تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶
Volume 13, No. 4, Winter 2018 (IR-WRR)
۱-۱۶

برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز با استفاده از تلفیق مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA)

احسان محسنی‌زاده[۱] و مجتبی شوریان[۲*]

چکیده

تخصیص منابع آب با اطمینان‌پذیری مطلوب و رعایت اولویت‌های تخصیص به نیازهای آبی نیازمند مدیریت یکپارچه حوضه آبریز[۱] می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های این موضوع، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب در سالهای اخیر بسیار کارگشا بوده است. بنا به خصوصیات روشهای مختلف مورد استفاده در برنامه‌ریزی منابع آب، می‌توان بیان داشت که فرآیند برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز مستلزم استفاده توأم از یک مدل شبیه‌سازی جامع با قابلیت لحاظ نمودن جزییات عناصر موجود در سطح حوضه آبریز و یک الگوریتم بهینه‌سازی با قابلیت درنظرگیری تعداد زیادی متغیر تصمیم و سرعت همگرایی مناسب به سمت جواب بهینه سراسری و همچنین عدم نیاز به تغییر شکل روابط و معادلات حاکم بر مسأله می‌باشد. در این راستا در تحقیق حاضر، مسأله بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه آبریز گرگانرود با استفاده از تلفیق مدل MODSIM بعنوان مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته[۲] بعنوان الگوریتم بهینه‌ساز و توسعه مدل COA-MODSIM مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. تابع هدف مسأله در یک حالت حداکثرسازی حجم تأمین نیازها و در حالتی دیگر حداکثرسازی اعتمادپذیری تأمین و متغیرهای تصمیم مقادیر رهاسازی از مخازن موجود در حوضه گرگانرود (سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر) می‌باشند. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد قابل قبول رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مورد استفاده در تحقیق برای حل مسأله برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز می‌باشد. بررسیها نشان می‌دهند که درشرایط رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی نسبت به شبیه‌سازی وضع موجود، میزان تأمین نیازهای آبی حوضه با لحاظ جـریانهای آب برگشتی در حدود ۳۶ ٪ افزایش و جریان خروجی از حوضه در حدود ۲۴ ٪ کاهش می‌یابد. این نتایج بیانگر اهمیت اتخاذ سیاستهای بهره‌برداری بهینه از مخازن سیستم به منظور افزایش میزان تأمین نیازهای آبی و کاهش اتلاف منابع آبی در سطح حوضه آبریز می‌باشد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی منابع آب، تخصیص بهینه، حوضه آبریز، MODSIM، الگوریتم بهینه‌سازی Cuckoo.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۲/۲۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Basin Scale Optimum Water Resources Allocation Planning by Coupling MODSIM and Cuckoo Optimization Algorithm

E. Mohsenizadeh[1] and M. Shourian[2]*

Abstract

Optimal allocation of water resources with flexibility to meet the water demands and priorities in allocations will require the integrated river basin management. To overcome the complexity of this approach, the use of water resources planning models has been very useful in the recent years. In this research the optimum water allocation in the Gorganroud River basin was investigated through coupling MODSIM model as the simulation engine and Cuckoo Optimization Algorithm (COA) as an optimization engine developing the COA-MODSIM model. The objective function in one case was to maximize the supply's volume for the demands and in another case to maximize the reliability of supply. Results indicated acceptable performance of the simulation-optimization model used to solve the problem of optimal allocation of water resources at the basin scale. It is also shown that the simulation-optimization model increased the amount of water supply in the basin considering the return flows by %36 and decreased the outflow from the basin by about %24 compared to the simulation of the status quo. These results indicated the significance of the optimal allocation policies to increase the water supply and reliability and to reduce the loss of water resources in the basin.

Keywords: Water Resources Planning, Optimum Allocation River Basin, MODSIM, Cuckoo Optimization Algorithm.

Received: November 17, 2016

Accepted: May 12, 2017

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2-Assistant Professor, Department of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_shourian@sbu.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

امروزه مسأله آب، در بسیاری از نقاط جهان، به فاکتور محدود کننده توسعه، در بخشهای مختلف تبدیل گردیده است. این در حالی است که با افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی، توسعه بخش‌های مختلف صنعتی، اقتصادی و کشاورزی آب اهمیتی روز افزون پیدا کرده و تقاضا برای آن روز به روز افزایش می‌یابد. از این رو محدودیت منابع آب تجدیدپذیر از طرفی و افزایش مصرف آب از سوی دیگر باعث شده تا بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب موجود بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. معضل کمبود آب در اقلیم‌های خشک مانند خاورمیانه که کشور ما ایران نیز جزیی از این ناحیه محسوب می‌شود، نسبت به سایر مناطق دیگر کاملاً چشمگیر می‌باشد. به طوری که ایران در میان کشورهای آسیایی، بالاترین رقم نسبت میزان استحصال آب به میزان آب قابل استحصال را دارد. لذا برنامه‌ریزی تخصیص عادلانه و بر اساس توسعه پایدار، بسیار با اهمیت می‌شود. توجه به توسعه پایدار در برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب خود مستلزم لحاظ کردن شاخص‌های بسیار و گوناگونی بوده که می‌بایست در کنار هم و به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرند.

با توجه به پیچیدگی‌های موضوع برنامه‌ریزی تخصیص کارآمد آب، مدل‌های ریاضی این فرصت را فراهم می‌کند که فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با سیستم منابع آب و روابط حاکم بین نقاط عرضه و تقاضا، شبیه‌سازی گردد. به طور کلی مدل‌های تخصیص مدیریت منابع آب به سه نوع شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تقسیم می‌شوند. مدل‌های شبیه‌سازی با استفاده از مجموعه‌ای از روابط و پارامترها به پیش‌بینی رفتار سیستم می‌پردازند و رفتار سیستم منابع آب را مطابق با یک مجموعه از قوانین (واقعی یا فرضی) حاکم بر تخصیص‌های آب و بهره‌برداری از سازه‌ها بازسازی می‌کنند. اساس مدل‌های بهینه‌سازی بر بیشینه یا کمینه نمودن یک تابع هدف می‌باشد که بر اساس تعدادی از متغیرهای تصمیم و قیودات از پیش تعیین شده استوار بوده و مقادیر بهینه تخصیص‌ها را بر اساس مقدار تابع هدف (معمولاً اقتصادی) و مطابق با قیود به دست می‌آورند. نقطه قوت مدل‌های شبیه‌سازی توانایی آنها در لحاظ کردن سیستم‌های منابع آب با کلیه اجزاء و جزییات ممکن است، اما حل بسیاری از مسائل منابع آب نیازمند استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی می‌باشد. مدل‌های بهینه‌سازی کلاسیک نیازمند تعریف روابط ریاضی تابع هدف و قیود به اشکال خاص (نظیر خطی، غیر خطی، مختلط عدد صحیح و ...) بوده تا قادر به حل آنها باشند، لذا دقت شبیه‌سازی سیستم در آنها کاهش یافته و عموماً با مشکل ابعادی و محاسباتی مواجه هستند. به منظور حل این مشکلات امروزه استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی که در آن شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم منابع آب توأما انجام می‌شود مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، با استفاده از ترکیب یک مدل شبیه‌سازی و یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی مسائل مدیریت بهینه منابع آب در ابعاد بزرگ مقیاس حوضه‌ای قابل حل است.

در این راستا، Shourian et al. (2008) به منظور تعیین سیمای بهینه منابع آب بالا دست حوضه سیروان از تلفیق MODSIM (به عنوان یک شبیه‌ساز) و الگوریتم بهینه‌سازی هوش دسته ذرات (PSO^3) بهره گرفتند. Ghadami et al. (2009) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب استفاده کردند. Karimi (2011) مدل‌های MODSIM و WEAP را به عنوان دو مدل پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت حوضه آبریز در نحوه تخصیص آب به نیازها مقایسه نمود. Rahimi et al. (2015) برای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیر زمینی، با بهره‌گیری از الگوریتم PSO در محیط MODSIM و مدل حل اختلاف نش که یکی از رویکردهای تئوری بازی‌ها است، سیستم منابع آب سد بوکان را مورد مطالعه قرار دادند و تحت رویکردهای همکارانه و غیر همکارانه به ارزیابی سناریوهای تخصیص آب به ذینفعان پرداختند. Ahmadi et al. (2015) با استفاده از تلفیق WEAP و MODFLOW یک مدل پویای برنامه‌ریزی به منظور تخصیص منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود توسعه دادند. Hosseini-Moghari et al. (2015) عملکرد الگوریتم‌های ژنتیک[4]، رقابت استعماری[5] و فاخته را در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از سد کارون ۴ مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که الگوریتم COA توانایی قابل ملاحظه‌ای در یافتن جوابهای مطلوب برای مسأله مذکور نسبت به روشهای GA و ICA دارد. Parsapour-Moghaddam et al. (2015) با استفاده از تلفیق تئوری بازی و الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی، برنامه‌ریزی بهینه منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت رفسنجان را مورد مطالعه قرار دادند. Kheirandish and Farzin (2016) با هدف تأمین نیاز شرب، صنعت و تأمین حقابه پایین‌دست، برنامه‌ریزی تخصیص سد کمال صالح را با استفاده از نرم‌افزار WEAP که یک مدل مناسب برای تخصیص منابع آب به نیازهای مختلف می‌باشد مدل‌سازی کردند.

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز حاکی از توجه روزافزون به رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در حل مسائل منابع آب می‌باشد. در تحقیق حاضر نیز با استفاده از این رویکرد حل مسأله تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز گرگان‌رود مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور،

استفاده از یک مدل شبیه سایز با قابلیت محاسبه تخصیص در هر گام زمانی و کدنویسی یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی و درون‌گذاری مدل شبیه‌سازی به عنوان ابزار ارزیابی تابع برازندگی آن و در نتیجه توسعه مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی گام‌های اصلی تحقیق حاضر می‌باشند. با استفاده از مدل MODSIM 8.1 (Labadie, 2006) بعنوان یک مدل جامع شبیه‌سازی مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز، عملکرد بخشی از سیستم حوضه گرگان‌رود تحت تأثیر سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر شبیه‌سازی شده و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسأله که سیاستهای بهره‌برداری از مخازن سیستم هستند، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته تحت هدف بیشینه‌سازی سود خالص ناشی از تخصیص آب تعیین خواهد شد.

