

## بهینه‌سازی منحنی فرمان بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با توسعه یک مدل هیبریدی برنامه‌ریزی خطی - الگوریتم ژنتیک

مهرداد تقیان<sup>۱\*</sup>، فریدون رادمنش<sup>۲</sup>، علی محمد آخوند علی<sup>۳</sup> و علی حقیقی<sup>۴</sup>

### چکیده

برای بهره‌برداری از سیستم مخازن، بهره‌برداران معمولاً در عمل از منحنی‌های فرمان پیروی می‌کنند. منحنی فرمان بیانگر مقدار تخلیه مورد نظر از مخزن یا حجم مطلوب ذخیره مخزن در یک بازه زمانی مشخص از سال است. در تحقیق حاضر از ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل شبیه‌سازی ARSP برای بهینه‌سازی منحنی فرمان بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی استفاده شده است. در این مدل هیبریدی، تخصیص آب در هر واحد زمانی با برنامه‌ریزی خطی و جستجوی احجام آستانه منحنی فرمان با تعریف یک برنامه‌ریزی غیرخطی و استفاده از یک الگوریتم ژنتیک ساده انجام شده است. قابلیت مدل توسعه داده شده با تعریف و تحلیل سیستم منابع آب سه مخزنی در رودخانه زهره ارزیابی شد. محاسبات نشان داده است که ترکیب یاد شده، محدودیت‌های مدل سازی را تا حد زیادی مرتفع ساخت، سرعت همگرایی بهینه‌سازی را افزایش داد و کل روند برنامه‌ریزی و مدیریت در سیستم‌های پیچیده بسیار انعطاف‌پذیر کرد.

**واژه‌های کلیدی:** منحنی فرمان، سیستم چند مخزنی، مدل هیبریدی، برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ژنتیک

**ارجاع:** تقیان م. رادمنش ف. آخوندعلی ع. م و حقیقی ع. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی منحنی فرمان بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با توسعه یک مدل هیبریدی برنامه‌ریزی خطی - الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش آب ایران. ۸۳(۹): ۹۰-۸۳

۱- دانشجوی دکتری هیدرولوژی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [Mehrdadtaghian@yahoo.com](mailto:Mehrdadtaghian@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۲۴

مقدمه

در فلات ایران، منابع آبی از جنبه‌های مختلف کمی و کیفی بسیار محدود است. این مهم بهره‌برداری اصولی و بهینه از منابع آب موجود را بیش از پیش ضروری ساخته است. این در حالی است که اغلب سدهای مخزنی در ایران فاقد برنامه‌ریزی بلند مدت و یا الگوهای بهره‌برداری بهینه هستند و عمدتاً بر اساس تجربیات بهره‌برداران اداره می‌شوند. در چند سال اخیر با توسعه روشهای بهینه‌سازی و معرفی روشهای فراکوشی<sup>۱</sup> به طور عام و روش الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) به طور خاص، بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن وارد مرحله تازه‌ای شده است.

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای سیاست‌های بهره‌برداری توسط اولیویرا و لاکس (۱۹۹۷) مطرح شد. واردلا و شریف (۲۰۰۰ و ۱۹۹۹) از دیگر محققانی بودند که استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهره‌برداری از مخزن بررسی کردند و در مقایسه آن با برنامه‌ریزی پویا گسسته تفاضلی<sup>۳</sup> نتایج حاصله را بسیار نزدیک به هم گزارش کردند. چانگ و همکاران (۲۰۰۵) الگوریتم ژنتیک را برای پیدا کردن منحنی فرمان ماهانه بهینه در یک سیستم تک سدی چند هدفه در تایوان به کار بردند. چن و همکاران (۲۰۰۷) الگوریتم ژنتیک چند هدفه پویا<sup>۴</sup> (MMGA) را برای تهیه منحنی فرمان‌برداری در یک سیستم تک مخزنه چند هدفه در تایوان به کار بردند. کانگرانگ و چالیراکتراکون (۲۰۰۷) از ترکیب الگوریتم ژنتیک با نرم افزار HEC3 برای جستجوی منحنی فرمان بهینه استفاده کرده و شش تابع هدف مختلف را برای ارزیابی نتایج و یک تابع میانگین متحرک را برای کاهش نوسانات منحنی فرمان به کار بردند. داریان و ممتحن (۲۰۰۹) سیاست بهره‌برداری خطی و خطی قطعه‌ای را با انجام پارهای اصلاحات در عملگرهای الگوریتم ژنتیک در سیستم‌های چند مخزنه به کار بردند. لبادی (۲۰۰۴) در مروری بر استراتژی‌های حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن، کاربرد الگوریتم ژنتیک در مسائل مذکور را به دو دسته شامل بهینه‌سازی رها کردن آب از مخزن در هر دوره زمانی و بهینه‌سازی پارامترهای سیاست بهره‌برداری از مخزن تقسیم می‌کند. بر این اساس، تحقیقات

