

استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن تحت تأثیر تغییر اقلیم

پریساسادات آشفته*^۱، امید بزرگ‌حداد^۲

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱/۲۶)

چکیده

در بهره‌برداری بهینه از مخزن سدها باید آثار تغییر اقلیم بررسی شود. در این تحقیق، برای استخراج منحنی‌های فرمان توسط GP، میزان جریان ورودی به مخزن و حجم ذخیره آن و تقاضای پایین دست مخزن در شرایط تغییر اقلیم محاسبه شد. مقادیر بهینه خروجی از مخزن آیدوغموش (آذربایجان شرقی) در دوره آتی با رویکرد کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای نسبی ماهیانه در تخصیص تقاضای آبیاری در شرایط تغییر اقلیم و بر اساس آورد رودخانه تعیین شد. برای بررسی سیاست‌های تخصیص، دو وضعیت در نظر گرفته می‌شود. بررسی‌ها نشان داد سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در شرایط تغییر اقلیم باید تغییر کند. در ادامه، شاخص‌های کارایی مخزن در شرایط تغییر اقلیم محاسبه و با مقادیر متناظر آن در دوره پایه مقایسه شد. نتایج نشان داد در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه شاخص اطمینان‌پذیری ۱۰۰ درصد افزایش، آسیب‌پذیری ۶ درصد کاهش، و برگشت‌پذیری ۱۷ درصد افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: شاخص‌های کارایی، معیارهای عملکرد، منحنی فرمان.

مقدمه

بدون شک در دوره‌های آتی، فعالیت‌های بشری از حد کنونی بیشتر می‌شود و به واسطه آن میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر نیز افزایش خواهد یافت. این افزایش باعث تشدید تغییرات در متغیرهای اقلیمی کره زمین خواهد شد که در دوره‌های آتی می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر سامانه‌های مختلف، از جمله منابع آب و کشاورزی، بگذارد. با توجه به نقش مهم مخازن در تأمین نیازهای آبی در بخش‌های مختلف مصرف، بهره‌برداری بهینه از این سامانه‌ها در شرایط تغییر اقلیم دارای اهمیت است. بنابراین، با در نظر گرفتن منحنی‌های فرمان بهینه می‌توان بهترین سطح رهاسازی از مخازن را در شرایط تغییر اقلیم تعیین کرد. محققان بسیاری از منحنی‌های فرمان بهره گرفته‌اند؛ مثلاً در قاعده تصمیم‌گیری که Karamouz and Houck (1982) به کار برد رهاسازی از مخزن تابعی از حجم ذخیره و جریان ورودی در نظر گرفته شد. این قاعده را محققان دیگر، از جمله Moradi-Jalal (2007)، نیز به کار برده‌اند. روش‌های مختلفی برای استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن وجود دارد. از این روش‌ها روش الگوریتم‌های تکاملی است که الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) زیرمجموعه آن است. Ahmed

and Sarma (2005) از GA همچون ابزاری برای بهینه‌سازی تک‌مخزن استفاده کردند. آن‌ها قاعده بهره‌برداری قطعه‌ای-خطی را به کار بردند. در تحقیق آن‌ها جریان ماهیانه مصنوعی در طول صد سال به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۲ تولید شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد سیاست‌های مستخرج از GA کارآمدتر از سیاست‌های مستخرج از برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)^۳ است. در استخراج قاعده بهره‌برداری بهینه با استفاده از GA یک رابطه ریاضی باید برای رهاسازی و دیگر پارامترهای بهره‌برداری از مخزن، همچون حجم ذخیره مخزن و جریان ورودی به مخزن، برقرار شود. ولی از آنجا که استخراج این رابطه مستلزم بررسی همه روابط موجود در مسئله بهره‌برداری است، این موضوع بسیار وقت می‌گیرد. پس، استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)^۴ ضروری به نظر می‌رسد. در این روش، علاوه بر یافتن مقادیر پارامترها، رابطه بهینه بهره‌برداری به خودی خود استخراج می‌شود. محققان مختلف از این ابزار برای موضوعات مربوط به منابع آب بهره گرفته‌اند که در ادامه تشریح می‌شود. Sivapragasam et al (2008) با استفاده از GP هیدروگراف جریان با اوج‌های متعدد را برای رودخانه‌ای در امریکا روندیابی کردند. نتایج حاکی از آن بود که

2. Artificial Neural Network
3. Stochastic Dynamic Programming
4. Genetic Programming

* نویسنده مسئول: Pashofteh@ut.ac.ir

1. Genetic Algorithm

جریان ورودی به مخزن و تقاضای پایین دست مخزن در شرایط تغییر اقلیم محاسبه شود و سپس رابطه‌ای بر اساس جریان ورودی به مخزن، حجم ذخیره آن، و تقاضای پایین دست مخزن در شرایط تغییر اقلیم در شروع هر دوره در نظر گرفته شود. بنابراین، در شرایط تغییر اقلیم اساساً در نظر گرفتن تقاضای پایین دست به منزله یکی از متغیرهای مستقل ضروری است که در تحقیقات پیشین به آن پرداخته نشده است. در این تحقیق مقادیر بهینه خروجی از سامانه تک مخزنه آیدوغموش در دوره آتی (۲۰۲۶-۲۰۳۹) با رویکرد کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای نسبی ماهیانه، توسط GP، در تخصیص تقاضای آبیاری در شرایط تغییر اقلیم و بر اساس آورد رودخانه در وضعیت متناظر تعیین می شود و شاخص‌های کارایی در شرایط بهینه سازی مخزن در شرایط تغییر اقلیم محاسبه و با مقادیر متناظر آن در دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۰۰) مقایسه می شود.

مواد و روش‌ها

در این بخش روش‌های مورد نیاز برای این تحقیق ارائه می شود. مراحل اصلی انجام دادن این تحقیق در شکل ۱ می آید.

