تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۶ (ص ۳۳۳-۳۲۳)

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

زهره سادات موسوی‌رستگار[۱]، ام‌البنی محمدرضا پور[۲]*، امید بزرگ حداد[۳]، محبوبه ابراهیمی[۴]

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: ۲۵/ ۵/ ۱۳۹۵- 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 ازجمله 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 به‌صورت 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

* نویسنده مسئول : nmohammdrezapour@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

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 بیشینه‌سازی تولید انرژی انجام شد و عملکرد الگوریتم فاخته با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید. نتایج نشان دادند، الگوریتم فاخته نتایج مطلوب، قابل‌اطمینان، 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 جیره-بندی اثرات کمبود نیاز پایین‌دست 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 مونت‌کارلو، میزان رهاسازی بهینه را بدست آوردند. نتایج تحقیق نشان داد که روش مورداستفاده 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 به‌تبع آن اقتصاد منطقه دچار بحران می‌گردد. با توجه به این که منبع

Archive of SID

www.SID.ir

اصلی تأمین آب در استان گلستان رودخانه‌ها و مخازن می‌باشند و با کاهش حجم مخزن سد وشمگیر 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 موردمطالعه 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 فرایند 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 j در همسایگی آن حرکت می‌کند و علاوه‌بر پذیرش جوابی که باعث بهبود تابع هدف می‌شود جواب‌های نامطلوب نیز به‌شرطی 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} پارامر کنترل کننده (دما) و f مقدار تابع هدف است. این روند همراه با کاهش دما تا رسیدن به‌شرط توقف تکرار می‌شود و بهترین جواب به‌دست‌آمده در طول اجرای الگوریتم ثبت می‌شود.

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 برازندگی آنها محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه به‌وسیله عملگرهای تزویج[1] و جهش[2] جامعه‌ای جدید با مقادیر برازندگی 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))

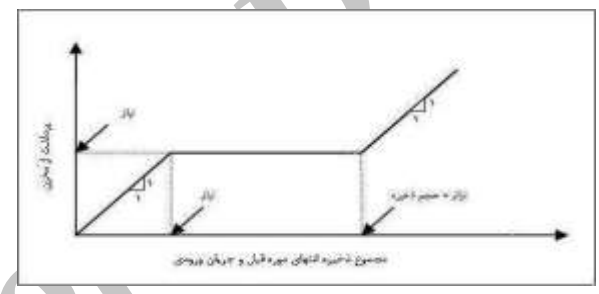
در این سیاست، رهاسازی از مخزن تنها بر اساس نیاز هر دوره انجام می‌پذیرد. بدین معنی که اگر آب کافی برای رفع نیاز موجود نباشد، مخزن خالی و اگر آب بیش از نیاز موجود باشد، مخزن پر شده و سپس سرریز خواهد نمود. این مدل فاقد

1.Crossover
2.Mutation

Archive of SID

www.SID.ir

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 وشمگیر)، 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.

(رابطه ۱)

$$\text{Min TSD} = \sum_{t=1}^{n}\left(\frac{R_t - D_t}{D_{max}}\right)^2 + penalty_{t=1\ldots n_t}$$

$$\text{If } V_t > (S_t + Q_t) \text{ then } \mathrm{R}_t = \frac{1}{\mathrm{K_P}}(\mathrm{S}_t + \mathrm{Q}_t)$$

$$\text{if } S_t < Smin \; penalty = \sum_{\mathrm{t=1}}^{\mathrm{T}}\left(\frac{S_t - \mathrm{Smin}}{\mathrm{Smin}}\right)^2 + 10$$

$$\text{if } S_t \geq \mathrm{Smin} \text{ and } S_t \leq \mathrm{Smax} \; \text{penalty} = 0$$

