

بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره با کاربرد روش بهینه‌سازی مجموعه ذرات

الهه فلاح مهدی پور^۱ امید بزرگ حداد^۲

(دریافت ۸۹/۱۱/۲۶ آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۵/۲ پذیرش ۹۰/۵/۱۰)

چکیده

بهره‌برداری بهینه از مخازن چندمنظوره یکی از مسائل پیچیده و گاهاً غیرخطی مطرح در بهینه‌سازی چندهدفه است. الگوریتم‌های فراکوشی ابزار بهینه‌سازی مناسبی هستند که با شبیه‌سازی رفتار جانداران به جستجوی فضای تصمیم پرداخته و امکان ارائه مجموعه‌ای از نقاط را به عنوان مجموعه جواب مسئله دارند. لذا در این تحقیق، کاربرد الگوریتم MOPSO در مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن بازفت، با اهداف تولید انرژی برقی، تأمین نیاز پایین دست (شرب، صنعت و کشاورزی)، کنترل سیلاب و تفریحات مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، در ابتدا مقایسه‌ای میان مجموعه جوابهای حاصل از الگوریتم MOPSO در ترکیبات دوتایی اهداف اشاره شد و CP با ضرایب وزنی و توانی مختلف صورت پذیرفت که الگوریتم MOPSO در تمامی ترکیبات اهداف در ارائه مجموعه جوابهایی با توزیع مناسب نقاط نسبت به CP از برتری برخوردار بود و بر جوابهای CP غلبه نمود. در ادامه مقایسه دیگری میان، نقاط انتهایی مجموعه جواب الگوریتم MOPSO و NLP صورت گرفت که جوابهای الگوریتم MOPSO با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با NLP، قابلیت زیادی در ارائه جوابهای بهینه در نقاط انتهایی مجموعه جواب داشت.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری بهینه، چندهدفه، الگوریتم مجموعه ذرات، سیستم مخازن

Optimization of Multipurpose Reservoir Operation with Application Particle Swarm Optimization Algorithm

Elahe Fallah Mehdipour¹

Omid Bozorg Haddad²

(Received Feb. 15, 2011 Revised July 24, 2011 Accepted Aug. 1, 2011)

Abstract

Optimal operation of multipurpose reservoirs is one of the complex and sometimes nonlinear problems in the field of multi-objective optimization. Evolutionary algorithms are optimization tools that search decision space using simulation of natural biological evolution and present a set of points as the optimum solutions of problem. In this research, application of multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) in optimal operation of Bazoft reservoir with different objectives, including generating hydropower energy, supplying downstream demands (drinking, industry and agriculture), recreation and flood control have been considered. In this regard, solution sets of the MOPSO algorithm in bi-combination of objectives and compromise programming (CP) using different weighting and power coefficients have been first compared that the MOPSO algorithm in all combinations of objectives is more capable than the CP to find solution with appropriate distribution and these solutions have dominated the CP solutions. Then, ending points of solution set from the MOPSO algorithm and nonlinear programming (NLP) results have been compared. Results showed that the MOPSO algorithm with 0.3 percent difference from the NLP results has more capability to present optimum solutions in the ending points of solution set.

Keywords: Optimal Operation, Multi-Objective, Particle Swarm Optimization (PSO), Reservoir System.

1. Ph.D. Student of Water Resources, Dept. of Irrigation and Reclamation, College of Tech. and Agriculture Eng., Pardis of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran
2. Assoc. Prof. of Irrigation and Reclamation, College of Tech. and Agriculture Eng., Pardis of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Tehran (Corresponding Author) (+98 263) 2241119 OBHaddad@ut.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی فناوری و کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی فناوری و کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران (نویسنده مسئول) (۰۲۶۳) ۲۲۴۱۱۱۹ OBHaddad@ut.ac.ir

در سال ۱۳۸۶ در بهره‌برداری بهینه ایستگاه‌های پمپاژ، چاو و همکاران^۷ در سال ۱۹۹۸ در پیش‌بینی تراز سطح آب، معراجی و همکاران در سال ۲۰۰۶ در بهره‌برداری تک‌هدفه سد دز، استفاده از آنها در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه^۸ گسترش یافته است [۳-۱۵].

در تحقیق حاضر با توجه به اهمیت بهره‌برداری بهینه از مخازن چندمنظوره و کاربردهای موفق الگوریتم PSO تک‌هدفه، استفاده و کاربرد الگوریتم مجموعه ذرات چند هدفه^۹ در مسئله بهره‌برداری مخزن مورد بررسی قرار گرفت.

در زمینه بهره‌برداری چندمنظوره مخزن، بالتر^{۱۰} و فونتین^{۱۱} در سال ۲۰۰۶ کاربرد الگوریتم پیشنهادی کوئلو^{۱۲} و لکونتسا^{۱۳} در سال ۲۰۰۲ را در مسئله بهره‌برداری مخزن بررسی کرده‌اند و نتایج را با روش قید-اپسیلون^{۱۴} مقایسه نموده‌اند [۶ و ۷]. کومار^{۱۵} و ردی^{۱۶} در سال ۲۰۰۷ با استفاده از الگوریتم PSO و با بهره‌گیری از تکنیک وزن‌دهی و تبدیل مسئله چندهدفه به تک‌هدفه همچنین فرایندهای تکاملی نظیر نخبه‌گرایی و جهش در فرایند جستجوی تک‌هدفه، مسئله بهره‌برداری مخزن با اهداف کشاورزی و تولید انرژی برقی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۸]. به این ترتیب گرچه نتایج به دست آمده از الگوریتم PSO در حالت تک‌هدفه نسبت به الگوریتم اولیه PSO بهبود یافته است، اما در واقع این مسئله با الگوریتم PSO تک‌هدفه حل شده است.

