

# بهره برداری بهینه از مخزن سد با استفاده از روش جستجوی ممنوعه‌ی احتمالاتی رتبه-معیار و برانزنگی-معیار

سیدحسین حسینی نوزاد (کارشناس ارشد)

محمدهادی افشار (دانشیار)

دانشکده‌ی هندیسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

امروزه روش‌های فراکاوشی در حل مسئله‌ی بهره‌برداری از مخزن سد، که یکی از مسائل مورد علاقه‌ی محققان در حوزه‌ی مدیریت منابع آب در سراسر دنیا است، سهم مهمی را به خود اختصاص داده‌اند. در این عرصه به روش جستجوی ممنوعه کمتر از سایر روش‌ها توجه شده است. در این نوشتار، ابتدا در مرحله‌ی انتخاب روش جستجوی ممنوعه‌ی استاندارد، یک مکانیزم احتمالاتی با دو معیار رتبه‌ی پاسخ در همسایگی و مقدار تابع هدف پاسخ، با روش چرخ‌گردان اعمال شد و سپس دو مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برق‌آبی مخزن سد در این روش‌ها حل شد. با توجه به نتایج، روش رتبه-معیار موفق‌تر از روش مقدار-معیار بوده است و این روش موفق‌تر از روش استاندارد ارزیابی می‌شود. همچنین در مقایسه با نتایج سایر محققان، با وجود اینکه بهترین پاسخ در این روش‌ها به پاسخ مبنا نزدیک‌تر است (حل با LINGO)، محدوده و به عبارتی انحراف از معیار پاسخ‌ها در مقایسه با پاسخ‌های بعضی محققان بزرگ‌تر است. به منزله‌ی پیشنهادی برای اصلاح این مورد در آینده، می‌توان این روش‌ها را با مفاهیم تشدد و تشط بهبود بخشید.

واژگان کلیدی: بهره‌برداری بهینه از مخزن سد، جستجوی ممنوعه، توسعه‌ی احتمالاتی.

shhn80@gmail.com  
mhafshar@iust.ac.ir

## ۱. مقدمه

بشر از دیرباز برای تأمین منابع آب، کنترل سیلاب‌های رودخانه‌ها و تأمین انرژی مورد نیاز خود سازه‌هایی را روی رودها بنا کرده است که از این میان سدها نقش مهمی داشته‌اند. دانشمندان روش‌های فراوانی را برای انتخاب بهینه‌ترین سیاست بهره‌برداری از این سازه‌ها ارائه کرده‌اند که می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup>، برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۲</sup>، برنامه‌ریزی پویا<sup>۳</sup> و روش‌های فراکاوشی<sup>۴</sup> اشاره کرد. در این میان روش‌های فراکاوشی، سهم شایان توجهی را به خود اختصاص داده‌اند و تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است.<sup>[۱]</sup>

به عبارت دیگر، حل مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی در دنیای واقعی، محققان را با چالش‌های فراوانی روبرو کرده است. یکی از راه‌های غلبه بر این پیچیدگی‌ها به‌کار بستن روش‌های فراکاوشی بر مبنای طبیعت یا هوش بشری است. با استفاده از این روش‌ها پاسخ‌هایی نزدیک به پاسخ بهینه و در زمان محاسباتی معقولی به دست می‌آید؛ که هیچ‌کدام تضمینی برای یافتن پاسخ بهینه مسئله نیست؛ و نسبت به روش‌های ریاضی، سرعت بالاتری در حل مسائل خصوصاً از نوع بزرگ مقیاس<sup>۵</sup> دارند.<sup>[۱]</sup> در این نوشتار یکی از روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی<sup>۶</sup> به نام جستجوی

## ۲. روش جستجوی ممنوعه‌ی استاندارد

روش جستجوی محلی نزولی<sup>۸</sup> منشأ ابتدایی روش جستجوی ممنوعه است. این روش از یک پاسخ اولیه‌ی تصادفی شروع و با اندکی تغییر در پاسخ، تعدادی پاسخ در همسایگی نقطه‌ی جاری تولید می‌کند و به سمت پاسخی که مقدار تابع هدف را بهبود بخشد حرکت می‌کند. این حرکت تا زمانی ادامه می‌یابد که دیگر بهبودی در

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۹/۱۲، دوری ۱۳۸۷/۶/۱۰، پذیرش ۱۳۸۸/۶/۴.

تابع هدف مشاهده نشود.

