

Application of the Fuzzy Theory Development in the Uncertainty Analysis of Water Supply System Performance Indexes

P. Golfam¹ and P.-S. Ashofteh^{2*}

Abstract

The purpose of the research is to calculate the performance indexes of water supply system based on perspective of classical and fuzzy probabilities using three-different fuzzy membership function under climate scenarios in baseline period (1977-2001) and future (2015-2040) in the Marun Basin. First, the effects of climate change on temperature and precipitation were estimated for the period of 2015-2040 using climate models of the fifth report of the International Panel on Climate Change (IPCC) under RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. For the same period, ANN were used to determine the changes in inflow to reservoir and the irrigation water requirements were determined using Cropwat. Then, the water supply system was modeled with WEAP, the goal of which was to maximize the water delivered to the points of need based on the defined conditions. The crisp and fuzzy water supply system performance indexes were then calculated. Results showed that under RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, temperature will increase by 19, 20, 21%, and precipitation will decrease by 5% and increase by 14 and 15%, respectively. Future irrigation water requirements will increase relative to baseline, while inflow to the reservoir will decrease under RCP 2.6 and RCP 4.5 and increase under RCP 8.5. Also, the results showed that (1) the resiliency and vulnerability in the fuzzy environment with Gaussian and exponential fuzzy membership functions increases compared to the crisp environment, and (2) the choice of the type of fuzzy membership function is very important in extracting the results and so the fuzzy membership functions with fuzzy core perform very well in water resource management problems.

Keywords: Water Supply System Performance Indicators, Fuzzy Theory, Gaussian Function, Exponential Function, Sigmoid Function.

Received: January 28, 2023

Accepted: May 10, 2023

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. Email: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. Email: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.1.5.0](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1402.19.1.5.0)

کاربرد توسعه نظریه فازی در تحلیل عدم قطعیت شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب

پروین گلفام^۱ و پریسازادات آشفته^{۲*}

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، محاسبه شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب بر مبنای دیدگاه احتمالات کلاسیک و فازی با استفاده از سه تابع عضویت مختلف فازی تحت سناریوهای اقلیمی در بازه پایه (۱۹۷۷-۲۰۰۱) و آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۰) در حوضه آبریز مارون است. ابتدا اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش با مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 بررسی و تغییرات آبدهی مخزن با ANN و آب مورد نیاز آبیاری با Cropwat در (۲۰۴۰-۲۰۱۵) برآورد شدند. سپس، سامانه تأمین آب با WEAP که هدف آن پیشینه‌سازی آب تحویل‌شده به نقاط نیاز براساس قیده‌های تعریف‌شده، مدل‌سازی و شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب قطعی و فازی محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهند که دما در آینده نسبت به پایه تحت RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۱۹، ۲۰، ۲۱ درصد افزایش و بارش تحت RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۵ درصد کاهش و ۱۴ و ۱۵ درصد افزایش خواهد یافت. آب مورد نیاز آبیاری در آینده نسبت به پایه افزایش خواهد یافت، در حالی که جریان ورودی به مخزن، تحت RCP 2.6 و RCP 4.5 کاهش و تحت RCP 8.5 افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان می‌دهند که (۱) برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در محیط فازی با توابع عضویت فازی گوسین و نمایی نسبت به محیط قطعی افزایش می‌یابد، (۲) انتخاب نوع تابع عضویت فازی، اهمیت زیادی در استخراج نتایج دارد به طوری که توابع عضویت فازی دارای هسته فازی در مسائل مدیریت منابع آب، عملکرد بسیار مناسبی دارند.

کلمات کلیدی: شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب، نظریه فازی، تابع گوسین، تابع نمایی، تابع سیگموئید.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲۰

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



تخمین برگشت‌پذیری سناریوهای مدیریت آب زیرزمینی در دشت رفسنجان براساس هفت اصل برگشت‌پذیری عمومی (Moghaddasi et al., 2022)، مقایسه رویکرد مدل‌های Lingo و MODSIM براساس شاخص‌های مدیریت منابع آب (Mortezaeipooya et al., 2022)، شاخص پایداری آب^۲ (WSI) برای محاسبه میزان مصرف پایدار سالانه آب در هند (Biswas et al., 2022)، تعیین شاخص پایداری منحصر به فرد در حوضه آبریز مارون را با توجه به ویژگی‌های منابع و مصرف‌کننده‌های آب (Golfam and Ashofteh, 2022).

El-Baroudy et al. (2006) بیان کردند یکی از اهداف طراحی سامانه‌های منابع آب، حصول اطمینان از عملکرد رضایت‌بخش آنها تحت طیف وسیعی از شرایط احتمالی آینده است و سه شاخص ترکیبی اطمینان‌پذیری-آسیب‌پذیری^۳، شاخص استحکام^۴ و شاخص بازگشت‌پذیری را برای سامانه تأمین آب و مدیریت سیلاب در لندن توسعه دادند.

Simonovic (2009)، عدم قطعیت در مدیریت منابع آب را ناشی از تغییرپذیری^۵ و ابهام ناشی از کمبود اطلاعات، ناقص بودن جزئیات، نبود ساختاری برای در نظر گرفتن مشکلات مدیریت منابع آب، منابع اثرگذار بر تعصبات سیاست‌گذاری در مدیریت منابع آب بیان کرد. از منطق فازی در مباحث مختلف مربوط به مدیریت منابع آب استفاده شده است که می‌توان به پیش‌بینی سیل براساس منطق فازی (Perera and Lahat, 2015)، برآورد تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی را با سیستم استنتاج فازی (Patel and Balve, 2016)، بررسی پایداری تأمین آب با استفاده از سامانه استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS)^۶ در کرواسی (Halkijevic et al., 2017)، محاسبه شاخص کیفیت آب در رودخانه سالانگور مالزی با استفاده از مدل‌های هوش ترکیبی مبتنی بر ANFIS ادغام‌شده با مدل‌های خوشه‌بندی داده‌های فازی^۷ c-mean، تقسیم شبکه (GP)^۸، خوشه‌بندی کاهشی (SC)^۹ (Yaseen et al., 2018)، بررسی انواع کاربردهای منطق فازی در هیدرولوژی و مدیریت منابع آب (Kambalimath and Deka, 2020)، اصلاح شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری با منطق فازی (Golmohammadi et al., 2021)، توسعه یک مدل بهینه‌سازی برای تخصیص منابع آب و زمین کشاورزی در شرایط عدم قطعیت با اعداد فازی شهودی، برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط و برنامه‌نویسی چند هدفه (Li et al., 2020)، مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر عدم قطعیت برای تخصیص همزمان منابع آب و خاک

دستیابی به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد، بدون شناسایی بحران‌های تهدیدکننده و علل رخداد آنها، امری دشوار است. در حالی که بیش از ۴۰ درصد جمعیت جهان در وضعیت کمبود آب قرار دارند (United Nations, 2019)، پیش‌بینی می‌شود این وضعیت در اثر عواملی نظیر رشد جمعیت و توسعه اقتصادی (United Nations World Water Development Report, 2018)، رشد شهرنشینی و افزایش رقابت و تقاضای انرژی و غذا (Niva et al., 2020)، رویدادهای شدید آب‌شناسی نظیر افزایش سطح آب دریاها و اسیدی‌شدن اقیانوس‌ها در سال‌های آینده تشدید شود (United Nation Environment Programme (UNEP), 2019).

هم‌چنین، عدم قطعیت ناشی از ابعاد و اثرات بحران تغییر اقلیم، چالش‌های رو به رشد بیش‌تری را بر منابع آب تحمیل می‌کند (Carneiro Marques et al., 2022). پایش تغییرات عملکرد سامانه تأمین آب در بازه زمانی آینده، یکی از الزامات سیاست‌گذاری‌های مدیریت یکپارچه منابع آب است. شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها برای بررسی وضعیت سامانه‌های تأمین منابع آب از ابعاد مختلف به‌شمار می‌آیند. تاکنون پژوهش‌های متعددی در خصوص کاربرد آنها صورت گرفته است نظیر، معرفی شاخص‌های اطمینان‌پذیری پایدار سالانه آب و انحراف سطوح مخزن از منحنی‌های فرمان مخازن چندمنظوره برای عملکرد سامانه تأمین آب در صربستان (Srdjevic and Srdjevic, 2017)، استفاده از شاخص پایداری برای بررسی چگونگی تغییر در دسترسی به منابع آب در حوضه آبریز کرخه (Sarzaeim et al., 2017)، محاسبه شاخص پایداری منابع آب براساس رویکرد استدلال شواهد^۱ (ER) در حوضه آبریز گرگان‌رود-قره‌سو (Jahanshahi and Kerachian, 2019)، مقایسه سناریوهای سازگاری با پدیده تغییر اقلیم در بخش کشاورزی در حوضه آبریز قرنقو در کشور ایران را براساس هشت شاخص مدیریت مخزن (Ashofteh et al., 2019 a)، محاسبه برگشت‌پذیری منابع آب سد بوکان از پنج بعد اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری سنتی، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری تحت رویدادهای شدید چهار بعد فرعی سرعت، استحکام، تدبیر و فراوانی، شاخص زیست‌بوم (Behboudian and Kerachian, 2021)، محاسبه شاخص PI-Plus در زمینه اطمینان‌پذیری تأمین، حفظ ذخیره آبخوان و الزامات جریان رودخانه (Karamouz et al., 2021)، بررسی عوامل مؤثر بر برگشت‌پذیری مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی و کاهش خطرپذیری‌های استفاده از منابع آب در چین (Xu et al., 2021)،

کشاورزی را بر مبنای اعداد فازی شهودی (Chen et al., 2023) اشاره کرد.

برنامه‌ریزان سامانه‌های منابع آب می‌دهد که علاوه بر کاهش عدم قطعیت در محاسبه شاخص‌های عملکرد سامانه تأمین آب، شرایط حوضه مطالعاتی و نیز تجربیات کارشناسان و ذینفعان را لحاظ کنند که سبب خواهد شد هر تابع عضویت فازی را بتوان برای هر حوضه آبریز به صورت منحصر به فرد تعیین کرد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، گام‌های پژوهش حاضر شرح داده خواهد شد. ابتدا، تغییرات بارندگی و دما در حوضه آبریز مارون در بازه زمانی (۲۰۴۰-۲۰۱۵) با مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP 2.6 (خوش‌بینانه)، RCP 4.5 (حد واسط) و RCP 8.5 (بدبینانه) بررسی خواهد شد. در گام بعد، اثرات تغییر اقلیم بر حجم رواناب ورودی به مخزن سد مارون با ANN^۱ و نیز آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی با مدل Cropwat محاسبه و سامانه آب با مدل WEAP^{۱۱} مدل‌سازی می‌شود. در گام آخر، تغییرات شاخص‌های سامانه آبی در دو محیط قطعی و فازی تحلیل خواهند شد. روندنمای انجام پژوهش حاضر، در شکل ۱ ارائه شده است.

