



کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی PSO در بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخازن سدها

اصغر آزادنیا^۱، بنفشه زهرایی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

azadnia165@yahoo.com

bzahraie@ut.ac.ir

خلاصه

بهره‌برداری از مخازن سدها همواره از مسائلی بوده است که بهینه کردن توابع هدف متضاد در آنها مد نظر بوده است. کاربرد روشهای تکاملی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدها در دو دهه اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. از روشهای نوین در این دسته، روش بهینه‌سازی دسته ذرات^۱ (PSO) است که تاکنون بیشتر برای حل مسائل تک هدفه مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از رویکردی نوین، الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده قرار گیرد. لزوم یافتن جوابهای غیرپست با تنوع بالا و یافتن بهینه فراگیر^۲ مناسب برای دسته ذرات در الگوریتم چندگانه PSO، از جمله مواردی هستند که در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. کاربرد این روش در مورد بهره‌برداری بهینه از سد سفیدرود با در نظر گرفتن دو هدف تامین نیاز پائین دست و تخلیه رسوب مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی چندگانه PSO، مسائل چندهدفه، جبهه پارتو، بهره‌برداری از مخازن سدها

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر همزمان با مطرح شدن مسائل بهینه‌سازی جدید روشهای جدید بهینه‌سازی نیز ابداع شدند. مهمترین گروه از این روشهای بهینه‌سازی روشهای تکاملی می‌باشند که توانایی حل مسائل با ابعاد بزرگ و تعداد متغیرهای زیاد را دارا هستند. از سوی دیگر مسائل مورد توجه در مدیریت منابع آب از مسائلی هستند که غالباً دارای تعداد متغیرهای تصمیم زیاد هستند و بهینه‌سازی توابع هدف غیرخطی که بعضاً در تضادی با یکدیگر نیز هستند در آنها مطرح است. از این رو استفاده از روشهای تکاملی چندگانه در این گونه مسائل در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در سالهای اخیر در حل مسائل تک‌هدفه مهندسی آب از الگوریتم PSO استفاده‌های زیادی شده است با این حال به دلیل نبودن الگوریتم‌های چندگانه دسته ذرات^۳ (MOPSO) در مسائل چندهدفه آب، از این روش استفاده چندانی نشده است. Gill و همکاران (۲۰۰۶) [۱] از MOPSO برای تخمین پارامترهای یک مدل بارش-رواناب Sacramento با ۱۳ پارامتر استفاده نمودند. همچنین برای کالیبره کردن یک مدل برداری با سه پارامتر برای پیش بینی رطوبت خاک از MOPSO استفاده کردند.

Reddy و Kumar در سال ۲۰۰۷ [۲] برای حل مسائل چند هدفه بهره‌برداری از مخزن روش EM-MOPSO را پیشنهاد کردند. این نوع از PSO برای یافتن راه حل مناسب از یک آرشیو خارجی با اندازه متغیر استفاده می‌کند. Baltar و Fontane [۳] در سال ۲۰۰۸ از MOPSO برای حل مسائل چند هدفه استفاده نمودند و کاربرد آن را در سه جنبه بررسی کردند: ۱- حل توابع نمونه برای مقایسه با نسخه های دیگر MOPSO و نیز الگوریتم های دیگر، ۲- مسئله بهره‌برداری از مخزن چند کاربرده با چهار تابع هدف و ۳- بهره‌برداری کیفی از مخزن سد با سه تابع هدف. الگوریتم مربوطه با استفاده از یک آرشیو خارجی جواب های غیر پست را ذخیره می‌کند و بر اساس جبهه پارتو آنها را مقایسه می‌کند. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش قید ε با بهینه‌سازی غیر خطی (ε-NLP) مقایسه شده است. Liu [۴] با استفاده از ترکیب عملگرهای مختلف به کار رفته در NSGA-II (مرتب کردن بر اساس غیر پستی، مرتب کردن بر اساس فاصله ازدحام و نخه‌گرایی) و همچنین یک عملگر جهش در PSO، یک مدل بارش-رواناب را بهینه‌سازی کرد. مدل بارش-روانابی که وی به کار برد مدل NAM است که MIKE11 نیز از آن استفاده می‌کند. توابع هدف

¹ Particle Swarm Optimization

² Global Best (gBest)

³ Multi-Objective Particle Swarm Optimization



مورد استفاده در مدل وی، مجموع مربعات اختلاف دبی پیک مشاهده‌ای و دبی های پیک شبیه سازی شده و نیز مجموع مربعات اختلاف دبی حداقل مشاهده‌ای و دبی های حداقل شبیه سازی شده می‌باشند که باید کمینه گردند. وی نتایج کاربرد این مدل برای یک حوضه آبریز واقعی را با الگوریتم NSGA-II مقایسه کرد که نتایج به دست آمده حاکی از بهبود جوابها به ویژه در پراکندگی و تنوع جوابهای غیرپست بود. در ادامه این مقاله، جزئیات الگوریتم MOPSO مورد استفاده در این تحقیق و نتایج کاربرد آن برای بهینه سازی بهره برداری از مخزن ارائه شده است.

