نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و چهارم /بهار ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 24 / June 2020

مقایسه عملکرد الگوریتم‌های MOPSO و NSGA-II در محاسبه منحنی فرمان سیستم‌های چند مخزنی

جواد پیاده کوهسار[۱]
حامد مازندرانی زاده[۲*]
محمدکاظم صدر[۳]

چکیده

رشد و گسترش شهرسازی، صنعتی شدن، افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و ... باعث شده تا کمبود و ضرورت مدیریت منابع آب بیش‌ازپیش آشکار گردد. احداث مخزن بر روی رودخانه‌ها به‌عنوان یک ابزار سازه‌ای برای تنظیم جریان اجتناب‌ناپذیر است، به‌نحوی‌که بر روی برخی رودخانه‌ها بیش از یک مخزن احداث شده است. وابستگی عملکرد و تأثیرگذاری بهره‌برداری از مخزن‌های بالادست بر عملکرد مخزن‌های پایین‌دست باعث پیچیدگی نحوه بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی می‌شود. در مدل‌های بهره‌برداری از مخازن غالباً تأمین و پوشش نیازهای مختلفی نظیر کشاورزی، شرب، محیط‌زیست و برقابی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های بهینه‌سازی فراکاوشی چندهدفه ابزاری مناسب در برخورد با مسائل چندهدفه غیر محدب، نظیر مسئله بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی، هستند. در این مطالعه، با تکیه‌بر توانایی دو روش بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب NSGA-II و الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات MOPSO، بهره‌برداری بهینه از یک سیستم دومخزنه شامل مخزن‌های بوستان و گلستان در حوضه گرگان‌رود، باهدف بهینه‌سازی تأمین نیازهای زیست‌محیطی و کشاورزی موردبررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با توجه به کاهش شدید ورودی‌ها، تأمین نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی به‌صورت کامل انجام نشده است. همچنین مقایسه عملکرد این دو الگوریتم نشان می‌دهد الگوریتم NSGA-II با ۴۶ درصد قابلیت اطمینان در تأمین نیازها، نسبت به الگوریتم MOPSO با ۴۲ درصد قابلیت اطمینان از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است. همچنین مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌ها نشان از برتری الگوریتم MOPSO نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد.

واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی چندهدفه، تأمین نیاز، تغییر اقلیم، شاخص اعتمادپذیری، گرگان‌رود.

---

[۱]. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
[۲]. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، "mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir"
[۳]. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه Exeter، انگلستان

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2] [Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

مقدمه

ایران ازجمله مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا محسوب می‌شود که با متوسط بارش سالانه کم‌تر از یک‌سوم متوسط جهانی در بسیاری از بخش‌ها، با محدودیت، کمبود و یا فقدان آب در تأمین مصارف روبه‌رو است. احداث مخزن بر روی رودخانه‌ها به‌عنوان یک ابزاری سازه‌ای برای تنظیم جریان در زمان و مکان یکی از راه‌های مقابله با بحران کم‌آبی است، به‌نحوی‌که بر روی برخی رودخانه‌ها بیش از یک سد احداث شده است. وابستگی عملکرد و تأثیرگذاری بهره‌برداری از هر یک از سدها بر عملکرد سد دیگر باعث پیچیدگی نحوه بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی می‌شود. در مدل‌های بهره‌برداری از سدها غالباً پوشش نیازهای مختلفی ازجمله کشاورزی، شرب، محیط‌زیست و برقابی در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر در عین توجه به منابع محدود آب، باید نسبت به رفع نیازهای گوناگون پایین‌دست توجه شود. مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه ابزاری مناسب در برخورد با مسائل چندهدفه ناهم‌جنس به‌ویژه مسائل غیر محدب هستند. مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات[۱] (MOPSO) و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[۲] NSGA-II ازجمله روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه کارآمد هستند که تاکنون موردتوجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. در زمینه MOPSO (فلاح مهدی‌پور و بزرگ حداد[۳]، ۲۰۱۳) و در زمینه NSGA-II (مازندرانی زاده[۴]، ۲۰۱۶ و حاجی رجبی و مازندرانی زاده[۵]، ۲۰۱۸) می‌توان اشاره نمود.

در تحقیق ممتحن و برهانی‌داریان[۶] در سال ۲۰۱۴ ضمن استفاده از الگوریتم GA در بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم سه مخزنی نتایج آن با روش‌های برنامه‌ریزی پویای استوکاستیک[۷] و برنامه‌ریزی پویا رگرسیون[۸] مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده‌ی برتری الگوریتم GA در تخمین تابع هدف و سرعت همگرایی در مقایسه با دو روش دیگر بوده است. استفاده از الگوریتم Ant Colony در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره و مقایسه نتایج آن با الگوریتم GA نشان می‌دهد که الگوریتم Ant Colony در دوره‌های بلندمدت از توانایی بیشتری نسبت به الگوریتم GA برخوردار است (کومار و جانگاردی[۹]، ۲۰۰۶). استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل[۱۰] برای بهینه‌سازی یک سیستم دومخزنه باهدف بهینه‌سازی مدیریت میزان آب رهاسازی در شرایط پیوسته توسط جلالی و همکاران[۱۱] در سال ۲۰۰۷ گزارش شده است. ترکیب الگوریتم GA و بازپخت فلزات[۱۲] (SA) برای بهره‌برداری بهینه از یک سیستم سیستم سه مخزنی بر روی رودخانه ژجیانگ[۱۳] چین برای دوره زمانی ۴۱ ساله باهدف بیشینه کردن انرژی تولیدی در طول سال، نشان از توانایی خوب این الگوریتم در حل مسائل پیچیده دارد (ژان گویی و ژیا[۱۴]، ۲۰۰۸).

