

# بهینه‌سازی چندهدفه مدل جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند

صادق صادقی طبس<sup>۱</sup>، محسن پوررضا بیلندی<sup>۲</sup>، مهرداد تقیان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بیرجند  
(نویسنده مسئول) ۰۹۲۰۳۱۲۸۰۷۳ sadeghitabas@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان

(دریافت ۹۳/۲/۱۰ پذیرش ۹۳/۸/۳۰)

## چکیده

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 این گونه مسائل در گذشته تنها با کاربرد روش‌های ساده کننده 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. یکی از مسائل کلاسیک در این مدل جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن است که کاربرد آن برای کاهش اثرات خشکسالی در مدیریت منابع آب بسیار متداول است. در تحقیق حاضر بهینه‌سازی چند هدفه مدل جیره‌بندی با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II، SPEA-II، MOPSO و AMALGAM انجام شد. در این راستا، یافتن مقادیر بهینه ضرایب جیره‌بندی سد طالقان در یک دوره آماری ۳۵ ساله آبدی و با دو هدف کمینه نمودن شاخص اصلاح شده کمبود و بیشینه نمودن شاخص اعتمادپذیری (دو هدف متناقض با یکدیگر)، در دستور کار قرار گرفت. نتایج نشان داد دوره جیره‌بندی در ماه‌های فصل گرم (نیمه اول سال) است که مقادیر KP مربوط به همه آن‌ها را بیشینه نمود. مقادیر KP در ماه‌های سرد نیز به سمت کمترین مقدار پیش رفته که در حقیقت نزدیک شدن به همان سیاست SOP را در پی خواهد داشت. همچنین در این تحقیق کارایی الگوریتم‌های مذکور برای ارائه دامنه وسیعی از جواب‌های بهینه مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** جیره‌بندی، بهینه‌سازی چندهدفه، بهره‌برداری مخازن، الگوریتم‌های چندهدفه تکامل‌گرا

## ۱- مقدمه

ممکن است خسارات زیادی به بخش‌های مصرف کننده آب وارد آورد. از این رو برای استفاده مناسب و کاهش ریسک باید از سدهای مخزنی به‌عنوان 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 هوایی و نوع مصرف، کمترین کمبود در طول دوره بهره‌برداری به وجود آید.

در طراحی حجم مورد نیاز مخزن از سیاست بهره‌برداری استاندارد بر مبنای اعتمادپذیری استفاده می‌شود. در بهره‌برداری از مخزن بر اساس روش شبیه‌سازی<sup>۱</sup> SOP میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می‌شود. هنگامی که مخزن نتواند نیاز را به‌طور کامل تأمین کند، درصدی از آن را تأمین می‌کند. در این سیاست میزان کمبود کل به حداقل می‌رسد، ولی شدت کمبودها زیاد است.

منابع آب سطحی در ایران سهم عمده‌ای را در تأمین 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 تأمین 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 برای برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب به‌خصوص مخازن سدها به‌عنوان یکی از سازه‌های آبی ذخیره کننده منابع آب سطحی و رواناب‌ها، نیاز به اتخاذ سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن دارند. میزان آبدی رودخانه‌ها که از اصلی‌ترین منابع آب سطحی به‌شمار می‌روند، در طول سال تغییرات بسیاری دارد. بنابراین آبدی رودخانه و نیازها از نظر زمانی با یکدیگر همخوانی ندارند و اعتمادپذیری تأمین آب به این صورت به شدت کاهش می‌یابد که

<sup>1</sup> Standard Operation Policy (SOP)

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 [۱]. سیاست بهره‌برداری با منحنی فرمان بیان می‌شود. بر اساس منحنی فرمان در صورتی که حجم ذخیره مخزن از حدی پایین‌تر باشد، برای جلوگیری از شرایط بحرانی، درصدی از نیاز آن ماه از مخزن آزاد می‌شود. به این صورت از مواجه شدن با خسارات جدی جلوگیری شده و از شدت کمبودها کاسته می‌شود [۲]. در این حالت ممکن است تعداد کمبودها زیاد شود ولی از شدت آن‌ها کاسته می‌شود. مدل‌های مختلف بهینه‌سازی برای 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 آبدی<sup>۱</sup> و جیره‌بندی<sup>۲</sup> 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 در سال ۱۹۶۲ یافت [۳]. همچنین لاکس و همکاران در سال ۱۹۸۱ قواعد بهره‌برداری از مخزن را تشریح نمودند [۴]. یه در سال ۱۹۸۵ مطالعات پیشرفته‌ای در زمینه مدیریت مخزن و مدل‌های بهره‌برداری داشته است [۵]. شیانگ-شی و ریول در سال ۱۹۹۴ در بهره‌برداری منابع آب در دوره خشکسالی به تشریح سیاست بهره‌برداری استاندارد و مدل جیره‌بندی پرداختند [۶]. دندی و همکاران در سال ۱۹۹۷ در مقایسه روش‌هایی برای پیش‌بینی آبدی سیستم‌های چند مخزنه به تشریح مدل شبیه‌سازی، مدل بهینه‌سازی و مدل آبدی پرداختند [۷]. داهه و اسریواستاوا در سال ۲۰۰۲ در مدل آبدی چندگانه چند مخزنه با کمبود قابل قبول در آبدی سالانه به تشریح مدل آبدی پرداختند [۸]. آذرانفر و شهسواری در سال ۱۳۸۵، کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری مدل جیره‌بندی را در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری سد مخزنی کمندان پیشنهاد کردند [۹]. خلف و شکراللهی در سال ۱۳۸۷ در تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری به روش مدل آبدی و به تکنیک شبیه‌سازی در سد مخزنی بالا رود به این نتیجه دست یافتند که با تکنیک شبیه‌سازی هم می‌توان مدل آبدی را حل نمود [۱۰]. طبری و همکاران در سال ۱۳۹۰، در تحقیقی سیاست بهینه برداشت از منابع آب را بر پایه نظرات و سیاست‌های تصمیم‌گیران تأمین آب تعیین نمودند. نتایج نشان از کارایی بالای سیاست ارائه شده در جهت بهبود پتانسیل‌های آبی منطقه و جلوگیری از تلفات بی‌رویه آب داشت [۱۱]. عمادی در سال ۱۳۸۸