۲- برنامه‌ریزی تخصیص بهینه با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی: COA-MODSIM

رویکرد اصلی این تحقیق استفاده از مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) به صورت توأم و در قالب یک برنامه یکپارچه به منظور تخصیص بهینه منابع آب در حوضه آبریز گرگانرود می‌باشد. علیرغم قابلیت‌های شاخص مدل MODSIM، این مدل اساساً یک مدل شبیه‌سازی بهره‌برداری از سیستم منابع آب همراه با تخصیص منابع آب بین مصارف در مقیاس حوضه آبریز و تحت ابعاد و سیاستهای تخصیص معلوم برای المان‌های مختلف ذخیره، انتقال و انحراف آب است. به عبارت دیگر مدل، به خودی خود قادر به تعیین سیما، طراحی و تعیین ابعاد بهینه اجزای مذکور و یا تعیین سیاستهای بهره‌برداری بهینه از مخازن نیست. بلکه رفتار یک سیستم منابع آب در سطح حوضه آبریز را تحت سناریوهای مشخص و از پیش تعیین شده مطالعه و بررسی می‌کند. لذا به منظور نیل به سیمای توسعه مطلوب و یا سیاستهای بهره‌برداری بهینه از مخازن مورد نظر در یک سیستم منابع آب نیاز به اتصال این مدل به یک الگوریتم بهینه‌سازی با متغیرهای تصمیم طراحی یا بهره‌برداری از اجزای مذکور می‌باشد. بر این اساس تلفیق مدل شبیه‌سازی شبکه جریان در سطح حوضه آبریز MODSIM و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) در حل مسأله تخصیص آب در حوضه گرگانرود پیگیری شده است. هدف از حل مسأله در نظر گرفته شده در سیستم تحت بررسی، بهینه‌یابی مقادیر ذخیره آب در مخازن سیستم در گام زمانی ماهانه بعنوان متغیرهای بهره‌برداری مسأله می‌باشد.

با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی در محیط Custom Coding مدل MODSIM به زبان VB.NET می‌توان مقادیر متغیرهای مورد نظر مسأله را در هر بار اجرای مدل برابر با مقادیر دلخواه درنظرگرفت و نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی رفتار سیستم را به ازای مقادیر مذکور آنالیز کرد. با برنامه‌نویسی الگوریتم COA در این محیط و درون‌گذاری مدل MODSIM در آن، مقادیر متغیرهای تصمیم که میزان حجم ذخیره ماهانه در طول دوره شبیه‌سازی در مخازن سیستم هستند برابر با مقادیر تولید شده توسط الگوریتم فاخته در هر تکرار درنظر گرفته می‌شود. سپس به ازای این مجموعه از مقادیر متغیرهای بهره‌برداری، با اجرای مدل شبیه‌ساز، توابع سود خالص ناشی از تخصیص آب به گره‌های نیاز سیستم متناظر با آن سیاست بهره‌برداری از مخازن محاسبه می‌گردد. فاخته‌ها به سمت مقادیری همگرا می‌شوند که بیشترین مقدار تابع هدف را که برابر با سود خالص ناشی از بهره‌برداری سیستم در طول افق برنامه‌ریزی و با درنظرگیری قیود مسأله می‌باشد، دربرداشته باشد. قیود این مدل بهینه‌سازی شامل قیدهای حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم و همچنین قیود برقراری شرط پیوستگی و همچنین حدود کرانهای جریان در مجاری شبکه در هر گام زمانی می‌باشند. لذا با اتصال الگوریتم COA به مدل MODSIM و توسعه مدل COA-MODSIM، مسأله برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز با رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی قابل حل است. بر این اساس، روند عملکرد مدل COA-MODSIM در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱- MODSIM، مدل جامع شبیه‌سازی حوضه آبریز

مدل MODSIM یک سیستم پشتیبان در تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب و بهره‌برداری چند منظوره از مخازن، مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی و با قابلیت درنظرگیری سازوکارهای حاکم بر مناسبات اداری و قانونی استفاده از منابع آب می‌باشد. این مدل از روش برنامه‌ریزی شبکه جریان[۶] یا NFP برای محاسبه مقادیر تخصیص آب بین گره‌های نیاز و ذخیره در هر گام زمانی استفاده می‌کند. در این مدل مسأله حداقل‌کردن هزینه شبکه جریان و به عبارتی تخصیص بهینه آب بین مصارف متعدد به صورت تکراری در هر گام زمانی حل می‌شود. فرمول‌بندی عمومی الگوریتم NFP که در هر گام زمانی در MODSIM استفاده می‌شود به شکل زیر است:

$$\text{Minimize} \sum_{l \in A} c_l q_l \qquad (۱)$$

$$\text{subject to:} \qquad (۲)$$

$$\sum_{j \in O_i} q_j - \sum_{k \in I_i} q_k = 0; \qquad \text{for all } i \in N$$

$$l_l \le q_l \le u_l; \qquad \text{for all } l \in A \qquad (۳)$$

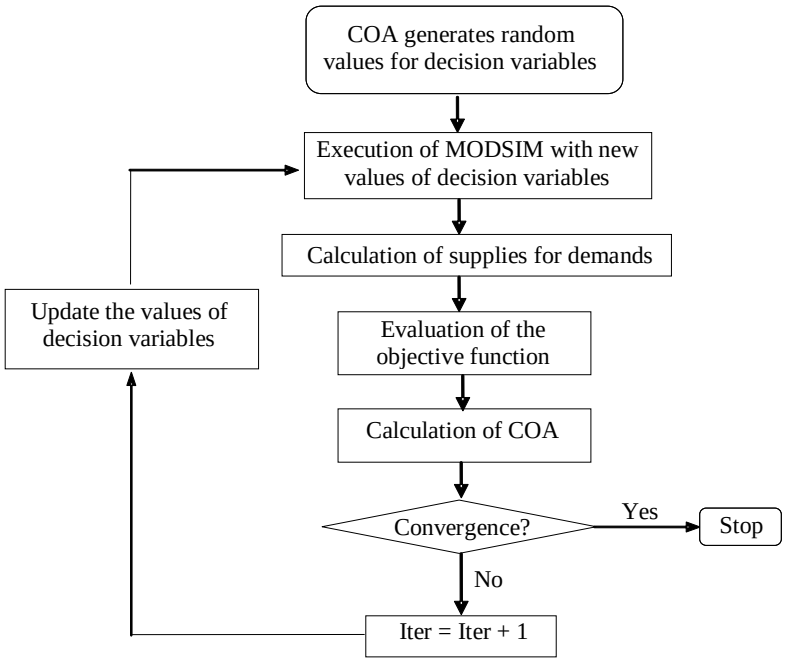

Fig. 1- Flowchart of the COA-MODSIM coupled model

شکل ۱- روندنمای عملکرد مدل COA-MODSIM

که در این روابط A مجموعه مجاری جریان در شبکه، N مجموعه گره‌ها، O_i مجموعه کانالهای آغاز شونده از گره i (کانالهای خروجی)، I_i مجموعه کانالهای پایان یابنده در گره i (کانالهای ورودی)، q_l مقدار دبی جریان در کانال l، c_l ضریب هزینه جریان در کانال l (منفی ضرایب وزنی و یا سود واحد دبی در کانال l که بر اساس اولویتهای تخصیص بین نیازها محاسبه می‌شود)، l_l کران پایین جریان در کانال l و u_l کران بالای جریان در کانال l می‌باشد. در نبود مطالعات اقتصادی و به منظور تخصیص بهینه آب بین مصارف، ضرایب هزینه در تابع هدف NFP با استفاده از مقادیر اولویتهای نسبی تأمین نیازها که توسط کاربر تعیین شده محاسبه می‌شود. علی‌رغم قابلیتهای شاخص مدل MODSIM، این مدل یک مدل شبیه‌سازی بهره‌برداری از سیستم همراه با تخصیص آب بین مصارف در مقیاس حوضه آبریز و تحت ابعاد و سیاستهای تخصیص معلوم و مشخص است. به عبارت دیگر مدل به خودی خود قادر به تعیین طراحی یا بهره‌برداری بهینه نیست. به همین دلیل اتصال این مدل به یک الگوریتم بهینه‌سازی با متغیرهای تصمیم بهره‌برداری از مخازن حوضه آبریز در این مطالعه پیگیری شده است.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

این الگوریتم بهینه‌سازی از زندگی یک خانواده از پرندگان به نام فاخته الهام گرفته شده است. زندگی خاص این نوع پرنده و ویژگیهای آن در تخم‌گذاری و زاد و ولد انگیزه اصلی توسعه این الگوریتم فراکاوشی جدید بوده است. مانند سایر روش‌های فراکاوشی، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود. جمعیت فاخته‌ها، در جوامع مختلف آن‌ها دو نوع است: فاخته‌های بالغ و تخم‌ها. تلاش فاخته‌ها برای زنده ماندن اساس الگوریتم بهینه‌سازی فاخته را تشکیل می‌دهد. در طول مسابقه برای زنده ماندن، برخی از فاخته‌ها یا تخم‌های آنان از بین می‌روند. جامعه فاختگان نجات‌یافته به یک محیط بهتر مهاجرت می‌کنند و دوباره شروع به تکثیر و تخم‌گذاری می‌کنند. امید است تلاش فاخته‌ها برای زنده ماندن به حالتی برسد که تنها یک جامعه از فاخته‌ها و همه با یک ارزش سود مشابه وجود داشته باشند. برای حل یک مسئله بهینه‌سازی لازم است مقادیر متغیرهای مسأله به شکل یک ماتریس درآیند. این ماتریس محل زندگی نامیده می‌شود. ماتریس محل زندگی Npop × Nvar ایجاد می‌شود. سپس یک تعداد تصادفی از تخم‌ها برای هر کدام از این محل زندگی اولیه پیشنهاد می‌شود. این اعداد به عنوان حدود بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف است. عادت دیگر فاخته‌های حقیقی این است که در یک دامنه مشخص در لانه سایر پرندگان تخم‌گذاری می‌کنند. این فاصله بیشینه شعاع تخم‌گذاری (ELR) نامیده می‌شود.