در تحقیق حاضر، مقایسه‌ای میان برنامه‌ریزی سازشی^{۱۷} که با تبدیل مسئله چندهدفه به تک‌هدفه به جستجوی جواب بهینه می‌پردازد و یکی از روشهای بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای الگوریتم PSO که کارایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی ریاضی اثبات گشته است، صورت پذیرفت. همچنین مجموعه جواب ارائه شده توسط الگوریتم چندهدفه از نظر دستیابی به بهینه‌های تک‌هدفه با توجه به قابلیت‌های بالای برنامه‌ریزی غیرخطی^{۱۸} در مشخص نمودن جواب بهینه در یک مسئله بهینه‌سازی با جوابهای تک‌هدفه حاصل از NLP مقایسه شد. زمان اجرای برنامه و عدم دستیابی به جوابهایی که از توزیع مناسبی برخوردار هستند می‌تواند به‌عنوان محدودیت‌های مدل مطرح گردد. در مقابل این محدودیتها، ارائه مجموعه‌ای از جوابها

در سالهای اخیر افزایش جمعیت، محدودیت منابع آب و توزیع غیر یکنواخت آن و همچنین استفاده بی‌رویه از این منابع محدود، لزوم مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع موجود را بیش از پیش نمایان ساخته است. از جمله سازه‌هایی که در حوزه منابع آب به‌منظور ذخیره و استفاده از منابع آب سطحی استفاده می‌گردد، مخزن سطحی است. برای بهره‌برداری بهینه از یک مخزن باید مقدار تابع هدف و متغیرهای مورد نظر به‌منظور برآورده نمودن نیاز طرح شده، بهینه گردند. در حالت واقعی معمولاً برای بهره‌برداری از یک مخزن، اهداف متفاوتی نظیر تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت در مناطق پایین دست، تولید انرژی برقی و کنترل سیلاب و تفریحات تعریف می‌شوند که می‌توانند همسو یا ناهمسو با یکدیگر باشند. بنابراین به‌منظور در نظر گرفتن تمامی اهداف بالا به‌طور همزمان سیستم تعریف شده به‌منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن به‌صورت چندهدفه در نظر گرفته می‌شود.

روند یافتن جواب بهینه مسئله با توجه به پیچیدگی‌های حاکم بر مسائل منابع آب، به‌خصوص مسائل به‌شدت مقعر، گاه با مشکل روبرو است. به‌منظور رفع این مشکل استفاده از روشهای تکاملی^۱ و فراکاوچی^۲ گسترش یافته است. الگوریتم‌های فراکاوچی بر گرفته از علوم کامپیوتر و روشهای تصادفی هستند که با استفاده از یک فرایند تکراری جستجوی فضای تصمیم، به ارائه جواب بهینه می‌پردازند. الگوریتم‌های تکاملی نیز روشهای جستجوی تصادفی هستند که حرکت در آنها شبیه به تکامل بیولوژیکی و یا رفتار اجتماعی گونه‌های مختلف جانداران است. برای مثال، چگونه مورچه‌ها کوتاه‌ترین مسیر تا منبع غذایی را پیدا می‌نمایند و یا چگونه پرندگان به منبع غذایی در طول دوره مهاجرت دست می‌یابند [۱]. کاربرد موفقیت‌آمیز انواع روشهای الهام گرفته شده از طبیعت، همچون نورد شبیه‌سازی شده^۳، الگوریتم ژنتیک^۴ و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۵ در مسائل بسیار پیچیده مهندسی همچنان ایده‌آل بوده است که سیستم‌های طبیعی به‌عنوان منبع اساسی ایده‌های مدل‌سازی و ایجاد سیستم‌های مصنوعی مختلف مورد پذیرش و توجه خاص قرار گرفته‌اند [۲].

یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تجمعی^۶ است که پس از اثبات کارایی آن در حل مسائل تک‌هدفه در حوزه‌های مختلف منابع آب در مطالعاتی نظیر رجب‌پور و افشار

⁷ Chow et al.

⁸ Multiobjective Optimization

⁹ Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

¹⁰ Balter

¹¹ Fontane

¹² Coello

¹³ Lechunga

¹⁴ε-Constraint Method

¹⁵ Kumar

¹⁶ Reddy

¹⁷ Compromise Programming (CP)

¹⁸ Non-Linear Programming (NLP)

¹ Evolutionary

² Meta-heuristic

³ Simulated Annealing (SA)

⁴ Genetic Algorithm (GA)

⁵ Artificial Neural Network (ANN)

⁶ Particle Swarm Optimization (PSO)

به جای تنها یک جواب در هر بار اجرای برنامه می تواند از جمله مزایای استفاده از الگوریتم MOPSO باشد که در ادامه مقایساتی نیز به منظور بررسی این موارد صورت پذیرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- الگوریتم PSO

محققان متعددی قوانین حاکم بر رفتار پرندگان و ماهیان را مورد مطالعه قرار داده و آن را شبیه سازی نموده اند. با رعایت قوانین حاکم بر مجموعه، گروه پرندگان و ماهیان قادرند به حرکت خود به سمت غذا، لانه و غیره ادامه داده و بدون اینکه خللی در حرکت دیگر اعضا به وجود آید بهترین مسیر را به سمت مقصد مورد نظر انتخاب نمایند. در واقع با تقسیم اطلاعات بین اعضای گروه، فرایند انتخاب مسیر بهینه شکل می گیرد. الگوریتم PSO اولین بار توسط کندی^۱ و ابرهارت^۲ در سال ۱۹۹۵ معرفی گردیده است [۹]. این الگوریتم نیز مانند سایر الگوریتم های جمعی، با جمعیت تصادفی شروع به کار کرد. در واقع هر کدام از اعضا یک ذره^۳ هستند که مجموعه^۴ را به وجود می آورند. این مجموعه با توجه به سرعت های هر ذره و مجموعه در فضای تصمیم به سمت نقطه بهینه حرکت می کند. به این ترتیب بردار حرکت هر ذره در هر تکرار تحت تأثیر بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن رسیده است (Pbest) و بهترین موقعیتی که بهترین عضو مجموعه تاکنون به آن رسیده است (Gbest)، می باشد. در این حالت در هر تکرار متناظر با هر ذره یک تابع هدف محاسبه می شود. در تکرار اول، موقعیت اولیه هر ذره به عنوان Pbest و ذره متناظر با بهترین مقدار تابع هدف، به عنوان Gbest انتخاب می شود. در تکرارهای بعدی چنانچه مقدار تابع هدف جدید هر ذره بهتر از مقدار قبلی باشد، موقعیت ذره جدید به عنوان Pbest انتخاب خواهد شد و در غیر این صورت موقعیت ذره در تکرار قبلی به عنوان Pbest شناخته می شود. در مورد Gbest نیز محاسبه مشابهی صورت می گیرد با این تفاوت که این بار مقایسه بین کلیه ذرات مجموعه در کل تکرارها انجام خواهد شد. در نهایت سرعت محاسبه شده برای ذره از فاصله هر ذره نسبت به Pbest و Gbest است. در یک مسئله D بعدی، موقعیت آمین ذره از جمعیت با بردار D بعدی $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})^T$ نمایش داده می شود. به منظور نمایش سرعت این ذره نیز از بردار $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})^T$ برای شماره تکرار از n استفاده شده است. در نهایت جمعیت با استفاده از روابط زیر و به صورت هدفمند به سمت نقطه بهینه حرکت می کند