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

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

که در آن S_tحجم 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_tمقدار آب سرریز شده از مخزن، R_tحجم مقادیر رهاسازی در دوره t، هستند. قیود مورداستفاده در فرایند بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه تک مخزنه شامل محدودیت‌های حجم ذخیره مخزن و مقادیر رهاسازی در هر ماه است. با در نظر گرفتن بیش‌ترین حجم مخزن در هر دوره *Smax* و کم‌ترین حجم مفید مخزن *Smin*، حدود بالا و پایین حجم مخزن در طول فرایند شبیه‌سازی به صورت زیر هستند که به صورت یک قید به سامانه وارد می‌شوند:

$$\mathrm{Smin} \leq \mathrm{S(t)} \leq \mathrm{Smax} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

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

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

$$\boldsymbol{Sp_t} = \begin{matrix} \boldsymbol{S_t + Q_t - \mathrm{Smax}} & \textbf{if} & \boldsymbol{S_t + Q_t > Smax} \\ \boldsymbol{0} & \textbf{if} & \boldsymbol{S_t + Q_t < Smax} \end{matrix}$$

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 تعریف‌شده، قرارگیرد (رابطه ۵).

(رابطه ۵)

سال خیلی خشک	$\frac{\mathrm{i-I}}{\mathrm{S}} < -1$
سال خشک	$-1 < \frac{\mathrm{i-I}}{\mathrm{S}} < -0.5$
سال طبیعی	$-0.5 < \frac{\mathrm{i-I}}{\mathrm{S}} < 0.5$
سال تر	$0.5 < \frac{\mathrm{i-I}}{\mathrm{S}} < 1$
سال خیلی تر	$1 < \frac{\mathrm{i-I}}{\mathrm{S}}$

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

Archive of SID

www.SID.ir

این سیاست، در زمان اعمال کاهش نیاز، نیاز و به‌تبع 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 به‌صورت 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)

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

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

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

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

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 مورداستفاده برای اعمال محدودیت‌های مقادیر رهاسازی در هر ماه نیز به‌صورت رابطه (۸) می‌باشد.

(رابطه ۸)

$$Sp(t) = \begin{matrix} S(t) + Q(t) - Smax & \text{if} \quad S(t) + Q(t) > Smax \\ 0 & \text{if} \quad S(t) + Q(t) < Smax \end{matrix}$$

زمانی جیره‌بندی آغاز خواهد شد که حجم ذخیره به‌علاوه مقدار جریان ورودی کوچک‌تر از مقدار K_p ضرب‌در نیاز ماه باشد و میزان رهاسازی با توجه به رابطه (۹) به دست می‌آید و چنانچه این مقدار بزرگتر باشد،کل نیاز از مخزن تأمین خواهد شد.

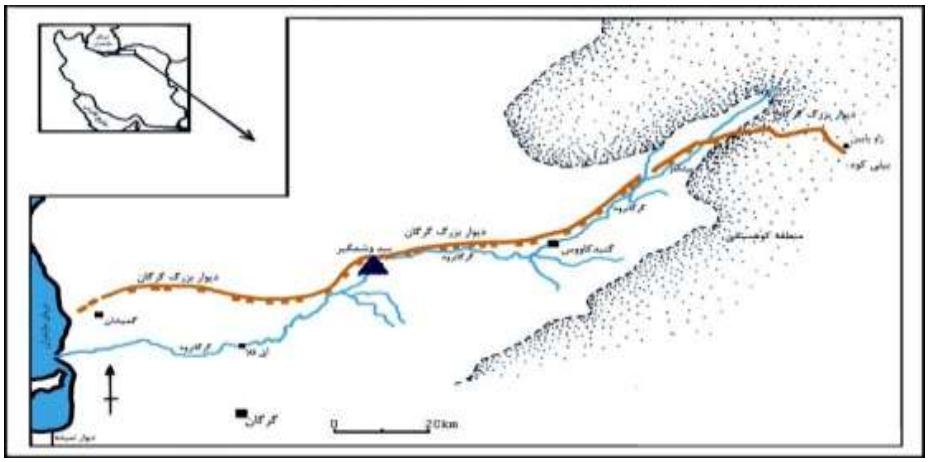
$$R_t = \frac{1}{K_P}(S_t + Q_t) \quad \text{(رابطه ۹)}$$

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، آبزی‌پروری، صنعت، محیط‌زیست و تبخیر از سطح مخازن مصرف می‌شود.

