

## مدیریت رسوب در بهره‌برداری چند هدفه از سد سفیدرود با لحاظ تولید انرژی برق آبی و مسائل زیست‌محیطی

رضا حاجی‌آبادی<sup>۱</sup>، مهدی ضرغامی<sup>۲\*</sup> و وحید نورانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> محقق مدعو دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تافتز ایالات متحده

<sup>۴</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

### چکیده

با افزایش تقاضا برای آب و انرژی برق آبی و از طرفی دیگر با توجه به رسوب‌گذاری مخازن سدها و مسایل زیست‌محیطی دیگر، بهره‌برداری از مخازن از پیچیدگی خاصی برخوردار است. در این تحقیق روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) به منظور بهینه‌سازی چند هدفه مخزن سد سفیدرود به کار برده شده و علاوه بر قیده‌های فیزیکی، مسائل و محدودیت‌های زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شده است. سپس به وسیله وزن‌دهی به توابع هدف، سناریوهای مختلفی تعریف شده‌اند و بهترین راه حل متناظر با هر سناریو از میان مجموعه نقاط بهینه پارتو تعیین گردیده است. نتایج این تحقیق که نسبت به تحقیق حاکی از آن هستند که با استفاده از بهینه‌سازی خروجی جریان در مخزن سفیدرود می‌توان به یک مدیریت مناسب‌تر جهت تأمین اهداف مورد نظر دست یافت. نتایج نشان می‌دهند که علاوه بر تأمین مناسب‌تر نیاز آبی پایین دست می‌توان مقدار تولید انرژی برق آبی را بیش از ۷ درصد نسبت به حالت مشاهداتی افزایش داد. همچنین در صورت نیاز به عملیات رسوب‌زدایی و با هدف تأمین هشتاد درصد از نیاز آبی پایین دست، نه تنها می‌توان انرژی برق آبی تولیدی را ۳ درصد نسبت به حالت مشاهداتی افزایش داد، بلکه مقدار رسوب خروجی نیز بیش از ۴۷ میلیون تن افزایش خواهد داشت.

**واژگان کلیدی:** بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک چند هدفه، سفیدرود، نقاط بهینه پارتو.

### ۱- مقدمه

زود هنگام سدها، خطر رسوب‌گذاری مخازن آن‌ها است. این مشکل به ویژه در کشورهای در حال توسعه که در آن‌ها مدیریت حوضه‌های آبریز با چالش‌ها و نابسامانی‌های مختلفی روبه‌روست، بسیار ملموس‌تر است [۲]. حساسیت و اهمیت این چنین مسائلی در سراسر جهان، محققین را بر آن داشته تا با بکارگیری روش‌های گوناگون به دنبال بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها باشند.

مدل کردن ریاضی مسائل بهینه‌سازی نیازمند تعریف تک اهداف و روابط بین آن‌ها در سیستم و همچنین تعریف قیود مسئله و در نهایت انتخاب جواب بهینه می‌باشد [۳] و در مسائلی که ماهیت غیر خطی و پیچیده‌ای دارند یافتن جواب‌های بهینه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی معمولی و ریاضی مشکل و یا در برخی موارد غیر ممکن است. از این روی، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه برای حل غیر خطی که حل آن‌ها با استفاده از روش‌های معمولی و تحلیلی ممکن نیست اجتناب ناپذیر می‌باشد.

مدیریت سنتی منابع آب که اغلب مبتنی بر بررسی سود و هزینه بوده، روش پایداری نبوده لذا نیاز به ارزیابی دوباره روش‌ها برای مدیریت سازگار منابع آب می‌باشد. یکی از ابزارهای مهم برای این منظور استفاده از دیدگاه بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشد. متخصصین همواره در جستجوی پاسخی برای این مسئله بوده‌اند که چقدر، کی و به چه کسی منابع آبی را باید تخصیص داد تا حداکثر منفعت اقتصادی در عین برابری اجتماعی و با ملاحظه مسائل زیست‌محیطی حاصل شود. به همین دلیل، به منظور رسیدن به این اهداف، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه در سال‌های اخیر گسترش روزافزونی داشته است.

یکی از ابزارهای مدیریت منابع آب، سدها هستند که بهره‌برداری از آن‌ها و حوضه‌های آبریز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا خسارت‌های محتمل بر اثر عدم مدیریت مناسب آن‌ها می‌تواند غیر قابل جبران باشد [۱]. جدی‌ترین تهدید برای مرگ

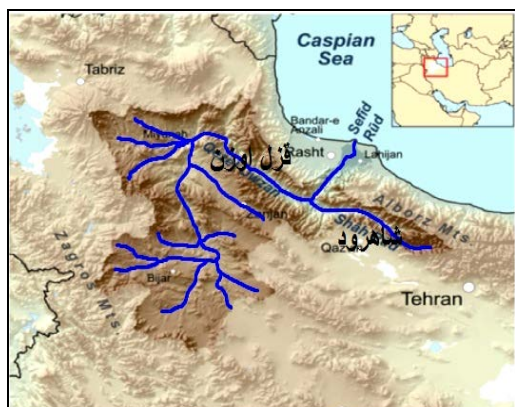
با توجه به تولید نیروگاه و کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها مورد بررسی قرار دادند. Shokri و همکاران [۱۶] با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP) با لحاظ دو عدم قطعیت به منظور تأمین هم‌زمان تقاضای آب پایین‌دست و خروج رسوبات عملکرد مخزن سد سفیدرود را بهینه کردند. Bai و همکاران [۱۷] با استفاده از بهره‌برداری چند هدفه بهینه مخازن آبشاری و تولید سیلاب‌های مصنوعی کنترل شده در بخشی از رودخانه زرد در کشور چین، منجر به رسوب‌شویی مؤثرتر و کاهش نرخ رسوب‌گذاری در بستر رودخانه شدند. آن‌ها در این تحقیق از مدل الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب<sup>۲</sup> استفاده کردند که بر اساس فضای جستجوی ممکن بهبود یافته بود. سپس برنامه بهره‌برداری بهینه به دست آمده را برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ گسترش دادند.

به دلیل پیچیدگی مسائل بهینه‌سازی و بهره‌برداری چند هدفه در مخازن، اکثر مطالعات گذشته از رویکردهای وزن‌دهی، برنامه‌ریزی پویا و یا روش‌های دیگر استفاده کرده و مسائل چند هدفه را به مسائل تک هدفه تبدیل می‌کنند [۱۷]. اما الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب به طور موفقیت‌آمیزی در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه به کار برده شده است. در این تحقیق نیز از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب برای حل مسئله بهینه‌سازی مخزن سد سفیدرود استفاده گردیده است. سد سفیدرود نقش به‌سزایی در تأمین آب مورد نیاز کشاورزی استان گیلان دارد. مطالعات انجام شده توسط پایمزد نشان می‌دهد که با فعال شدن طرح‌های آبی استان‌های بالادست، میزان حجم آب ورودی سد سفیدرود دستخوش تغییراتی شده و منجر به ایجاد مشکلاتی در تأمین آب مورد نیاز پایین‌دست یعنی استان گیلان می‌شود؛ به طوری که این مشکلات در سال‌های خشک به نحو قابل توجه‌تری بروز خواهد کرد. بر اساس مطالعات پایمزد، میزان حجم آب ورودی به سد سفیدرود با فعال شدن طرح‌های آبی استان‌های بالادست (کردستان، زنجان، آذربایجان شرقی و اردبیل) در آینده، نسبت به شرایط پایه ۴۱ درصد کاهش خواهد یافت که این کاهش حجم آب ورودی برای سال‌های خشک به مراتب حادتر خواهد شد و مدیریت مناسب‌تر در چنین سال‌هایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۸]. بنابر این بهره‌برداری مناسب و پایدار از این سد اهمیت ویژه‌ای دارد.