در بررسی اعتمادپذیری تأمین آب توسط سدهای مخزنی با استفاده از روش بهره‌برداری استاندارد به نتایج زیر دست یافت [۱۲]:

- ۱- در روش SOP تعداد ماه‌های کمبود کم است؛
- ۲- کمبودهای ایجاد شده در روش SOP بسیار شدید است که اگر سیستم واقعا با آن مواجه شود زیان‌های جبران‌ناپذیری ایجاد خواهد شد؛
- ۳- در روش SOP مقدار کمبود کل به حداقل می‌رسد که به دلیل کاهش حجم تبخیر در اثر پایین نگه داشتن سطح آب مخزن در این روش است.
- ۴- این روش در طراحی و به‌دست آوردن حجم مخزن و تراز نرمال مفید است.
- ۵- برای تعدیل میزان کمبود و کاهش خسارت باید از سیاست‌های دیگر بهره‌برداری که دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است در دوره بهره‌برداری استفاده شود.

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی نیاز به بهینه شدن در بیش از یک تابع هدف دارند. این مسائل، مسائل بهینه‌سازی چند هدفه<sup>۳</sup> 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 گرادین کارایی دشوار است. یکی از روش‌هایی که کارایی خود را در حل بسیاری از مسائل چند هدفه نشان داده است و در بسیاری از الگوریتم‌های چند هدفه مورد استفاده قرار گرفته است، روش مبتنی بر پارتو<sup>۴</sup> می‌باشد. یک مفهوم مهم در روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر پارتو مفهوم غالب بودن<sup>۵</sup> است. جواب  $i$  بر جواب  $j$  غالب است اگر دو شرط زیر برقرار باشد:

- ۱- جواب  $i$  از دید هیچ یک 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<sup>۶</sup> نامیده می‌شود. الگوریتم‌هایی مانند NSGA-II<sup>۷</sup>، MOPSO<sup>۸</sup>، SPEA-II<sup>۹</sup> و AMALGAM<sup>۱۰</sup> بر پایه مفهوم پارتو استوار شده‌اند.

روش‌های متعددی توسط محققان مختلف برای بهره‌برداری بهینه از مخازن چندگانه چندهدفه توسعه داده شده است. ادر و همکاران در سال ۱۹۹۷، مسئله طراحی و بهره‌برداری را برای هدف

<sup>3</sup> Multi Objective Optimization

<sup>4</sup> Pareto

<sup>5</sup> Dominate

<sup>6</sup> Pareto Front

<sup>7</sup> Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)

<sup>8</sup> Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

<sup>9</sup> Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA-II)

<sup>10</sup> A Multi Algorithm, Genetically Adaptive Multi-objective (AMALGAM)

<sup>1</sup> Yield Model

<sup>2</sup> Hedging

برقایی بر روی رودخانه دانوب بررسی کردند [۱۳]. جیل و همکاران در سال ۲۰۰۵، از MOPSO برای تخمین پارامترهای یک مدل معروف بارش- رواناب به نام مدل محاسبه رطوبت خاک ساکارامنتو<sup>۱</sup> با ۱۳ پارامتر استفاده نمودند [۱۴]. ردی و کومار در سال ۲۰۰۷، برای حل مسائل چندهدفه بهره‌برداری از مخزن مدل EM-MOPSO را پیشنهاد کردند. این نوع از PSO نیز برای یافتن راه حل مناسب از بهینه پارتو استفاده می‌کند. برای این کار یک آرشیو خارجی با اندازه متغیر را به کار بردند [۱۵]. بالتز و فوتتان در سال ۲۰۰۸، استفاده از الگوریتم MOPSO را از سه جنبه بررسی کردند، در این روش از یک آرشیو خارجی برای ذخیره جواب‌های غیرمغلوب استفاده شد [۱۶]. همچنین از یک روش شراکت جواب‌ها برای گسترده‌گی جواب‌ها و یک عملگر جهش برای بهبود جستجوی کلی استفاده نمودند. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش قیدε با بهینه‌سازی غیر خطی (ε-NLP) مقایسه شد. لیو در سال ۲۰۰۹ با استفاده از اپراتورهای به کار رفته در NSGA-II (رتبه‌بندی غیر پست، مرتب کردن بر اساس معیار فاصله شلوغی<sup>۲</sup> و تکنیک نخه‌گرایی) 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 به دست آمده حاکی از بهتر بودن تنوع جواب‌های غیرپست حاصل از مدل MOPSO بود.