تأمین منابع آب در مرکز تمام فعالیت‌های بشری قرار دارد و ضروری است که تغییرات هر محرکی که سبب ایجاد تغییر در منابع آب در دسترس خواهد شد، مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که شناسایی کامل همه عوامل اثرگذار بر منابع آب در دسترس و تغییرات پیش‌بینی نشده بر تقاضای بخش‌های مختلف، بسیار پیچیده و متأثر از عوامل مختلف است، وجود عدم قطعیت‌های فراوان اجتناب‌ناپذیر و سیاست‌گذاری بلندمدت در این بخش، دارای چالش‌های متعددی است. نظریه فازی یکی از راه‌کارهای کاهش عدم قطعیت در زمینه‌های مختلف است که می‌تواند روند تصمیم‌سازی را بیش‌تر با شواهد سازگار کند. در پژوهش حاضر، به منظور بهبود محاسبه شاخص‌های عملکرد سامانه تأمین آب، از توابع عضویت فازی مختلف برای تعیین مقادیر آستانه استفاده شده است که مقادیر پارامترهای اصلی آنها با استفاده از تجربیات کارشناسان و ذی‌نفعان، شرایط حوضه مورد مطالعه به صورت صریح تنظیم شده‌اند. بنابراین، استفاده از توابع عضویت فازی در تعیین حالت‌های مطلوب و نامطلوب سامانه تأمین آب، این امکان را به سیاست‌گذاران و

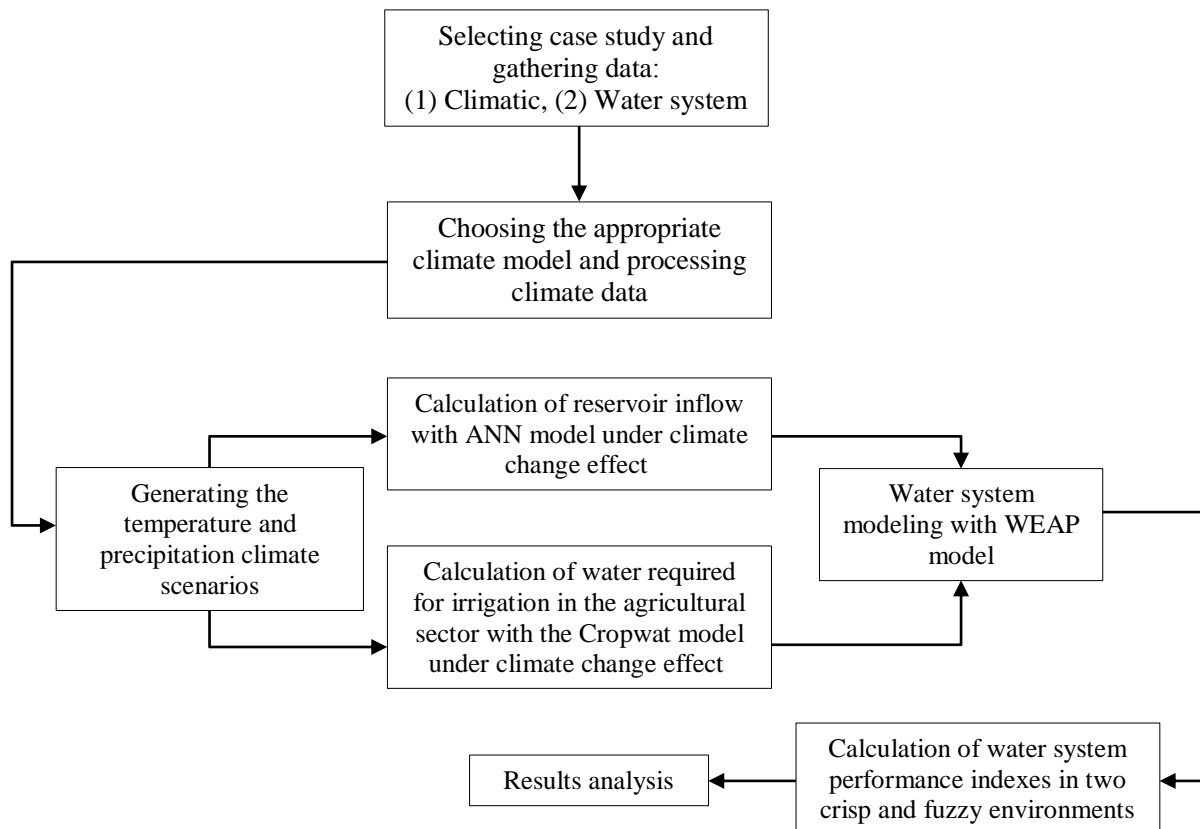


Fig. 1- The flowchart of the present study

شکل ۱- روندنمای پژوهش حاضر

تحقیقات منابع آب ایران، سال نوزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲
Volume 19, No. 1, Spring 2023 (IR-WRR)

۱-۲- انتخاب مدل اقلیمی و تولید سناریوهای اقلیمی دما و بارش

در این گام، برای ارزیابی و انتخاب مدل اقلیمی مناسب دما و بارش از میان مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم IPCC از چهار ضریب خطای هم‌بستگی، ضریب میانگین خطای مطلق (MAE)^{۱۲}، ضریب جذر میانگین مربعات (RMSE)^{۱۳} و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NE)^{۱۴} استفاده شد که روابط ریاضی آنها در جدول ۱ آورده شده است.

پس از انتخاب مدل اقلیمی مناسب، سناریوهای اقلیمی در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) تولید می‌شود. ابتدا دما و بارش ماهانه در بازه زمانی پایه (۱۹۹۷-۲۰۰۰) از مدل‌های اقلیمی استخراج و با روش تغییر عامل، کوچک‌مقیاس می‌شوند. سپس سناریوی اقلیمی دما و بارش به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه خواهد شد:

$$\delta T_i = (\bar{T}_{\text{Climate model, } i} - \bar{T}_{\text{Base time of model, } i}) \quad (1)$$

$$\delta P_i = (\bar{P}_{\text{Climate model, } i} / \bar{P}_{\text{Base time of model, } i}) \quad (2)$$

که در آن، δT_i و δP_i = به ترتیب سناریوهای اقلیمی دما و بارندگی کوچک‌مقیاس شده برای ماه i $\bar{T}_{\text{Climate model, } i}$ و $\bar{P}_{\text{Climate model, } i}$ به ترتیب میانگین بلندمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی توسط مدل اقلیمی برای ماه i در بازه زمانی آینده، $\bar{T}_{\text{Base time of model, } i}$ و $\bar{P}_{\text{Base time of model, } i}$ میانگین بلندمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی برای ماه i در بازه زمانی پایه هستند.

سپس، سری زمانی متغیرهای اقلیمی دما و بارش به ترتیب براساس روابط (۳) و (۴) تعیین می‌شوند (Wilby and Harris, 2006; Ashofteh et al., 2013):

$$FT_i = T_{\text{observation, } i} + \delta T_i \quad (3)$$

$$FP_i = P_{\text{observation, } i} \times \delta P_i \quad (4)$$

که در آن، FT_i و FP_i سری زمانی دما و بارندگی برای ماه i به دلیل پدیده تغییر اقلیم در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰)، $T_{\text{observation, } i}$ و $P_{\text{observation, } i}$ سری زمانی دما و بارندگی مشاهداتی در بازه زمانی پایه در ماه i هستند.

Table 1- Error coefficients for the selection of climate models

جدول ۱- ضرائب خطا برای انتخاب مدل‌های اقلیمی

Mathematical formulation	Error coefficient
(1) $r = \frac{(\sum_{i=1}^n (a_m - \bar{a}_m)(a_s - \bar{a}_s))^2}{\sum_{i=1}^n (a_m - \bar{a}_m)^2 \sum_{i=1}^n (a_s - \bar{a}_s)^2}$	Correlation *The range of changes for the correlation coefficient varies between 0% and 100%, the closer to 100%, it indicates the optimal performance of the climate model.
(2) $MAE = \frac{\sum_{i=1}^n a_s - a_m }{n}$	Mean absolute error *The range of changes for the mean absolute error varies between 0% and 100%, the closer to 100%, it indicates the optimal performance of the climate model
(3) $RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (a_s - a_m)^2}{n} \right)^{0.5}$	Root mean square error *The range of changes for the root mean square error varies between 0% and 100%, the closer to 100%, it indicates the optimal performance of the climate model
(4) $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (a_m - a_s)^2}{\sum_{i=1}^n (a_m - \bar{a}_s)^2}$	Nash-Sutcliffe efficiency *The range of changes of the NSE coefficient is between $-\infty$ and 1, and the closer its value is to 1, the better the performance of the climate model.

a_m = The observed value of the climate variable in the baseline time period, \bar{a}_m = The average value of the observed climate variable in the baseline period, a_s = Simulated climate variable for the future time period, \bar{a}_s = The average value of the simulated climate variable for the future time period, n = Number of months

۲-۲- محاسبه جریان ورودی به مخزن و آب مورد نیاز برای آبیاری کشاورزی

به منظور محاسبه تغییرات جریان آب ورودی به مخزن سد از مدل ANN استفاده شد. ANN، یک مدل ریاضی معروف برای الگوبرداری از سازوکار عملکرد مغز انسان است که به دلیل قابلیت یادگیری قوی به طور وسیعی در مسائل مهندسی پیچیده استفاده می‌شود (Niu and Feng, 2021). ساختار ANN متشکل از نرون‌ها و لایه‌های مختلف برای پردازش اطلاعات است. در پژوهش حاضر، تعداد لایه‌ها و نرون‌ها شامل لایه ورودی با چهار نرون، لایه پنهان با پنج نرون و لایه خروجی با یک نرون است. شبکه عصبی پژوهش حاضر، از نوع پیش‌خور برگشتی^{۱۵} با تابع فعالیت Levenberg-Marquardt است. مهم‌ترین ویژگی این مدل، به‌روزرسانی وزن لایه‌های پنهان از طریق انتشار خطا^{۱۶} در جهت بازگشتی است. همچنین، ۱۸۰ ماه از مقادیر مشاهداتی پارامترهای دما، بارش و جریان ورودی به مخزن برای آموزش مدل ANN و ۱۲۰ ماه برای آزمون استفاده شدند. سه ورودی در شبکه عصبی مصنوعی پژوهش حاضر، شامل دما (برحسب درجه سانتی‌گراد)، بارندگی (برحسب میلی‌متر) و رواناب (برحسب مترمکعب بر ثانیه) هستند که هر یک از آنها به‌صورت جداگانه از طریق اکسل برای پردازش وارد Matlab شدند. پیش از فراخوانی داده‌ها در کد متلب، داده‌ها براساس فرمول زیر استانداردسازی شدند:

$$0.5 + \frac{[0.5 \times (x - \bar{x})]}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

که در آن، x مقدار پارامتر ورودی در هر ماه، \bar{x} میانگین پارامتر ورودی در کل بازه زمانی، x_{\max} بیشینه مقدار داده ورودی و x_{\min} کمینه مقدار داده ورودی است.