۲. الگوریتم بهینه سازی دسته ذرات

الگوریتم دسته ذرات اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Kennedy و Eberhart [۵] مطرح شد. در تدوین این روش از پرواز گروهی پرندگان و شنای گروهی ماهی ها و زندگی اجتماعی آنان الهام گرفته شده که با استفاده از یک سری روابط ساده فرمول بندی شده است. مانند همه الگوریتم های تکاملی دیگر، الگوریتم دسته ذرات نیز با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد شروع می‌شود که در اینجا به عنوان یک گروه از ذره ها خوانده می‌شوند. مشخصات هر ذره در گروه، براساس مجموعه ای از پارامترها تعیین می‌شود که باید مقادیر بهینه آنها تعیین شود. در این روش، هر ذره یک نقطه از فضای جواب مسئله را نشان می‌دهد. هر کدام از ذرات دارای حافظه هستند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به خاطر می‌سپارند. بنابراین حرکت هر ذره در دو جهت صورت می‌گیرد: ۱- به سوی بهترین موقعیتی که تاکنون اختیار کرده اند و ۲- به سوی بهترین موقعیتی که همه ذرات تا به حال اختیار کرده اند. در این روش، تغییر موقعیت هر ذره در فضای جستجو تحت تاثیر تجربه و دانش خود و همسایگانش است.

فرض کنید در یک مسئله خاص، فضایی D بعدی داریم و i امین ذره از گروه می‌تواند با یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت نمایش داده شود. تغییر موقعیت هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان پذیر است. هر ذره، اطلاعاتی شامل بهترین مقداری که تاکنون به آن رسیده (بهینه شخصی)^۱ و موقعیت X^t را داراست. این اطلاعات، حاصل مقایسه تلاش هایی است که هر ذره برای یافتن بهترین جواب انجام می‌دهد. همچنین هر ذره بهترین جوابی را که تا کنون در کل گروه بدست آمده است، از مقایسه مقادیر بهینه ذرات مختلف می‌شناسد (بهینه فراگیر)^۲. هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب سعی می‌کند موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات زیر تغییر دهد:

- موقعیت کنونی (X^t)
 - سرعت کنونی (V^t)
 - فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه شخصی
 - فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه فراگیر
- بدین ترتیب سرعت هر ذره و به تبع آن موقعیت جدید آن به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 \text{rand}(0,1)(pbest_i - X_i^t) + c_2 \text{rand}(0,1)(gbest_i - X_i^t) \quad (۱)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (۲)$$

که در آن: V_i^{t+1} سرعت ذره i در تکرار جدید، V_i^t سرعت ذره i در تکرار فعلی، X_i^t موقعیت کنونی ذره، X_i^{t+1} موقعیت ذره در تکرار جدید، $pbest_i$ بهترین موقعیتی که ذره i تا کنون اختیار کرده است و $gbest_i$ بهترین موقعیت بهترین ذره (بهترین موقعیتی که تمام ذرات تا کنون اختیار کرده اند) است. $\text{rand}(0,1)$ یک عدد تصادفی بین صفر و ۱ است که برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه به کار می‌رود. C_1 و C_2 به ترتیب پارامترهای شناختی و اجتماعی هستند. انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه های محلی می‌شود. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که انتخاب مقدار بزرگتری برای پارامتر شناختی C_1 نسبت به پارامتر اجتماعی C_2 مناسب تر است، اما بایستی همواره شرط $C_1 + C_2 \leq 4$ رعایت شود. پارامتر w اینرسی وزنی نام دارد که برای تضمین همگرایی در دسته ذرات به کار می‌رود. اینرسی وزنی، جهت کنترل تاثیر سوابق سرعت های پیشین بر سرعت های جاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس تحقیقات انجام شده، مقداری بین ۰/۴ و ۰/۷ برای w مناسب است.