انجام شده توسط واردلا و شریف (۲۰۰۰ و ۱۹۹۹) از نوع اول و سایر تحقیقات ذکر شده از نوع دوم هستند. چارچوب بهینه‌سازی بهره‌برداری از نوع اول به قاعده مدل برنامه‌ریزی پویا بر می‌گردد که در آن هیچ پیش فرضی برای سیاست بهره‌برداری به جز گسسته سازی فضای حالت مسأله وجود ندارد. اما در روش دوم متغیرهای تصمیم‌گیری، پارامترهای سیاست بهره‌برداری هستند. لذا با کاهش ابعاد مسأله، محاسبات الگوریتم ژنتیک تا حد زیادی ارتقاء می‌یابد.

در این تحقیق یک مدل الگوریتم ژنتیک ساده به مدل شبیه‌سازی ARSP ملحق می‌شود تا با جستجوی مستقیم منحنی فرمان، سیاست بهره‌برداری از مخازن را به آن دیکته نماید. مدل شبیه‌سازی مذکور خود مجهز به یک الگوریتم برنامه‌ریزی خطی<sup>۵</sup> (LP) برای تخصیص بهینه نیازها در واحد زمانی و تعریف استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری است. بکارگیری مدل ترکیبی فوق جهت اهداف یاد شده، حجم عظیمی از محاسبات سیستم را تسهیل کرده، از دشواری‌های فرایند تکامل در الگوریتم ژنتیک کاسته شده و راندمان بهینه‌سازی و احتمال رسیدن به پاسخ بهینه مطلق را افزایش می‌دهد. همچنین امکان انجام یک شبیه‌سازی با کارایی بالاتر و در نظر گرفتن جزئیات سیستم منابع آب در سیستم‌های پیچیده واقعی را فراهم می‌سازد. مدل ARSP یک برنامه عمومی شبیه‌سازی مخازن است که توسط شرکت کانادایی ایکرز تهیه شده است (سیگوالداسن، ۱۹۷۶) و با تغییرات اندکی به روز رسانی شده است. در این نرم افزار از روش برنامه‌ریزی شبکه جریان<sup>۶</sup> که شامل مجموعه‌ای از مسائل برنامه‌ریزی خطی است، استفاده می‌شود. نقش برنامه‌ریزی خطی موجود در مدل، کمینه‌سازی مجموعه هزینه‌های ناشی از هر سیاست بهره‌برداری در هر گام زمانی ضمن حفظ محدودیت‌های مسأله از جمله اصل بقای جرم در سیستم است. از لحاظ ریاضی برنامه‌ریزی خطی برای یک مسیر منفرد  $(i, j)$  از کمان  $A$  بین کل گره‌های  $(i, j)$  از مجموعه مسیرهای ممکن  $N$  به شرح ذیل است (لیچ، ۲۰۰۹):

$$\forall (i, j) \in N \min \sum_{(i, j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

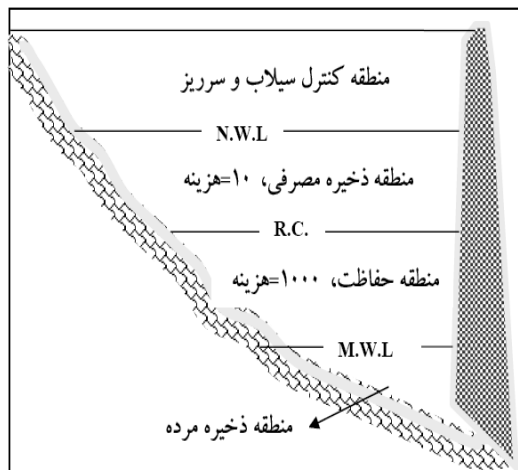
$$\forall i \in N \sum_i x_{ij} - \sum_j x_{ji} = 0 \quad (2)$$

$$\forall (i, j) \in A l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad (3)$$