مقایسه نتایج دو الگوریتم MOPSO و برنامه‌ریزی غیرخطی[۱۵] (NLP) در بهره‌برداری بهینه از مخزن بازفت[۱۶] با اهداف تولید انرژی برق‌آبی، تأمین نیاز پایین‌دست و کنترل سیلاب نشان می‌دهد که الگوریتم MOPSO در مقایسه با NLP از قابلیت بهتری در یافتن جواب‌های بهینه برخوردار

۱. Multi-Objective Particle Swarm Optimization
۲. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
۳. Fallah Mehdipour and Bozorg Haddad
۴. Mazandarani Zadeh
۵. Haji Rajabi and Mazandarani Zadeh
۶. Momtahen and Dariane
۷. Stochastic Dynamic Programming
۸. Dynamic Programming and Regression
۹. Kumar and Janga Reddy
۱۰. Ant Colony Optimization
۱۱. Jalali et. al.
۱۲. Simulated Annealing
۱۳. Zhejiang
۱۴. Xun-Gui and Xia
۱۵. Non Linear Programming
۱۶. Bazaft

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

است (فلاح مهدی‌پور و بزرگ حداد[۱]، ۲۰۱۳). تخصیص بهینه بار آلودگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه MOPSO با اهداف حداقل‌سازی مقدار تخطی از استاندارد کیفیت آب و مجموع هزینه‌های تصفیه و جریمه قابل پرداخت توسط تخلیه کنندگان به‌منظور تدوین سیاست‌های اولیه مدیریت کیفیت آب، نشان از توانمندی این روش در حل مسائل بزرگ‌مقیاس دارد (صابری و همکاران[۲]، ۲۰۱۶). استفاده از الگوریتم NSGA-II با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در طراحی سیستم زهکش کشت و صنعت سلمان فارسی نشان می‌دهد استفاده از ضریب زهکشی کمتر منجر به انتشار بار آلودگی کمتر خواهد شد و خسارت کمتری به محیط‌زیست وارد می‌شود (مازندرانی زاده[۳]، ۲۰۱۶). بررسی حداکثر سازی تخصیص نیاز آبی و حداقل نمودن برداشت آب از منابع آبی با استفاده از الگوریتم NSGA-II، در حوضه آبریز زرینه‌رود نشان می‌دهد که در صورت تخصیص بهینه آب میان کشاورزان، مقدار زیادی در منابع آب صرفه‌جویی خواهد شد (بنی حبیب و رضاپور طبری[۴]، ۲۰۱۷). فنگ و همکاران[۵] در سال ۲۰۱۷ ضمن مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم برقابی به‌منظور برآوردن نیاز شبکه برق در چین با دو هدف بیشینه‌سازی تولید کل و بیشینه‌سازی برق خروجی، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO و NSGA-IIنشان داد که روش MOPSO قادر به ارائه راه‌حل‌های بهتری نسبت به NSGA-II است.

در این تحقیق ضمن مقایسه دو الگوریتم پرکاربرد NSGA-II و MOPSO به استخراج منحنی فرمان مخزن‌های بوستان و گلستان واقع در حوضه گرگان‌رود در شرایط خشک‌سالی پرداخته شده است.

۱. Fallah Mehdipour and Bozorg Haddad

۲. Saberi et. al.

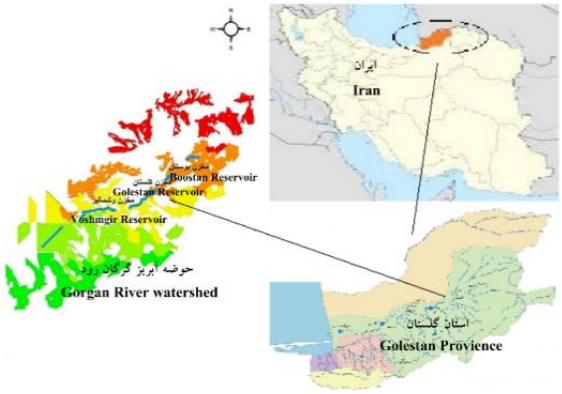
۳. Mazandarani Zadeh

۴. Banihabib and Rezapour Tabari

۵. Feng, Zh. Niu W. Zhou J. Cheng

مواد و روش‌ها

شکل (۱)، محل قرارگیری مخازن در حوضه آبریز گرگان‌رود را نمایش می‌دهد. این حوضه آبریز مشتمل بر دو سد بوستان و گلستان است که در وضعیت سری با یکدیگر قرار دارند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سد بوستان در بالادست و سد گلستان در پایین‌دست حوضه قرار دارد، سد وشمگیر نیز در پایین‌دست سد گلستان واقع‌شده و در این مطالعه به‌عنوان یک نیاز آبی از سد گلستان دیده شده است.



شکل (۱): حوضه آبریزگرگان‌رود و محل قرارگیری مخازن

سد مخزنی بوستان: بر اساس اطلاعات گزارش وضعیت بهره برداری از سدها منتشر شده توسط سازمان مدیریت منابع آب ایران در سال ۲۰۱۶، سد بوستان در شهرستان کلاله در شمال غربی شهر کلاله[۶] بر روی آبراهه اصلی حوضه آبریز گرگان‌رود احداث گردیده است. سد از نوع سدهای خاکی همگن با ارتفاع سد از پی ۳۲ متر، طول تاج سد ۶۲۰ متر و ظرفیت ذخیره حدود ۵۰ میلیون مترمکعب است. در جدول (۱)، مقادیر ورودی در سال آبی ۹۳-۹۴، تبخیر، کشاورزی و زیست‌محیطی مخزن بوستان آمده است.