۳. مسائل چند هدفه و مفهوم بهینه پارتو

^۱ personal best

^۲ global best



در مسائل چند هدفه به جای یک تابع هدف، چندین تابع هدف باید بصورت همزمان بهینه شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسئله دارای بیش از یک جواب بهینه خواهد بود که به آنها جوابهای بهینه پارتو گفته می‌شود. مفهوم بهینه پارتو به این صورت قابل تشریح است که $\bar{x}_* = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ یک بهینه پارتو است اگر برای هر \bar{x} دیگر عضو دامنه مجاز و $i = \{1, 2, \dots, k\}$ داشته باشیم (برای یک مسئله کمینه سازی):

$$\forall_{i \in I} (f_i(\bar{x}_*) \leq f_i(\bar{x}_i)) \quad (3)$$

که در آن n تعداد متغیرهای فضای تصمیم و k تعداد توابع هدف است. به عبارت دیگر \bar{x}_* یک بهینه پارتو است اگر هیچ بردار \bar{x} دیگری وجود نداشته باشد که به ازای بهبود بخشیدن برخی از توابع هدف حداقل یک تابع هدف را بدتر نکند. جوابهای بهینه پارتو تحت عنوان جوابهای غیر پست^۱ نیز شناخته می‌شوند.

۴. الگوریتم به کار رفته در این تحقیق

در سال ۲۰۰۵، Naval و Raquel [۶] نوع جدیدی از الگوریتم دسته ذرات چند هدفه به نام MOPSO-CD^۲ را پیشنهاد کردند. همان طور که می‌دانیم مکانیسم فاصله ازدحام^۳ اولین بار توسط Deb و همکاران [۷] (۲۰۰۲) ارائه شد و در الگوریتم NSGA-II به کار برده شده است. در MOPSO-CD هم از این روش برای یافتن پاسخ های بهینه و نیز حذف جوابهای غیر پست در هنگامی که آرشیو پر است استفاده می‌شود. فرایند فاصله ازدحام همراه با یک اپراتور جهش موجب می‌شود تا تنوع جوابهای غیر پست در سرتاسر فضای ممکن جوابها حفظ شود. همچنین نسبت به سایر الگوریتم ها (مانند NSGA-II)، این الگوریتم در یافتن تمام جوابهای غیر پست در فضای جستجو قوی تر است، که ویژگی مذکور به خاطر استفاده از آرشیو خارجی (آرشیوی از جوابهای غیر پست که در گذشته پیدا شده اند) و همچنین به خاطر نوع اپراتور جهش آن است. اپراتور جهش باعث می‌شود تا قابلیت جستجوی الگوریتم بالا رود و از همگرایی زود هنگام آن جلوگیری شود. همچنین کاربرد روش فاصله ازدحام در این الگوریتم در مقایسه با کاربرد شبکه سازگار^۴ در MOPSO (Coello و همکاران [۸]) باعث یافتن تنوع و توزیع بهتری از جواب های غیر پست شده است. در ادامه به توضیح بیشتر اجزاء این الگوریتم می‌پردازیم.

مقدار فاصله ازدحام برای هر جواب تخمینی از چگالی جوابها در اطراف آن است. برای محاسبه فاصله ازدحام ابتدا جوابها را بر حسب یکی از توابع هدف به صورت نزولی مرتب می‌کنیم. برای محاسبه فاصله ازدحام متناسب به هر نقطه روی یک جبهه مشخص، نقاط قبل و بعد نسبت به توابع هدف مسئله انتخاب و مطابق شکل (۱) یک مستطیل (در سطح دو بعدی) تشکیل می‌شود. بدیهی است در صورتی که تعداد توابع هدف بیش از ۲ باشد، نقاط مورد نظر یک مکعب تشکیل خواهند داد.

همانطور که در این شکل نشان داده شده، اعداد واقع بر جبهه پارتو، به شکل توپر دیده می‌شوند و سایر جواب ها با دایره های توخالی نمایش داده شده اند. برای محاسبه فاصله ازدحام جواب نام در این شکل، مستطیلی ترسیم شده که جواب های بعدی و قبلی نسبت به دو تابع هدف، در گوشه های آن قرار گرفته اند. فاصله ازدحام برای این نقطه معادل متوسط اضلاع این مستطیل است. هرچه فاصله ازدحام کمتر باشد، نشان دهنده تراکم بیشتر جوابها است. لازم به ذکر است در شرایطی که مسئله دارای بیش از دو تابع هدف باشد، نقاط $i-1$ و $i+1$ برای تمام توابع هدف یکسان نخواهد بود.