$$\text{Habitat} = [x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}] \quad (۴)$$

$$\text{Objective Function} = f(\text{Habitat}) = f(x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}) \quad (۵)$$

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{No. of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (Var_{hi} - Var_{low}) \quad (۶)$$

در یک مسأله بهینه‌سازی Nvar بعدی، یک Habitat یک آرایه ماتریس Nvar × ۱خواهد بود که موقعیت فعلی زندگی فاخته را نشان می‌دهد. هرکدام از مقادیر متغیرها ($x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}$) در هر تکرار بر اساس مقدار تابع هدف به‌روزرسانی می‌شود. سود یک محل زندگی توسط تابع سود f در یک محل زندگی ($x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}$) محاسبه می‌شود. در یک مسأله بهینه‌سازی با حد بالای var_{hi} و حد پایین var_{low} برای متغیرها، هر فاخته یک شعاع تخم‌گذاری ELR دارد که با تعداد کل تخم‌ها، تعداد تخم‌های فعلی آن فاخته و نیز حدود var_{hi} و var_{low} متناسب است، همچنین α عدد صحیحی است که برای به دست آوردن مقدار ماکزیمم ELR به کار می‌رود. Number of current cuckoo's eggs بیانگر تعداد تخم‌های حال حاضر فاخته و Total number of eggs بیانگر تعداد کل تخم‌ها می‌باشد. بعضی از تخم‌ها که کمتر شبیه تخم‌های خود پرنده میزبان هستند، توسط آنها شناسایی و بیرون انداخته می‌شوند. بنابراین بعد از فرآیند تخم‌گذاری، p درصد از تخم‌ها (معمولاً ۱۰٪) که مقدار سود آنها کمتر است، نابود می‌شوند. تنها یک تخم در هر لانه فرصت رشد می‌یابد. این به خاطر آن است که وقتی تخم فاخته می‌شکند و جوجه فاخته سر از تخم بیرون می‌آورد، تخم‌های پرنده میزبان را از لانه بیرون می‌اندازد. وقتی فاخته‌ها به زمان تخم‌گذاری نزدیک می‌شوند، به محل زندگی جدید و بهتر مهاجرت می‌کنند. گروه‌بندی فاخته‌ها به روش خوشه‌بندی k-means انجام می‌شود. هر فاخته فقط λ٪ کل فاصله تا مقصدش را پرواز می‌کند و همچنین انحرافی به اندازه Ø رادیان دارد. این دو پارامتر، λ و Ø به فاخته‌ها کمک می‌کند موقعیت‌های بیشتری را در محیط جست و جو کنند. برای هر فاخته، λ و Ø به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\lambda \sim U(0,1) \quad (۷)$$

$$Ø \sim U(-\omega,\omega) \quad (۸)$$

$$X_{NextHabitat} = X_{CurrentHabitat} + F[X_{BestCuckoo} - X_{CurrentHabitat}, \lambda, Ø] \quad (۹)$$

که U(0,1) یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ است. λ پارامتری است که فاصله انحراف از مقصد را محدود می‌کند. همچنین Ø زاویه انحراف از مسیر می باشد. $\omega = \pi / 6$ برای همگرایی مناسب جمعیت فاخته‌ها مناسب می‌باشد. وقتی همه فاخته‌ها به نقطه هدف مهاجرت کردند، به هر فاخته بالغ چند تخم اختصاص داده می‌شود. با توجه به آن، یک ELR برای هر فاخته محاسبه می‌شود و بعد فرآیند جدید تخم‌گذاری از نو آغاز می‌شود. در هر تکرار از الگوریتم فاخته با استفاده از مقادیر بدست آمده برای متغیرهای تصمیم مسأله محاسبات مدل شبیه‌سازی صورت گرفته و با تعیین مقادیر بهینه متغیرها با توجه به مقدار تابع هدف بدست آمده، مقادیر جدید متغیرها با استفاده از رابطه (۹) بدست آورده می‌شوند. که در آن $X_{NextHabitat}$ محل زندگی هر فاخته بالغ جدید، $X_{CurrentHabitat}$ محل زندگی قبلی فاخته، $X_{BestCuckoo}$ محل زندگی بهترین فاخته در گروه و F تابع انتقال می‌باشد. این روند تا رسیدن به یک تعداد تکرار ماکزیمم که در این مسأله برابر ۳۰۰ در نظر گرفته شده و یا تکرار شدن جواب بهینه سراسری مسأله در ۲۰ تکرار متوالی ادامه می‌یابد. در مطالعه حاضر، تعداد متغیر تصمیم بهینه‌سازی (Npar) برای سه مخزن سیستم در یک دوره شبیه‌سازی ۱۰ ساله با گام زمانی ماهانه برابر با ۳۶۰ = ۱۲×۱۰×۳ و پس از سعی و خطا مقادیر numCuckoos یا تعداد فاخته‌ها در شروع اجرای مدل برابر ۴، minNumberOfEggs یا حداقل تعداد تخم تخصیص داده شده برای هر فاخته برابر ۲، maxNumberOfEggs یا حداکثر تعداد تخم تخصیص داده شده برای هر فاخته برابر ۴ برای پارامترهای الگوریتم COA در نظر گرفته شد. maxNumberOfCuckoos که تعداد حداکثر فاخته‌های زنده در محیط را محدود می‌کند و آنهایی که در بدترین محلها زندگی می‌کنند را از بین می‌برد برابر ۸ در نظر گرفته شد. در شکل ۲ نحوه انجام محاسبات الگوریتم COA نشان داده شده است.

با کدنویسی الگوریتم COA در محیط سفارشی‌سازی MODSIM و اتصال شبیه‌ساز به آن، مدل COA-MODSIM توسعه داده شده است. در حقیقت در مدل COA-MODSIM، یک الگوریتم بهینه‌سازی داخلی NFP تک زمانه متصل به یک الگوریتم بهینه‌سازی بلند مدت بیرونی (COA) می‌باشد. در این فرآیند، COA مقادیر متغیرهای تصمیم مسأله را برای الگوریتم درونی NFP پیش‌خور (Forward) می‌نماید. در بازگشت، مقادیر تخصیص آب به گره‌های نیاز سیستم در گامهای زمانی ماهانه که از طریق حل الگوریتم NFP بدست آمده‌اند، از MODSIM به COA برگردانده (Feedback) شده تا مقدار تابع هدف برای هر نقطه متناظر در درون فضای جستجوی چندبعدی مسأله توسط COA محاسبه گردد. این فرآیند پیش‌خوردی–بازخوردی[۷] بین COA و MODSIM بطور پیوسته از طریق قوانین تکاملی تعیین مسیر الگوریتم COA تا زمان رسیدن به نقطه همگرایی تابع هدف مسأله ادامه پیدا می‌کند. فرمول‌بندی مسأله نیز به شکل متعارف نبوده و شامل دو مسأله بهینه‌سازی توابع تو در تو می‌باشد که حل آن در گرو رفت و برگشت مقادیر متغیرها بین دو مدل COA و MODSIM است. در ابتدا به منظور صحت‌سنجی عملکرد کد نوشته شده برای الگوریتم COA، بهینه‌سازی تابع ریاضی مرجع Rastrigin در حالت ۱۰ بعدی با استفاده از این الگوریتم انجام شده است. فرمول تابع Rastrigin به شکل رابطه (۱۰) می‌باشد.