شبیه سازی داده‌های اقلیمی

پیش نیاز برآورد حجم جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آبیاری شبیه سازی داده‌های اقلیمی برای دوره آتی است. در این تحقیق برای شبیه سازی سناریوهای اقلیمی از مدل HadCM3 و سناریوی انتشار A2 استفاده شد (Ashofteh et al, 2013a).

برآورد حجم جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آبیاری در شرایط تغییر اقلیم

در گام اول، برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن در دوره آتی از مدل نیمه مفهومی IHACRES استفاده می شود که با استفاده از ورودی‌های اقلیمی رواناب را استخراج می کند و سپس حجم جریان ورودی به مخزن محاسبه می شود (Ashofteh et al, 2013a). در گام دوم، پس از تعیین نیاز آبیاری محصولات در دوره آتی، بر اساس سطح کشت ثابت، حجم تقاضای آبیاری در ماه‌های مختلف در دوره آتی به دست می آید. در این روش برای تعیین تبخیر و تعرق گیاهی از روش فائو ۲۴ و برای تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل از روش فائو پنمن-مانتیس استفاده شد (Ashofteh et al, 2013a).

مدل‌های بهره برداری از مخزن

تابع هدف در مسائل تخصیص آبیاری می تواند به صورت کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای نسبی در تخصیص به آن

GP با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۷۳ نتایجی مناسب تر از رابطه ماسکینگهام با RMSE برابر ۳/۲۶ ارائه کرده است. Sivapragasam et al (2008) تبخیر از دو مخزن در هند را با استفاده از GP مدل سازی کردند. نتایج تبخیر محاسبه شده از GP با روش پنمن-مانتیس و مقادیر واقعی مقایسه شدند. نتایج GP، به رغم وابستگی به کمیت و کیفیت داده‌ها، نزدیکی بسیار زیادی با داده‌های واقعی داشت. آن‌ها مقدار افت سطح آب مخزن ناشی از تبخیر را با استفاده از GP به پارامترهایی نظیر درجه حرارت، سرعت باد، ساعت آفتابی، نم نسبی، و سطح و عمق آب مخزن در دو هفته قبل از هر دوره وابسته کردند. Wang et al (2009) کارایی روش‌های مختلف را برای پیش گویی جریان آب دهی ماهیانه دو رودخانه مقایسه کردند. آن‌ها روش‌های میانگین متحرک خودهمبسته (ARMA)، ANN، سامانه استنتاج فازی مصنوعی (ANFIS)، GP، و ماشین برداری پشتیبان (SVM) را به کار بردند و از معیارهای ضریب همبستگی (R)، ضریب کارایی نش-ساتکلیم (NSE)، RMSE، و میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) برای مقایسه روش‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد ANFIS و GP و SVM نسبت به سایر روش‌ها در بخش آموزش و صحت سنجی عملکرد مناسب تری دارند. از طرفی GP و ANFIS در مدل سازی اوج‌های جریان توانا ترند. همان طور که اشاره شد، GP علاوه بر یافتن مقادیر پارامترها، رابطه بهینه بهره برداری را نیز استخراج می کند. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته برای استخراج منحنی فرمان رابطه خطی یا غیر خطی از جریان ورودی به مخزن و حجم ذخیره مخزن در شروع هر دوره در نظر گرفته شده و بعضاً حجم تقاضای آب در هر ماه ثابت لحاظ شده است. Karamouz and Houck (1982) یک قاعده تصمیم گیری خطی (LDR) را معرفی کردند که دربرگیرنده حجم ذخیره و جریان ورودی در شروع دوره بهره برداری است؛ که برای دستیابی به رهاسازی مناسب با سه ضریب ثابت تعدیل می شوند. این قاعده تصمیم گیری را محققان دیگر، از جمله Bozorg Haddad et al (2008)، به کار گرفتند. قاعده بهره برداری قطعه‌ای-خطی برای یک سامانه تک مخزنه را Oliveira and Loucks (1997) پیشنهاد کردند. آن‌ها رهاسازی هدف را با استفاده از آب قابل دسترس و جریان ورودی تعیین و سپس رهاسازی‌ها را از هر مخزن بر اساس رهاسازی هدف محاسبه کردند.

در این تحقیق برای کاربرد منحنی‌های فرمان استخراج شده توسط GP در شرایط تغییر اقلیم ابتدا باید میزان

تقاضای آبیاری در ماه t ، R_t میزان رهاسازی در ماه t ، D_{Max} میزان حجم بیشینه تقاضای آبیاری، S_t و S_{t+1} میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای ماه t ، Q_t میزان حجم جریان ورودی به مخزن سد در ماه t ، ev_t ارتفاع تبخیر از دریاچه سد در ماه t ، S_{Max} حجم بیشینه مخزن، S_{Min} حجم مرده مخزن، S_{pt} میزان حجم سرریز از مخزن در ماه t ، n طول بازه زمانی برنامه ریزی، Art سطح مخزن در ماه t ، a و b ثابت‌های منحنی سطح-حجم ذخیره مخزن است.

برای تضمین ارضای با قیدهای ۳ و ۴ و ۵ از تابع جریمه (PF) استفاده می‌شود:

$$PF_1 = A \left(\frac{|S_{Min} - S_{t+1}|}{S_{Max} - S_{Min}} \right)^2 + B \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$PF_2 = A \left(\frac{|S_{Min} - S_{t+1}|}{S_{Max} - S_{Min}} \right)^2 + B \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$PF_3 = E \left(\frac{|R_t|}{D_t} \right) + F \quad (\text{رابطه ۹})$$

PF_1 و PF_2 و PF_3 ، به ترتیب، تابع جریمه و ضرایب A تا F ثابت‌های مثبت تابع جریمه‌اند.

