ متر از بستر رودخانه و ٦٠ متر از پی سنگی، قادر به ذخیره‌سازی ٤/٨٦ میلیون مترمکعب آب است. طول تاج سد نهرین با خاکریز جناح راست ۳۰۷ متر و عرض تاج آن ۱۰ متر است. (گزارش فنی سد ذخیره‌ای نهرین طبس، ۱۳۸۱). مشخصات نیازها و آبدهی ورودی به مخزن در یک دوره ۳۷ ساله (۱۳۹۲-۱۳۵٦) در شکل ۱ ارایه شده است. با توجه به این‌که مقادیر تبخیر از سطح مخزن وابسته به تراز سطح آب مخزن می‌باشد، مقادیر آن در شکل لحاظ نگردیده، ولی در روابط بهینه‌سازی تبخیر به‌عنوان تابعی از تراز سطح آب مخزن لحاظ شده است (هر چند مقدار آن نیز ناچیز می‌باشد).



شکل ۱- مشخصات نیازها و آبدهی ورودی به مخزن در بازه زمانی ۳۷ سال (۱۳۹۲-۱۳۵٦).

Figure 1. Characteristics of demands and inflow during (1356-1392).

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن: به‌طورکلی بهره‌برداری از مخزن بر دو اساس صورت می‌گیرد: بهره‌برداری بلندمدت و بهره‌برداری زمان حقیقی (به هنگام[1]). در بهره‌برداری بلندمدت، از یک سری تاریخی طولانی‌مدت داده‌ها جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری‌ها استفاده می‌گردد. به بیان دیگر، با به کارگیری یک آمار تاریخی طولانی‌مدت و فرض تکرار آن در آینده، بهینه‌سازی انجام می‌شود، در حالی‌که در بهره‌برداری زمان حقیقی تصمیم‌گیری به‌صورت لحظه‌ای می‌باشد، یعنی با توجه به ورودی‌ها و حجم ذخیره ابتدای دوره، تصمیم‌گیری برای آن دوره انجام می‌گیرد. بهره‌برداری کوتاه‌مدت (برای مثال در زمان سیلاب) از جمله انواع بهره‌برداری زمان حقیقی است که در آن رهاسازی با توجه به شرایط دوره حاضر و در بازه زمانی کوتاه و در جهت کنترل سیلاب بر اساس میزان ورودی به مخزن و میزان حجم ذخیره آب موجود در آن، صورت می‌پذیرد. حالت دوم دارای این مزیت است که می‌توان در هر لحظه تصمیم‌گیری مناسب را ارائه نمود. بنابراین رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی می‌تواند به‌عنوان تابعی از برخی پارامترها مانند حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره جاری یا انتهای دوره قبل و آورد رودخانه در طول دوره جاری یا دوره‌های قبل ذکر گردد. انتخاب هر یک از این پارامترها به اهداف مورد نظر و اهمیت هر یک در تعیین مقدار رهاسازی بستگی دارد. به‌طورکلی چندجمله‌ای عمومی زیر بیانگر رابطه بین حجم رهاسازی از مخزن و پارامترهایی است که در تعیین آن مؤثر می‌باشند.

$$R_t = a_i + b1_i \times S_t^1 + \cdots + bn_i \times S_t^n + c1_i \times Q_t^1 + \cdots + cn_i \times Q_t^n + d1_i \times D_t^1 + \cdots + dn_i \times D_t^n \quad (۱)$$

که در آن، R_t رهاسازی از مخزن در طول دوره t، S_t بردار حالت (حجم ذخیره) مخزن در آغاز دوره t، D_t مقدار نیاز در طول دوره زمانی t و a_i، $b1_i$، ....، bn_i، $c1_i$، ....، cn_i، $d1_i$، .... و dn_i، ضرایب ثابتی که می‌توانند به‌صورت هفتگی، ماهانه و یا فصلی تعریف شوند و در واقع متغیرهای تصمیم می‌باشند.

قاعده تصمیم‌گیری خطی و غیرخطی (LDR and NLDR): به‌طورکلی قواعد بهره‌برداری از مخازن به دو صورت کلی منحنی‌های فرمان و یا توابع تصمیم‌گیری ارائه می‌شوند این قواعد با توجه به سیاست بهره‌برداری می‌توانند خطی و یا غیرخطی باشند. در قواعد تصمیم‌گیری خطی میزان رهاسازی تابعی خطی از پارامترهای تصمیم‌گیری هم‌چون حجم ذخیره مخزن و جریان ورودی است (۱۵)، حال آن‌که در قواعد تصمیم‌گیری غیرخطی این تابع به‌صورت غیرخطی بیان می‌گردد. روابط و قیود مورد استفاده در قواعد تصمیم‌گیری خطی و غیرخطی در ادامه ذکر گردیده است.

$$R_t = a_1 + b_1 \times S_t^1 + \cdots + b_n \times S_t^n + c_1 \times Q_t^1 + \cdots + c_n \times Q_t^n \quad (۲)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - SP_t - L_t \quad (۳)$$

$$L_t = F_1(Ev_t, \bar{A}_t) \quad (٤)$$

1- At the time

www.SID.ir

Archive of SID

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1})/2 \quad (۵)$$

$$A_t = F_2(S_t) \quad (٦)$$

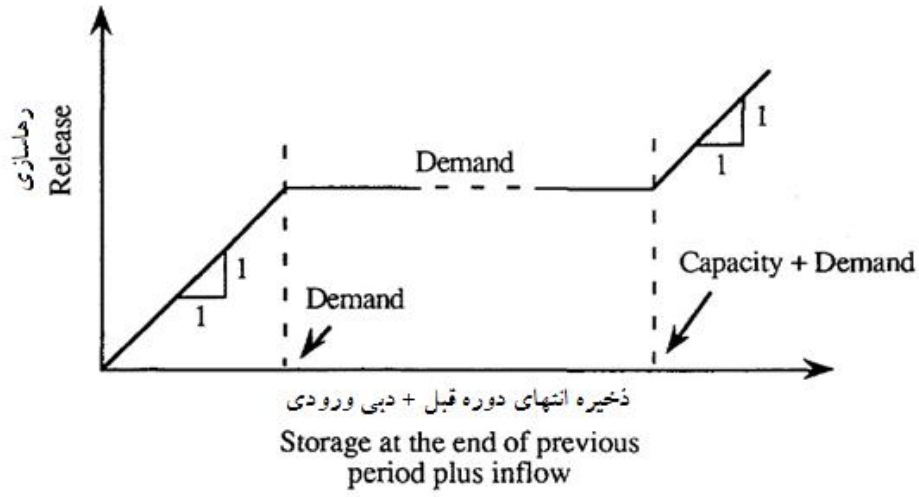
$$R_{Min.} \le R_t \le R_{Max.} \quad (۷)$$