روش جستجوی ممنوعه، بر کاوش در همسایگی -لیکن با پرهیز از گرفتار شدن در بهینه‌های موضعی -استوار است. ایده‌ی کلی این روش در مراجعه به ناحیه‌هایی است که به تازگی کاوش شده‌اند؛ بنابراین، جستجو از یک پاسخ اولیه‌ی تولیدشده‌ی تصادفی شروع می‌شود و در همسایگی نقطه‌ی جاری، نقطه‌ی را که از سایر نقاط همسایگی بهتر است و مراجعه به آن ممنوع نیست می‌یابد و به سمت آن حرکت می‌کند؛ این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که معیار توقف ارضاء شود و هر بار پاسخ یافته شده‌ی اخیر با بهترین پاسخ یافته شده تا این مرحله مقایسه و در صورت بهبود، جایگزین آن می‌شود.<sup>[۶-۱۱]</sup> با توجه به توضیحات فوق اجزاء و مفاهیم اساسی این روش در ذیل آمده است.

### ۱.۲. پاسخ اولیه<sup>۹</sup>

در اغلب روش‌های کاوشی در هنگام شروع حل، یک (یا یک دسته) پاسخ به صورت تصادفی تولید می‌شود تا کاوش از آن نقطه (یا نقاط) آغاز شود. در روش جستجوی ممنوعه نیز در اولین گام، یک پاسخ اولیه با کمک فرآیندی تصادفی تولید می‌شود.

### ۲.۲. حرکت در همسایگی

دومین مفهوم اساسی این روش، مفهوم حرکت است. حرکت، انتقال از پاسخ جاری به بهترین پاسخ موجود در یک همسایگی است که ممنوعیتی برای مراجعه ندارد. برای تعیین نحوه‌ی حرکت، الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد که ساده‌ترین آن‌ها تولید پاسخ جدید با ایجاد یک آشفتنگی<sup>۱۰</sup> در یکی از متغیرهای تصمیم پاسخ است، برای مثال با تعریف یک گام حرکت ثابت (یا متغیر)، در واقع، هر حرکت تغییر در مقدار یکی از متغیرهای تصمیم به اندازه یک گام است. با انجام تمامی حرکات ممکن روی پاسخ جاری، همسایگی مورد نظر تولید می‌شود. در نهایت حرکت به سوی بهترین پاسخ‌های همسایگی که در لیست ممنوعه وجود ندارند، انجام می‌شود.

### ۳.۲. لیست ممنوعه<sup>۱۱</sup>

همواره بهترین پاسخ‌های اخیر در لیست ممنوعه ذخیره می‌شود. سیاست کلی، اعمال محدودیت برای عدم بازگشت به نواحی کاوش شده‌ی اخیر و پرهیز از دور شدن و گرفتاری در بهینه‌های موضعی است. طول این لیست نباید آن‌قدر کوتاه باشد که منجر به گرفتار شدن در بهینه‌های موضعی شود و نه آن‌قدر بلند باشد که کارایی روش در انتخاب مسیری به سمت پاسخ بهینه از دست برود. به عبارت دیگر هر قدر لیست کوچک‌تر باشد این امکان فراهم می‌آید که یک ناحیه دقیقاً کاوش شود (تشدد<sup>۱۲</sup>) و هر قدر بزرگ‌تر باشد فرصت جستجو در نواحی گسترده‌تری را پدید می‌آورد (تشست<sup>۱۳</sup>)؛ لذا باید بین این دو مهم به تعادل رسید.

برای ذخیره‌ی پاسخ در لیست ممنوعه دو امکان وجود دارد: ذخیره‌ی تمامی متغیرهای تصمیم یا ذخیره‌ی یک یا چند متغیر. انتخاب روش اول نیازمند فضا و زمان زیادی برای ذخیره‌سازی خصوصاً در مسائل با ابعاد بزرگ است. برای حل این مشکل، یک یا چند ویژگی از پاسخ ذخیره می‌شود. علی‌رغم اینکه با این کار حجم و زمان مورد نیاز برای ذخیره‌سازی کاهش می‌یابد، حرکت به سمت پاسخ‌های دیگری که در یک یا چند ویژگی با پاسخ‌های موجود در لیست ممنوعه مشترک هستند، نیز ممنوع می‌شود.

### ۴.۲. معیار رد ممنوعیت<sup>۱۴</sup>

برای پرهیز از مشکل فوق از معیار رد ممنوعیت استفاده می‌شود. براساس این معیار گاهی در صورتی که پاسخ بهینه‌ی در همسایگی آن، حتی در لیست ممنوعه، موجود باشد؛ ممنوعیت حرکت به سمت آن نادیده گرفته می‌شود.

### ۵.۲. معیار توقف<sup>۱۵</sup>

برای پایان دادن به کار جستجو، معیارهای مختلفی را می‌توان به کار بست که از آن جمله می‌توان به محدودکردن تعداد تکرارهای برنامه به میزان حداکثر یا محدودکردن تعداد تکرار بدون ایجاد بهبودی در پاسخ بهینه اشاره کرد.