قواعد بهره‌برداری از مخزن

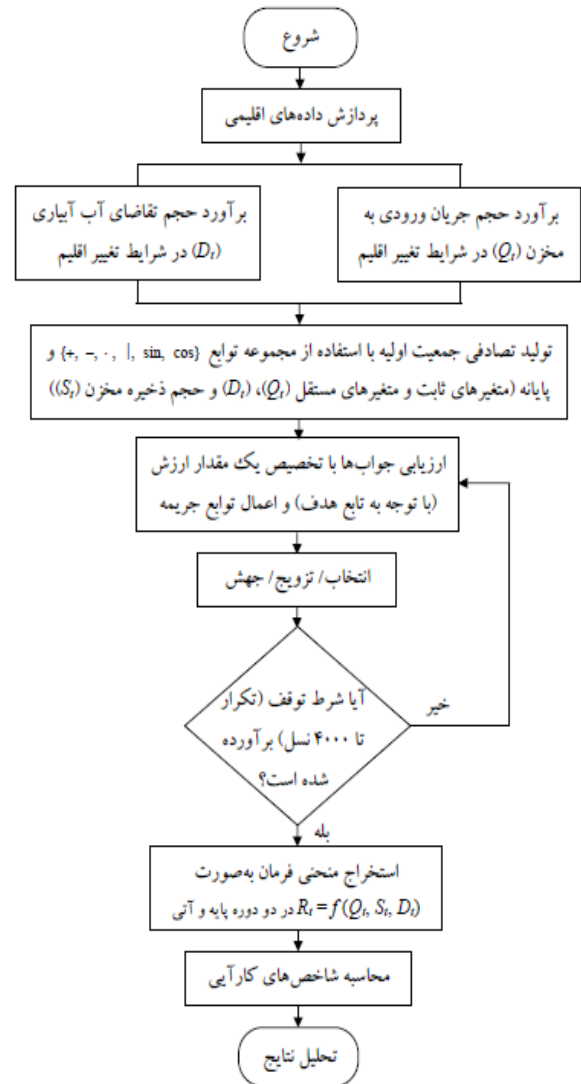
در این تحقیق حجم رهاسازی تابعی از پارامترهای تصمیم‌گیری، همچون حجم جریان ورودی و حجم ذخیره و حجم تقاضای آب در پایین‌دست مخزن، با هدف تأمین آب آبیاری در دو دوره پایه و آبی است که رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ آن را نشان می‌دهد:

$$R_{tb} = f_1(S_{tb}, Q_{tb}, D_{tb}) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$R_{tf} = f_2(S_{tf}, Q_{tf}, D_{tf}) \quad t = 1, 2, \dots, T$
 R_{tb} ، Q_{tb} ، S_{tb} و D_{tb} به ترتیب رهاسازی، جریان ورودی، حجم ذخیره، و تقاضای آبیاری در دوره پایه و R_{tf} ، Q_{tf} ، S_{tf} و D_{tf} به ترتیب رهاسازی، جریان ورودی، حجم ذخیره، و تقاضای آبیاری در دوره آبی و $f_1(1)$ و $f_2(1)$ منحنی فرمان به ترتیب در دو دوره پایه و آبی است.

شاخص‌های کارایی مخزن

در این تحقیق از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری، و برگشت‌پذیری استفاده شد. در صورتی که هدف مخزن تأمین نیاز آبیاری باشد، شاخص اطمینان‌پذیری به صورت احتمال تأمین درصد معینی از تقاضاها در یک بازه زمانی مشخص



شکل ۱. مراحل مختلف تحقیق

در هر ماه باشد. بنابراین، تابع هدف و قیودات مربوطه می‌توانند مطابق رابطه‌های ۱ تا ۶ در نظر گرفته شوند:

$$\text{Minimize Def} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{D_t - R_t}{D_{Max}} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - Sp_t - (ev_t \times Ar_t / 1,000) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$S_{Min} \leq S_t \leq S_{Max} \quad (\text{رابطه ۳})$$

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

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\begin{cases} Sp_t = S_t + Q_t - (ev_t \times Ar_t / 1,000) - S_{Max} \\ Sp_t = 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\text{if } S_t + Q_t - (ev_t \times Ar_t / 1,000) \geq S_{Max}$$

$$\text{else if}$$

Def تابع هدف در تخصیص به آبیاری، D_t مجموع میزان

مطابق رابطه ۱۲ تعریف می‌شود:

$$\alpha = P\{X_t \in Sa\} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

α شاخص اطمینان‌پذیری، X_t وضعیت سامانه در بازه زمانی t ام، Sa حالت مطلوب سامانه، و P احتمال تأمین در بازه زمانی t ام است.

شاخص آسیب‌پذیری می‌تواند به صورت بزرگی شکست‌های سامانه به حجم کل تقاضای آبیاری طبق رابطه ۱۳ تعریف شود:

$$v = \frac{\sum_{j \in Fa} (D_t - R_t)_j}{V_t} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

v شاخص آسیب‌پذیری، $D_t - R_t$ حجم کمبود در بازه زمانی t ام، و V_t حجم کل تقاضا در بازه زمانی t ام است.

شاخص برگشت‌پذیری نشان‌دهنده احتمال بازگشت سامانه به حالت مطلوب (Sa) پس از حالت شکست (Fa) است. برگشت‌پذیری سامانه در افق برنامه‌ریزی به صورت رابطه ۱۴ قابل تعریف است:

$$\beta = P\{X_{t+1} \in Sa | X_t \in Fa\} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

β شاخص برگشت‌پذیری و Fa حالت شکست سامانه (کمبود تأمین آب آبیاری) است.

برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

هر الگوریتم GP دارای یک درخت اجزاست. درخت اجزا درختی متشکل از گره و اتصال است. برای ساخت الگوریتم، فیزیک مسئله به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول مجموعه پایانه TS (اتصال در درخت اجزا) نامیده می‌شود که شامل همه

پارامترهای مستقل و ثابت‌ها است و مقادیر این مجموعه فقط با توجه به طبیعت مسئله مورد نظر تعیین می‌شود. بخش دوم مجموعه توابع FS (گره در درخت اجزا) نامیده می‌شود که شامل همه عملگرها یا رابطه‌های ریاضی است. مثلاً بخش دوم می‌تواند شامل عملگرهای حسابی (+، -، ×، /) و توابع ریاضی مانند لگاریتم و جذر و توابع سینوسی و غیره، با توجه به پیچیدگی مسئله، باشد (Loucks and Van Beek, 2005). مراحل کلی حل مسئله با GP به صورت زیر است:

۱. تولید تصادفی جمعیت اولیه از عبارتهای جبری (مجموعه‌ای که می‌تواند برای انتخاب متغیرها و عملگرها در فرآیند جست‌وجو به کار رود از سوی کاربر معرفی می‌شود)؛
۲. ارزیابی هر یک از جواب‌ها و اختصاص مقادیر ارزش (تابع هدف متناظر) بسته به چگونگی حل مسئله و در صورت نیاز اعمال توابع جریمه بر مقادیر تابع هدف؛
۳. تشکیل نسل بعدی با استفاده از عملگر ژنتیک تزویج؛
۴. اعمال عملگر ژنتیک جهش به طور تصادفی؛
۵. تکرار مراحل ۲ و ۳ و ۴ تا ثابت‌ماندن بهترین تابع هدف پس از تعداد تکرار معین.

ویژگی اجرای بهره‌برداری از مخزن

در این تحقیق، GP برای بهره‌برداری از مخازن به کار رفت. بدین منظور از GP در جعبه ابزار MATLAB 9.0 (Overman, 2011) استفاده شد. ویژگی‌های به‌کاررفته در این روش در جدول ۱ می‌آید.

جدول ۱. ویژگی‌های روش GP در بهره‌برداری از مخزن

تعداد تکرار (معیار توقف)	تعداد کروموزوم (تعداد دخت)	توابع به‌کاررفته برای مجموعه Fu	عمق درخت	احتمال جهش	احتمال تزویج
۴۰۰۰	۵۰	{+, -, ×, ÷, sin, cos}	۳	متغیر	متغیر

منطقه مطالعه‌شده و تعریف وضعیت‌ها

جدول ۲. مشخصات حوضه و مخزن و شبکه پایاب

مشخصات	
وسعت	۱۸۰۲ کیلومتر مربع
حوضه	آبدهی سالیانه رودخانه
	طول رودخانه
میانگین بارش سالیانه	۳۷۸ میلی‌متر
وسعت شبکه آبیاری پایاب	۱۳۵۰۰ هکتار
تراز نرمال سد	۱۳۴۱٫۵ متر از سطح دریا
مخزن	ظرفیت کل
	حجم مرده
	a و b (ثابت‌های منحنی سطح-حجم ذخیره $(Ar_t = aS_t + b)$)

مطالعه موردی و داده‌ها

منطقه مطالعاتی این تحقیق حوضه آیدوغموش است که در استان آذربایجان شرقی قرار دارد (Ashofteh et al, 2013a). مشخصات حوضه و مخزن و شبکه پایاب آن در جدول ۲ می‌آید. به دلیل آنکه ایستگاه‌های موجود در حوضه داده‌های دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ را پوشش می‌دهند، این دوره دوره پایه در نظر گرفته شد. اطلاعات الگو و سطح زیر کشت محصولات در محدوده طرح در جدول ۳ می‌آید.

در این تحقیق، برای تولید سناریوی اقلیمی، از مدل HadCM3 استفاده شد. در گام اول، با معرفی داده‌های اقلیمی

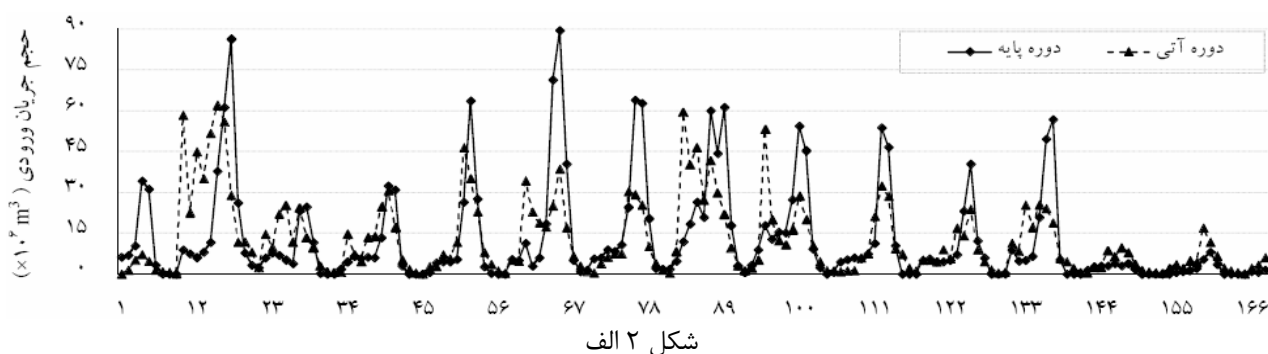
(Ashofteh et al, 2013a).

نتایج نشان داد حجم جریان ورودی در دوره آتی ۰/۷ درصد نسبت به دوره پایه کم شد. این در حالی است که حجم تقاضای آب آبیاری در دوره آتی نسبت به دوره پایه ۱۶ درصد افزایش داشت (Ashofteh et al, 2013a).