$$S_{Min.} \le S_t \le S_{Max.} \quad (۸)$$

$$SP_t = \begin{cases} S_t + Q_t - R_t - S_{Max.} & , \quad S_t + Q_t - R_t > S_{Max.} \\ 0 & , \quad S_t + Q_t - R_t < S_{Max.} \end{cases} \quad (۹)$$

که در آن‌ها، R_t خروجی مخزن در دوره t، Q_t جریان ورودی به مخزن در دوره t، A_t سطح آب در ابتدای دوره t، S_t حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t، SP_t سرریز در دوره t، L_t تلفات ناشی از تبخیر در دوره t و Ev_t عمق تبخیر در دوره t می‌باشد.

قاعده سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP): یکی از قواعد بهره‌برداری از مخزن، قاعده بهره‌برداری SOP می‌باشد. در این قاعده تا زمانی که میزان آب موجود (در دسترس) از تقاضا (نیاز) کم‌تر باشد تمامی آب در دسترس به پایین‌دست تخصیص داده می‌شود. زمانی‌که میزان آب در دسترس از میزان تقاضا بیش‌تر بوده، آب به اندازه تامین تقاضا رها می‌شود و مازاد موجودی آب در مخزن ذخیره می‌شود و زمانی که آب موجود از تقاضا و حجم مخزن بیش‌تر باشد بقیه آن سرریز می‌شود. در شکل ۲ منحنی SOP ترسیم شده است:



شکل ۲- منحنی سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP).

Figure 2. Standard Operation Policy (SOP).

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به این عملکرد، از نقاط ضعف قاعده SOP می‌توان به این مورد اشاره نمود که هیچ‌گونه پیش‌بینی نسبت به آینده ندارد و ممکن است در اثر مواجه شدن با خشکسالی با کمبودهای شدید روبه‌رو شویم. قاعده SOP در مراحل اولیه طراحی می‌تواند مفید باشد اما جهت بهره‌برداری از مخزن در شرایط خشکسالی روش مناسبی نمی‌باشد.

الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند: در مقایسه با مسائل تک‌هدفه که در آن‌ها به دنبال یک جواب بهینه هستیم، در مسائل چندهدفه به ندرت یک جواب قابل پذیرش موجود است. در این مسائل با مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه روبرو می‌شویم که بر یکدیگر برتری ندارند و اصطلاحاً به آن‌ها بهینه پارتو[1] گفته می‌شود. این مجموعه جواب‌ها از این جهت بهینه هستند که راه‌حل بهتری نسبت به آن‌ها با در نظر گرفتن تمام اهداف وجود ندارد. جواب مسأله بهینه‌سازی با چند هدف، یک حل یگانه به عنوان بهینه کلی نمی‌باشد. در عوض در بهینه‌سازی چندمنظوره، هدف ما یافتن یک دسته از جواب‌های بهینه پارتو است.

در ادامه الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند به‌کار رفته در این پژوهش مختصراً تشریح می‌گردند.

الگوریتم NSGA-II: روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه کلاسیک در حل مسائل پیچیده دارای نقص‌های عمده‌ای مانند هزینه محاسباتی قابل‌توجه هستند. در مقابل الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک چندهدفه از قابلیت‌های ویژه‌ای در حل مسائلی با مقدار متغیرهای تصمیم زیاد، دارای فضای جواب گسسته و ساختار غیرخطی برخوردارند. دب و همکاران (۲۰۰۰) مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II را برای فائق آمدن بر ضعف‌های مدل‌های چندهدفه قبلی مانند مشکلات مربوط به هزینه محاسباتی، پیشنهاد نمودند (۸). الگوریتم چندهدفه NSGA-II بر اساس طبقه‌بندی غیرپست با پیچیدگی محاسباتی بالا کار می‌کند. عملگر انتخاب در این الگوریتم، یک ظرف آمیزش را از ترکیب جمعیت‌های والد و فرزند به وجود می‌آورد. برای جلوگیری از تمرکز جواب‌ها، معیار فاصله شلوغی نیز در این الگوریتم به‌کار گرفته می‌شود تا بهترین جواب‌ها با توجه به برازش، گسترش و پراکندگی جواب‌ها انتخاب گردد. بنابراین اصل نخبه‌گرایی کاملاً رعایت می‌شود. در مقاله حاضر با استفاده از روش بالا، منحنی تعامل بین اهداف به‌دست می‌آید.

الگوریتم MOPSO: یکی دیگر از ابزارهای بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه، الگوریتم MOPSO می‌باشد. در این الگوریتم فرآیند جستجو با تولید مجموعه‌های تصادفی به تعداد اهداف، با مشخصات یکسان (تعداد ذره و ابعاد) و توزیع یکنواخت آغاز می‌گردد. ساختار این الگوریتم مشابه روشی است که پارسپولوس و وراهیتیس (۲۰۰۲) با نام بردار ارزیابی الگوریتم مجموعه ذرات ارائه نمودند. در این روش برای هر هدف یک مجموعه تولید شده و Gbest مرتبط با آن در هر تکرار استخراج می‌گردد (۲۱). برای رفتن به مرحله بعدی، هر مجموعه Gbest خود را به مجموعه بعدی منتقل می‌کند. این در حالی است که Pbest برای هر مجموعه به‌طور اختصاصی به‌دست می‌آید. در نهایت پس از تعداد مشخصی تکرار، مجموعه حاصل از آخرین مجموعه، به‌عنوان مجموعه نهایی و نقاط غیرغالب آن به‌عنوان مجموعه جواب یا پارتو هیچ برتری بر یکدیگر نداشته و با کاهش مقدار یک تابع هدف، مقدار تابع هدف دیگر افزایش می‌یابد و بر عکس.