طبری و سلطانی در سال ۲۰۱۳، در تحقیقی یک مدل چندهدفه که در آن به طور همزمان حداقل اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای آبی سیستم، حداکثر و هزینه‌های مرتبط با عدم تأمین نیاز، احیای آبخوان، تخطی از ظرفیت مخزن در حال بهره‌برداری و اولویت‌های تخصیص حداقل می‌شود را توسعه دادند. نتایج نشان داد که مدل NSGA-II در مدت زمان بسیار کمتری قادر به ارائه مقادیر بهینه تخصیص خواهد بود [۱۸]. آزادنیا و زهرایی در سال ۱۳۸۹، از الگوریتم MOPSO-DC در بهره‌برداری از سد سفیدرود با دو تابع هدف، حداقل‌سازی عدم نیاز پایین دست و کاهش خسارت ناشی از خروجی نامناسب استفاده نمودند [۱۹]. در این الگوریتم از یک آرشیو خارجی ذخیره جواب‌های غیرپست استفاده شده است. طبری در سال ۱۳۹۰، مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ای به منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص با توجه به محدودیت‌های موجود و با هدف حداکثر نمودن تأمین 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. نتایج نشان داد با اعمال برنامه‌های بهینه بهره‌برداری می‌توان حجم قابل توجهی از منابع آبی

داخل حوضه را به منظور احیای منابع آبی به برون از حوضه انتقال داد و از خروج آب توسط رودخانه‌های مرزی به میزان زیادی جلوگیری نمود [۲۰].

در این تحقیق علاوه بر بهینه‌سازی ضرایب جیره‌بندی بهره‌برداری مخزن با هدف حداقل کردن شاخص اصلاح شده کمبود که در تحقیقات قبلی متداول بوده است، به طور همزمان به بهینه‌سازی اعتمادپذیری تأمین نیازها نیز پرداخته شد. لذا با توجه به اینکه اهداف فوق متناقض با یکدیگر هستند به جای یک جواب بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به دست آمد. برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های چند هدفه هوشمند NSGA-II، MOPSO، SPEA-II و AMALGAM استفاده شد که الگوریتم اخیر (AMALGAM) به عنوان الگوریتم ترکیبی چندهدفه برای اولین بار در مسائل بهره‌برداری مخازن مطرح و ارائه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

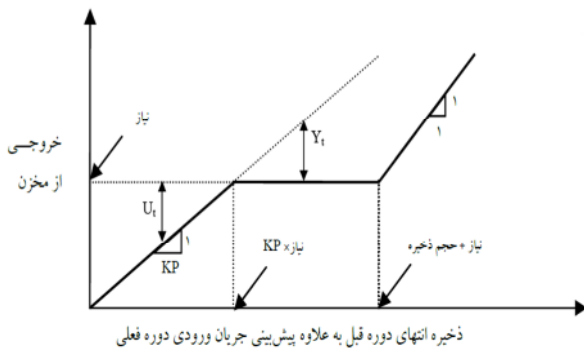
### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای حل مدل و تدوین یک سیاست بهره‌برداری مخزن به روش جیره‌بندی، از مشخصات مخزن سد طالقان و نیازهای شرب و کشاورزی آن استفاده شد. سد طالقان در حدود ۱۰۰ کیلومتری شمال غربی تهران در محل سنگیان بر روی رودخانه طالقان، احداث شده است (شکل ۱). آب تنظیمی این سد برای تأمین حقابه‌های پایین دست (۱۲ میلیون مترمکعب) و نیز به همراه آب اندک رودخانه زیاران، به موازات رودخانه طالقان، برای تأمین بخشی از نیاز شرب شهر تهران (۱۵۰ میلیون مترمکعب)، نیازهای کشاورزی دشت قزوین (۲۷۹/۱ میلیون مترمکعب) و نیاز تغذیه مصنوعی (۲۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شده است. رقوم نرمال مخزن در تراز ۱۷۸۰ متر از سطح دریا قرار داشته و حجم کل و حجم مفید آن به ترتیب معادل ۴۲۰ و ۳۲۰ میلیون مترمکعب است. مشخصات نیازها و آبدی ورودی به مخزن در یک دوره ۳۵ ساله (۱۳۷۷-۱۳۴۳) در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه مقادیر تبخیر از سطح مخزن وابسته به تراز سطح آب مخزن است، مقادیر آن در شکل لحاظ نشده، ولی در روابط بهینه‌سازی تبخیر به عنوان تابعی از تراز سطح آب مخزن لحاظ شده است (هرچند مقدار آن نیز ناچیز است).

از میان این ۳۵ سال، سه سال خشک پیاپی ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۰ به عنوان شاخص انتخاب شد و مدل جیره‌بندی، برای یافتن KP‌های هر ماه (ضرایب جیره‌بندی) با این سه سال اجرا شد. لازم به ذکر است که در مدل، آبدی رودخانه زیاران با توجه به مقدار اندک آن برای ایجاد شرایط بحرانی تر، استفاده نشد.

