

## مقایسه سیاست جیره‌بندی توسط الگوریتم‌های فراکاوشی با سیاست بهره‌برداری استاندارد در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد وشمگیر در شرایط خشکسالی

زهرة سادات موسوی‌رستگار<sup>۱</sup>، ام‌البنی محمدرضا پور<sup>۲\*</sup>، امید بزرگ حداد<sup>۳</sup>، محبوبه ابراهیمی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب، دانشگاه زابل، زابل

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۴. استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۵/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۶/۳)

### چکیده

یکی از اصلی‌ترین منابع آبی موجود، منابع سطحی آب و به طور مشخص آب موجود در مخازن سدها می‌باشد. یکی از روش‌های بهبود بهره‌برداری از مخازن اعمال سیاست جیره‌بندی در مخزن است. تابع هدف در این تحقیق کمینه‌سازی نسبت کمبود با اعمال سیاست جیره‌بندی بر مصارف کشاورزی سد وشمگیر در استان گلستان است. به این منظور دوره سه‌ساله خشکسالی متوالی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ برای این تحقیق انتخاب گردید. سیاست جیره‌بندی با استفاده از الگوریتم‌های بازپخت، ژنتیک، رقابت استعماری صورت گرفته و سپس نتایج با سیاست بهره‌برداری استاندارد مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی با اعتمادپذیری ۹۹/۹۴ درصد، برگشت‌پذیری ۵۰٪، شاخص پایداری ۴۹/۳۹، آسیب‌پذیری ۶٪ و درصد تأمین ۹۹ دارای بالاترین کارایی و همچنین سیاست بهره‌برداری استاندارد نیز با اعتمادپذیری ۹۹/۲۵ درصد، برگشت‌پذیری ۱۱٪، شاخص پایداری ۹/۲۲، آسیب‌پذیری ۱۵/۵٪ و درصد تأمین ۸۰ دارای پایین‌ترین کارایی در بهره‌برداری از مخزن وشمگیر در دوره خشکسالی بوده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم‌های فرا کاوشی، خشکسالی، سد وشمگیر، سیاست بهره‌برداری استاندارد، سیاست جیره‌بندی

### مقدمه

با توجه به نقش حیاتی آب در حیات انسان‌ها، بهره‌برداری بهینه، صرفه‌جویی و اصلاح الگوی مصرف امری مهم و ضروری است. حال آن که نقش مخازن در ذخیره‌سازی و تأمین آب در دوره‌های کم‌آبی و خشکی نیز بسیار برجسته و با اهمیت می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی ابزارهای بسیار مؤثری در تخمین عملکرد هیدرولوژیکی و اقتصادی طرح‌های پیشنهادی مدیریت آب‌های سطحی هستند؛ اما این مدل‌ها در زمینه انتخاب و تعریف بهترین پیکربندی و ترکیب ظرفیت‌ها، اهداف و سیاست‌های بهره‌برداری، عملکرد مناسبی ندارند. با وجودی که مدل‌های بهینه‌سازی، حتی اگر برای انتخاب بهترین جواب عملکرد خوبی نداشته باشند، جهت حذف بدترین آنها عملکرد مؤثری دارند (Hogati et al. 2013) در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن تحقیقات زیادی صورت گرفته که در ادامه به آنها

اشاره می‌گردد. در مطالعه‌ای که به بررسی کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت (Annealing) در بهره‌برداری بهینه از منابع آب و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization, ACO) پرداخته شده، این نتیجه بدست آمده که الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت روش قدرتمندتری نسبت به سایر روش‌ها است و در زمان بسیار کم‌تر به نتایج بهتری می‌رسد (Borhani Daraine and Shahidi, 2008). بهینه‌سازی مخزن رودخانه شهرچای با هدف تأمین نیاز پایین‌دست از جمله نیاز شرب، کشاورزی و محیط‌زیست با الگوریتم‌های بازپخت، ژنتیک و ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization, PSO) صورت گرفته است؛ که نتایج نشان دادند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت مؤثرتری نسبت به سایر روش‌ها عمل نموده است (Azarafza et al, 2012). تحقیقی بر روی بهینه‌سازی قاعده جیره‌بندی در سدهای مخزنی از طریق اتصال الگوریتم ژنتیک به یک مدل شبیه‌ساز (ARSP) (Acres Reservoir Simulation Package) صورت گرفت. مدل

پیشنهادی مذکور در سامانه منابع آب رودخانه زهره واقع در جنوب غرب کشور ارزیابی گردید. نتایج نشان دادند ترکیب یادشده شدت کمبودها را نسبت به حالت بدون جیره‌بندی نیازها تا حد زیادی بهبود بخشید (Taghian et al, 2012). تحقیقی بر روی بهره‌برداری بهینه مخازن سدهای لتیان و ماملو با رویه شرایط واقعی، مطلوب و جیره‌بندی صورت گرفت و منحنی فرمان این مخازن استخراج گردید. نتایج تحقیق نشان داد که حداقل کمبود با توجه به اولویت‌های تخصیص (شرب، صنعت و کشاورزی) در سیاست جیره‌بندی اتفاق افتاده است (Hoseini et al, 2013). اثر اعمال سیاست جیره‌بندی بر وضعیت تأمین مصارف سد نمرود در منطقه گرمسار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که سیاست جیره‌بندی بر مصارف مربوط به سد دست‌بالا از چهار ماه قبل از بروز تنش باید اعمال شود (Razaghi et al. 2014). تحقیقی برای بررسی و مطالعه کاربرد روش‌های مختلف جیره‌بندی و بررسی کارایی استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی جستجوی هارمونی برای حل مسئله کمبود شدید تأمین آب شرب تهران انجام شد که نتایج با توجه به معیارهای ارزیابی که شامل اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری است، روش گسسته جواب بهتری می‌دهد (Karami and Borhani Dariane, 2014). تحقیقی بر روی سد ویر در جمهوری چک بر اساس سیاست جیره‌بندی انجام شد که نتایج نشان داد سیاست جیره‌بندی از ضریب اعتمادپذیری بالا و ضریب آسیب‌پذیری پایینی برخوردار است (Marton and Kapelan, 2014). برای مدیریت مخزن سد آیدوغموش واقع در استان آذربایجان شرقی از برنامه‌ریزی ژنتیک منطقی با ادغام توابع شرطی، برای استخراج قاعده جیره‌بندی مخزن در شرایط پایه و تغییر اقلیم استفاده گردید. نتایج نشان داد که بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک منطقی و در شرایط تغییر اقلیم نسبت به پایه شاخص‌های اطمینان‌پذیری کاهش، آسیب‌پذیری افزایش و برگشت‌پذیری نیز کاهش خواهند یافت (Ashofteh and Bozorg Haddad, 2015). از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و مورچگان پیوسته برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن استفاده گردید. نتایج نشان دادند که با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای تمامی اجراهای برنامه منجر به جواب شدنی شده ولی بدون در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای در مواردی الگوریتم قادر به یافتن جواب شدنی نبود. همچنین الگوریتم ژنتیک در یافتن جواب‌های شدنی بهینه عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشت (Zeynali et al 2015). تحقیقی بر روی طراحی بهینه مخزن سد دز با قابلیت اطمینان بالا بر