برای محاسبه مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی در حوضه آبریز مارون در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) از مدل Cropwat استفاده خواهد شد. مدل Cropwat توسط بخش غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO)^{۱۷} (۱۹۹۲) بر مبنای معادله فائو-پنمن-مانتیت^{۱۸} توسعه داده شده است. ابتدا تبخیر-تعرق گیاه مرجع با معادله فائو-پنمن-مانتیت با استفاده از داده‌های اقلیمی شامل رطوبت نسبی، مدت زمان تابش، سرعت باد محاسبه خواهد شد. در گام بعد، با ضرب تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی هر یک از محصولات کشاورزی، نیاز آبی هر محصول به دست می‌آید. در گام آخر، حجم آب مورد در بخش کشاورزی از حاصل ضرب سطح زیر کشت هر یک از محصولات کشاورزی در مقدار تفاضل بارندگی مؤثر (بخشی از بارندگی که در عمق توسعه ریشه گیاه قرار می‌گیرد) از نیاز آبی هر محصول به دست می‌آید. با توجه به محاسبه مقدار آب آبیاری کشاورزی براساس

مقدار ماهانه دما و بارش حاصل از مدل‌های اقلیمی، نوع رویکرد مدل‌سازی کشاورزی از تقاضای کشاورزی متغیر^{۱۹} (VAD) است.

۲-۳- مدل‌سازی سامانه تأمین آب با مدل WEAP

از مدل WEAP برای شبیه‌سازی عملکرد سامانه تأمین آب استفاده خواهد شد. مدل WEAP با پشتیبانی مؤسسه محیط زیست استکهلم سوئد (SEI)^{۲۰} بر مبنای سامانه‌های تصمیم‌یار توسعه یافته است. به‌طور کلی مدل WEAP، یک مدل شبیه‌سازی است که در آن، تخصیص منابع آب به نقاط نیاز براساس بیشینه‌سازی تحویل آب به نقاط تقاضا با توجه به قیدهای زیر است:

۱- اولویت‌بندی نقاط تقاضا، اولویت‌بندی نقاط تقاضا و بخش‌های مصرف‌کننده آب بستگی به وضعیت منطقه مورد مطالعه و نیز سیمای طرح منابع آب دارد. در حوضه آبریز مارون، نقاط نیاز یا بخش‌های مصرف‌کننده آب شامل مصرف آب در آبیاری محصولات کشاورزی پایین‌دست سد مارون، تأمین حق‌آبه‌های کشاورزی دشت‌های پایین‌دست، تأمین نیاز زیست‌محیطی تالاب هورالعظیم و تأمین انرژی برق‌آبی ساکنان شهرها و روستاهای حوضه آبریز مارون است.

(الف) اولویت تأمین تقاضا (به عبارت دیگر، قید تأمین تقاضا) براساس سیمای منابع آب به شرح زیر هستند:

- ۱- تأمین آب برای آبیاری محصولات کشاورزی (اولویت یک)؛
- ۲- تأمین انرژی برق‌آبی (اولویت دو)؛
- ۳- تأمین حق‌آبه‌های کشاورزی و نیاز زیست‌محیطی که در اولویت آخر و دارای اولویت یکسان هستند (اولویت سه)

اولویت تأمین نیازها در بازه زمانی پایه و بازه زمانی آینده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی ثابت در نظر گرفته شدند.

(ب) اولویت عرضه

با توجه به آنکه تنها منبع تأمین‌کننده آب و انرژی برق‌آبی در حوضه آبریز مارون، سد و نیروگاه مارون است، اولویت عرضه تنها برای سد مارون در نظر گرفته شده است که هم در بازه زمانی پایه و هم در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای مختلف، اولویت یک به آن اختصاص داده شده است.

این مدل توانایی بررسی طیف وسیعی از مسائل منابع آب شامل تحلیل تقاضای آب، حق‌آبه‌ها و اولویت‌های تخصیص، شبیه‌سازی جریان‌های

(2005) Loucks and Van Beek شاخص پایداری را معرفی کرد. شاخص پایداری ترکیبی از شاخص‌های مختلف سنجش عملکرد سامانه تأمین آب و نشانه‌ای از رفتار یک پارچه سامانه تأمین آب با توجه به پیامدهای نامطلوب احتمالی در صورت عدم تعادل آب موجود و مورد نیاز است (Srdjevic and Srdjevic, 2017). Sandoval-Solis et al. (2011) شاخص پایداری را به صورت میانگین هندسی شاخص‌های کمی و کیفی سامانه آب توسعه دادند. بیان ریاضی شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب مطابق روابط (۷) تا (۱۰) ارائه شده است.

$$\text{Volume Reliability Index} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{No. times of Def}=0}{N} \quad (7)$$

$$\text{Resilience Index} = \frac{\text{No. times [Def}=0 \text{ follows Def}>0]}{\sum_{i=1}^N \text{Def}} \quad (8)$$

$$\text{Vulnerability Index} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Def}}{\text{No. times Def}>0} \quad (9)$$

$$\text{Sustainability Index} = \left[\prod_{m=1}^M \text{Index} \right]^{1/m} \quad (10)$$

که در آن، N ، کل بازه زمانی، m ، تعداد معیارها، Def ، کمبود آب، No. times ، شمارش تعداد ماه یا وضعیت، هستند. مطابق تعاریف هر یک از شاخص‌ها، هر اندازه مقدار شاخص‌های اطمینان‌پذیری زمانی، برگشت‌پذیری و پایداری بیش‌تر و مقدار شاخص آسیب‌پذیری کم‌تر باشد، عملکرد شاخص بهتر و وضعیت سامانه تأمین آب مطلوب‌تر است.

۲-۵- نظریه فازی

در نظریات کلاسیک، حالت‌های تعلق یک عنصر به یک مجموعه، یا تعلق کامل یا عدم‌تعلق کامل است. نظریه فازی در مقابل نظریه کلاسیک، درجه تعلق یک عنصر را از تعلق و عدم‌تعلق کامل، به حالت میانه تبدیل می‌کند. در نظریه فازی که نخستین بار توسط Zadeh (1965) معرفی شد، برای بیان درجه تعلق یک عنصر به یک مجموعه، از تابع عضویت فازی استفاده می‌شود. به بیان دیگر، تفاوت اصلی میان مجموعه‌های کلاسیک و فازی، درجه عضویت فازی یا تابع عضویت فازی است. تابع عضویت فازی، تغییرات تدریجی بین صفر و یک را نشان می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نظریه فازی، امکان در نظرگیری عدم قطعیت‌های ذاتی و تصادفی با منابع مختلف نظیر نقص اطلاعات انسانی، عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات آینده است. Yaseen et al. (2018) بیان کردند که رویکرد منطق فازی، یکی از مدل‌های هوشمند معتبر برای حل مسائل دارای عدم قطعیت و ابهام داده‌ها است.

سطحی و زیرزمینی از طریق اتصال با MODFLOW، بهره‌برداری از مخزن سد، تولید برق‌آبی، ردیابی آلاینده‌های آب از طریق اتصال با MODPATH، الزامات زیست‌بوم، ارزیابی آسیب‌پذیری و تحلیل مالی پروژه‌های آبی، پیوند آب-انرژی از طریق اتصال با مدل LEAP را دارد (WEAP User Guide, 2016).

قواعد بهره‌برداری از مخزن در مدل WEAP براساس سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) (Sieber et al., 2005) است. در SOP، در صورتی که در یک ماه آب موجود در مخزن سد، کم‌تر از مجموع نیازهای آب بخش‌های مصرف‌کننده باشد، تمام آب موجود در مخزن سد رهاسازی می‌شود و در غیراین صورت، به اندازه حجم تقاضای آب، رهاسازی صورت می‌گیرد که در رابطه (۶)، آورده شده است.

$$\text{Release}_t = \begin{cases} \text{Storage}_{t-1} + \text{Inflow}_t & \text{if } \text{Storage}_{t-1} + \text{Inflow}_t \leq \text{Demand}_t \\ \text{Demand}_t & \text{if } \text{Demand}_t \leq \text{Storage}_{t-1} + \text{Inflow}_t \leq \text{Demand}_t + C \\ \text{Storage}_{t-1} + \text{Inflow}_t - C & \text{if } \text{Storage}_{t-1} + \text{Inflow}_t \geq C + \text{Demand}_t \end{cases}$$

که در آن، Release_t ، رهاسازی آب از مخزن سد در گام زمانی t ، Storage_{t-1} ، ذخیره آب در مخزن در گام زمانی $t-1$ ، Inflow_t ، جریان ورودی به مخزن سد در گام زمانی t ، Demand_t ، تقاضای آب در گام زمانی t ، C ، گنجایش مخزن سد هستند. در ادامه شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب براساس رهاسازی و تقاضای آب ارائه می‌شود.

۲-۴- شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب

در پژوهش حاضر، چهار شاخص سنجش عملکرد سامانه تأمین آب شامل: (۱) اطمینان‌پذیری زمانی، (۲) برگشت‌پذیری، (۳) آسیب‌پذیری و (۴) پایداری مورد بررسی خواهد گرفت.

شاخص‌های اطمینان‌پذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری توسط Hashimoto et al. (1982) ارائه شدند. شاخص اطمینان‌پذیری زمانی، نمایانگر تعداد ماه‌هایی از بازه زمانی است که در آنها، تقاضای آب به‌طور کامل تأمین می‌شود. شاخص برگشت‌پذیری، سرعت عبور سامانه از وضعیت نامطلوب (عدم‌تأمین تقاضای آب) به وضعیت مطلوب (تأمین تقاضای آب) را نشان می‌دهد. شاخص آسیب‌پذیری نشان‌دهنده شدت خسارت ناشی وارد به سامانه تأمین آب ناشی از عدم‌تأمین تقاضای آب در سامانه است.

۲-۵-۱- تابع عضویت فازی و شاخص‌های فازی سنجش عملکرد سامانه تأمین آب

تعریف یک مجموعه فازی برای هر مسأله با تعریف تابع عضویت متناسب با آن تکمیل می‌شود. به بیان دیگر، تعریف تابع عضویت مناسب، گام اساسی در حل مسائل است و در صورت مناسب نبودن تابع عضویت، تمام تحلیل‌ها دچار خطا خواهد بود.