۶. Kalaleh

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

جدول (۱): اطلاعات مخزن سد بوستان (Mcm)

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
ورودی	۰/۷	۱	۱/۹	۱/۲۵	۲/۲۴	۴/۹	۷/۶	۲	۰/۹	۰/۶	۰/۹	۶	۲۹/۹
تبخیر	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۳	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۱۴	۲/۳۸
کشاورزی	۰	۲	۰	۰	۰	۰/۸	۱/۵	۴/۵	۲	۳/۹	۴/۴	۴/۶	۲۳/۷
محیط‌زیست	۰/۲۴	۰/۳	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۴۷	۳/۱۱	۲/۴	۰/۹۸	۰/۳۳	۱/۰۲	۰/۵۳	۱۰/۲۷
جمع نیاز	۰/۲۹	۲/۳۳	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۷	۱/۳۴	۴/۶۳	۷/۲	۳/۶	۴/۷۵	۵/۸۴	۵/۲۷	۳۶/۳۵

سد مخزنی گلستان: بر اساس اطلاعات گزارش وضعیت بهره برداری از سدها منتشر شده توسط سازمان مدیریت منابع آب ایران در سال ۲۰۱۶، سد گلستان در شهرستان گنبدکاووس در حدود ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهر گنبد بر روی آبراهه اصلی حوضه احداث شده است. گلستان از نوع سدهای خاکی همگن است که ظرفیت مخزن در ابتدای دوره بهره‌برداری حدود ۸۶ میلیون مترمکعب بوده و به دلیل سیل سال ۱۳۸۰، ۲۴ میلیون مترمکعب آن از رسوب پرشده است و ظرفیت فعلی این مخزن ۶۲ میلیون مترمکعب است. در جدول (۲)، مقادیر ورودی در سال آبی ۹۳-۹۴، تبخیر، کشاورزی و زیست‌محیطی مخزن گلستان آمده است.

جدول (۲): اطلاعات مخزن سد گلستان (Mcm)

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
ورودی	۰/۸۴	۱/۳	۲/۸	2/9	۴/۴	۱۰/۸	۲۱/۴	۱/۸	۰/۸	۲/۹	۱/۱	۳/۸	۵۴/۵۸
تبخیر	۰/۱۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۷۴	۱/۳۹	۱/۱۲	۰/۹۷	۰/۴۸	۶/۰۳
کشاورزی	۰	۶/۵	۰	۰	۰	۳/۸	۴/۵	۱۱	۷/۸	۱۳/۳	۱۴	۶/۴	۶۶/۳
محیط‌زیست	۰/۷	۰/۹	۱	۱/۱	۱/۴	۲/۴	۱۴/۶	۱۰/۱	۴/۷	۱/۶	۲/۳	۱/۲	۴۲
وشمگیر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲/۵	۱۲/۵	۰	۰	۲۵
جمع نیاز	۰/۲۵	۷/۴۹	۱/۰۸	۱/۲۹	۱/۵۹	۶/۴۷	۱۹/۴۳	۲۱/۸۴	۲۶/۳۹	۲۸/۵۲	۱۷/۲۷	۸/۰۸	۱۳۹/۳۳

الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II

الگوریتم NSGA-II در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران[۱] معرفی شد. این الگوریتم که نسخه اصلاح‌شده NSGA است (دب[۲]، ۲۰۰۱) نسبت به نسخه قبل دارای دو مزیت الف- کاهش پیچیدگی محاسباتی، در نسخه قبل پیچیدگی از درجه $mN^{۲}$ بود، m تعداد اهداف و N اندازه جمعیت ب- استفاده از دو مفهوم غلبه اعضا بر یکدیگر و فاصله ازدحامی برای ایجاد گروهی از جواب‌های غیر مسلط بر یکدیگر[۳] که جواب‌های بهینه پارتو[۴] نامیده می‌شوند (مازندرانی زاده[۵]، ۲۰۱۶).

الف- مرتب‌سازی اعضا بر اساس غلبه: اگر $x_{۱}$ و $x_{۲}$ دو بردار جواب از مسئله بهینه‌سازی M هدفه باشند، $x_{۱}$ بر $x_{۲}$ مسلط است اگر و تنها اگر در تمام اهداف بهتر یا مساوی با $x_{۲}$ باشد $\left(f_i(x_{۱}) \geq f_i(x_{۲}), \forall i = ۱,۲,۳, \ldots\ldots M\right)$ و در حداقل یک هدف از آن بهتر باشد $\left(f_i(x_{۱}) \geq f_i(x_{۲}), \exists i = ۱,۲,۳, \ldots\ldots M\right)$.

محاسبه فاصله ازدحامی اعضا: بر اساس تعریف دب و همکاران[۱] فاصله هر جواب با نزدیک‌ترین همسایگانش فاصله ازدحامی نامیده می‌شود. درواقع فاصله ازدحامی نشان‌دهنده تراکم جواب‌های اطراف یک عضو است (رابطه (۱)).

$$cd_k(x_i) = \frac{f_k(x_{i+۱}) - f_k(x_{i-۱})}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \qquad (۱)$$

$$cd(x_i) = \sum_{k=۱}^{M} cd_k\,(x_i) \qquad (۲)$$

به طوری که $cd_k(x_i)$ فاصله ازدحامی جواب x_i به ازای تابع هدف kام و $cd(x_i)$ کل فاصله ازدحامی جواب x_i است. همچنین $f_k^{\max}$ و $f_k^{\min}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف kام است (کوئلو و همکاران[۶]، ۲۰۰۷). روند اجرای الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب در شکل (۲) آمده است.