اهداف بهینه‌سازی شامل تأمین نیاز پایین‌دست، تولید انرژی

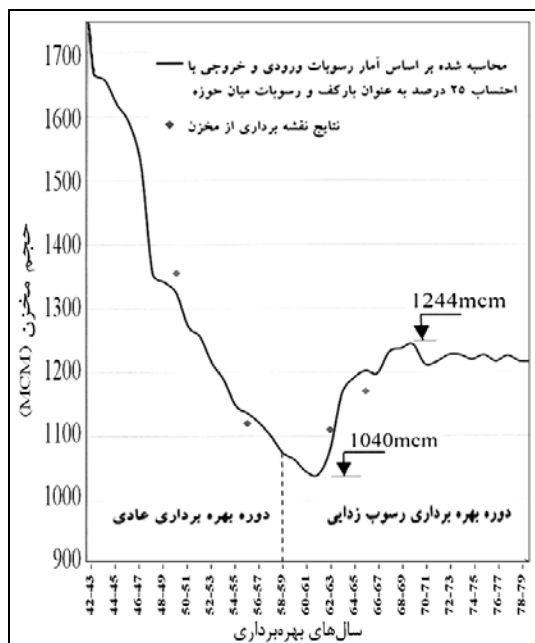
در طی سالیان اخیر استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی مسائل گوناگون نظیر سیستم‌های توزیع آب [۴، ۵]، مدل‌های بارش- رواناب [۶]، مدیریت مصرف آب شهری [۷]، سیستم‌های پمپاژ [۸]، بهینه‌سازی ابعاد لوله‌های پستاک سدها [۹] و مدیریت مخازن سدها [۱۰، ۱۱] مورد توجه قرار گرفته است.

سلطانی و همکاران [۱۲] با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی کیفی مخزن و یک مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مخزن سد ۱۵ خرداد که دارای مشکلات کیفیت آب است را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. مدل شبیه‌سازی کیفی مخزن آن‌ها که در داخل فرآیند بهینه‌سازی قرار دارد، وضعیت لایه‌بندی کیفی مخزن و همچنین کیفیت آب خروجی از دریچه‌ها را ارائه می‌دهد. آزادنی [۱] الگوریتم بهینه‌سازی PSO<sup>۱</sup> را برای بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌برداری از مخزن سد سفیدرود، به کار برد. توابع هدف در این تحقیق شامل دو تابع یکی مربوط به تأمین نیاز پایین‌دست و دیگری برای خروج رسوبات مخزن بود [۱]. در ادامه اینانلو [۳] ترکیبی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS و الگوریتم بهینه‌سازی PSO را برای حل مسائل چند هدفه مدیریت منابع آب با مطالعه موردی مخزن سد سفیدرود در یک دوره ۶۰ ماهه، استفاده کرد. در این تحقیق تأمین نیاز پایین‌دست و خروج رسوبات به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. در تحقیقات اینانلو و آزادنی تولید نیروگاه در نظر گرفته نشده است و همچنین در عملیات رسوب‌شویی اشاره‌ای به مسائل زیست‌محیطی نشده است. Chen و همکاران [۱۳] با استفاده از نوع خاصی از الگوریتم ژنتیک مصارف مخزن Fei-Tsui در تایوان را بر اساس توابع هدف حداکثر تولید نیروگاه و ذخیره آب بهینه‌سازی کردند؛ طوری که الگوریتم به کار رفته از همگرایی زودرسی که ممکن است در طول فرآیند الگوریتم ژنتیک معمولی اتفاق بیفتد جلوگیری می‌کند. Wan و همکاران [۱۴] یک مدل جریان کلی از آب و رسوب را برای پیش‌بینی حرکت رسوب در مخزن Sanmenxia واقع در چین توسعه دادند. سپس با توجه به جریان رسوب پیش‌بینی شده توسط مدل، یک برنامه بهینه برای مخزن با توجه به خروج رسوبات ارائه کردند. Khan و همکاران [۱۵] یک مدل بهینه بهره‌برداری از مخزن سد Tarbela در پاکستان را بر اساس روش الگوریتم ژنتیک با توجه به حداقل کردن کمبود نیازهای آبیاری و همچنین خروج رسوبات گسترش دادند. آن‌ها همچنین مدل را



شکل ۱- نمایی از حوضه آبریز سد سفیدرود

تأمین نیاز پائین‌دست از اهداف اصلی مخزن سفیدرود می‌باشد؛ اما حجم رسوبات ورودی به مخزن نیز قابل توجه است. در سال ۱۳۵۹ پس از ۱۷ سال بهره‌برداری عادی، حدود ۷۰۰ میلیون متر مکعب رسوب در مخزن نهشته شد (شکل ۲). به این ترتیب مانور رسوب‌زدائی در دستور کار قرار گرفت. طی ۱۱ سال عملیات رسوب‌زدائی بین سال‌های ۱۳۵۹ تا ۱۳۷۰ علاوه بر خالی کردن کل رسوبات ورودی به مخزن در این دوره افزون بر ۲۰۰ میلیون متر مکعب از رسوبات نهشته شده قبلی نیز تخلیه گردید [۲].



شکل ۲- تغییرات حجم مخزن سد سفیدرود در سال‌های بهره‌برداری [۲۰]

برق‌آبی و خروج رسوبات می‌باشد. لحاظ هم زمان این سه تابع هدف در مطالعات گذشته مربوط به این مخزن مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین این تحقیق با در نظر گرفتن مسائل و مشکلات زیست محیطی ناشی از خروج رسوبات به عنوان قیدهایی برای مدل بهینه‌سازی، سعی در کنترل مطلوب‌تر این مشکلات دارد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، بهینه‌سازی چند هدفه مخزن سد سفیدرود با توجه به مشکلات رسوب‌گذاری و بهره‌برداری با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مخزن سد سفیدرود در سال ۱۳۸۷ و در مقیاس ده روزه مطالعه شده است که مقدار ورودی به سد در این سال نسبت به نیاز پایین‌دست کمتر است و یک سال خشک محسوب می‌گردد. از اطلاعات مورد نیاز مسئله می‌توان به سری‌های زمانی ده روزه مربوط به جریان ورودی به مخزن و نیاز پایین‌دست اشاره نمود.