۵. انتخاب پاسخ های بهینه فراگیر

انتخاب مناسب پاسخ های بهینه فراگیر در الگوریتم دسته ذرات چند هدفه یک مرحله مهم محسوب می‌شود، چون تابع قابلیت همگرایی الگوریتم و توانایی آن در دست یابی به مجموعه ای متنوع از جوابهای غیر پست در فضای تصمیم است. در MOPSO-CD، یک آرشیو خارجی محدود، جوابهای غیر پست را ذخیره می‌کند. برای یافتن پاسخ های بهینه، دسته ذرات باید در نقاط مشخص متراکم نشود تا بتواند همه فضای جستجو را پوشش دهند. برای این منظور، در این روش به جواب های غیر پستی که مقدار فاصله ازدحام بیشتری دارند، اولویت بیشتری داده می‌شود. در آرشیو خارجی، جواب های غیر پست بر اساس مقدار فاصله ازدحام و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. آنگاه در هر مرحله از چند جواب بالای آرشیو (مثلاً ۱۰ درصد بالای آرشیو) یکی به طور تصادفی انتخاب می‌شود. این ترتیب نزولی در آرشیو خارجی در جای دیگر نیز ما را یاری می‌کند و آن هنگامی

¹ Non-dominated Solutions

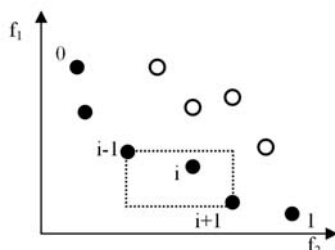
² Multi Objective Particle Swarm Optimization using Crowding Distance

³ Crowding Distance

⁴ Adaptive Grid



است که آرشیو پر باشد. در چنین مواقعی از جوابهای غیر پست پائین آرشیو (مثلاً ۱۰ درصد پائین) یکی به صورت تصادفی انتخاب می شود و جواب غیر پست جدید که در تکرار اخیر پیدا شده است جایگزین آن می شود. شکل (۲) خلاصه مراحل این الگوریتم را نشان می دهد.



شکل ۱- نحوه محاسبه فاصله ازدحام در یک مسئله دو هدفه حداقل سازی (Deb 2002)

۱- برای هر $i=1$ تا M (اندازه جمعیت یعنی تعداد ذرات است):

الف- $P[i]$ را به طور تصادفی تولید کنید

ب- $V[i]=0$ (سرعت هر ذره است)

پ- $P[i]$ را ارزیابی کنید (مقادیر تابع هدف را برای آن محاسبه کنید)

ت- $pbest[i]=P[i]$

ث- بهترین ذره ای که در $P[i]$ ها یافت شده را در $gbest$ قرار بدهید

۲- $t=0$ قرار بدهید.

۳- جوابهای غیر پست پیدا شده در P را در A قرار بدهید (A آرشیو خارجی است)

۴- مراحل زیر را تکرار کنید:

۴-۱- فاصله ازدحام را برای هر یک از جوابهای موجود در A محاسبه کنید

۴-۲- جوابهای موجود در A را بر حسب فاصله ازدحام به صورت نزولی مرتب کنید

۴-۳- برای هر $i=1$ تا M :

۴-۳-۱- به صورت تصادفی یکی از جوابهای بالای (مثلاً ۱۰ درصد بالا) آرشیو را به عنوان بهینه انتخاب کنید

۴-۳-۲- سرعت جدید را از رابطه (۳) حساب کنید

۴-۳-۳- موقعیت جدید $P[i]$ را از رابطه (۴) حساب کنید

۴-۳-۴- اگر $P[i]$ از مرزها خارج شود، مقدار متغیرهای آن را به حدود بالا و پائینشان برسانید و سرعت ذره را در عدد ۱- ضرب کنید

۴-۳-۵- اگر $t < T_{MAX} * P_{MUT}$ عمل جهش را روی $P[i]$ انجام بده (T_{MAX} بیشترین تعداد تکرار و P_{MUT} احتمال جهش است)

۴-۳-۶- $P[i]$ را ارزیابی کنید

۴-۴- همه جوابهای غیر پست جدید که در P یافت شده اند را در A قرار بدهید با این شرط که هیچ یک از جوابهای A بر آنها غلبه نداشته باشند.

همه جوابهای A که جوابهای جدید بر آنها غلبه دارند از آرشیو حذف می شوند. چنانچه آرشیو پر است طی مراحل زیر جوابهایی که باید حذف شوند مشخص می گردند:

۴-۴-۱- فاصله ازدحام همه جوابهای موجود در A را محاسبه کنید

۴-۴-۲- جوابهای موجود در A را بر حسب فاصله ازدحام به صورت نزولی مرتب کنید

۴-۴-۳- به طور تصادفی یکی از جوابهای (مثلاً ۱۰ درصد) پائین A را انتخاب کنید

۵- بهینه شخصی را برای هر ذره به روز کنید. اگر موقعیت جدید هر ذره بر موقعیت ذخیره شده در حافظه غلبه داشت $pbest[i]=P[i]$.