توابع عضویت فازی مختلفی در نظریه فازی وجود دارند، مانند تابع عضویت مثلثی، تابع عضویت ذوزنقه‌ای، تابع عضویت S شکل، تابع عضویت فازی π شکل، تابع عضویت β شکل. در این پژوهش، توابع عضویت گوسی، نمایی و سیگموئید مورد بررسی قرار خواهد گرفت که به ترتیب طبق روابط (۱۱) تا (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$\mu(x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (11)$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + k(x-m)^2} \quad (12)$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + [-n(x-c)]} \quad (13)$$

که در آن، x ، نسبت رهاسازی آب از مخزن نسبت به مجموع کل تقاضای آب در سامانه تأمین آب، $\mu(x)$ ، تابع عضویت فازی، c ، مرکز تابع عضویت فازی گوسی، σ ، عرض تابع عضویت فازی گوسی، k ، کنترل‌گر شیب در نقطه تقاطع تابع عضویت نمایی، m ، مرکز تابع عضویت فازی نمایی، n ، گستردگی تابع عضویت فازی سیگموئید هستند.

مهم‌ترین چالش در توابع عضویت فازی، تخمین پارامترهای شامل c ، σ ، k ، n هستند. تعیین این پارامترها، به شرایط مورد مطالعاتی و نظرات کارشناسان بستگی دارد. (Golmohammadi et al. (2021) معادلاتی برای مقادیر نامعلوم توابع فازی ارائه دادند که در جدول ۲ آورده شده است.

براساس تعاریف وضعیت مطلوب و نامطلوب در سامانه تأمین آب، شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب اطمینان‌پذیری جمعی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری فازی از روابط (۱۴) تا (۱۶) محاسبه خواهد شد:

$$\text{Fuzzy Volume Reliability Index} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu(x_i)}{T} \quad (14)$$

$$\text{Fuzzy Resilience Index} = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu(x_i) - \mu(x_{i-1})) \text{ if } (\mu(x_i) > \mu(x_{i-1}))}{\sum_{i=1}^N (1 - \mu(x_i))} \quad (15)$$

$$\text{Fuzzy Vulnerability Index} = \frac{\sum_{i=1}^N (1 - \mu(x_i))}{T} \quad (16)$$

که در آن، $\mu(x_i)$ = وضعیت مطلوب سامانه تأمین آب، $1 - \mu(x_i)$ = وضعیت نامطلوب سامانه تأمین آب هستند.

۳- منطقه مطالعاتی

قلمرو مکانی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، حوضه آبریز مارون در استان خوزستان در جنوب غرب کشور ایران با مساحتی معادل ۳۸۰۱ کیلومتر مربع در طول شرقی ۵۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۱ دقیقه و در عرض شمالی ۳۰ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۱ دقیقه است (شکل ۲).

Table 2- Fuzzy membership functions Parameters

جدول ۲- پارامترهای توابع عضویت فازی

$\sigma = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{Water Release}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Water Demand}_i} \right) - c}{\sqrt{-2 \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{Water Release}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Water Demand}_i} \right)}}$	Gaussian function
$k = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{Water Demand}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Water Release}_i} \right)^{-1}}{\left(\left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{Water Release}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Water Demand}_i} \right) - m \right)^2}$	Exponential function
$n = \frac{-\ln \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{Water Demand}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Water Release}_i} \right) - 1 \right)}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \text{Water Release}_i}{\sum_{i=1}^N \text{Water Demand}_i} \right) - c}$	Sigmoid function

۴۱۱۳۷ هکتار)، (۳) نباتات علوفه‌ای (یونجه، شیدر با مساحت ۱۵۲۷ هکتار)، (۴) حیوانات (باقلا، لوبیا چشم‌بلبلی با مساحت ۶۸۸ هکتار)، (۵) دانه‌های روغنی (کنجد با مساحت ۱۷۸۴ هکتار) هستند (جهاد کشاورزی استان خوزستان، ۱۹۷۷).

۴- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل‌های بخش مواد و روش‌ها برای حوضه آبریز مارون شرح داده خواهد شد.

۴-۱- مدل اقلیمی مناسب و تولید سناریوهای اقلیمی

نتایج ارزیابی ۱۶ مدل اقلیمی از گزارش پنجم IPCC، نشان دادند که دو مدل اقلیمی GFDL-CM3 و MIROC5 به‌ترتیب برای پارامترهای اقلیمی دما و بارش مناسب بودند. مقادیر عامل تغییر برای متغیرهای دما و بارش تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 8.5 در جدول ۳ آورده شده است.

این حوضه در محدوده حوضه آبریز اصلی عمان-خلیج فارس واقع شده و از زیرحوضه‌های جراحی-مارون به شمار می‌آید. سد و نیروگاه برق‌آبی مارون در ۱۹ کیلومتری شمال شرق شهرستان بهبهان و روی رودخانه مارون با طول ۴۲۲ کیلومتر و با جهت شرق-غرب احداث شده است. این سد، دومین سد سنگ‌ریزه‌ای مرتفع در کشور ایران با اهداف، تأمین آب آبیاری محصولات کشاورزی در دشت‌های کشاورزی بهبهان، جایزان، خلف‌آباد و شادگان، فجر، تأمین حق‌آبه‌های شادگان-هورالعظیم و خلف‌آباد-شادگان، تأمین نیاز زیست‌محیطی تالاب بین‌المللی شادگان و کنترل سیلاب است. ظرفیت کل سد مخزنی مارون، ۱/۲ میلیارد مترمکعب، حجم مفید معادل ۹۹۳ میلیون مترمکعب، تراز نرمال مخزن سد برابر با ۵۵۰ متر، است (Iran Water Resources Management Company, 1977).

مساحت بخش کشاورزی در پایین‌دست سد مارون شامل دشت‌های بهبهان (۱۳۵۰۰ هکتار)، جایزان (۶۵۰۰ هکتار)، خلف‌آباد (۲۲۰۶۵ هکتار) و شادگان (۸۱۹۵ هکتار) است. محصولات کشاورزی در این حوضه شامل: (۱) جالیز و سبزی (خیار، گوجه‌فرنگی، هندوانه، خربزه با مساحت ۵۱۴۱ هکتار)، (۲) غلات (گندم، جو، ذرت دانه‌ای با مساحت

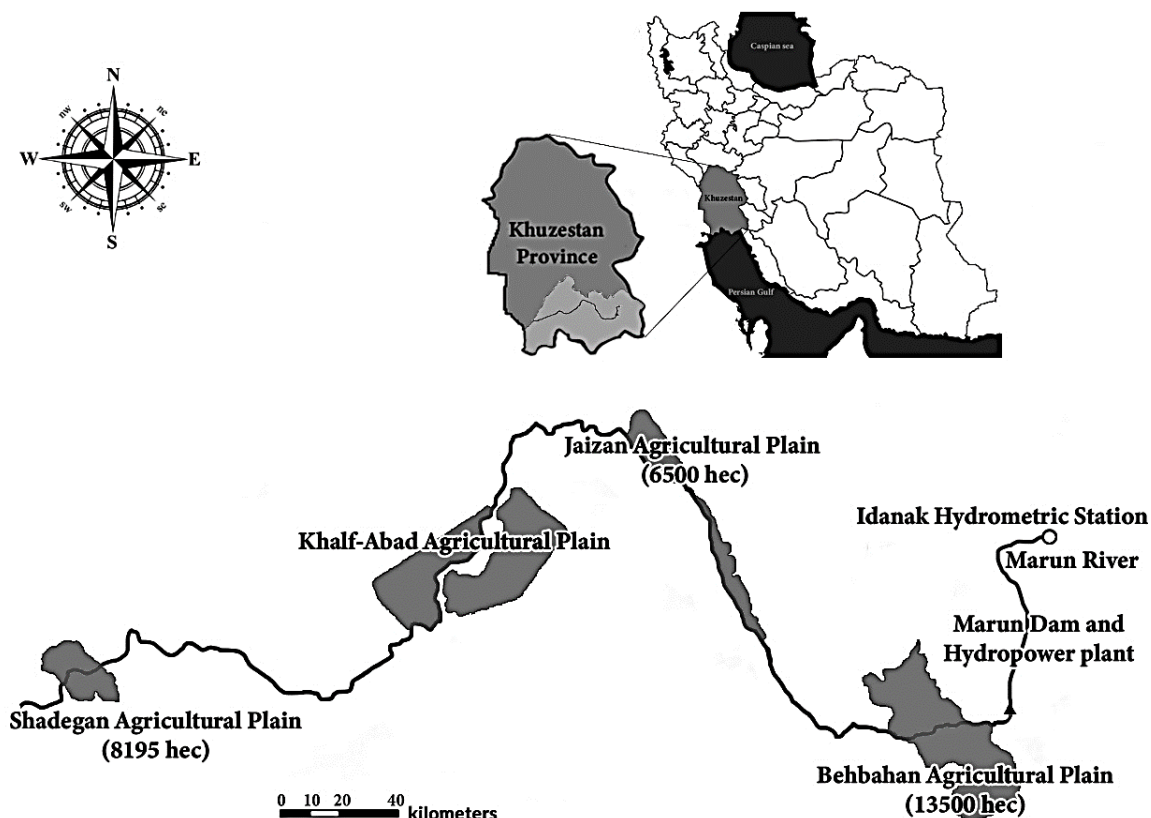


Fig. 2- The Case study area

شکل ۲- منطقه مطالعاتی

Table 3- Change factor values for temperature and precipitation variables in different climate scenarios

جدول ۳- مقادیر عامل تغییر برای متغیرهای دما و بارش تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

Month	RCP 2.6 scenario		RCP 4.5 scenario		RCP 8.5 scenario	
	ΔP	ΔT	ΔP	ΔT	ΔP	ΔT
January	0.82	4.21	1.08	3.54	1.17	3.99
February	0.76	4.58	0.76	4.56	±0.97	5.10
March	0.89	4.88	1.18	4.33	1.05	5.17
April	1.42	5.26	1.45	5.25	1.25	5.63
May	0.99	4.96	1.26	5.05	1.81	4.92
June	1	5.21	1.63	5.74	1.13	5.42
July	0	5.40	0	5.57	0	5.60
August	0.33	5.58	0	5.32	1	5.56
September	5.33	5.35	4.67	5.49	4.67	5.95
October	1.1	5.01	1.25	4.60	1.63	5.25
November	1.56	3.74	1.27	4.09	1.06	4.79
December	0.84	3.85	0.75	3.70	0.77	4.42

تحت سناریوهای اقلیمی در بازه زمانی آینده در شکل ۳ آورده شده است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که روند تغییرات دما در ماه‌های مختلف در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) منطبق بر روند تغییرات دما در بازه زمانی پایه است. در همه سناریوهای اقلیمی، دما در تمام ماه‌ها افزایش خواهد یافت به طوری که تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۱۹، ۲۰ و ۲۱ درصد افزایش خواهد یافت. اوج دما تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) نسبت به زمانی پایه، دو ماه زودتر یعنی در ماه ژوئیه رخ خواهد داد.