### ۲-۱- موقعیت و مشخصات سد سفیدرود

سد مخزنی سفیدرود از جمله سدهای مهم کشور و مهم‌ترین سد استان گیلان می‌باشد که در سال ۱۳۴۱ جهت مهار طغیان‌های مخرب و آبیاری دشت حاصل‌خیز گیلان مورد بهره‌برداری قرار گرفت. سد سفیدرود بر روی رودخانه سفیدرود در پایین‌دست محل تلاقی دو رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود، در مجاورت شهر منجیل احداث گردیده است. شکل (۱) نمایی از حوضه آبریز سد سفیدرود را نشان می‌دهد. سد سفیدرود در تمامی دوران بهره‌برداری به دلیل طولانی بودن حوضه آبریز خود دچار مشکل رسوب بوده و مسئله رسوب همواره از مشکلات این سد بوده است. مساحت کل حوضه آبریز سفیدرود ۵۶۲۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد که شامل رودخانه قزل‌اوزن به طول ۵۰۰ کیلومتر با حوضه آبریزی به وسعت ۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع و رودخانه شاهرود به طول ۱۸۰ کیلومتر با حوضه آبریزی به وسعت ۶۲۰۰ کیلومتر مربع است. حوضه آبریز سفیدرود سالانه به طور متوسط، ۴۳ میلیون تن رسوب را وارد مخزن سد سفیدرود می‌نماید. از این مقدار ۳۵ میلیون تن از شاخه قزل‌اوزن، ۶ میلیون تن از شاخه شاهرود و دو میلیون تن از رودخانه‌های فرعی می‌باشد [۲].

بر اساس پارامتر فاصله ازدحام صورت می‌گیرد. سپس جواب‌های با رتبه‌بندی بهتر به عنوان جمعیت اولیه برای تکرار بعدی انتخاب خواهند شد ( $P_{t+1}$ ) به طوری که تعداد آن‌ها برابر با جمعیت اولیه تعریف شده باشد. مفهوم مغلوب شدن برای یک مسئله کمینه‌سازی بر اساس رابطه (۱) تعریف شده است.

$$\begin{cases} F(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\} \\ F(y) = \{f_1(y), f_2(y), f_3(y)\} \\ F(x) \text{ Dom } F(y) \Leftrightarrow \forall i: f_i(x) \leq f_i(y) \text{ and } \exists j: f_j(x) < f_j(y) \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $F(x)$  و  $F(y)$  مجموعه‌ای از توابع هدف و دو نقطه از فضای جستجو هستند.  $F(x)$  زمانی  $F(y)$  را مغلوب می‌کند که تمام توابع هدف موجود در  $F(x)$  کوچک‌تر یا مساوی (حداقل یک تابع هدف کوچک‌تر) تمام توابع هدف موجود در  $F(y)$  باشند.

پارامتر فاصله ازدحام نیز برای هر عضو در هر گروه محاسبه می‌شود و بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونه مورد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه می‌باشد. اعضای هر دسته نیز توسط این پارامتر به صورت جداگانه مرتب‌سازی می‌شوند. بزرگ‌تر بودن این پارامتر منجر به واگرایی و گستره بهتری در مجموعه اعضای جمعیت خواهد شد. این پارامتر با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$D(k) = \sum_{i=1}^n \frac{|f_i^{k+1} - f_i^{k-1}|}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (2)$$

در این رابطه،  $f_i^{k-1}$  و  $f_i^{k+1}$  به ترتیب مقادیر تابع هدف  $i$  ام مربوط به عضو بعد و قبل عضو  $k$  ام می‌باشد و  $f_i^{\max}$  و  $f_i^{\min}$  مقادیر بیشینه و کمینه تابع هدف  $i$  ام می‌باشند.

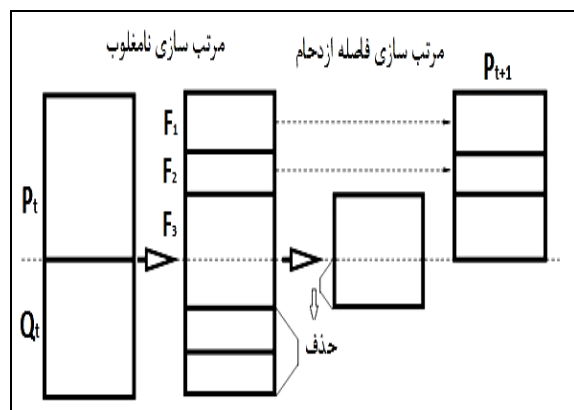
### ۳-۲- توابع هدف

در این تحقیق برای نیاز پایین‌دست، از رابطه (۳) به عنوان تابع هدف استفاده شده است. همان‌طور که در این رابطه دیده می‌شود، تابع هدف برای تأمین نیاز پایین‌دست شامل دو قسمت می‌باشد. نیازهای پایین‌دست در بازه‌های ده روزه در طول دوره بهره‌برداری مورد مطالعه (سال ۱۳۸۷) دارای اهمیت یکسانی نیستند. به همین منظور برای نیازهای بیشتر از ۲۰ میلیون متر

با توجه به مسائل گفته شده، اهمیت استراتژیک و مشکل رسوب گذاری سد سفیدرود و همچنین لزوم خروج رسوبات، برای جلوگیری از کاهش حجم مخزن و امکان تأمین سایر نیازهای در نظر گرفته شده برای مخزن، مطالعه و بررسی روش‌های ممکن جهت اعمال یک مدیریت مناسب حائز اهمیت می‌باشد. هدف از این تحقیق ارائه یک مدیریت مناسب و بهینه جهت مقادیر خروجی و رهاسازی جریان مخزن با توجه به تأمین نیاز پایین‌دست، تولید نیروگاه و خروج رسوبات به وسیله عملیات رسوب‌شویی می‌باشد.

### ۲-۲- الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب

در دهه‌های گذشته تعداد زیادی از الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه معرفی شده است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب اشاره کرد که توسط Deb [۲۱] ارائه شده است. در این مطالعه نیز به منظور بهینه‌سازی چند هدفه روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی و پیاده‌سازی شده است. نمودار کلی الگوریتم NSGA-II در شکل (۳) ارائه گردیده است.



شکل ۳- نمودار الگوریتم NSGA-II ارائه شده توسط Deb [۲۱]

در نمودار ارائه شده در شکل (۳)،  $P_t$  جمعیت اولیه می‌باشد که اعضای آن برای بار اول به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و  $Q_t$  جمعیت فرزندان حاصل از باز ترکیب و جهش جمعیت اولیه است. در مرحله بعدی اعضای جمعیت اولیه و فرزندان حاصل از آن با توجه به برازندگی و شایستگی بر اساس توابع هدف تعریف شده و همچنین بر اساس نامغلوب بودن در درون دسته‌هایی در نمودار ارائه شده در شکل (۳)، قرار می‌گیرند. پس از آن نیز یک رتبه‌بندی

برق آبی و خروج رسوبات به صورت عکس به کار برده شده‌اند تا هر سه تابع هدف در مدل بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی بیان شوند و پس از بهینه‌سازی به حالت اولیه برگردانده شده‌اند.

#### ۲-۴- محاسبه بار رسوب خروجی در رسوب‌شویی

برای محاسبه بار رسوب خروجی از روش معرفی شده در مؤسسه IRTCES<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۵ استفاده شده است. این روش تجربی بر اساس مشاهدات عملیات رسوب‌شویی که در مخازن کشور چین انجام شده است می‌باشد. معادله این روش به صورت رابطه (۶) می‌باشد [۲۲].

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

در رابطه (۶)،  $Q_s$  دبی انتقال رسوب بر حسب تن بر ثانیه،  $Q_f$  دبی رسوب‌شویی بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $S$  شیب طولی مخزن و  $W$  عرض کانال رسوب‌شویی بر حسب متر است که به مقدار دبی رسوب‌شویی بستگی دارد.  $\psi$  نیز یک ضریب ثابت است و با توجه به نوع رسوبات تعیین می‌شود که با توجه به ریز دانه بودن رسوبات سد سفیدرود برابر با ۱۶۰۰ در نظر گرفته شده است [۲۰].