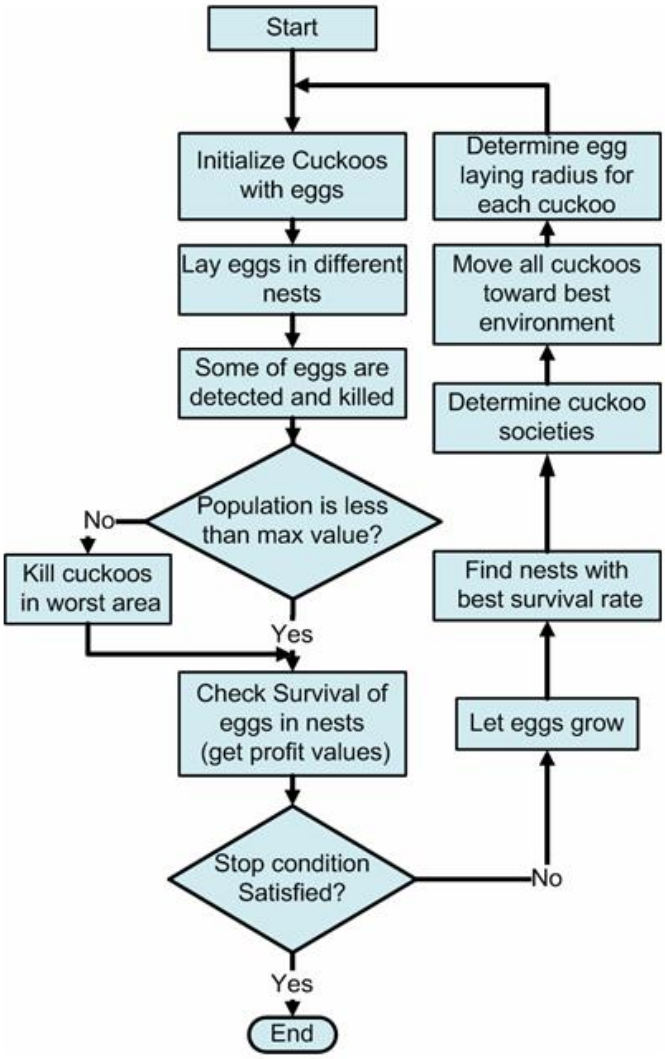

Fig. 2- Flowchart of the Cuckoo Optimization Algorithm

شکل ۲- روندنمای الگوریتم COA

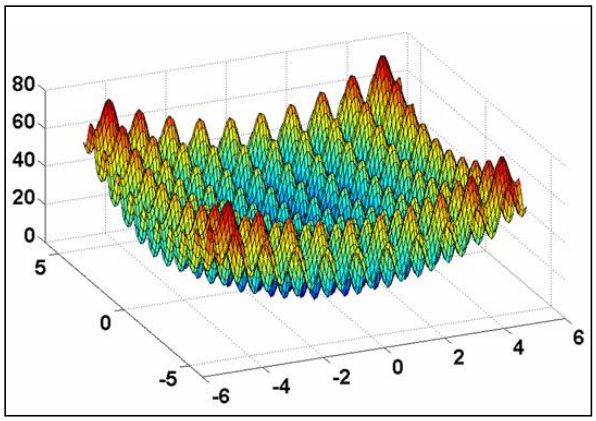

Fig. 3- 2-D Rastrigin function space

شکل ۳- فضای تابع Rastrigin در حالت دو بعدی

$$F = 10n + \sum_{i=1}^{n}(x_i - 10\cos(2\pi x_i)) \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، n نشان دهنده ابعاد مسأله بوده و بهینه سراسری تابع در مقطه صفر می‌باشد. تابع Rastrigin دارای بهینه‌های محلی متعددی بوده و معمولاً حل آن توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی با مشکلات محاسباتی زیادی مواجه می‌شود. در شکل ۳ فضای تابع در حالت دو بعدی نشان داده شده است. در شکل ۴ نتایج کمینه‌سازی تابع Rastrigin در حالت ۱۰ بعدی با استفاده از سه الگوریتم GA، PSO و COA با یکدیگر مقایسه شده است. در هر سه الگوریتم، جمعیت اولیه و بیشینه تعداد تکرارها به ترتیب ۲۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج شکل ۴، الگوریتم COA قادر به رسیدن به جواب مناسب‌تری نسبت به روشهای دیگر در تعداد تکرار کمتری شده است. این موضوع بیانگر سرعت همگرایی بالاتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های GA و PSO می‌باشد.

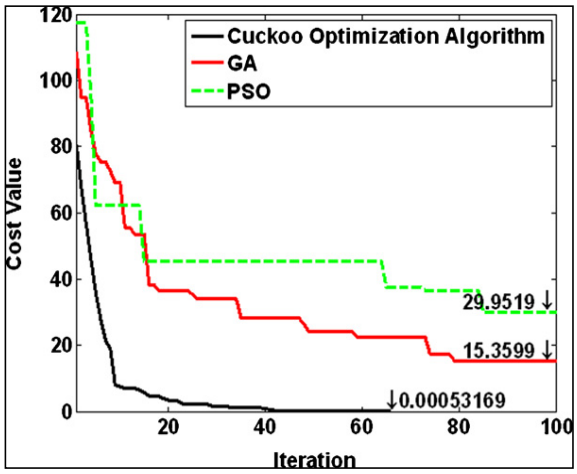

Fig. 4- Minimization results of the 10-D Rastrigin function by GA, PSO and COA algorithms

شکل ۴- نتایج کمینه‌سازی تابع Rastrigin در حالت ۱۰ بعدی با استفاده از الگوریتم‌های GA، PSO و COA

یکی از مشکلات متعارف در استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، گرفتار شدن الگوریتم در نقاط بهینه محلی و در نتیجه همگرایی زودرس می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، از برتری‌های الگوریتم COA نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌توان به سرعت همگرایی بیشتر و دقت بالاتر در رسیدن به بهینه سراسری در مسائل بهینه‌سازی با ابعاد بالا اشاره کرد. بطور کلی، ساختار و نحوه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی الهام گرفته شده از طبیعت که در سالهای اخیر توسعه یافته و استفاده از آنها در مسائل بهینه‌سازی رواج یافته تا حدود زیادی مشابه یکدیگر است. عموماً این الگوریتم‌ها مبتنی بر جمعیت بوده، در فضای پیوسته جستجو کرده و با استفاده از یک رابطه ریاضی همگرا شونده به سمت بهترین جوابی که تا کنون بدست آمده که در آن یک عبارت تصادفی نیز قرار دارد، به‌صورت تکراری جواب مسأله را تا حد ممکن بهبود می‌بخشند. تفاوت این الگوریتم‌ها با یکدیگر در شکل رابطه ریاضی محاسبه مقدار جدید متغیرها در هر تکرار و تأثیر پارامترهای تعریف شده در محاسبات می‌باشد. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های GA، PSO و COA بیانگر عملکرد مطلوب الگوریتم فاخته در حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد.

۲-۳- مشخصات سیستم تحت مطالعه و شبیه‌سازی حوضه آبریز

سیستم تحت مطالعه یکی از زیر سیستم‌های محدوده حوضه آبریز قره‌سو- گرگانرود واقع در شمال شرق کشور می‌باشد. این حوضه آبریز از نظر تقسیمات استانی در استان گلستان و در مجاورت با استانهای مازندران، سمنان و خراسان شمالی واقع گردیده و همجوار با کشور ترکمنستان و دریای خزر می‌باشد. از نظر تقسیمات حوضه‌ای این حوضه جزیی از حوضه آبریز درجه یک دریای خزر می‌باشد. حوضه آبریز قره‌سو- گرگانرود شامل دو رودخانه اصلی به نامهای گرگانرود و قره‌سو بوده که به صورت مجزا به دریای خزر تخلیه می‌شوند. رودخانه گرگانرود از رودخانه‌های مهم حوضه آبریز خزر بوده و در منطقه گرگان واقع می‌باشد که پس از سرچشمه گرفتن از منتهی‌الیه غرب کوههای خراسان و عبور از مسیرهای پرپیچ و خم و کوهستانی وارد منطقه کلاله شده و در نهایت پس از عبور از صحرای ترکمن و شمال گرگان در دو شاخه وارد خلیج گرگان می‌شود. این رودخانه دارای جریان آب دائمی بوده و شاخه‌های اصلی و فرعی زیادی را در طول مسیر به خود ملحق می‌نماید. در حال حاضر سه سد مخزنی به ترتیب از بالادست به نامهای بوستان، گلستان و وشمگیر بر روی این رودخانه احداث شده است. در شکل ۵ محدوده حوضه تحت مطالعه نشان داده شده است.

در جدول ۱ سیمای کلی منابع و مصارف سالانه که نشان‌دهنده میزان کل جریان سطحی ورودی و مقدار کل نیازهای درون حوضه است و در جدول ۲ مشخصات سازه‌های موجود در سیستم تحت مطالعه با استفاده از اطلاعات طرح جامع آب کشور (مهاب قدس، ۱۳۹۲) گزارش شده است. در شکل ۶ نیز شماتیک سیستم منابع آب سطحی و مصارف حوضه تحت مطالعه نشان داده شده است. دوره شبیه‌سازی حوضه آبریز حد فاصل سالهای ۸۵-۱۳۷۵ در نظر گرفته شده است. بر اساس اطلاعات موجود، میزان استحصال از منابع آب زیرزمینی در حوضه گرگانرود در مقایسه با منابع آب سطحی ناچیز بوده و لذا سیستم منابع آب سطحی حوضه مدل‌سازی شده است.

Table 1- Water resources and demands in the Gorganroud River basin

جدول ۱- سیمای کلی منابع و نیازهای آبی در حوضه آبریز گرگانرود

Item	Value (MCM)
Total Surface Inflow	495
Agricultural Demands	507
Piscicultural Demands	58
Total Demands	565

Table 2- Characteristics of the reservoirs in the system

جدول ۲- مشخصات مخازن موجود در سیستم تحت مطالعه

Dam	Min. Capacity (MCM)	Max. Capacity (MCM)
Boustan	4.3	43.7
Golestan	5.7	57.8
Voshmgir	4.2	42

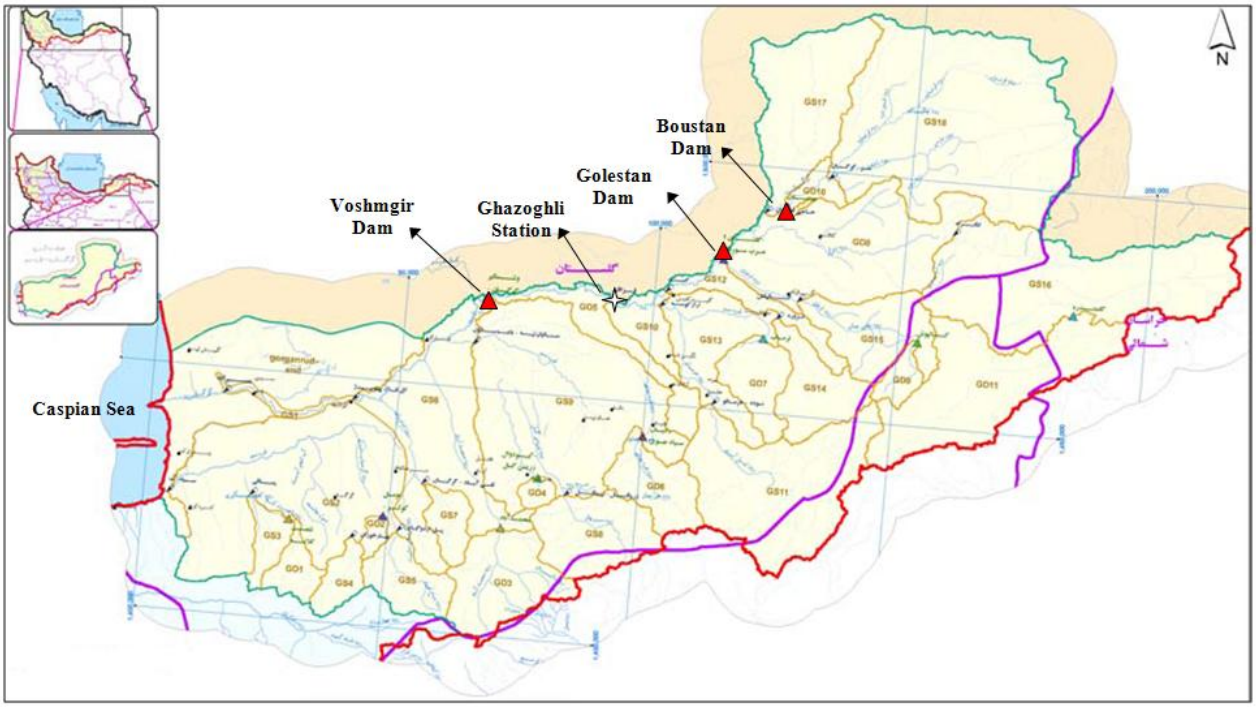

Fig. 5- Location of the Gorganroud River basin (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2013)