5- Linear programming  
6- Network flow programming

1- Evolutionary algorithms (GA)  
2- Genetic algorithms  
3- Discrete differential dynamic programming  
4- Macro- evolutionary multi-objective genetic algorithms (MMGA)

و برای تعریف و القا نمودن سیاست بهره‌برداری مورد نظر به کار می‌رود. در این راستا مطابق شکل ۱، حجم مفید مخزن به دو منطقه ذخیره‌ای در حد فاصل مناطق غیر فعال و کنترل سیلاب، تقسیم شده است.



شکل ۱- مناطق مختلف مخزن و هزینه‌ها

در محدوده یک که ذخیره مصرفی نام دارد، هزینه هر واحد کمبود ذخیره از رقوم نرمال حداکثر<sup>۱</sup>، ۱۰ واحد فرض شده است که مطابق جدول ۱ دارای هزینه نسبی کمتری از کمبود خروجی برای تأمین نیازها است. منطقه دو که منطقه حفاظت نام دارد در حد فاصل منحنی فرمان و رقوم حداقل بهره‌برداری<sup>۲</sup> قرار دارد، دارای هزینه ۱۰۰۰ واحد به ازای هر واحد کمبود ذخیره نسبت به منحنی فرمان بهره‌برداری<sup>۳</sup> می‌باشد که بیشتر از هزینه نسبی کمبود در تأمین نیازهای کشاورزی و زیست محیطی و کمتر از هزینه نسبی نیازهای شرب و صنعت است. لذا هرگاه حجم مخزن در منطقه یک قرار گرفت، مدل می‌تواند تا حد نایل شدن به سطح منحنی فرمان برای تأمین کلیه نیازها، آب رها نماید و هرگاه حجم مخزن پایین تر از سطح منحنی فرمان بهره‌برداری قرار گرفت فقط برای تأمین نیازهای شرب و صنعت، رهاسازی صورت می‌گیرد تا از ذخیره مذکور برای تعدیل کمبودهای شدید، بهره‌برداری شود. حداقل هزینه اختصاص یافته ۱۰ واحد در منطقه یک نیز باعث می‌گردد تا آب مازاد بر نیاز رها نشود.

که در آن  $C_{ij}$  میزان هزینه به ازای هر واحد جریان،  $I_{ij}$  حد پایین جریان،  $X_{ij}$  مقدار جریان،  $U_{ij}$  حد بالای جریان در امتداد کمان  $(i,j)$  است. معادله ۱ تعریف کلی مساله حداقل کردن هزینه جریان است. معادله ۲ قانون بقای جرم در هر گره را نمایش می‌دهد. معادله ۳ تضمین می‌کند که برای هر راه حل ممکن موجود، جریان در همه کمان‌ها بین مقادیر حداکثر و حداقل مجاز قرار دارد.

هر سیستم از سیستم‌های منابع آب را می‌توان با یک شبکه نشان داد که در آن جریان ورودی، مخازن، سازه‌های انحراف و نیازها به صورت گره باشند. جریان در سیستم، آبراهه‌ها و لوله‌ها و مناطق ذخیره مخزن نیز به صورت کمان نمایش داده می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری در مساله تخصیص، تعیین بهینه مقادیر جریان در هر یک از کمان‌ها است. تصمیمات بهره‌برداری بستگی به سیستم هزینه‌ای دارد که برای سطوح مختلف ذخیره مخزن و نیازها از پیش تعریف شده است. مقادیر هزینه را کاربر تعیین می‌کند و معمولاً مفهوم صریح اقتصادی ندارند، بلکه بطور نسبی نمایانگر درجه اهمیت هر نیاز نسبت به سایر موارد هستند. در برنامه مزبور برای هر سیاست بهره‌برداری از پیش تعیین شده که در قالب اطلاعات ورودی مشخص می‌شود، راه حل بهینه در هر واحد زمانی (ماه) محاسبه و ارایه می‌شود. هر هدف بهره‌برداری در برنامه دارای هزینه‌ای نسبی خواهد بود که در صورت عدم تأمین هدف، هزینه مزبور اعمال خواهد شد. برنامه بهترین راه حل تخصیص آب در شبکه را با رعایت شرایط و محدودیت‌های مفروض به نحوی ارایه می‌دهد که تابع هزینه نسبی کل شبکه حداقل شود. در این راستا اطلاعات ورودی طی ۱۶ پرونده مفصل به برنامه داده می‌شود و اطلاعات خروجی شامل نتایج محاسبات شبیه‌سازی برای کلیه اجزای اصلی شبکه دریافت می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### مدل سیستم هزینه‌ای مناطق مخزن و نیازها