## ۳. توسعه‌ی احتمالاتی پیشنهادی

روش جستجوی ممنوعه گاهی حتی مسیرهای سربالایی<sup>۱۶</sup> را به امید فرار از بهینه‌های محلی و دست‌یابی به پاسخ‌های بهتر در تکرارهای بعدی انتخاب می‌کند. در فرآیند انتخاب بهترین پاسخ در همسایگی موجود، این سؤال پیش می‌آید که اگر بهترین پاسخ همسایگی از پاسخ جاری بهتر نباشد به چه علتی روش جستجو آن را به مابقی پاسخ‌ها ترجیح می‌دهد؟ تفاوت آن پاسخ با سایر پاسخ‌های همسایگی چیست؟ لذا صحیح‌تر است که گفته شود به احتمال بیشتر، با این حرکت به پاسخ بهینه می‌رسیم. به عبارتی، احتمال دست‌یابی به پاسخ بهینه با میزان خوبی پاسخی که می‌خواهیم به سمت آن حرکت کنیم رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا با تعریف معیاری برای خوبی پاسخ، به جای انتخاب قطعی بهترین پاسخ موجود، فرآیند انتخاب را به شیوه‌ی احتمالاتی می‌توان طوری تنظیم کرد که احتمال انتخاب هر پاسخ، متناسب با میزان خوبی آن باشد. در این نوشتار دو معیار برای میزان خوبی تعریف می‌شود: یکی رتبه‌ی پاسخ در بین سایر پاسخ‌های همسایگی و دیگری مقدار تابع هدف متناظر با پاسخ.

### ۱.۳. روش جستجوی ممنوعه احتمالاتی رتبه - معیار (RBPTS)<sup>۱۷</sup>

در این حالت احتمال انتخاب هر پاسخ بدین شکل تعریف می‌شود:

$$Pr_i = \frac{\frac{1}{k_i}}{\sum_j \frac{1}{k_j}} \quad (1)$$

که در آن  $k_i$  رتبه پاسخ  $i$ ام در بین پاسخ‌های موجود در همسایگی پاسخ جاری و  $Pr_i$  احتمال پذیرش پاسخ  $i$ ام به‌عنوان پاسخ جاری گام بعد است. براساس رابطه‌ی ۱ پاسخ‌های با رتبه‌ی بهتر، مقدار  $k_i$  کمتر و  $\frac{1}{k_i}$  بیشتر؛ شانس بیشتر برای انتخاب شدن دارند.

### ۲.۳. روش جستجوی ممنوعه احتمالاتی برازندگی -

#### معیار (FBPTS)<sup>۱۸</sup>

در این حالت احتمال انتخاب پاسخ به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Pr_i = \frac{\frac{1}{(Objective)_i}}{\sum_j \frac{1}{(Objective)_j}} \quad (2)$$

**ب) بهره برداری برقی آبی**

در این حالت، برای حل مسئله با هدف بیشینه‌سازی، استفاده از ظرفیت نصب نیروگاه یا به عبارت دیگر کمیته سازی کمبود توان تولیدی از ظرفیت نصب، رابطه‌ی ۴ به‌عنوان تابع هدف لحاظ شده است:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } O.F &= \sum_{t=1}^{NT} \left[ \lambda - \frac{P_t}{P_{pp}} \right] \\ h_t &= \left( \frac{H_t + H_{t+1}}{\gamma} \right) - TWL, \\ P_t &= \min \left[ \left( \frac{g \times \eta \times R_t}{PF} \right) \times \left( \frac{h_t}{1000} \right), P_{pp} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$P_t$  توان تولیدی نیروگاه در دوره‌ی زمانی  $t$ ام (مگاوات)؛  $P_{pp}$  ظرفیت نصب نیروگاه (Power Plant) (مگاوات)؛  $NT$  تعداد کل دوره‌های زمانی؛  $g$  شتاب ثقل ( $m^2/s$ )؛  $\eta$  بازده نیروگاه؛  $PF$  ضریب کارکرد  $^{\circ}$  نیروگاه؛  $R_t$  دبی عبوری از توربین در دوره‌ی زمانی  $t$ ام ( $m^3/s$ )؛  $h_t$  بار آب موثر بر نیروگاه ( $m$ )؛  $H_t$  تراز مخزن از سطح دریا ( $m$ )؛  $TWL$  تراز پایاب نیروگاه از سطح دریا ( $m$ )؛  $h_t$  بار آب موثر بر نیروگاه ( $m$ ).

**۳.۴. قیود**

اساسی‌ترین قید مسئله، معادله‌ی پیوستگی مخزن (رابطه‌ی ۵) است:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - L_t \quad (5)$$

که در آن  $S_t$  حجم مخزن در ابتدای دوره‌ی زمانی  $t$ ؛  $I_t$  آب ورودی به مخزن در دوره‌ی زمانی  $t$ ؛  $R_t$  آب رها شده در دوره‌ی زمانی  $t$ ؛  $L_t$  تلفات در دوره‌ی زمانی  $t$  است. یکی دیگر از قیود، ناشی از محدودیت حجم مخزن (رابطه‌ی ۶) است:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (6)$$

$S_{\min}$ ،  $S_{\max}$  بیشینه و کمینه‌ی حجم مخزن، و قید آخر ناشی از محدودیت آب رها شده از مخزن (رابطه‌ی ۷) است:

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad (7)$$

$R_{\min}$ ،  $R_{\max}$  بیشینه و کمینه‌ی آب رها شده از مخزن است.