شکل ۵- موقعیت حوضه آبریز رودخانه گرگانرود (Mahab Ghodss Consulting Engineers, 1392)

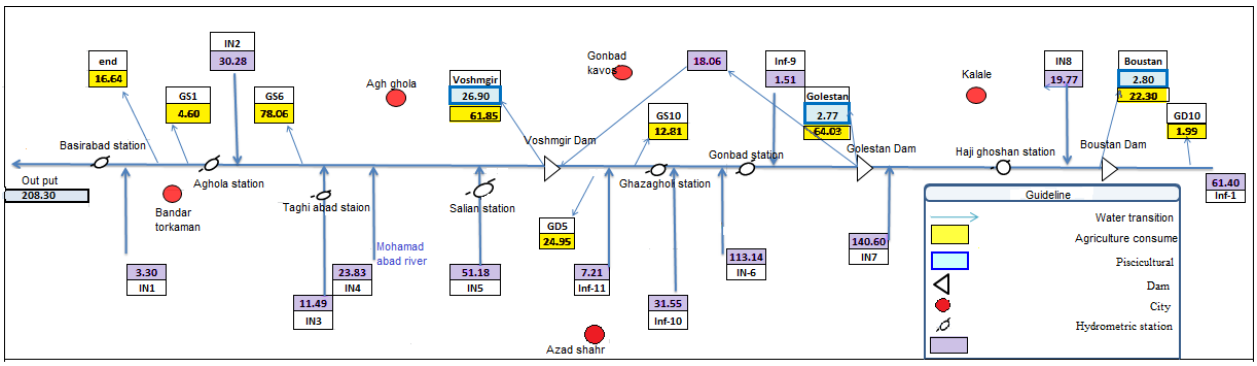

Fig. 6- Schematic of water resources and supplies in the Gorganroud River basin

شکل ۶- پیکربندی منابع و مصارف آبی در حوضه آبریز گرگانرود

با استفاده از سری دراز مدت آبدهی ماهانه مشاهداتی رودخانه گرگانرود در محل ایستگاه‌های آبسنجی و مقایسه مقادیر مدل‌سازی شده آنها می‌توان نسبت به کالیبراسیون و صحت‌سنجی عمومی مدل شبیه‌سازی منابع و مصارف اقدام نمود. پارامترهای مؤثر در MODSIM جهت کالیبراسیون مدل، ضرایب آب برگشتی[۸] از گره‌های نیاز و قواعد رهاسازی و اولویت‌های ذخیره آب در مخازن سیستم هستند. با تغییر این پارامترها، مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سری زمانی آبدهی رودخانه در محل چند ایستگاه شاخص حوضه با یکدیگر انطباق داده شده است. در شکل ۷، بعنوان یک نمونه از نتایج صحت‌سنجی مدل، سری زمانی مشاهداتی و محاسباتی در محل ایستگاه قزاقلی واقع بر روی رودخانه گرگانرود نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده در این بخش بیانگر عملکرد قابل قبول مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز گرگانرود می‌باشد. بدیهی است بدلیل تعداد زیاد و اندرکنش پیچیده پارامترهای مؤثر بر روی یکدیگر و تغییرات متغیرها در طول دوره شبیه‌سازی، انطباق کامل سری زمانی آبدهی مشاهداتی و محاسباتی در مدل‌های منابع آب امری بسیار مشکل و زمان‌بر است. بر این اساس، مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز که مطابق نتایج فوق صحت‌سنجی شده، جهت استفاده در محاسبات بهینه‌سازی تخصیص مورد پذیرش قرار گرفته است.

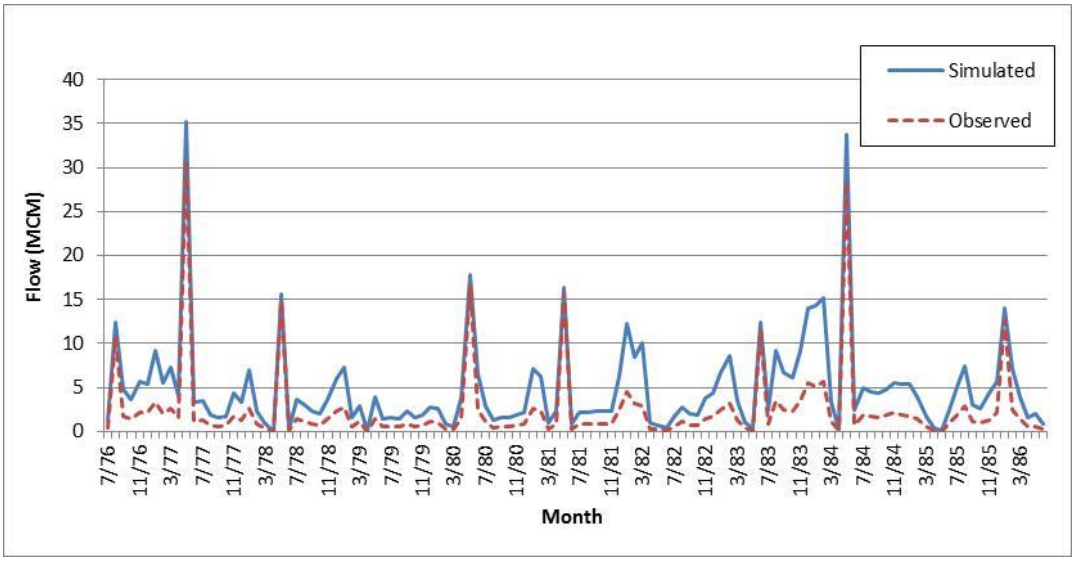

Fig. 7- Comparison of the observed and simulated flow in the Ghazaghli station

شکل ۷- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی جریان رودخانه گرگانرود در ایستگاه قزاقلی

Table 3- Comparison of the basin water supply in the simulation and simulation-optimization models (MCM)

جدول ۳- مقایسه وضعیت تأمین نیازهای آبی حوضه گرگانرود در شرایط شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی (میلیون متر مکعب)

Item	Demand	Simiulation Supply	Simiulation-Optimization Supply	Variation (%)
Agriculture	507	182	288	+37
Pisciculture	58	33	50	+35
Total	565	215	339	+36
Outflow	-	274	208	-24

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی تغییرات میزان تخصیص منابع آب در شرایط استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و فراهم نمودن مبنایی جهت مقایسه نتایج، ابتدا مدل شبیه‌سازی سیستم حوضه رودخانه گرگانرود در شرایط وضع موجود اجرا شده و نتایج آن ارائه می‌گردد. سپس با تلفیق الگوریتم COA در محیط Costum Coding مدل MODSIM، سیاستهای بهره‌برداری از مخازن سیستم به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌یابی شده و وضعیت تأمین نیازها با شرایط مبنا (شبیه‌سازی) مورد مقایسه قرار گرفته است. در مسأله مذکور، تابع هدف بهینه‌سازی حداکثرسازی میزان تأمین نیازهای آبی حوضه در کنار حداقل‌سازی میزان جریان خروجی از حوضه در نظر گرفته شده است. بر این اساس، رابطه تابع هدف در یک الگوریتم کمینه‌سازی مطابق با رابطه (۱۱) می‌باشد:

$$\text{Objective Function} = C - a \times (\text{Total Supply}) + b \times (\text{Outflow}) \quad (۱۱)$$

که در آن Total Supply میزان تأمین متوسط سالیانه برای نیازهای سیستم و OutFlow مقدار جریان متوسط سالیانه خروجی از حوضه می‌باشد که به ترتیب در ضرایب وزنی a و b ضرب شده‌اند. ضریب C نیز یک عدد بزرگ است که برای جلوگیری از منفی شدن مقدار تابع هدف به‌کار رفته است. مقادیر ضرایب a، b و C پس از سعی و خطا به‌ترتیب برابر با ۱۰، ۱۰ و ۲۰۰۰۰ انتخاب شده است. معیار توقف الگوریتم تکرار بهترین جواب محاسبه شده برای تابع هدف در ۲۰ تکرار متوالی تعیین گردیده است. در جدول ۳ نتایج وضعیت تأمین نیازهای آبی حوضه در شرایط شبیه‌سازی صرف و استفاده از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی COA-MODSIM ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود که از میزان ۴۹۵ میلیون متر مکعب جریان متوسط سالیانه ورودی به حوضه، مخازن سیستم در شرایط بهینه قادر به تخصیص ۳۳۹ میلیون متر مکعب آب به به گره‌های نیاز می‌باشند و جریان باقی مانده به مقدار

۲۰۸ میلیون متر مکعب در پایین دست از سیستم خارج شده است. در حالیکه در شرایط شبیه‌سازی وضع موجود، میزان تأمین نیازها برابر با ۲۱۵ میلیون متر مکعب و جریان خروجی ۲۷۴ میلیون متر مکعب بدست آمده است. به‌عبارت دیگر استفاده از رویکرد بهینه‌سازی منجر به افزایش تأمین نیازهای حوضه به میزان ۱۲۴ میلیون متر مکعب و کاهش جریان خروجی از حوضه به میزان ۶۶ میلیون متر مکعب در سال گردیده است. این اختلاف ۵۸ میلیون متر مکعب در افزایش تأمین‌ها و کاهش جریان خروجی ناشی از افزایش جریان آب برگشتی در محل مصارف و بازچرخانی آب در حوضه آبریز بوده است. این نتایج بیانگر بهبودی در حدود ۳۶٪ در وضعیت تأمین نیازهای آبی حوضه در شرایط استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی می‌باشد. در شکلهای ۸ تا ۱۱ نتایج حاصل از اجرای مدل‌های شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی گزارش شده است.