الگوریتم SPEA-II: این روش ترکیبی از چند روش متداول و تکنیک‌هایی برای به‌دست آوردن مجموعه

1- Optimal Pareto

www.SID.ir

Archive of SID

جوابی نزدیک به مجموعه جواب بهینه پارتو می‌باشد که بر الگوریتم ژنتیک استوار است و تمامی مراحل آن را دنبال می‌کند. روش SPEA-II همانند روش‌های مشابه علاوه بر جمعیت جواب‌ها از جمعیت دیگری برای حفظ جواب‌های بهینه در طول نسل‌های الگوریتم استفاده می‌کند (جمعیت جانبی جواب‌ها). در این الگوریتم موارد زیر رعایت می‌شود:

- استفاده از مفهوم غلبه پارتو برای انتساب مقدار برازندگی.
- استفاده از روش‌های خوشه‌بندی جهت جلوگیری از بزرگ شدن اندازه جمعیت جانبی.
- مقدار برازندگی جواب‌های موجود در جمعیت با توجه به مفهوم غلبه پارتو و اعضای جمعیت جانبی انتساب می‌یابد.
- انتساب مقداری بین (0,1] به‌عنوان مقدار برازندگی به هر عضو مجموعه جانبی.
- شرکت اعضای مجموعه جانبی در روند انتخاب[1] الگوریتم ژنتیک.

توابع هدف مسأله بهینه‌سازی و شاخص‌های عملکردی: از شاخص‌های عملکردی در ارزیابی عملکرد سیستم‌ها تحت سیاست‌های مختلف استفاده می‌شود. این شاخص‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ شاخص‌های عملکردی سنتی[2] و شاخص‌های جدید[3]. شاخص‌های سنتی در واقع همان آماره‌ها هستند مانند میانگین، واریانس، شاخص کمبود و غیره؛ در حالی‌که ریسک، اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری از جمله شاخص‌های جدید به‌شمار می‌روند. این شاخص‌ها بر خلاف TPIها، توجه مستقیم به پویایی سیستم و عملکرد سیستم تحت موقعیت‌های پرخطر دارند (۲۰). در مطالعات گذشته علی‌رغم تفسیرهای یکسانی که از شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری وجود دارد اما نحوه تعریف برآوردگرهای آن‌ها متفاوت است.

برای هر سیستمی می‌توان شرایط مطلوب NF و نامطلوب (شکست) F تعریف کرد. به‌عنوان مثال برای یک سیستم منابع آب، تامین همه نیاز برآورده شده یا درصدی از آن می‌تواند به‌عنوان شرایط مطلوب باشد. به مدت زمانی که سیستم به‌طور پیوسته در وضعیت شکست قرار می‌گیرد، دوره شکست می‌گویند. اگر مدت زمانی که یک سیستم برای بار j ام در یک دوره شکست قرار گیرد با dj مقدار نیاز در گام t با D(t) و مقدار نیاز تامین شده با R(t) نشان داده شود، حجم کمبودی که سیستم در این مدت متحمل می‌شود Vj، برابر است با:

$$Vj = \sum_{t=1}^{dj}[D(t) - R(t)] \quad (۱۰)$$

با توجه به تعاریف بالا، شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

اعتمادپذیری: اعتمادپذیری قدیمی‌ترین و در عین‌حال پرکاربردترین شاخص در مسایل مدیریت منابع آب است و بر اساس تعریف هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) برابر است با احتمال این‌که وضعیت سیستم (S) در شرایط مطلوب باشد (۱۳).

$$Re1 = P\{S \in NF\} \quad (۱۱)$$

1- Selection Process
2- Traditional Performance Indicators
3- Modern Performance Indicators

www.SID.ir

Archive of SID

که در آن، T کل گام‌های زمانی، j شمارنده رویداد شکست، dj دوره شکست j ام و M تعداد رخدادهای شکست باشد، اعتمادپذیری با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌گردد:

$$Re1 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{M} dj}{T} \quad (۱۲)$$

برگشت‌پذیری: برگشت‌پذیری معیاری است برای تعیین این‌که اگر سیستمی وارد یک وضعیت شکست شد، با چه سرعتی از این شرایط عبور کرده و وارد وضعیت مطلوب می‌شود. هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) این شاخص را به‌صورت احتمال شرطی زیر تعریف کرده‌اند (۱۳):

$$Res = P\{R(t+1) \in NF | R(t) \in F\} \quad (۱۳)$$

به‌عبارت دیگر این تعریف، عکس مدت زمانی است که سیستم به‌صورت میانگین در وضعیت شکست قرار دارد:

$$Res = \left\{\frac{1}{M}\right\} \sum_{j=1}^{M} dj \quad (۱٤)$$

موی و همکاران (۱۹٦۸) برگشت‌پذیری را بیش‌ترین مدت زمانی که سیستم در وضعیت شکست قرار دارد تعریف کرده‌اند (۱۹). برای بیان این معیار به‌گونه‌ای که قابل مقایسه با تعریف ارایه شده توسط هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود (۱۳):

$$Res = \{Max\ dj\}^{-1} \quad (۱۵)$$

آسیب‌پذیری: این شاخص معیاری است برای تعیین خسارت‌های احتمالی وارده بر سیستم ناشی از یک رویداد شکست. هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) این شاخص را به‌صورت زیر تعریف کرده‌اند (۱۳):

$$Vul = \sum_{j \in F} e(j) h(j) \quad (۱٦)$$

که در آن، h(j) شدیدترین خسارتی است که در j امین گذار در وضعیت شکست به وجود می‌آید و e(j) احتمال این است که h(j) شدیدترین خسارت در میان همه وضعیت‌های شکست باشد. هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) شاخص آسیب‌پذیری را بر اساس کل کمبودی که در j امین گذار در وضعیت شکست ایجاد می‌شود برآورد کرده‌اند (vj) و احتمال این‌که هر رویداد شدیدترین شکست باشد را برای همه رویدادها یکسان و برابر با 1/M در نظر گرفته‌اند. با توجه به توضیحات بالا، در این مطالعه، شاخص آسیب‌پذیری به‌عنوان میانگین کمبودها در دوره‌های شکست برآورد می‌شود:

$$Vul = \frac{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} v(j)}{Sum(Dt)} \quad (۱۷)$$

www.SID.ir

Archive of SID

شاخص اصلاح‌شده کمبود: در این پژوهش اعتمادپذیری به‌عنوان هدف اول و شاخص اصلاح شده کمبود (MSI)[1] نیز به‌عنوان تابع هدف دوم استفاده گردید.