اساس الگوریتم ترکیبی ACO-LP صورت گرفت. زوج الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی الگوریتم کلونی مورچه با یک مدل برنامه‌ریزی خطی مجازی (LP) می‌باشد. این روش باعث کاهش ضریب حساسیت ظرفیت مخزن به میزان ۰/۸۵ و افزایش ضریب اطمینان به میزان ۰/۸ شده است (Afshar et al, 2015). تحقیقی بر روی بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی با هدف کمینه‌سازی خسارات و صدمات در طول فاجعه سیل بر روی سد چندمخزنی چهل چای و نرماب انجام شد. خسارات سیل توسط نرم‌افزار HEC-RAS و GIS اندازه‌گیری شده است نتایج نشان داد که الگوریتم جستجوی هارمونی می‌تواند در بهره‌برداری از مخازن به منظور مدیریت سیل مفید باشد. (Bashiri-Atrabi et al, 2015). بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنی ویچانگ در جنوب غربی چین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (Cuckoo optimization Algorithm, COA) با هدف بهینه‌سازی تولید انرژی انجام شد و عملکرد الگوریتم فاخته با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید. نتایج نشان دادند، الگوریتم فاخته نتایج مطلوب، قابل اطمینان، دارای قابلیت جستجوی بالا و همگرایی رضایت‌بخش نسبت به الگوریتم ژنتیک برخوردار است (Ming et al., 2015). برای بررسی عملکرد مخزن پونگ در هند با سیاست جیره‌بندی تحت سناریوی تغییرات آب و هوایی تحقیقی انجام شد و از الگوریتم ژنتیک برای بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده گردید که نتایج نشان دادند که روش سیاست جیره‌بندی اثرات کمبود نیاز پایین دست ناشی از تغییرات آب‌وهوایی را تا حد ممکن از بین می‌برد (Adeloye, 2015). بهره‌برداری بهینه از مخزن درودزن شیراز توسط روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی تصادفی انجام شد که از مدل بهینه‌سازی خطی بر اساس سیاست جیره‌بندی توسط نرم‌افزار LINGO و تولید جریان مصنوعی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، میزان رهاسازی بهینه را بدست آوردند. نتایج تحقیق نشان داد که روش مورد استفاده در تحقیق می‌تواند روش مؤثری در بهره‌برداری از مخازن باشد (Goodarzi et al, 2015).

هدف از انجام این تحقیق بهره‌برداری بهینه سد وشمگیر با سیاست جیره‌بندی توسط الگوریتم‌های فراکاوشی در دوران خشکسالی بوده تا بهترین شکل رهاسازی برای نیاز کشاورزی در زمان خشکسالی بدست آید. همچنین نتایج بدست آمده با سیاست بهره‌برداری استاندارد مقایسه می‌گردد. اقتصاد استان گلستان وابسته به بخش کشاورزی بوده و وقوع دوره‌های خشکسالی، تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد و به تبع آن اقتصاد منطقه دچار بحران می‌گردد. با توجه به این که منبع

### الگوریتم رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

الگوریتم رقابت استعماری از یک پدیده اجتماعی- انسانی الهام گرفته و در سال 2013 ارائه شده است (Atashpaz, Gargari and Lucas, 2013). به‌طور ویژه این الگوریتم به فرآیند استعمار، به‌عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی- سیاسی بشر نگریسته و با مدل‌سازی ریاضی این پدیده تاریخی، از آن به‌عنوان منشأ الهام یک الگوریتم قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی بهره می‌گیرد. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آنها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند.

### الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک به روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار است که می‌توان در طبقه‌بندی‌ها از آن به‌عنوان یک روش عددی، جستجوی مستقیم و تصادفی معرفی کرد. این الگوریتم مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است. در الگوریتم GA، ابتدا به‌طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برانزنگی آنها محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه به‌وسیله عملگرهای تزویج<sup>۱</sup> و جهش<sup>۲</sup> جامعه‌ای جدید با مقادیر برانزنگی بالاتر تولید می‌شود (Goldberg, 1989). مهم‌ترین عملگرهای الگوریتم GA شامل تزویج و جهش می‌باشد؛ که عمل تزویج بر روی کروموزوم‌های افرادی که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند اعمال می‌شود و پس از اعمال تزویج ژن‌های دو والد از محل تزویج از هم جدا شده و باهم جابه‌جا می‌شوند. عمل جهش نیز به صورت‌های گوناگونی می‌تواند اعمال شود از جمله این‌که یک ژن می‌تواند با ژنی دیگر در طول کروموزوم تعویض شود یا مقدار عددی یک یا چند ژن به‌طور تصادفی تغییر کند (Zeynali et al., 2015).

### بهره‌برداری از مخزن به روش استاندارد (Standard Operation Policy (SOP))

در این سیاست، رهاسازی از مخزن تنها بر اساس نیاز هر دوره انجام می‌پذیرد. بدین معنی که اگر آب کافی برای رفع نیاز موجود نباشد، مخزن خالی و اگر آب بیش از نیاز موجود باشد، مخزن پر شده و سپس سرریز خواهد نمود. این مدل فاقد

اصلی تأمین آب در استان گلستان رودخانه‌ها و مخازن می‌باشند و با کاهش حجم مخزن سد و شمشگیر به علت به اتمام رسیدن عمر مفید مخزن و تجمع زیاد رسوب و خشکسالی‌های اخیر، نیاز به بهره‌برداری بهینه از مخزن بر اساس سیاست جیره‌بندی می‌باشد تا خسارات ناشی از کمبود آب برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی کمینه شود...

### مواد و روش‌ها:

برای اعمال سیاست جیره‌بندی ابتدا شاخص خشکی بر اساس روش میانگین چندساله رودخانه برای یک دوره ۱۵ ساله محاسبه شده و سال‌های خشکسالی که در آن وجود دارد بدست آمد. سه سال خشکی متوالی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲ به‌عنوان دوره مورد مطالعه انتخاب شد. سپس برنامه‌نویسی الگوریتم‌ها در نرم‌افزار متلب با توجه به تابع هدف که در واقع کمینه کردن میزان کمبود در نیاز کشاورزی می‌باشد، انجام شد. پس از اطمینان از صحت داده‌های خروجی، ارزیابی نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، درصد تأمین نیاز و انعطاف‌پذیری صورت گرفت. در این بخش به معرفی الگوریتم‌های بکار رفته در این تحقیق پرداخته می‌شود.