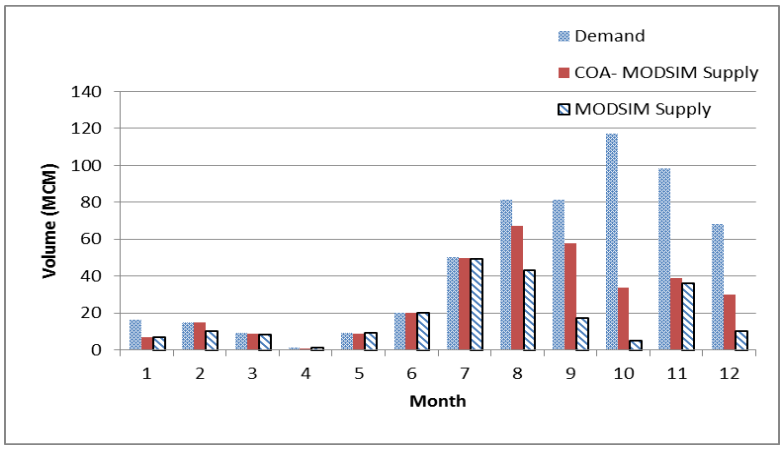

Fig. 8- Average supply for the basin total water demands in simulation and simulation-optimization models

شکل ۸- متوسط تأمین کل نیاز آبی حوضه در مدل‌های شبیه‌سازی وضع موجود و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

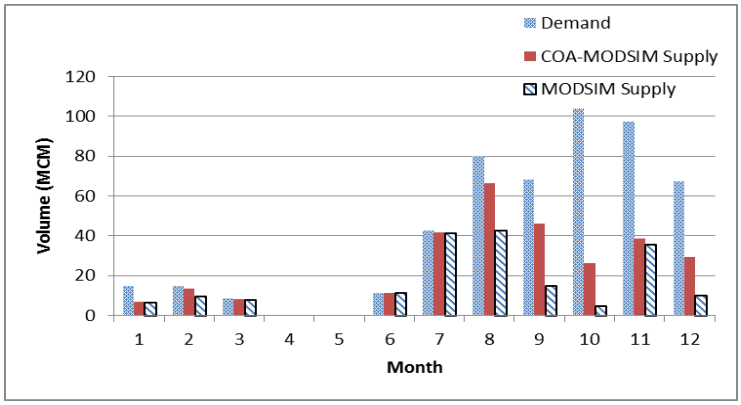

Fig. 9- Average supply for the basin agricultural demands in simulation and simulation-optimization models

شکل ۹- متوسط تأمین کل نیاز کشاورزی حوضه در مدل‌های شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

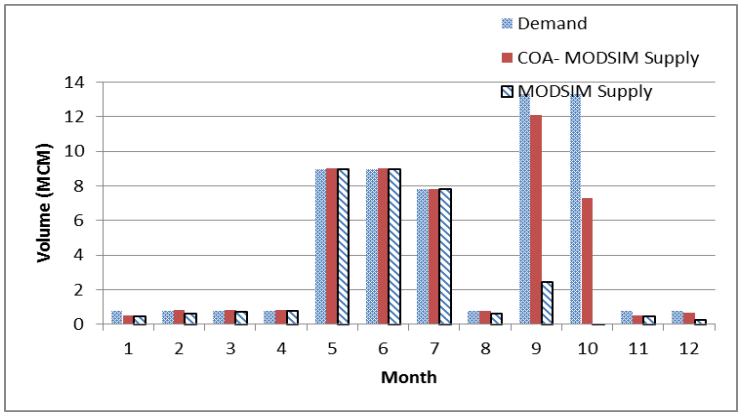

Fig. 10- Average supply for the basin piscicultural demands in simulation and simulation-optimization models

شکل ۱۰- متوسط تأمین کل نیاز آبزی پروری حوضه در مدل‌های شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

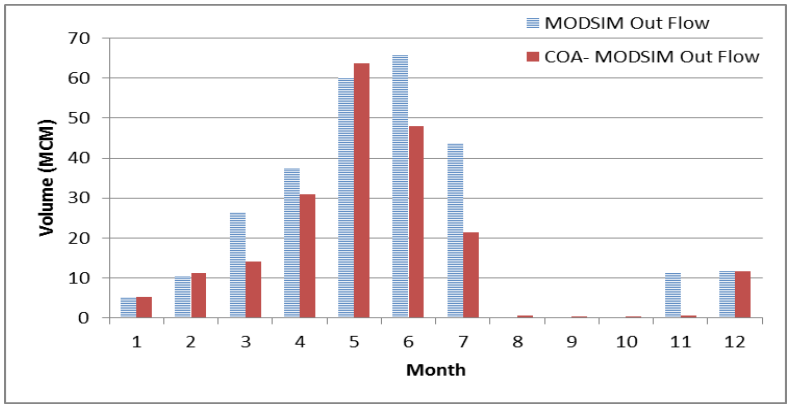

Fig. 11- Average outflow from the basin in simulation and simulation-optimization models

شکل ۱۱- متوسط جریان خروجی از حوضه در مدل‌های شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

به منظور بررسی تأثیر فرم تابع هدف، در یک حالت دیگر پارامتر Total Supply یا مقدار تأمین نیازها با پارامتر Total Reliability یا اعتمادپذیری کل تأمین نیازها جایگزین گردید. به منظور محاسبه اعتمادپذیری تأمین نیازها، با استفاده از قابلیت Costum Coding در MODSIM، تعداد ماههایی که مقدار تأمین در هر گره نیاز بیشتر از ۹۰٪ مقدار نیاز در آن ماه بوده محاسبه شده و نسبت آن به کل تعداد ماههای شبیه‌سازی سیستم برابر با اعتمادپذیری تأمین نیاز گره محاسبه گردیده است. این کار با استفاده از یک شمارنده انجام شده که در هر گام زمانی که میزان تأمین برای گره کمتر از ۹۰٪ نیاز آن ماه باشد یک واحد به مقدار آن اضافه می‌شود. سطح تأمین ۹۰٪ یک پارامتر انتخابی بوده و می‌توان بسته به شرایط مسأله مقدار آن را تغییر داد. تابع هدف مدل در این شرایط به شکل رابطه (۱۲) می‌باشد.

$$\text{Objective Function} = C - a \times (\text{Total Reliability}) - b \times (\text{Outflow}) \quad (۱۲)$$

در جدول ۴ نتایج حاصل از حل مسأله در شرایط تغییر تابع هدف آورده شده است. در شکلهای ۱۲ تا ۱۴ وضعیت تأمین نیازهای سیستم در شرایط تابع هدف حداکثرسازی تأمین و حداکثرسازی اعتمادپذیری با یکدیگر مقایسه شده و وضعیت جریان خروجی از حوضه نیز در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که در حالت تابع هدف حداکثرسازی تأمین، مقادیر تأمین نیازهای آبی حوضه نسبت به حالت حداکثرسازی اعتمادپذیری بیشتر شده است. در حالت حداکثرسازی اعتمادپذیری، مقدار تأمین‌ها کاهش یافته اما اعتمادپذیری تأمین نیازها در سطح ۹۰٪ نسبت به حالت اول افزایش داشته است. این هدف با کاهش مقدار آب تأمین شده جهت نیازهای کشاورزی و آبزی پروری در ماه‌های خرداد، تیر و شهریور حاصل شده است. مقایسه مقدار کل تأمین آبی در حوضه بیانگر افزایش ۱۳٪ تأمین‌ها در حالت تابع هدف حداکثرسازی تأمین و افزایش ۷٪ اعتمادپذیری تأمین نیازها در حالت تابع هدف حداکثرسازی اعتمادپذیری می‌باشد. انتخاب تخصیص بهینه در سطح حوضه از بین هر یک از این دو حالت بستگی به سیاست تصمیم‌گیران مدیریت منابع آب حوضه دارد. در حالت اول حجم آب بیشتری برای نیازها در کل تأمین شده اما در حالت دوم در تعداد ماههای بیشتری اما با حجم تأمین کمتری می‌توان منابع آب را تخصیص داد.

Table 4- Results obtained by simulation and simulation-optimization (S-O) models with the maximum supply and maximum reliability objective functions

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی وضع موجود و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با تابع هدف حداکثرسازی تأمین و حداکثرسازی اعتمادپذیری

Item	Simulation		S-O Maximum Supply		S-O Maximum Reliability	
	Volume (MCM)	Reliability (%)	Volume (MCM)	Reliability (%)	Volume (MCM)	Reliability (%)
Average supply for Agricultural demands	182	63٪	288	68٪	257	74٪
Average supply for Piscicultural demands	33	70٪	50	80٪	42	88٪
Total water supply	215	67٪	339	74٪	299	81٪
Outflow	274	-	208	-	254	-

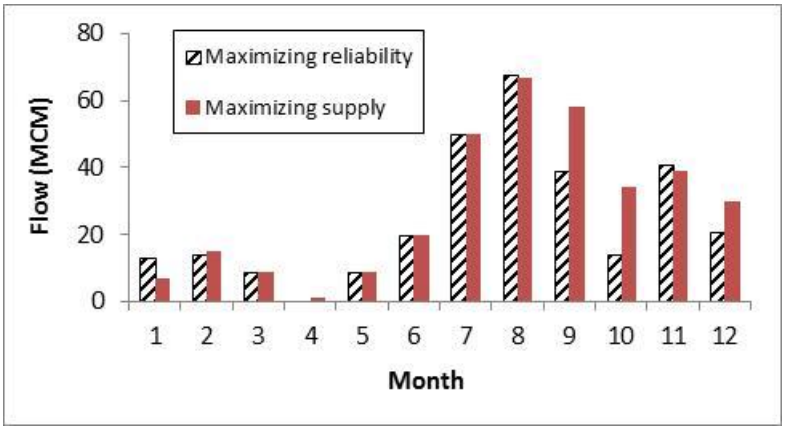

Fig. 12- Comparison of the average supply for the basin total water demands with the maximum supply and maximum reliability objective functions

شکل ۱۲- مقایسه وضعیت تأمین متوسط سالیانه کل نیازهای آبی در حوضه با توابع هدف حداکثرسازی تأمین و حداکثرسازی اعتمادپذیری

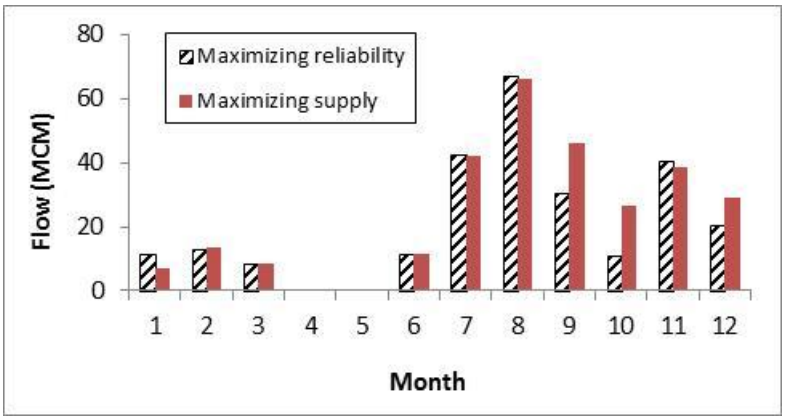

Fig. 13- Comparison of the average supply for the basin agricultural demands with the maximum supply and maximum reliability objective functions