$$MIN\left\{MSI = \frac{100}{n}\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{TS_t}{TD_t}\right)^2\right\} \quad (۱۸)$$

که در آن، TS_t میزان کمبود در دوره زمانی t، TD_t میزان نیاز در دوره زمانی t، n تعداد کل دوره‌های زمانی (ماه) است. وجود توان دو در این رابطه باعث می‌شود کمبودهای شدیدتر وزن بالاتری در تابع مذکور داشته باشند و بنابراین با سرعت بیش‌تری کاهیده شوند.

نتایج و بحث

مدل‌های بهره‌برداری از مخزن LDR، NLDR و SOP در محیط برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شده و با روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه تلفیق گردیدند. برای هر یک از دو مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی (LDR و NLDR) دو تابع هدف بدین‌شرح تعریف گردید، تابع هدف اول کمینه‌سازی مجموع درصد کمبودهای برآورد نشده و تابع هدف دوم بیشینه‌سازی اعتمادپذیری بود که بیشینه آن معمولاً در شرایط

$$R_t = a + b_t \times S_t + b_t \times Q_t \quad (۱۹)$$

$$R_t = a + b_t \times S_t + c_t \times Q_t + d_t \times S_t^2 + e_t \times Q_t^2 \quad (۲۰)$$

هر یک از مدل‌ها با هر یک از روش‌های بهینه‌سازی به تعداد ۵۰۰۰ تکرار اجرا گردید. جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف به‌دست آمده از هر یک از روش‌های چندهدفه مذکور برای مدل‌های LDR و NLDR در شکل ۳ نشان داده شده است.

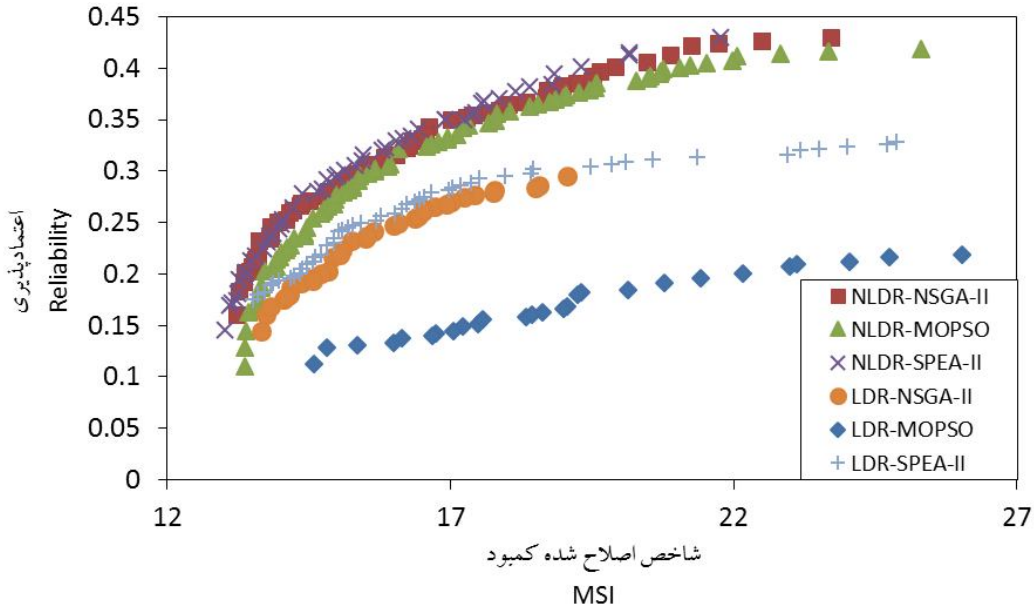
استفاده از شاخص مذکور از نظر جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی اهمیت دارد. کاربرد این تابع هدف توسط پژوهشگران زیادی گزارش شده است (٦، ١٤ و ٢٧).

بهره‌برداری SOP حاصل می‌گردد. دو تابع هدف مذکور با یکدیگر رابطه عکس داشته و با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد. مدل‌های بهره‌برداری از مخزن برای یک دوره ۳۷ ساله از سال ۱۳٥٦ تا ۱۳۹۲، جهت یافتن ضرایب مربوطه در هر دو مدل خطی و غیرخطی، در شرایط یکسان برای هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه اجرا گردید. در مدل بهره‌برداری خطی متغیرهای تصمیم شامل مقدار ثابت α، ۱۲ ضریب ماهیانه مقادیر ذخیره در دوره t (b_t) و در نهایت ۱۲ ضریب ماهیانه مقادیر دبی ورودی به سد (c_t) می باشد (رابطه ۱۹). همچنین در مدل بهره‌برداری غیرخطی متغیرهای تصمیم علاوه بر ضرایب فوق، شامل ۱۲ ضریب ماهیانه مقادیر مجذور ذخیره در دوره t (d_t) و ۱۲ ضریب ماهیانه مقادیر مجذور دبی ورودی به سد (e_t) می‌باشد (رابطه ۲۰).