مطابق شکل ۳، الگوی تغییرات بارش متفاوت از الگوی دما است، بدان معنا که بارش تحت همه سناریوهای اقلیمی افزایش نخواهد یافت. متغیر اقلیمی بارش، تحت سناریوی اقلیمی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه ۵ درصد کاهش خواهد یافت، اما تحت سناریوهای اقلیمی RCP 4.5 و RCP 8.5 به میزان ۱۴ و ۱۵ درصد افزایش خواهد یافت. تغییرات توزیع زمانی بارش در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) نیز قابل توجه است؛ زیرا اوج بارندگی در بازه زمانی پایه، در ماه مارس، تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب در ماه‌های آوریل، فوریه و می خواهد بود. تغییرات توزیع پارامترهای اقلیمی بارش و دما بر بخش‌های مختلفی نظیر مقدار آب مورد نیاز آبیاری محصولات کشاورزی به دلیل تغییرات بارش مؤثر و نیز تولید برق آبی به دلیل افزایش دما و به دنبال آن، افزایش تبخیر از سطح مخزن سد اثرگذار خواهد بود.

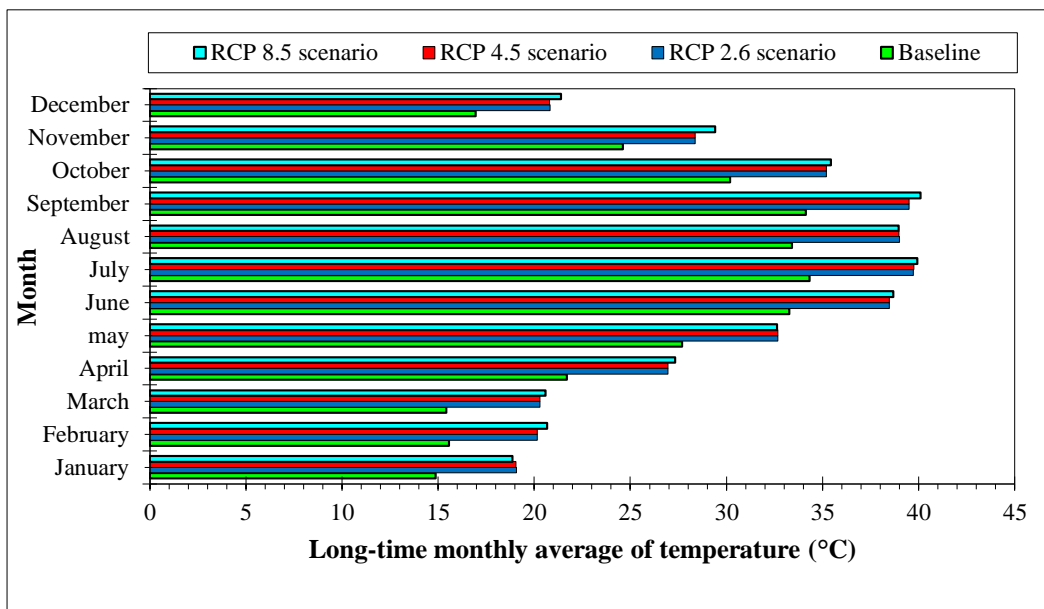
مطابق جدول ۳، بیشینه عامل تغییر بارش تحت هر سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 در ماه سپتامبر و کمینه مقدار آن ماه ژوئیه با مقدار صفر رخ می‌دهد. بیشینه عامل تغییر دما، تحت سناریوی RCP 2.6 با مقدار ۵/۵۸ در ماه آگوست، تحت سناریوی RCP 4.5 برابر با ۵/۵۷ در ماه ژوئیه و تحت سناریوی RCP 8.5 با مقدار ۵/۹۵ در ماه سپتامبر رخ می‌دهد. در جدول ۴، مقادیر ضریب‌های خطای مدل‌های اقلیمی MIROC5 و GFDL-CM3 آورده شده است.

Table 4- Error coefficient for climate models

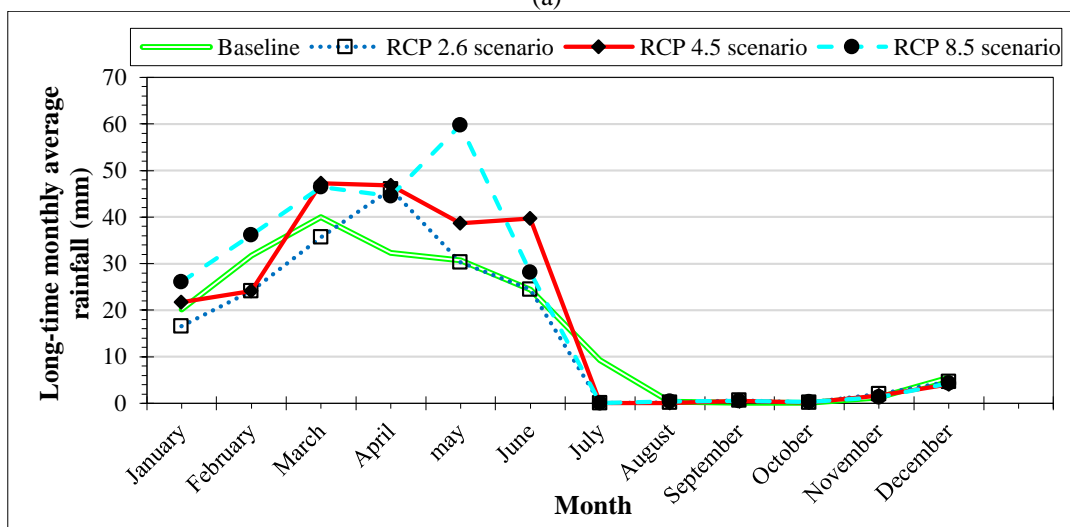
جدول ۴- ضرایب خطا برای مدل‌های اقلیمی

Error	Unit	GFDL-CM3	MIROC5
r	%	99.6	74.9
MAE	(mm/°C)	2.1	7.6
RMSE	(mm/°C)	2.1	10.8
NS	dimensionless	0.96	0.54

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که به طور کلی، مدل اقلیمی برای متغیر دما در مقایسه با متغیر بارش عملکرد بسیار مناسبی دارد. مقدار ضریب خطای هم‌بستگی که نشان‌دهنده شدت رابطه میان دو متغیر است، برای هر مدل MIROC5 و GFDL-CM3 مقدار مناسبی است و بیان‌گر روند تغییرات متغیرهای اقلیمی دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی، در بازه زمانی پایه و آینده بر یکدیگر منطبق است. پایین بودن ضرایب خطای MAE و RMSE که نشان‌گر کمینه بودن تفاوت میان متغیر اقلیمی شبیه‌سازی شده با مدل اقلیمی در بازه زمانی پایه و آینده است که تغییرات آن برای مدل اقلیمی دما بسیار مناسب‌تر از بارش است. سری‌های بلندمدت دما و بارش در بازه زمانی آینده



(a)



(b)

Fig. 3- Long-term climate scenarios in the future time interval for the climate variable (a) temperature and (b) precipitation

شکل ۳- سناریوهای بلندمدت اقلیمی در بازه زمانی آینده برای متغیر اقلیمی (الف) دما و (ب) بارندگی

گرفت. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل ANN در بازه زمانی پایه در مقایسه با داده‌های تاریخی نشان دادند که مقدار تست و آموزش برای r به ترتیب برابر با $0.79/4$ و $0.84/8$ ، برای RMSE، $0.7/1$ و $0.8/5$ ، برای MAE، $0.9/2$ و $1.0/5$ ، برای NSE، $0.7/3$ و $0.7/8$ هستند. روند تغییرات جریان ورودی به مخزن سد مارون با مدل ANN برای بازه زمانی آینده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در شکل ۴ آورده شده است.

۲-۴- پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد و آب آبیاری در بخش کشاورزی

به منظور صحت‌سنجی مدل ANN از ایستگاه هیدروکلیماتولوژی ایدنک در بالادست سد و نیروگاه برق‌آبی مارون استفاده شده است. به منظور استفاده از مدل ANN، ابتدا عملکرد مدل در بازه زمانی پایه با داده‌های تاریخی در مرحله آموزش و آزمون، مورد صحت‌سنجی قرار

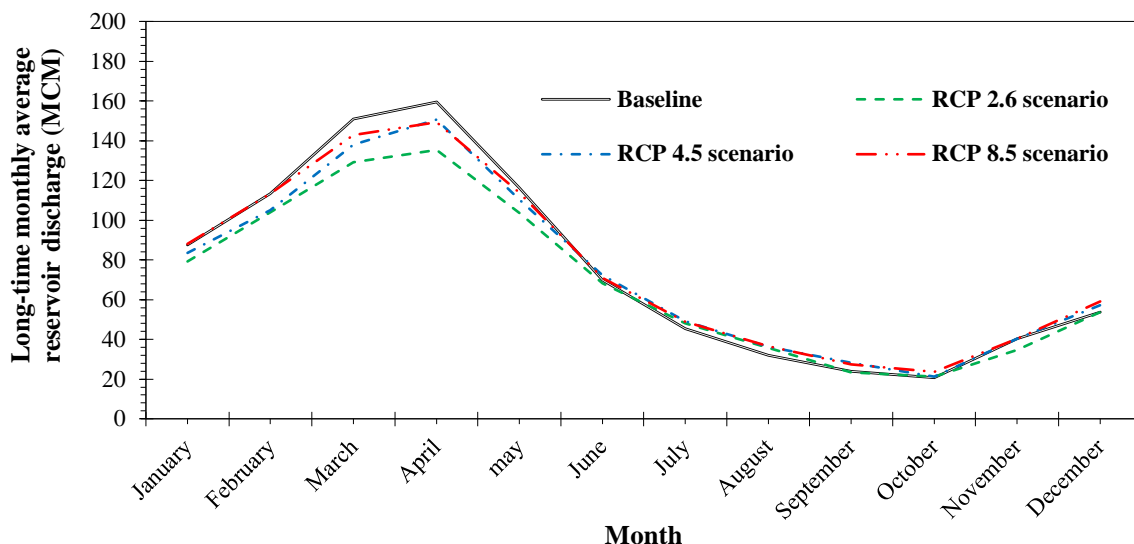


Fig. 4- Long-term average monthly reservoir water discharge in the baseline and future time periods

شکل ۴- میانگین بلندمدت ماهانه آبدهی مخزن در بازه زمانی پایه و آینده

به نباتات علوفه‌ای است. میزان آب مورد نیاز برای آبیاری نباتات علوفه‌ای تحت سناریوهای RCP 8.5 و RCP 4.5 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب ۴۹ و ۵۳ درصد افزایش خواهد یافت.