<sup>1</sup> Sacramento

<sup>2</sup> Crowding Distance Measure



شکل ۳- قاعده بهره‌برداری مخزن با رویه جیره‌بندی پیوسته

بر اساس این سیاست میزان خروجی برای مواقعی که حجم ذخیره به علاوه مقدار پیش‌بینی جریان ورودی، کمتر از  $KP$  برابر نیاز باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$(1) \quad \text{خروجی} = (\text{ذخیره} + \text{ورودی پیش‌بینی شده}) \times (1/KP)$$

در مدل بهینه‌سازی که در زیر آمده است، متغیرهای تصمیم مقادیر  $KP_i$  (ضرایب جیره‌بندی) و حداقل نمودن شاخص اصلاح شده کمبود<sup>۲</sup> و حداکثر نمودن شاخص اعتمادپذیری به‌عنوان توابع هدف انتخاب شدند.

تابع هدف اول:  $MSI$  که در رابطه ۲ نشان داده شده است، از حیث جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی لحاظ شده است. این تابع هدف توسط سایر محققان نیز به‌کار رفته است [۲۲، ۲۳ و ۲۴].

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

که در این رابطه

$TS_t$  میزان کمبود در دوره زمانی  $t$ ،  $TD_t$  میزان نیاز در دوره زمانی  $t$  و  $n$  تعداد کل دوره‌های زمانی (ماه) است. وجود توان دو در این رابطه باعث می‌شود جریمه بالاتری به کمبودهای شدیدتر تعلق گرفته و توزیع کمبودها بهتر صورت گیرد.

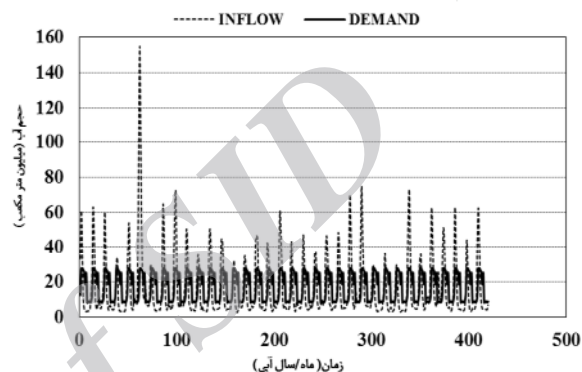
تابع هدف دوم: شاخص اعتمادپذیری ( $Z$ ) بوده و عبارت است از، احتمال اینکه سیستم در طول دوره بهره‌برداری به‌صورت بهره‌برداری نرمال (بدون شکست) باشد که رابطه ریاضی آن به صورت زیر است [۲۵]

$$(3) \quad Z = 1 - \left( \frac{F}{P} \right)$$

<sup>2</sup> Modified Shortage Index (MSI)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- مشخصات نیازها و آبدهی ورودی به مخزن در بازه زمانی ۳۵ سال (۱۳۴۳-۱۳۷۷)

## ۲-۲- روش جیره‌بندی (SQ Type)

بر اساس روش جیره‌بندی SQ Type (استفاده از مجموع ذخیره و جریان ورودی مخزن در بازه زمانی جاری)، در زمان اعمال کاهش نیاز، نیاز و به دنبال آن خروجی مخزن تابعی از حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره جاری به‌علاوه ورودی پیش‌بینی شده در طول دوره جاری است. پارامترهای سیاست مذکور که در حقیقت راهنمایی برای تعیین چگونگی تعدیل نیاز هستند، از حل یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی حاصل می‌شود.

شیانگ شی و ریول در سال ۱۹۹۴ یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط غیر خطی<sup>۱</sup> ارائه دادند [۶]. این مدل بر پایه تغییر شیب 1:1 منحنی S شکل مس و همکاران استوار بود [۲۱]. شکل ۳، منحنی مربوط به سیاست جیره‌بندی را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Mixed Integer Non-Linear Programming

که در آن

F تعداد کل دوره‌های شکست و T تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری است.

منظور از هر شکست در این رابطه عدم تأمین نیاز آبی به صورت کامل در هر دوره (یک ماه) است.

روابط و قیود مورد استفاده در مدل جیره‌بندی به صورت زیر ارائه شده است

$$F1 = \text{Minimize (MSI)} \quad (4)$$

$$F2 = \text{Maximize (Z)} \quad (5)$$

Subject to:

$$R_t + Y_t = (1/KP_t) \times (S_t + I_t) \quad (6)$$

$$R_t + U_t = D_t \quad (7)$$

$$Y_t \times U_t = 0 \quad (8)$$

$$U_t \leq M \quad (9)$$

$$S_t \leq C \quad (10)$$

$$S_n \geq S_0 \quad (11)$$

$$b_t \leq [S_t/C] \quad (12)$$

$$W_t \leq b_t \times B \quad (13)$$

$$S_{t+1} - S_t + R_t + W_t = I_t \quad (14)$$

$$b_t = \text{Binary variable (0 or 1)} \quad (15)$$

$$S_t, W_t, R_t, Y_t, U_t, K_p \geq 0 \quad (16)$$

که در این روابط

M حداکثر کمبود،  $R_t$  خروجی مخزن در دوره  $t$ ،  $Y_t$  متغیر مازاد،  $U_t$  کمبود،  $C$  ظرفیت مخزن،  $S_t$  حجم مخزن در ابتدای دوره  $t$ ،  $S_n$  حجم مخزن در انتهای دوره دراز مدت،  $S_0$  حجم مخزن در ابتدای دوره

دراز مدت،  $b_t$  متغیر دودویی،  $W_t$  سرریز در دوره  $t$ ، [ ] نماد ریاضی جزء صحیح،  $I_t$  ورودی به مخزن در دوره  $t$ ،  $K$  شیب خط بهره‌برداری در ماه  $P$  و  $B$  یک عدد بسیار بزرگ است.