### الگوریتم بازپخت (SA)

فرآیند شبیه‌سازی بازپخت کردن برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی، برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ پیشنهاد گردید (Kirkpatrick et al., 1983). الگوریتم بازپخت یا شبیه‌سازی حرارتی، یکی از مجموعه الگوریتم‌های فرا کاوشی معروف در زمینه الگوریتم‌های هوش مصنوعی است. در فرآیند بازپخت، ابتدا حرارت فلزات را تا دمای بسیار بالایی افزایش داده و سپس، یک فرآیند سردسازی و کاهش دمای تدریجی بر روی آنها صورت می‌گیرد. الگوریتم SA به وسیله جستجو در مجموعه‌ای از جواب‌های شدنی برای یافتن جواب بهینه عمل می‌کند. در روند این جستجو، الگوریتم از یک جواب اولیه  $i$  که به صورت تصادفی یا بر اساس اطلاعات موجود مسئله انتخاب می‌شود به جواب  $z$  در همسایگی آن حرکت می‌کند و علاوه بر پذیرش جوابی که باعث بهبود تابع هدف می‌شود جواب‌های نامطلوب نیز به شرطی پذیرفته می‌شوند که شرط زیر که معیار متروپلیس نامیده می‌شود ارضا شود:  $Exp(\pm \frac{\Delta f}{c_k}) \geq Random(0,1)$  که در آن  $c_k$  پارامتر کنترل‌کننده (دما) و  $f$  مقدار تابع هدف است. این روند همراه با کاهش دما تا رسیدن به شرط توقف تکرار می‌شود و بهترین جواب به‌دست‌آمده در طول اجرای الگوریتم ثبت می‌شود.

1. Crossover  
2. Mutation

صورت ارضا نشدن قیود، در تابع هدف اعمال می‌شود. دینامیک سامانه و معادله‌های مورد استفاده در فرایند بهینه‌سازی بر اساس قانون بقای جرم به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شوند:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - Sp_t \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $S_t$  حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره  $t$ ،  $S_{t+1}$  حجم ذخیره مخزن در انتهای دوره  $t$ ،  $Q_t$  حجم مقدار جریان ورودی به مخزن در طول دوره  $t$ ،  $Sp_t$  مقدار آب سرریز شده از مخزن،  $R_t$  حجم مقادیر رهاسازی در دوره  $t$ ، هستند. قیود مورد استفاده در فرایند بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه تک مخزن شامل محدودیت‌های حجم ذخیره مخزن و مقادیر رهاسازی در هر ماه است. با در نظر گرفتن بیشترین حجم مخزن در هر دوره  $S_{max}$  و کمترین حجم مفید مخزن  $S_{min}$ ، حدود بالا و پایین حجم مخزن در طول فرایند شبیه‌سازی به صورت زیر هستند که به صورت یک قید به سامانه وارد می‌شوند:

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (\text{رابطه ۳})$$

قید مورد استفاده برای اعمال محدودیت‌های مقادیر رهاسازی در هر ماه نیز به صورت زیر هستند:

$$R_{Min} \leq R(t) \leq R_{Max} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t > S_{max} \\ 0 & \text{if } S_t + Q_t < S_{max} \end{cases}$$

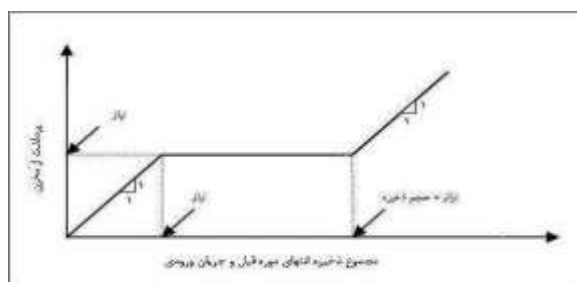
#### بهره‌برداری از مخزن به روش جیره‌بندی

روش جیره‌بندی بهره‌برداری مخزن در زمان خشکسالی از کارایی بالایی برخوردار است. خشکی تعریف‌های مختلفی دارد که یکی از آنها خشکی بر اساس میانگین چندساله جریان رودخانه می‌باشد. این خشکی زمانی به انتها می‌رسد که میانگین چند ساله جریان رودخانه‌ای بالاتر از یک حد آستانه تعریف شده، قرارگیرد (رابطه ۵).

$$\begin{aligned} \frac{i-1}{S} < -1 & \quad \text{سال خیلی خشک} \\ -1 < \frac{i-1}{S} < -0.5 & \quad \text{سال خشک} \\ -0.5 < \frac{i-1}{S} < 0.5 & \quad \text{سال طبیعی} \\ 0.5 < \frac{i-1}{S} < 1 & \quad \text{سال تر} \\ 1 < \frac{i-1}{S} & \quad \text{سال خیلی تر} \end{aligned}$$

که  $I$  میانگین جریان سالانه دراز مدت و  $i$  میانگین جریان هر سال و  $S$  نیز انحراف سالانه دراز مدت آبدهی می‌باشد. جهت شروع سیاست جیره‌بندی نیاز به یک حجم آستانه می‌باشد و تعیین حجم آستانه با استفاده از مجموع ذخیره و جریان ورودی به مخزن در بازه زمانی جاری می‌باشد. بر اساس

آینده‌نگری لازم جهت مدیریت کارا در بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. در نتیجه برای مدیریت و بهره‌برداری از مخازن روش مناسب و با کارایی مطلوب نخواهد بود. نحوه ذخیره مصرف و سرریز در روش SOP در شکل (۱) آورده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است محدوده مجاز رهاسازی بین دو خط موازی محدود شده است. همان‌طور که ذکر شد SOP بالاترین اولویت را به رهاسازی آب برای بیش‌ترین سود و تأمین نیاز حال حاضر اختصاص می‌دهد. اگر آب بیش‌تری موجود باشد تا جایی که ظرفیت ذخیره مخزن پر شود در مخزن ذخیره می‌شود و بقیه آب سرریز می‌کند.



شکل ۱. منحنی S شکل سیاست بهره‌برداری استاندارد

#### تابع هدف و قیودات

برای استفاده از یک مدل بهینه‌سازی در حل یک مسئله خاص، باید متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود را برای مسئله مورد نظر تعریف کرد. در این مطالعه (بهره‌برداری از مخزن سد و شمشگیر)، حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی ( $S_t$ ) به‌عنوان متغیر حالت و میزان رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی ( $R_t$ ) به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق برای حل مسئله بهره‌برداری میزان رهاسازی از این مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. تابع هدف کمینه‌سازی میزان کمبود نیاز کشاورزی می‌باشد که مطابق با رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{Min TSD} &= \sum_{t=1}^n \left( \frac{R_t - D_t}{D_{max}} \right)^2 + \text{penalty}_{t=1 \dots n_t} \\ \text{If } V_t > (S_t + Q_t) & \text{ then } R_t = \frac{1}{K_p} (S_t + Q_t) \\ \text{if } S_t < S_{min} & \text{ penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{S_t - S_{min}}{S_{min}} \right)^2 + 10 \\ \text{if } S_t \geq S_{min} & \text{ and } S_t \leq S_{max} \text{ penalty} = 0 \end{aligned}$$