از ساختار هزینه‌ای<sup>۱</sup> مدل شبیه‌ساز می‌توان به منظور انعکاس ارزش آب ذخیره شده نسبت به ارزش آب جریان یافته برای تأمین نیازهای مختلف، استفاده کرد. لازم به توضیح است این سیستم هزینه‌ای فقط مفهوم نسبی دارد

1- Normal water level  
2- Minimum water level  
3- Rule curve

1- Penalty structure



شکل ۳- الگوریتم کلی تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه سازی

#### مشخصات محدوده و اطلاعات مورد استفاده

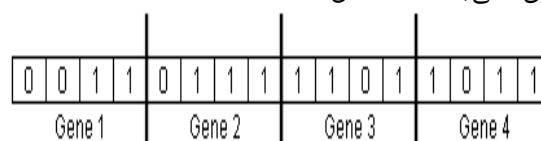
محدوده سیستم منابع آب رودخانه زهره در سه استان فارس، کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان گسترش داشته و لذا هریک بنا به حوزه عملکرد خود پروژه های بزرگ ملی و منطقه‌ای برای بهره‌برداری از منابع آب، تعریف و برنامه‌ریزی کرده‌اند. بر این اساس در شرایط وضع آبی (افق سال ۱۴۰۰)، این سیستم شامل سه گره سد مخزنی، ۷ آبراهه جریان ورودی، ۹ گره شبکه آبیاری و حلقه، ۳ آبراهه انحراف عمومی برای نیازهای شرب و صنعت، ۸ گره اتصالی، ۲ بازه حداقل جریان و تعدادی آبراهه عمومی خواهد بود. مجموع نیازهای مذکور در وضع آبی، بالغ بر ۱۹۵۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که حدود ۱۳ درصد آن به شرب و صنعت، ۱۶ درصد به حق آبه‌های زیست محیطی و ۷۱ درصد به بخش کشاورزی تخصیص یافته است. در این تحقیق، اطلاعات نیازهای مذکور به صورت ماهانه مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر آن آمار آبدی ماهانه ورودی به سیستم برای دوره آماری ۴۸ ساله مد نظر قرار گرفته است. تغییرات سالانه مجموع آبدی‌های ورودی، مطابق شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱- هزینه هر واحد کمبود در تأمین نیازهای مختلف

نوع نیاز	شرب و صنعت	زیست محیطی	کشاورزی
هزینه	۱۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰

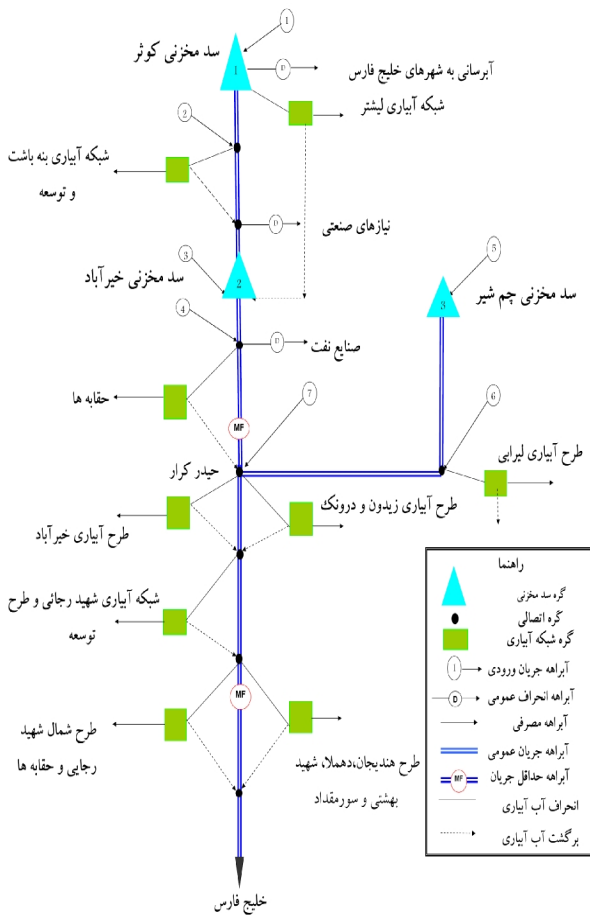
#### تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