۱. Deb et. al.

۲. Deb

۳. Non-dominated Solutions

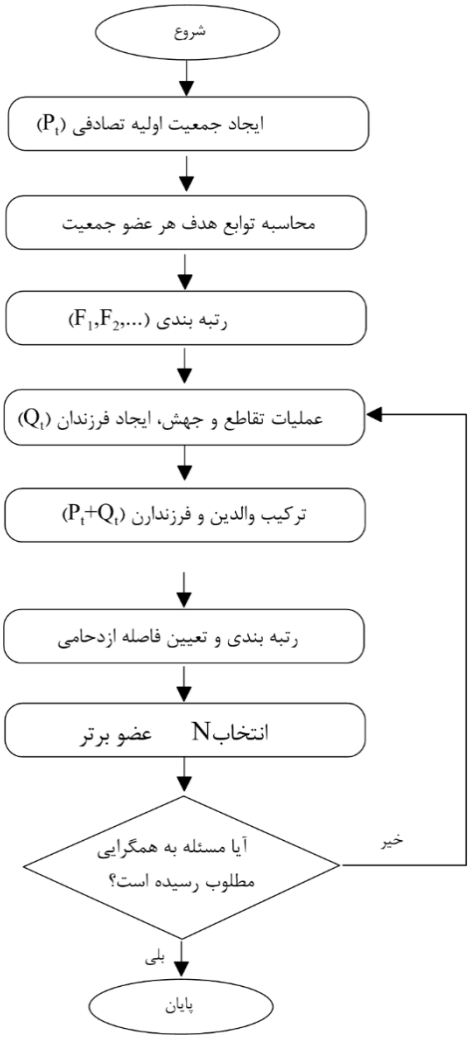
۴. Pareto Frontier

۵. Mazandarani Zadeh

۶. Coello et. al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]



شکل (۲): الگوریتم NSGA-II

الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه MOPSO

در این الگوریتم که نخستین بار توسط کوئلو و همکاران[1] در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است، فرایند جست‌وجو با تولید تعدادی ذره به‌صورت تصادفی و توزیع آن‌ها در فضای جواب آغاز می‌شود. مشابه الگوریتم تک‌هدفه PSO، سرعت و موقعیت هر ذره در هر مرحله باید محاسبه شود، با این تفاوت که به‌جای بهترین موقعیت جمعی، موقعیت یکی از اعضای آرشیو به‌تصادف انتخاب و به‌عنوان رهبر تعیین می‌شود. سرعت و مکان ذره در مرحله $t+1$ با استفاده از معادلات زیر قابل‌محاسبه است:

$$v_{t+1}^{i} = w_t v_t^i + c_1 r_1 (x_t^{i,best} - x_t^i) + c_2 r_2 (rep_{rand} - x_t^i) \quad (۳)$$

$$x_{t+1}^{i} = x_t^i + v_{t+1}^i \quad (۴)$$

$$-v_{\max} \le v_{t+1}^i \le v_{\max} \quad (۵)$$

$$w_t = w_{\min} + \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t} \quad (۶)$$

که x_t^i و v_t^i به ترتیب بردارهای مکان و سرعت ذره i در زمان t که rep_{rand} عضوی تصادفی از آرشیو، $x_t^{i,best}$ بهترین تجربه شخصی ذره i، w_t ضریب اینرسی متغیر از ۰/۹ تا ۰/۴، r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک، c_1 و c_2 به ترتیب ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری جمعی است. روند الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در شکل (۳) نمایش داده شده است (کوئلو و همکاران[1]، ۲۰۰۴).

تابع هدف پیشنهادی

مدل پیشنهادی باید از قابلیت بهینه‌سازی هم‌زمان دو هدف کشاورزی و زیست‌محیطی برخوردار باشد. هدف کشاورزی این مطالعه عبارت است از کاهش فاصله میان نیاز کشاورزی و مقدار آب تأمین‌شده و هدف زیست‌محیطی نیز عبارت از کاهش فاصله میان نیاز زیست‌محیطی پایه و مقدار تخصیص داده شده ماهانه به همراه تأمین نیاز سد وشمگیر است؛ بنابراین مدل پیشنهادی از دو هدف مستقل تأمین نیازهای کشاورزی (OF_1) و تأمین نیاز زیست‌محیطی (OF_2) تشکیل شده است.

۱. Coello et. al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

$$OF_1:\ \ Min \sum_{i=1}^{2} \sum_{t=1}^{12} [(AR_{i,t} - AD_{i,t})^2] \qquad (۷)$$

$$OF_2:\ \ Min \sum_{i=1}^{2} \sum_{t=1}^{12} [(ER_{i,t} - ED_{i,t})^2 + (VR_{i,t} - VD_{i,t})^2] \qquad (۸)$$

$Subject\ to$:

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + I_{i,t} - R_{i,t} - E_{i,t} - SP_{i,t} \qquad (۹)$$