برای اعمال قیود فوق در مسئله، روش‌های مختلفی وجود دارد که روش اعمال ضریب پناستی یکی از متداول‌ترین آن‌هاست. در نوشتار حاضر به کمک سعی و خطا-برای هر کدام از دو نوع بهره‌برداری به‌صورت جداگانه-هر بار ضریب پناستی متغیری محاسبه و در مقدار مجموع تخلف از قیود ضرب و به مقدار تابع هدف اضافه می‌شود (رابطه‌ی ۸):

$$F_p = F + \alpha_p \times \sum_{t=1}^{NT} CSV_t \quad (8)$$

که در آن  $F_p$  تابع هدف جریمه‌دار؛  $F$  تابع هدف حقیقی؛  $\alpha_p$  ضریب پناستی؛  $CSV_t$  مجموع مقدار تخلف از قیود در دوره‌ی زمانی  $t$  است.

مقدار ضریب پناستی باید متناسب با مقدار حقیقی تابع هدف باشد. نباید خیلی کوچک باشد زیرا نیازمند محاسبات زیاد برای یافتن پاسخ ممکن و یا انحراف به سمت پاسخ‌های ناممکن می‌شود. همچنین در نظر گرفتن مقادیر خیلی بزرگ در حکم جریمه، سبب محدود شدن فضای جستجوی مسئله و هم‌گرایی به پاسخ‌های بهینه‌ی موضعی می‌شود.

$i$  (Objective) مقدار تابع هدف در نقطه‌ی  $i$  و  $Pr_i$  احتمال انتخاب نقطه‌ی  $i$  به‌عنوان نقطه‌ی جاری گام بعد است.

براساس رابطه‌ی ۲ پاسخ‌هایی که مقدار تابع هدف  $i$  (Objective) در آن‌ها کمتر است، مقدار  $\frac{1}{(Objective)_i}$  آن‌ها بیشتر است، و شانس بیشتری برای انتخاب دارند.

**۳.۳. روش چرخ گردان<sup>۱۹</sup> برای اعمال فرآیند احتمالاتی**

برای انتخاب احتمالاتی در هر دو مکانیزم فوق از چرخ گردان استفاده شده است. این روش، روشی متداول در سایر روش‌ها نظیر الگوریتم ژنتیک است. برای استفاده از این روش در الگوریتم جستجوی ممنوعه، مجموع مقادیر برانزنگی کل اجزاء در همسایگی حساب می‌شود و هر یک از اعضاء با توجه به مقدار برانزنگی‌اش، سهمی را به خود اختصاص می‌دهد. برای انتخاب یک نقطه‌ی بهینه در همسایگی، یک عدد تصادفی بین صفر و مجموع محاسبه‌شده انتخاب می‌شود و این عدد تصادفی با هر قسمت از چرخ رولت که به‌رخورد داشت، جزء متناظر آن قسمت به‌عنوان نقطه‌ی برگزیده انتخاب می‌شود. عیب اعمال این مکانیزم در روش احتمالاتی برانزنگی معیار این است که اگر یک یا چند نقطه در همسایگی دارای برانزنگی بالا باشند، درصد قابل ملاحظه‌ی از سطح چرخ گردان را به خود اختصاص می‌دهند و درصد کمتری از سطح چرخ گردان برای نقاط با برانزنگی متوسط متناسب باقی می‌ماند. در نتیجه، احتمال انتخاب این نقاط به‌عنوان نقاط برگزیده کاهش می‌یابد و در رقابت تقریباً حذف می‌شوند. برای کاستن این ضعف به جای مقدار تابع هدف به منزله‌ی برانزنگی، می‌توان از رتبه‌ی نقطه در همسایگی استفاده کرد. هر دو مکانیزم فوق در این تحقیق بررسی شده‌اند.

**۴. بهره برداری بهینه از مخزن سد**

برای حل این مسئله، دو الگوریتم وجود دارد: یکی الگوریتم بهینه‌ساز که در واقع اصول روش جستجوی ممنوعه را مدل می‌کند و دیگری الگوریتم شبیه‌ساز که رفتار مخزن را در شرایط مختلف شبیه‌سازی می‌کند.

**۱.۴. متغیر تصمیم**

متغیر تصمیم در مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد می‌تواند حجم ذخیره‌ی مخزن در هر دوره‌ی  $S_t$  و یا میزان آب رها شده در هر دوره‌ی زمانی  $R_t$  باشد؛ در این نوشتار میزان آب رها شده به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است.