1- Modified Shortage Index

www.SID.ir

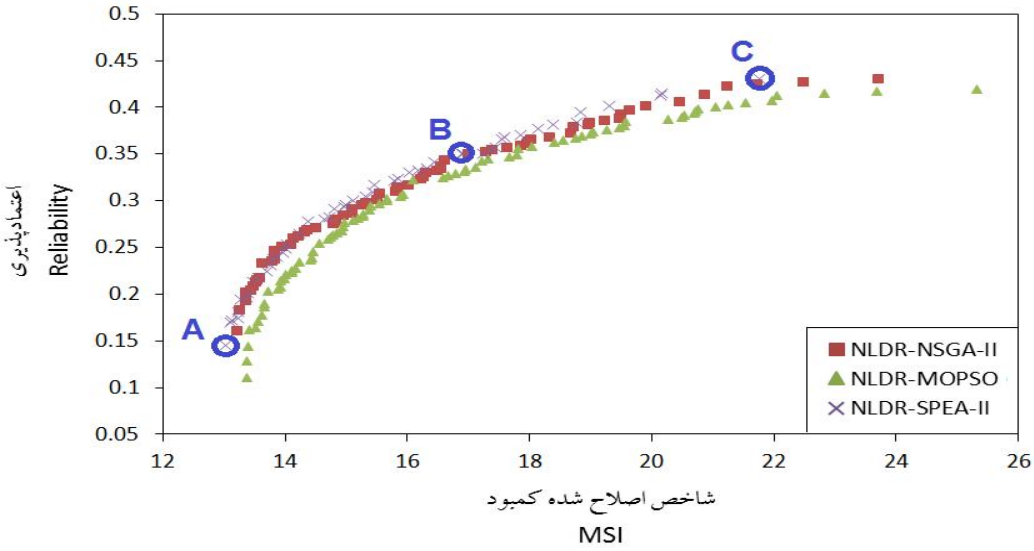
Archive of SID



شکل ۳- جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف به‌دست آمده از هر یک از روش‌های چندهدفه مذکور برای مدل های LDR و NLDR.

Figure 3. Optimal Pareto fronts obtained by multi-objective methods for the LDR and NLDR models.

با توجه به شکل ۳ می‌توان استنباط نمود در رابطه با مدل‌های LDR و NLDR با تعداد تکرار یکسان، مدل بهره‌برداری غیرخطی نتایج بهتری از خود نشان داده است. این امر می‌تواند به‌دلیل درجه آزادی بیش‌تر رابطه غیرخطی در تعیین منحنی فرمان رهاسازی مخزن سد باشد. در نتیجه در این پژوهش به‌دلیل پاسخ بهینه‌تر مدل بهره‌برداری غیرخطی نتایج این مدل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت (شکل ٤).



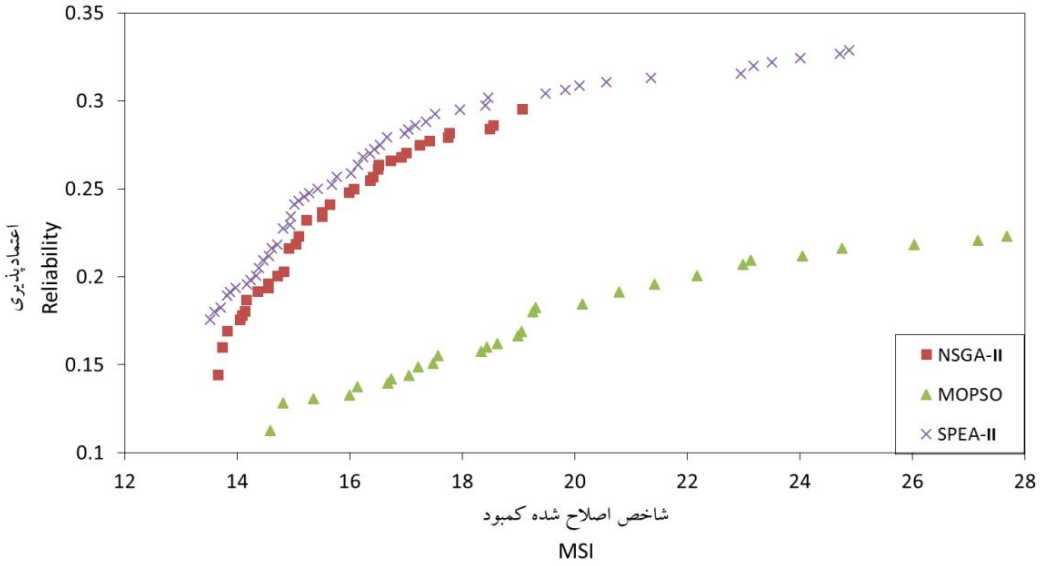
شکل ٤- جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف توسط هر یک از الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند در مدل غیرخطی.

Figure 4. Optimal Pareto fronts obtained by multi-objective algorithms in the NLDR.

www.SID.ir

Archive of SID

همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، در مدل بهره‌برداری غیرخطی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و SPEA-II به مقادیر توابع هدف بهینه‌تری به نسبت روش MOPSO در تعداد تکرار یکسان دست یافته‌اند (دارای جبهه پارتو غالب بر جبهه پارتو روش MOPSO). این امر در مدل خطی نیز با حساسیت بیش‌تر به چشم می‌خورد (شکل ٦). در مقایسه با بررسی عملکرد روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از توابع استاندارد خانواده ZDT می‌توان گفت نتایج ارزیابی در این مرحله دوباره تکرار گردید. همچنین در پژوهش‌های پیشین صادقی‌طبس و همکاران (۱۳۹۵) این‌چنین نتیجه‌ای قابل مشاهده است.



شکل ۵- جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف توسط هر یک از الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند در مدل خطی.

Figure 5. Optimal Pareto fronts obtained by multi-objective algorithms in the LDR.

در نهایت از بین نتایج سه روش بهینه‌سازی مذکور نتایج روش غالب (SPEA-II) به‌عنوان روش بهتر انتخاب گردید. همان‌طور که ذکر شد، در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه تنها مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه (بهینه پارتو) جهت برآورده نمودن اهداف ارائه می‌گردد و انتخاب بهترین گزینه به‌عنوان سیاست بهره‌برداری بهینه بر عهده مسئولین امر و سیاست‌گذاران مربوطه است تا با لحاظ نمودن معیارهای اقتصادی، اجتماعی و پیامدهای زیست‌محیطی، بهترین جواب بهینه از میان سایر جواب‌های بهینه پارتو گزیده و مقادیر رهاسازی متناظر با جواب منتخب تعیین گردد.