$$S_{i,\min} \le S_{i,t} \le S_{i,\max} \qquad (۱۰)$$

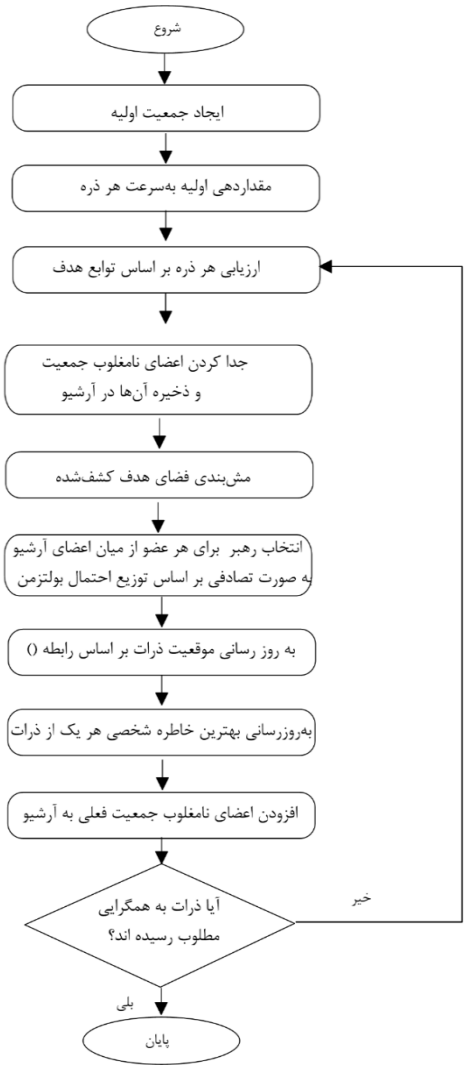
$$R_{i,\min} \le R_{i,t} \le R_{i,\max} \qquad (۱۱)$$

$$S_{i,1} = S_{i,\max} \qquad (۱۲)$$

$$S_{i,1} = S_{i,12} + I_{i,12} - R_{i,12} - E_{i,12} - SP_{i,12} \qquad (۱۳)$$

$$\text{All Var.} \ge 0 \qquad (۱۴)$$

در رابطه فوق، $AR_{i,t}$ و $AD_{i,t}$ به ترتیب مقدار آب رهاسازی شده و مقدار نیاز کشاورزی از مخزن i در دوره t، $E_{i,t}$ و $ED_{i,t}$ به ترتیب مقدار آب رهاشده و حداقل نیاز زیست‌محیطی از مخزن i در دوره t، $VR_{i,t}$ و $VD_{i,t}$ به ترتیب مقدار آب رهاشده و مقدار نیاز مخزن وشمگیر از مخزن i در دوره t است. $S_{i,t}$ مقدار ذخیره مخزن i در دوره t، $I_{i,t}$ ورودی به مخزن i در دوره t، $R_{i,t}$ خروجی از مخزن i در دوره t و $E_{i,t}$ تبخیر از سطح مخزن i در دوره t، $SP_{i,t}$ مقدار خروجی از سرریز از مخزن i در دوره t است. دو قید ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهد که حجم مخزن‌ها در ابتدا و انتهای دوره برابر بیشینه حجم مخزن در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است $I_{i,t}$ که به‌عنوان ورودی به مخزن در نظر گرفته شده است برای مخزن گلستان که در پایین‌دست بوستان قرار دارد شامل ورودی ناشی از بارندگی و



شکل (۳): الگوریتم MOPSO

ورودی ناشی از رهاسازی زیست‌محیطی سد بوستان است. به‌این‌ترتیب تعداد متغیرهای این مسئله بهینه‌سازی شامل ۲۴ متغیر (میزان رهاسازی ماهانه کشاورزی و محیطزیست) برای سد بوستان و ۲۶ متغیر (میزان رهاسازی ماهانه کشاورزی و محیطزیست و میزان رهاسازی برای سد وشمگیر در ماه‌های خرداد و تیر) برای سد گلستان است.

نتایج و بحث

پس از استخراج منحنی پارتو از هریک از روش‌ها، با استفاده از یکی از روش‌های انتخاب نقطه تعادل شامل روش نش[1]،

۱. Nash

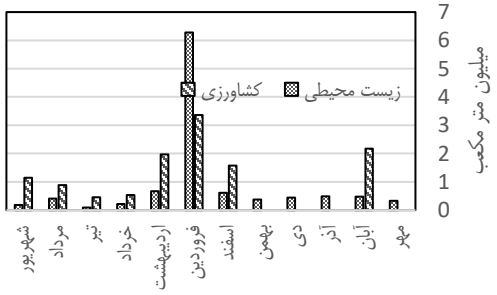
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

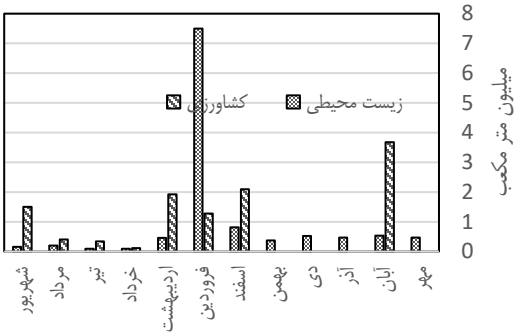
کالایی اسمروسکی[۱]، مساحت برابر[۲] می‌توان به انتخاب نقطه تعادل اقدام نمود (پرهیزکاری و همکاران[۳]، ۲۰۱۹). در این تحقیق از روش نش برای انتخاب این نقطه استفاده شده است.

الف- بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد بوستان

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب به نتایج مدل‌های بهینه‌سازی NSGA-II و MOPSO در بهره‌برداری از سد بوستان اختصاص دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ماه‌های آبان، اسفند، فروردین، اردیبهشت و شهریور در هر دو مدل بیشترین میزان تخصیص برای نیاز کشاورزی به‌دست‌آمده است که علت این امر نیاز فراوان محصولات کشاورزی به آبیاری در این دوره زمانی بوده است. همچنین کمترین میزان تخصیص آب کشاورزی در ماه تیر و مرداد به‌دست‌آمده است که دلیل آن می‌توان به سطح زیر کشت محدود تابستانه و میزان ورودی ناچیز به مخزن در این زمان بیان کرد. همچنین در ماه فروردین بیشترین میزان رهاسازی آب برای تأمین نیاز زیست‌محیطی به‌دست‌آمده است که دلیل آن می‌تواند ورودی مناسب به مخزن در این ماه از سال باشد که با توجه به شرایط منطقه، میزان بارندگی در این دوره زمانی مناسب است. همچنین میزان تخصیص آب برای تأمین نیاز زیست‌محیطی در ماه‌های تیر و مرداد کمترین میزان مقدار را به خود اختصاص داده است که می‌توان میزان ورودی کم به مخزن را ازجمله دلایل این تخصیص ناچیز بیان نمود.