۶- شماره تکرار را یکی زیاد کنید $t=t+1$ و به مرحله سه بازگردید تا به بیشترین شماره تکرار که مورد نظر است برسیم.

شکل ۲- شرح مراحل کار الگوریتم بهینه سازی استفاده شده در تحقیق

۶. ساختار مدل بهینه سازی بهره برداری از مخزن

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه سازی بهره برداری از مخزن، مقادیر جریان خروجی ماهانه از مخزن سد هستند که باید مقادیر بهینه آنها تعیین شود. افق برنامه ریزی در مثال مورد استفاده در این تحقیق ۶۰ ماه است بنابراین هر ذره در MOPSO دارای ۶۰ بعد است. توابع هدف مدل بهینه سازی



در این تحقیق مشکل از دو تابع یکی مربوط به تأمین نیاز پائین دست و دیگری برای خروج رسوبات مخزن است. هدف هر دو تابع، حداقل سازی خسارت ناشی از خروجی نامناسب از مخزن در طول دوره بهینه سازی است. در محاسبه خسارت ناشی از عدم تأمین نیاز ($Loss_{m,y}^1$)، تابع هدف نسبت ارائه شده توسط کارآموز و واسیلیادیس (۱۹۹۲) استفاده شده است. در این تابع، فرض می شود که خسارت ناشی از رهاسازی آب از سیستم تابعی از نسبت خروجی به نیاز است. این تابع هزینه محدب و نمایی می باشد. دامنه رهاسازی مطمئن آب شامل محدوده ۸۰ تا ۱۲۰ درصد نیازها است. ساختار این تابع هدف دارای سه بخش می باشد که در رابطه (۴) آورده شده است.

$$Loss_{m,y}^1 = \begin{cases} 1.58 \times 10^6 \left(e^{(-R_{m,y}/0.8D_{m,y})} - e^{-1} \right) & \frac{R_{m,y}}{D_{m,y}} < 0.8 \\ 0 & 0.8 < \frac{R_{m,y}}{D_{m,y}} < 1.2 \\ 3.88 \times 10^5 \left(e^{(R_{m,y}/1.2D_{m,y})} - e^1 \right) & \frac{R_{m,y}}{D_{m,y}} > 1.2 \end{cases} \quad (4)$$

در تابع هدف دوم، فرض می شود خسارت ناشی از عدم خروج رسوبات از مخزن ($Loss_y^2$) تابعی از نسبت خروجی سالانه رسوب از مخزن به حداکثر رسوب خروجی سالانه امکان پذیر است. این تابع هزینه نیز محدب و نمایی است و در رابطه (۵) تعریف شده است.

$$Loss_y^2 = \begin{cases} 1580000 e^{\left(-\frac{V_y}{V_{\max}} - \left(\frac{1}{e} \right) \right)} & \frac{V_y}{V_{\max}} \leq 1 \\ 0 & \frac{V_y}{V_{\max}} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

که در این رابطه، V_{\max} حداکثر بار رسوب خروجی سالانه از مخزن طی عملیات فلاشینگ است. این مقدار براساس آمار تاریخی رسوب خروجی طی این عملیات و یا قضاوت کارشناسی در مورد حداکثر مقدار محتمل رسوب خروجی از شرایط ایده آل انجام عملیات فلاشینگ قابل محاسبه است. برای محاسبه V از رابطه پیشنهادی توسط موسسه والینگفورد به صورت زیر استفاده شده است:

$$V = \Psi \frac{Q_f^{1.6} S^{1.2}}{W^{0.6}} \quad (6)$$

در رابطه بالا، Q_f دبی فلاشینگ است که با توجه به زمان مناسب برای عملیات فلاشینگ برای هر سد، قابل محاسبه است. S شیب طولی مخزن در طول دوره فلاشینگ می باشد و W عرض جریان در عملیات فلاشینگ می باشد. پارامتر Ψ مربوط به اندازه رسوبات می باشد و مقدار آن در سد سفیدرود برابر با ۱۶۰۰ در نظر گرفته شده است.

محدودیت های مسئله مشخصات فیزیکی دریاچه ها و دریاچه مخزن را شامل می شوند. شرایط مرزی تعریف شده برای حداکثر خروجی مجاز با استفاده از منحنی حجم - سطح - ارتفاع مخزن میان یابی می شود. براساس حجم ذخیره در هر دوره و میان یابی خروجی مربوط به حجم مورد نظر، مقدار خروجی مجاز مخزن به دست می آید. محدودیت دیگر رابطه پیوستگی است که در تمام دوران بهره برداری باید برقرار باشد.