**۲.۴. تابع هدف****الف) بهره برداری ساده**

در این مسئله رابطه‌ی ۳، با هدف کمیته‌سازی کمبود، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است:

$$\text{Minimize } O.F = \sum_{i=1}^{NT} \left[ \frac{D_i - R_i}{D_{\max}} \right]^2 \quad (3)$$

که در آن  $D_i$  میزان نیاز در هر دوره‌ی زمانی برای متغیر تصمیم  $i$ ام؛  $R_i$  میزان رهاسازی در هر دوره‌ی زمانی برای متغیر تصمیم  $i$ ام؛  $NT$  تعداد دوره‌ها؛  $D_{\max}$  بیشینه‌ی نیاز است.

#### ۴.۴. اطلاعات مسئله‌ی نمونه

مسئله‌ی نمونه در این تحقیق، مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برق‌آبی از مخزن سد دز است. این مسئله برای یک دوره‌ی پنج‌ساله (۶۰ ماهه) حل شده است. همان‌گونه که شرح داده شد متغیر تصمیم آب رها شده از مخزن در ماه‌های مورد مطالعه است؛ لذا این مسئله ۶۰ متغیر تصمیم دارد. اطلاعات موجود در ارتباط با مسئله به شرح زیر است:

$$S_1 = 1430 \text{ mcm}; \quad S_{\min} = 830 \text{ mcm}; \quad S_{\max} = 3340 \text{ mcm};$$

$$R_{\min} = 0 \text{ mcm}; \quad R_{\max} = 1000 \text{ mcm}.$$

نیروگاه سد دز از ۸ واحد ۸۰٫۸ مگا واتی تشکیل شده است که زمان کارکرد آن حدود ۱۰ ساعت در طول روز است. به این ترتیب در مسئله‌ی برق‌آبی مقادیر زیر در محاسبات قرار داده می‌شود:

$$PF = 0.917; \quad P_{pp} = 650 \text{ Mw}; \quad \eta = 90\%;$$

$$TWL = 172 \text{ m}.$$

برای استفاده از مقادیر حجم-ارتفاع مخزن، یک چند جمله‌ی درجه‌ی سه (رابطه ۹) بر مقادیر برازش داده شده است:

$$H_t = a + b.S_t + c.S_t^2 + d.S_t^3$$

$$a = 249.83364; \quad b = 0.0587205; \quad c = -1.37 \times 10^{-5};$$

$$d = 1.526 \times 10^{-9}. \quad (9)$$

#### ۵. نتایج حل مسئله‌ی نمونه

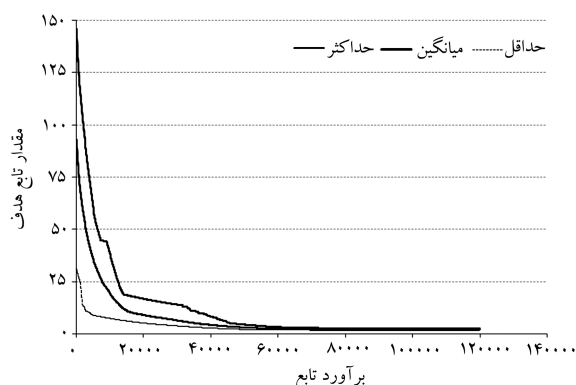
برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد، مسئله به تعداد ۱۰ بار اجرا شد تا علاوه بر یافتن پاسخ بهینه، تأثیر موارد تصادفی (مانند پاسخ اولیه) در کارایی آن نیز بررسی شود. هم‌چنین پارامترهای روش بهینه‌ساز به صورت سعی و خطا برای هر دو مسئله زیر محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است. (جدول ۱)

#### الف) بهره‌برداری ساده

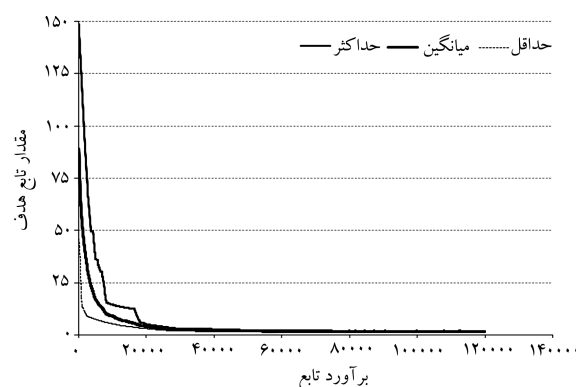
مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی سد دز با هر سه مکانیزم روش جستجوی ممنوعه‌ی: استاندارد (شکل ۱)، احتمالاتی رتبه-معیار (شکل ۲) و احتمالاتی برازندگی-معیار (شکل ۳) با ۱۰ بار تکرار حل شده است و بهترین، بدترین و متوسط پاسخ‌ها و انحراف از معیار تابع هدف برای هر روش محاسبه شده است. هزینه‌ی محاسباتی (مدت زمان انجام محاسبات) با رایانه‌ی بی با مشخصات ( $IntelCore2DuoCPU@GHz$ ,  $RAM 2GHz$ ) برای ده بار اجرای برنامه، ۳۲ ثانیه بوده است. نتایج سایر محققان و پاسخ مینا (نتیجه‌ی حل با نرم افزار Lingo ۹) نیز ارائه شده است (جدول ۲). توضیحات مربوط به اشکال و جداول در بخش تفسیر نتایج ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای روش بهینه‌ساز.

