Arshive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷
Volume 14, No. 1, Spring 2018 (IR-WRR)
۱۹۸-۲۱۵

رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در طراحی بهینه سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای

میلاد زمانی‌پور[۱] ، مطهره سعادت‌پور[۲*] و باقر ذهبیون[۳]

چکیده

در تحقیق حاضر به منظور تعیین ابعاد بهینه مؤلفه‌های طراحی طرح انتقال آب بهشت‌آباد-زاینده‌رود، از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده گردید. شکل توسعه یافته الگوریتم هوش جمعی ذرات چند هدفه به‌صورت چند ازدحامی با رویکرد همکارانه، به منظور بهینه‌سازی و مدل برنامه‌ریزی- ارزیابی منابع آب، WEAP، جهت شبیه‌سازی سیستم منابع و مصارف حوضه‌های آبریز، مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به حجم محاسباتی بالای رویکردهای شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در قالب الگوریتم‌های فراکاوشی و نیاز به فراخوانی‌های متعدد مدل شبیه‌سازی، هزینه محاسباتی بالایی به سیستم تحمیل خواهد شد. به منظور مواجهه با این چالش، مدلی جایگزین مدل شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه آبریز (WEAP) مبتنی بر روش‌های داده‌کاوی و ابزار شبکه عصبی توسعه یافت. کاهش کمبودهای تأمین نیاز مصارف شرب و زیست‌محیطی حوضه‌های مبدأ و مقصد و نیز کاهش هزینه‌های اقتصادی اجرای این طرح، از اهداف تعریف شده در مسأله پیش روی این تحقیق می‌باشند. نتایج نشان داد الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی قادر به ارائه جواب‌های منطقی و متنوع در مسأله مورد بررسی است که به لحاظ تصمیمات مدیریتی دارای مطلوبیت مناسبی است. همچنین تکنیک فرامدل مورد استفاده، در تقریب توابع هدف مسأله، صرف زمان کمتر و دقت قابل قبول در ارائه پاسخ‌های سیستم، عملکرد مناسبی را از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: الگوریتم هوش جمعی ذرات چند هدفه، تکنیک فرامدل، شبکه عصبی، طرح انتقال آب بهشت‌آباد، WEAP.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۶/۳۰

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۲- استادیار، عضو هیات علمی گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۳- دانشیار، عضو هیات علمی گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Simulation-Optimization Approach Based on Meta-Model in Optimal Design of Inter-Basin Water Transfer System

M. Zamanipour [1], M. Saadatpour[2] and B. Zahabiyoun[3]*

Abstract

In this research the simulation-optimization (S-O) approach is applied to determine the optimum capacity of water transfer systems in "Beheshtabad" to "Zayandehrood" Inter-basin water transfer project. In this regard, a Multi-Objective Multi-Cooperative Swarm Particle Swarm Optimization (MOMCSPSO) algorithm as an optimization technique is linked to Water Evaluation and Planning system (WEAP) as the simulation model. Due to the immense computational efforts of simulation-optimization approach specifically in an evolutionary algorithm application and the need to frequent recalling of the simulation model, intensive computational costs are expected. To alleviate this challenge, a surrogate based S-O approach is developed in this research and the Artificial Neural Network (ANN) as the surrogate model substituted WEAP. The objective functions of the problems were minimizing the environmental and domestic water demand shortages at the origin and destination basins separately while minimizing the costs of the water transfer system. The results showed that the proposed optimization algorithm was able to offer reasonable and diverse solutions with good functionality in terms of management decisions. Furthermore the developed techniques in this research can effectively reduce the computational time whereas the desired accuracy is achieved in water resources objective function estimations.

Keywords: Multi-Objective Particle Swarm Optimization, Meta-Model Techniques, Artificial Neural Network, "Beheshtabad to Zayandehrood" Inter-Basin Water Transfer, WEAP.

Received: March 11, 2017
Accepted: September 21, 2017

1- M.Sc. Graduated Student in Hydro-Structure and Civil Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: Msaadatpour@iust.ac.ir
3- Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Arshive of SID

۱- مقدمه

پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای گزینه‌ای به منظور ایجاد توازن توزیع مکانی و زمانی غیریکنواخت منابع و نیازهای آبی می‌باشند (Manshadi et al., 2015) که با هدف کاهش تغییرات زمانی-مکانی منابع آبی و فراهم نمودن افزایش امکان دستیابی به منابع آبی مطمئن توسعه یافته‌اند. پروژه‌های بزرگ مقیاس انتقال آب بین حوضه‌ای تأثیرات قابل توجهی بر اکوسیستم‌های آبی و محیط زیست حوضه‌های مبداء و مقصد خواهند داشت. در این پروژه‌ها، حوضه‌های آبریز مقصد (دریافت-کننده منابع آب انتقالی) از سودهای بیشتری متنفع می‌گردند در حالی که حوضه مبداء (ارسال‌کننده منابع آبی) ممکن است متحمل زیانهایی گردد. بر این اساس، اجرای پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای تنها در صورتی که هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی برای حوضه مبداء قابل تحمل باشد، توصیه می‌گردند (Ahmadi-najl et al., 2016). به دلیل ارتباط هیدرولیکی میان منابع آبی و سامانه‌های دریافت‌کننده آب در پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، کل سیستم در قالبی یکپارچه و بهم‌پیوسته مورد مطالعه خواهد بود. با توجه به پیچیدگی‌های مسائل بزرگ مقیاس انتقال آب بین حوضه‌ای، پویایی این مسائل و غیرخطی بودن آن‌ها، توسعه دانش مربوط به اجزای مختلف این سیستم بزرگ مقیاس، درک بهتر بازخورد میان مؤلفه‌های زمانی و مکانی سیستم مورد مطالعه، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه آبریز، به همراه دانش مهندسی سیستم‌ها یک ضرورت است. شبیه‌سازی ابزاری انعطاف‌پذیر، با کاربرد وسیع برای تحلیل‌های پیچیده سامانه‌های منابع آبی است. سامانه مورد نظر برای شبیه‌سازی، از هر دو جنبه متغیرهای طراحی و سیاست‌های بهره‌برداری از آن، باید معرفی و توصیف شود و سپس مورد شبیه‌سازی قرار گیرد تا نحوه عملکرد آن تعیین شود (Shourian et al., 2008a). مدل‌های شبیه‌سازی منابع آب امروزه در گستره وسیعی از مسائل از قبیل بررسی اثرات تغییر اقلیم و خشکسالی بر منابع آبی (Höllermann et al., 2010; Harma et al., 2012; Hamlat et al., 2013)، مدیریت کمی و کیفی منابع آب به‌منظور بررسی اثرات اجتماعی-اقتصادی (Dai and Labadie, 2001; Raoufi et al., 2014; Li et al., 2015) و حل تعارضات مصرف‌کنندگان منابع آب (Mutiga et al., 2010)، به کار گرفته می‌شود.

مدل‌های شبیه‌سازی امکان مقایسه بین گزینه‌های مختلف را فراهم می‌نمایند؛ اما بهترین گزینه را معرفی نمی‌کنند. به منظور فراهم نمودن گزینه مطلوب، مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شوند. علی‌رغم قابلیت‌های بسیار مدل‌های شبیه‌ساز منابع آب، به سبب تک دوره‌ای بودن، قابلیت بهینه‌سازی مؤلفه‌های طراحی و بهره‌برداری بلند مدت وجود ندارد و از آنجا که بسیاری از مسائل مربوط به منابع آبی دارای ماهیت غیرخطی هستند؛ لذا اتصال یک مدل بهینه‌ساز مناسب مانند الگوریتم‌های تکاملی به مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند در این راستا، کارآمد باشد. Shourian et al., 2008b روشی را برای طراحی و بهره‌برداری بهینه از بالادست حوضه رودخانه سیروان در ایران را با ترکیب مدل شبیه‌ساز منابع آب MODSIM و الگوریتم بهینه‌ساز PSO ارائه نمودند. Vasan (2012) در تحقیق خود به بررسی کارایی الگوریتم PSO در برنامه‌ریزی الگوی کشت و زمان‌بندی آبیاری با بهره‌برداری تلفیقی از مخازن سدها و آب زیرزمینی بر روی منطقه مطالعاتی خود (راجستان هند) پرداخت. Vonk et al. (2014) کاهش آسیب‌پذیری سیستم عملکرد سد را تحت شرایط تغییرات اقلیمی و توسعه اقتصادی با تغییر در برنامه عملکرد سد با ارتباط بین مدل WEAP و الگوریتم NSGA-II بررسی نمودند. Nouiri et al. (2015) با هدف مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی ابزار مدیریتی جدیدی به نام ALL_WATER_gw را در چارچوب یک مدل شبیه‌ساز تلفیقی WEAP-MODFLOW و الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حل مسأله بهینه‌سازی، به کار گرفتند. Anzab et al. (2016) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به وسیله اتصال مدل WEAP و الگوریتم بهینه‌سازی PSO به منظور طراحی و بهره‌برداری بهینه برای پروژه انتقال آب کارون به زهره در ایران را ارائه نمودند. امروزه با توجه به پیشرفت علوم کامپیوتری و افزایش سرعت پردازش اطلاعات، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در بین محققان مورد استقبال زیادی واقع می‌شود. اساس این الگوریتم‌ها بر پایه قوانین تکامل، بقاء، زندگی و پیشرفت جانداران است. در بعضی از مواقع در حل مسائل بزرگ مقیاس منابع آب، شکل استاندارد این الگوریتم‌ها در یافتن جواب‌های منطقی و مناسب دارای ضعف‌هایی است. از این رو برای مواجهه با این مشکل در مطالعات، اقدام به توسعه این الگوریتم‌ها شده است (Kumar and Reddy, 2007; Zhang et al., 2011; Ostadrahimi et al., 2012).