$$V_{id}^{n+1} = \chi \cdot \left(w \cdot V_{id}^n + c_1 r_1^n (Pbest_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2^n (Gbest_d^n - x_{id}^n) \right) \quad (1)$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^{n+1} \quad V_{Min} \leq V_{id}^{n+1} \leq V_{Max} \quad (2)$$

که در این روابط

اینرسی بوده که شاخص مؤثری در همگرایی مجموعه است و قابلیت مجموعه را در دستیابی به بهینه فراگیر و محلی و استخراج جواب بهینه تنظیم می نماید. لذا انتخاب مناسب آن در چگونگی حرکت به سمت نقطه بهینه تأثیرگذار است. چنانچه مقادیر بزرگ تری به این پارامتر اختصاص یابد فضای تصمیم در محدوده وسیع تری جستجو شده و در نتیجه رسیدن به نقطه بهینه فراگیر تسریع می گردد، در حالی که انتخاب مقادیر کم برای این پارامتر به اکتشاف نقاط بهینه محلی و استخراج نقطه بهینه کمک می کند. C_1 و C_2 دو ضریب ثابت و مثبت هستند که انتخاب مناسب آنها بر افزایش یا کاهش سرعت همگرایی تأثیرگذار است. چنانچه مقادیر کمی به این دو پارامتر اختصاص یابد، جستجو در محدوده کوچک تر و همگرایی کندتر خواهد بود و برعکس اگر مقادیر بزرگ تری به آنها نسبت داده شود، فضای وسیع تر با سرعت بیشتری جستجو خواهد شد. پارامترهای T_1 و T_2 برای حفظ تنوع جستجو در بین نقاط مختلف به عنوان ضریب Pbest و Gbest به کار می روند که اعداد تصادفی در محدوده صفر و یک با توزیع یکنواخت هستند. پارامتر X فاکتور انقباض است که بزرگی و اندازه سرعتها را در هر مرحله کنترل می نماید. انتخاب مقادیر بزرگ این پارامتر با جستجوی فضای بیشتری از فضای تصمیم و مقادیر کوچک تر آن با جستجوی فضای کوچکی همراه است.

۲-۲- الگوریتم MOPSO

در تحقیق حاضر ابزار بهینه سازی، الگوریتم MOPSO بود که فرایند جستجو را با تولید مجموعه های تصادفی به تعداد اهداف، با مشخصات یکسان (تعداد ذره و ابعاد) و توزیع یکنواخت آغاز نمود. ساختار آن مشابه روشی است که پارسپولوس^۵ و وراهیتیس^۶ در سال ۲۰۰۲ با نام بردار ارزیابی الگوریتم مجموعه ذرات^۷ ارائه نموده اند [۱۰]. در این روش برای هر هدف یک مجموعه تولید شده و Gbest مرتبط با آن در هر تکرار استخراج می گردد. برای رفتن به مرحله بعدی، هر مجموعه Gbest خود را به مجموعه بعدی منتقل

⁵ Parsopoulos

⁶ Vrahatis

⁷ Vector Evaluated PSO (VEPSO)