در این مدل، سه قید اول قوانین بهره‌برداری توصیف می‌شود. اگر ذخیره به علاوه جریان پیش‌بینی شده بزرگ‌تر یا مساوی حجم آستانه  $D_t \times K$  باشد، کل نیاز رها خواهد شد. در نتیجه مقدار کمبود  $U_t$  برابر صفر و متغیر نقصان  $Y_t$  مقدار مثبتی می‌شود. در غیر این صورت  $(1/KP_t) \times (S_t + I_t)$  از مخزن رها می‌شود که در این حالت  $Y_t$  برابر صفر می‌شود و  $U_t$  مقدار مثبتی می‌گیرد. رابطه  $8$  از مثبت شدن همزمان دو متغیر  $Y_t$  و  $U_t$  در دوره  $t$  جلوگیری می‌کند. این سه قید تضمین‌کننده شرایط بهره‌برداری از قاعده SOP است. از روابط دیگر برای کنترل صحت زمان سرریزها و پیوستگی مخزن استفاده می‌شود [6 و 26].

### ۲-۳- الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند

در مقایسه با مسائل تک هدفه که در آن‌ها یک جواب بهینه مورد نظر است، در مسائل چند هدفه به ندرت یک جواب قابل پذیرش موجود است. در این مسائل مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه وجود دارد که بر یکدیگر برتری ندارند و اصطلاحاً به آن‌ها بهینه پارتو<sup>۱</sup> گفته می‌شود. این مجموعه جواب‌ها از این جهت بهینه هستند که راه حل بهتری نسبت به آن‌ها با در نظر گرفتن تمام اهداف وجود ندارد. جواب مسئله بهینه‌سازی با چند هدف، یک حل یگانه به عنوان بهینه کلی نیست. در عوض در بهینه‌سازی چند منظوره، هدف یافتن یک دسته از جواب‌های بهینه پارتو است.

در ادامه الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند به کار رفته در این تحقیق تشریح می‌شوند.

### ۲-۳-۱- NSGA-II

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه کلاسیک در حل مسائل پیچیده دارای نقص‌های عمده‌ای مانند هزینه محاسباتی قابل توجه 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 غیر خطی هستند. دب و همکاران در سال ۲۰۰۰، مدل الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II را برای فائق آمدن بر ضعف‌های مدل‌های چند هدفه قبلی مانند مشکلات مربوط به هزینه محاسباتی، پیشنهاد نمودند [27]. الگوریتم چندهدفه NSGA-II بر اساس طبقه‌بندی غیر پست با پیچیدگی محاسباتی بالا کار می‌کند. عملگر انتخاب در این

<sup>1</sup> Pareto-Optimal



۵- شرکت اعضای مجموعه جانبی در روند انتخاب<sup>۱</sup> الگوریتم ژنتیک.

### ۲-۳-۴- AMALGAM

یکی از جدیدترین الگوریتم‌های چند هدفه هوشمند الگوریتم AMALGAM است که توسط روت و رایبسون در سال ۲۰۰۷ ارائه شد [۳۰]. روش AMALGAM ترکیبی از دو مفهوم جدید است و در دو حالت فرایند تکامل در آن صورت می‌گیرد. در حالت اول از قابلیت‌های تکاملی چهار الگوریتم چندهدفه NSGA-II، PSO، DE و AMS به صورت همزمان برای تکامل جمعیت استفاده می‌شود و در حالت دوم از قابلیت تکامل خود الگوریتم AMALGAM برای تکامل جمعیت استفاده می‌شود. این الگوریتم به دلیل استفاده همزمان از چند الگوریتم چندهدفه هوشمند دیگر، الگوریتم ترکیبی<sup>۲</sup> چند هدفه نامیده می‌شود. در این الگوریتم نیز مقدار برازندگی هر عضو از جمعیت بر اساس مفهوم غلبه پارتو (FNS<sup>۳</sup>) تعیین می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

مدل جیره‌بندی SQ type و الگوریتم‌های چند هدفه به‌کار رفته در این تحقیق در محیط برنامه‌نویسی متلب<sup>۴</sup> کدنویسی شده و با یکدیگر تلفیق شدند. برای مدل دو تابع هدف به این شرح تعریف شد: تابع هدف اول کمینه‌سازی مجموع درصد کمبودهای برآورد نشده و تابع هدف دوم افزایش اعتمادپذیری بود که بیشینه آن معمولاً در شرایط بهره‌برداری SOP حاصل می‌شود. دو تابع هدف مذکور با یکدیگر رابطه عکس داشته و با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد. مدل جیره‌بندی برای سه سال خشک پایانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۰ به‌عنوان شاخص، برای یافتن KP های هر ماه (ضرایب جیره‌بندی)، در شرایط یکسان برای هر یک از الگوریتم‌های هوشمند اجرا شد. در جدول ۱ سه نمونه KP<sub>i</sub> (متغیرهای تصمیم‌گیری) بهینه محاسبه شده از قسمت‌های مختلف جبهه پارتو توسط هر یک از الگوریتم‌های چند هدفه هوشمند برای سه سال مذکور آورده شده است (شکل ۴).