یافتن مؤلفه‌های بهینه مطلوب از سیستم‌های پیچیده مستلزم جستجو در فضای وسیع و گسترده‌ای است. مدل‌های شبیه‌ساز امروزی برای ارائه دانش علمی دقیق در مورد سیستم‌های دنیای واقعی تمایل به محاسبات سنگین و فشره دارند. اکثر تحلیل‌های مهندسی مبتنی بر مدل، نیازمند هزاران بار اجرای مدل شبیه‌ساز هستند که هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد (Razavi et al., 2012). تکنیک جست و جوهای اکتشافی از انعطاف‌پذیری بالایی در حل مسائل برخوردارند؛ اما شدت بالای محاسبات در روش‌های بهینه‌سازی نیازمند صدها و گاهاً هزاران بار ارزیابی توابع هدف برای رسیدن به شرط خاتمه

www.SID.ir

Arshive of SID

الگوریتم هستند. لذا به منظور فائق آمدن بر مشکلات مرور شده، استفاده از مدل‌های جایگزین[1] در مسائل پیشنهاد گردیده است. هدف از ساخت مدل جایگزین این است که با حفظ دامنه و ابعاد مسأله، با روابط تجربی ساده رابطه بین متغیرهای تصمیم و خروجی‌های مورد نظر را شبیه‌سازی نماید (Johnson and Rogers, 2000). به این منظور در بسیاری از موارد یک مدل داده‌کاوی نظیر مدل شبکه عصبی مصنوعی[2] به منظور تقریب تابع/توابع هدف مسأله بهینه‌سازی، جایگزین مدل اصلی شده و در ادامه با الگوریتم بهینه‌ساز ارتباط داده می‌شود (Karamouz et al., 2009; Nazif et al., 2010; Safavi et al., 2010; Grundmann et al., 2012; Javaheri and Saadatpour, 2017; Alizadeh et al. (2016). مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز NSGA-II-MODFLOW، مبتنی بر فرامدل M5P را به منظور تعیین بهترین سیاست‌های تخصیص آب زیرزمینی توسط مدل‌های چاه‌زنی بازگشتی، توسعه دادند. Shourian et al. (2008a) به بهینه‌سازی تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با توسعه مدل تلفیقی PSO-MODSIM، پرداختند. در تحقیق آن‌ها از مدل شبکه عصبی به عنوان مدل جایگزین MODSIM با هدف کاهش حجم محاسبات سیستم در رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده گردید. Tsoukalas and Makropoulos (2015) با هدف دستیابی به یک راه حل مناسب در تأمین نیاز تولید انرژی و تأمین مصارف، از مدل شبیه‌سازی WEAP و الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II بهره گرفتند و مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز مبتنی بر فرامدل ParEGO-NSGA-II را توسعه دادند. Mirfenderesgi et al. (2016) با توسعه یک مدل ترکیبی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با ارتباط الگوریتم بهینه‌سازی SPSO و چهار مدل شبکه عصبی، ماشین بردار پشتیبان، کریجینگ و توابع پاسخ چندجمله‌ای، به‌عنوان جایگزین مدل MODSIM، به تخصیص مقادیر بهینه آب در مقیاس حوضه پرداختند. Afsharian-zadeh and Mousavi (2016) با هدف بهینه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری، مسأله طراحی و بهره‌برداری از سدهای برقابی متوالی کارون ۲ و ۳ را با احتساب تأثیرات هیدرولیکی سراب مخزن پایین‌دست بر تراز پایاب نیروگاه بالادست، مورد مطالعه قرار دادند. آنان برای حل مسأله از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی غیرمحدب عدد صحیح[3] و روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و تکاملی استفاده نمودند. با توجه به پیچیدگی‌های این مسأله امکان حل مدل با روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک میسر نگردید و در ادامه از الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات، همراه با ملاحظات تولید جواب‌های شدنی مرحله به مرحله یا نموی[4] و همچنین استفاده از ساختار مسأله در تشخیص دوره‌های شکست و موفقیت در تأمین نیاز انرژی پایدار سیستم، به جواب‌های قابل قبول و نه ضرورتاً بهینه کلی دست یافتند.

هدف اصلی این مقاله، توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به منظور تعیین ظرفیت های بهینه‌سازه‌های ذخیره‌سازی و انتقال منابع آبی با در نظر گرفتن توأم معیارهای ارتقاء تأمین نیاز در حوضه‌های مبداء و مقصد و کاهش هزینه‌های طرح است. با توجه به وجود اهداف متفاوت و چندگانه در مدیریت طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای توسط مدیران، توسعه و ارائه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چند هدفه، مورد نظر است. به این منظور از الگوریتم هوش جمعی ذرات چند هدفه به عنوان یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی فراکاوشی بهره گرفته خواهد شد. با توجه به عدم توانایی شکل استاندارد این الگوریتم در حل این مسأله بزرگ مقیاس، پیچیده و غیر خطی، اقدام به توسعه آن شده و از الگوریتم هوش جمعی ذرات چندهدفه چند ازدحامی با رویکرد همکارانه استفاده خواهد شد. همچنین از مدل شبیه‌سازی برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع و مصارف در سطح حوضه آبریز (WEAP) به منظور شبیه‌سازی پاسخ‌های حوضه‌های آبریز مبداء و مقصد در سناریوهای متفاوت ظرفیت سازه‌های انتقال و ذخیره‌سازی منابع آبی استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مستلزم فراخوانی‌های متعدد مدل شبیه‌سازی به منظور ارزیابی متغیرهای تصمیم سیستم است و از طرفی به دلیل هزینه زمانی و محاسباتی مدل شبیه‌سازی WEAP، حجم محاسباتی بالایی به سیستم تحمیل خواهد گردید. به منظور مواجهه با هزینه‌های بالای زمانی و محاسباتی در حل این مسأله بزرگ مقیاس، از تکنیک‌های فرامدل به دو صورت ترتیبی و تطبیقی در این تحقیق استفاده شده است. در تکنیک شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به عنوان ابزارهای کارآمد و دقیق، پاسخ‌های سیستم منابع آبی به سناریوهای مختلف ظرفیت سازه‌ها تقریب زده خواهد شد. در ادامه، این مدل شبیه‌سازی جایگزین با الگوریتم بهینه‌سازی هوش تجمعی ذرات چند هدفه به صورت در خط ارتباط داده شده و به منظور تعیین ظرفیت‌های بهینه‌سازه‌های آبی به کار گرفته می‌شوند. مدل داده‌کاوی منتخب در این مطالعه، شبکه عصبی ANN می‌باشد.

۲- روش تحقیق

در شکل ۱، نمودار جریانی مربوط به ساختار کلی روش تحقیق پیشنهادی برای تعیین ابعاد بهینه سیستم انتقال آب بهشت‌آباد با استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، ارائه شده است. ساختار پیشنهادی شامل سه بخش اصلی مدل شبیه‌سازی، توسعه مدل جایگزین و فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. در ادامه هر یک از این بخش‌ها تشریح می‌گردند.

www.SID.ir

Arshive of SID

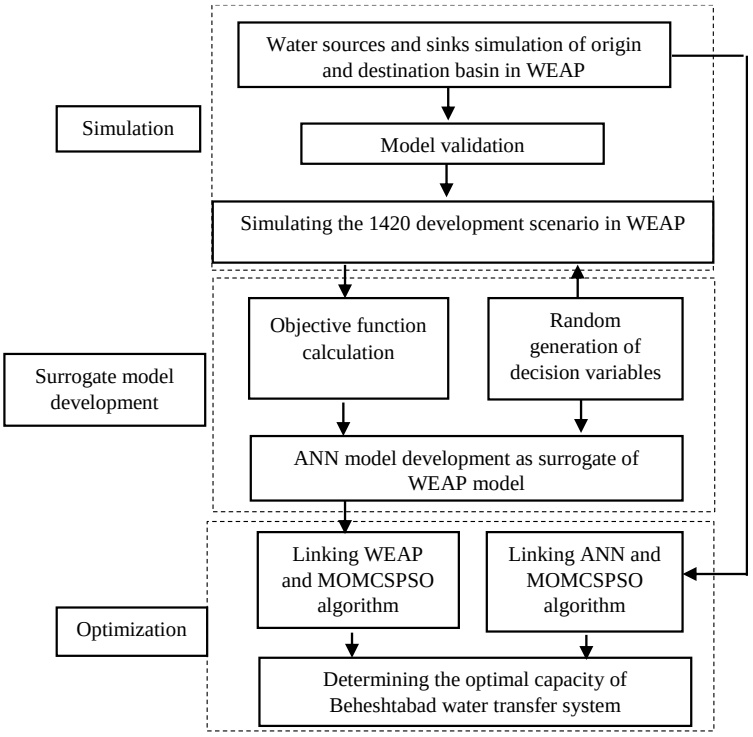

Fig. 1- Flowchart of Research Process

شکل ۱- نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق

۲-۱- شبیه‌سازی منابع آب با استفاده از مدل WEAP

WEAP بر اساس معادلات پایه بیلان آبی عمل کرده و آن را می‌توان در سیستم‌های شهری، کشاورزی و حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های رودخانه‌ای مرزی پیچیده به کار برد. یکی از مؤلفه‌های مهم در مدل‌های شبیه‌ساز حوضه‌ای نظیر WEAP، چگونگی حل تخصیص منابع آب در این مدل‌ها می‌باشد. اغلب معیاری که برای محاسبه تخصیص آب به مصرف‌کننده به‌کار می‌رود حداقل کردن کمبود آب تحویلی به همه مصرف‌کنندگان در هر بازه زمانی مطابق رابطه ۱ است (Dinar et al., 1997):

$$\min \sum_i p_i \frac{Q^t_{dem,i}-Q^t_{del,i}}{Q^t_{dem,i}} \quad (۱)$$

که در آن $Q^t_{dem,i}$ مقدار آب تقاضا شده از طرف مصرف‌کننده i در بازه t، $Q^t_{del,i}$ مقدار آب تحویل داده شده به مصرف‌کننده i در بازه t، p_i اولویت مصرف‌کننده i در فرآیند تخصیص می‌باشد. مدل WEAP از یک مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تأمین نیازهای نقاط تقاضا با توجه به اولویت در تقاضا و ترجیح در تأمین، تعادل جرمی و سایر قیود است (Yates et al., 2005).

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی هوش تجمعی ذرات چند هدفه MOPSO

الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات ابتدا در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید. فرمول‌بندی این الگوریتم با الهام گرفتن از پرواز گروهی پرندگان و شنای گروهی ماهی‌ها و زندگی اجتماعی آن‌ها انجام شده است. در الگوریتم PSO یک جمعیت از جواب‌های بالقوه برای مسأله مورد نظر، به‌منظور اکتشاف در فضای جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرند. در PSO، هر عنصر از جمعیت دارای یک سرعت قابل تنظیم (تغییر مکان) که مطابق با آن در فضای جستجو به حرکت در می‌آید، می‌باشد. علاوه بر این، هر عنصر دارای یک حافظه بوده که بهترین نقطه از فضای جستجو را که تابحال دیده است را به‌خاطر می‌سپارد (Eberhart et al., 1996).

در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، چندین تابع هدف باید به‌صورت همزمان بهینه شوند. در این صورت مسأله دارای بیش از یک جواب بهینه می‌باشد که به آن‌ها جواب‌های بهینه پرتو گفته می‌شود. فضای شدنی مسأله نیز توسط قیودی که توسط کاربر برای مسأله تعریف می‌شود، تعیین می‌گردد. یکی از مسائل مهم در شکل چند هدفه این الگوریتم انتخاب Gbest برای تعیین موقعیت جدید است. در الگوریتم MOPSO از یک آرشیو[۵] خارجی برای ذخیره کردن جواب‌های

www.SID.ir

Arshive of SID

نامغلوب استفاده می‌شود. این آرشیو دارای دو قسمت کنترل کننده آرشیو و شبکه است. عملگر کنترل کننده آرشیو در مورد اضافه شدن و یا نشدن جواب‌ها به آرشیو تصمیم‌گیری می‌کند. بدان صورت که جواب‌های نامغلوب در هر تکرار در جمعیت اولیه با تک تک جواب‌های موجود در آرشیو، که در ابتدای الگوریتم خالی است، مقایسه می‌شوند. در صورتی که ظرفیت آرشیو پر شود، آنگاه از روش شبکه‌بندی برای حذف یکی از جواب‌ها استفاده می‌گردد. پس از آنکه جواب‌های غالب درون آرشیو قرار گرفتند، در تکرار بعدی لازم است تا برای هدایت ذرات، Gbest جدید برای هر ذره انتخاب شود. گاهاً در الگوریتم MOPSO از یک مکانیزم نزدیکی- تصادفی استفاده می‌شود. انتخاب بر اساس نزدیکی یعنی Gbest برای یک ذره، نزدیک‌ترین جواب درون آرشیو به آن ذره است. انتخاب بر اساس تصادف نیز یعنی هر ذره یکی از ذرات درون آرشیو را به‌تصادف به‌عنوان Gbest انتخاب می‌کند (Coello et al., 2004).