شکل ۱۳- مقایسه وضعیت تأمین متوسط نیازهای کشاورزی در حوضه با توابع هدف حداکثرسازی تأمین و حداکثرسازی اعتمادپذیری

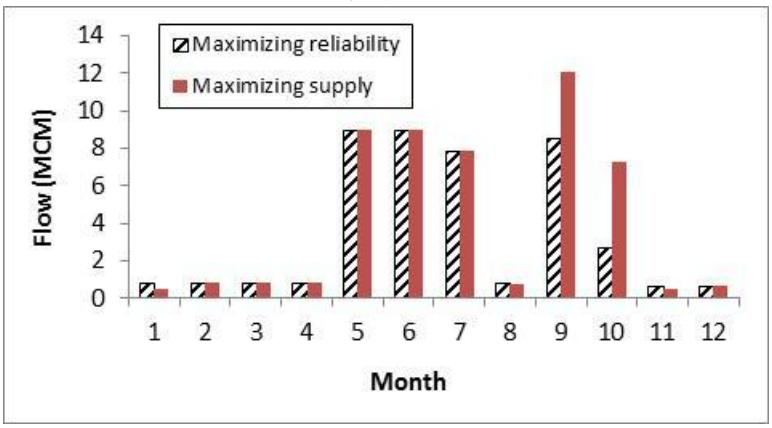

Fig. 14- Comparison of the average supply for the basin piscicultural demands with the maximum supply and maximum reliability objective functions

شکل ۱۴- مقایسه وضعیت تأمین متوسط نیازهای آبزی پروری در حوضه با توابع هدف حداکثرسازی تأمین و حداکثرسازی اعتمادپذیری

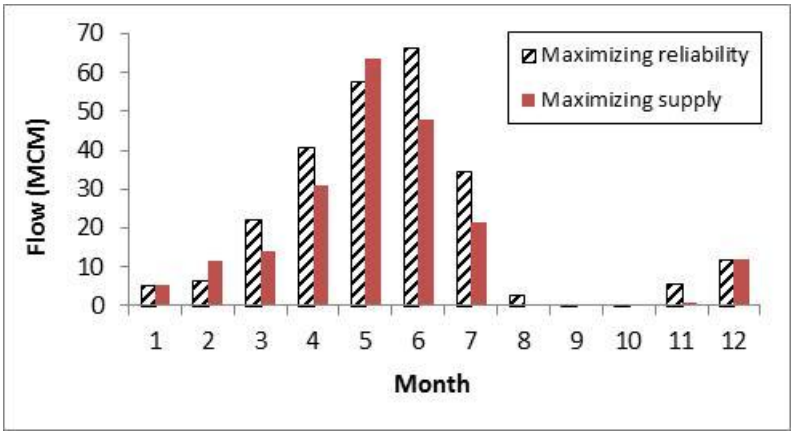

Fig. 15- Comparison of the mean outflow from the basin with the maximum supply and maximum reliability objective functions

شکل ۱۵- مقایسه وضعیت جریان خروجی متوسط سالیانه از حوضه با توابع هدف حداکثرسازی تأمین و حداکثرسازی اعتمادپذیری

مدل شبیه‌سازی MODSIM یک مدل تخصیص اولویت پایه[9] می‌باشد. بدین معنی که برای محاسبه مقادیر تخصیص آب به گره‌های نیاز و ذخیره در سیستم در هر گام زمانی، نیازمند معلوم بودن اولویت تخصیص به گره می‌باشد. تعیین این عدد اولویت برای مخازن سیستم می‌تواند با دو نگرش انجام گیرد: اولویت ذخیره آب در مخزن به‌گونه‌ای باشد که رهاسازی آب فقط برای تأمین نیازهای صرفاً پایین‌دست مخزن انجام شده و پس از تأمین آنها آب در مخزن ذخیره گردد؛ یا نه به‌گونه‌ای باشد که از مخزن برای تأمین نیازهای کلیه یا چند گره مد نظر در پایین دست حوضه که با مخزن فاصله زیادی دارند نیز استفاده گردد که در این شرایط اولویت ذخیره آب در مخزن بایستی کمتر از نیازهای مد نظر باشد. حالت اول در مدل شبیه‌سازی شرایط وضع موجود حوضه آبریز گرگانرود پیاده شده است که در آن سدها عموماً با هدف تأمین نیازهای منطقه خود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. اما در مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی اولویت مخازن به‌گونه‌ای تعریف گردیده که مخازن در تأمین نیازهای آبی کل حوضه آبریز مشارکت داشته باشند. در شکلهای ۱۶ تا ۱۸ تغییرات ذخیره آب در مخازن حوضه در دو حالت شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی نشان داده شده است.

مقایسه سری‌های زمانی تغییرات ذخیره مخازن نشان می‌دهد که در شرایط شبیه‌سازی، رفتار مخزن بطور کلی نشان دهنده یک رفتار ساده کلاسیک است که در زمان نیاز به رهاسازی آب برای تأمین گره‌های پایین دست تخلیه شده و در فصول پرآبی حجم ذخیره افزایش یافته است.

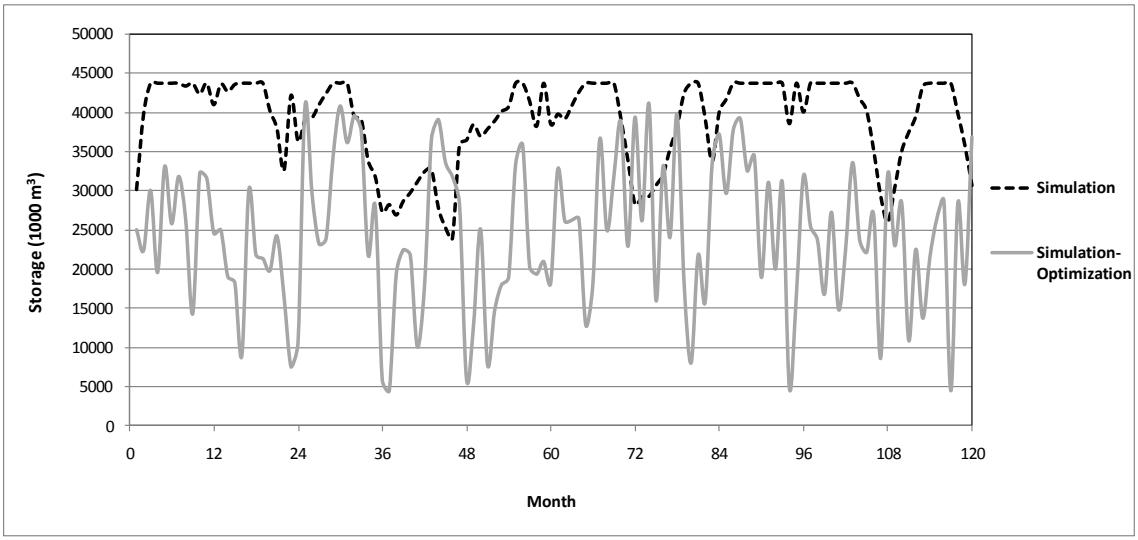

Fig. 16- Boustan reservoir storage variation in simulation and simulation-optimization models

شکل ۱۶- تغییرات حجم ذخیره مخزن سد بوستان در مدلهای شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

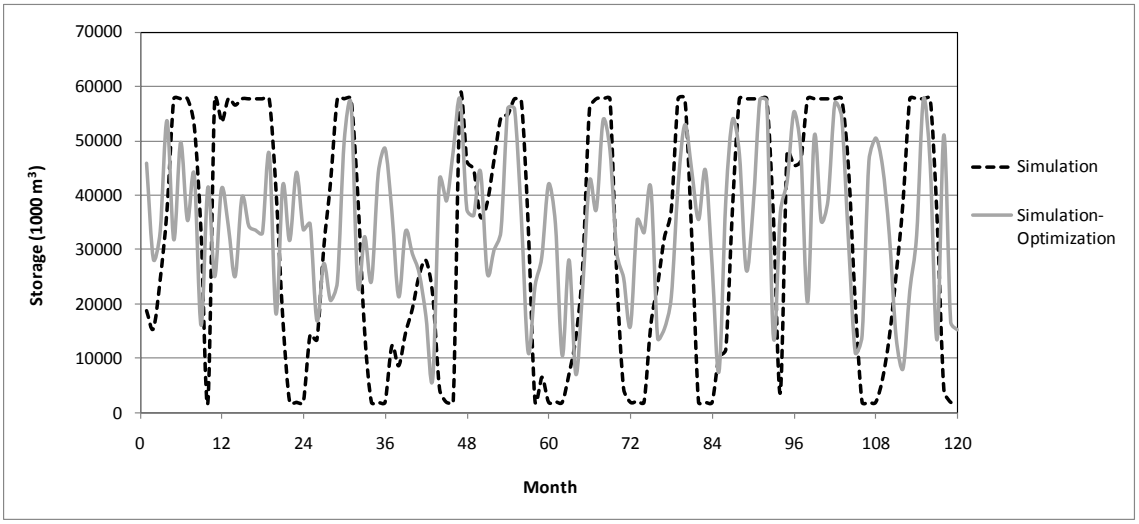

Fig. 17- Golestan reservoir storage variation in simulation and simulation-optimization models

شکل ۱۷- تغییرات حجم ذخیره مخزن سد گلستان در مدل‌های شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