مقادیر قرار گرفته در جدول ۱ در تمامی روش‌ها دارای روند خاصی بودند. به این معنی که دوره جیره‌بندی در ماه‌های فصل گرم (نیمه اول سال) قرار داشت و در نتیجه مقادیر KP مربوط به همه آن‌ها، بیشینه شد. مقادیر KP در ماه‌های سرد نیز به سمت کمترین پیش رفته که در حقیقت نزدیک شدن به همان سیاست SOP را در پی خواهد داشت. این روند نشانه پیروی الگوریتم‌های به‌کار رفته از

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 برآزش، گسترش و پراکندگی جواب‌ها انتخاب شد. بنابراین اصل نخه‌گرایی کاملاً رعایت می‌شود. در مقاله حاضر با استفاده از روش بالا، منحنی تعامل بین اهداف به دست آمد.

### ۲-۳-۲- MOPSO

یکی دیگر از ابزارهای بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه، الگوریتم MOPSO است. در این الگوریتم فرایند جستجو با تولید مجموعه‌های تصادفی به تعداد اهداف، با مشخصات یکسان (تعداد ذره و ابعاد) و توزیع یکنواخت آغاز می‌شود. ساختار این الگوریتم مشابه روشی است که پارسیپولوس و وراهیتیس در سال ۲۰۰۲ با نام بردار ارزیابی الگوریتم مجموعه ذرات ارائه نمودند [۲۸]. در این روش برای هر هدف یک مجموعه تولید شده و Gbest مرتبط با آن در هر تکرار استخراج می‌شود. 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 به دست می‌آید. در نهایت پس از تعداد مشخصی تکرار، مجموعه حاصل از آخرین مجموعه، به‌عنوان مجموعه نهایی و نقاط غیر غالب آن به‌عنوان مجموعه جواب یا پارتو هیچ برتری بر یکدیگر نداشته و با کاهش مقدار یک تابع هدف، مقدار تابع دیگر افزایش می‌یابد و بر عکس.

### ۲-۳-۳- SPEA-II

این روش ترکیبی از چند روش متداول و تکنیک‌هایی برای به دست آوردن مجموعه جوابی نزدیک به مجموعه جواب بهینه پارتو است که بر الگوریتم ژنتیک استوار است و تمامی مراحل آن را دنبال می‌کند [۲۹]. 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:

- ۱- استفاده از مفهوم غلبه پارتو برای انتساب مقدار برازندگی؛
- ۲- استفاده از روش‌های خوشه‌بندی برای جلوگیری از بزرگ شدن اندازه جمعیت جانبی؛
- ۳- مقدار برازندگی جواب‌های موجود در جمعیت با توجه به مفهوم غلبه پارتو و اعضای جمعیت جانبی انتساب می‌یابد؛
- ۴- انتساب مقداری بین [0,1] به‌عنوان مقدار برازندگی به هر عضو مجموعه جانبی؛

<sup>1</sup> Selection Process

<sup>2</sup> Multi-algorithm

<sup>3</sup> Fast Non-dominated Sorting

<sup>4</sup> MATLAB

جدول ۱- نمونه KP<sub>i</sub> های بهینه محاسبه شده توسط هریک از الگوریتم های چند هدفه هوشمند برای سه سال (۱۳۶۸-۱۳۷۰)

اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	مهر	مرداد	مهر	مهر	اردیبهشت	فروردین	
۱/۴۳	۱/۵۷	۱/۸۱	۲/۲۶	۲/۲۲	۱/۹۸	۳/۳۲	۴/۴۴	۵/۵۳	۵/۴۹	۵/۲۴	۳/۵۹	NSGA-II
۱/۰۰	۱/۲۴	۱/۶۳	۱/۹۲	۲/۳۱	۱/۰۴	۲/۲۷	۴/۴۵	۵/۵۵	۵/۶۵	۵/۲۵	۲/۳۶	
۱/۰۰	۱/۰۱	۱/۲۱	۱/۹۲	۲/۲۹	۱/۴۴	۱/۱۰	۵/۶۱	۶/۴۳	۶/۸۱	۶/۵۱	۱/۹۲	
۱/۰۰	۱/۲۷	۱/۴۶	۲/۱۴	۲/۶۷	۲/۲۲	۲/۸۵	۳/۶۸	۴/۵۵	۴/۸۹	۳/۸۹	۲/۹۸	MOPSO
۱/۰۰	۱/۰۹	۱/۰۰	۱/۶۱	۱/۴۶	۲/۴۹	۱/۴۴	۴/۰۳	۴/۶۹	۴/۹۸	۴/۰۱	۲/۴۵	
۱/۲۷	۱/۲۳	۱/۲۴	۱/۵۳	۲/۲۶	۲/۴۸	۱/۹۸	۵/۶۱	۶/۲۶	۲/۸۷	۶/۴۷	۱/۵۴	
۱/۰۰	۱/۰۳	۱/۰۱	۱/۰۴	۱/۱۰	۱/۹۳	۲/۹۹	۴/۰۶	۴/۸۸	۴/۹۳	۴/۷۷	۲/۳۸	SPEA-II
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۳۷	۱/۰۴	۱/۱۲	۱/۹۱	۱/۶۲	۲/۳۳	۹/۵۷	۹/۳۸	۶/۸۹	۱/۰۳	
۱/۰۰	۱/۰۲	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۲۴	۲/۰۸	۳/۱۸	۴/۲۹	۴/۵۱	۳/۸۱	۳/۶۲	۱/۰۰	
۱/۰۰	۱/۰۲	۱/۴۲	۱/۶۰	۱/۰۹	۱/۷۹	۱/۴۶	۵/۰۷	۵/۷۴	۵/۹۳	۵/۸۱	۱/۰۸	AMALGAM
۱/۰۰	۱/۰۶	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۴۲	۱/۳۶	۱/۰۹	۸/۲۲	۱/۰۱	۱۱/۲۸	۹/۸۷	۱/۲۲	
۱/۰۰	۱/۰۲	۱/۰۰	۱/۶۰	۱/۰۹	۱/۷۹	۱/۴۶	۵/۰۷	۵/۷۴	۵/۹۳	۵/۸۱	۱/۰۸	