هدف از تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی که منجر به یک مدل هیبریدی GA-LP می‌شود، تعیین سطوح ماهانه منحنی فرمان مخازن است. در این شرایط رقوم ماهانه سطح آب در مخزن که معرف منحنی فرمان در هر سد می‌باشند به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی معرفی می‌شوند. الگوریتم ژنتیک یک رشته یا مجموعه‌ای از کروموزوم‌های مصنوعی را تولید می‌کند که هر رشته شامل تعدادی از بلوک‌ها<sup>۱</sup> است و هر کدام از این بلوک‌ها خود بیانگر متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله یا ژن<sup>۲</sup> می‌باشند (شکل ۲).

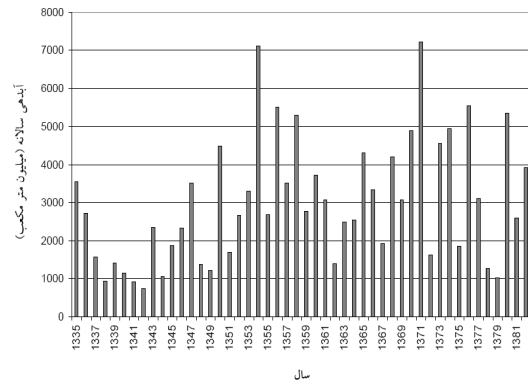


شکل ۲- نمونه ای از یک کروموزوم

پس از تولید این رشته از منحنی‌های فرمان برای مخازن، شبیه‌سازی سیستم با برنامه ARSP برای نمایش عملکرد سیستم با آن منحنی فرمان، تشکیل می‌شود و تخصیص آب به سایر نیازها در هر گام زمانی با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی بهینه می‌گردد. سپس در یک فرآیند تکامل تدریجی با اعمال عملگرهای تزیج و جهش و تولید کروموزوم‌های بهتر، راه حل بهینه و نسل برتر تولید می‌شود (گلدبرگ، ۱۹۸۹؛ میچالویز، ۱۹۹۶). شکل ۳ طرح شماتیک تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۵- پیکربندی حوضه آبریز زهره افق ۱۴۰۰



شکل ۴- آبدهی‌های سالانه ورودی به سیستم

در این آمار، دوره‌های خشکسالی شدید قابل ملاحظه است که برای ارزیابی جامع مدل به کار رفته در این تحقیق، حائز اهمیت می‌باشد. خلاصه مشخصات سد‌های مخزنی در جدول ۲ و پیکربندی شماتیک سیستم در شکل ۵ نشان داده شده است. سایر اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق شامل مقادیر سطح، حجم و ارتفاع مخازن با رسوب گذاری، آب‌های برگشتی ماهانه از شبکه‌ها و تبخیر ماهانه از سطح آزاد مخازن هستند.

جدول ۲- مشخصات سد‌های مخزنی مورد بررسی

سد	رقوم نرمال	رقوم حداقل بهره برداری	حجم کل مخزن	حجم مفید مخزن
کوثر	۶۲۵	۵۸۰	۵۸۰	۴۱۸/۶
خیرآباد	۲۵۹/۶	۲۳۸	۱۷۹/۲	۱۰۴/۷
چم شیر	۵۹۸	۵۲۰	۱۸۶۳/۶	۱۵۷۶/۳