شکل (۴): نتایج مدل NSGA-II در بهره‌برداری از سد بوستان



شکل (۵): نتایج مدل MOPSO در بهره‌برداری از سد بوستان

ب- بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن گلستان

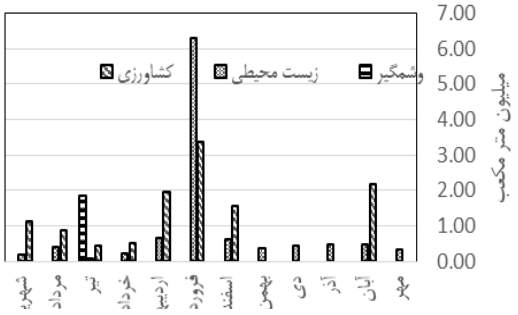
شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب به نتایج مدل‌های بهینه‌سازی NSGA-II و MOPSO در بهره‌برداری از سد گلستان اختصاص دارد. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از هر دو مدل بهینه‌سازی بیشترین میزان تخصیص از مخزن جهت تأمین نیازهای کشاورزی در ماه‌های آبان، اسفند و فروردین، اردیبهشت و شهریور به‌دست‌آمده است. علت این امر نیاز فراوان محصولات کشت‌شده در منطقه پایین‌دست مخزن به آبیاری و همچنین وسعت زیاد اراضی زیر کشت منطقه تحت پوشش مخزن گلستان است. در ماه‌های فروردین و اردیبهشت آبیاری غلات، کلزا و حبوبات و در اردیبهشت آبیاری پنبه نیز صورت می‌گیرد. همچنین کمترین میزان آب رهاشده برای نیاز کشاورزی از مخزن در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به‌دست‌آمده است که علت سطح زیرکشت محدود و ورودی کم به مخزن در فصل تابستان است. همچنین در ماه فروردین بیشترین میزان رهاسازی آب برای تأمین نیاز زیست‌محیطی به‌دست‌آمده است که دلیل آن می‌تواند ورودی مناسب به مخزن در این ماه از سال باشد. همچنین میزان تخصیص آب زیست‌محیطی در ماه شهریور کمترین میزان تخصیص را به خود اختصاص داده است؛ که می‌توان میزان

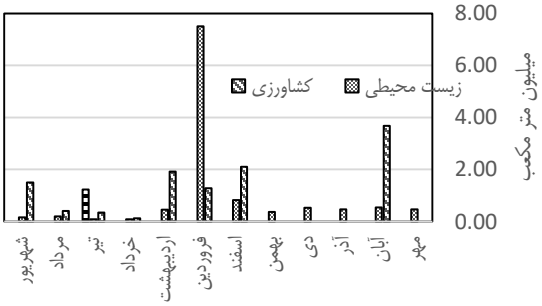
۱. Kalai-Smorodinsky
۲. Area Monotonic
۳. Parhizkari et. al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

ورودی کم به مخزن را ازجمله دلایل این تخصیص ناچیز بیان نمود. در خصوص تخصیص به سد وشمگیر، تخصیص فقط در تیرماه صورت گرفته است. بر اساس جدول (۲) نیاز سد وشمگیر فقط ماه‌های خرداد و تیر است که با توجه به کاهش شدید ورودی به مخزن تخصیص فقط در تیرماه انجام شده است. مقادیر مربوط به تأمین حق‌آبه مخزن وشمگیر با توجه به میزان بارش ناچیز در زمان‌های موردنیاز این مخزن (خرداد و تیر)، از روند مناسبی برخوردار نبوده است؛ بنابراین سد گلستان قادر به تأمین نیاز سد وشمگیر به مقادیر قابل‌قبول نبوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل NSGA-II از قابلیت مناسب‌تری در تأمین نیازها برخوردار است، به‌گونه‌ای در این مدل ضمن نگهداشت بیشتر آب در ماه فروردین به تأمین بیشتر نیاز سد وشمگیر در تیرماه اقدام شده است.

شکل (۶): نتایج مدل NSGA-II در بهره‌برداری از سد گلستان





شکل (۷): نتایج مدل MOPSO در بهره‌برداری از سد گلستان

ج- شاخص اعتمادپذیری در بهره‌برداری از مخازن:

شاخص‌های گوناگونی برای ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن می‌توان استفاده کرد. شاخص اعتمادپذیری با مفهوم فراوانی نسبی عدم شکست در این تحقیق موردتوجه قرار گرفته است. اعتمادپذیری کمی به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (کجلسن و رزبرگ[1]، ۲۰۰۴):

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{2} \sum_{t=1}^{12} (AR_{i,t} + ER_{i,t} + VR_{i,t})}{\sum_{i=1}^{2} \sum_{t=1}^{12} (AD_{i,t} + ED_{i,t} + VD_{i,t})} \qquad (۱۵)$$

در جدول (۳)، اعداد مربوط به مقادیر محاسبه‌شده اعتمادپذیری بهره‌برداری از مخازن با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی NSGA-II و MOPSO درج گردیده است.