مورد مطالعاتی

منطقه موردمطالعه **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.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه

Archive of SID

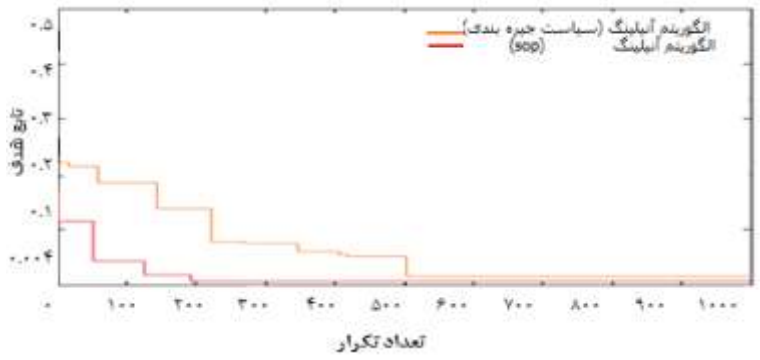
www.SID.ir

نتایج

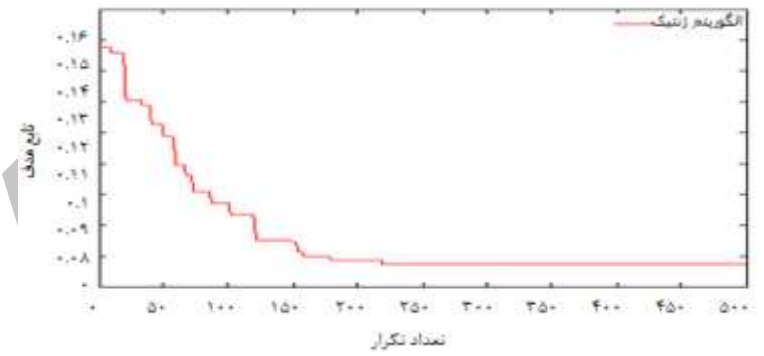
محاسبه ضرایب K_p برای هر ماه سال از طریق سعی و خطا و با توجه به حجم بیشینه و کمینه مخزن توسط الگوریتم‌های موردمطالعه با اعمال سیاست جیره‌بندی انجام شد. سپس مقادیر حجم آستانه هر ماه از سال بر اساس حاصل‌ضرب K_p در نیاز کشاورزی آن ماه به دست آمد. جدول (۱) مقادیر K_p های حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی با اعمال سیاست جیره‌بندی در ماه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۳) مقادیر تابع هدف الگوریتم‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

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

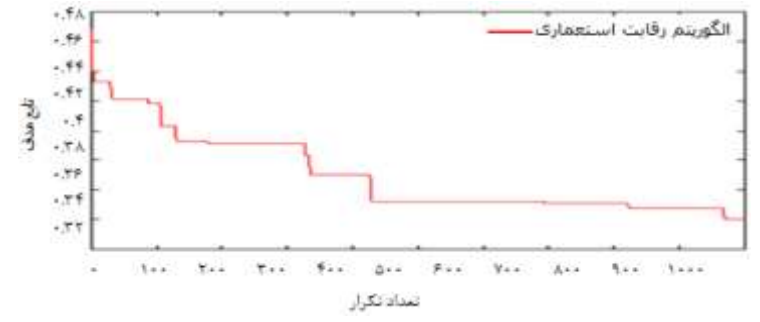
الگوریتم		فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
	k_p	۳	۲/۵۹	۲	۵	۳	۶	۶	۳	۶	۷	۳	۳
آنیلینگ	v_t	۳۸/۶۱	۴۳/۵	۱۱/۵۶	۵۶/۶۵	۳۸/۷۳	۰	۱۵/۸۴	۲۵/۵	۰	۰	۲۱/۷۵	۳۲/۵۵
	k_p	۳/۳۷	۲/۵۹	۲	۳/۸۳	۶/۰۲	۸	۵/۳۵	۸	۸	۲	۸	۴
رقابت استعماری	v_t	۴۳/۵	۴۳/۵	۱۱/۵۶	۴۳/۵	۷۷۷/۷۶	۰	۱۴/۱۳۶	۶۸	۰	۰	۵۸	۴۳/۵
	k_p	۳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