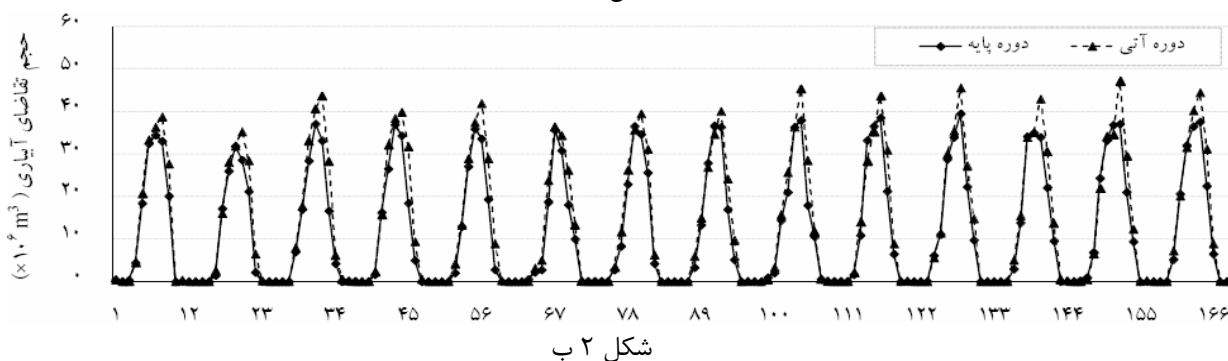
کوچک مقیاس شده حوضه در دوره آتی به مدل نیمه مفهومی واسنجی شده IHACRES رواناب آتی شبیه سازی شد. نتایج در شکل ۲ الف می آید (Ashofteh et al, 2013a). در گام دوم، بر اساس داده های اقلیمی در دوره آتی، حجم تقاضای ماهیانه آبیاری در دوره آتی به دست آمد که نتایج در شکل ۲ ب می آید

جدول ۳. مجموع سطح زیر کشت هر محصول در شبکه آبیاری (Ashofteh et al, 2013a)

نام محصول	گندم	جو	یونجه	سویا	ذرت علوفه ای	ذرت دانه ای	سیب زمینی	باغات (گردو)
سطح زیر کشت (هکتار)	۱'۶۱۰	۱'۰۸۰	۱'۶۲۰	۱'۰۸۰	۶۷۵	۱'۰۸۰	۱'۶۲۰	۴'۷۲۵



شکل ۲ الف



شکل ۲ ب

شکل ۲. مقایسه تغییرات (الف) حجم جریان ورودی به مخزن و (ب) حجم تقاضای آبیاری در دوره پایه و آتی (Ashofteh et al, 2013a)

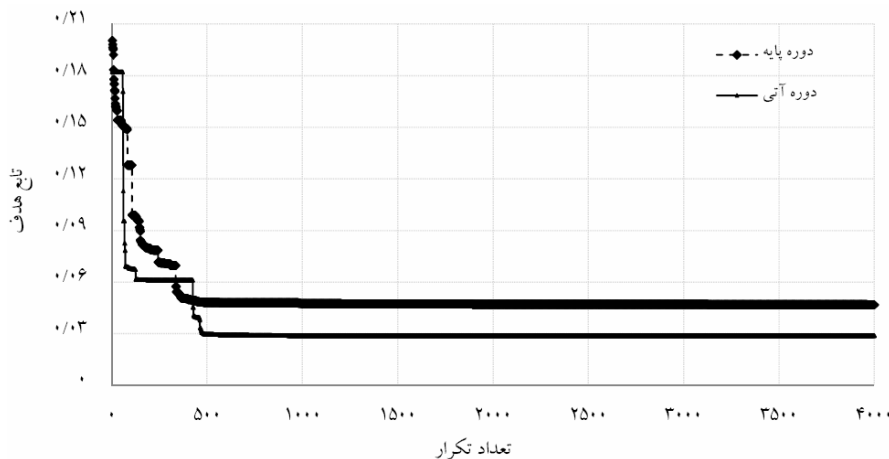
پرداخته می شود. در قاعده استخراج شده با GP، حجم ذخیره مخزن، جریان ورودی به مخزن، و تقاضای آب آبیاری در پایین دست مخزن در شروع هر دو دوره پایه و آتی در منحنی فرمان بهره برداری در نظر گرفته شد. شکل ۳ روند مقادیر نزولی تابع هدف را (کمینه کردن مجموع مجذور کمبودهای نسبی) در دو دوره، همراه مقادیر بهینه تابع هدف، نشان می دهد. می توان نتیجه گرفت که GP در نهایت همگرا می شود و در دوره آتی با تابع هدفی برابر ۰/۰۲۹ نسبت به دوره پایه با تابع هدفی برابر ۰/۰۴۷ عملکرد بهتری دارد. رابطه های ۱۵ و ۱۶ قاعده های توسعه داده شده با کمترین مقدار تابع هدف به ترتیب برای دوره پایه و آتی است:

وضعیت های بررسی شده

در این تحقیق، برای بررسی سیاست های بهره برداری مناسب و تخصیص مطلوب، دو وضعیت در نظر گرفته شد؛ وضعیت اول، در نظر گرفتن قواعد فعلی بر اساس حجم تغییرات جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آب آبیاری در شرایط پایه، وضعیت دوم، در نظر گرفتن قواعد آتی بر اساس حجم تغییرات جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آب آبیاری در شرایط تغییر اقلیم.