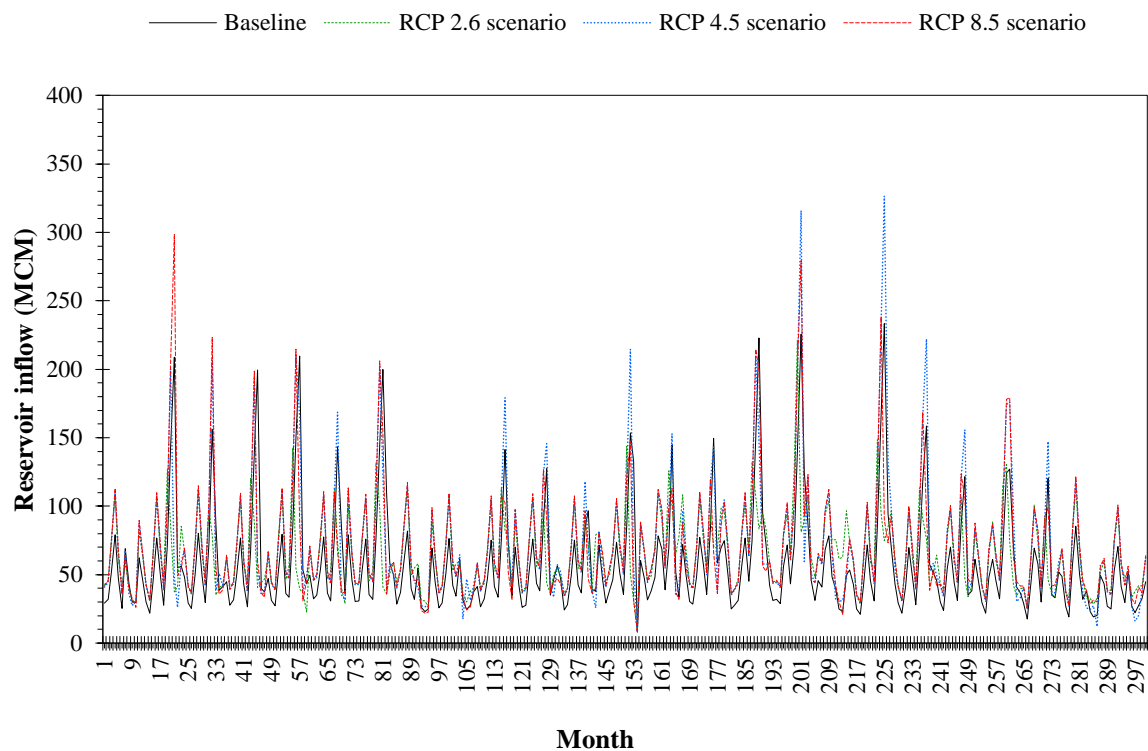
۳-۴- سامانه تأمین آب

پس از مدل‌سازی منابع و مصارف آب در حوضه آبریز مارون، مدل WEAP اجرا و مقدار رهاسازی آب از مخزن سد در بازه زمانی پایه و آینده استخراج شدند. نتایج عرضه و تقاضای آب حاصل از مدل WEAP در شکل ۵ آورده شده است.

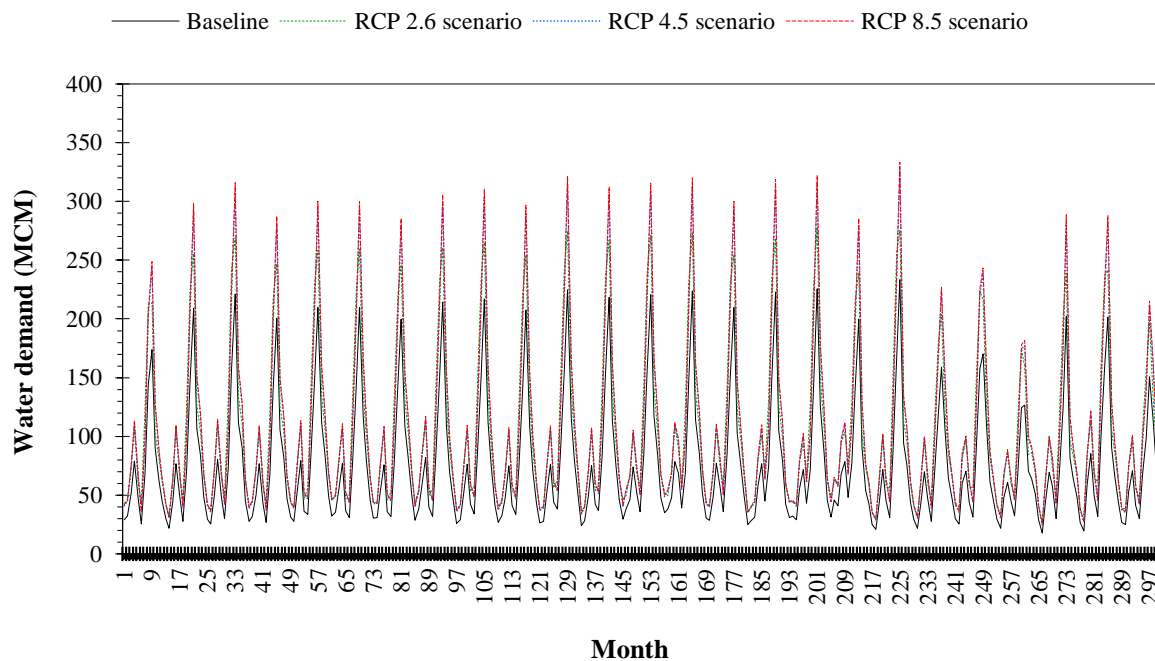
با توجه به شکل ۵، مجموع میزان رهاسازی آب در بازه زمانی پایه برابر با ۱۷۵۵۷ میلیون مترمکعب و مجموع تقاضای آب برابر با ۲۲۸۰۲ میلیون مترمکعب است. بنابراین مجموع کمبود آب در بازه زمانی پایه برابر با ۵۲۴۵ میلیون مترمکعب است. مجموع میزان رهاسازی در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب برابر با ۱۹۵۵۵، ۲۱۶۰۹ و ۲۱۱۸۸ میلیون مترمکعب و مجموع تقاضای آب به ترتیب برابر با ۳۱۴۶۷، ۳۱۹۲۹ و ۳۲۶۱۳ میلیون مترمکعب خواهد بود. مجموع کمبود آب در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۱۱۹۱۱، ۱۰۳۲۰ و ۱۱۴۲۵ میلیون مترمکعب خواهد که نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب ۱۲۷، ۹۶ و ۱۱۷ درصد افزایش خواهد یافت.

مطابق شکل ۴، توزیع زمانی میانگین بلندمدت ماهانه جریان ورودی به مخزن در بازه زمانی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) در بیشتر ماه‌ها مشابه با بازه زمانی پایه است. بیشینه جریان ورودی به مخزن در بازه زمانی پایه و آینده در ماه آوریل و کمینه مقدار آن در ماه اکتبر رخ می‌دهد. بیشینه مقدار آبدهی مخزن در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۱۵ درصد، ۶/۳ درصد و ۹۱۳/۷۶ میلیون مترمکعب ماهانه آبدهی مخزن در بازه زمانی پایه ۹۱۳/۷۶ میلیون مترمکعب است. مقدار آبدهی مخزن در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6، به میزان ۸/۴ درصد نسبت به بازه زمانی پایه کاهش می‌یابد. همچنین آبدهی مخزن تحت سناریوهای اقلیمی RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۲/۴ درصد کاهش و یک درصد افزایش خواهد یافت.

همچنین نتایج حاصل از مدل Cropwat نشان دادند که مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی در بازه زمانی (۲۰۴۰-۲۰۱۵)، تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه به میزان ۳۹ درصد افزایش خواهد یافت که بیشینه افزایش مربوط به افزایش آب آبیاری برای نباتات علوفه‌ای به میزان ۴۷ درصد خواهد بود. همچنین مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب، ۴۰ و ۴۲ درصد افزایش خواهد یافت که بیشینه میزان افزایش مربوط



(الف)



(ب)

Fig. 5- Results of (a) Reservoir inflow, (b) Water demand

شکل ۵- نتایج (الف) آبدهی مخزن و (ب) تقاضای آب

۴-۴- شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب

پس از استخراج نتایج رها سازی و تقاضای آب در حوضه آبریز مارون، شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در دو محیط قطعی و فازی در بازه زمانی پایه و آینده با سه تابع عضویت گوسین، نمایی و سیگموئید، محاسبه شدند. نتایج محاسبه شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در بازه زمانی پایه و آینده در محیط قطعی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ نشان می‌دهد که شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه کاهش خواهند یافت. علت این امر، افزایش قابل توجه آب مورد نیاز آبیاری در بخش کشاورزی و کاهش حجم آبدهی مخزن در بازه زمانی آینده است. شاخص اطمینان‌پذیری زمانی در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب ۹، ۱۳ و ۸ درصد کاهش می‌یابد.

هم‌چنین شاخص برگشت‌پذیری در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب ۳۱، ۲۰ و ۱۷ درصد کاهش خواهد یافت. در مجموع شاخص پایداری سامانه تأمین آب مارون، در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به بازه زمانی پایه به ترتیب، ۵۷، ۵۴ و ۵۲ درصد کاهش می‌یابد. کاهش چشم‌گیر شاخص پایداری تحت سناریوی اقلیمی RCP 2.6 نشان می‌دهد که این سناریو، بحرانی‌ترین سناریوی اقلیمی برای حوضه آبریز مارون است. با توجه به آنکه در سناریوی RCP 2.6، باید انتشار دی‌اکسید کربن از سال ۲۰۲۰ کاهش و در سال ۲۱۰۰ به صفر برسد، افزایش دما که تابعی از غلظت گازهای گلخانه‌ای است در مقایسه با سایر سناریوهای اقلیمی، کمتر افزایش خواهد یافت. در سناریوی RCP 4.5، بیشینه انتشار دی‌اکسید کربن، در سال ۲۰۴۰ رخ خواهد داد و پس از آن، انتشار دی‌اکسید کربن کاهش خواهد یافت و هیچ سالی برای انتشار صفر آن در نظر نگرفته شده است. بنابراین کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در این سناریو نسبت

به سناریوی RCP 2.6، دارای ۲۰ سال تأخیر است که سبب می‌شود وضعیت تغییرات دما، افزایش بیشتری نسبت به سناریوی RCP 2.6 داشته باشد. در سناریوی RCP 8.5، هیچ‌گونه کاهش در انتشار گاز دی‌اکسید کربن تا انتهای قرن بیست و یک در نظر گرفته نشده است. بنابراین افزایش دما در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 بیشتر خواهد بود. هم‌چنین تحت سناریوی RCP 2.6 مقدار بارش در بازه زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه به میزان ۵ درصد کاهش یافت، در حالی که در سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 بارش نسبت به بازه زمانی پایه افزایش یافت. بنابراین افزایش دما و کاهش بارش در بازه زمانی آینده تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه زمانی پایه، سبب شده است که شاخص پایداری تحت سناریوی RCP 2.6 نسبت به سایر سناریوها بیشینه کاهش را داشته باشد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با نتایج پژوهش‌های پیشین در حوضه آبریز مارون منطبق است؛ از جمله، محاسبه اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد و آسیب‌پذیری ۲۰ درصد براساس منحنی فرمان بهینه سد مارون را با هدف کمینه‌سازی کمبود آب (Sajadi and Rabei, 2004)، محاسبه وقوع بیشینه دبی رودخانه در فصل زمستان و کمینه مقدار آن در فصل تابستان رودخانه مارون با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال و سن و نیز تحلیل پارامتری رگرسیونی (Marofi and Tabari, 2011) اشاره کرد. (Mirmehdi et al. (2022) سازگاری منابع آب موجود و نیازهای پایین‌دست سد مخزنی مارون در شرایط تغییر اقلیم را با ترکیب مدل‌های SWAT و MODSIM بررسی کردند. ابتدا، اثرات تغییر اقلیم بر مقدار جریان ورودی به سد مارون با استفاده از مدل SWAT تحت چهار سناریوی اقلیمی RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 در سه بازه زمانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و (۲۰۶۱-۲۰۸۰) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان دادند با وجود افزایش بارش در این حوضه، افزایش دما اثر و کارایی بیشتری را در کاهش میزان جریان داشته است. سپس شاخص اطمینان‌پذیری با استفاده از جریان ورودی سد مارون در بازه زمانی پایه و آینده با مدل MODSIM محاسبه شد.