که در آن  $TSD$  مقدار مربع انحرافات رهاسازی‌ها از نیازهای موردنظر به عبارت دیگر همان تابع هدف (کمبود)،  $R_t$  مقادیر رهاسازی،  $D_t$  نیازها و  $R_{max}$  بالاترین نیاز ماهانه در طول دوره موردنظر می‌باشد.  $penalty$  میزان جریمه‌ای است که در

چنانچه این مقدار بزرگتر باشد، کل نیاز از مخزن تأمین خواهد شد.

$$R_t = \frac{1}{K_p} (S_t + Q_t) \quad (\text{رابطه ۹})$$

هرگاه حجم آب قابل‌دسترس ( $AW=S+Q$ ) هر ماه کمتر از حجم آستانه باشد، جیره‌بندی آغاز می‌شود. بر این اساس ضرایب جیره‌بندی  $K_p$  بهینه از الگوریتم بر پایه کمینه‌سازی شاخص کمبود نیاز بدست می‌آید که این ضریب همان شیب خط بهره‌برداری در ماه است.

داده‌های ورودی به برنامه شامل تأمین‌کننده‌های آب موردنیاز و مصرف‌کننده‌ها می‌باشند. تأمین‌کننده‌های آب موردنیاز شامل جریان رودخانه و حجم آب ذخیره‌شده در مخازن می‌باشد. جریان رودخانه و حجم ذخیره‌شده آب در مخازن در بخش کشاورزی، آبی‌پروری، صنعت، محیط‌زیست و تبخیر از سطح مخازن مصرف می‌شود.

#### مورد مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه رودخانه گرگان‌رود در استان گلستان قرار دارد. رودخانه با طول حدود ۳۰۰ کیلومتر و دارای مساحت حوضه آبریز ۱۰۲۵۰ کیلومترمربع است. ارتفاعات این حوضه از حدود ۲۹۷۷ متر واقع در زیر حوضه قره‌چای تا ۲۶- متر از سطح دریا متغیر می‌باشد. سه سد بوستان، گلستان و وشمگیر بر روی رودخانه گرگان‌رود قرار گرفته است. شکل (۲) موقعیت جغرافیایی سه سد را نشان می‌دهد. سد وشمگیر در طول جغرافیای ۵۴ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی در شمال شرقی شهر آق‌قلا و در فاصله ۴۲ کیلومتری این شهر و در محلی به نام سنگر سوار بر روی رودخانه گرگان‌رود احداث گردیده است.

این سیاست، در زمان اعمال کاهش نیاز، نیاز و به تبع آن خروجی مخزن تابعی از حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره جاری بعلاوه ورودی پیش‌بینی‌شده در طول دوره جاری می‌باشد. تابع هدف، کمینه کردن میزان کمبود نیاز کشاورزی می‌باشد که به صورت رابطه (۶) ارائه می‌گردد:

$$V_t = K_p \times D_t. \quad (\text{رابطه ۶})$$

$V_t$  حجم آستانه،  $D_t$  نیاز کشاورزی پایین‌دست مخزن در ماه جاری و مقادیر  $K_p$  ضریب تعیین‌کننده رهاسازی در ماه جاری می‌باشند.

(رابطه ۷)

$$\text{Min TSD} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{nt} \left( \frac{R_t - D_t}{D_{max}} \right)^2 + \text{penalty} \quad t = 1 \dots nt$$

$$\text{if } S_t < S_{min} \quad \text{penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{S_{min} - S_t}{S_{max} - S_{min}} \right)^2 + 10$$

$$\text{if } R_t < 0 \quad \text{penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t}{D_t} \right)^1 + 10$$

$$\text{if } D_t < R_t \quad \text{penalty} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t - D_t}{D_t} \right)^2 + 10$$

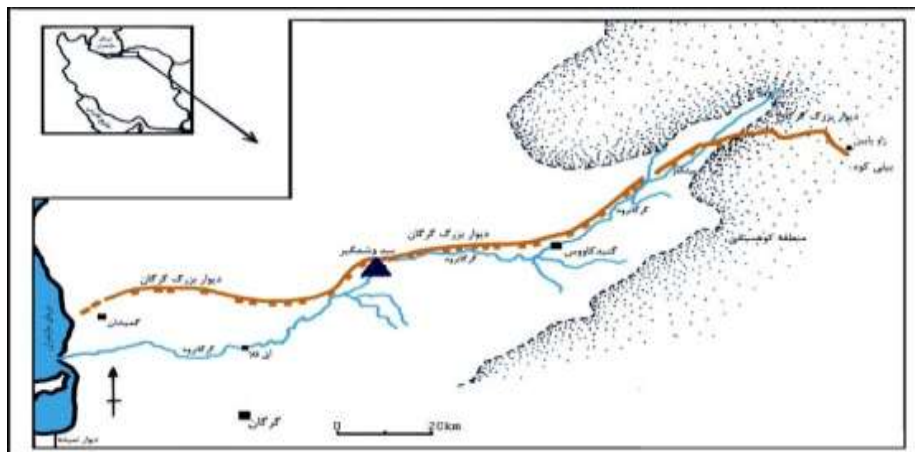
که در آن  $TSD$  یا همان تابع هدف مقادیر کمبود نیاز،  $D_{(t)}$  نیاز کشاورزی،  $D_{max}$  بالاترین نیاز ماهانه در طول دوره موردنظر،  $R_t$  خروجی از مخزن در طول دوره  $t$ ،  $S_t$  حجم ذخیره در ابتدای ماه و  $S_{min}$  حجم کمینه مخزن می‌باشد.  $penalty$  میزان جریمه‌ای است که در صورت ارضا نشدن قیود، در تابع هدف اعمال می‌شود.

قید مورد استفاده برای اعمال محدودیت‌های مقادیر رهاسازی در هر ماه نیز به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

(رابطه ۸)

$$Sp(t) = \begin{cases} S(t) + Q(t) - S_{max} & \text{if } S(t) + Q(t) > S_{max} \\ 0 & \text{if } S(t) + Q(t) < S_{max} \end{cases}$$

زمانی جیره‌بندی آغاز خواهد شد که حجم ذخیره به‌علاوه مقدار جریان ورودی کوچک‌تر از مقدار  $K_p$  ضرب در نیاز ماه باشد و میزان رهاسازی با توجه به رابطه (۹) به دست می‌آید و