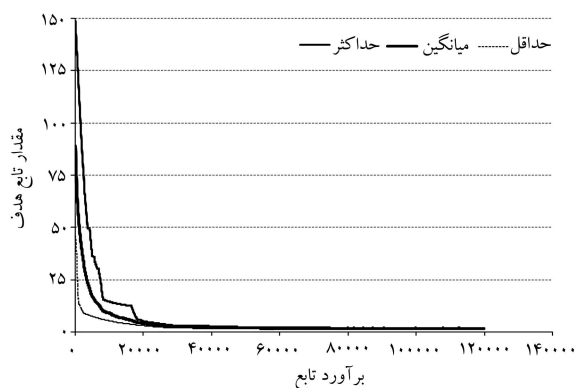
نسبت گام حرکت	تعداد تکرار	طول لیست ممنوعه
۰٫۰۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰



شکل ۱. نتایج حل مسئله‌ی بهره‌برداری ساده به روش جستجوی ممنوعه‌ی استاندارد.



شکل ۲. نتایج حل مسئله‌ی بهره‌برداری ساده به روش جستجوی ممنوعه‌ی احتمالاتی رتبه معیار.



شکل ۳. نتایج حل مسئله‌ی بهره‌برداری ساده به روش جستجوی ممنوعه‌ی احتمالاتی برازندگی معیار.

#### ب) بهره‌برداری برق آبی

در گام بعد، مسئله‌ی بهره‌برداری برق‌آبی سد دز، با هر سه مکانیزم روش جستجوی ممنوعه‌ی استاندارد (شکل ۴)، روش جستجوی ممنوعه‌ی احتمالاتی رتبه-معیار (شکل ۵) و روش جستجوی ممنوعه‌ی احتمالاتی برازندگی-معیار (شکل ۶) با ۱۰ بار تکرار حل و بهترین پاسخ، بدترین پاسخ و متوسط مقدار تابع هدف برای هر روش محاسبه شده است. در این حالت هزینه‌ی محاسباتی (مدت زمان انجام محاسبات) با

جدول ۲. نتایج حاصل از ۱۰ بار حل مسئلهی بهره برداری ساده از مخزن سد دز به روش های مختلف.

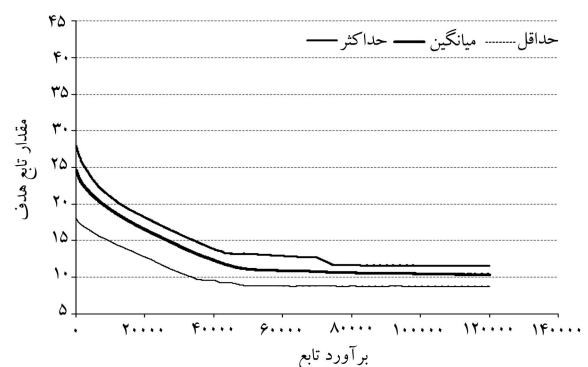
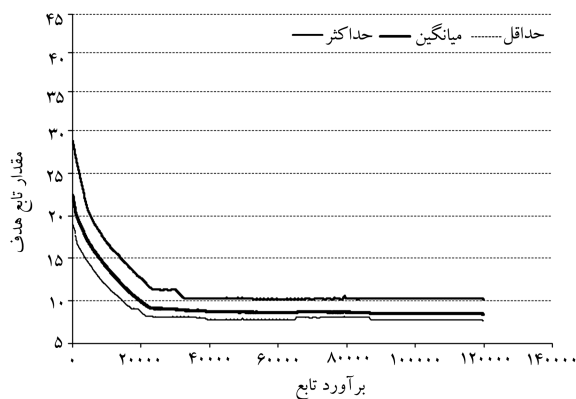
ردیف	روش	بهترین پاسخ	متوسط پاسخها	بدترین پاسخ	انحراف از معیار
۱	استاندارد	۱,۴۹۶۷	۲,۵۹۱۹	۳,۷۰۱۰	۰,۸۰۹۳
۲	رتبه معیار	۱,۰۸۷۹	۱,۸۸۳۹	۱,۸۸۵۱	۰,۴۱۲۲
۳	برازندگی معیار				
۴	پاسخ مینا (حل با نرم افزار LINGO ۹), [۱]	۰,۷۳۱۰۰	-	-	-
۵	روش MMAS با ۲۰۰ مورچه, [۱]	۰,۸۰۰۸۲	۰,۸۳۲۴۰	۰,۸۵۱۱۶	-
۶	روش ACS با ۱۵۰ مورچه, (جلالی)*, [۱]	۰,۹۴۹۰۰	-	-	-

\*این نتایج مربوط به مراحل اولیه تحقیقات وی بوده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از ۱۰ بار حل مسئلهی بهره برداری برق آبی از مخزن سد دز به روش های مختلف.