Table 5- Water supply system performance indexes in different time intervals in crisp environment (%)

جدول ۵- شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در بازه‌های زمانی مختلف در محیط قطعی (درصد)

Index	Time interval			
	Baseline time	RCP 2.6 scenario	RCP 4.5 scenario	RCP 8.5 scenario
Time reliability	73	63	66	67
Resilience	35	24	28	29
Vulnerability	7	10	11	12
Sustainability	57	24	26	27

Table 6- Water supply system performance indexes in different time intervals in fuzzy environment (%)
جدول ۶- شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در بازه‌های زمانی مختلف در محیط فازی (درصد)

Membership function	Index	Time interval			
		Baseline	RCP 2.6 scenario	RCP 4.5 scenario	RCP 8.5 scenario
Gaussian	Time reliability	73	63	66	67
	Resilience	61	77	58	53
	Vulnerability	15	23	20	15
exponential	Time reliability	73	63	66	67
	Resilience	69	86	61	55
	Vulnerability	3	12	14	10
sigmoid	Time reliability	99	100	99	100
	Resilience	1	1	1	2
	Vulnerability	40	43	41	42

خطی میان عرضه و تقاضای آب با تابع عضویت‌های گوسین و نمایی نشان می‌دهد که رابطه میان آنها دارای شیب مثبت و ضریب R^2 نزدیک به یک است.

عملکرد تابع سیگموئید متفاوت از دو تابع گوسین و نمایی است. شاخص اطمینان‌پذیری زمانی تحت تابع عضویت فازی سیگموئید، به‌طور قابل توجهی نسبت به حالت قطعی و دو تابع عضویت فازی گوسین و نمایی بیشتر و مقدار شاخص برگشت‌پذیری، به‌طور قابل توجهی کمتر از حالت قطعی و دو تابع عضویت فازی گوسین و نمایی است.

در تابع عضویت سیگموئید نقاط کمینه و بیشینه مقدار تابع عضویت فازی به‌ترتیب برابر با $0/5$ و $0/99$ است. مقدار تابع عضویت برابر با $0/5$ در ماه‌هایی که عرضه و تقاضای آب با یکدیگر برابر هستند، رخ می‌دهد. در حالی که در ماه‌هایی که تقاضای آب بیش از عرضه آن است و کمبود آب در سامانه وجود دارد، مقدار تابع عضویت، بیش از $0/5$ است. این مسأله سبب شده است که ماه‌هایی که تقاضای آب در آنها تأمین نمی‌شود، خارج از بیشینه محدوده عرضه به تقاضای آب قرار گیرند. علت این امر آن است که تابع عضویت فازی سیگموئید فاقد هسته مجموعه فازی و از نوع صرفاً کاهش‌ی یا افزایشی است و علی‌رغم وجود هم‌بستگی با ضریب R^2 برابر با $0/94$ میان x و $\mu(x)$ ، تابع از نوع کاهش‌ی بوده و دارای ارتباط معکوس با یکدیگر هستند. بنابراین استفاده از تابع عضویت فازی سیگموئید در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب، نتایج دقیقی را ارائه نمی‌دهد که این امر مؤید نتایج تحقیق (Safavi and Golmohammadi 2016) نیز است. برای رفع این مشکل، می‌توان از مفهوم برش α در تعیین سطوح اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری استفاده کرد، زیرا مجموعه برش α سبب ایجاد مجموعه‌ای از ماه‌ها به‌عنوان زیرمجموعه‌ای جداگانه خواهد شد که

نتایج نشان دادند، تغییر اقلیم سبب کاهش تخصیص آب به بخش‌های مصرف‌کننده خواهد شد به‌طوری که میانگین تخصیص آب به نیازها حداقل ۲ و حداکثر ۶/۲۵ درصد کاهش خواهد یافت. در جدول ۶ مقادیر شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در محیط فازی با توابع عضویت مختلف آورده شده است.

مطابق جدول ۶ شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب در محیط فازی، نسبت به محیط قطعی افزایش می‌یابد. علت این امر، آن است که در منطق کلاسیک که تأمین یا عدم‌تأمین تقاضای آب با مقدار یک یا صفر نشان داده می‌شود. در حالی که در منطق فازی با استفاده از توابع عضویت، اعداد بین صفر تا یک نیز در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، وضعیت‌هایی از سامانه تأمین آب که در آنها، حجم زیادی از تقاضای آب تأمین می‌شود، نیز به‌عنوان وضعیت مطلوب در نظر گرفته می‌شود. جدول ۶ نشان می‌دهد که تغییرات شاخص‌های عملکرد سامانه تأمین آب تحت هریک از توابع عضویت فازی با یکدیگر متفاوت است. شاخص اطمینان‌پذیری زمانی با توابع عضویت فازی گوسین و نمایی هم در بازه زمانی پایه و هم در بازه زمانی آینده نسبت به محیط قطعی، تغییر ندارد. علت این امر آن است که حد اطمینان‌پذیری زمانی در حالت فازی، برابر با تأمین ۱۰۰ درصد آب در نظر گرفته شده است و بنابراین مقادیر آن با دیدگاه احتمالاتی کلاسیک به‌طور کامل یکسان است.

شاخص برگشت‌پذیری تحت دو تابع گوسین و نمایی، نسبت به حالت قطعی افزایش یافت. شاخص برگشت‌پذیری، سنجش وضعیت عرضه و تقاضای آب در دو ماه متوالی نسبت به یکدیگر است بنابراین تحت توابع عضویت فازی که تغییرات آنها پیوسته است، تغییرات بیشتری را نسبت به حالت قطعی نشان می‌دهد. عملکرد دو تابع عضویت فازی گوسین و نمایی، مشابه با یکدیگر اما با مقادیر متفاوت هستند. رابطه

۵ درصد کاهش و تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۱۴ و ۱۵ درصد افزایش خواهد یافت.

اثرات تغییرات روند دما و بارش بر وضعیت آب‌شناسی حوضه آبریز مارون با مدل ANN و آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی با مدل Cropwat برآورد شدند. نتایج حاصل از مدل ANN نشان دادند که رواناب ورودی به مخزن سد تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 کاهش و تحت سناریوی RCP 8.5 نسبت به بازه زمانی پایه افزایش خواهد یافت. هم‌چنین آب مورد نیاز در بخش کشاورزی نیز تحت هر سه سناریو نسبت به بازه زمانی پایه افزایش خواهد یافت. در گام آخر، با استفاده از مدل WEAP، وضعیت سامانه آب حوضه آبریز مارون شبیه‌سازی و چهار شاخص سنجش عملکرد سامانه آب در محیط قطعی و در محیط فازی با استفاده از تابع عضویت فازی محاسبه شدند. نتایج نشان دادند که شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب، روند تغییراتی یکسانی تحت توابع عضویت فازی مختلف نداشتند. تغییرات شاخص اطمینان‌پذیری زمانی متأثر از سطح اطمینان است و در صورتی که سطح اطمینان برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شود، شاخص‌های سنجش عملکرد قطعی و فازی تحت توابع عضویت گوسین و نمایی یکسان هستند. شاخص برگشت‌پذیری که وضعیت دو ماه متوالی را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد، تحت توابع فازی گوسین و نمایی افزایش و تحت تابع عضویت سیگموئید کاهش یافت.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از منطق فازی به جای دیدگاه احتمالی، عدم قطعیت‌های مختلف ناشی از نقص دانش انسانی و رخ دادهای احتمالی را در محاسبات در نظر گرفته و بدین‌دلیل شاخص پایداری سامانه آب که حاصل تجمیع سایر شاخص‌ها است، در محیط فازی کاهش یافت. هم‌چنین نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که چالش مهم در توسعه منطق فازی با شاخص‌های سنجش عملکرد سامانه تأمین آب، انتخاب تابع عضویت مناسب است. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد توابع عضویت فازی نظیر تابع عضویت فازی سیگموئید که فاقد هسته فازی هستند، عملکرد مناسبی در مسائل مدیریت منابع آب ندارند و توابع عضویت فازی مانند گوسین، نمایی، نتایج بسیار مناسبی به‌دست می‌دهند.

درجه عضویت آنها بزرگ‌تر یا مساوی با سطح تعیین‌شده از سوی تصمیم‌گیران است. بدین‌ترتیب از تغییرات ناهمگون شاخص‌های اطمینان‌پذیری زمانی و برگشت‌پذیری جلوگیری خواهد شد. در گام آخر، شاخص پایداری در محیط قطعی و فازی با توابع عضویت مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.