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه

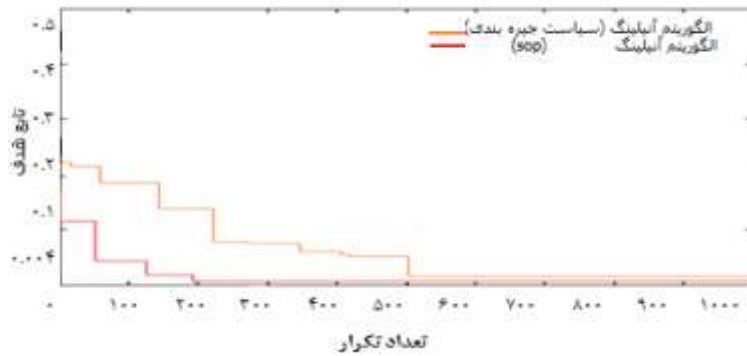
**نتایج**

کشاورزی آن ماه به دست آمد. جدول (۱) مقادیر  $K_p$  های حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی با اعمال سیاست جیره‌بندی در ماه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۳) مقادیر تابع هدف الگوریتم‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

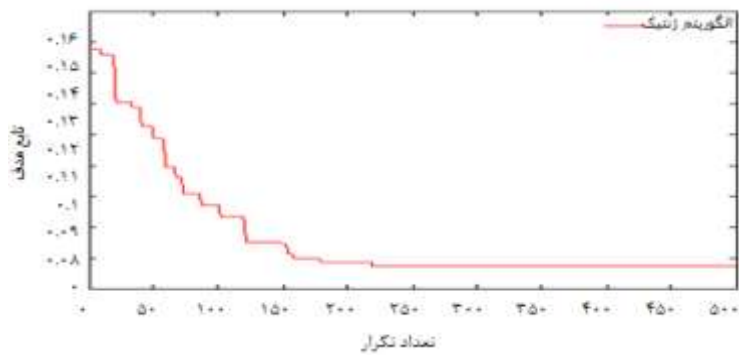
محاسبه ضرایب  $K_p$  برای هر ماه سال از طریق سعی و خطا و با توجه به حجم بیشینه و کمینه مخزن توسط الگوریتم‌های مورد مطالعه با اعمال سیاست جیره‌بندی انجام شد. سپس مقادیر حجم آستانه هر ماه از سال بر اساس حاصل ضرب  $K_p$  در نیاز

جدول ۱. مقادیر  $K_p$  و حجم آستانه ( $v_t$ ) با اعمال سیاست جیره‌بندی در الگوریتم‌های مختلف

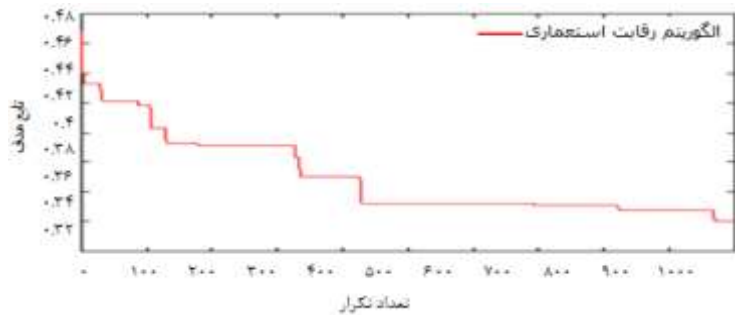
الگوریتم	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
$k_p$	۳	۲/۵۹	۲	۵	۳	۶	۶	۳	۶	۷	۳	۳
$v_t$	۳۸/۶۱	۴۳/۵	۱۱/۵۶	۵۶/۶۵	۳۸/۷۳	۰	۱۵/۸۴	۲۵/۵	۰	۰	۲۱/۷۵	۳۲/۵۵
$k_p$	۳/۳۷	۲/۵۹	۲	۳/۸۳	۶/۰۲	۸	۵/۳۵	۸	۸	۲	۸	۴
$v_t$	۴۳/۵	۴۳/۵	۱۱/۵۶	۴۳/۵	۷۷۷/۷۶	۰	۱۴/۱۳۶	۶۸	۰	۰	۵۸	۴۳/۵
$k_p$	۳	۳	۳	۵	۴	۸	۵	۳	۸	۸	۵	۲
$v_t$	۳۸/۶۱	۵۰/۳۴	۱۷/۳۴	۵۶/۶۵	۵۱/۶۴	۰	۱۳/۲	۲۵/۵	۰	۰	۳۶/۳۵	۲۱/۷