۷. مطالعه موردی: مخزن سد سفیدرود

سد سفیدرود بین طولهای جغرافیایی ۲۳° و ۴۹° و ۳۶° شمالی در پایین دست نقطه تلاقی دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود در نزدیکی شهر منجیل، حدود ۲۵۰ کیلومتری شمال غربی تهران واقع شده است. بهره برداری از این سد در اردیبهشت ۱۳۴۱ به منظور آبیاری دشت گیلان و تولید برق آغاز شده است. حجم اولیه مخزن ۱۷۶۰ میلیون مترمکعب بوده است که بعد از ۱۸ سال بهره برداری از آن، این حجم به ۱۰۴۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. با انجام عملیات رسوب زدایی، حجم مخزن افزایش و تا حجم ۱۲۴۴ میلیون مترمکعب رسانده شده است. تغییر حجم مخزن از سال ۶۹ بسیار اندک بوده است. این تغییرات نشان دهنده این است که در دوره های اولیه فلاشینگ، این عملیات تأثیر بسزایی در احیاء مخزن داشته است اما در سالهای بعد تقریباً رسوبات سالیانه ورودی، خارج شده است.

به منظور بهینه سازی مدیریت بهره برداری از سد سفید رود، سری زمانی ورودی ماهانه به مخزن و نیازهای آبی پایین دست در یک دوره ۵ ساله (از سال آبی ۷۹-۸۰ تا ۸۵-۸۴) استفاده شده است. برای محاسبه دبی فلاشینگ (Q_f) در مدل بهینه سازی، مقادیر بهینه خروجی از مخزن در ماه های



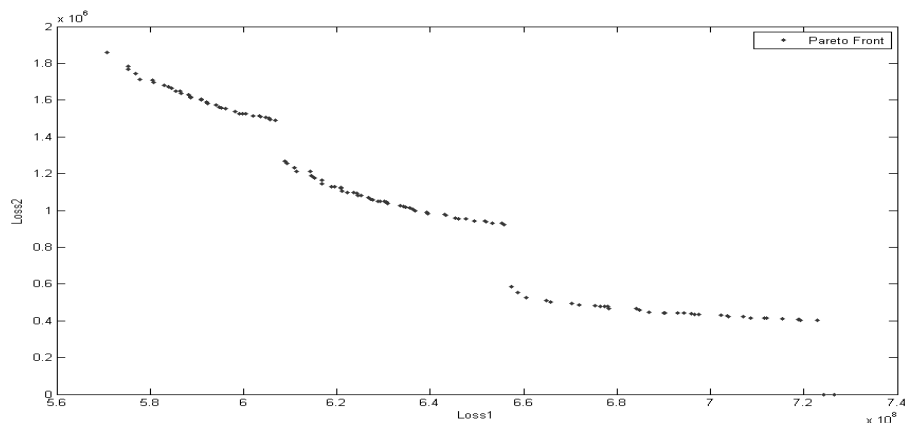
مهر، آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین که زمان مناسب برای عملیات فلاشینگ است، مورد توجه قرار گرفته اند. با توجه به میزان اثربخشی ماه های مختلف در موفقیت عملیات فلاشینگ، ضرابی مطابق دستورالعمل موسسه والینگفورد [۹] در نظر گرفته شده است. این ضراب در مورد سد سفیدرود برای ماه های مهر و اسفند برابر یک، برای ماه های آبان و بهمن برابر دو و برای سه ماه آذر و دی و فروردین برابر سه در نظر گرفته شد. با توجه به ضراب در نظر گرفته شده، در مدل بهینه سازی MOPSO، ذراتی که خروجی های بالاتری را برای عملیات فلاشینگ در سه ماه آذر و دی و فروردین در نظر بگیرند، ترجیح بیشتری دارند. علت آنکه ضراب ماهها متفاوت در نظر گرفته شده است آنست که بعلا و ورودی های بیشتر در سه ماه آذر، دی و فروردین، استفاده از حجم بالای ورودی در تخلیه رسوبات موجب کارآمدی بیشتر عملیات فلاشینگ می شود. بعلا آنکه از ماه اردیبهشت تا انتهای شهریور در پایین دست به آب با کیفیت قابل قبول جهت کشاورزی نیاز است، لذا در مدل بهینه سازی، محدودیت برای انجام عملیات فلاشینگ در این ماهها اختصاص داده شده است. در ادامه نتایج مدل ارائه می گردد.