#### ۲-۵- محاسبه انرژی برق آبی

انرژی تولید شده توسط نیروگاه‌های برق آبی از رابطه (۷) به دست می‌آید [۲۳].

$$P = 2.73 \times 10^{-3} (q \times h \times e) \quad (7)$$

در رابطه (۷)،  $P$  مقدار انرژی تولیدی بر حسب کیلو وات ساعت در ثانیه،  $q$  دبی عبوری از توربین بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $h$  ارتفاع آب روی توربین بر حسب متر و  $e$  راندمان توربین می‌باشد. در این مطالعه، با توجه به نظر کارشناسان سد سفیدرود و مشاهدات مربوط به انرژی تولیدی نیروگاه در سال ۱۳۸۷ راندمان توربین برابر با ۸۲ درصد در نظر گرفته شده است.

مکعب اهمیت بیشتری در نظر گرفته شده است. این مقدار و میزان اهمیت آن نیز بر اساس سعی و خطا تعیین شده است و در نهایت نتیجه‌گیری شد که روش بهینه‌سازی با در نظر گرفتن اهمیت بیشتر (ضریب ۲) برای مقادیر نیاز پایین دست بیش از ۲۰ میلیون متر مکعب نتایج مطلوب‌تری ارائه می‌دهد. همچنین تابع هدف نیاز پایین دست تنها در مواقعی که رهاسازی آب کمتر از نیاز پایین دست باشد، دارای مقدار است و در مواردی که بیش از مقدار نیاز پایین دست خروجی داشته باشیم، مقدار تابع هدف نیاز پایین دست صفر است.

$$f_1(\text{Demand}) = \begin{cases} D_i \geq 20 \ \& \ R_i \leq D_i \Rightarrow f_1 = 2 \times \left( \sum_{i=1}^n (D_i - R_i)^2 \right) \\ D_i < 20 \ \& \ R_i \leq D_i \Rightarrow f_1 = \sum_{i=1}^n (D_i - R_i)^2 \\ R_i > D_i \Rightarrow f_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

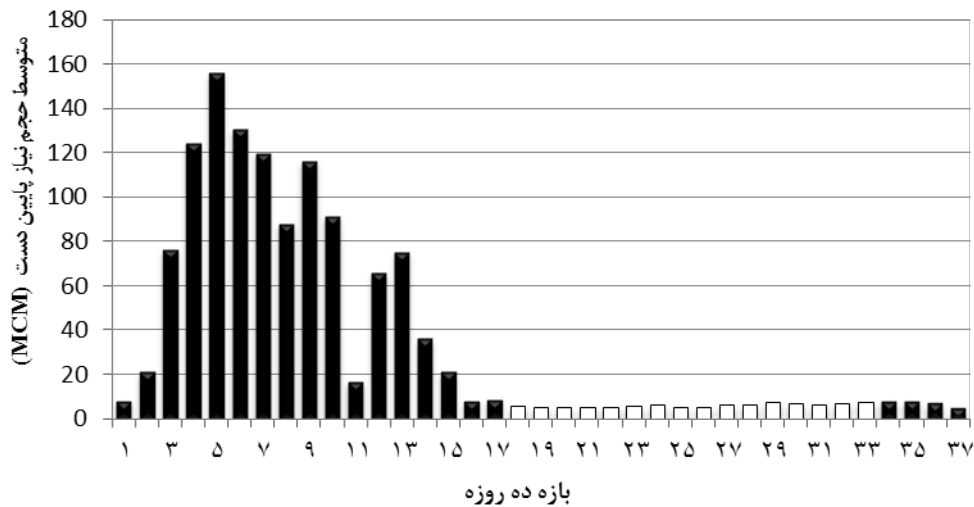
در رابطه (۳)،  $R_i$  مقدار حجم خروجی از مخزن در زمان  $i$  و  $D_i$  مقدار حجم نیاز پایین دست در زمان  $i$  است که هر دو بر حسب میلیون متر مکعب می‌باشند. تابع هدف در نظر گرفته شده برای خروج رسوبات و انرژی برق آبی نیز به صورت توابعی متناسب با مجموع کل رسوبات خروجی و مجموع کل انرژی برق آبی در دوره بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. در روابط (۴) و (۵) این توابع ارائه شده است.

$$f_2(\text{Flushing}) = f_2 \left( \sum_{i=1}^n V_{si} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $V_{si}$  مقدار حجم رسوب خروجی در زمان  $i$  بر حسب میلیون تن است.

$$f_3(\text{Hydropower}) = f_3 \left( \sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $P_i$  مقدار انرژی برق آبی در زمان  $i$  بر حسب میلیون کیلووات ساعت است. با توجه به نوع توابع هدف در نظر گرفته شده توابع هدف انرژی برق آبی و خروج رسوبات باید بیشینه شوند در حالی که تابع هدف نیاز پایین دست باید کمینه شود. در مدل بهینه‌سازی برای یک نوع کردن توابع هدف و بیان کردن تمام اهداف به صورت کمینه‌سازی، توابع هدف انرژی



شکل ۴- بازه‌های مجاز به منظور انجام عملیات رسوب‌شویی (سال ۱۳۸۷)

مجاز صورت خواهد گرفت. روزهایی که رسوب‌شویی برای مدل بهینه‌سازی ممنوع اعلام شده است شامل فصل آبیاری (بازه‌هایی که مقادیر نیاز پایین‌دست آن‌ها بیشتر از ۸ میلیون متر مکعب است) و فصل مهاجرت ماهی‌ها به رودخانه سفیدرود (اوایل اسفند تا اواخر اردیبهشت) می‌باشد. در شکل (۴) که مقادیر نیاز پایین‌دست در طول دوره بهره‌برداری (سال ۱۳۸۷) را نشان می‌دهد، روزهای مجاز برای انجام دادن عملیات رسوب‌شویی با توجه به فصل آبیاری و تخم‌ریزی ماهی‌ها با رنگ سفید نمایش داده شده است. روزهای ممنوع نیز با رنگ سیاه مشخص شده است.

#### ۷-۲- روش نش غیر متقارن<sup>۱</sup>

بعد از حل مسئله، جواب‌های مدل بهینه‌سازی به صورت مجموعه نقاط غیر پست (نقاط بهینه پارتو) نسبت به سه تابع هدف به دست می‌آید. به طوری که نمی‌توان در این مجموعه بین دو جواب مختلف یکی را به دیگری برتری داد و هر جواب حداقل در یک تابع هدف نسبت به دیگری برتری دارد. پس از به دست آوردن نقاط بهینه پارتو به منظور انتخاب جواب نهایی باید وزن و اهمیت هر تابع هدف مشخص شود. در این تحقیق برای مشخص کردن جواب نهایی از روش غیر متقارن نش استفاده شده است. این روش را می‌توان به صورت رابطه (۹) بیان کرد [۲۴].

#### ۶-۲- قیود بهینه‌سازی

با توجه به در نظر گرفتن سه نوع تابع هدف، قیودی به منظور منطقی بودن نتایج باید در نظر گرفته شود. در این تحقیق دو نوع قید فیزیکی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است. قیدهای فیزیکی: در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن بایستی رابطه پیوستگی بین مقادیر ورودی، خروجی و حجم ذخیره مخزن بر اساس رابطه (۸) برقرار باشد.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $S_{t+1}$  حجم مخزن در ابتدای دوره  $t+1$  می‌باشد.  $S_t$ ،  $I_t$  و  $R_t$  نیز به ترتیب مقادیر حجم مخزن در ابتدای دوره  $t$  و حجم ورودی به مخزن در دوره  $t$  و حجم خروجی از مخزن در دوره  $t$  می‌باشند.