ردیف	روش	بهترین پاسخ	متوسط پاسخها	بدترین پاسخ	انحراف از معیار
۱	استاندارد	۸,۷۵۳۳	۱۰,۳۵۷۷	۱۱,۵۶۶۴	۰,۹۵۷۴
۲	رتبه معیار	۷,۶۰۱۷	۸,۷۱۱۴	۹,۹۸۰۰	۰,۷۰۲۳
۳	برازندگی معیار				
۴	پاسخ مینا (حل با نرم افزار LINGO ۹), [۱]	۷,۳۷۲	-	-	-
۵	روش MMAS با ۲۰۰ مورچه, [۱]	۸,۲۲۸۹	۸,۸۳۳۷۰	۸,۶۹۹۶۹	-
۶	روش ACS با ۱۵۰ مورچه, (جلالی)*, [۱]	غیر موجه (Unfeasible)			

\*این نتایج مربوط به مراحل اولیه تحقیقات وی بوده است.



شکل ۴. نتایج حل مسئلهی بهره برداری برق آبی به روش جستجوی ممنوعهی استاندارد.

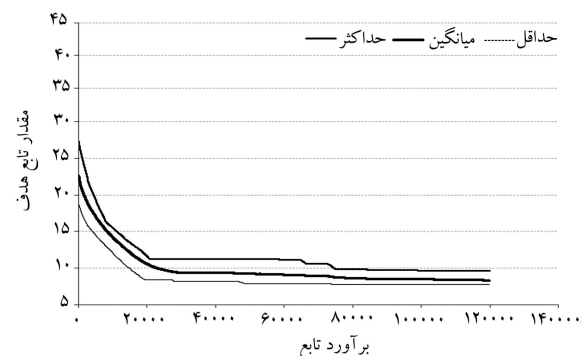
شکل ۶. نتایج حل مسئلهی بهره برداری برق آبی به روش جستجوی ممنوعهی احتمالاتی برازندگی معیار.

رایانه‌یی با مشخصات (IntelCore۲DuoCPU@GHz, RAM ۲GHz) برای ده بار اجرای برنامه، ۴۴ ثانیه بوده است. نتایج سایر محققان و پاسخ مینا (نتیجه حل با نرم افزار Lingo ۹) نیز ارائه شده است (جدول ۳). توضیحات مربوط به اشکال و جداول در بخش تفسیر نتایج ارائه شده است.

### ج) تفسیر نتایج

با توجه به اجرای مدل در شرایط مختلف (اشکال ۱ الی ۶) و (جداول ۱ الی ۳) نتایج زیر حاصل شده است.

۱. روش جستجو در حالت بهره برداری ساده پس از حدود ۱۵۰ تکرار (معادل



شکل ۵. نتایج حل مسئلهی بهره برداری برق آبی به روش جستجوی ممنوعهی احتمالاتی رتبه معیار.

## ۶. نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا روش جستجوی ممنوعه‌ی استاندارد با اعمال یک مکانیزم احتمالاتی با روش چرخ‌گردان اجرا شد و سپس برای بهره‌برداری بهینه‌ی ساده و برق‌آبی مخزن سد دز به‌کار گرفته شده‌است؛ این مکانیزم احتمالاتی در مرحله‌ی انتخاب نقطه‌ی بعدی حرکت، با دو معیار رتبه‌ی پاسخ در همسایگی و مقدار تابع هدف اعمال شده‌است. همچنین متغیر تصمیم، میزان آب رها شده از مخزن در هر دوره لحاظ و مسئله با هر کدام از روش‌ها به تعداد ۱۰ بار حل شده‌است تا تأثیر فرآیندهای تصادفی بررسی شود. نتایج حاکی از موفقیت توسعه‌ها در مقایسه با روش استاندارد است؛ همچنین روش رتبه-معیار موفق‌تر از روش برانزنگی-معیار عمل کرده‌است، که می‌توان علت را رفع نقص روش چرخ‌گردان در این حالت دانست. از مقایسه‌ی پاسخ‌ها با پاسخ مینا و پاسخ‌های سایر محققان مشاهده می‌شود که علی‌رغم اینکه بهترین پاسخ یافته شده در ده تکرار در این تحقیق از پاسخ‌های سایر محققان به پاسخ مینا نزدیک‌تر بوده‌است، با وجود این محدوده و به عبارتی انحراف از معیار پاسخ‌ها بیش از نتایج آنان بوده‌است؛ این موضوع بیانگر آنست که توسعه‌های ارائه شده نیاز به اصلاح بیشتری دارد؛ برای نمونه می‌توان فرآیندهای تشدد و تشتط را در روش جستجو اعمال کرد تا انحراف از معیار پاسخ در تکرارها را کاهش و اطمینان‌پذیری استفاده از روش انتخابی را افزایش دهد.