تابع هدف

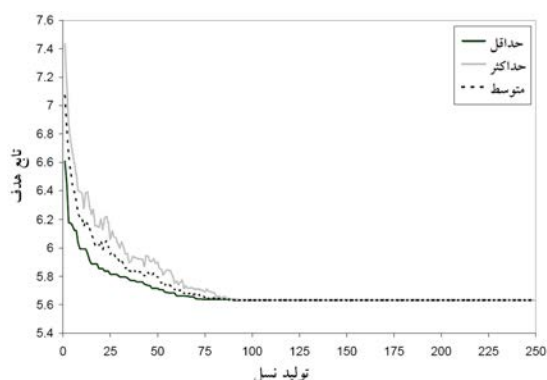
در سیستم‌های تأمین آب غالباً هدف بهره برداری، حداقل سازی خسارت ناشی از پایین آمدن توانایی سیستم در تأمین کل نیازها است. برای حداقل کردن میزان و توزیع کمبود در نیازهای مصرفی می‌توان شاخص کمبود اصلاح شده سو و چنگ (۲۰۰۲) را به کار برد که در آن جنبه های اقتصادی و اجتماعی لحاظ شده است و توسط سایر محققین نیز به کار رفته است (چانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ تو و همکاران، ۲۰۰۸).

در این معادله  $TS_t$  میزان کل کمبود در دوره زمانی  $t$ ،  $TD_t$  میزان کل نیاز در دوره زمانی  $t$ ، تعداد کل دوره های زمانی (ماه) و  $MSI$  شاخص اصلاح شده کمبود است. وجود توان دو در این معادله باعث می‌شود جریمه بالاتری به کمبودهای شدیدتر تعلق گرفته و توزیع کمبودها بهتر صورت گیرد. می توان از شاخص مذکور برای نیازهای مختلف به صورت جداگانه بهره جست و حداقل کردن مجموع آنها را به عنوان تابع هدف منظور نمود.

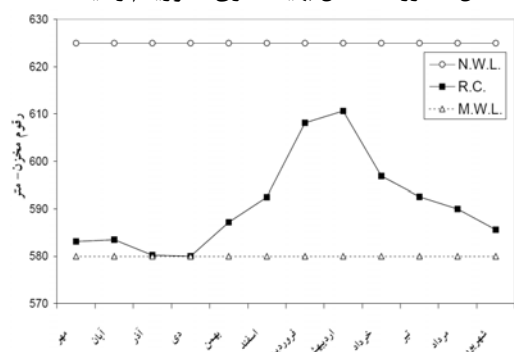
$$Z_t = \min[(MSI)_d + (MSI)_e + (MSI)_a] \quad (5)$$

$$MSI = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left( \frac{TS_t}{TD_t} \right)^2 \quad (4)$$

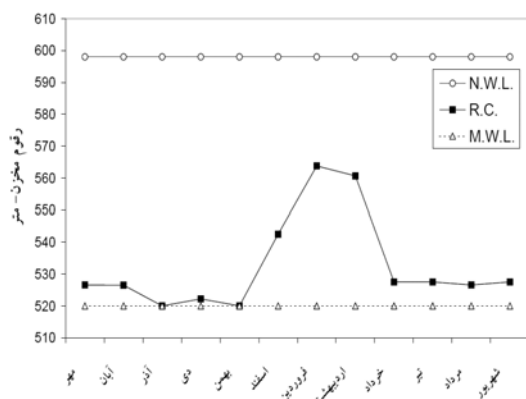
کمبودها در نیازهای شرب و صنعت و زیست محیطی از کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با سیاست بهره‌برداری استاندارد<sup>۱</sup> برخوردار شده است. همین وضعیت در مورد نیازهای کشاورزی که تأمین آن در اولویت بعدی سیستم قرار داشته است، با نسبت کمتر رخ داده است. برای بررسی دقیق تر کارایی روش مورد استفاده، مجموع مقادیر شاخص سالانه کمبود برای نیازهای مختلف در جدول ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۶- روند تکامل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک



شکل ۷- منحنی فرمان بهره‌برداری در سد کوثر



شکل ۸- منحنی فرمان بهره‌برداری در سد چم شیر وجود دوره

در معادله فوق،  $Z_t$  تابع هدف،  $(MSI)_d$ ،  $(MSI)_e$  و  $(MSI)_a$  به ترتیب شاخص اصلاح شده کمبود برای نیازهای شرب و صنعت، زیست محیطی و کشاورزی می‌باشد. لازم به توضیح است از آنجا که اولویت نیازها در ساختار هزینه‌ای مدل شیشه‌ساز مشخص گردیده است، نیازی به اعمال ضرایب وزنی در این معادله نمی‌باشد.