حجم ذخیره مخزن بایستی بین مقادیر حداقل و حداکثر آن باشد. میزان خروجی بهینه‌سازی شده در هر دوره بایستی بین مقادیر حداقل و حداکثر آن باشد. مقادیر دبی عبوری از نیروگاه با توجه به ظرفیت حداکثر و حداقل دبی عبوری از توربین‌ها محدود می‌شود. همچنین یک تراز حداقل (۴۲ متر بالاتر از دریچه‌های عمقی) برای تولید نیروگاه در نظر گرفته شده است و در روزهای مجاز برای عملیات رسوب‌شویی نیروگاه از مدار خارج می‌گردد و انرژی تولید نخواهد کرد.

قیدهای زیست‌محیطی: برای دبی رسوب‌شویی یک مقدار حداکثر با توجه به ایجاد مشکلات محیط زیستی در پایین‌دست، در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این رسوب‌شویی تنها در روزهای

1- Non-symmetric Nash solution

رسوبات (عملیات رسوب‌شویی) و تولید انرژی برق‌آبی بود، منحنی پارتو به دست آمده سه بعدی می‌باشد. شکل (۵) منحنی پارتو به دست آمده از الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد. در منحنی پارتو مقادیر توابع هدف به صورت نرمال شده نشان داده شده‌اند؛ طوری که بهترین حالت برای هر تابع هدف برابر با یک و بدترین حالت برای آن برابر با صفر در نظر گرفته شده است. پس از به دست آوردن نقاط بهینه پارتو به منظور انتخاب جواب نهایی باید وزن و اهمیت هر تابع هدف مشخص شود. در این تحقیق، طبق جدول (۱) شش سناریو با مقادیر وزن توابع هدف گوناگون تعریف شده‌اند. پس از مشخص نمودن وزن‌ها، بر اساس روش نش غیر متقارن جواب بهینه متناظر با سناریوهای تعریف شده از میان نقاط بهینه پارتو تعیین شده است.

جدول ۱- وزن توابع هدف در سناریوهای تعریف شده

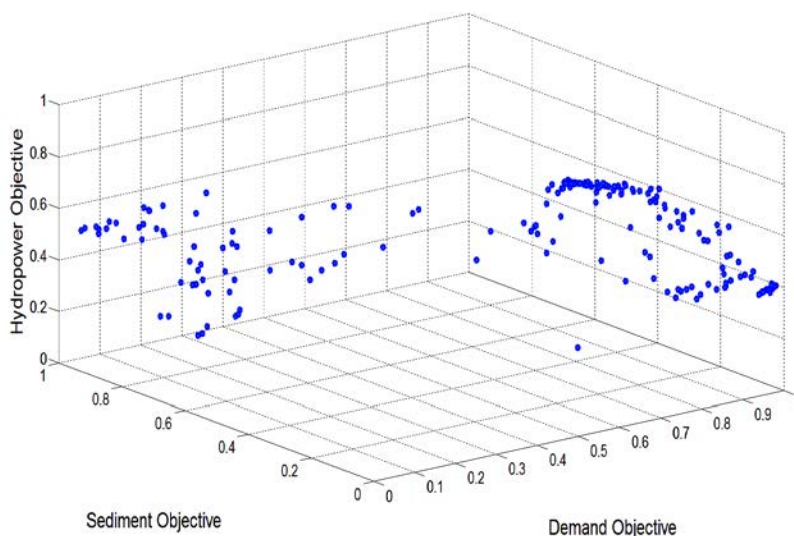
سناریوها	تأمین نیاز پایین دست	رسوب‌زدایی (رسوب شویی)	تولید انرژی برق‌آبی
سناریو ۱	۱	۰	۰
سناریو ۲	۰/۷	۰/۳	۰
سناریو ۳	۰/۷	۰	۰/۳
سناریو ۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
سناریو ۵	۰	۱	۰
سناریو ۶	۰	۰	۱

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} && \prod_{i=1}^n (f_i - f_{\min i})^{w_i} \\ & \text{subject to} && f_{\min i} \leq f_i \leq f_{\max i} \end{aligned} \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $f_i$  مقدار تابع هدف نام پس از نرمال‌سازی است و  $w_i$  وزن در نظر گرفته شده برای آن می‌باشد.  $f_{\max i}$  و  $f_{\min i}$  به ترتیب ایده‌آل‌ترین و بدترین مقدار آن تابع می‌باشند و بعد از نرمال‌سازی به ترتیب برابر با یک و صفر می‌شوند. یک نشان دهنده ایده‌آل‌ترین و صفر نشان دهنده بدترین حالت برای تابع هدف مورد نظر است. برای تابع هدف نیاز پایین‌دست ایده‌آل‌ترین حالت کم‌ترین مقدار آن است که پس از نرمال‌سازی مقدار آن برابر با یک می‌شود. در حالی که در توابع هدف انرژی برق‌آبی و خروج رسوبات ایده‌آل‌ترین حالت بیش‌ترین مقدار آن - هاست که پس از نرمال‌سازی این مقادیر برابر با یک خواهند شد. در نهایت با توجه به وزن‌های انتخاب شده برای هر تابع هدف در هر سناریو می‌توان جواب بهینه متناظر با آن سناریو را از میان نقاط بهینه پارتو استخراج نمود.

### ۳- نتایج و بحث

در بهینه‌سازی چند هدفه، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به عنوان جواب به دست می‌آیند که به اصطلاح نقاط بهینه پارتو یا منحنی پارتو خوانده می‌شوند. با توجه به انتخاب سه تابع هدف برای مخزن سفیدرود که شامل تأمین نیاز پایین‌دست و خروج



شکل ۵- منحنی پارتو به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II

رسوب‌زدایی و تولید انرژی برق‌آبی کاملاً در تضاد با یکدیگر هستند. زیرا در هنگام انجام عملیات رسوب‌زدایی نیروگاه از مدار خارج و تولید انرژی برق‌آبی نخواهیم داشت. اما با این وجود و برخلاف مقادیر رسوب خروجی، تفاوت زیادی در تولید انرژی برق‌آبی توسط سناریوهای مختلف دیده نمی‌شود و تغییرات آن نسبت به کمترین میزان انرژی برق‌آبی تولید شده حدود ۲۲ درصد است. یکی از دلایل این موضوع این است که تولید انرژی برق‌آبی و تأمین نیاز پایین‌دست تا حدودی در راستای یکدیگر هستند. دلیل دیگر ممنوع کردن عملیات رسوب‌شویی در فصل آبیاری و فصل مهاجرت ماهی‌ها می‌باشد؛ طوری که موجب می‌شود سناریوهایی که حتی با اهمیت بالا برای رسوب‌شویی تعریف شده‌اند در بازه‌های ممنوع برای رسوب‌شویی انرژی برق‌آبی تولید کنند.