۸. نتایج

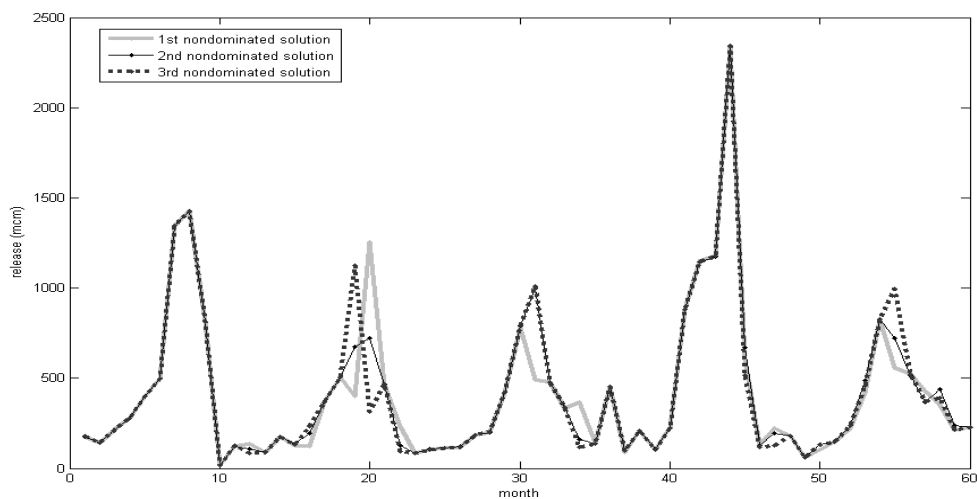
در الگوریتم MOPSO-CD از یک آرشیو خارجی با اندازه محدود برای ذخیره جوابهای غیربست استفاده می شود. در شکل (۳) جبهه پارتو به دست آمده توسط الگوریتم مذکور آمده است. در این شکل سه جواب که به ترتیب دارای بیشترین، میانه و کمترین مقدار تابع تابع هدف اول بودند را انتخاب نموده و مقادیر متغیرهای تصمیم (میزان خروجی از مخزن) برای آنها در شکل (۴) آورده شده است. همچنین مقادیر معادل حجم مخزن برای این سه جواب در شکل (۶) ارائه شده است. در جدول (۱) درصد برآورده شدن نیازها و متوسط ماهانه مقدار رسوب خروجی در طی سالهای بهره برداری به ازای سه جواب مذکور آمده است. در جواب اول که کمترین مقدار تابع تابع هدف اول را دارد مشاهده می کنیم که تقریباً در ۷۳٪ مواقع نیاز پائین دست به طور کامل برآورده می شود. در حالی که در دو جواب دیگر با زیاد شدن تابع هدف اول درصد برآورده شدن نیاز کمتر می شود. در شکل (۵) متوسط نیاز پائین دست و خروجی های به دست آمده از جواب اول نشان داده شده اند. نکته قابل توجه دیگر آنکه متوسط ماهانه میزان رسوب خروجی (در ماههایی که عملیات فلاشینگ مجاز است) در جواب اول ۱۸/۱۵ تن در ثانیه می باشد که این مقدار در دو جواب بعدی با کاهش مقدار تابع هدف دوم بیشتر می شود.

جدول ۱- درصد مواقع تامین نیازها و مقدار متوسط ماهانه رسوب خروجی در ماه های مجاز

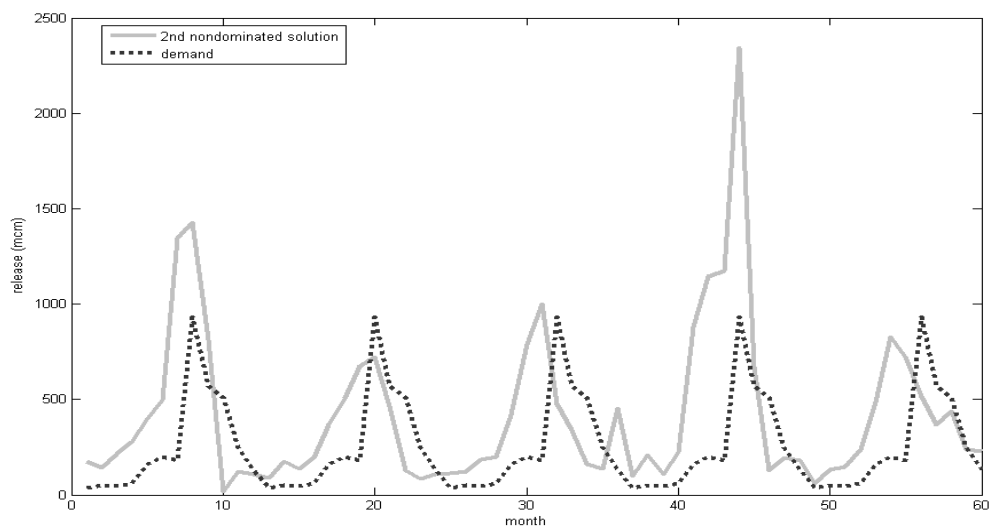
درصد برآورده شدن نیاز پائین دست ۱۰۰٪	درصد برآورده شدن نیاز پائین دست ۷۰٪	درصد برآورده شدن نیاز پائین دست ۵۰٪	متوسط میزان رسوب خروجی در واحد زمان در سالهای بهره برداری (ton/sec)
73.33 %	83.33 %	91.67 %	18.15
70.00%	81.67 %	91.67 %	20.72
68.33 %	76.67 %	90.00 %	22.44