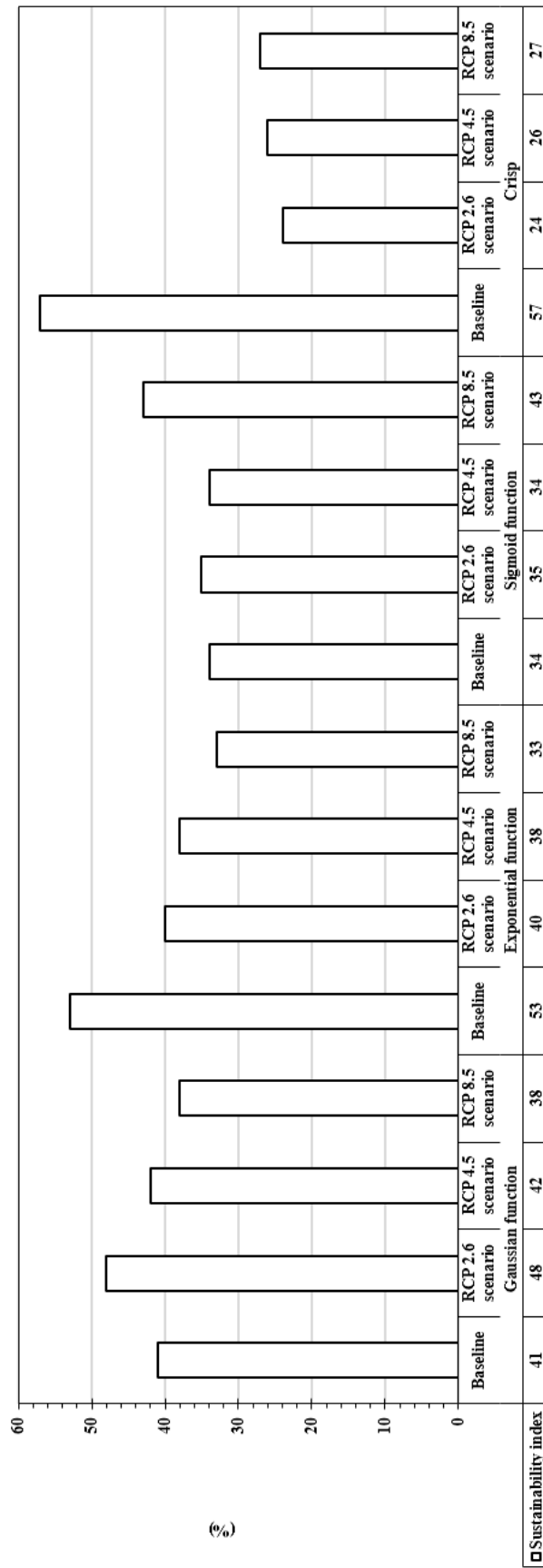
مطابق شکل ۶، شاخص پایداری در بازه زمانی پایه در محیط قطعی بیشینه مقدار را دارد در حالی که در محیط فازی با توابع عضویت فازی مختلف، علی‌رغم افزایش سایر شاخص‌ها، کاهش یافته است. بیشینه و کمینه کاهش شاخص پایداری در محیط فازی به ترتیب مربوط به تابع عضویت سیگموئید و نمایی است. این مسأله نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن رخ دادهای احتمالی آینده در سامانه آب، شاخص پایداری کاهش خواهد یافت و تأمین آب با چالش‌های بیشتری روبه‌رو خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

سامانه‌های بزرگ و پیچیده منابع آب، همواره در معرض وقوع طیف وسیعی از رخ دادهای احتمالی در آینده که نمی‌توان آنها را به‌طور قطعی پیش‌بینی کرد، قرار دارند. کمی‌سازی عدم قطعیت‌های ناشی از خطرات بالقوه، چالش‌های دشواری را در طراحی، برنامه‌ریزی و مدیریت این سامانه‌ها، تحمیل می‌کند. در سامانه‌های آبی که اغلب دارای ورودی‌هایی هستند که محاسبات دقیق و قطعی آنها میسر نیست، به‌کارگیری رویکرد احتمالاتی و تبدیل آن به یک رویکرد توزیع احتمالی معنادار به‌ویژه در مسائل دارای چند پارامتر دشوار است (Press, 2033) و نیازمند توسعه ابزاری است که در آن امکان بررسی پدیده‌های مبهم در یک چارچوب ریاضی میسر باشد.

در پژوهش حاضر، ابتدا اثرات پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی دما و بارش در بازه زمانی آینده (۲۰۴۰-۲۰۱۵) تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 از گزارش پنجم هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که دما تحت هر سه سناریو نسبت به بازه زمانی پایه (۲۰۰۱-۱۹۷۷) افزایش خواهد یافت. هم‌چنین بارش در بازه زمانی آینده تحت سناریوهای RCP 2.6

Fig. 6- Sustainability index
شکل ۶- شاخص پایداری



پی نوشتها

- 1- Evidential Reasoning
- 2- Water Sustainability Index
- 3- Combined Reliability-Vulnerability Index
- 4- Robustness Index
- 5- Variability
- 6- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems
- 7- Fuzzy Data Clustering
- 8- Grid Partition
- 9- Subtractive Clustering
- 10- Artificial Neural Networks
- 11- Water Evaluation and Planning
- 12- Mean Absolute Error
- 13- Root Mean Square Error
- 14- Nash-Sutcliffe
- 15- Feed-Forward Back Propagation
- 16- Error Propagation
- 17- United Nations' Food and Agricultural Organization
- 18- FAO-Penman-Monteith
- 19- Variable Agricultural Demand
- 20- Stockholm Environment Institute
- 21- Standard Operation Procedure

۶- مراجع

- Ashofteh P S, Bozorg-Haddad O, and Mariño M A (2013) Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(2):85-97
- Ashofteh P S, Rajaei T, Golfam P, and Chu X (2019) Applying climate adaptation strategies for improvement of management indexes of a river-reservoir irrigation system. *Irrigation and Drainage Journal* 68(3):420-432
- Behboudian M and Kerachian R (2021) Evaluating the resilience of water resources management scenarios using the evidential reasoning approach: The Zarrinehrud river basin experience. *Journal of Environmental Management* 284:112025
- Biswas J K, Mondal B, Priyadarshini P, Abhilash P C, Biswas S, and Bhatnagar A (2022) Formulation of water sustainability index for India as a performance gauge for realizing the United Nations Sustainable Development Goal 6. *Ambio* 51:1569-1587
- Carneiro Marques A, Veras C E, and Rodriguez D A (2022) Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 608:127690
- Chen H, Wang Z, Xu S, Zhao Y, Cheng Q, and Zhang B (2020) Energy demand, emission reduction and

health co-benefits evaluated in transitional China in a 2°C warming world. *Journal of Cleaner Production* 264:121773

- El-Baroudy I and Simonovic S P (2006) Application of the fuzzy performance measures to the City of London water supply system. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33(3):255-265
- FAO, CROPWAT (1992) A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage paper, No. 46. Food and Agriculture Organization, Rome
- Golfam P and Ashofteh P S (2022) Performance indexes analysis of the reservoir-hydropower plant system affected by climate change. *Water Resources Management* 36:5127-5162
- Golmohammadi M H, Safavi H R, Sandoval-Solis S, and Fooladi M (2021) Improving performance criteria in the water resource systems based on fuzzy approach. *Water Resources Management* 35:593-611
- Halkijevic I, Vukovic Z, and Vouk D (2017) Indicators and a neuro-fuzzy based model for the evaluation of water supply sustainability. *Water Resources Management* 31:3683-3698
- Hashimoto T, Stedinger J R, and Loucks D P (1982) Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1):14-20
- Jahanshahi S and Kerachian R (2019) An evidential reasoning-based sustainability index for water resources management. *Hydrological Science Journal* 64(10):1223-1239
- Karamouz M, Rahimi R, and Ebrahimi E (2021) Uncertain water balance-based sustainability index of supply and demand. *Journal of Water Resources Planning and Management* 147(5)
- Locks D P and Van Beek E (2005) Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris
- Moghaddasi P, Kerachian R, and Sharghi S (2022) A stakeholder-based framework for improving the resilience of groundwater resources in arid regions. *Journal of Hydrology* 609:127737
- Mortezaeipooya S S, Ashofteh P S, and Golfam P (2022) Selecting the best approach to modeling the performance of water supply system using the combination of rough set theory with multi-criteria decision-making. *Water Resources Management* 36(9):3129-3152

- Niu W J and Feng Z K (2021) Evaluating the performances of several artificial intelligence methods in forecasting daily streamflow time series for sustainable water resources management. *Sustainable Cities and Society* 64:102562
- Niva V, Cai J, Taka M, Kummu M, and Varis O (2020) China's sustainable water-energy-food nexus by 2030: Impacts of urbanization on sectoral water demand. *Journal of Cleaner Production* 251:119755
- Press S J (2003) *Subjective and objective Bayesian statistics: Principles, models and applications*. 2nd Edition, New York, NY: Wiley Interscience
- Safavi H R, Golmohammadi M H (2016) Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-Water Resources Research* 12(1):68-83 (In Persian)
- Sandoval-Solis S, McKinney D C, and Loucks D P (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137:381-390
- Sarzaeim P, Bozorg-Haddad O, Fallah-Mehdipour E, and Loáiciga H A (2017) Climate change outlook for water resources management in a semiarid river basin: the effect of the environmental water demand. *Environmental Earth Sciences* 76:489
- Sieber J, Swartzand C, and Huber-Lee A (2005) *User guide for WEAP21*. Stockholm Environment Institute Tellus Institute
- Simonovic S P (2009) A new method for spatial and temporal analysis of risk in water resources management. *Journal of Hydroinformatics* 11(3-4):320-329
- Srdjevic Z and Srdjevic B (2017) An extension of the sustainability index definition in water resources planning and management. *Water Resources Management* 31:1695-1712
- United Nation Environment Programme Annual Report (2019) Available at: www.unep.org.
- WEAP Tutorial (2016) Stockholm Environment Institute: Stockholm, Sweden.
- Wilby R L and Harris I (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42(2):1-10
- World Water Assessment Programme (Nations Unies) (2018) *The United Nations world water development report*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, New York, United States, Available at: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018.
- Xu W, Zhong Z, Proverbs D, Xiong S, and Zhang Y (2021) Enhancing the resilience of the management of water resources in the agricultural supply chain. *Water* 13(12):1619
- Yaseen Z M, Ramal M M, Diop L, Jaafar O, Demir V, and Kisi O (2018) Hybrid adaptive neuro-fuzzy models for water quality index estimation. *Water Resources Management* 32:2227-2245
- Zadeh L A (1965) Fuzzy sets. *Information and Control* 8(3):338-353
- Sajadi M and Rabei F (2004) Simulating the water resources system of the Jarrahi catchment basin and determining the optimal operating curve of the Marun dam. *Scientific Journal of Agriculture* 27:165-172 (In Persian)
- Marofi S and Tabari H (2011) Revealing the process of changes in Marun River discharge using parametric and non-parametric methods. *Geographical Research Quarterly* 26(819):11119-17141 (In Persian)
- MirMehdi M, Shourian M, and Sharafati A (2022) Adaptation to climate change conditions in Maroon Basin. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 53(11):2533-2549 (In Persian)
- Perera E D P and Lahat L (2015) Fuzzy logic based flood forecasting model for the Kelantan River basin, Malaysia. *Journal of Hydro-Environment Research* 9(4):542-553
- Patel J N and Balve P N (2016) Evapotranspiration estimation with fuzzy logic. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering* 3(4)
- Kambalimath S and Deka P C (2020) A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources. *Applied Water Science* 10:191
- Li M, Fu Q, Singh V P, Liu D, Li T and Zhou Y (2020) Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty. *Agricultural Systems* 178:102685
- Chen Y, Fu Q, Singh V P, Ji Y, Li M, and Wang Y (2023) Optimization of agricultural soil and water resources under fuzzy and random uncertainties: Synergy and trade-off between equity-based economic benefits, nonpoint pollution and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 281:108264
- Iran Water Resources Management Company (1977) Available at: www.wrm.ir