الف



ب

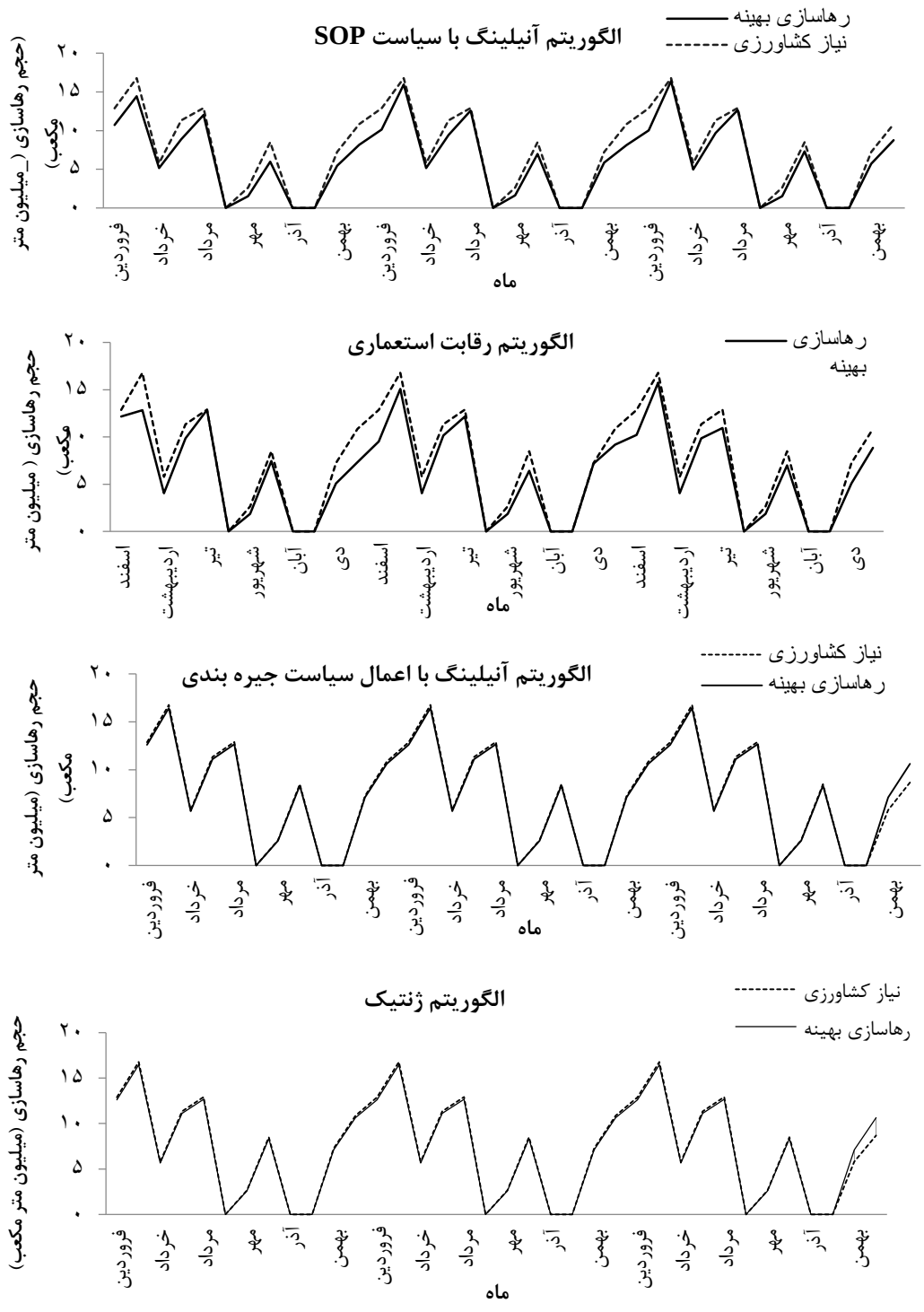


ج

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

www.SID.ir

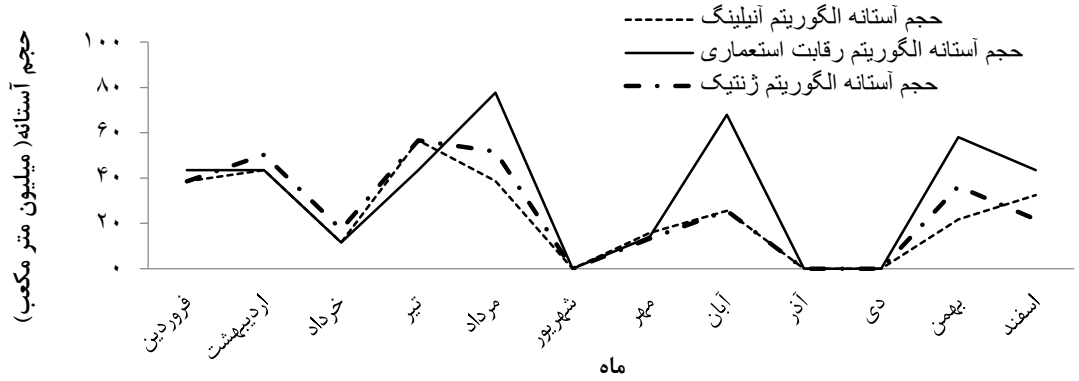
همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد الگوریتم باز پخت با سیاست جیره‌بندی در تکرار مرتبه ۵۰۰ با میزان ۰/۰۰۴۳۶۹ و الگوریتم بازپخت بدون سیاست جیره‌بندی (سیاست بهره‌برداری استاندارد) در تکرار مرتبه ۲۵۰ با میزان ۰/۰۰۱۲۳ به جواب بهینه دست پیدا کرده‌اند. کمتر بودن قیود در الگوریتم بازپخت بدون اعمال سیاست جیره‌بندی نسبت به زمانی که سیاست جیره‌بندی اعمال شده است، باعث شده تا سریع‌تر به 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 موردمطالعه با اعمال سیاست جیره‌بندی و الگوریتم بازپخت با سیاست بهره‌برداری استاندارد را نشان می‌دهد.