الف



ب

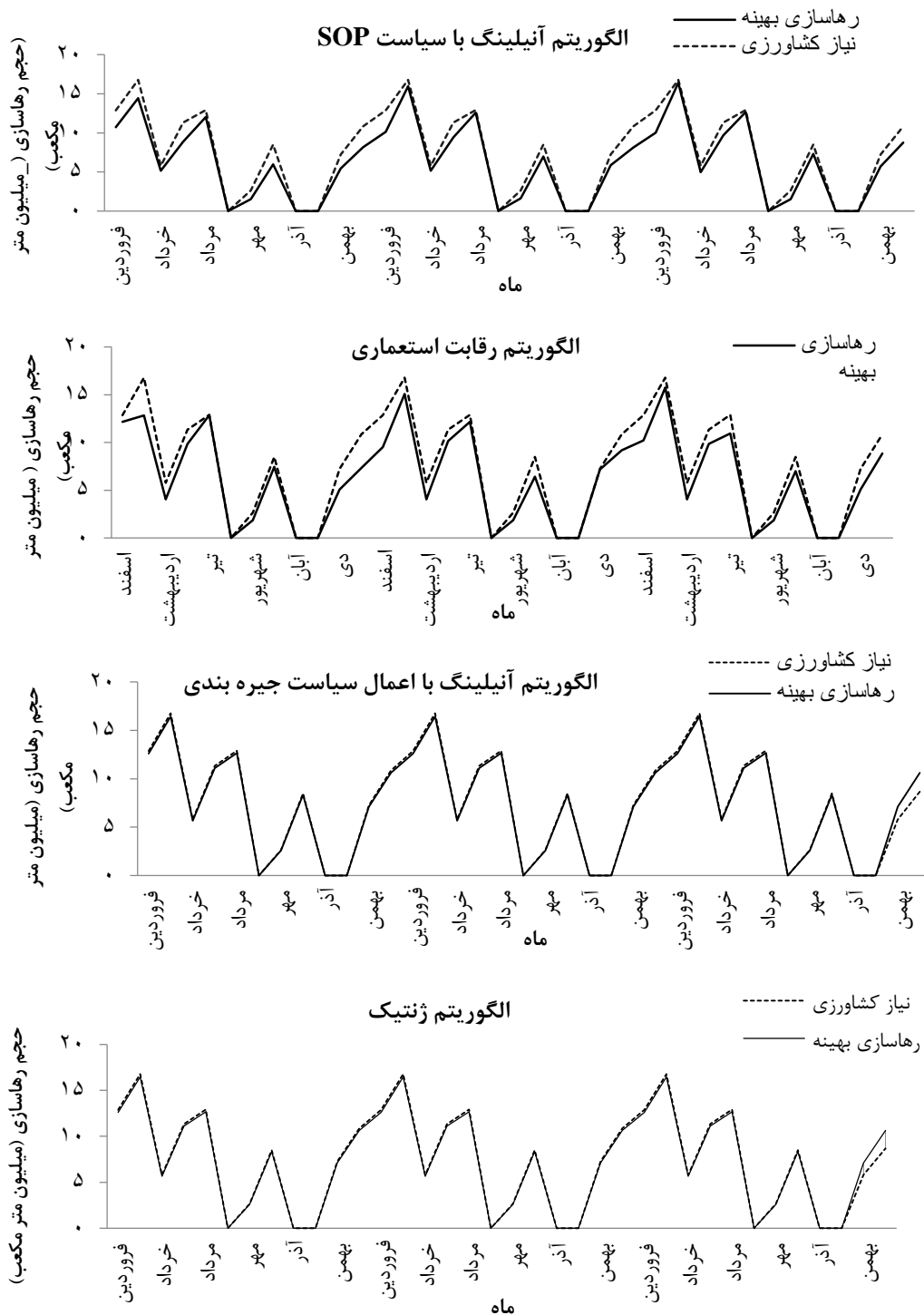


ج

شکل ۳. تابع هدف الگوریتم بازیخت با سیاست جیره‌بندی و بدون اعمال سیاست جیره‌بندی (الف)، الگوریتم ژنتیک (ب) و الگوریتم رقابت استعماری (ج)

همگرایی بهینه برسد. همچنین باعث شد همچنین الگوریتم ژنتیک در تکرار مرتبه ۲۰۰ و الگوریتم رقابت استعماری در تکرار مرتبه ۱۰۰۰ به جواب بهینه دست پیدا کرده‌اند. شکل (۴) حجم رهاسازی بهینه توسط الگوریتم‌های مورد مطالعه با اعمال سیاست جیره‌بندی و الگوریتم بازپخت با سیاست بهره‌برداری استاندارد را نشان می‌دهد.

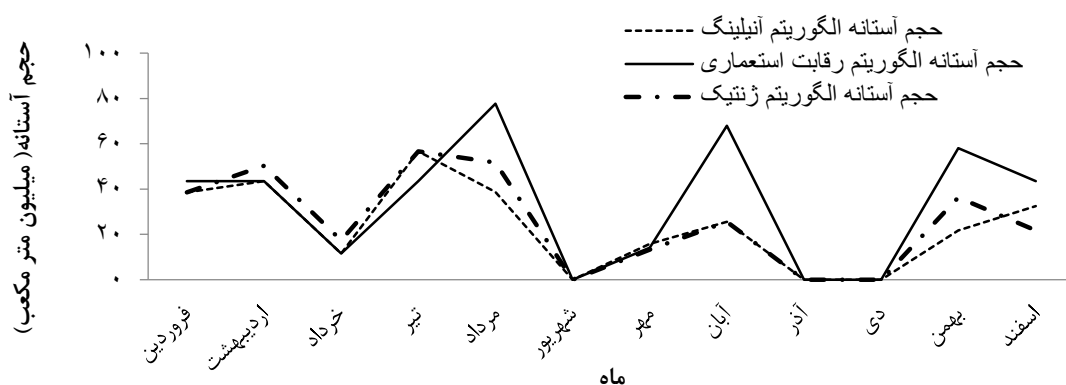
همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد الگوریتم باز پخت با سیاست جیره‌بندی در تکرار مرتبه ۵۰۰ با میزان  $0.04369$  و الگوریتم بازپخت بدون سیاست جیره‌بندی (سیاست بهره‌برداری استاندارد) در تکرار مرتبه ۲۵۰ با میزان  $0.0123$  به جواب بهینه دست پیدا کرده‌اند. کمتر بودن قیود در الگوریتم بازپخت بدون اعمال سیاست جیره‌بندی نسبت به زمانی که سیاست جیره‌بندی اعمال شده است، باعث شده تا سریع‌تر به



شکل ۴. حجم آب رهاسازی بهینه از مخزن و نیاز کشاورزی (میلیون متر مکعب)

رقابت استعماری در تأمین نیاز کشاورزی از دو الگوریتم دیگر از توانایی کمتری برخوردار می‌باشد. الگوریتم بازپخت و ژنتیک تقریباً از توانایی مشابهی در تأمین نیاز کشاورزی برخوردار هستند. شکل (۵) حجم آستانه در نظر گرفته شده توسط الگوریتم‌های بازپخت، رقابت استعماری و ژنتیک برای هر ماه از سال را نشان می‌دهد. اگر میزان آب قابل استحصال یا همان حجم ذخیره ماه قبل بعلاوه حجم ورودی همان ماه، کم‌تر از حجم آستانه باشد اعمال سیاست جیره‌بندی آغاز می‌شود.

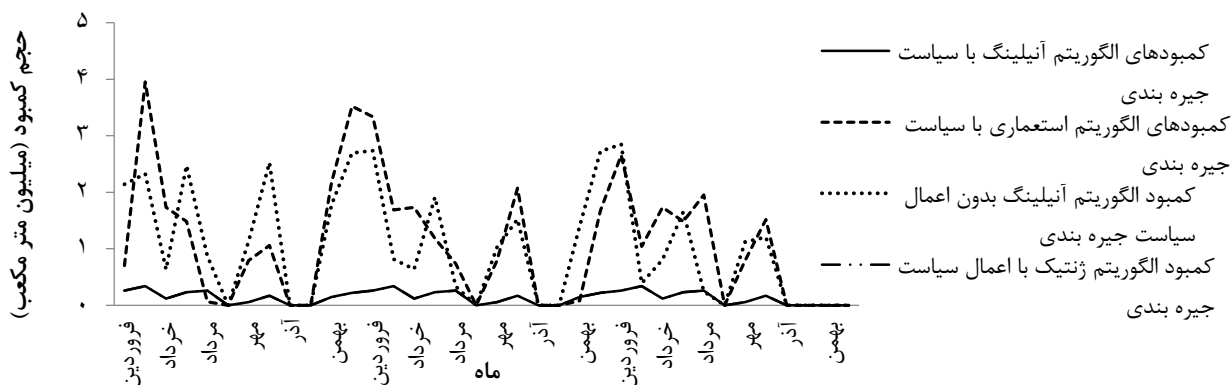
همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، اختلاف نمودار رهاسازی بهینه با نیاز کشاورزی در سیاست جیره‌بندی در تمام الگوریتم‌ها کم‌تر از اختلاف نمودار رهاسازی بهینه با نیاز کشاورزی بدون اعمال سیاست جیره‌بندی در الگوریتم بازپخت می‌باشد. که نشان‌دهنده آینده‌نگری سیاست جیره‌بندی می‌باشد. ایجاد یک میزان تنش کم در کل دوره بهتر از به وجود آمدن تعداد شکست کمتر اما با شدت کمبود شدید می‌باشد. همچنین از بین سه الگوریتم ژنتیک، بازپخت و رقابت استعماری در سیاست جیره‌بندی همان‌گونه که مشخص است، الگوریتم



شکل ۵. مقادیر حجم آستانه توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی

بدین معنا است که در برخی از ماه‌ها درصد عدم تأمین نیاز پایین دست در این الگوریتم از الگوریتم‌های دیگر بیشتر می‌باشد. شکل ۶ مقایسه حجم کمبود نیاز تأمین نشده توسط مدل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

حجم آستانه براساس نیاز کشاورزی پایین دست در آن ماه تعریف می‌شود. ماه‌های که در آنها نیاز کشاورزی صفر است حجم آستانه نیز صفر می‌باشد. همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است مقادیر حجم آستانه بدست آمده توسط الگوریتم رقابت استعماری در بعضی از ماه‌ها از دو الگوریتم دیگر بالاتر است. این



شکل ۶. حجم کمبود توسط الگوریتم‌های مورد مطالعه (میلیون متر مکعب)

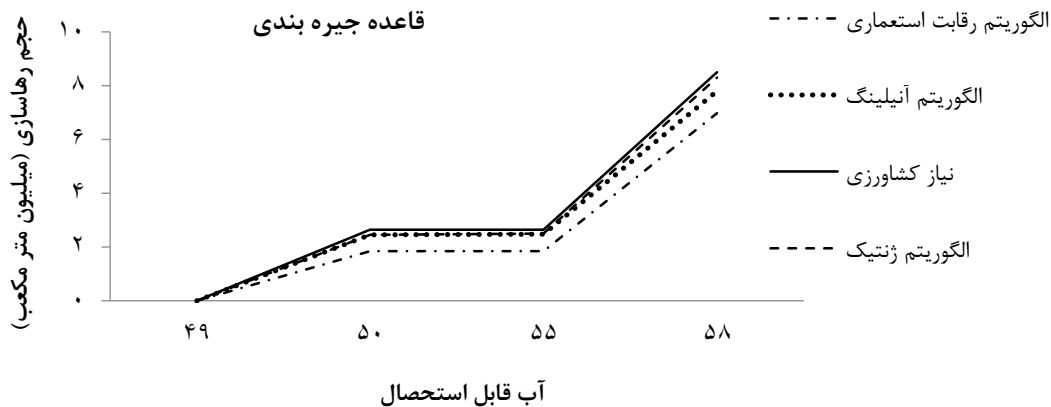
شرایط اعمال سیاست جیره‌بندی در الگوریتم‌های ژنتیک و بازپخت می‌باشد. که این نشان‌دهنده آینده‌نگری سیاست جیره‌بندی نسبت به بهره‌برداری استاندارد و همین‌طور کارایی پایین

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، میزان حجم کمبود در الگوریتم رقابت استعماری با اعمال سیاست جیره‌بندی و سیاست بهره‌برداری استاندارد بسیار بیشتر از



برای ماه‌های شهریور، مهر و آبان سال ۱۳۸۱ استخراج شده و در شکل ۷ نشان داده شده است.

الگوریتم رقابت استعماری در زمان خشکسالی می‌باشد که میزان ورودی به مخزن کاهش یافته است. نمودار قاعده جیره‌بندی



شکل ۷. قاعده جیره‌بندی در الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی

جبران‌ناپذیر باشد و وضعیت اقتصادی کشاورزان را به مخاطره بیاندازد. میزان حجم کمبود در تأمین نیاز معادل اختلاف نیاز کشاورزی و میزان رهاسازی بهینه می‌باشد. جدول (۲) مربوط به شاخص‌های ارزیابی مربوط به سیاست جیره‌بندی توسط الگوریتم بازپخت، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری با اعمال سیاست جیره‌بندی و الگوریتم بازپخت با سیاست بهره‌برداری استاندارد می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده از شکل (۷) در هر سه الگوریتم شیب خط رهاسازی از شیب خط نیاز پایین‌دست بویژه در الگوریتم رقابت استعماری کمتر می‌باشد. زیرا درصدی از نیاز ماه‌های قبل که تأمین نشده، جهت ذخیره در مخزن برای تأمین نیاز در ماه‌های آینده ذخیره می‌شود. بنابراین درصدی از نیاز پایین‌دست تأمین نمی‌شود. در صورت عدم اعمال چنین سیاست‌هایی ممکن است میزان خسارات ناشی از تنش‌ها

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی

روش بهینه‌سازی	شاخص	شاخص	برگشت- شاخص	آسیب- درصد	تأمین (%)
	اعتمادپذیری (%)	پذیری (%)	پایداری (%)	پذیری (%)	
الگوریتم رقابت استعماری با اعمال سیاست جیره‌بندی	۹۹/۳۳	۱۶/۷	۱۴/۰۵	۱۵/۳	۸۴
الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی	۹۹/۹۴	۵۰	۴۹/۳۹	۶	۹۹
الگوریتم بازپخت با سیاست بهره‌برداری استاندارد	۹۹/۲۵	۱۱	۹/۲۲	۱۵/۵	۸۰
الگوریتم ژنتیک با اعمال سیاست جیره‌بندی	۹۹/۷	۴۰	۳۸/۷۸	۸/۵	۹۵

بازپخت با سیاست بهره‌برداری استاندارد بالاترین مقدار از بین مدل‌ها دارا می‌باشند. این بدین معنی است که الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی احتمال ماندن در شرایط شکست بیش‌تری نسبت به بقیه مدل‌ها را دارا می‌باشد. شاخص آسیب‌پذیری، بیانگر شدت کمبود در طی دوره شکست می‌باشد. شاخص آسیب‌پذیری الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی کمتر از بقیه مدل‌ها می‌باشد. هر چه این شاخص کمتر باشد سامانه کم‌تر دچار آسیب شده است. ترکیب سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و سرعت برگشت‌پذیری را پایداری گویند، که معیار مناسبی برای مقایسه گزینه‌های مختلف

شاخص اعتمادپذیری نشان‌دهنده میزان تأمین اهداف سامانه می‌باشد که هر چقدر این شاخص بالاتر باشد الگوریتم از عملکرد بهتری برخوردار است. در الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی ضریب اعتمادپذیری ۹۹/۹۴، بدست آمده که نسبت به سایر الگوریتم‌ها بالاتر می‌باشد. برای ارزیابی یک سامانه ذخیره در برگشت از حالت شکست به حالت بهره‌برداری نرمال، از شاخص سرعت برگشت‌پذیری استفاده می‌شود. هرچه این مقدار بیش‌تر باشد احتمال ماندن در شرایط شکست کم‌تر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیاست بهره‌برداری استاندارد کم‌ترین مقدار شاخص برگشت‌پذیری و الگوریتم