یافته ها و بحث

در این بخش به بررسی نتایج استخراج منحنی فرمان در سامانه تک مخزنه آیدوغموش در دو دوره پایه و آتی به وسیله GP



$$Def_f = 0.029$$

$$Def_b = 0.047$$

شکل ۳. تغییرات تابع هدف در چهار هزار تکرار برای دو دوره پایه و آتی (Def_b و Def_f به ترتیب تابع هدف برای دوره پایه و آتی)

دوره آتی کمتر شده که بر اثر افزایش رهاسازی ایجاد شده است (شکل ۴ ب). در شکل ۴ پ میزان سرریز در دوره آتی کمتر شده است؛ چون اولاً حجم جریان ورودی در دوره آتی فقط ۰.۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش یافته (شکل ۲ الف) و ثانیاً در دوره آتی اوج جریان ورودی، که در دوره پایه عمدتاً در دو ماه آوریل و می است، کاهش یافته و در عوض در ماه‌های آگوست و سپتامبر بالا رفته است (Ashofteh et al, 2013a). به منظور بررسی بیشتر اینکه آیا قواعد به کاررفته در دوره پایه قابل کاربرد برای دوره آتی هست یا نه، شرایط و اطلاعات آتی با قواعد فعلی به کار برده شد و آن قواعد یک بار با شرایط و اطلاعات پایه و بار دیگر با شرایط و اطلاعات آتی همراه قواعد بهینه مربوط به خود مقایسه شد (شکل ۵).

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، قواعد فعلی با شرایط پایه برای شرایط آتی مناسب نیست. برای بررسی بیشتر این موضوع از معیارهای ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای مطلق (MAE)، و کارایی نش-ساتکلیف استفاده شد (Ashofteh et al, 2013b) (جدول ۴).

(رابطه ۱۵)

$$R_{ib} = 0.2 \cos \left[\frac{Q_{ib}(S_{ib} - 0.4)}{(0.08D_{ib} + 0.3Q_{ib})(S_{ib} - 2)} \right] + 0.2 \cos \left[\frac{3Q_{ib}}{0.7D_{ib} - 0.9} \right] + 0.2 \cos \left[\frac{3Q_{ib}}{Q_{ib} - 0.6D_{ib}} \right] + 0.2 \cos \left[\frac{0.7Q_{ib}}{D_{ib}} \right] + 0.2 \cos [0.5Q_{ib}] - \frac{0.09S_{ib}}{(0.45 + 0.05D_{ib})} + 0.2S_{ib} + 0.05D_{ib} + 0.05$$

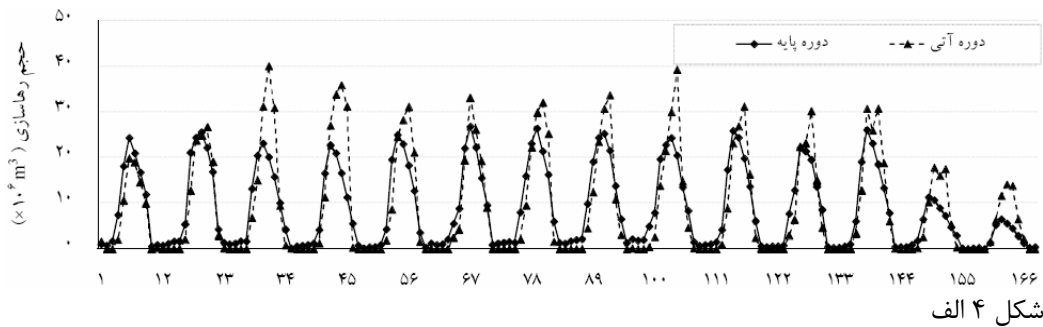
(رابطه ۱۶)

$$R_{if} = [0.001S_i - 0.0002D_{if}] - \{5D_{if} + 0.02 + 0.2 \left[0.00001 + 0.007D_{if} - 0.001S_{if} + 0.002S_{if} \sin(Q_{if}) + 0.001 \left(\frac{Q_{if} + 0.04}{S_{if}} \right) \right] \times \left[4D_{if} + \frac{0.98}{Q_{if}Q_{if}} + \frac{1.98}{S_{if}} + \frac{2.3D_{if}}{Q_{if}} \right] \}$$

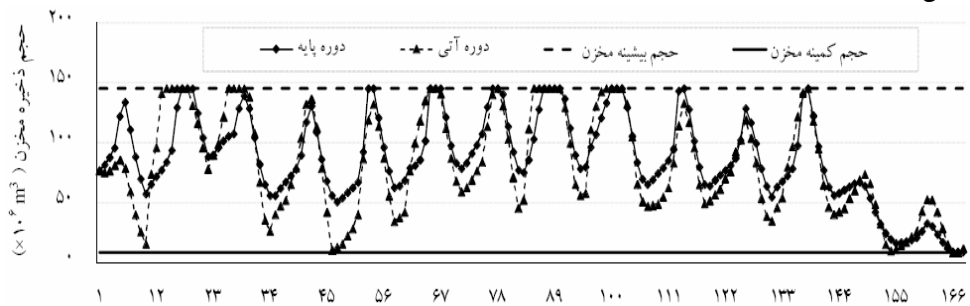
در گام بعدی، تغییرات آب رهاسازی شده از مخزن، آب ذخیره شده در مخزن، و حجم سرریز شده از مخزن با قاعده GP در دوره‌های پایه و آتی بررسی شد. نتایج در شکل‌های ۴ الف تا ۴ پ می‌آید. همان‌طور که در شکل ۴ الف ملاحظه می‌شود، میزان رهاسازی در دوره آتی بیشتر شده است. این موضوع به دلیل افزایش حجم تقاضای آب در دوره آتی به میزان ۱۶ درصد (Ashofteh et al, 2013a) است (شکل ۲ ب). مدل ناگزیر میزان رهاسازی را افزایش داده است. همچنین میزان ذخیره مخزن در

جدول ۴. مقایسه معیارهای عملکرد در دو وضعیت تحت بررسی در تأمین تقاضای آب آبیاری (میانگین بلندمدت ماهیانه) در دوره آتی