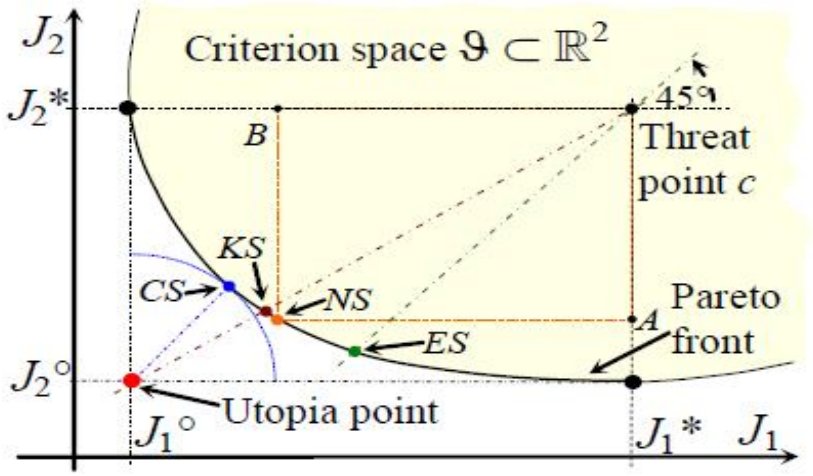
از پاسخ‌های پارتو حاصله سه پاسخ به‌عنوان نمونه از قسمت‌های مختلف جبهه انتخاب گردید (پاسخ‌های A، B و C در شکل ۵). برای انتخاب سه نمونه پاسخ مذکور، روش‌های مختلفی از جمله: راه‌حل CS[1]، راه‌حل NS[2]، راه‌حل ES[3] و راه‌حل KS[4] KS[4] وجود دارد. در این پژوهش پاسخ‌های منتخب A و C، بهترین مقادیر هر یک از دو تابع هدف و پاسخ B با استفاده از روش راه‌حل کالای-

1- Compromise Solution
2- Nash Solution
3- Egalitarian Solution
4- Kalay-Smorodinsky

www.SID.ir

Archive of SID

اسمورودینسکی (KS) انتخاب شد. نحوه محاسبه این نقطه در شکل زیر شرح داده شده است. در حقیقت نقطه تقاطع خط واصل بین نقاط (j_1,j_2) و (j_1^*,j_2^*) و نقاط واقع بر جبهه پارتو نمایش‌دهنده مطلوب این معیار، می‌باشد.



شکل ٦- نحوه محاسبه معیارهای مختلف جهت انتخاب راه‌حل مناسب از جبهه پارتو (٧).

Figure 6. How to calculate different criteria for choosing the appropriate solution from Pareto Front (Coelho et al., 2004).

در ادامه مقادیر بهینه ضرایب مدل بهره‌برداری غیرخطی (متغیرهای تصمیم مدل بهتر) برای پاسخ‌های منتخب از جبهه بهینه پارتو در جدول ١ ارائه گردیده است.

جدول ١- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم محاسبه شده توسط روش بهینه‌سازی چندهدفه SPEA-II در مدل NLDR.

Table 1. Optimal Values of Decision Variables Calculated by SPEA-II algorithm in the NLDR Model.

C					B					A					$\times 10^{-4}$
e_i	d_i	c_i	b_i	a	e_i	d_i	c_i	b_i	a	e_i	d_i	c_i	b_i	a	i
355	12	269	27		302	84	371	54		383	395	345	36		1
418	3	39	436		486	116	7	422		416	264	348	489		2
288	349	409	449		237	145	426	394		124	285	484	338		3
169	53	131	328		89	419	127	217		334	409	34	372		4
304	306	1	492		276	281	4	499		197	312	37	395		5
378	451	488	70	398	246	454	493	53	455	116	387	467	119	482	6
209	386	441	474		264	429	308	347		132	340	362	145		7
209	457	42	341		233	445	0	496		210	354	328	265		8
37	500	25	455		140	475	4	487		245	392	77	122		9
375	236	393	448		389	274	480	488		434	380	323	264		10
108	384	2	187		112	440	198	179		252	293	258	471		11
221	484	91	172		197	468	2	279		441	298	411	486		12

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین مقادیر تابع هدف برای مدل در شرایط SOP نیز محاسبه گردید. این مقادیر برای توابع هدف اول و دوم (مجموع درصد کمبود برآورده نشده و اعتمادپذیری) به‌ترتیب برابر ۵۵ و ۰/۴۲ بود. مقادیر توابع هدف و سایر معیارهای ارزیابی در راستای توسعه پایدار برای سه پاسخ منتخب سیاست بهره‌برداری NLDR و سیاست بهره‌برداری SOP در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج حاصله از اجرای مدل بهینه‌سازی در دوره ۳۷ سال.

Table 2. Results obtained from implementation of the optimization model during (1356-1392).

	شاخص اصلاح‌شده کمبود MSI	اطمینان‌پذیری Reliability	برگشت‌پذیری Resilience	آسیب‌پذیری Vulnerability
SOP	55.01	0.42	3.57E-02	5.94E-02
NLDR-A	13.02	0.15	9.17E-03	3.17E-02
NLDR-B	16.44	0.35	1.43E-02	4.58E-02
NLDR-C	21.76	0.41	2.33E-02	5.78E-02

با مقایسه مقادیر توابع هدف در شرایط SOP و مقادیر توابع هدف در پاسخ NLDR-C می‌توان مشاهده نمود با به‌کارگیری مدل بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان با میزان کمبود کم‌تر (MSI کم‌تر) تقریباً به ماکزیمم اعتمادپذیری (اعتمادپذیری در شرایط SOP) دست یافت. این امر مشخصاً اثر مدل بهینه‌سازی را توجیه می‌نماید که با ارائه سیاست بهینه، پاسخگویی به نیاز افزایش یافته و طبیعتاً مقادیر سرریز کاهش می‌یابد.