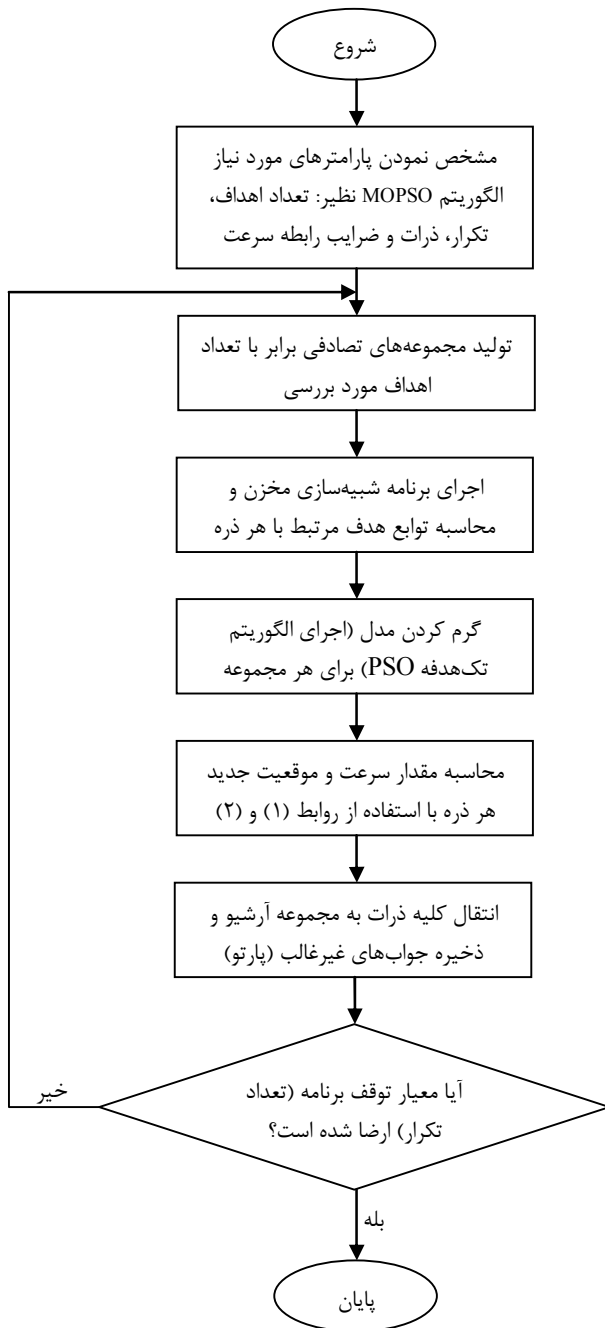
¹ Kennedy

² Eberhart

³ Particle

⁴ Swarm

درجه اهمیت (وزن) هدف زام و P عددی بین یک تا بی نهایت که مشخص کننده تأکید به انحرافات موجود است به گونه ای که هرچه این ارزش بزرگ تر باشد، تأکید بیشتری بر بزرگ ترین انحرافات خواهد بود. معمولاً ارزشهای P برابر ۱، P برابر ۲ و P برابر ∞ در محاسبات به کار گرفته می شوند که ارزش این متغیر به معیارهای تصمیم گیرنده بستگی دارد [۱۲].



شکل ۱- مراحل مختلف مدلسازی در الگوریتم مورد استفاده در تحقیق حاضر

می کند. این در حالی است که Pbest برای هر مجموعه به طور اختصاصی به دست می آید. در نهایت پس از تعداد مشخصی تکرار، مجموعه حاصل از آخرین مجموعه، به عنوان مجموعه نهایی و نقاط غیر غالب آن به عنوان مجموعه جواب یا پارتو معرفی می گردند. اعضای مجموعه پارتو هیچ برتری بر یکدیگر نداشته و با کاهش مقدار یک تابع هدف، مقدار تابع هدف دیگر افزایش می یابد و برعکس. در روش مورد استفاده در این تحقیق، فرایند جستجو مانند الگوریتم VEPSO بود، با این تفاوت که در هر تکرار همه ذرات به آرشیو خارجی منتقل شد و مجموعه جوابهای غیر غالب در آن نگهداری و بقیه حذف شدند. در نهایت اعضای این آرشیو به عنوان مجموعه جوابهای غیر غالب ارائه شدند. همچنین به منظور کاهش مجموع فواصل نقاط پارتو نسبت به محل اصلی خود از فرایندی به نام گرم کردن^۱ مدل که در واقع بهینه سازی تک هدفه است، استفاده شد. به این منظور قبل از شروع فرایند جستجوی چند هدفه، هر کدام از مجموعه ها با توجه به هدف تعریف شده Pbest و Gbest خود را دنبال کرد و بهینه سازی به صورت تک هدفه برای هر مجموعه انجام شد. جستجوی تک هدفه با توجه به تعداد مشخصی تکرار که توسط کاربر تعیین گردید و یا مشخص نمودن مقدار تفاوت تابع هدف در دو تکرار متوالی به عنوان شاخصی به منظور توقف آن ادامه پیدا کرد. پس از طی این فرایند، جستجوی چند هدفه با توجه به مباحثی که تاکنون مطرح گردید، آغاز شد و طی تعداد مشخصی تکرار ادامه یافت. شکل ۱ مراحل مختلف مدلسازی الگوریتم MOPSO و چگونگی استفاده از مدل بهره برداری مخزن در آن را نمایش می دهد.

۲-۳- برنامه ریزی سازشی

زنلی^۲ در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار این روش را ارائه نموده است [۱۱]. در این روش به منظور ایجاد حالت بهینه، از سنجش نزدیکی یک راه حل موجود نسبت به راه حل ایده آل استفاده می گردد. این سنجش از انحراف به وسیله یک تابع ریاضی به شکل رابطه ۳ انجام می گیرد.

$$\text{Min. } Z = \left[\sum_{j=1}^n \gamma_j \left(\frac{f_j(x) - f_j(x_{*j})}{f_j(x_{*j}) - f_j(x^*j)} \right)^p \right]^{1/p} \quad (3)$$

که در این رابطه

x^*j راه حل ایده آل هدف زام، x_{*j} نشان دهنده نامناسب ترین راه حل موجود در بهینه سازی هدف زام، x راه حل مفروض، γ_j نشان دهنده

^۱ Warm up
^۲ Zeleny

۲-۴- بهره‌برداری از مخزن

در مسائل مربوط به مخزن، تابع هدف معمول به منظور بهینه‌سازی قطعی سیستم مخازن می‌تواند به صورت زیر بیان شود

$$\text{Min. (Max.) } Z = \sum_{t=1}^T f(S_t, R_t) \quad (4)$$

که در این رابطه

t اندیس دوره مورد نظر، T تعداد دوره‌های بهره‌برداری، Z هدفی که باید بیشینه و یا کمینه شود، R_t میزان رهاسازی و S_t حجم ذخیره مخزن در دوره t است. معادلات حالت- مکان بر اساس حفظ پایایی جرم در سیستم به عنوان یک رابطه اساسی است که عبارت است از

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - SP_t - \text{Loss}_t \quad (5)$$

که در این رابطه

Q_t جریان ورودی رودخانه در دوره t ام، SP_t سرریز در دوره t ام و Loss_t کل تلفات آب در دوره t ام است. محدوده‌های بالایی و پایینی حجم ذخیره باید به گونه‌ای باشد که تفریحات و مقاصد تجدیدپذیری حجم کنترل سیلاب را فراهم آورده و نیز حداقل تراز برای حجم مرده مخزن و بهره‌برداری از نیروگاه را فراهم آورد

$$S_{\text{Min}} \leq S_t \leq S_{\text{Max}} \quad (6)$$

$$R_{\text{Min}} \leq R_t \leq R_{\text{Max}} \quad (7)$$

که در این روابط

S_{Min} حداقل حجم ذخیره، S_{Max} حداکثر حجم ذخیره، R_{Min} حداقل حجم رهاسازی و R_{Max} حداکثر حجم رهاسازی است.