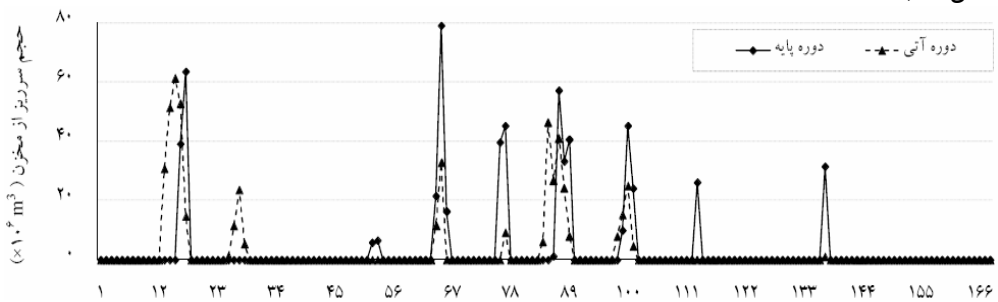
معیار عملکرد				وضعیت
$(\times 10^6 m^3)$	$(\times 10^6 m^3)$	$(\times 10^6 m^3)$	r (%)	
NSE	MAE	RMSE		
-۰.۳۳	۶.۸۲	۱۱.۳۶	۰.۸۴	قواعد فعلی با شرایط آتی
۰.۷۳	۴.۷۵	۸.۰۵	۰.۹۳	قواعد آتی با شرایط آتی



شکل ۴ الف

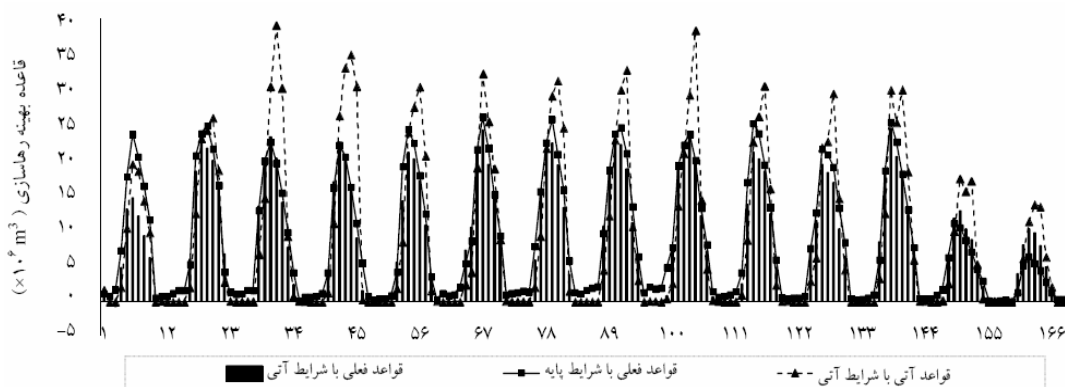


شکل ۴ ب



شکل ۴ پ

شکل ۴. تغییرات (الف) حجم آب رهاسازی شده از مخزن و (ب) حجم ذخیره شده در مخزن و (پ) حجم سرریز شده از مخزن بر اساس قاعده استخراج شده از GP با توجه به تغییرات حجم تقاضای آبیاری و حجم جریان ورودی



شکل ۵. مقایسه قواعد فعلی رهاسازی با شرایط آبی و قواعد آبی رهاسازی با شرایط آبی

تغییر کند و بهینه شود. در گام بعد، به منظور بررسی عملکرد مخزن در تحویل تقاضای آب آبیاری بر اساس حجم آورد رودخانه، مقادیر معیارهای کارایی در دو دوره پایه و آبی مقایسه شدند که در جدول ۵ می‌آید.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد در وضعیت قواعد فعلی با شرایط آبی شاخص‌های خطا عملکرد نسبی پایین‌تری نسبت به قواعد آبی با شرایط آبی در تأمین تقاضای آب آبیاری در دوره آبی دارد. بنابراین، سیاست‌های بهره‌برداری در شرایط آبی باید

جدول ۵. مقایسه معیارهای کارایی در بهره‌برداری از مخزن در دوره‌های پایه و آتی

دوره	اطمینان‌پذیری	آسیب‌پذیری	برگشت‌پذیری
	(درصد)	(درصد)	(درصد)
پایه (۱۹۸۷-۲۰۰۰)	۶۱	۳۳	۲۱
آتی (۲۰۲۶-۲۰۳۹)	۳۰	۳۵	۱۸

همان‌طور که جدول ۵ نشان می‌دهد، شاخص اطمینان‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم ۳۰ درصد است که کمتر از دوره پایه، یعنی ۶۱ درصد، است. در مورد شاخص اطمینان‌پذیری تعداد ماه‌هایی که کمبود دارند تعیین‌کننده‌اند نه مقدار کمبود. بنابراین بسته به اینکه یک مقدار معین در کل دوره به چه نحو در طول ماه‌های آن دوره توزیع شود شاخص اطمینان‌پذیری تغییر خواهد کرد. در شرایط تغییر اقلیم، از آنجا که میزان کمبود در ماه‌های کمتری توزیع شده، این شاخص کاهش یافته است. نتایج شاخص آسیب‌پذیری نشان می‌دهد در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه این شاخص افزایش می‌یابد و وضعیت آن بدتر می‌شود. در شرایط تغییر اقلیم با توجه به کاهش جریان ورودی به مخزن و افزایش حجم تقاضای آب آبیاری این شاخص تا حدودی زیاد شده است. در مورد برگشت‌پذیری، نتایج نشان می‌دهد در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه این شاخص کاهش می‌یابد. در این شاخص تعداد ماه‌های تأمین و کمبود تعیین‌کننده‌اند، نه مقدار تأمین و کمبود. بنابراین بسته به اینکه یک مقدار تأمین معین پس از یک مقدار کمبود معین در کل دوره به چه نحو در طول ماه‌های آن بازه وجود دارد، شاخص برگشت‌پذیری تغییر خواهد کرد. میزان جریان رهاسازی در دوره آتی بیشتر می‌شود (شکل ۴ الف) که این آب اضافی به دلیل کاهش سرریز در آتی تأمین می‌شود (شکل ۴ پ)؛ ولی به دلیل افزایش تقاضای آب در دوره آتی تفاوت بین تقاضای آبیاری و آب تحویلی در دوره آتی بیشتر می‌شود و این موضوع به بدتر شدن شاخص‌های کارایی مخزن در دوره آتی می‌انجامد.