با توجه به جدول ۲، در سیاست بهره‌برداری SOP بیش‌ترین کمبود و همچنین بیش‌ترین اعتمادپذیری ملاحظه می‌گردد. در نقطه مقابل قاعده بهره‌برداری NLDR-A با کم‌ترین مقدار کمبود، کم‌ترین مقدار اعتمادپذیری را به خود اختصاص داده است. در رابطه با دو معیار دیگر (آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری) مشاهده می‌گردد، نتایج معیار آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری به‌ترتیب مشابه شاخص اصلاح شده کمبود و اعتمادپذیری می‌باشد، که این امر با توجه به روابط آن‌ها قابل‌توجیه است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌گردد هرچه سیاست به سمت حداقل نمودن حداکثر تنش پیش رود، سیستم دچار آسیب کم‌تر می‌گردد (آسیب‌پذیری کم‌تر پاسخ NLDR-A)، اما تعداد شکست‌ها افزایش می‌یابد در نتیجه اعتمادپذیری سیستم کاهش می‌یابد (اعتمادپذیری کم‌تر پاسخ NLDR-A) و در نتیجه با افزایش تعداد شکست سرعت برگشت‌پذیری سیستم به شرایط مطمئن کاهش می‌یابد و سیستم مدت زمان طولانی‌تری دچار شکست می‌گردد (سرعت برگشت‌پذیری کم‌تر پاسخ NLDR-A). علی‌رغم این امر، در سیستم تنش‌های کم‌تری احساس می‌گردد (شاخص اصلاح‌شده کمبود کم‌تر پاسخ NLDR-A). این امر در نقطه مقابل (پاسخ SOP) نیز قابل توجیه است.

در نهایت با توجه به هدف موردنظر سیاست‌گذاران امر می‌توان هر یک از قواعد بهره‌برداری را با توجه به شاخص‌های عملکردی محاسبه شده، مدنظر قرار داد.

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری کلی

مسائل بهره‌برداری از مخزن دارای اهداف مختلف و متنوع هستند که به ندرت منتهی به یک جواب بهینه می‌شوند و معمولاً در آن‌ها مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه موجود است. در این مطالعه علاوه بر بهینه‌سازی ضرایب جیره‌بندی بهره‌برداری مخزن با هدف حداقل کردن شاخص اصلاح‌شده کمبود که در پژوهش‌های قبلی متداول بوده است، به‌طور هم‌زمان به بیشینه‌سازی اعتمادپذیری تامین نیازها نیز پرداخته شد. بنابراین با توجه به این‌که اهداف فوق متناقض با یکدیگر بودند، به جای یک جواب بهینه، با مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه مواجه هستیم. جهت حل مسأله فوق، از الگوریتم‌های چندهدفه NSGA-II، MOPSO و SPEA-II استفاده گردید. مدل‌های بهره‌برداری از مخزن برای یک دوره ۳۷ ساله از سال ۱۳۵٦ تا ۱۳۹۲، جهت یافتن ضرایب مربوطه در هر دو مدل خطی و غیرخطی، در شرایط یکسان برای هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه به تعداد ۵۰۰۰ تکرار اجرا گردید و جبهه پارتو بهینه حاصل شد. نتایج نشان داد در رابطه با مدل‌های LDR و NLDR با تعداد تکرار یکسان، مدل بهره‌برداری غیرخطی نتایج بهتری از خود نشان داده است که این امر می‌تواند به‌دلیل درجه آزادی بیش‌تر رابطه غیرخطی در تعیین منحنی فرمان رهاسازی مخزن سد باشد. از پاسخ‌های پارتو بهینه حاصله از مدل بهتر (SPEA-II-NLDR)، سه پاسخ به‌عنوان نمونه از قسمت‌های مختلف جبهه انتخاب گردید و مقادیر توابع هدف و سایر معیارهای ارزیابی در راستای توسعه پایدار برای سه پاسخ منتخب و سیاست بهره‌برداری SOP مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت برای هر یک از پاسخ‌های مربوطه سیاست بهینه بهره‌برداری ارائه گردید. لازم به ذکر است در این پژوهش مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه (بهینه پارتو) جهت برآورده نمودن اهداف مذکور ارائه گردید. اما انتخاب بهترین گزینه به‌عنوان سیاست بهینه بهره‌برداری بر عهده مسئولین امر و سیاست‌گذاران مربوطه است تا با لحاظ نمودن معیارهای اقتصادی، اجتماعی و پیامدهای زیست‌محیطی، بهترین جواب بهینه از میان سایر جواب‌های بهینه پارتو گزیده و منحنی فرمان متناظر با جواب منتخب تعیین گردد.

منابع

1. Ahmadianfar, I., Adib, A., and Taghian, M. 2016. Optimization of fuzzified hedging rules for multipurpose and multireservoir systems. J. Hydrol. Engin. 21: 4.
2. Azadnia, A., and Zahraei, B. 2010. Application of particle swarm optimization in multipurpose reservoir operation. 5th National Congress on Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhan. (In Persian)
3. Azaranfar, A., and Shahsavari, M. 2007. Application of different optimization models in reservoir operation rule curve. 2nd Conference on Water Resources Management, Isfahan University of Technology, Isfahan.
4. Baltar, A.M., and Fontane, D.G. 2008. Use of Multiobjective Particle Swarm Optimization in Water Resources Management. ASCE J. Water Resour. Plan. Manage. 134: 5. 275-265.
5. Bower, B.T., Hufschmidt, M.M., and Reedy, W.W. 1962. Operating Procedures: Their Role in the Design of Water-Resource Systems by Simulation Analyses, Design of Water Resourse Systems. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
6. Chang, J.F., Chen, L., and Chang, C.L. 2005. Optimizing reservoir operating rule curves by genetic algorithms. Hydrological Processes. 19: 2277-2289.