در تحقیق حاضر تلفات از مخزن به صورت تبخیر و با در نظر گرفتن رابطه خطی سطح- حجم مخزن بر اساس روابط ۸ تا ۱۰ محاسبه شد

$$\text{Loss}_t = \text{Ev}_t \cdot \overline{A}_t / 1000 \quad (8)$$

$$\overline{A}_t = (A_t + A_{t+1}) / 2 \quad (9)$$

$$A_t = a \times S_t + b \quad (10)$$

که در این روابط

Ev_t مقدار متوسط افت در دوره t ام (تبخیر منهای بارش) برحسب میلی‌متر، \overline{A}_t میانگین میزان سطح آب مخزن در دوره t ام برحسب کیلومتر مربع، A_t و A_{t+1} به ترتیب میزان سطح آب مخزن برحسب کیلومتر مربع در ابتدا و انتهای دوره t ام و a و b ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به سطح متناظر مخزن هستند.

به منظور بهره‌برداری مناسب مخزن، رابطه ۱۱ برای حجم مخزن در نظر گرفته شد

$$S_1 = S_{T+1} \quad (11)$$

که در این رابطه

S_1 و S_{T+1} به ترتیب حجم ابتدا و انتهای دوره‌های بهره‌برداری برحسب میلیون مترمکعب است.

در این تحقیق اهداف تأمین نیاز پایین دست، کنترل سیلاب و تفریحات و تولید انرژی برقایی به منظور بهره‌برداری سیستم مخازن در نظر گرفته شد. سه خروجی برقایی، تأمین نیاز پایین دست و کنترل سیلاب برای این مخزن در نظر گرفته شد که در حالت‌های مختلف بهره‌برداری، ابتدا رهاسازی آب از خروجی برقایی سپس از خروجی تأمین نیاز و در نهایت از خروجی کنترل سیلاب خارج گردید. به این ترتیب تا زمانی که از خروجی برقایی تا حداکثر ظرفیت آن استفاده نشده از دو خروجی دیگر استفاده نمی‌گردد همچنین پس از استفاده از خروجی تأمین نیاز تا حداکثر ظرفیت آن از خروجی کنترل سیلاب استفاده می‌گردد. R_{MaxPower} حداکثر ظرفیت خروجی برقایی، R_{MaxDe} حداکثر ظرفیت خروجی تأمین نیاز و R_{MaxFC} حداکثر ظرفیت خروجی کنترل سیلاب همگی برحسب میلیون مترمکعب است. لازم به ذکر است که در این حالت R_t بین صفر و مجموع حداکثر خروجی‌های مخزن بوده و R_t^{Power} ، R_t^{De} و R_t^{FC} به ترتیب میزان رهاسازی از خروجی برقایی، تأمین نیاز و کنترل سیلاب در هر دوره t برحسب میلیون مترمکعب هستند.

۲-۴-۱- بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با هدف تأمین نیاز پایین دست

در این حالت هدف، کمینه نمودن مجموع مجذور تفاضل از نیاز در دوره t است و به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود

$$\text{Min. } f_1 = \sum_{t=1}^T \left((R_t^{\text{Power}} + R_t^{\text{De}} - D_t) / D_{\text{Max}} \right)^2 \quad (12)$$

که در این رابطه

f_1 مجموع مجذور تفاضل رهاسازی ماهانه $(R_t^{\text{Power}} + R_t^{\text{De}})$ از نیاز در دوره t ، D_{Max} حداکثر نیاز ماهانه مخزن و D_t مقدار نیاز است.

۲-۴-۲- بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با هدف کنترل سیلاب و تفریحات

در بهره‌برداری با این هدف، تمامی روابط مانند بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز پایین دست است فقط تابع هدف به صورت رابطه ۱۳ است

دوره t ام برحسب متر، a_0, a_1, a_2, a_3 ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به ارتفاع متناظر آن، b_0, b_1, b_2, b_3 ضرایب ثابت تبدیل آب خروجی از نیروگاه به تراز آب پایاب، RP_t میزان رهاسازی از خروجی برقایی به منظور تولید توان در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب و RPS_t میزان سرریز از خروجی برقایی در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب است.

۳- مطالعه موردی

به منظور بررسی کاربرد الگوریتم‌هایی که تاکنون مطرح گردید در این بخش مخزن بازفت به عنوان مورد مطالعاتی مدنظر قرار گرفت. مخزن بازفت بر روی رودخانه بازفت که از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون محسوب می‌گردد، واقع شده است. متوسط جریان سالانه وارد به مخزن برابر $2012/6$ میلیون متر مکعب تخمین زده شده است. حجمهای حداقل و حداکثر سد به ترتیب برابر $142/15$ و $450/3$ میلیون مترمکعب و ظرفیت نصب نیروگاه برابر 290 مگاوات است. ارتفاع خروجی برقایی معادل ارتفاع حجم مرده است و به این ترتیب در تمامی دوره‌ها امکان رهاسازی از خروجی برقایی وجود دارد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقایسه CP با بهینه‌یابی چندهدفه بر مبنای الگوریتم PSO

به منظور مقایسه الگوریتم MOPSO و روشهای سنتی بهینه‌سازی چندهدفه که با تبدیل مسئله چندهدفه به تک‌هدفه به جستجوی جواب می‌پردازند، مقایسه‌ای بین آن و CP صورت گرفت. لازم به ذکر است که مدل مورد استفاده الگوریتم MOPSO در قالب برنامه‌ای در محیط مطلب^۱ مورد استفاده قرار گرفت.