جدول (۳): نتایج اعتمادپذیری

		NSGA-II	MOPSO
مخزن بوستان	کشاورزی	۰/۵۱	۰/۴۸
	محیط‌زیست	۰/۶۴	۰/۵۸
	کشاورزی+محیط‌زیست	۰/۵۵	۰/۵۱
مخزن گلستان	کشاورزی	۰/۴۴	۰/۳۷
	محیط‌زیست	۰/۶۴	۰/۶۰
	وشمگیر	۰/۰۹	۰/۱۰
	کشاورزی+محیط‌زیست+ وشمگیر	۰/۴۳	۰/۳۹
بوستان و گلستان		۰/۴۶	۰/۴۲

بر اساس جدول (۳)، نتایج نشان‌دهنده آن است که با استفاده از هردو الگوریتم پیشنهادی جواب‌های مناسبی برای مسئله حاصل شده است ولیکن نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک مطلوب‌تر است؛ که دلیل آن به دام نیفتادن در نقاط بهینه محلی و همگرایی مناسب بوده است.

۱. Kjeldsen and Rosbjerg

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با توجه به تأمین ۰/۵۱ درصد نیاز کشاورزی بوستان، ۰/۴۴ درصد نیاز کشاورزی گلستان و ۰/۶۴ درصد نیاز محیط‌زیست بوستان و ۰/۶۴ درصد نیاز محیط‌زیست گلستان و به‌طورکلی ۰/۴۶ درصد نیاز مخازن نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات با تأمین ۰/۴۸ درصد نیاز کشاورزی بوستان، ۰/۳۷ درصد نیاز کشاورزی گلستان و ۰/۵۸ درصد نیاز محیط‌زیست بوستان، ۰/۶۰ درصد نیاز محیط‌زیست گلستان و به‌طورکلی ۰/۴۲ درصد تأمین نیاز هردو مخزن توانسته است درصد بیشتری از نیاز مخازن را تأمین نماید.

د- مقایسه زمان انجام محاسبات الگوریتم‌ها

مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل زمان محاسبه مسئله برای ۱۰ بار اجرای برنامه با استفاده از هر دو الگوریتم پیشنهادی در جدول (۴) با استفاده از رایانه شش هسته‌ای با پردازنده مرکزی دو گیگاهرتز، حافظه cash چهار مگابایت، درج گردیده است.

جدول(۴): میانگین، حداقل و حداکثر زمان حل مسئله (ثانیه)

	حداکثر	میانگین	حداقل	انحراف معیار	تکرار
NSGA-II	۱۵۲/۱	۱۵۰/۵	۱۴۹/۳	۹/۶۳	۱۰
MOPSO	۱۸۹/۲۳	۱۵۱/۰۵	/۰۵ ۱۲۸	۲۰/۳۴	۱۰

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای زمان محاسبات الگوریتم‌های بهینه‌سازی موردنظر مشاهده می‌شود که الگوریتم MOPSO نسبت به الگوریتم NSGA-II، مسئله را در زمان بسیار کوتاه‌تری حل نموده است. ازآنجایی‌که بحث زمان در حل مسائل مهم بوده بنابراین الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه MOPSO از این برتری برخوردار بوده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود الگوریتم MOPSO از سرعت بیشتر و دقت کمتر نسبت به الگوریتم NSGA-II برخوردار است که این موضوع را می‌توان به ماهیت دو الگوریتم نسبت داد. الگوریتم MOPSO که بر اساس حرکت به سمت بهترین تجربه فردی و جمعی طراحی شده است ضمن جستجوی سریع فضا، امکان گیر کردن در موقعیت‌های بهینه محلی در آن وجود دارد. درحالی‌که در الگوریتم NSGA-II، به‌واسطه عملگر جهش امکان گیرکردن در بهینه محلی کمتر است.

جمع‌بندی

با نگاه دقیق به سیستم‌های منابع آب و مشکلات آن‌ها می‌توان به اهمیت بهینه‌سازی بهره‌برداری این سیستم‌ها پی برد. درگذشته بهره‌برداری از این سیستم‌های منابع آب به روش‌های کلاسیک صورت می‌گرفت ولی به دلیل حساسیت و پیچیدگی این مسائل، مهندسین منابع آب با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی روی آوردند. با توجه به کمبود آب و همچنین افزایش اراضی تحت کشت آبی، بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب باید با دقت و اهمیت بیشتری صورت بگیرد.

در این تحقیق تلاش شده است تا مدلی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن بوستان و گلستان ارائه شود که هم نیازهای کشاورزی و هم نیازهای زیست‌محیطی را مدنظر قرار دهد. مدل‌های ارائه‌شده شامل الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه NSGA-II و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات MOPSO می‌باشند که در این مدل‌ها کنترل سیلاب ماهانه منطقه پایین‌دست مخازن به‌عنوان قید در مسئله گنجانده شده است. برای بهینه‌سازی از اطلاعات سیستم منابع آب شامل مخازن بوستان و گلستان در حوضه آبریز گرگان‌رود استفاده شده است. به‌منظور محاسبه میزان آب رهاسازی شده، نیاز کشاورزی و زیست‌محیطی در نظر گرفته‌شده برای مخازن با توجه به اطلاعات سازمان آب

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

منطقه‌ای استان گلستان و میزان ورودی به مخازن سال آبی ۹۳-۹۴ و کاربرد فرمول‌های مربوطه مدل اجرا گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان از تخصیص بسیار مناسب برای محیط‌زیست است ولی برای کشاورزی هردو مخزن قادر به تأمین تمام نیاز کشاورزی نیست و تنها توانسته بخش از نیاز کشاورزی پایین‌دست را تأمین نمایند که به دلیل ورودی کم به این مخازن تأمین تمام نیاز کشاورزی امکان‌پذیر نیست.