۲-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی MOMCSPSO[۶]

با توجه به ماهیت مسأله مورد مطالعه در این تحقیق، روش MOPSO کلاسیک به‌صورت چند هدفه (تشریح شده در قسمت بالا) عملکرد مناسبی نداشته است، چراکه مقادیر متغیرهای تصمیم بهینه مسأله، در بازه کوچکی از دامنه تغییرات خود انتخاب شده بودند و تنوع آن‌ها با توجه به چند هدفه بودن مسأله بسیار کم بوده است و به این معناست که الگوریتم در همگرایی جواب‌های بهینه دچار مشکل است. به منظور فائق آمدن بر این مشکل از تکنیک بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات چند ازدحامی با رویکرد همکارانه استفاده گردید. در این تکنیک به‌جای داشتن تنها یک Swarm، چند Swarm به موازات هم عمل می‌نمایند. به این ترتیب که کل ذرات تولید شده در گام اول به تعداد m Swarm تقسیم می‌شوند. تا تعداد گام‌های مشخصی، ذرات موجود در هر Swarm بر اساس مشخصات همان Swarm به‌روز می‌شوند (Li and Yao, 2009; Ostadrahimi et al., 2012). برای متغیرهای بهینه‌سازی توابع هدف مسأله ۳۰ ذره که مشتمل بر دو گروه ۱۵تایی از ذرات است در نظر گرفته شد که در طول روند بهینه‌سازی عملکرد همکارانه را از خود نشان می‌دهند. به این‌گونه که در گروه اول ذرات (Swarm1)، دامنه تغییرات متغیرهای تصمیم برای سه دسته‌ی سه‌تایی از گروه ذرات طبق جدول ۱ محدود شده است و ۶ ذره دیگر طبق جدول ۲ برای دامنه تغییرات متغیر تصمیم به جست و جو در فضای مسأله می‌پردازند. در گروه دوم (Swarm2) نیز تمامی ذرات طبق جدول ۲ در انتخاب متغیرهای تصمیم عمل می‌کنند. در طول روند بهینه‌سازی در تکرارهای مشخصی جبهه پرتو تشکیل شده هر یک از دو گروه ذرات، در هم ادغام و مقایسه شده و ادامه روند بهینه‌سازی از این جبهه پرتو واحد استفاده می‌شود.

در این تحقیق دو نوع تابع هدف کمی و اقتصادی (هزینه اجرای طرح) برای حل مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شد که در مجموع مسأله بهینه‌سازی با سه هدف حل می‌شود. ماهیت مسائل انتقال آب بین حوضه‌ای دارای اهداف متضاد است که با تأمین نیازهای یک حوضه، حوضه دیگر با کمبود مواجه می‌شود.

Table 1- Decision variables' bounds for the first group of particles

جدول ۱- دامنه تغییرات متغیرهای تصمیم برای گروه اول ذرات

Variable	Bounds	3 particles	3 particles	3 particles
Dam reservoir volume (MCM)	Upper bound	2000	400	400
	Lower bound	80	100	100
Tunnel capacity (cms)	Upper bound	6.2	154	6.2
	Lower bound	0	0	0

Table 2- Decision variables bounds for the second group of particles

جدول ۲- دامنه تغییرات متغیرهای تصمیم برای گروه دوم ذرات

Variable	Tunnel capacity (cms)	Dam volume (MCM)
Upper bound	154	2000
Lower bound	0	80

از طرفی هم با وجود تابع هدف اقتصادی در مسأله، اهداف از جنس متفاوت می‌باشند که منحنی تبادل بین اهداف می‌تواند درک درستی از رفتار متعارض اهداف نسبت به یکدیگر را در اختیار بگذارد. به همین دلیل مسأله مورد نظر به صورت چند هدفه حل شد. تابع هدف کمی مسأله بهینه‌سازی به‌صورت حداقل‌سازی کمبود نیازهای شرب و زیست‌محیطی حوضه مبدأ و مقصد به‌صورت جمع مجذور ماهانه طبق روابط ۲ و ۳ در نظر گرفته شد:

www.SID.ir

Arshive of SID

$$F_1=\text{Minimize}\left(\sum_{t=1}^{n}\sum_{d=1}^{k}\left(\frac{\text{DemandB}_{td}-\text{SupplyB}_{td}}{\text{DemandB}_{td}}\right)^2\right) \quad (۲)$$

$$F_2=\text{Minimize}\left(\sum_{t=1}^{n}\sum_{d=1}^{k}\left(\frac{\text{DemandZ}_{td}-\text{SupplyZ}_{td}}{\text{DemandZ}_{td}}\right)^2\right) \quad (۳)$$

که در آن، SupplyB_{td}؛ حجم کل آب تحویلی به نیاز d در دوره t در حوضه مبدأ، DemandB_{td}؛ حجم کل آب مورد نیاز، نیاز d در دوره t در حوضه مبدأ، SupplyZ_{td}؛ حجم کل آب تحویلی به نیاز d در دوره t در حوضه مقصد و DemandZ_{td}؛ حجم کل آب مورد نیاز، نیاز d در دوره t در حوضه مقصد است.

هدف سوم در حل مسأله بهینه‌سازی، حداقل نمودن هزینه اجرای سامانه انتقال آب می‌باشد. هزینه‌های سامانه انتقال آب بهشت‌آباد شامل اجرای سد مخزنی و تونل بهشت‌آباد است. به همین دلیل برای محاسبه هزینه اجرای تونل و سد مخزنی بهشت‌آباد می‌بایستی رابطه‌ای بین ظرفیت و هزینه اجرا آن‌ها، تعریف شود. به این منظور از پژوهشی که توسط Rostami et al. (2013) انجام شد، برای محاسبه هزینه اجرای تونل استفاده گردید. در پژوهش آن‌ها بر اساس مطالعه ۲۷۲ پروژه ساخت تونل و تحلیل آماری اطلاعات ثبت شده پروژه‌ها شامل هزینه‌های ساخت و ساز، ابعاد تونل، وضعیت زمین‌شناسی و کاربرد تونل، مدل‌هایی با هدف تخمین هزینه ساخت تونل ارائه شد (Rostami et al., 2013). با توجه به کاربرد تونل بهشت‌آباد به منظور انتقال آب و خصوصیات زمین‌شناسی در مسیر تونل، از مدل زیر که در پژوهش آنان ارائه گردید، در این تحقیق استفاده شد (رابطه ۴). مدل پیشنهادی آنان بر اساس طول و قطر تونل است:

$$\text{Cost}=10^{(0.553+0.866\log(\text{Lenght(km)})+1.23\log(\text{Diameter (m)}))} \quad (۴)$$

بر مبنای محاسبات مالی سال ۱۳۸۵ هزینه احداث تونل بهشت‌آباد با قطر ۶ متر و طول ۶۵ کیلومتر برابر با ۴۶۶۵ میلیارد ریال برآورد شده است (Zayndab Consulting Engineers, 2008). در محاسبه هزینه اجرای تونل ارزش دلار امریکا در سال ۲۰۰۸ به ریال سال ۱۳۸۵ تبدیل گردید. با استفاده از رابطه ۴ هزینه اجرای تونل بهشت آباد با قطر ۶ متر مقدار ۵۰۵۷ میلیارد ریال حاصل شد که نسبت آن با مقداری که در مطالعات اقتصادی شرکت زایندآب آمده برابر با ۰/۹۲۲۵ است و این نسبت به عنوان ضریبی در رابطه ۴ استفاده گردید. با محاسبه هزینه اجرای تونل به ازای قطرهای مختلف و طول ثابت ۶۵ کیلومتر و یک رگرسیون خطی بین مقادیر هزینه، رابطه ۵ برای محاسبه هزینه اجرای تونل بهشت‌آباد به‌دست می‌آید:

$$\text{TunnelCost}=935.9*\text{Diameter}_{\text{TunnelB}}-939.5 \quad (۵)$$

TunnelCost: هزینه اجرای تونل بهشت‌آباد (میلیارد ریال)، $\text{Diameter}_{\text{TunnelB}}$: قطر تونل بهشت‌آباد (متر)

در مدل WEAP تعیین ابعاد تونل انحراف بر اساس ظرفیت تونل (cms) می‌باشد. به همین دلیل رابطه هزینه اجرای تونل باید بر اساس ظرفیت تونل تعیین شود. از این رو رابطه‌ای بین ظرفیت تونل بهشت‌آباد و قطر آن تعریف می‌شود (شکل ۲).

در نهایت با استفاده از رابطه ۵ و نمودار شکل ۲، رابطه ۶ برای محاسبه هزینه اجرای تونل به ازای ظرفیت آن تعریف می‌گردد:

$$\text{TunnelCost}=935.9*(0.8011*\text{QTunnel}_B^{0.4993})-939.5 \quad (۶)$$

که در آن TunnelCost؛ هزینه اجرای تونل بهشت‌آباد (میلیارد ریال) و QTunnel_B؛ ظرفیت تونل انتقال آب بهشت‌آباد (cms) است.

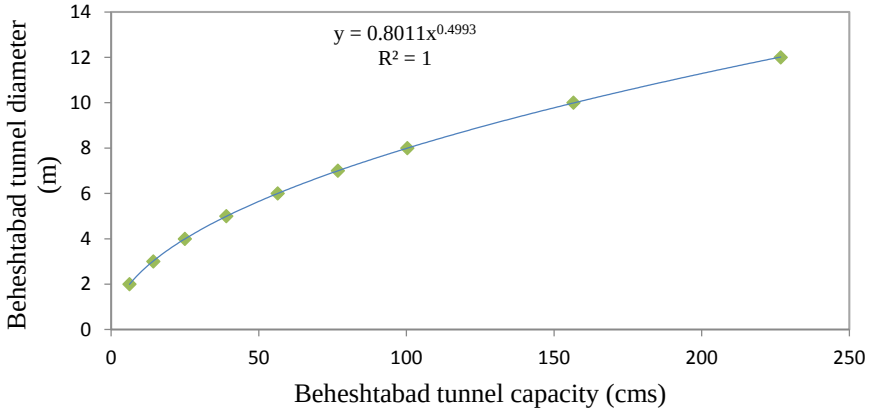

Fig. 2- Relationship between Beheshtabad tunnel capacity and its diameter

شکل ۲- رابطه ظرفیت تونل بهشت‌آباد به ازای قطر آن

www.SID.ir

Arshive of SID

با برازش منحنی مناسب (تابع ریاضی درجه دو در این تحقیق در نظر گرفته شد) بین مقادیر احجام مختلف مخزن و هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، رابطه ریاضی بیانگر رابطه حجم مخزن سد و هزینه‌های ساخت، نگهداری و بهره‌برداری آن حاصل می‌گردد. رابطه میان مقادیر ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ میلیون متر مکعب حجم مخزن بهشت‌آباد با هزینه احداث، بهره‌برداری و نگهداری مخزن بهشت آباد به شرح رابطه ۷ است:

$$DamCost=0.0008\ DamCap^2+0.3167\ DamCap+1777.4 \quad (۷)$$

که در آن، DamCost هزینه ساخت، بهره‌برداری و نگهداری سد بهشت‌آباد (میلیارد ریال) و DamCap، حجم مخزن سد بهشت‌آباد (MCM) است. در نهایت با استفاده از روابط ۶ و ۷ رابطه زیر برای محاسبه هزینه اجرا، بهره‌برداری و نگهداری سامانه انتقال آب طرح بهشت‌آباد بر مبنای قیمت‌های پایه سال ۱۳۸۵ به‌عنوان تابع هدف سوم ارائه می‌شود:

$$F_3(COST)=Minimize(935.9*(0.8011*QTunnel_B^{0.4993}) +0.0008\ DamCap^2+0.3167\ DamCap+837.9) \quad (۸)$$