همان‌طور که در بخش معرفی الگوریتم اشاره شد در گرم کردن مدل، بهینه‌های تک‌هدفه به عنوان نقاط شروع جستجوی چندهدفه بودند. در CP نیز مطابق رابطه ۳ بهترین حالت هر هدف به الگوریتم معرفی شد. همچنین نوعی نرمال‌سازی اهداف مختلف صورت گرفت که جستجوی نقطه بهینه را به دلیل یکسان‌سازی حدود تغییرات اهداف مختلف آسان‌تر می‌کرد. در واقع در این روش، مسئله چندهدفه به تک‌هدفه تبدیل شد. به این ترتیب با استفاده از ضرایب مختلف نسبت داده شده به اهداف متفاوت و ضرایب توانی مختلف P ، نقاط بهینه ارائه شد. ضرایب متداول مورد استفاده P برابر ۱، P برابر ۲ و P برابر ∞ هستند. به این منظور ابزار بهینه‌سازی این مسائل NLP و نرم‌افزار به‌کار رفته LINGO11 بود. به منظور مقایسه مناسب جوابهای ارائه شده توسط

$$\text{Min. } f_2 = \sum_{t=1}^T \left(\frac{S_t - S_t^{\text{target}}}{S_{\text{Max}}} \right)^2 \quad (13)$$

که در این رابطه

S_t^{target} مقدار حجم کنترل سیلاب و تفریحات مورد نظر در دوره t ام برحسب میلیون مترمکعب است. در تابع هدف معرفی شده، هدف ثابت نگاه داشتن حجم در حدود S_t^{target} در تمام دوره‌های بهره‌برداری است. در واقع چنانچه حجم مخزن بیشتر از حجم مورد نظر باشد، هدف کنترل سیلاب و اگر کمتر از آن باشد، هدف تفریحات را تأمین نموده و باعث انحراف از S_t^{target} در هر دوره خواهد شد.

۲-۴-۳ بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با هدف تأمین انرژی برقایی

در این بخش پیچیدگی‌های مسئله به خصوص از نظر قیود و شرایط غیرخطی اضافه شده و تابع هدف به صورت رابطه ۱۴ نمایش داده می‌شود

$$\text{Min. } f_3 = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_t}{\text{PPC}} \right) \quad (14)$$

که در این رابطه

P_t توان تولیدی در دوره t ام برحسب مگاوات و PPC ظرفیت نصب مخزن برحسب مگاوات است. سایر روابط حاکم منطبق بر روابط زیر است

$$P_t = g \cdot e_t \cdot RP_t / PF / \text{Mul}_t \cdot (\overline{H}_t - TW_t) / 1000 \quad (15)$$

$$\overline{H}_t = (H_t + H_{t+1}) / 2 \quad (16)$$

$$H_t = a_0 + a_1 \cdot S_t + a_2 \cdot S_t^2 + a_3 \cdot S_t^3 \quad (17)$$

$$TW_t = b_0 + b_1 \cdot R_t^{\text{Power}} + b_2 \cdot (R_t^{\text{Power}})^2 + b_3 \cdot (R_t^{\text{Power}})^3 \quad (18)$$

$$RPS_t = R_t^{\text{Power}} - RP_t \quad (19)$$

$$0 \leq P_t \leq \text{PPC} \quad (20)$$

که در این روابط

g شتاب جاذبه زمین و برابر $9/81$ متر بر مجذور ثانیه، e_t بازده نیروگاه که برای تمامی دوره‌ها ثابت فرض شده است، PF ضریب کارکرد نیروگاه، Mul_t ضریب تبدیل میلیون متر مکعب به متر مکعب بر ثانیه در دوره t ام، \overline{H}_t متوسط تراز آب مخزن در دوره t ام برحسب متر، H_t تراز آب در ابتدای دوره t ام برحسب متر، H_{t+1} تراز آب در انتهای دوره t ام برحسب متر، TW_t تراز آب پایاب در

¹ Matlab7.0

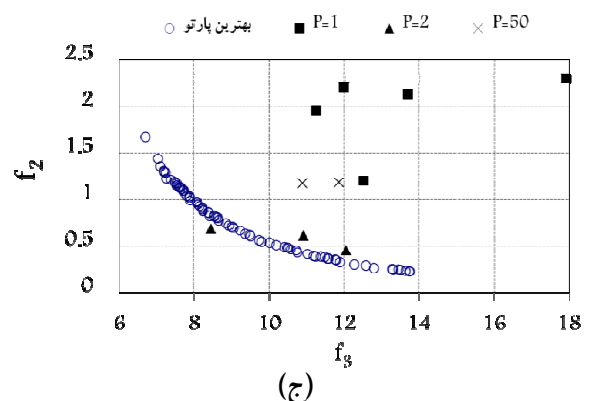
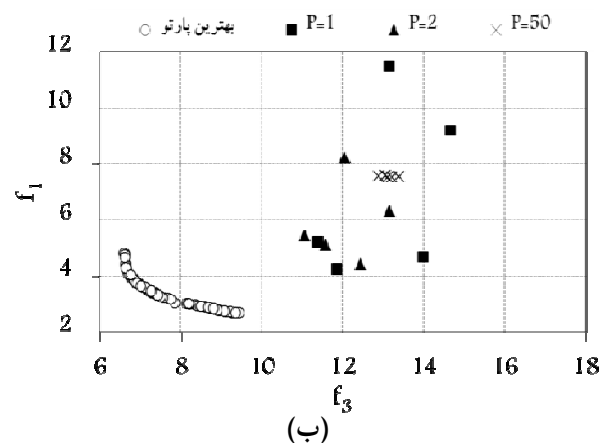
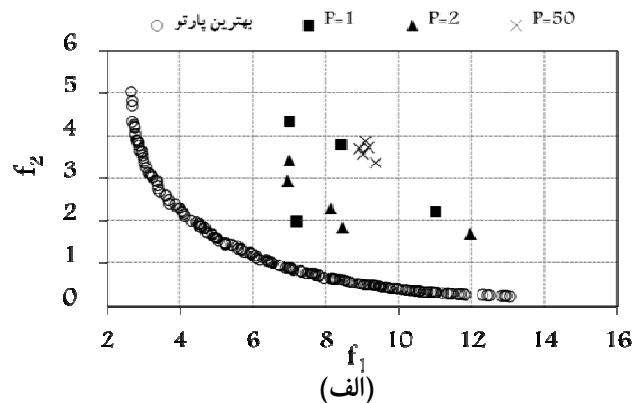
همان طور که مشاهده می‌گردد نقاطی که از CP به دست آمده، قادر به ارائه مجموعه‌ای که شامل جوابهای غیرغالب باشد را نداشته و این نقاط در برخی موارد بر یکدیگر غلبه نموده‌اند. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد نقاط ارائه شده توسط CP در زمان‌های مشابه یعنی ۱۵ دقیقه، به دست آمده است. نرم‌افزار LINGO11 به دلیل وابستگی شدید به نوع تعریف مسئله، طی زمان پیشنهادی با توجه به اهداف متفاوت، عملکرد متفاوتی به جای گذاشته و به این دلیل برخی نقاط به حالت بهینه خود نزدیک و برخی از آن دور هستند، در نتیجه امکان ارائه مجموعه‌ای از نقاط غیرغالب وجود نداشته است. بنابراین الگوریتم MOPSO نتایج مناسب‌تری نسبت به CP ارائه نموده است.