به‌طورکلی نتایج به‌دست‌آمده از هردو الگوریتم مطلوب است ولی درصد قابل‌اعتماد تأمین نیازهای الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II با ۴۶ درصد نسبت MOPSO با ۴۲ درصد تأمین نیاز مناسب‌تر بوده است. درنهایت با توجه به نتایج حاصل‌شده، استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات MOPSO برای حل سایر مسائل بهینه‌سازی پیچیده علوم و مهندسی آب پیشنهاد می‌شود.

مراجع

۱- گزارش سالانه وضعیت بهره برداری از سدها، (۲۰۱۶) سازمان مدیریت منابع آب ایران

2- Banihabib, M.E. Rezapour Tabari. M. 2017. Development of Integrated Multi-Objective Strategy for Reallocation of Agricultural Water. Iran-Water Resources Research, Vol. 13, No. 1. pp. 38-52.

3- Coello, C. Pulido. G. Lechuga. M. 2004. Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions on evolutionary computation, Vol. 8, pp. 256-279.

4- Coello, C. Lamont. G. Vanveldhuizen. D. (2007). “Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems”. Springer, New York.

5- Deb, K. (2001). “Multi-objective optimization using evolutionary algorithms”. UK: Wiley.

6- Deb, K. Pratap. A. Agarwal S. Meyarivan. T. 2002. A Fast and Elitist Multi Objective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol 6, No. 2. pp. 182-197.

7- Fallah Mehdipour, E. Bozorg Haddad. O. 2013. Optimization of Multipurpose Reservoir Operation with Application Particle Swarm Optimization Algorithm. Journal of Water and Sewage, Vol. 23, No. 4. pp. 97-105.

8- Feng, Zh. Niu W. Zhou J. Cheng C. 2017. Multi-Objective Operation Optimization of a Cascaded Hydropower System. Journal of water resources planning and management, Vol. 143, No. 10.

9- Haji Rajabi, F. Mazandarani Zadeh H. 2018. Multi-Objective Optimization of Drainage Depth Based on Fair Benefits Division Short-Term Versus Long-Term Environmental Effects. Journal of Iran-Water Resources Research. Vol. 13, No. 4. pp.144-153.

10- Jalali, M. R. Afshar. A. Marino. M. A. 2007. Multi-Colony Ant Algorithm for Continuous Multi-Reservoir Operation Optimization Problem. Water Recourses Management. Vol. 21, pp. 1429-1447.

11- Kjeldsen, TR. Rosbjerg D. 2004. Choice of Reliability, Resilience and Vulnerability Estimators for Risk Assessments of Water Resources Systems. Hydrological Science Journal. Vol. 49, pp. 757-767.

12- Kumar, N. Janga Reddy. M. 2006. Ant Colony Optimization for Multi-Purpose Reservoir Operation. Water Reservoir Management. Vol. 20, pp. 879-898.

13- Mazandarani Zadeh, H. 2016. Drainage System Design by NSGA-II Multi Objective Algorithm Using Economic and Environmental Approach. Journal of Iran-Water Resources Research. Vol. 12, No. 3. pp. 142-152.

14- Momtahen, Sh. Dariane. A. B. 2007. Direct Search Approach Using Genetic Algorithm for Optimization of Water Reservoir Operating Policies. ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 113, No. 3. pp. 202-209.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

15- Parhizkari, M. Mazandarani Zadeh. H. Afshar. k. 2019. Multi-Objective Optimization of Hydropower Reservoirs Based on P.A.B Markets. Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant. Vol. 30, pp. 51-62.

16- Saberi, L. Niksokhan. M.H. Sarang. A. 2016. Optimal Waste Load Allocation Using Multi-Objective Optimization and Multi Criteria Decision Analysis, Journal of Water and Soil. Vol. 30, No. 1. pp. 88-98.

17- Xun-Gui, L. Xia W. 2008. An Improved Genetic Algorithm-Simulated Annealing Hybrid Algorithm for the Optimization of Multiple Reservoirs. Water Resources Management. Vol 22, pp. 1031-1049.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

Comparison of MOPSO and NSGA-II Performance in Calculating The Rule Curve Of Multi Reservoir Systems

Javad Piadeh Koohsar[۱]

Hamed Mazandarani Zadeh[۲]

Mohammad Kazem Sadr[۳]

Abstract:

The growth and expansion of urban development, industrialization, population growth, climate change, etc. have made the shortage and necessity of water resources management even more apparent. The construction of a reservoir on the rivers as an instrument for regulating flow in time and place is one of the ways to deal with the water crisis, as more than one dam has been built on some rivers. Functional dependence and the impact of the operation of each reservoir on the other one leads to the complexity of the operation of multi reservoir systems. In reservoir operation models, various requirements, such as agriculture, drinking, environmental and hydropower is considered. Multi-objective optimization models are an appropriate tool for dealing with heterogeneous multi-objective problems. MOPSO and NSGA-II are effective multi-objective optimization models that have been considered by many researchers so far. In this research, the comparison of two widely used NSGA-II and MOPSO algorithms to extract the rule curves of Boostan and Golestan reservoirs located in Gorgan Rood watershed in drought conditions has been investigated. The results show that due to the sharp decline in rainfall, agricultural and environmental needs have not been fully met. Also, a comparison of the performance of these two algorithms shows that the NSGA-II algorithm with 46% reliability in meeting the needs, has a better performance than the MOPSO algorithm with 42% reliability. Also, comparing the run time of algorithms shows the superiority of MOPSO algorithm over NSGA-II algorithm.

Keywords:

Multi Objective Optimization, Need supply, Climate Change, Reliability Index, Gorgan Rood

[۱] Master Graduated of Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

[۲] Associate Professor of Water Sciences and Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir.

[۳] Assistant Prof. Dept. of Water Engineering, University of Exeter.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.4.2]