۲-۲-۲- ساختار مدل MOMCSPSO-WEAP

پس از آماده‌سازی مدل شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه‌های بهشت‌آباد–زاینده‌رود (WEAP) در شرایط توسعه، به منظور تعیین ظرفیت سازه‌های ذخیره‌سازی، این مدل شبیه‌سازی به مدل بهینه‌سازی MOMCSPSO ارتباط داده می‌شود. سپس به ازای مجموعه مقادیر مختلف از متغیرهای طراحی MOMCSPSO تولید می‌شوند، با اجرای مدل WEAP به ازای هر مجموعه ذرات تولید شده، توابع هدف متناظر با آن مجموعه جواب محاسبه می‌گردند. ذرات به سمت مقادیری همگرا می‌شوند که کمترین مقدار تابع هدف را که برابر با میزان کمبود نیازها در حوضه‌های مبدأ و مقصد و هزینه‌های اجرایی طرح می‌باشد، در برداشته باشد. قیود این مدل بهینه‌سازی شامل قیدهای حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی است. در شکل ۳ روندنمای عملکرد مدل MOMCSPSO-WEAP نشان داده شده است.

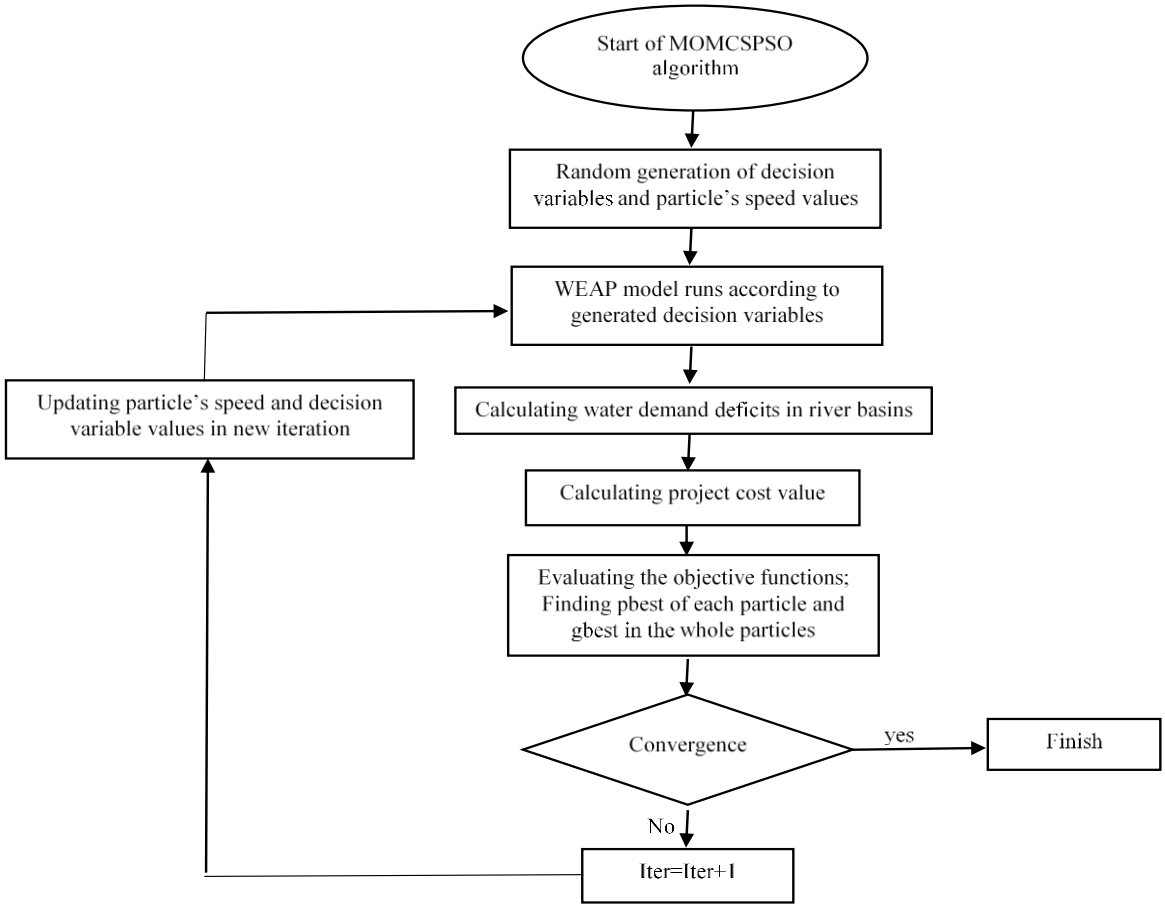

Fig. 3- Flowchart of MOMCSPSO-WEAP model procedure

شکل ۳- روندنمای عملکرد مدل MOMCSPSO-WEAP

www.SID.ir

Arshive of SID

۲-۳- مدل جایگزین

هدف از ایجاد مدل جایگزین این است که در فرآیند طراحی یا بهره‌برداری، جایگزین مدل اصلی شده و با ارائه پاسخ‌های سریع و نسبتاً دقیق در زمان کوتاه‌تر، امکان ارزیابی مجموعه گزینه‌هایی را فراهم آورد که کل فضای تصمیم را می‌پوشانند. این مدل‌های جایگزین در حالی که به تشبیه پاسخ‌های مدل‌های شبیه‌سازی با دقت قابل قبولی می‌پردازند، به لحاظ هزینه‌های محاسباتی و زمانی ارزان‌تر می‌باشند (Barton and Meckesheimer, 2006). مدل جایگزین مورد استفاده در این تحقیق، مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. این روش بر اساس تئوری درونی پیچیده و فرآیندهای موازی سیستم‌های عصبی بیولوژیک استوار است و توانایی آن در برقراری ارتباط میان ورودی‌ها و خروجی‌های یک فرآیند بدون آگاهی کامل از فیزیک آن است. یک شبکه عصبی مصنوعی مجموعه‌ای از نرون‌ها است که با قرارگرفتن در لایه‌های مختلف معماری خاصی را بر مبنای ارتباطات بین نرون‌ها در لایه‌های مختلف تشکیل می‌دهند. یک نرون با استفاده از تابع انتقال، مقدار خروجی خاصی را به ازای ورودی‌های مختلف تولید می‌کند.

۲-۳-۱- ساختار مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با رویکرد فرامدل[۷]

به منظور مواجهه با چالش هزینه‌های محاسباتی و زمانی MOMCSPSO-WEAP، تکنیک فرامدل در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، مدل داده کاوی شبکه عصبی مصنوعی بر اساس اطلاعات حاصل از مدل شبیه‌سازی فرآیندی WEAP به عنوان مدل جایگزین توسعه داده شده است. سپس مدل جایگزین توسعه داده شده با الگوریتم MOMCSPSO ارتباط داده شده و رویکردهای شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین برای حل مسأله تعریف شده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. رویکردهای مختلفی در توسعه تکنیک‌های فرامدل وجود دارد. یکی از تکنیک‌ها روش ترتیبی است. در این تکنیک، مدل داده‌کاوی پس از آموزش و تست، به عنوان مدل جایگزین در رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. در کل فرآیند تکرار، فراخوانی مدل شبیه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مدل داده‌کاوی در تقریب برازندگی تابع هدف به کار می‌رود. تکنیک تطبیقی، از دیگر تکنیک‌های موجود در توسعه تکنیک فرامدل است. به این ترتیب که در طی فرآیند تکرار شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، مدل داده‌کاوی جایگزین با داده‌های جدیدی از مدل شبیه‌سازی اصلی آموزش و صحت‌سنجی می‌گردد. در این تکنیک، ساختار مدل داده‌کاوی ممکن است در طی تکرار شبیه‌سازی اصلاح گردد.

در فرامدل تطبیقی اصلاح آرشیو شبکه عصبی، بر اساس فاصله متغیرهای تصمیم ایجاد شده (ظرفیت تونل و حجم سد مخزنی بهشت‌آباد) در مقایسه با داده‌های موجود در آرشیو شبکه عصبی انجام می‌گیرد. روش کار به این صورت است که در تکرارهای معینی فاصله متغیرهای تصمیم ایجاد شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی با داده‌های موجود در آرشیو محاسبه می‌شود. کم‌ترین فاصله هر بردار جدید ایجاد شده (متغیرهای تصمیم) با داده‌های موجود در آرشیو به عنوان فاصله شاخص آن بردار جدید درنظر گرفته می‌شود. سپس این شاخص‌ها به صورت نزولی مرتب می‌شوند و نصف این ذرات که دارای فاصله شاخص بزرگتری (با ذرات آرشیو شبکه عصبی) نسبت به بقیه ذرات هستند، وارد آرشیو داده‌های آموزشی شده و شبکه عصبی مجددا مورد آموزش قرار می‌گیرد. شماره تکراری که در آن اصلاح داده‌های آرشیو مدل داده‌کاوی با استفاده از اطلاعات مدل شبیه‌ساز فرآیندی WEAP انجام شود، در اینکار تحقیقاتی هر ۲۰ تکرار در نظر گرفته شد. در پایان نیز نتایج حاصل از به‌کارگیری تکنیک فرامدل ترتیبی و تطبیقی با مدل WEAP مورد ارزیابی قرار گرفته و اعضای جبهه پرتو نهایی می‌گردند. توسعه هر دو مدل شبیه‌سازی جایگزین و الگوریتم بهینه‌سازی با برنامه‌نویسی در محیط MATLAB صورت پذیرفت.

۳- محدوده مورد مطالعه

موقعیت طرح انتقال آب بهشت‌آباد در دو استان چهارمحال و بختیاری و اصفهان واقع است. ورودی تونل انتقال آب بر روی شاخه بهشت‌آباد و تقریبا از منتهی‌الیه آن شروع خواهد شد. این تونل در راستای شمال شرق به طول حدود ۶۵ کیلومتر در بالادست سد چم‌آسمان به زاینده‌رود منتهی می‌گردد (شکل ۴). محدوده مورد مطالعه شامل حوضه آبریز بهشت‌آباد در موقعیت جغرافیایی ۵۰-۳۱ تا ۳۵-۳۲ درجه شمالی و ۰۰-۵۰ تا ۲۵-۵۱ درجه شرقی و حوضه آبریز زاینده‌رود در موقعیت ۱۰-۳۲ تا ۴۰-۳۳ درجه شمالی و ۳۰-۵۰ تا ۲۳-۵۳ درجه شرقی قرار دارد. حوضه بهشت‌آباد کاملاً در محدوده استان چهارمحال و بختیاری واقع است و با ۳۸۶۰ کیلومتر مربع وسعت، وسیعترین زیرحوضه در حوضه آبخیز کارون شمالی است.