۴-۲- مقایسه نتایج الگوریتم MOPSO با NLP

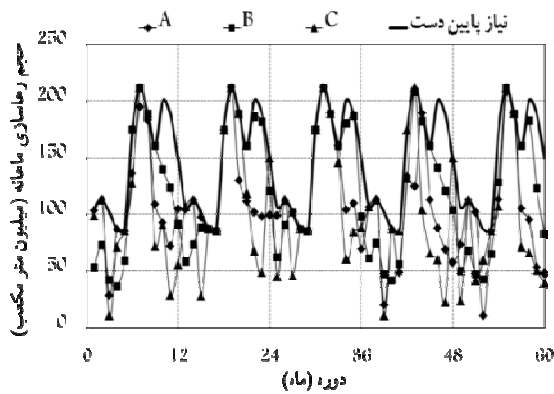
در این بخش بهره‌برداری با اهداف تولید انرژی برقی، تأمین نیاز پایین دست و کنترل سیلاب و تفریحات مد نظر قرار گرفت. تعداد تکرار در قسمتهای تک‌هدفه جستجو (گرم کردن مدل)، ۶۰۰۰۰ برای هدف برقی و ۱۰۰۰۰ برای هدف پایین دست و ۱۵۰۰۰ برای هدف کنترل سیلاب و تفریحات و تعداد تکرار جستجوی چندهدفه ۱۵۰۰۰، همچنین تعداد ذرات ۱۰ بود. مجموعه جواب حاصل از الگوریتم MOPSO در شکل ۳ نمایش داده شده است. به منظور بررسی نقاط مختلف این مجموعه جواب، نقاط حاصل از NLP به عنوان بهینه تک‌هدفه به دست آمده و نقطه‌ای از مجموعه جواب که کمترین فاصله از بهینه هدف تولید انرژی برقی حاصل از NLP را داشته با A و نقطه‌ای که دارای کمترین فاصله از بهینه هدف تأمین نیاز پایین دست بوده با B و نقطه‌ای که دارای کمترین فاصله از بهینه هدف کنترل سیلاب و تفریحات داشته، با C نمایش داده شده است (شکل ۳). در شکل ۴ نیز به ترتیب مقدار متغیرهای تصمیم (رهاسازی ماهانه) و متغیرهای حالت (حجم ذخیره ماهانه) هر کدام از نقاط بالا نمایش داده شده است. در نقطه A که بهترین نقطه از نظر هدف برقی است، بیشترین مقدار حجم مخزن در دوره‌های مختلف و در نقطه C که بهترین نقطه از نظر هدف کنترل سیلاب و تفریحات است، بیشترین مجاورت با حجم هدف در دوره‌های مختلف وجود دارد. همچنین در نقطه B که بهترین نقطه از نظر هدف تأمین نیاز است، کمترین فاصله با مقادیر نیاز وجود دارد.

همان طور که در نتایج بهره‌برداری سه‌هدفه از مخزن نشان داده شد، الگوریتم MOPSO توانایی تولید نقاط مجموعه‌هایی در قسمتهای میانی محدوده‌های جواب همچنین قسمتهایی که به بهینه‌های تک‌هدفه نزدیک است، را دارا است. به منظور مقایسه

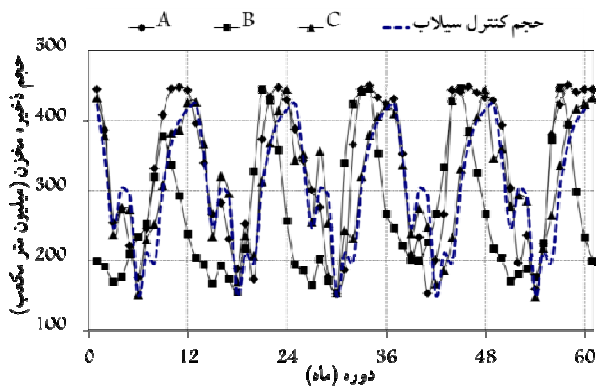
این نرم‌افزار با یکدیگر زمان اجرای ۱۵ دقیقه، برای ضرایب مختلف در نظر گرفته شد. برنامه‌های مورد استفاده در هر بار جستجو پس از ۱۵ دقیقه متوقف شد و جواب حاصل به عنوان نقطه بهینه گزارش شد. همچنین این نرم‌افزار قابلیت حل مسئله برای ضریب P بیش از ۵۰ را ظرف مدت زمان پیشنهادی یعنی ۱۵ دقیقه نداشت. بنابراین بیشترین مقدار در نظر گرفته شده برای این ضریب ۵۰ بود. شکل ۲ مجموعه جوابهای حاصل از ترکیبات اهداف مختلف را در مقایسه با مجموعه جوابهای حاصل از CP نمایش می‌دهد.