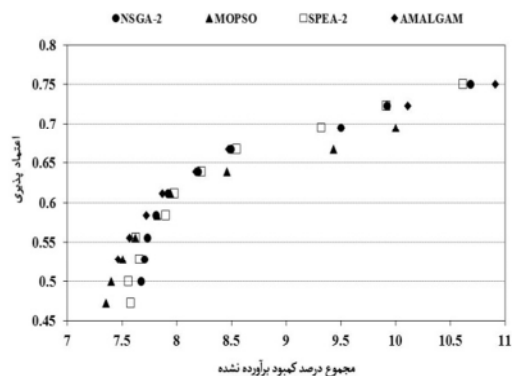
الگوریتم NSGA-II و SPEA-II در کمینه کردن تابع هدف مجموع درصد کمبود برآورده نشده (مقادیر کمتر از ۹/۵) در آخرین رتبه قرار می‌گیرند اما از نظر تابع هدف محور عمودی (اعتماد پذیری) همه روش‌ها در یک رتبه قرار می‌گیرند. در مجموع و به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت در شرایط یکسان، الگوریتم ترکیبی چند هدفه هوشمند AMALGAM در بازه زیادی از جبهه پارتو، مقادیر بهتری از توابع هدف را تولید می‌کند که این امر نشان از کارایی نسبی بهتر الگوریتم‌های ترکیبی چندهدفه نسبت به الگوریتم‌های چندهدفه ساده<sup>۱</sup> دارد.

همچنین مقادیر تابع هدف برای مدل در شرایط SOP نیز محاسبه شد. این مقادیر برای توابع هدف اول و دوم (مجموع درصد کمبود برآورده نشده و اعتماد پذیری) به ترتیب برابر ۲۳/۳۱ و ۰/۴۱ بود. با مقایسه مقادیر توابع هدف در شرایط SOP و مقادیر محاسبه شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود مدل‌های بهینه‌سازی کارایی نسبتاً بالایی را در بهینه نمودن توابع هدف دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

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 اصلاح شده کمبود که در تحقیقات قبلی متداول بوده

تابع هدف "کمینه کردن بیشترین کمبود" بود، زیرا چنانچه تابع هدف مذکور به عنوان تنها هدف مسئله تعریف می‌شد، مقادیر KP برای ماه‌های گرم که بیشترین نیازها را در خود جای داده است به سمت بیشینه آن (در اینجا عدد ۲۰) سوق می‌یافت و برعکس این مقدار در ماه‌های سرد به حداقل (یعنی ۱) حرکت می‌نمود. با افزایش توابع هدف به دو تابع با اهداف متضاد، این روند حفظ ولی از شدت آن تا حد زیادی کاسته شد. همچنین جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف توسط هریک از الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف توسط هریک از الگوریتم‌های چندهدفه هوشمند

با استفاده از شکل ۴ می‌توان استنباط نمود روش‌های به‌کار رفته هیچ برتری محسوسی نسبت به یکدیگر نداشته و برتری هر کدام به دیگری در قسمت‌هایی از نمودار مشهود است. به‌عنوان مثال دو

<sup>1</sup> Single Multi Objective Algorithms.

همچنین در مقایسه روش‌های بهینه‌سازی می‌توان دریافت در شرایط یکسان، روش‌های به‌کار رفته برتری محسوسی نسبت به یکدیگر ندارند. ولی در مجموع و به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت، الگوریتم ترکیبی چند هدفه AMALGAM جبهه پارتوی نسبتاً بهتری از مقادیر توابع هدف را تولید می‌کند که نشان از کارایی نسبتاً بهتر الگوریتم‌های چندهدفه ترکیبی نسبت به الگوریتم‌های چندهدفه ساده دارد. در انتها با توجه به عدم استفاده از الگوریتم چندهدفه ترکیبی AMALGAM (یکی از روش‌های چندهدفه نوین در حوضه بهینه‌سازی) در مسائل و مباحث هیدرولوژیکی و منابع آبی، استفاده از الگوریتم مذکور در زمینه‌های مرتبط، پیشنهاد می‌شود.