همان طور که اشاره شد، تأمین آب مورد نیاز پایین‌دست مهمترین هدف در سد سفیدرود می‌باشد. بنابر این میزان تأمین نیاز پایین‌دست توسط سناریوها از اهمیت بیشتری برخوردار است و تولید انرژی برق‌آبی و خروج رسوبات با توجه به تأمین نیاز آبی پایین‌دست باید صورت بگیرد. به همین منظور برای تجزیه و تحلیل شایسته‌تر این هدف درصدهای مختلفی از نیاز آبی پایین‌دست مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. میزان کمبود سالانه هر سناریو و همچنین حداکثر کمبود در بازه‌های ده روزه آن‌ها در این درصدهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب مقادیر کمبود نیاز سالانه و حداکثر کمبود ده روزه هر سناریو را با توجه به درصدهای مختلف نیاز پایین‌دست نشان می‌دهند.

همان طور که جدول (۱) نشان می‌دهد، سناریوی ۱ تنها با هدف تأمین نیاز پایین دست تعریف شده و وزن اهداف رسوب‌زدایی و انرژی برق‌آبی برابر صفر در نظر گرفته شده است اما این به معنای عدم خروج رسوبات در این سناریو یا عدم تولید انرژی برق‌آبی نمی‌باشد. در واقع انتخاب وزن صفر برای یک هدف به معنای اهمیت نداشتن آن هدف در آن سناریو است. بنابر این سناریوی ۱، بهترین جواب در بین مجموعه نقاط بهینه پارتو برای تأمین نیاز پایین‌دست می‌باشد. سناریوهای ۵ و ۶ نیز به ترتیب تنها برای اهداف رسوب‌زدایی و تولید انرژی برق‌آبی تعریف شده‌اند تا بتوان میزان حداکثر رسوب خروجی و حداکثر تولید انرژی برق‌آبی را با توجه به قیود مطرح شده در برنامه بهینه‌سازی از میان منحنی پارتو تعیین نمود. سناریوهای ۲ و ۳ نیز ترکیبی از دو تابع هدف هستند و در سناریوی ۴ میزان وزن هر سه تابع هدف برابر در نظر گرفته شده است.

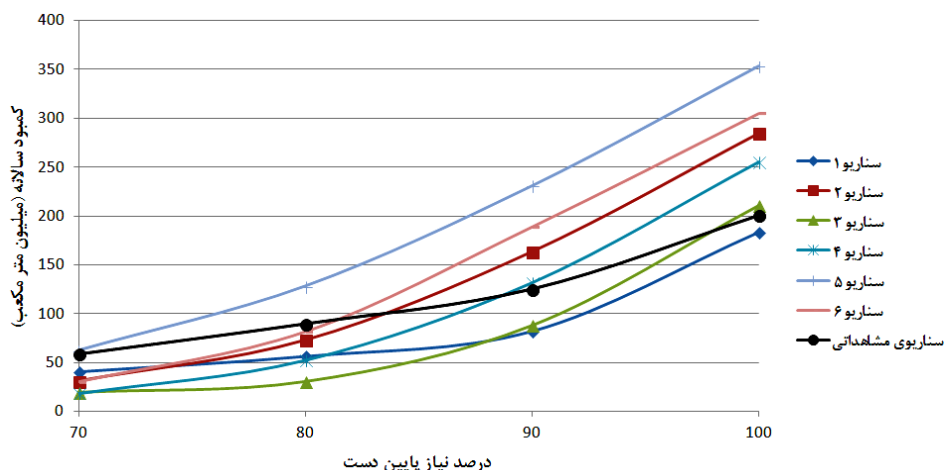
در نهایت با توجه به سناریوهای تعریف شده و بر اساس روش نش غیر متقارن جواب بهینه متناظر با هر سناریو از میان مجموعه نقاط بهینه پارتو استخراج گردیده است.

جدول (۲) مقدار رسوب خروجی و انرژی برق‌آبی تولید شده توسط هر سناریو را نمایش می‌دهد. حداکثر رسوب خروجی در بین سناریوها بیش از ۸۹ میلیون تن و مربوط به سناریوی ۵ می‌باشد؛ در حالی که همین سناریو کمترین مقدار تولید انرژی برق‌آبی را دارد. همچنین حداکثر تولید انرژی برق‌آبی نیز بیش از ۱۴۷ میلیون کیلووات ساعت و مربوط به سناریو ۶ است که دارای کمترین میزان رسوب خروجی نیز می‌باشد. همان طور که مورد انتظار است با توجه به نحوه تعریف قیود، اهداف

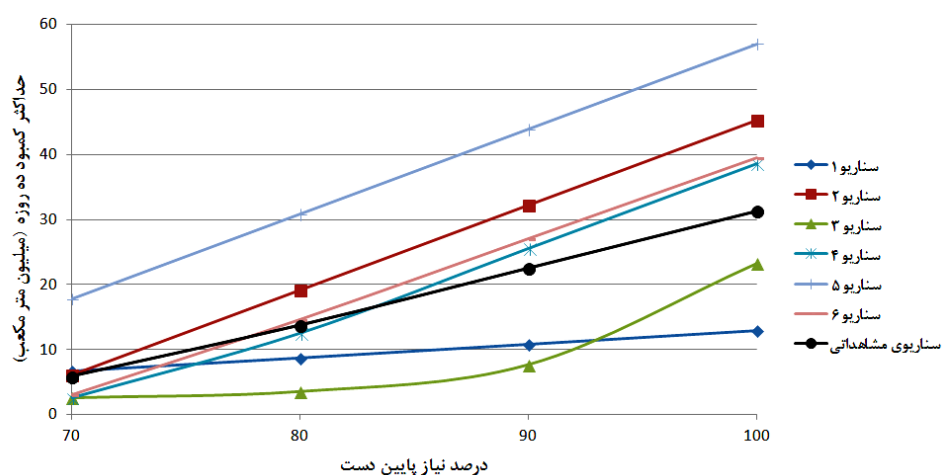
جدول ۲- مقدار رسوب خروجی و تولید انرژی برق‌آبی در طول یک سال دوره بهره‌برداری (۱۳۸۷)

سناریوها	رسوب خروجی (میلیون تن)	تولید انرژی برق‌آبی (میلیون کیلو وات ساعت)	متوسط حجم مخزن در طول سال (میلیون متر مکعب)
سناریوی ۱	۲/۵۵	۱۲۹/۳۷	۲۹۵/۷۶
سناریوی ۲	۸۰/۳۱	۱۲۳/۸۹	۳۴۴/۰۵
سناریوی ۳	۲/۲۸	۱۳۷/۴۱	۳۲۶/۱۴
سناریوی ۴	۴۷/۲۳	۱۳۲/۰۳	۳۳۷/۱۲
سناریوی ۵	۸۹/۳۹	۱۲۰/۲۶	۳۷۲/۲۱
سناریوی ۶	۰/۴۹	۱۴۷/۲۳	۳۷۷/۳۵
سناریوی مشاهداتی	۰/۱۵	۱۲۸/۱۶	۲۸۷/۹۹