۴- نتایج و تحلیل نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز مبدأ و مقصد

در این تحقیق، برای دستیابی به اهداف مورد نظر از مدل کامپیوتری WEAP برای برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب در محدوده مطالعاتی استفاده گردید. طول دوره شبیه‌سازی ۲۰ سال (۱۳۷۰-۱۳۸۹) و گام زمانی ماهانه در نظر گرفته شد.

www.SID.ir

Arshive of SID

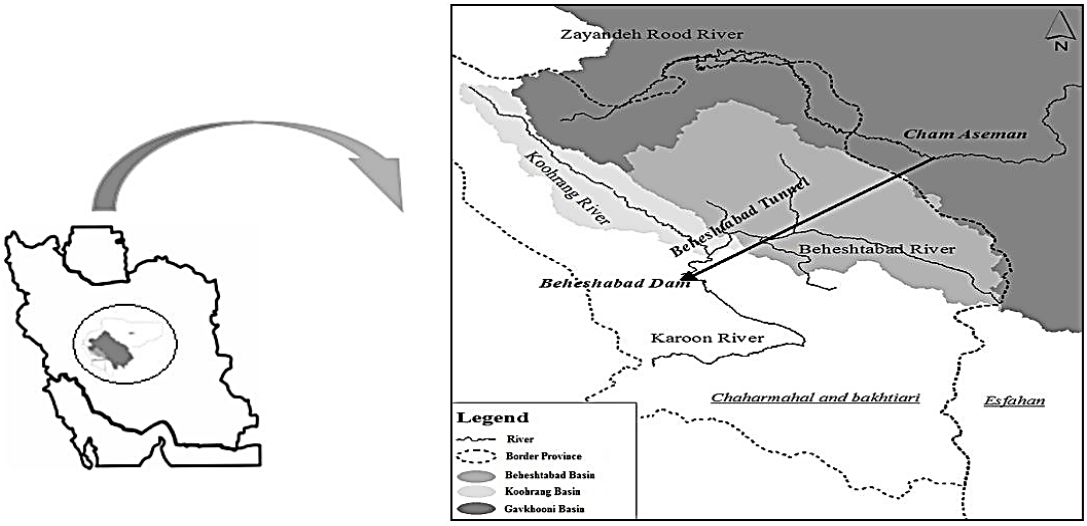

Fig. 4- The map of the study area
شکل ۴- محدوده مورد مطالعه

سری زمانی مربوط به آبدهی رودخانه‌های دو حوضه زاینده‌رود و بهشت‌آباد، اطلاعات مربوط به گره‌های نیاز که نشان‌دهنده نیازهای شرب، صنعت، زیست‌محیطی و کشاورزی مناطق مختلف دو حوضه می‌باشد، اطلاعات مربوط به گره‌های مخازن سدها و عدد اولویت مربوط به نیازها که با توجه به آن تخصیص آب در مدل بین نیازها صورت می‌پذیرد به‌عنوان ورودی‌های مدل WEAP به آن اعمال شدند. در این تحقیق اولویت نیازها به ترتیب نیاز شرب، زیست محیطی، صنعت و کشاورزی است. شماتیک سیستم تحت مطالعه در شرایط موجود، در شکل ۵ ارائه شده است.

پس از پیاده‌سازی داده‌ها و اطلاعات پایه در مدل شبیه‌سازی واسنجی مدل انجام شد. واسنجی مدل با توجه به وضعیت موجود حوضه توسط پارامترهای درصد جریان آب برگشتی از مصارف و اولویت برداشت از آب سطحی و زیرزمینی به روش سعی و خطا در یک دوره ۱۰ ساله (۸۹-۸۰) صورت پذیرفت. نمودارهای پراکندگی عملکرد مدل در دوره واسنجی نیز برای این ایستگاه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. با توجه به نتایج، مقایسه سری زمانی آبدهی ثبت شده و مقادیر محاسباتی، تطابق مناسب را بیان می‌کنند. از این رو مدل شبیه‌سازی‌شده تا حد قابل قبولی نمایشگر سیستم واقعی حوضه است که می‌توان در ادامه جهت اعمال فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

پس از واسنجی مدل شبیه‌سازی شده، سیستم منابع و مصارف حوضه این طرح در مدل WEAP در شرایط افق ۱۴۲۰ با وجود طرح هایی که هم اکنون در حال بهره‌برداری، اجرا و مطالعات هستند، پیاده‌سازی شد. سیستم منابع و مصارف منابع آب در شرایط توسعه شامل، نیازها و مصارف آبی در وضع موجود، نیازها و مصارف آبی در افق طرح، طرح‌های اجرایی، طرح‌های مطالعاتی و مدیریت تقاضا در حوضه آبریز طرح انتقال آب بهشت‌آباد می‌باشد. با توجه به این موضوع می‌توان اظهار کرد که خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی این سیستم در WEAP با درصد خطای کمی بیانگر رفتار حوضه آبریز طرح بهشت‌آباد در شرایط آینده بوده و لذا استفاده از آن‌ها در ادامه روند تحقیق و به‌کارگیری در مدل بهینه‌سازی، جواب‌های منطقی و نزدیک به واقعیت را برای انتقال آب طرح بهشت‌آباد در اختیار می‌گذارند.

۴-۲- طراحی بهینه طرح انتقال آب بهشت‌آباد با استفاده از مدلMOMCSPSO-WEAP

از آنجایی که مدل WEAP قابلیت فراخوانی مستقیم در محیط نرم‌افزار MATLAB را ندارد، نرم‌افزار Excel به‌عنوان یک رابط برای ارتباط بین مدل WEAP و الگوریتم MOMCSPSO به کار گرفته شده است. به این صورت که مقادیر متغیرهای تصمیم تولید شده توسط الگوریتم MOMCSPSO در محیط Excel، که از قبل در نرم‌افزار WEAP فراخوانی شده است، ذخیره می‌شوند. همچنین خروجی‌های مدل WEAP پس از ذخیره در فایل‌های Excel برای محاسبه توابع هدف در محیط متلب فراخوانی می‌شوند. عملکرد مدل MOMCSPSO-WEAP بدین گونه است که در تکرار اول مقادیر متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم MOMCSPSO به صورت تصادفی تولید می‌شوند. در ادامه مقادیر تولید شده برای متغیرها به مدل WEAP داده می‌شود.

www.SID.ir

Arshive of SID

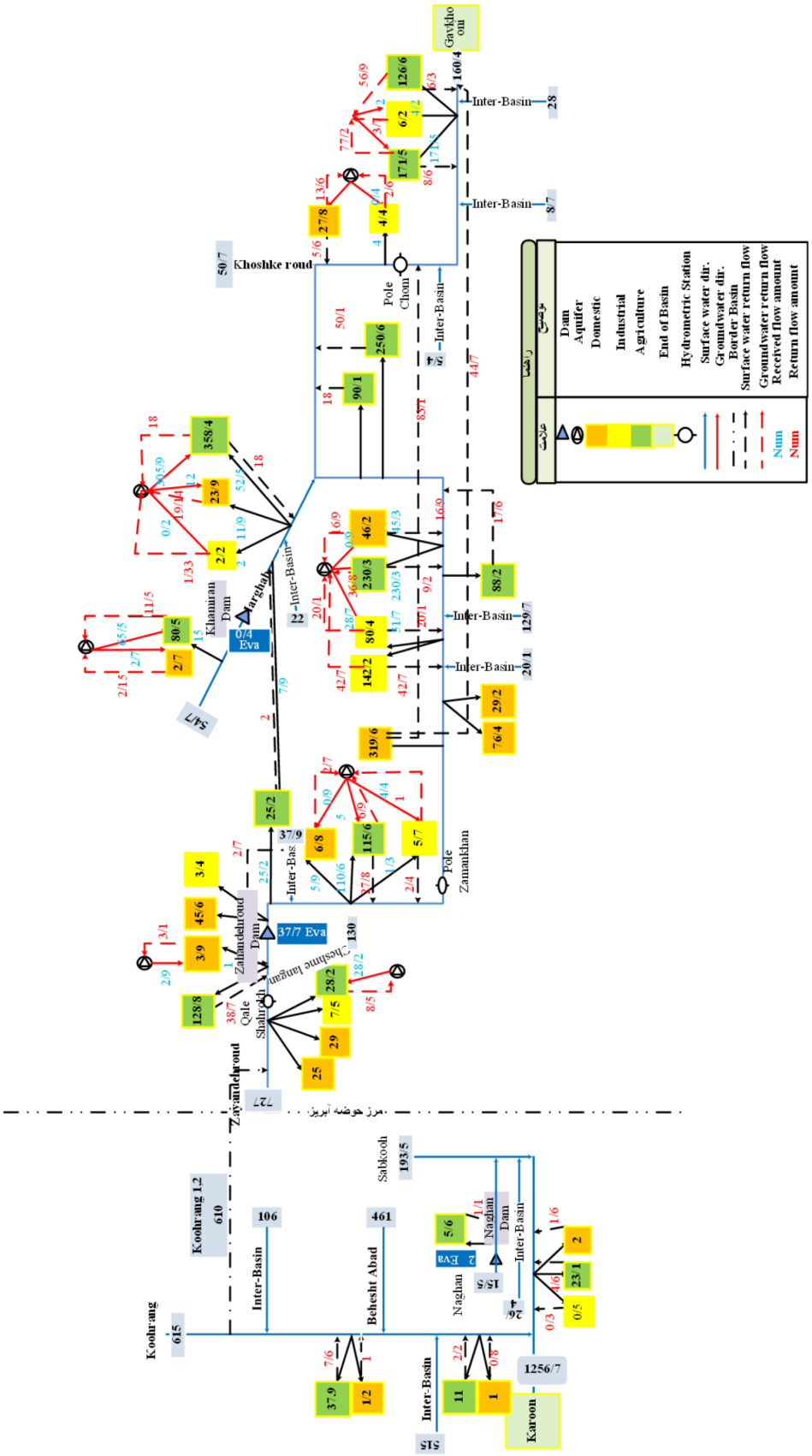

Fig. 5- Schematic of the annual water sources and sinks in the studied river basins

شکل ۵- شماتیک سالانه منابع و مصارف حوضه‌های آبریز مورد مطالعه

www.SID.ir

Arshive of SID

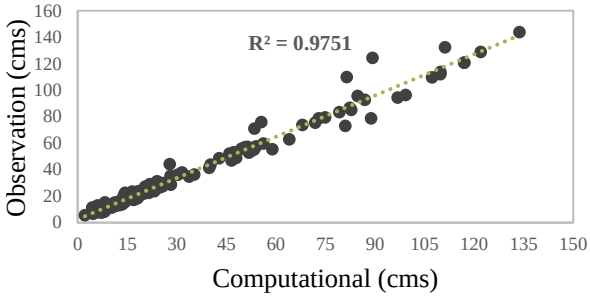

Fig. 6- Correlation between computational and observation flow data in Qaleh-shahrokh station

شکل ۶- همبستگی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی جریان در ایستگاه قلعه‌شاهرخ