نسبت به حالت معمول (عدم اعمال جیره‌بندی) افزایش می‌یابد. این بدان معناست که با اعمال سیاست جیره‌بندی در ماه‌های پر آب (فصل زمستان)، نه تنها حجمی از آب به منظور تعدیل تنش‌های موجود در ماه‌های دچار تنش و کم آب در همان سال ذخیره می‌گردد، بلکه اعمال جیره‌بندی در ماه‌های دچار تنش (فصل تابستان) باعث افزایش حجم مخزن در فصل پاییز سال بعد نیز می‌گردد. در نتیجه اعمال این سیاست‌ها و افزایش حجم آب ذخیره‌شده در مخزن، انتظار می‌رود تنش‌های ناشی از کمبود آب در منطقه کاهش یابد. در شرایط جیره‌بندی به دلیل آینده‌نگری موجود در ماهیت سیاست جیره‌بندی، احتمال وقوع تنش‌های با شدت زیاد کاهش یافته و احتمال تأمین مصارف در حد آستانه موردنظر و بالاتر از این حد، افزایش یافته است. با توجه به نتایج، می‌توان مشاهده نمود که بهره‌برداری با سیاست استاندارد از بقیه سیاست‌ها از شاخص پایداری (۹/۲۲) کم‌تری برخوردار بوده است. همچنین الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی و سپس الگوریتم ژنتیک و در نهایت الگوریتم رقابت استعماری به ترتیب دارای بالاترین شاخص پایداری می‌باشند. همچنین یکی از دلایلی که باعث شده الگوریتم رقابت استعماری نسبت به دو الگوریتم دیگر از شاخص پایداری کم‌تری برخوردار باشد را می‌توان به اختصاص مقادیر حجم آستانه بالاتر توسط این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم دیگر دانست.

## REFERENCES

- Adeloye, A. J., Soundharajan, B. S., Ojha, C. S. P. and Remesan, R. (2015). Effect of Hedging-Integrated Rule Curves on the Performance of the Pong Reservoir (India) During Scenario-Neutral Climate Change Perturbations. *Water Resour Manage.* 29,3387–3407
- Afshar, A., Masoumi, F. and Sandoval Solis, S. (2015). Reliability Based Optimum Reservoir Design by Hybrid ACO-LP Algorithm. *Journal of Water Resour Manage.* 29,2045–2058.
- Ashofteh, P.S and Bozorg Haddad, O. 2015. Use of Multi-Conditional Functions in the Field of Reservoir Management and under Climate Change. *Iranian Journal of Soil and water Research.* 45(4), 397-404. (In Farsi)
- Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C. (2007). Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for Optimization inspired by imperialistic competition, *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 4661–4667.
- Azarafza, H., Rezaii, H., Behmanesh, J. and Besharat, S. (2012). Results Comparison of Employing PSO, GA and SA Algorithms in Optimizing Reservoir Operation (Case Study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). *Journal of Water and Soil.* 26(5), 1101-1108. (In Farsi)
- Bashiri-Atrabi, H., Qaderi, K., Rheinheimer, D., E. and Sharifi, E. (2015). Application of Harmony Search Algorithm to Reservoir Operation Optimization. *Journal of Water Resources Manage.* 29,5729–5748
- Borhani Dariane, A., Shahidi, L. (2008). Optimization of Reservoir Operation using Simulated Annealing and other Heuristic Methods. *International Journal of Engineering Sciences.* 19(8), 31-40
- Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, Boston.
- Goodarzi, E., Ziaei, M. and Hossinipour, E. (2015.) Optimization Analysis in Hydrosystem Engineering, Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality. Springer International Publishing Switzerland. Chapter 7, 218-238.
- Hoseini, H., Nagafi Gilaii, A., Zakertiri, M., (2013). Optimal Operation in Actual, satisfied and Hedging Condition and Application in Drawing of Latian, Mamloo Reservoirs Rule Curve. Fifth conference of Water Resource Management. University of Shahid Beheshti. Tehran, Iran.
- Hogati, A., Farid\_ Hoseini, A. R., Alizadeh, A., Entezari, M. (2013). Reservoir operation model

سیاست‌های بهره‌برداری سامانه‌های ذخیره در مرحله طراحی و برآورد الگوی بهره‌برداری بهینه سامانه‌های در حال بهره‌برداری می‌باشد. در مقایسه گزینه‌ها، گزینه‌ای که بیش‌ترین شاخص پایداری را داشته باشد به عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. شاخص پایداری الگوریتم بازپخت با اعمال سیاست جیره‌بندی در رتبه اول و سپس الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری به ترتیب دارای بالاترین مقدار شاخص پایداری می‌باشند. همان‌طور که از جدول (۲) مشخص است سیاست بهره‌برداری استاندارد با الگوریتم بازپخت دارای کم‌ترین شاخص پایداری می‌باشد که نشان‌دهنده آینده‌نگری سیاست جیره‌بندی نسبت به بهره‌برداری استاندارد می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بهینه‌سازی رهاسازی نیاز کشاورزی از مخزن سد و شمشگیر با اعمال سیاست جیره‌بندی با الگوریتم‌های فراکاوشی و سیاست بهره‌برداری استاندارد در یک دوره سه ساله خشکسالی متوالی پرداخته شده است. علت انتخاب نیاز کشاورزی در میان تمام مصارف پایین‌دست سد، حجم بالای نیاز این بخش در مقایسه با سایر مصارف سد بوده است. با انتخاب این نیاز، می‌توان اثر تنش‌ها را در بحرانی‌ترین حالات بررسی نمود. در اثر اعمال سیاست جیره‌بندی بر مصارف در این دوره، متوسط میزان آب ذخیره‌شده در مخزن در ماه‌های مختلف

- with the Hedging policy procedure and its application in the preparation of the Dosty reservoir rule curve. Sevens Conference of Civil Engineering, Zahedan University. Iran.
- Karami, F., Borhani Dariane, A. (2013). Comparison of Hedging Policies in Reservoir Management under Drought Condition. *Journal of Water and wastewater*. 25(3), 76-85.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, (220), 671-680.
- Marton, D., Kapelan, Z. (2014). Risk and Reliability Analysis of Open Reservoir Water Storages Using Optimization. *Procedia Engineering*. 89, 1478-1485 (In Farsi)
- Ming, B., Chang, J.X., Huang, Q., Wang, Y., Huang, S.Z. (2015). Optimal Operation of Multi-Reservoir System Based-On Cuckoo Search Algorithm. *Journal of Water Resource Management*. 29, 5671-5687.
- Razaghi, P., Babazadeh, H. and Shourian, M. 2014. Development of multi-purpose reservoir operation hedging rule in water resources shortage conditions using MODSIM8.1. *Journal of Water and Soil Resource Conservation*. 3(2), 11-23. (In Farsi)
- Taghian, M., Radmanesh, F., Akhondali, A. and Haghighi, a. 2012. Optimization of hedging Rule for Reservoir Dams via Connecting a Genetic Algorithm to a Simulation Model. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 35(2), 41-50. (In Farsi)
- Zeynali, M.J., Mohammad Reza Pour, O. and Foroghi, F. 2015. Evaluation of Particle Swarm, Genetic and Continuous Ant Colony Algorithms in Optimal Operation of Doroodzan Dam Reservoir. *Journal of Water and Soil sciences*. 25(3), 27-40.