www.SID.ir

Archive of SID

7.Coello, C.A.C., Pulido, G.T., and Lechuga, M.S. 2004. Handling multiple objectives with particle swarm.
8.Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. 2000. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi objective optimization: NSGA-II. Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
9.Emadi, A.R., Ghaderi, K., Mohseni Movahed, S.A.A., and Soleimani, A. 2009. Evaluation of Water supply reliability in reservoir dams by standard operation policy. The First National Conference on Engineering and Management of Infrastructures. Tehran University, Tehran. (In Persian)
10.Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M.A. 2011. MOPSO algorithm and its application in multipurpose multireservoir operations. J. Hydroinform. 13: 4. 794-811.
11.Ghimire, B.N., and Reddy, M.J. 2013. Optimal reservoir operation for hydropower production using particle swarm optimization and sustainability analysis of hydropower. ISH J. Hydr. Engin. 19: 3. 196-210.
12.Gill, M., Kaheil, K., Khalil, Y.H., McKee, A., and Bastidas, L. 2006. Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology. Water Resource Research. 42: 7.
13.Hashimoto, T., Stendinger, J.R., and Loucks, D.P. 1982. Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. Water Resources Research. 18: 1. 14-20.
14.Hsu, N.S., and Cheng, K.W. 2002. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning. Water Resource Planning and Management. 128: 2. 102-112.
15.Karamouz, M., and Houck, M.H. 1982. Annual and monthly reservoir operating rules. Water Resources Research. 18: 5. 1337-1344.
16.Khalaf, R., and Shokrollahi, A. 2008. Reservoir operation rule curve of Balarood dam using yield model and simulation technique. 2nd National Conference on Dam and Hydropower, Tehran. (In Persian)
17.Liu, Y. 2009. Automatic calibration of a rainfall-runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm Expert Systems with Applications. 36: 9533-9538.
18.Louks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. 1981. Water Resource Systems Learning and Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
19.Moy, W.S., Cohon, J.L., and Revelle, C.S. 1986. A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir. J. Water Resour. Res. 22: 4. 489-498.
20.Oliveira, R., and Loucks, D. 1997. Operating rules for multi-reservoir systems. Water Resource Research. 33: 4. 839-852.
21.Parsopoulos, K.E., and Vrahatis, M.N. 2002. Particle swarm optimization method in multi objective problems. Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing, Madraid, Spain. Pp: 603-607.
22.Reddy, M.J., and Kumar, D.N. 2007. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. Hydrological Processes. 21: 2897-2909.
23.Sadeghi Tabas, S., Pourreza Bilondi, M., and Taghian, M. 2015. Multi-Objective Optimization of the Hedging Model for reservoir Operation Using Evolutionary Algorithms. J. Water Wastewater (Parallel title). Ab va Fazilab. 26: 5. 14-22. (In Persian)
24.Tabari, M.M.R. 2012. Conjunctive Use of Surface and Groundwater with Inter-Basin Transfer Approach: Case Study Piranshahr Plain. J. Water Wastewater. 22: 80. 103-113.
25.Tabari, M.M.R., Maknoon, R., and Ebadi, T. 2012. Development Structure for Optimal Long-Term Planning in Conjunctive Use. J. Water Wastewater. 23: 84. 56-69.
26.Tabari, M.M.R., and Soltani, J. 2013. Multi-Objective Optimal Model for Conjunctive Use Management Using SGAs and NSGA-II Models. Water resources management. 27: 1. 37-53.
27.Tu, M.Y., Hsu, N.S., Tsai, F.T.C., and Yeh, W.W.G. 2008. Optimization of hedging rules for reservoir operations. Water Resource Planning and Management. 134: 1. 3-13.

www.SID.ir

Archive of SID

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(5), 2019
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2018.12334.2691

Determine the optimal utilization of the reservoir as a multi-purpose policy for sustainable development

S.Y. Hosseyni[1], *M. Naseri[2] and S. Sadeghi-Tabas[3]

[1]M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, University of Birjand, Birjand, Iran,
[2]Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran,
[3]Ph.D. Student of Civil Engineering-Water Resources Engineering and Management, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran
Received: 10.15.2017; Accepted: 09.11.2018

Abstract

Background and Objectives: Reservoirs operation problems have various and diverse objectives that rarely lead to an optimized solution and usually contain a set of optimal solutions (Pareto Front). Solving these problems in the past has been possible only with the use of simpler methods, including the use of weight coefficients for various purposes and the conversion of them into a just one objective function. However in recent years, with the development of multi-objective methods, there is a good way to solve them. In this regard, the purpose of the present study was to investigate the efficiency of multi-objective optimization algorithms MOPSO, SPEA-II and NSGA-II in the reservoir operation problem using LDR, N-LDR operation models to generate the optimal Pareto front in order to sustainable development.

Materials and Methods: In order to obtain the mentioned purpose, first, the NSGA-II, MOPSO and SPEA-II optimization methods were evaluated using some benchmark problems such as standard ZDT family functions with identical conditions (equal population number and number of runs). After evaluating multi-objective optimization methods using standard ZDT family functions, NLDR, LDR and SOP operation models were coded in MATLAB programming environment and linked with multi-objective optimization methods. For each of the two optimization-simulation models (LDR and NLDR), the two objective functions were defined as follows: the first objective function was to minimize the sum of the MSI and the second objective function was the reliability maximization that the maximum of which is usually obtained under the SOP operation conditions. Reservoir operation models for a 37-year period from 1356 to 1392 were executed to find the coefficients in both linear and nonlinear models in the same conditions for each multi-objective optimization algorithm with 5000 itrations. The optimal Pareto front was obtained.

Results: The results of this study showed that the SPEA-II optimization method in NLDR operation model, has reached to the best optimal Pareto front among others. So, from its three answers were selected (by using various criteria) as sample and then sustainability indices such as reliability, resilience, vulnerability and MSI were computed for those three answers. By comparing the values of objective functions and other sustainable development criteria in SOP conditions and the NLDR-C response, it can be observed that using the multi-objective optimization model, we can by less shortages (less MSI 21, 76 compared to 55), reach to approximately maximum reliability (reliability in SOP conditions). However, in NLDR-A solution, the least shortage (MSI equal to 13.02) can be observed compared to other sample solutions and SOP policy.

* Corresponding Author; Email: mnaseri@birjand.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

Conclusion: According to the research findings, it was observed the SPEA-II optimization method in all of the standard ZDT family functions has reached to a more optimal Pareto front than other optimization methods. Also, compared to other optimization methods, this method has a more complete front of Pareto's solutions, which indicates the efficiency of this optimization method in multi-objective optimization problems. In the case of LDR and NLDR models with the same number of iterations, also it was observed that the NLDR model has shown better results, which can be due to the higher degree of freedom of nonlinear relationship in determining the operation policy of the reservoir releasing. In this research, a series of optimal (Pareto optimal) solutions was presented to meet the stated objectives. However, selection of the best solution as the optimal policy of operation is the responsibility of the relevant authorities and decision makers, so by taking into account the economic, social and environmental consequences, the best optimal solution can be chosen among others and the operation policy corresponding to the selected solution, can be determined.

Keywords: Multi-objective optimization, Operation policy, Sustainable development, Tabas's Nahrin dam

www.SID.ir