#### اجرای مدل و تعیین منحنی فرمان بهینه

با توجه به حجم ناچیز سد خیرآباد در مقایسه با دو سد دیگر و نیازهای پایاب سیستم، منحنی فرمان آن اثر معنی داری در سیستم نخواهد داشت، لذا برای این سد منحنی فرمان تهیه نشده است. بایستی توجه داشت این به معنای حذف اثر و تنظیم آب آن در سیستم نخواهد بود. بلکه در حقیقت حجم مفید آن دارای منطقه حفاظت ذخیره نخواهد بود و از کل آب موجود در آن تا حد رقوم حداقل بهره برداری، می‌توان در هر ماه استفاده نمود.

بدین ترتیب در سیستم مذکور، منحنی‌های فرمان ماهانه سدهای چم شیر و کوثر بایستی بهینه شوند و لذا تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری در مسأله حاضر شامل ۲۴ مختصات (۱۲ عدد برای هر مخزن) می‌باشد. عملگرهای الگوریتم ژنتیک که در بهینه‌سازی این سیستم در نظر گرفته شده‌اند به قرار ذیل هستند:

تعداد بیتها در هر ژن = ۶، اندازه جمعیت = ۱۰۰، احتمال تزویج = ۰/۵، احتمال جهش = ۰/۰۵ - ۰/۰۰۵. به منظور اخذ جزئیات این عملگرها میتوان به منابع مربوطه مراجعه نمود (هاپت و هاپت، ۲۰۰۴). با توجه به تابع هدف مورد استفاده (معادله ۵) و ساختار مدل برنامه‌ریزی خطی موجود در ARSP، روند همگرایی الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به منحنی فرمان بهینه مطابق شکل ۶ دنبال می‌شود. در نهایت منحنی فرمان بهره‌برداری در سدهای کوثر و چم شیر بر اساس دوره درازمدت آماری، مطابق شکل‌های ۷ و ۸ بدست آمد.

وجود دوره‌های خشکسالی بسیار شدید در آمار درازمدت آبدهی حوضه آبریز، باعث افت شدید ذخیره مخزن در خلال سال‌های مذکور و متعاقب آن سطوح پایین منحنی فرمان بهره‌برداری شده است.

مقادیر شاخص کمبود درازمدت بر اساس کل دوره آماری مورد بررسی، مطابق جدول ۳ نشان می‌دهد با اجرای منحنی فرمان بهینه برآورد شده در این تحقیق، شدت

جدول ۳- ارزیابی عملکرد درازمدت سیستم

مجموع	مقادیر شاخص اصلاح شده کمبود			حالت
	کشاورزی	زیست محیطی	شرب و صنعت	
۶/۹۴	۵/۵۶	۱/۰۴	۰/۳۴	SOP
۵/۶۲	۴/۹۲	۰/۶۰	۰/۱۰	جدید*

\*حالت جدید با اجرای منحنی فرمان بهینه بر مبنای مدل به کار رفته در این تحقیق می‌باشد

جدول ۴- ارزیابی عملکرد سیستم بر اساس شاخص اصلاح شده کمبود در سال‌های شکست

سال آبی								حالت
۱۳۸۰-۸۱	۱۳۴۵-۴۶	۱۳۴۴-۴۵	۱۳۴۳-۴۴	۱۳۴۲-۴۳	۱۳۴۱-۴۲	۱۳۴۰-۴۱	۱۳۳۹-۴۰	
۵/۸۵	۱۷/۷۵	۱۸/۸۰	۲۴/۴۷	۹۴/۸۴	۸۶/۲۴	۵۷/۸۱	۲۷/۱۷	SOP
۷/۲۳	۱۱/۰۶	۱۶/۸۴	۲۴/۲۹	۸۶/۸۳	۶۰/۲۰	۳۸/۷۹	۲۴/۹۷	جدید

### نتیجه گیری

نیز، اثرات مطلوب مدل ترکیبی فوق را نشان می‌دهد. روش پیشنهادی مذکور به دلیل تلفیق دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و انعطاف‌پذیری بالای ساختار هزینه‌ای، امکان تحلیل سیستم‌های پیچیده مانند سیستم‌های چند مخزنه و چند هدفه را با در نظر گرفتن تمام همبستگی‌های عرضی و مکانی جریان‌های ورودی و مولفه‌های مصرف فراهم می‌سازد. لذا به سادگی در بسیاری از مسائل متنوع بهینه‌سازی مربوط به مخازن، قابل پیاده‌سازی و اجرا خواهد بود.