نتیجه‌گیری

به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد آیدوغموش با هدف تأمین آبیاری در شرایط تغییر اقلیم از ابزار GP استفاده شد. تابع هدفی به صورت کمینه‌کردن مجموع مجذور کمبودهای نسبی در تخصیص به آبیاری در نظر گرفته شد. قواعد بهره‌برداری بهینه از مخازن برای دوره پایه و آتی استخراج شد. تغییرات آب رهاسازی‌شده، آب ذخیره‌شده، و حجم سرریز شده

از مخزن با قاعده GP در دوره‌های آتی و پایه بررسی شد و نتایج نشان داد میزان رهاسازی در دوره آتی بیشتر شده؛ که به دلیل افزایش حجم تقاضای آب در دوره آتی به میزان ۱۶ درصد است. میزان ذخیره مخزن در دوره آتی کمتر شده؛ که نتیجه افزایش رهاسازی است. میزان سرریز در دوره آتی کمتر شده؛ چون در دوره آتی اوج جریان ورودی، که در دوره پایه عمدتاً در دو ماه آوریل و می بوده، کاهش و در عوض در ماه‌های آگوست و سپتامبر افزایش یافته است. بنابراین در دوره آتی عملکرد سد در استفاده بیشتر از جریان ورودی و به تبع آن کاهش جریان سرریز بهتر شده است. پس، به تمهیدات سازه‌ای، از جمله افزایش ارتفاع مخزن، نیاز نیست. بررسی‌های بیشتر معیارهای عملکرد نشان داد قواعد فعلی با شرایط پایه برای شرایط آتی مناسب نیست. بنابراین، سیاست‌های بهره‌برداری و تخصیص برای شرایط آتی باید تغییر کند. در ادامه، برای مقایسه عملکرد مخزن در دوره‌های پایه و آتی از شاخص‌های اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده شد. نتایج نشان داد در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه شاخص اطمینان‌پذیری افزایش (۱۰۰٪)، آسیب‌پذیری کاهش (۶٪)، و برگشت‌پذیری نیز افزایش (۱۷٪) خواهد یافت.

نمادها و علائم

- a و b : ثابت‌های منحنی سطح-حجم ذخیره مخزن
- Ar_t : سطح مخزن در ماه t ام ($Ar_t = aS_t + b$)
- A تا F : ثابت‌های مثبت تابع جریمه
- Def : تابع هدف در تخصیص به آبیاری
- D_{Max} : میزان حجم بیشینه تقاضای آبیاری
- D_t : مجموع میزان تقاضای آبیاری در ماه t ام
- ev_t : ارتفاع تبخیر از دریاچه سد در ماه t ام
- $f_1(1)$ و $f_2(1)$: منحنی فرمان، به ترتیب در دو دوره پایه و آتی
- Fa : حالت شکست سامانه (کمبود تأمین آب آبیاری)
- MAE : متوسط خطای مطلق
- n : طول بازه زمانی برنامه‌ریزی
- NSE : کارایی نش-ساتکلیف
- PF_1 و PF_2 و PF_3 : تابع جریمه
- P : احتمال تأمین در بازه زمانی t ام
- Q_t : میزان حجم جریان ورودی به مخزن سد در ماه t ام
- r : ضریب همبستگی
- $RMSE$: جذر میانگین مربعات خطا
- R_t : میزان رهاسازی در ماه t ام

V_t : حجم کل تقاضا در بازه زمانی t ام
 X_t : وضعیت سامانه در بازه زمانی t ام
 α : شاخص اطمینان پذیری
 β : شاخص برگشت پذیری
 ν : شاخص آسیب پذیری

S_a : حالت مطلوب سامانه
 S_{Max} : حجم بیشینه مخزن
 S_{Min} : حجم مرده مخزن
 Sp_t : میزان حجم سرریز از مخزن در ماه t ام
 S_t و S_{t+1} : میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای ماه t ام

REFERENCES

- Ahmed, J. A. and Sarma, A. K. (2005). "Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir", *Water Resources Management*, 19 (2), 145-161.
- Ashofteh, P. S., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A. (2013a). "Climate change impact on reservoir performance indices in agricultural water supply", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (2), 85-97.
- Ashofteh, P. S., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M. A., (2013b). "Scenario assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change", *Water Resources Management*, 27 (1), 255-274.
- Bozorg Haddad, O., Afshar, A., and Mariño M. A. (2008). "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs", *Journal of Hydroinformatics*, 10 (3), 257-264.
- Karamouz, M. and Houck, M. H. (1982). "Annual and monthly reservoir operating rules", *Water Resources Research*, 18 (5), 1337-1344.
- Loucks, D. P. and Van Beek, E. (2005). "Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications", Chapter: Studies and Reports in Hydrology, *Data-based models*, UNESCO Publishing, Paris, 160-161.
- Moradi-Jalal, M., Bozorg Haddad, O., Karney, B. W., and Mariño, M. A. (2007). "Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas", *Agricultural Water Management*, 90 (1-2), 149-159.
- Oliveira, R. and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multireservoir systems", *Water Research*, 33 (4), 839-852.
- Overman, E. (2011). "A MATLAB tutorial", Department of Mathematics, the Ohio State University, Columbus. OH. USA. 180 pp.
- Sivapragasam, C., Mahewaran, R., and Venkatesh, V. (2008). "Genetic programming approach for flood routing in natural channels", *Hydrological Processes*, 25 (5), 623-628.
- Wang, W. C., Chau, K. W., Cheng, C. T., and Qiu, L. (2009). "A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series", *Journal of Hydrology*, 374 (3-4), 294-306.