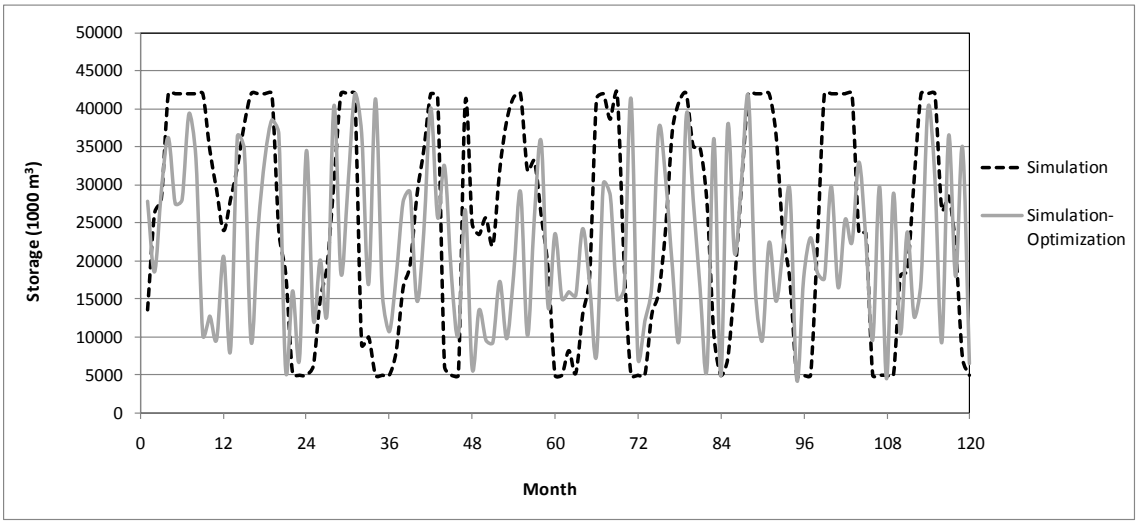

Fig. 18- Voshmgir reservoir storage variation in simulation and simulation-optimization models

شکل ۱۸- تغییرات حجم ذخیره مخزن سد وشمگیر در مدل‌های شبیه‌سازی و شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

اما در طرف مقابل در شرایط بهره‌برداری بهینه، نوسانات حجم ذخیره مخازن سیستم بسیار بیشتر بوده و رفتار پیچیده‌تری از خود نشان داده‌اند. دلیل این امر عملکرد سیستمی مخزن با هدف تأمین نیازهای کل حوضه آبریز و نه فقط نیازهای پایین دست خود بوده است. البته بدیهی است که پیاده‌سازی چنین الگویی در عمل برای رهاسازی آب از مخازن ممکن است براحتی امکان‌پذیر نباشد و بایستی ملاحظات فنی و هیدرولیکی دقیق‌تری را در این زمینه در نظر گرفت. اما سیاست بهینه بدست آمده برای بهره‌برداری از مخازن می‌تواند به‌عنوان یک الگوی مناسب جهت برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز مورد استفاده قرار گیرد. با متوسط‌گیری مقادیر احجام بهینه ذخیره مخازن در طول دوره شبیه‌سازی سیستم، در شکل ۱۹ متوسط سالیانه سیاستهای بهره‌برداری بهینه از مخازن حوضه آبریز نشان داده شده است. بر همین اساس، الگوی بهینه بهره‌برداری از مخازن سیستم می‌تواند با تقسیم دوره زمانی شبیه‌سازی به زیر دوره‌های خشک و نرمال و تر در هر بازه بطور جداگانه بدست آمده و در برنامه‌ریزی مدیریت یکپارچه حوضه آبریز مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، مسأله برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی که در آن مدل جامع شبیه‌سازی حوضه آبریز MODSIM به‌عنوان هسته شبیه‌سازی و الگوریتم فراکاوشی فاخته به‌عنوان پوسته بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، حل شده است.

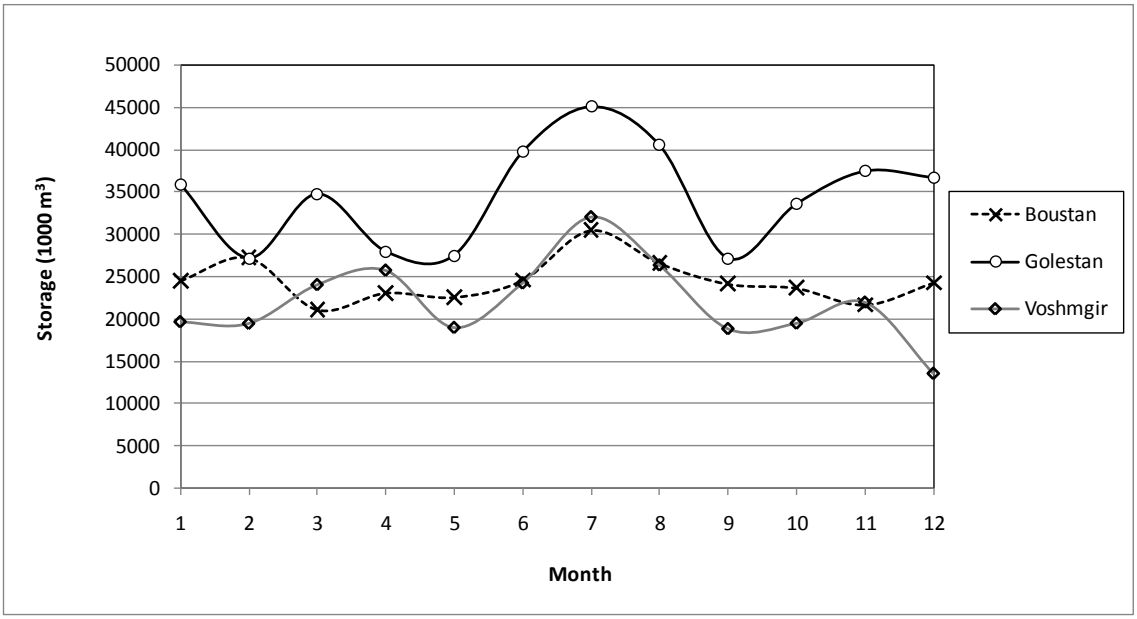

Fig. 19- Average annual optimum storages of dam reservoirs in the Gorganroud basin

شکل ۱۹- متوسط سالیانه احجام بهینه ذخیره آب در مخازن حوضه آبریز گرگانرود

مدل پیشنهادی COA-MODSIM برای تخصیص منابع آب سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر به مصارف آبی حوضه گرگانرود مورد آزمون قرار گرفته است. با توجه به نتایج رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی نسبت به شبیه‌سازی وضع موجود مشاهده شد که میزان تأمین نیازهای آبی کشاورزی حوضه در حدود ۳۷٪ افزایش می‌یابد. همچنین میزان تأمین آب برای نیازهای پرورش ماهی نیز به میزان ۳۵٪ افزایش یافته است. در مجموع مقدار تأمین شده آب برای کل نیازهای آبی حوضه افزایشی در حدود ۳۶٪ را نشان می‌دهد. همچنین جریان خروجی از حوضه نیز در شرایط بهینه به میزان ۲۴٪ کاهش یافته است. سیاستهای بهره‌برداری بهینه از مخازن در شرایط شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بیانگر رفتار پیچیده آنها در یک رویکرد سیستمی با هدف حداکثرسازی سود حاصل از سیستم می‌باشد. این نتایج بیانگر اهمیت و تأثیر تصمیم‌گیری مناسب برای برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز کشور می‌باشد. نتایج حاصل از مدل با انتظارات کلی در زمینه تحلیل سیستم‌های منابع آب همخوانی داشته و بیانگر تأثیر عوامل مختلف در تصمیم‌گیری پیچیده در سطح کلان مدیریت منابع آب در رفتار و عملکرد سیستم می‌باشد. بدیهی است نتایج حاصل در این تحقیق مبتنی بر پیش فرضها و صحت داده‌ها و اطلاعات است. علی‌رغم آن در صورت تکمیل اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، امکان نیل به نتایج کاربردی پیرامون سوالات مطرح در تعیین سیما و سیاستهای بهره‌برداری بهینه از منابع آب در حوضه‌های آبریز کشور با استفاده از مدل توسعه داده شده کاملاً امکانپذیر می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

1- Integrated River Basin Management
2- Cuckoo Optimization Algorithm
3- Particle Swarm Optimization
4- Genetic Algorithm
5- Imperialistic Competitive Algorithm
6- Network Flow Programming
7- Forward-Feedback
8- Return Flow Fractions
9- Priority-Based

۵- مراجع

Ahamadi A, Zadehvakili N, Safavi HR, Ohab Yazdi SA (2015) Development of a dynamic planning model for surface and groundwater allocation, Case Study: Zayandehroud river basin. Journal of Iran-Water Resources Research, 11 (1):21-31 (In Persian)

Ghadami SM, Ghahraman B, Sharifi MB, Rajabi Mashhadi H (2009) Optimization of multireservoir water resources systems operation using genetic Algorithm. Journal of Iran-Water Resources Research, 5(2):1–15 (In Persian)

Hosseini-Moghari SM, Morovati R, Moghadas M, Araghinejad S (2015) Optimum operation of reservoir using two evolutionary algorithms: Imperialist Competitive Algorithm (ICA) and Cuckoo Optimization Algorithm (COA). Water Resources Management 29(10):3749-3769

Parsapour-Moghaddam P, Abed-Elmdoust A, and Kerachian R (2015) A Heuristic evolutionary game theoretic methodology for conjunctive use of surface and groundwater resources, Water Resources Management, 29(11):3905-3918

Rahimi A (2015) Water resources allocation conflict resolution using game theory approach, Case Study: Bukan dam. Master of Science Thesis, Supervisor: Shourian M. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (In Persian)

Shourian M, Mousavi SJ, Tahershamsi A (2008) Basin-wide water resources planning by integrating PSO algorithm and MODSIM. Water Resources Management, 22(10):1347-1366

Karimi M (2011) Comparing WEAP and MODSIM in priority-based allocation modelling of Water Resources at basin scale. Master of Science Thesis, Supervisor: Mousavi SJ. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (In Persian)

Kheirandish A, Farzin S (2016) Water allocation modeling using WEAP in Kamal Saleh dam. 6th National Conference on Water Resources Management, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran (In Persian)

Labadie J (2006) MODSIM: Decision support system for integrated river basin management. Diss. International Environmental Modeling and Software Society

Mahab-Ghods Consulting Engineers (2013) National water master Plan. Gorganroud basin, surface Water Resources Report. Tehran, Iran (In Persian)