۲۰۰۰۰ بار برآورد تابع) و در حالت بهره‌برداری برق‌آبی پس از ۲۵۰ تکرار (معادل ۳۰۰۰۰ بار برآورد تابع) به پاسخ نهایی نزدیک شده است.

۲. دامنه‌ی تغییرات نتایج در ۱۰ بار تکرار در بهره‌برداری ساده بسیار کمتر از بهره‌برداری برق‌آبی است. این موضوع نشان‌گر پیچیدگی بیشتر مسئله‌ی برق‌آبی و در نتیجه حساسیت بالا به پاسخ اولیه‌ی انتخابی است.

۳. انتخاب اندازه‌ی گام حرکت تأثیر قابل توجهی در زمان محاسبات و پاسخ نهایی دارد. در این تحقیق اندازه‌ی گام حرکت در طول اجرا ثابت (معادل ۰٫۲ طول بازه‌ی متغیر تصمیم) انتخاب شد و نتایج ارائه شده بیانگر مطلوبیت این انتخاب است.

۴. بهترین پاسخ روش‌های پیشنهادی در مقایسه با نتایج سایر محققان (در ۱۰ بار تکرار) مطلوب‌تر است، لیکن متوسط پاسخ‌ها و بدترین پاسخ یافته شده (در مقایسه با نتایج دیگران و پاسخ مینا) مطلوب نیست و توسعه از نوع اعمال تشدد و تشتط را می‌طلبید.

۵. با مقایسه‌ی انحراف از معیارها، مکانیزم‌های احتمالاتی نسبت به حالت استاندارد پاسخ‌ها را بهبود بخشیده‌اند و همچنین مکانیزم احتمالاتی رتبه-معیار موفق‌تر از مکانیزم احتمالاتی برانزنگی-معیار عمل کرده‌است؛ علت را می‌توان این گونه ارزیابی کرد که مکانیزم دوم موجب رفع نقص روش چرخ‌گردان می‌شود.

## پانوشت

1. linear programming (LP)
2. non-linear programming (NLP)
3. dynamic programming (DP)
4. meta-heuristic
5. large scale problem
6. combinatorial optimization
7. tabu search
8. descend local search
9. initial solution
10. perturbation
11. tabu list
12. intensification
13. diversification
14. aspiration criteria
15. termination criteria
16. uphill climbing
17. ranking-based-probabilistic tabu search (RBPTS)
18. fitness-based-probabilistic tabu search (FBPTS)
19. roulette wheel selection method
20. plant factor

## منابع

1. Moieni, R., "Fully and partially constrained ant algorithm for the optimization of sequential problem: Application to optimal operation of reservoir", *Master of Science Thesis*, IUST, Iran (2007).
2. Misevicius, A.; Blazauskas, T.; Blonskis, J., and Smolinskas, J., "An overview of some heuristic algorithms for

combinatorial optimization problems", *ISSN 1392-124X Information technologijos ir valdymas*, **1**(30), (2004).

3. Hansen, P., and Jaumard, B., "Algorithms for the maximum satisfiability problem" In: *Rutcor Research Report*, Rutgers university, USA, pp. 43-87 (1987).
4. Glover, F., "Tabu search: Part I", In: *ORSA Journal on Computing*, **1**, (3), pp. 190-206 (Summer 1989).
5. Glover, F., "Tabu search: Part II", In: *ORSA Journal on Computing*, **2**, (1), pp.4-32 (Winter 1990).
6. Misevicius, A.; Lenkevicius, A.I., and Rubliauskas, D.; "Iterated tabu search: An improvement to standard tabu search", *ISSN 1392-124X Information technology and Control*, **35**,(3) (2006).
7. Blum, C., and Roli, A.; "Meta-heuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, **35**,(3), (Sep. 2003).
8. Cunha, M., and Ribeiro, L., "Tabu search algorithms for water network optimization", *European Journal of Operational Research*, **157**, pp. 746-758 (2006).
9. Glover, F., "Tabu search- wellsprings and challenges", *European Journal of Operations Research*, **106**, pp. 221-225 (1998).
10. Ming-Hsu, L.; Ching-Pin, T.; Chung-Hsiung, S., and Fu-Hsiung, Y., "Estimating seasonal basin rainfall using tabu search", *TAO*, **17**,(1), pp. 295-316 (March 2006).
11. Battiti, R., and Tecchiolli, G., "The reactive tabu search", *ORSA Journal on Computing*, **6**,(2), pp. 126-140 (1994).