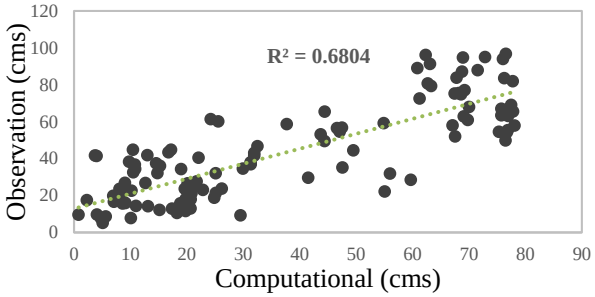

Fig. 7- Correlation between computational and observation flow data in Pole-zamankhan station

شکل ۷- همبستگی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی جریان ایستگاه پل زمان‌خان

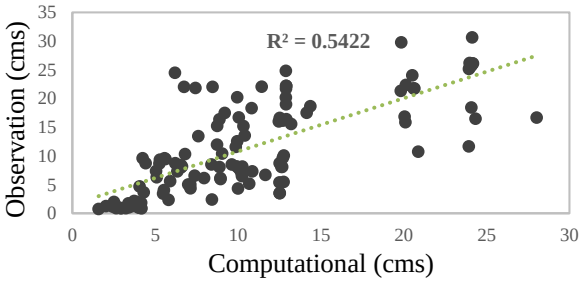

Fig. 8- Correlation between computational and observation flow data in Pole-chom station

شکل ۸- همبستگی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی جریان در ایستگاه پل چوم

مدل WEAP با توجه به این مقادیر رفتار سیستم را شبیه‌سازی نموده و مقادیر تأمین نیازهای آبی را به‌دست می‌آورد. با استفاده از نتایج به‌دست آمده توسط مدل WEAP مقدار تابع هدف محاسبه شده و با توجه به آن مقادیر نسل بعدی متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم MOMCSPSO محاسبه می‌شوند. این روند تا زمان همگرا شدن مدل به بهترین مقدار تابع هدف ادامه یافته تا بهینه‌ترین مقادیر متغیرهای تصمیم به‌دست آید. ضرایب c_1 و c_2 به‌عنوان ضرایب شناخت اجتماعی در مدل برابر ۱/۵ انتخاب شدند. تعداد دفعات ارزیابی توابع هدف به‌عنوان شرط توقف روند بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و اجرای مدل با تعداد ۲۰۰ تکرار و ۶۰۰۰ بار ارزیابی توابع هدف، انجام شد. همچنین مقادیر w_1 و w_2 به ترتیب برابر ۱ و ۰/۲ انتخاب شدند. اجرای این برنامه در کامپیوتری با مشخصات Cori7-3930k CPU@3.20GHz و RAM 16GB، انجام شد. جبهه پرتو حاصل از اجرای مدل تلفیق توسعه داده شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. همچنین تعدادی از متغیرهای تصمیم (از بین ۵۰ عضو پرتو) متناظر با این جبهه پرتو در جدول ۳ ارائه شده است.

همانگونه که در نتایج مشاهده می‌گردد استفاده از الگوریتم پیشنهادی قادر به یافتن نقاط گسترده‌ای از جبهه پرتو مسأله این کار پژوهشی می‌باشد. با توجه به متغیرهای تصمیم بهینه حاصل از جبهه پرتو، مشاهده می‌شود که الگوریتم بهینه‌ساز مقادیر متنوعی را برای ظرفیت سد مخزنی پیدا نموده است. اما در انتخاب ظرفیت‌های بهینه تونل انتقال آب، به‌عنوان یکی دیگر از متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی، الگوریتم عموماً در مقادیر پایین دامنه تغییرات ظرفیت تونل به جست و جوی مقدار بهینه آن پرداخته است.

این نتایج به دلایل مختلفی قابل توجیه است. ظرفیت بالای سد بهشت‌آباد در رفع کمبود مصارف هر دو حوضه مبدأ و مقصد تأثیر مثبت دارد به همین دلیل در روند بهینه‌سازی همانطور که الگوریتم به‌منظور حداقل نمودن هزینه اجرایی به دنبال حداقل کردن ظرفیت سد است، از طرفی هم افزایش ظرفیت سد مخزنی بهشت‌آباد موجب بهبود (مقادیر کمتر) در مقدار توابع هدف اول و دوم مسأله (کمبود حوضه‌های مبدأ و مقصد) می‌شود. به همین دلیل مقادیر متنوعی به ظرفیت بهینه سد اختصاص می‌یابد. نکته دوم آن‌که با توجه به آورد رودخانه بهشت‌آباد در ساختگاه سد و تعیین یک گره نیاز زیست‌محیطی در پایین دست آن، میزان دبی رودخانه در محل انتقال متناسب با ظرفیت‌های انتخابی تونل انتقال می‌باشد و انتخاب ظرفیت‌های بالا با توجه به عدم وجود آب کافی در محل انتقال، توجیه‌پذیر نیست.

۴-۳- توسعه مدل جایگزین

با توجه به ماهیت مسأله تعریف شده در این تحقیق که تعیین ظرفیت بهینه تونل و سد بهشت‌آباد مورد نظر است، ۱۵۰ سری داده برای ظرفیت آن‌ها در دامنه تغییرات این متغیرها طبق جدول ۲ به‌طور تصادفی انتخاب و به مدل WEAP معرفی شدند. نتایج خروجی از مدل WEAP (توابع هدف کمبود منابع آبی در حوضه‌های مبداء و مقصد)، به‌عنوان خروجی مورد نظر برای مدل داده‌کاوی شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شوند. به ترتیب ۷۵، ۱۵ و ۱۵ درصد داده‌ها برای آموزش، صحت‌سنجی و تست شبکه عصبی در نظر گرفته شدند.

www.SID.ir

Arshive of SID

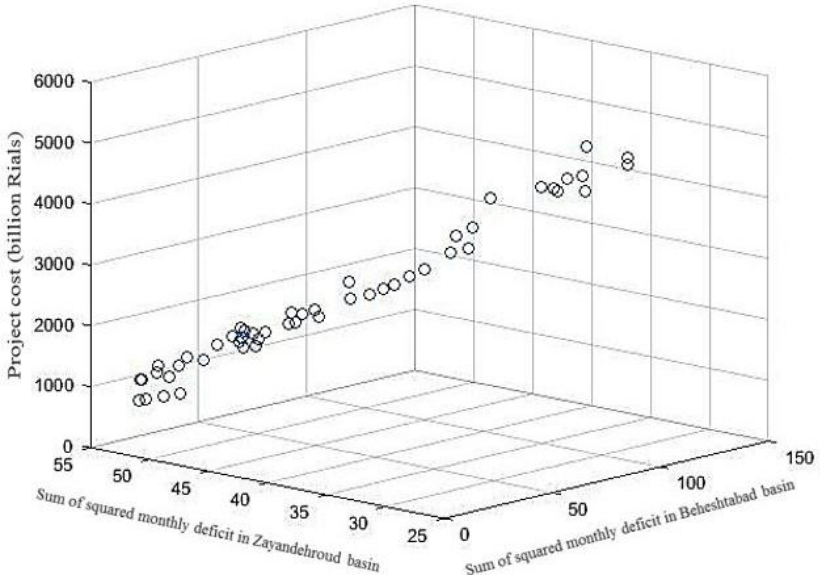

Fig. 9- Pareto front drived from the MOMCSPSO-WEAP model

شکل ۹- جبهه پرتو حاصل از مدل MOMCSPSO-WEAP

Table 3- Decision variables corresponding to the Pareto front of MOMCSPSO-WEAP model

جدول ۳- مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر جبهه پرتو مدل MOMCSPSO-WEAP

Pareto front No.	Tunnel capacity (cms)	Dam reservoir volume (MCM)
1	8	467
2	12.66	902
3	22.5	680
4	19.5	1010
5	19.7	254
6	23	768
7	10.5	447
8	17.3	551
9	18.7	636
10	2.5	233

برای آموزش شبکه از الگوریتم لونبرگ-مارکوارت[8] و تابع محرک از نوع سیگموید[9] استفاده گردید که در مقایسه با سایر توابع آموزش و محرک، عملکرد بهتری را از خود نشان دادند. رابطه خاصی برای تعداد نرون‌های لایه میانی وجود ندارد و بر اساس سعی و خطا به‌دست می‌آید که در این تحقیق از ۱۰ نرون برای لایه میانی در هر دو مدل جایگزین استفاده گردید. ضرایب همبستگی مقادیر توابع هدف خروجی از مدل WEAP با مدل جایگزین (شبکه عصبی) محاسبه و در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان از کارایی مناسب مدل جایگزین در تقریب توابع هدف مسأله در مقایسه با مدل شبیه‌ساز منابع آب WEAP دارد.

۴-۴- طراحی بهینه طرح انتقال آب بهشت‌آباد با استفاده از مدل جایگزین MOMCSPSO-ANN-(WEAP)

نحوه عملکرد مدل تلفیقی MOPSO-ANN-(WEAP) بدین گونه است که به ازای مقادیر تصمیم تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌ساز، مقادیر توابع هدف اول و دوم توسط مدل شبکه عصبی و مقدار تابع هدف سوم (هزینه اجرای طرح) بصورت مستقیم در الگوریتم به ازای مقادیر متغیرهای تصمیم (ظرفیت تونل و سد بهشت‌آباد) طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود. کلیه این اعضای جبهه پرتو، به منظور ارزیابی توابع هدف مسأله، در پایان توسط مدل WEAP مورد ارزیابی قرار گرفتند.

www.SID.ir

Arshive of SID

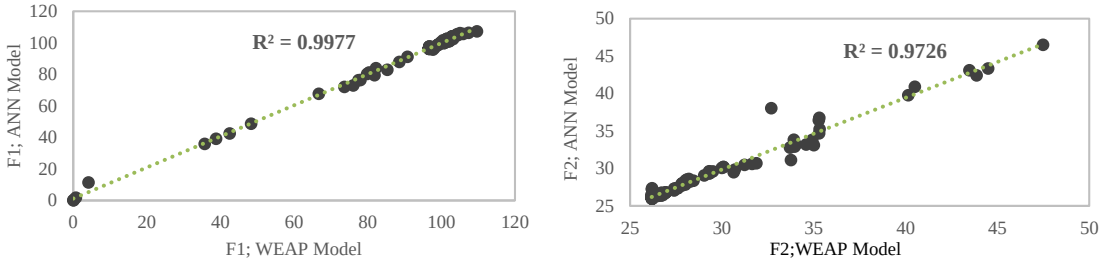

Fig. 10- Correlation between simulation results of WEAP and ANN model; a) First objective-function b) Second objective-function

شکل ۱۰- همبستگی نتایج شبیه‌سازی مدل WEAP و شبکه‌عصبی؛ الف) تابع هدف اول، ب) تابع هدف دوم

جبهه پرتو حاصل از اجرای فرامدل ترتیبی و تطبیقی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و تعدادی از متغیرهای تصمیم متناظر با این جبهه‌های پرتو به‌ترتیب در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه مسائل به‌صورت سه هدفه حل شدند مقایسه نتایج حاصل از این مدل‌ها در حل مسأله مورد نظر در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به صورت دو به دو نمایش داده شده است. همچنین مقایسه عملکرد این مدل‌ها در حل این مسأله در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ رابطه منطقی بین اهداف مسأله بهینه‌سازی قابل مشاهده است. با توجه به ماهیت مسأله انتقال آب، حوضه مبداء با از دست دادن آب دچار کمبود در تأمین نیازها خواهد شد و در طرف دیگر حوضه مقصد به عنوان دریافت‌کننده آب، در میزان کمبود در تأمین نیاز مصارف آن، بهبود حاصل خواهد شد. شکل ۱۳ بیانگر همین رابطه است. افزایش هزینه اجرایی طرح ناشی از افزایش ظرفیت سازه‌های انتقال آب است. با توجه به شکل ۱۴ ظرفیت سازه‌های بزرگتر منجر به انتقال آب بیشتری در سیستم خواهد شد که در نتیجه افزایش میزان کمبود حوضه مبدأ را به همراه خواهد داشت. با تفسیری مشابه، با توجه به نمودار شکل ۱۵ افزایش ظرفیت سازه‌ها و انتقال آب بیشتر به حوضه مقصد، موجب کاهش در مقدار کمبود نیازهای حوضه مقصد خواهد شد.

بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ تا ۱۵ نشان‌دهنده عملکرد نسبی مناسب تکنیک MOMCSPSO-ANN-WEAP در مقایسه با MOMCSPSO-ANN (فرامدل تطبیقی در مقایسه با فرامدل ترتیبی) در به لحاظ گستردگی پاسخ‌های ارائه شده بوده است. اگرچه تکنیک فرامدل تطبیقی در یافتن گزینه‌های متعدد کمبود پایین در حوضه مبدأ به ازای هزینه‌های مختلف اجرایی (خصوصاً هزینه کم) مانند تکنیک MOMCSPSO-WEAP عمل ننموده است؛ اما در مجموع می‌توان رضایت نسبی از عملکرد آن در حل این مسأله در ارائه پاسخ‌ها یا ابعاد طراحی مناسب داشت. به‌عبارتی اگرچه تکنیک MOMCSPSO-WEAP گزینه هایی با هزینه کم و کمبود پایین در حوضه مبدأ ارائه نموده است؛ اما این گزینه‌ها معادل کمبودهای بالایی در حوضه مقصد هستند که به لحاظ کاربردی جذابیت‌های مناسب را برای تصمیم‌گیرندگان نخواهد داشت.

Table 4- Decision variables corresponding to the Pareto front of the MOMCSPSO-ANN model

جدول ۴- مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر با جبهه پرتو مدل MOMCSPSO-ANN

Pareto front No.	Tunnel capacity (cms)	Dam volume (MCM)
1	16	1353
2	18.5	244
3	26.8	753
4	16	500
5	0	315
6	36.5	805
7	19.5	426
8	27.2	602
9	1.5	574
10	10.8	397

www.SID.ir

Arshive of SID

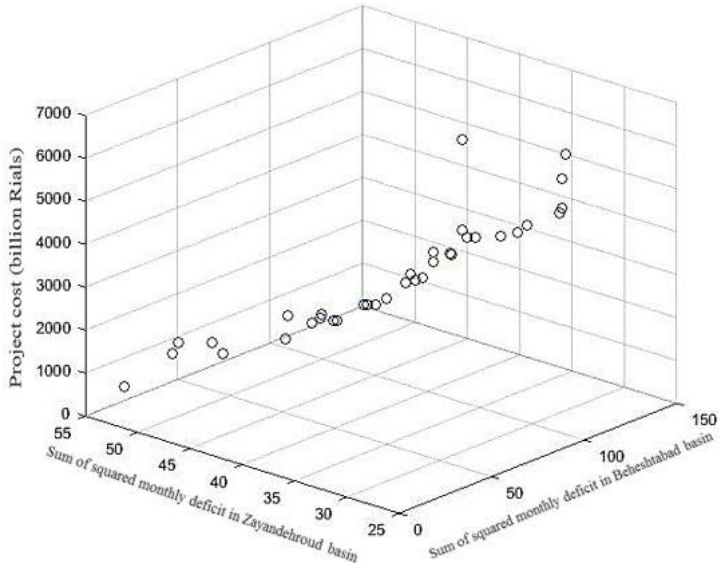

Fig. 11- Pareto front drived by the MOMCSPSO-ANN model (sequential meta-model)

شکل ۱۱- جبهه پرتو حاصل از مدل MOMCSPSO-ANN (فرامدل ترتیبی)

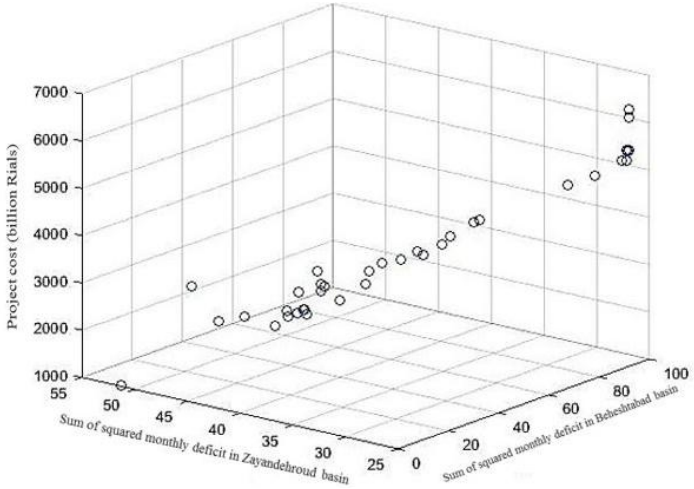

Fig. 12- Pareto front derived by the MOMCSPSO-ANN-WEAP model (adaptive meta-model)

شکل ۱۲- جبهه پرتو حاصل از مدل MOMCSPSO -ANN-WEAP (فرامدل تطبیقی)

Table 5- Decision variables corresponding to the Pareto front of the MOMCSPSO-ANN-WEAP model

جدول ۵- مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر با جبهه پرتو مدل MOMCSPSO-ANN-WEAP

Pareto front No.	Tunnel capacity (cms)	Dam reservoir volume (MCM)
1	35.9	1002
2	20.37	683
3	9.7	745
4	0	383
5	6.2	400
6	22.2	906
7	18.7	513
8	24.8	740
9	5	394
10	12.3	711

www.SID.ir

Arshive of SID

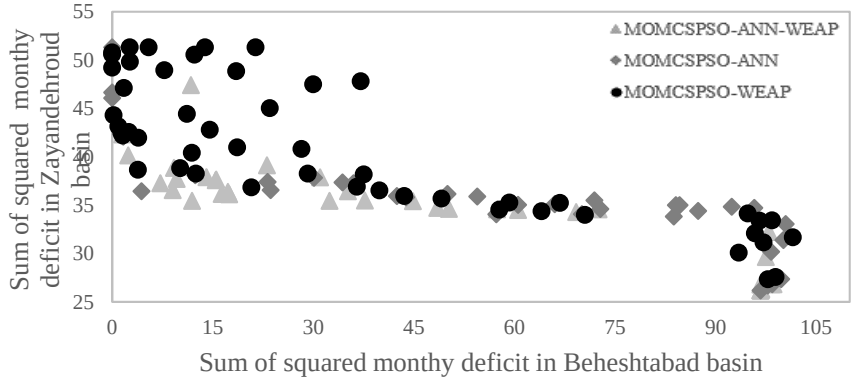

Fig. 13- The First and second objective functions in various applied techniques
شکل ۱۳- مقادیر توابع هدف اول و دوم در تکنیکهای مختلف حل مسأله

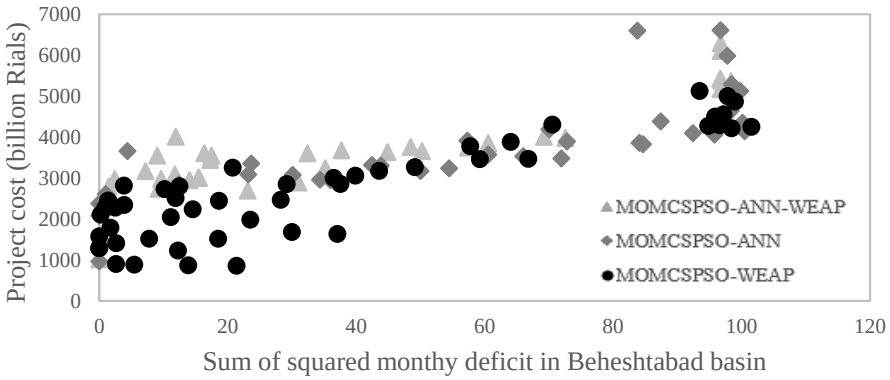

Fig. 14- The First and third objective functions in various applied techniques
شکل ۱۴- مقادیر توابع هدف اول و سوم حاصل تکنیکهای مختلف حل مسأله

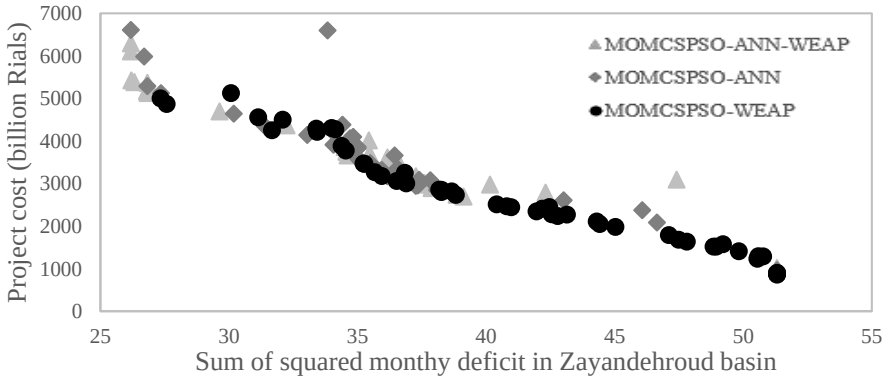

Fig. 15- The Second and third objective functions in various applied techniques
شکل ۱۵- مقادیر توابع هدف دوم و سوم حاصل تکنیکهای مختلف حل مسأله

همچنین تکنیک فرامدل تطبیقی در یافتن پاسخهای با پراکندگی و گستردگی مناسب در فضای تصمیم‌گیری عملکرد نسبی مطلوبی داشته است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶، تکنیک‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل در قالب‌های ترتیبی و تطبیقی عملکرد نسبی مناسبی در یافتن نقاط گوشه نسبت به رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با ابزار MOMCSPSO-WEAP خصوصاً در توابع کمبود نیازها در حوضه‌های مبداء و مقصد داشته‌اند. مقادیر متوسط ارائه شده نیز به نوعی بیانگر توزیع یکنواخت پاسخ‌های ارائه شده در جبهه پرتو است که بیانگر عملکرد مطلوب‌تر فرامدل تطبیقی نسبت به فرامدل ترتیبی است که در قسمتهای بالا نیز به آن اشاره گردید. در این جدول زمان‌های حل مسأله این کار پژوهشی با استفاده از تکنیک‌های مختلف نیز ارائه گردیده است. همانگونه که در جدول مشاهده می‌گردد، به‌کارگیری رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر فرامدل نقش قابل توجهی در کاهش زمان حل مسأله دارا می‌باشد.