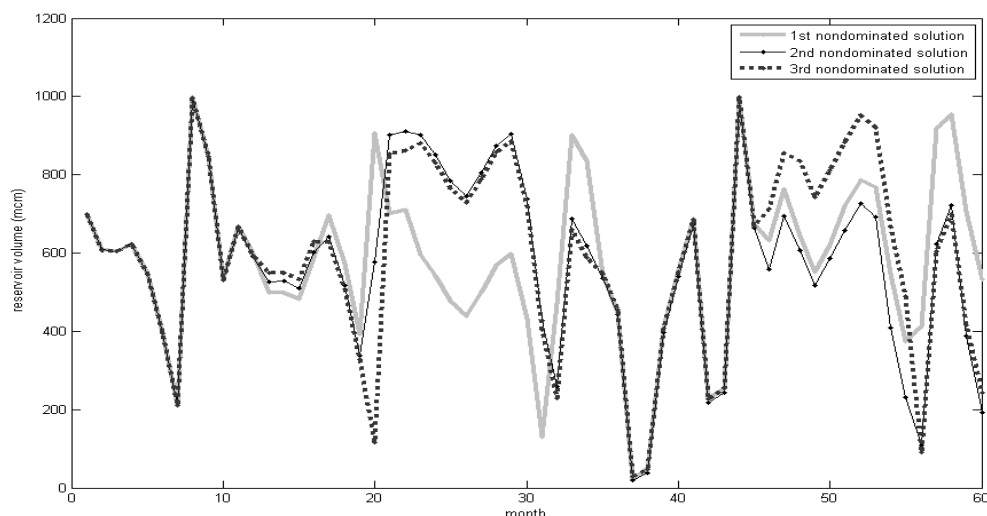
شکل ۳- جبهه پارتو به دست آمده توسط MOPSO



شکل ۴ - خروجی‌های به دست آمده به ازای سه جواب غیرپست انتخاب شده



شکل ۵ - خروجی‌های به دست آمده به ازای جواب غیرپست دوم و متوسط نیاز پائین دست



شکل ۶ - حجم آب ذخیره شده در مخزن سفید رود به ازای سه جواب غیرپست انتخاب شده

۹. مراجع

1. Gill, M.K, Y. H. Kaheil, A. Khalil, M. McKee, and L. Bastidas (2006), "Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology," Water Resource Research., 42, W07417, doi: 10.1029/2005WR004528.
2. 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. doi: 10.1002/hyp.6507.
3. 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, Vol. 134, No. 3, 0733-9496/2008/3-275-265.
4. Liu, Y. (2009) "Automatic calibration of a rainfall-runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm," Expert Systems with Applications. Vol. 36, 9533-9538.
5. Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization," Proceeding of International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, 1995 IEEE, Piscataway, 1995, pp. 1942-1948.
6. Raquel, C.R, Naval, J.P, (2005), "An Effective Use of Crowding Distance in Multiobjective Particle Swarm Optimization," GECCO '05, June 25-29, 2005, Washington DC, USA.
7. Deb. K, Pratap. A, Agarwal. S, and Meyarivan. T, (2002) "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, VOL. 6, NO. 2, April 2002.
8. Coello, C., Pulido, G., and Salazar, M.(2004). "Handling multiobjectives with particle swarm optimization", In IEEE Transactions on Evolutionary Computation," vol. 8, pp. 256-279, June 2004.
9. Atkinson, E. "The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoir", TDR Project R5839, UK, HR Wallingford Ltd, November 1996.

۱۰. اشرف واقفی، س، (۱۳۸۷)، "بررسی پارامترهای موثر بر عملیات فلاشینگ از مخازن سدها و تاثیر آنها در موفقیت عملیات"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، تهران.