است، به‌طور همزمان به بیشینه‌سازی اعتماد پذیری تأمین نیازها نیز پرداخته شد. لذا با توجه به اینکه اهداف بالا متناقض با یکدیگر بودند، به‌جای یک جواب بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه ایجاد شد. برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های چندهدفه ساده MOPSO، NSGA-II و SPEA-II و الگوریتم چندهدفه ترکیبی AMALGAM استفاده شد که این الگوریتم برای اولین بار در مسائل بهره‌برداری مخازن مطرح و ارائه شد. نتایج نشان داد دوره جیره‌بندی در ماه‌های فصل گرم (نیمه اول سال) است که مقادیر KP مربوط به همه آن‌ها را بیشینه می‌کند. مقادیر KP در ماه‌های سرد نیز به سمت کمترین مقدار پیش رفته که در حقیقت نزدیک شدن به همان سیاست SOP را در پی خواهد داشت.

## ۵- مراجع

1. Emadi, A. R., and Khademi, M. (2011). "Reservoir operation rule curve of doroodzan dam using yield model." *J. of Water and Soil*, 25(5), 1058-1068.
2. Oliveira, R., and Loucks, D. (1997). "Operating rules for multi-reservoir systems." *Water Resource Research*, 33(4), 839-852.
3. 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 Resource Systems, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
4. Louks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resource systems learning and analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
5. Yeh, W. W. G. (1985). "Resource management and operation models: A state-of-the-art review." *Water Resource*, 21(12), 1797-1818.
6. Shiyang-shih, Jh., and Reville, Ch. (1994). "Water-supply operations during drought continuous hedging rule." *J. of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629.
7. Dandy, G. C., Connarty, M. C., and Loucks, D. P. (1997). "Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir systems." *J. of Water Resources Planning and Management*, 123(6), 350-358.
8. Dahe, P. D., and Srivastava, D. K. (2002). "Multireservoir multiyield model with allowable deficit in annual yield." *J. of Water Resources Planning and Management*, 128 (6), 406-414.
9. Azaranfar, A., and Shahsavari, M. (2007). "Application of different optimization models in reservoir operation rule curve." *2<sup>nd</sup> Conference on Water Resources Management*, Isfahan University of Tech., Isfahan. (In Persian)
10. Khalaf, R., and Shokrollahi, A. (2008). "Reservoir operation rule curve of Balarood dam using yield model and simulation technique." *2<sup>nd</sup> National Conference on Dam and Hydropower (NCDH 2008)*, Tehran. (In Persian)
11. Mohammadrezapour Tabari, M., Maknoon, R., and Ebadi, T. (2012). "Development structure for optimal long-term planning in conjunctive use." *J. of Water and Wastewater*, 23-4(84), 56-69. (In Persian)
12. 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)



13. Eder, G., Duckstein, L., and Nachtnebel, H. P. (1997). "Ranking water resource projects and evaluating criteria by multicriterion Q-analysis." *J. of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(5), 259-271.
14. Gill, M., Kaheil, K., Khalil, Y. H., McKee, A., and Bastidas, L. (2005). "Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology." *Water Resource Research*, 42 W07417, doi: 10.1029/WR004528.
15. 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.
16. Baltar, A. M., and Fontane, D. G. (2008). "Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management." *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(5), 265-275.
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. Mohammadrezapour Tabari, M., 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.
19. Azadnia, A., and Zahraei, B. (2010). "Application of particle swarm optimization in multipurpose reservoir operation." *5<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhan. (In Persian)
20. Mohammadrezapour Tabari, M. (2012). "Conjunctive use of surface and groundwater with inter-basin transfer approach: Case study Piranshahr plain." *J. Water and Wastewater*, 22-4(80), 103-113. (In Persian)
21. Maass, A., Hufschmidt, M. M., Dorfman, R., Thomas, Jr., Marglin, S. A., and Fair, G. M. (1962). *Design of water-resource systems*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
22. Hsu, N.S., and Cheng, K.W. (2002). "Network flow optimization model for basin-scale water supply planning." *Water Resources Planning and Management*, 128(2), 102-112.
23. Chang, J.F., Chen, L. and Chang, C.L. (2005). "Optimizing reservoir operating rule curves by genetic algorithms." *Hydrological Processes*, 19, 2277-2289.
24. 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.
25. Mohammadi Mashkool, H., and Montaseri, M. (2007). "Determination of rule curve reservoir operation under drought conditions." *2<sup>nd</sup> Conf. of Water Resources Management*, Isfahan University of Tech., Isfahan. (In Persian)
26. Boloori Yazdeli, Y., Fallah Mehdipour, E., and Bozorg Haddad, O. (2008). "Extraction of operation rule curve using hedging policy." *2<sup>nd</sup> National Conf. Hydropower*, Tehran. (In Persian)
27. 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.
28. Parsopoulos, K.E., and Vrahatis, M.N. (2002). "Particle swarm optimization method in multiobjective problems." *Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing*, Madrid, Spain. 603-607.
29. Zitzler, E. (1999). "Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications." Doctorial Thesis ETH NO.13398, Zurich, Swiss federal Institute of Technology (ETH), Aachen, Germany: Shaker Verlag,
30. Vrugt, J. A., and Robinson, B. A. (2007). "Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search." *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 1043, 708-711.