### منابع

- 1- Chang J.F. Chen L. and Chang C.L. 2005. Optimizing reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes* 19:2277-2289.
- 2- Chen L. Mcphee J. and Yeh G.W.W. 2007. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir rule curves. *Advance in Water Resources* 30:1082-1093.
- 3- Dariane A.B. and Momtahan Sh. 2009. Optimization of Multi-reservoir Systems Operation Using Modified Direct Search Genetic Algorithm. *Water Resources Planning and Management* 135(3):141-148.
- 4- Goldberg D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. MA: Addison-Wesley.
- 5- Haupt R.L. and Haupt S.E. 2004. *Practical Genetic Algorithms*. John Wiley & Sons, INC., Publication, Second Edition.
- 6- Hsu N.S. and Cheng K.W. 2002. Network flow optimization model for basin-scale water

در این تحقیق به توسعه یک مدل بهینه‌سازی هیبریدی برنامه‌ریزی خطی-الگوریتم ژنتیک برای جستجوی مستقیم منحنی فرمان بهره‌برداری با تعریف یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی بر پایه حداقل‌سازی شاخص اصلاح شده کمبود در سیستم‌های چند مخزنه پرداخته شد. بدین منظور الگوریتم ژنتیک به عنوان بهینه ساز خارجی به مدل ARSP به عنوان شبیه‌ساز و بهینه‌ساز داخلی متصل شده است. مدل شبیه‌سازی فوق که خود مجهز به فرآیند برنامه‌ریزی شبکه جریان با ساختار هزینه‌ای و موتور برنامه‌ریزی خطی برای حداقل‌سازی هزینه جریان است،

یک بهسازی در بیان جرم سنتی و مسیریابی جریان در شبکه ایجاد می‌نماید و انعطاف‌پذیری مدل را برای مدیریت و برنامه‌ریزی در سیستم‌های پیچیده افزایش می‌دهد. جهت نشان دادن قابلیت‌ها و کارایی ترکیب مدل سازی فوق، سیستم سه مخزنی سدهای کوثر، خیرآباد و چم شیر بر روی رودخانه زهره مد نظر قرار گرفت و منحنی فرمان بهینه مخازن آن استخراج شد. مقایسه و ارزیابی عملکرد درازمدت سیستم بر اساس دوره آبدهی درازمدت ۴۸ ساله که مشتمل بر دوره‌های شدید خشکسالی نیز بوده است، بیانگر قابلیت و کارایی روش مورد استفاده جهت کاهش اثرات کمبودهای شدید در مقایسه با سیاست بهره‌برداری استاندارد می‌باشد. همچنین بررسی دقیق تر این عملکرد در سال‌های کمبود (شکست)

- 11- Oliveira R. and Loucks D. 1997. Operating rules for multi-reservoir systems. *Water Resource Research* 33(4):839–852.
- 12- Sharif M. and Wardlaw R. 2000. Multi-reservoir systems optimization using genetic algorithms: case study. *Computer Civil Engineering* 14(4):255–263.
- 13- Sigvaldason O.T. 1976. A simulation model for operating a multipurpose multi-reservoir system. *Water Resource Research* 12(2): 263–278.
- 14- Tu M.Y. Hsu N.S. Tsai F.T.C. and Yeh W.W.G. 2008. Optimization of hedging rules for reservoir operations. *Water Resource Planning and Management* 134(1):3–13.
- 15- Wardlaw R. and Sharif M. 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. *Water Resource Planning and Management* 125(1):25–33.
- supply planning. *Water Resource Planning and Management* 128(2):102–112.
- 7- Kangrang A. and Chaleerakrakoon C. 2007. Genetic algorithms connected simulation with smoothing function for searching rule curves. *American Journal of Applied Sciences* 4: 73-79.
- 8- Labadie J.W. 2004. Optimal operation of multi reservoir systems. State-of-the-art review. *Water Resources Planning and Management* 130(2):93–111.
- 9- Llich N. 2009. Limitation of network flow algorithms in river basin modeling. *Water Resources Planning and Management* 135(1):48–55.
- 10- Michalewicz Z. 1996. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. Springer-Verlag, New York, Third Edition