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

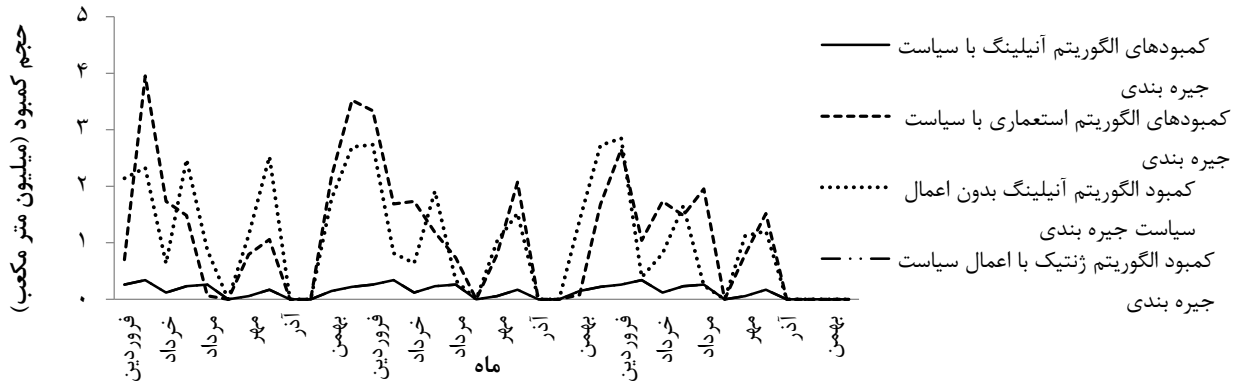
www.SID.ir

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 رقابت استعماری در تأمین نیاز کشاورزی از دو الگوریتم دیگر از توانایی کم‌تری برخوردار می‌باشد. الگوریتم بازپخت و ژنتیک تقریباً از توانایی مشابه ای در تأمین نیاز کشاورزی برخوردار هستند. شکل (۵) حجم آستانه در نظر گرفته‌شده 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.



شکل ۵. مقادیر حجم آستانه توسط الگوریتم‌های بهینه سازی

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 بدین معنا است که در برخی از ماه‌ها درصد عدم تامین 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.

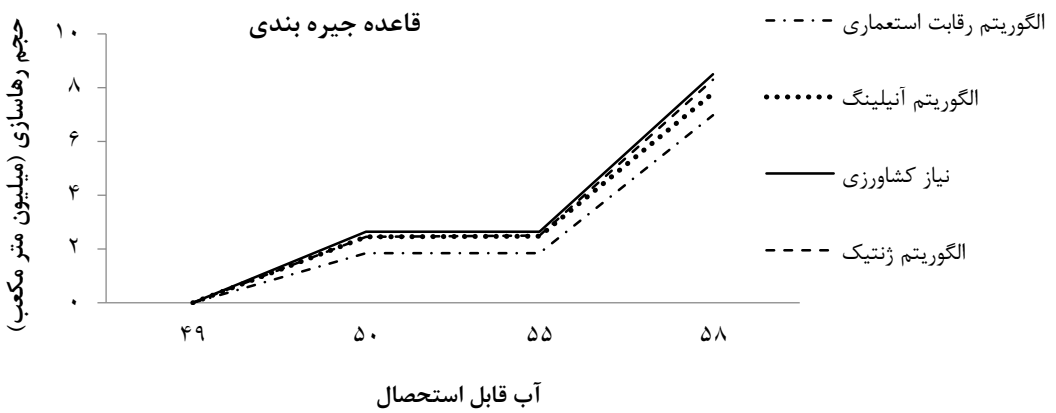


شکل ۶. حجم کمبود توسط الگوریتم های مورد مطالعه (میلیون متر مکعب)

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

Archive
www.SID.ir

الگوریتم رقابت استعماری در زمان خشکسالی می‌باشد که میزان ورودی به مخزن کاهش یافته است. نمودار قاعده جیره‌بندی برای ماه‌های شهریور، مهر و آبان سال ۱۳۸۱ استخراج شده و در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. قاعده جیره‌بندی در الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی

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 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 بهره برداری استاندارد می‌باشد.

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی

روش بهینه‌سازی	شاخص اعتمادپذیری(٪)	شاخص پذیری(٪)	برگشت- پایداری(٪)	آسیب- پذیری(٪)	درصد تأمین(٪)
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

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 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 جیره-بندی 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

Archive of SID
www.SID.ir

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 استاندار با الگوریتم بازپخت دارای کم‌ترین شاخص پایداری می‌باشد که نشان‌دهنده آینده‌نگری سیاست جیره‌بندی نسبت به بهره‌برداری استاندارد می باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بهینه‌سازی رهاسازی نیاز کشاورزی از مخزن سد وشمگیر با اعمال سیاست جیره‌بندی با الگوریتم‌های فراکاووشی 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 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 Manag*. 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.

Archive of SID

www.SID.ir

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 Shorages 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.

Archive of SID

www.SID.ir