شکل ۲- مجموعه جوابهای حاصل از ترکیبات اهداف الف- f_1-f_2 ، ب- f_1-f_3 و ج- f_2-f_3



(الف)



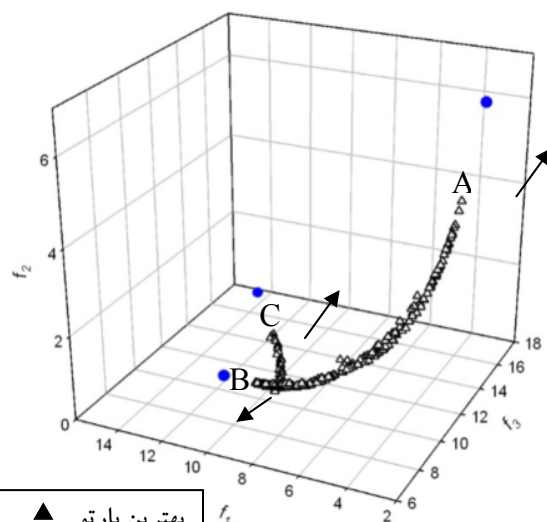
(ب)

شکل ۴- مجموعه‌های ماهانه الف- رهاسازی مخزن و ب- حجم ذخیره مخزن

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر الگوریتم PSO که کارایی خود را در ارائه مجموعه جوابهای بهینه در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه اثبات کرده است، به منظور حل مسائل بهره‌برداری چندمنظوره مخزن استفاده شد. به منظور نمایش میزان کارایی این الگوریتم نسبت به روشهای سنتی که با تبدیل مسئله چندهدفه به تک‌هدفه به حل مثال می‌پردازند، مقایسه‌ای میان این الگوریتم در محیط مطلب و CP در محیط LINGO11 صورت گرفت که در زمان برابر، LINGO11 نه تنها قادر به ارائه مجموعه جواب غیرغالب نبود بلکه در برخی موارد در مدت زمان محاسبات قادر به ارائه راه‌حل بهینه نیز نبود. بر این اساس در این مرحله وجود پوش و توزیع مناسب نقاط در قسمتهای میانی مجموعه جواب حاصل از MOPSO مشخص شد. در ادامه به بررسی این مطلب که آیا این نقاط فقط در قسمتهای میانی تمرکز دارند و یا در نقاط انتهایی که به بهینه‌های تک‌هدفه نزدیک هستند نیز وجود دارند، پرداخته شد. به این منظور بهترین نقاط مجموعه جواب از نظر هر هدف با بهینه‌های NLP مقایسه شد. نتایج حاکی از آن بود که این نقاط بین ۰/۰۲ تا ۰/۸۲ درصد از بهترین مقادیر (بهینه‌های تک‌هدفه) فاصله دارند.

نقاط انتهایی مجموعه‌های جواب (نقاطی که به بهینه‌های تک‌هدفه نزدیک است)، در جدول ۱ نقاط نزدیک بهینه‌های تک‌هدفه در بهره‌برداری سه‌هدفه با بهینه‌های حاصل از بهره‌برداری تک‌هدفه با استفاده از NLP مقایسه شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر اعداد بالا، مقادیر ذکر شده به اعدادی در محدوده صفر تا یک تبدیل شد. به این ترتیب به بهترین (کمترین) مقدار تابع هدف عدد یک و به بدترین (بیشترین) مقدار عدد صفر اختصاص یافت. بر اساس اعداد نمایش داده شده در این جدول الگوریتم MOPSO توانایی دستیابی به نقاط نزدیک بهینه تک‌هدفه در تمامی اهداف را داشت، به طوری که این اختلاف در بهترین حالت هدف تأمین نیاز پایین دست به کمترین مقدار خود یعنی ۰/۰۲ درصد رسید.



شکل ۳- نمایش بهترین مجموعه جواب بهره‌برداری سه‌هدفه سد بازفت

جدول ۱- مقایسه بهینه‌های تک‌هدفه و توابع هدف نقاط A, B, C و مجموعه جواب الگوریتم چندهدفه

نوع بهینه‌سازی	f_1	f_2	f_3
NLP	۰/۴۱۰۰	۰/۷۶۱۱	۱
	۰	۱	۰
	۱	۰	۰/۲۲۳۹
MOPSO	۰/۵۲۹۸	۰/۷۶۶۳	۰/۹۹۱۸
	۰/۹۹۹۸	۰/۲۷۷۶	۰/۴۱۷۹
	۰/۲۱۷۵	۰/۹۹۹۵	۰/۲۹۹۳
	۰/۲۱۷۵	۰/۹۹۹۵	۰/۲۹۹۳

- 1-Elbeltagi, E., Hegazy, T., and Grierson, G. (2005). "Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms." *J. of Advanced Engineering Informatics*, 19(1), 43-53.
- 2-Blum, C., and Roli, A. (2003). "Metaheuristic in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison." *J. of ACM Computing Surveys*, 35(3), 268-308.
- 3-Rajabpur, R., and Afshar, M.H. (2008). "Optimized operation of serial pump stations using the PSO algorithm." *J. of Water and Wastewater*, 66, 56-66. (In Persian)
- 4-Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- 5-Meraji, S.H., Afshar, M.H., and Afshar, A. (2006). "Reservoir operation by particle swarm optimization algorithm." *7th International Conference of Civil Engineering*, Tehran, Iran.
- 6-Balter, A.M., and Fontane, D.G. (2006). "A multiobjective particle swarm optimization model for reservoir operations and planning." *Proceeding of International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Montreal, 1544-1552.
- 7-Coello, C.A., and Lechunga, M.S. (2002). "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization." *Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, IEEE Service Center. Piscataway, NJ, 2, 1677-1681.
- 8-Kumar, D., and Reddy, J. (2007). "Multiple reservoir operation using particle swarm optimization." *J. of Water Resources Planning and Management*, 133(3), 192-202.
- 9-Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization." *Proceeding of the International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1942-1948.
- 10-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.
- 11-Zeleny, M. (1973). "Compromise programming." Cocharane, M., Zeleny, M. (Eds.), *Multiple criteria decision making*, University of Southern Carolina Press, Columbia.
- 12-Asgharpour, M.J. (2007). *Multicriteria decision making*, Tehran University Press, Tehran. (In Persian)