www.SID.ir

Arshive of SID

Table 6- Comparing the performance of techniques in optimal design of Beheshtabad project
جدول ۶- مقایسه عملکرد تکنیک‌های مختلف حل مسأله بهینه‌سازی طرح بهشت‌آباد

Objective Function \ Approach		MOMCSPSO-ANN	MOMCSPSO-ANN-WEAP	MOMCSPSO-WEAP
Squared monthly deficit in Beheshtabad basin	MAX	100.45	98.65	101.53
	MIN	0	0	0
	AVE	56.44	44.38	34.95
Squared monthly deficit in Zayandehroud basin	MAX	51.31	51.31	51.31
	MIN	26.18	26.18	27.33
	AVE	35.76	35.08	40.71
Cost (billion Rials)	MAX	6610	6394	5124
	MIN	965	1015	857
	AVE	3741	3394	2714
Time (hours)		~ 3.5	~ 6.5	~117
Number of function evaluations		6000	6000	6000

۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با هدف یافتن ابعاد بهینه سامانه انتقال آب بهشت‌آباد با درنظرگیری شرایط منابع آبی حوضه‌های درگیر و مسائل اقتصادی این طرح مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس مطالعات، یکی از راهکارهای مؤثر مدیریت منابع آب، شبیه‌سازی منابع و مصارف در سطح حوضه آبریز است که در این تحقیق از این رویکرد استفاده شده است. از میان این مدل‌ها، مدل شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی منابع آب WEAP به دلیل قابلیت‌های بالای آن، به‌کار گرفته شد. ابتدا حوضه‌های آبریز مبدأ و مقصد طرح در مدل شبیه‌سازی WEAP و در شرایط وضع موجود پیاده‌سازی و واسنجی شد. با توجه به پیچیدگی‌های مسائل مدیریت منابع آب به علت وجود ذی‌نفعان متعدد با اهداف متضاد، غیرخطی بودن این مسائل، وجود مؤلفه‌های متعدد تصمیم‌گیری، اندرکنش هر یک از این مؤلفه‌ها با یکدیگر و ...، مدل‌های شبیه‌سازی به تنهایی قادر به ارائه برنامه مدیریتی مناسب نمی‌باشند. در این میان استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم هوش جمعی ذرات چندهدفه با رویکرد چند ازدحامی و همکارانه به عنوان ابزاری کارآمد در این مسأله به‌کار گرفته شد و مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی MOMCSPSO-WEAP به منظور یافتن ابعاد بهینه سامانه انتقال آب طرح بهشت‌آباد توسعه یافت. الگوریتم‌های تکاملی به دلیل نیاز به فراخوانی‌های متعدد مدل شبیه‌سازی، هزینه محاسباتی و زمان بالایی را به سیستم تحمیل خواهند نمود. به منظور غلبه بر این کاستی، از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با تکنیک مدل جایگزین در این تحقیق استفاده شد. مدل جایگزین شبیه‌ساز منابع آب در این تحقیق از سری مدل‌های داده‌کاوی و شبکه عصبی بوده است که با هدف جایگزین مدل شبیه‌ساز WEAP به‌کار گرفته شد. رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با استفاده از مدل فرآیندی (WEAP) و همچنین با تکنیک مدل جایگزین به دو صورت ترتیبی و تطبیقی به منظور تعیین ابعاد بهینه مؤلفه‌های طراحی طرح بهشت‌آباد، به‌کار گرفته شد. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات، ظرفیت تونل و سد بهشت‌آباد به گونه‌ای تعیین گردیدند تا اهداف حداقل‌سازی میزان کمبود حوضه‌های مبدأ و مقصد و هزینه‌های اجرایی طرح بهشت‌آباد، بهینه گردند. به این ترتیب جبهه پرتویی از اعضای غالب در حل این مسأله استخراج شد. جبهه‌های پرتو حاصل از حل مسأله مورد نظر توسط رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی شامل جواب‌های متنوعی از نظر ظرفیت سازه‌های انتقال بوده است که حاکی از عملکرد مناسب این رویکرد و الگوریتم MOMCSPSO است. به منظور ارزیابی کارایی مدل جایگزین توسعه داده شده در این تحقیق نتایج حاصل از تکنیک فرامدل با مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی اصلی مقایسه گردیدند. بر اساس نتایج این ارزیابی، تکنیک شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با رویکرد مدل جایگزین توسعه داده شده در این تحقیق عملکرد قابل قبولی را در حل مسأله طراحی ابعاد بهینه سامانه انتقال آب با در نظر گرفتن اهداف توأم کمی منابع آبی و هزینه اقتصادی داشته است.

پی‌نوشت‌ها

1- Surrogate Model
2- Artificial Neural Network
3- MINLP
4- Incremental
5- Repository
6- Multi Objective Multi Cooperative Swarm PSO
7- Meta-Model
8- Levenberg-Marquardt
9- Sigmoid

www.SID.ir

Arshive of SID

۶- مراجع

Ahmadi-najl A, Haghighi A, Vali Samani HM (2016) Driving optimum trade-off between the benefits and costs of interbasin water transfer projects. International Journal of Optimization in Civil Engineering, 6(2):173–185

Alizadeh M, Nikoo M, Rakhshandehrou G (2016) Developing an optimal groundwater allocation model considering stakeholder interactions; application of fallback bargaining models. Iran-Water Resources Research, 11(3):43–56 (In Persian)

Anzab NR, Mousavi SJ, Rousta BA, Kim JH (2016) Simulation-optimization for optimal sizing of water transfer systems. In: Kim J., Geem Z. (eds) Harmony Search Algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 382. Springer, Berlin, Heidelberg

Afsharian-zadeh N, Mousavi SJ (2016) Reliability-based optimal design and operation of cascade hydraulically-coupled hydropower reservoir systems. Iran-Water Resources Research, 12(4):70-83 (In Persian)

Barton RR, Meckesheimer M (2006) Metamodel-based simulation optimization. Handbooks in Operations Research and Management Science, 13:535–574

Coello CAC, Pulido GT, Lechuga MS (2004) Handling multiple objectives with particle swarm optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 8(3):256–279

Dai T, Labadie JW (2001) River basin network model for integrated water quantity/quality management. Journal of Water Resources Planning and Management, 127(5):295–305

Dinar A, Rosegrant MW, Meinzen-Dick R (1997) Water allocation mechanisms. World Bank: Policy Research Working Paper #1779, Washington, DC, 42p

Eberhart R, Simpson P, Dobbins R (1996) Computational intelligence PC tools. Academic Press Professional, Inc. San Diego, CA, USA, 464p

Grundmann J, Schütze N, Schmitz GH, Al-Shaqsi S (2012) Towards an integrated arid zone water management using simulation-based optimisation. Environronmental Earth Science, 65(5):1381–1394

Hamlat A, Errih M, Guidoum A (2013) Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. Arabian Journal of Geosciences, 6(7):2225–2236

Harma KJ, Johnson MS, Cohen SJ (2012) Future water supply and demand in the Okanagan Basin, British Columbia: a scenario-based analysis of multiple, interacting stressors. Water Resources Management, 26(3):667–689

Höllermann B, Giertz S, Diekkrüger B (2010) Benin 2025-balancing future water availability and demand using the WEAP "Water Evaluation and Planning" System. Water Resources Management, 24(13):3591–3613

Javaheri S, Saadatpour M (2017) Deriving hydropower reservoir operation rules in selective withdrawal framework considering quality and quantity objectives; simulation-optimization approach based on meta-modelling. Iran-Water Resources Research (In press) (In Persian)

Johnson VM, Rogers LL (2000) Accuracy of neural network approximators in simulation-optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, 126(2):48–56

Karamouz M, Mojahedi SA, Ahmadi A (2009) Interbasin water transfer: economic water quality-based model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136(2): 90–98

Kumar DN, Janga Reddy M (2007) Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, 133(3):192–201

Li X, Zhao Y, Shi C, Sha J, Wang ZL, Wang Y (2015) Application of water evaluation and planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal binhai new area, china. Ocean and Coastal Management, 106:97–109

Li X, Yao X (2009) Tackling high dimensional nonseparable optimization problems by cooperatively coevolving particle swarms. IEEE Congress on Evolutionary Computation. 18-21 May,Trondheim, Norway, 1546-1553

Manshadi DH, Bashiri A, Asadi M (2015) Simulation and optimization of interbasin virtual water transfer management by game theory approach. In: Proc. of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology, 3-5 September, Rhodes, Greece

Mirfendere sgi G, Mousavi SJ (2016) Adaptive meta-modeling-based simulation optimization in basin-scale optimum water allocation: a comparative analysis of meta-models. Journal of Hydroinformatics, 18(3):446–465

Mutiga JK, Mavengano ST, Zhongbo S, Woldai T, Becht R (2010) Water allocation as a planning tool to minimise water use conflicts in the upper Ewaso Ng'iro north basin, Kenya. Water Resources Management, 24(14):3939–3959

www.SID.ir

Arshive of SID

model for water allocation planning at basin scale. Journal of Hydroinformatics, 10(4):331–343

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

Tsoukalas I, Makropoulos C (2015) A surrogate based optimization approach for the development of uncertainty-aware reservoir operational rules: the case of Nestos hydrosystem. Water Resources Management, 29(13):4719–4734

Vasan A (2012) Optimal reservoir operation for irrigation planning using the swarm intelligence algorithm. Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering, 147–165

Vonk E, Xu YP, Booij MJ, Zhang X, Augustijn DCM (2014) Adapting multireservoir operation to shifting patterns of water supply and demand. Water Resources Management, 28(3):625–643

Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A (2005) WEAP21-A demand, priority, and preference-driven water planning model, part 1: model characteristics. Water International, 30(4):487–500

Zayndab Consulting Engineers (2008) The water transfer project to the central plateau of Iran. Ministry of Energy, Tehran, Iran

Zhang J, Wu Z, Cheng C, Zhang S (2011) Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. Water Science and Engineering, 4(1):61–74

Nazif S, Karamouz M, Tabesh M, Moridi A (2010) Pressure management model for urban water distribution networks. Water Resources Management, 24(3):437–458

Nouiri I, Yitayew M, Maßmann J, Tarhouni J (2015) Multi-objective optimization tool for integrated groundwater management. Water Resources Management, 29(14):5353–5375

Ostadrahimi L, Mariño MA, Afshar A (2012) Multi-reservoir operation rules: multi-swarm PSO-based optimization approach. Water Resources Management, 26(2):407–427

Raoufi Y, Shourian M, Attari J (2014) Capacity design of inter-basin water transfer systems considering decision making criteria in the source and the target basins. Iran-Water Resources Research, 11(1):49–61 (In Persian)

Razavi S, Tolson BA, Burn DH (2012) Review of surrogate modeling in water resources. Water Resources Research 48, W07401, doi:10.1029/ 2011WR011527

Rostami J, Sepehrmanesh M, Gharahbagh EA, Mojtabai N (2013) Planning level tunnel cost estimation based on statistical analysis of historical data. Tunnelling and Underground Space Technology, 33:22–33

Safavi HR, Darzi F, Mariño MA (2010) Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater. Water Resources Management, 24(10):1965–1988

Shourian M, Mousavi SJ, Menhaj MB, Jabbari E (2008a) Neural - network - based simulation - optimization

www.SID.ir