شکل ۶- کمبود سالانه نیاز پایین دست با توجه به تأمین درصدهای مختلف نیاز پایین دست



شکل ۷- حداکثر کمبود ده روزه با توجه به تأمین درصدهای مختلف نیاز پایین دست

مشاهداتی دارای وضعیت بهتری می باشد. حداکثر کمبود ده روزه در سناریوی ۱ و ۳ به ترتیب تقریباً برابر با ۱۲ و ۲۳ میلیون متر مکعب می باشند در حالی که این کمبود در سناریوی مشاهداتی بیش از ۳۰ میلیون متر مکعب می باشد و مقدار قابل توجهی برای یک بازه ده روزه است. با در نظر گرفتن درصدهای کمتری از نیاز پایین دست مقدار حداکثر کمبود ده روزه در سناریوی ۳ به شدت کاهش یافته به طوری که حتی با در نظر گرفتن ۹۰ درصد از نیاز پایین دست رفتاری بهتر از سناریوی ۱ از خود نشان داده است. با کمتر شدن درصد نیاز پایین دست هر اندازه مقادیر نمودارهای کمبود سالانه و حداکثر کمبود ده روزه با شیب بیشتری کاهش یابند و مقادیر کمتری داشته باشند نشان دهنده رفتار مناسب تر آن سناریو در بازه های شکست خورده است. به عبارت دیگر در چنین سناریوهایی در بازه هایی که صد درصد نیاز پایین دست توسط سناریو تأمین نشده است می توان انتظار

همان طور که شکل (۶) نشان می دهد در صورتی که تأمین ۱۰۰ درصد نیاز پایین دست مورد نظر باشد، سناریوی ۱ دارای بهترین شرایط می باشد. سناریوی مشاهداتی و سناریوی ۳ نیز دارای کمبود تقریباً یکسانی می باشند. اما با در نظر گرفتن درصدهای کمتری از نیاز پایین دست مشخص می شود که سناریوی مشاهداتی دارای رفتار مناسبی نمی باشد؛ به طوری که حتی با در نظر گرفتن هفتاد درصد از نیاز پایین دست کمبود سالانه آن بیش از پنجاه میلیون متر مکعب است. این در حالی است که کمبود سالانه سناریوی ۳، با کاهش درصد نیاز پایین دست با شیب بسیار بیشتری کاهش می یابد به طوری که در ۹۰ درصد رفتاری مشابه با سناریوی ۱ و در ۸۰ و ۷۰ درصد رفتاری بهتر از سناریوی ۱ دارد. در شکل (۷) نیز چنین رفتاری قابل استنباط است. در حداکثر کمبود ده روزه سناریوی ۱ دارای وضعیت بهتری می باشد. سناریوی ۲ نیز نسبت به سناریوی

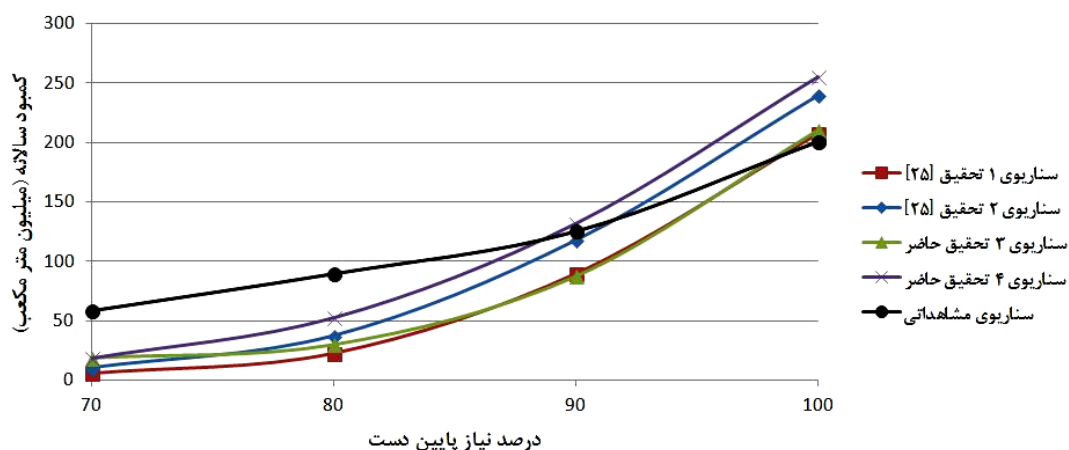
به سناریوی ۱ تحقیق [۲۵] بهبود یافته است؛ به طوری که میزان تولید انرژی برق آبی از ۱۲۹ میلیون کیلووات ساعت به بیش از ۱۳۷ میلیون کیلووات ساعت افزایش داده شده است. مقایسه سناریوی ۲ تحقیق [۲۵] و سناریوی ۴ تحقیق حاضر نیز نشان می‌دهد هرچند سناریوی ۲ تحقیق [۲۵] اندکی در تأمین نیاز پایین دست دارای شرایط بهتری می‌باشد، اما در سناریوی ۴ تحقیق حاضر مقدار رسوب خروجی بیش از ۲۵ درصد و مقدار تولید انرژی برق آبی حدود ۳ درصد نسبت به سناریوی ۲ تحقیق [۲۵] افزایش یافته است. به طوری که مقادیر رسوب خروجی و انرژی برق آبی به ترتیب از حدود ۳۷ میلیون تن و ۱۲۸ میلیون کیلووات ساعت به بیش از ۴۷ میلیون تن و ۱۳۲ میلیون کیلووات ساعت افزایش یافته است.

داشت که حداقل درصد بالایی از نیاز آن دوره تأمین گردیده است. بهره‌برداری چند هدفه مخزن سفیدرود در مطالعه دیگری توسط Hajjiabadi و Zarghami [۲۵] انجام شده است. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مطالعه Hajjiabadi و Zarghami حاکی از برتری نسبی نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. نتایج ارائه شده در جدول (۳) و شکل (۸) به خوبی برتری مدل تحقیق حاضر را نشان می‌دهند. شکل (۸) مقادیر کمبود نیاز سالانه سناریوهای مورد مقایسه را نسبت به سناریوی مشاهداتی نشان می‌دهد.

همان‌طور که جدول (۳) و شکل (۸) نشان می‌دهند سناریوی ۱ تحقیق [۲۵] و سناریوی ۳ تحقیق حاضر در تأمین نیاز پایین دست و خروج رسوبات رفتار مشابهی دارند، اما تولید انرژی برق آبی در سناریوی ۳ تحقیق حاضر حدود ۶ درصد نسبت

جدول ۳- مقایسه مقدار رسوب خروجی و تولید انرژی برق آبی تحقیق حاضر و تحقیق [۲۵]

سناریوها	رسوب زدایی (میلیون تن)	تولید انرژی برق آبی (میلیون کیلووات ساعت)
سناریوی ۱ تحقیق [۲۵]	۳/۸۹	۱۲۹/۰۱
سناریوی ۲ تحقیق [۲۵]	۳۷/۶۴	۱۲۸/۳
سناریوی ۳ تحقیق حاضر	۲/۲۸	۱۳۷/۴۱
سناریوی ۴ تحقیق حاضر	۴۷/۲۳	۱۳۲/۰۳
سناریوی مشاهداتی	۰/۱۵	۱۲۸/۱۶



شکل ۸- مقایسه کمبود سالانه نیاز پایین دست تحقیق حاضر و تحقیق [۲۵]

مخزن سد سفیدرود در سال ۱۳۸۷ و در مقیاس ده روزه مورد مطالعه قرار گرفت و تأمین نیاز پایین دست، تولید برق آبی و خروج رسوبات به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شدند. نتایج به دست آمده از سناریوهای تعریف شده حاکی از آن هستند که با توجه به قیدهای فیزیکی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شده

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با به کارگیری روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبه‌بندی نامغلوب بهره‌برداری چند هدفه مخزن سد سفیدرود با توجه به مدیریت رسوب، تولید برق آبی و همچنین مسائل زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور

- with Self-Adaptive Parameters for Computing the Optimal Design of Water Supply Systems", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23 (5), 727-735.
- [5] Wu, W., Holger, R. M., Angus, R. S., "Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Economic Cost, Hydraulic Reliability and Greenhouse Gas Emissions", *Water Resources Research*, 2013, 49 (3), 1211-1225.
- [6] Liu, Y., "Automatic Calibration of a Rainfall-Runoff Model Using a Fast and Elitist Multi-Objective Particle Swarm Algorithm", *Expert Systems with Applications*, 2009, 36 (5), 9533-9538.
- [7] Zarghami, M., Hajykazemian, H., "Urban Water Resources Planning by Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm" *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 70, 1-8.
- [8] Afshar, M. H., Rajabpour, R., "Application of Local and Global Particle Swarm Optimization Algorithm to Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Systems", *Irrigation and Drainage*, 2009, 58 (3), 321-331.
- [۹] نورانی، و.، کی‌نژاد، م.ع.، کاردان، ن.، "استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پنستاک سدهای بتنی"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، ۱۳۹۰، ۴۰ (۳)، ۸۵-۹۵.
- [10] Chen, L., "Real-coded Genetic Algorithm Optimization of Long-Term Reservoir Operation", *Journal of American Water Resources Association*, 2003, 39 (5), 1157-1165.
- [11] Chang, F., Chen, L., Chang, L., "Optimizing the Reservoir Operating Rule Curves by Genetic Algorithms", *Hydrological Processes*, 2005, 19 (11), 2277-2289.
- [۱۲] سلطانی، ف.، کراچیان، ر.، کارآموز، م.، "بهره‌برداری بهینه کمی-کیفی از مخازن سدها با کاربرد مدل‌های استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک"، *مجله علمی و پژوهشی شریف*، ۱۳۸۸، ۵۱ (۱)، ۳-۱۰.
- [13] Chen, L., Mcphee, J., William, W., Yeh, G., "A Diversified Multiobjective GA for Optimizing Reservoir Rule Curves", *Advances in Water Resources*, 2007, 30 (5), 1082-1093.
- [14] Wan, X. Y., Wang, G. Q., Yi, P., Bao, W. M., برای سد سفیدرود در یک سال خشک (۱۳۸۷) حداکثر مقدار رسوب خروجی و انرژی برق‌آبی ممکن به ترتیب حدود ۸۹ میلیون تن (سناریوی ۵) و ۱۴۷ میلیون کیلووات ساعت (سناریوی ۶) می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن درصدهای مختلفی از نیاز پایین‌دست نشان داد که سناریوهای ۱ و ۳ رفتار بسیار بهتری نسبت به سناریوی مشاهداتی دارند. تجزیه و تحلیل سناریوها در تأمین درصدهای مختلفی از نیاز پایین‌دست نشان داد که سناریوی ۳ در درصدهای پایین‌تر وضعیت مناسب‌تری در تأمین نیاز پایین‌دست نسبت به سناریوی ۱ دارد. در حالی که سناریوی ۱ تنها برای تأمین نیاز پایین‌دست تعریف شده بود. علاوه بر این مقدار تولید انرژی برق‌آبی در سناریوی ۳ نسبت به سناریوی ۱ و مشاهداتی به ترتیب حدود ۶ و ۷ درصد افزایش داشته است. نتایج سناریوی ۴ نیز که در آن اهداف با وزن برابر تعریف گردیدند حاکی از آن است که در صورتی که تأمین هشتاد درصد نیاز پایین‌دست مورد نظر باشد، نه تنها می‌توان علاوه بر تأمین مناسب نیاز پایین‌دست مقدار تولید انرژی برق‌آبی را حدود ۳ درصد نسبت به مقدار مشاهداتی افزایش داد، بلکه مقدار رسوب خروجی نیز می‌تواند بیش از ۴۷ میلیون تن افزایش یابد که با توجه به وضعیت رسوب‌گذاری سد سفیدرود می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. همچنین مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیق مشابه [۲۵] حاکی از برتری نتایج این تحقیق داشت؛ به طوری که در این تحقیق نشان داده شد که با تأمین نیاز آبی پایین‌دست مشابه با تحقیق قبلی، می‌توان مقادیر رسوب خروجی و تولید انرژی برق‌آبی را با در نظر گرفتن سناریوهای گوناگون به ترتیب به میزان ۲۵ درصد و ۶ درصد افزایش داد.
- ### ۵- مراجع
- [۱] آزادنی، ا.، "کاربرد الگوریتم PSO در حل مسائل چند هدفه منابع آب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۸۸.
- [۲] وزارت نیرو، "گزارش عملیات رسوب‌زدایی سد سفیدرود"، شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، امور سدها، پاییز ۱۳۸۵.
- [۳] اینانلو، ب.، "ترکیب روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS و الگوریتم بهینه‌سازی PSO در حل مسائل چند هدفه مدیریت منابع آب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۹۰.
- [4] Montalvo, I., Izquierdo, J., Garcia, R. P., Herrera, M., "Improved Performance of PSO

- [20] Toulouie, E., West., J. R., Billam., J., "Sedimentation and Desiltation in The Sefid-Rud Reservoir, Iran", *Geomorphology and Sedimentology of Lake and Reservoirs*, Edited by J. McManus and R. W. Duck, New York, 1993, pp 125-138.
- [21] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (2), 182-197.
- [22] Atkinson, E., "The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoir", Report OD 137, UK TDR Project R5839, HR Wallingford Ltd, United Kingdom, November, 1996.
- [23] Revelle, C., "Optimizing Reservoir Resources Including a New Model for Reservoir Reliability", John Wiley & Sons, New York, 1999, pp 45-65.
- [24] Harsanyi, J. C., Selten, R., "A Generalized Nash Solution for Two Person Bargaining Games with Incomplete Information", *Management Science*, 1972, 18 (2), 80-106.
- [25] Hajiabadi, R., Zarghami, M., "Multi-Objective Reservoir Operation with Sediment Flushing; Case Study of Sefidrud Reservoir", *Water Resources Management*, 2014, 28 (15) 5357-5376.
- "Similarity-Based Operation of Water and Sediment in a Sediment-Laden Reservoir", *Water Resources Management*, 2010, 24 (15), 4381-4402.
- [15] Khan, N. M., Babel, M. S., Tingsanchali, T., Clemente, R. S., Luong, H. T., "Reservoir Optimization-Simulation with a Sediment Evacuation Model to Minimize Irrigation Deficits", *Water Resources Management*, 2012, 26 (11), 3173-3193.
- [16] Shokri, A., Bozorg Hadad, O., Miguel, A., "Reservoir Operation for Simultaneously Meeting Water Demand and Sediment Flushing: Stochastic Dynamic Programming Approach with Two Uncertainties", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, 139 (3), 277-289.
- [17] Bai, T., Wu, L., Chang, J. X., Huang, Q., "Multi-Objective Optimal Operation Model of Cascade Reservoirs and its Application on Water and Sediment Regulation", *Water Resources Management*, 2015, 29 (8), 2751-2770.
- [۱۸] پایمزد، ش.، "تخصیص آب بین استانی در حوضه‌های مشترک با رویکرد دینامیک، مطالعه موردی: حوضه قزل اوزن"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، ۱۳۸۸.
- [۱۹] جدیری، ل.، "مدل‌سازی تغییر اقلیم و اثر آن بر تولید برق آبی سدها؛ مطالعه موردی سد سفیدرود"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ایران، ۱۳۹۱.