



Challenges of Water Resources Governance under the Impact of Climate Change and Water Transfer

Atabak Jaffari,¹  Ahmad Sharafati,^{2*}  Aminreza Neshat,³  Seyed Abbas Hosseini⁴ 

1. Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran;

Email: Atabak.jaffari@gmail.com

2. Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran; Email: asharafati@gmail.com

3. Department of Natural Resources and Environment, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran;

Email: neshat.aminreza@srbiau.ac.ir

4. Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran; Email:

abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received April 10, 2025

Received in revised form May 08, 2025

Accepted June 15, 2025

Available online June 22, 2025

Keywords:

Qazvin Plain, Integrated exploitation, Reservoir deficit, Climate change, Artificial intelligence

ABSTRACT

Research Topic: The water resources management approach should be based on a water governance framework in different dimensions for optimal allocation in terms of time and space with a view to future conditions.

Objective: Given the climatic stresses along with the lack of planning for water resource allocation, the approach of identifying future conditions is essential to understand the potential for development or development control.

Method: In this study, considering the integrated exploitation of surface and groundwater resources in the Qazvin study area and the use of transferred water from Taleghan Dam, the inflow to this dam and the status of the aquifer under climate change conditions were simulated using two optimization algorithms, the Fire Falcon and the Emperor Penguin, using the LSTM model. In this study, two emission scenarios of SSP 126 and SSP 585 were evaluated as optimistic and pessimistic conditions using three climate models.

Results: The results of the climate simulation showed that the amount of precipitation in the Qazvin study area will decrease and the temperature will increase. On the other hand, considering the selection of the LSTM-FHO model as the selected simulation model, the Qazvin aquifer was simulated in terms of groundwater level and the results indicated an increasing trend of decline and the aquifer deficit reaching more than 400 MCM. This deficit is also due to the decrease in the inflow to the Taleghan Dam.

Conclusions: The results obtained in this study showed that the conditions of the Qazvin plain were not sustainable due to the limited water resources and the transfer of water flow from the Taleghan Dam, and these conditions indicated the lack of potential to meet the current situation and indicated the need to redefine the governance framework and water allocation in this plain.

Cite this article: Jaffari, A., Sharafati, A., Neshat, A., Hosseini, A. (2024). Challenges of Water Resources Governance under the Impact of Climate Change and Water Transfer. *ECOHYDROLOGY*, 12 (2), 779-794. <http://doi.org/10.22059/ije.2025.394384.1868>



© Atabak Jaffari, Ahmad Sharafati, Aminreza Neshat, Seyed Abbas Hosseini.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2025.394384.1868>

Introduction

Water supply is one of the most important current challenges for water sector managers, and this has made management in this sector very important (Mirdashtvan et al. 2021). Population growth and subsequent development on the one hand, and water supply constraints on the other, have made water supply and demand management very sensitive. One approach to managing this issue is the discussion of inter-basin water transfer to compensate for shortages. The water transfer plan from the Taleghan Dam for the Salt Lake Basin has been exploited for a long time, and most of these water resources are allocated to the Qazvin Plain for the irrigation network of this area. In addition to allocating water from the Taleghan Dam in a transfer manner, this network also exploits groundwater resources. Groundwater resources are one of the essential components of the hydrological cycle and are exploited for the exploitation and maintenance of agricultural and economic activities (agriculture and industry), especially in arid and semi-arid regions. A study of the water resources balance in the Qazvin Plain, most of which is affected by the irrigation network of this region, shows that more than 80% of the water supply in this region is provided by groundwater resources, and the challenge of a deficit of more than 300 million cubic meters per year is a major warning in exploitation.

Method

According to the purpose of this research, the exploitation model of water resources and the impact of various factors on groundwater level is defined in the form of a conceptual model with a monthly time base, and based on it, the LSTM deep learning approach is used with two optimization models of the Golden Hawk and the Emperor Penguin for simulation. Also, in order to assess the impact of climate change, the results of the scenarios of the Sixth Climate Change Report are used for exploitation in the aquifer area and the inflow to Taleghan Dam as a surface flow input source.

Case study

The Qazvin study area is located in the north of the Salt Lake watershed. This study area covers an area of 9551.7 square kilometers, of which 5059 square kilometers are plains and the rest are mountainous areas and highlands. The survey of the observation well network of this aquifer indicates a decrease of 30.5 meters over 23 years, and the aquifer deficit is equal to 308.3 million cubic meters based on the latest water resources balance.

Simulation

The exploitation model in the Qazvin Plain is based on the balance of surface water and groundwater resources separately defined and evaluated using the LSTM simulation model by combining two optimization models. The results of these two models, considering climate change, indicate the inflow to Taleghan Dam and the allocation deficit from this dam and estimate the aquifer deficit with respect to the withdrawal of groundwater resources. In order to develop the aquifer model, the parameters affecting the groundwater level according to various studies including precipitation, aquifer recharge, aquifer discharge and groundwater level with a time delay were selected and analyzed as the input and groundwater level in the current month as the simulation target. In order to analyze the meteorological parameters, the Joostan evapotranspiration station at the center of gravity of the Taleghan Dam catchment area is used. The parameters considered for the two groundwater and surface water models are simulated monthly for a period of 20 years. In both models, 16 years are considered as training and 4 years as testing.

Results

The results of all climate models and scenarios indicate that the amount of precipitation has decreased and the temperature has increased. The trend of the effectiveness of the SSP 585 scenario compared to the SSP 126 scenario is evident. The amount of precipitation has a decreasing trend and for both Qazvin and Joostan stations, the lowest simulated precipitation is related to the SSP 585 scenario of the BCC-CSM2-MR model and the highest simulated precipitation is related to the SSP 126 scenario of the IPSL-CM6A-LR model. The computational results of the artificial intelligence model showed that the statistical indicators in the test period have lower accuracy than the training period and among the two simulation models, the LSTM-FHO model has a higher capability than the LSTM-EPC model.

The variables of precipitation, aquifer recharge, aquifer discharge and groundwater level with a delay of one and two months have the highest capability for simulating the groundwater level in the aquifer. Considering the model selection and input variables selected for simulating the aquifer level and aquifer hydrograph for aquifer deficit analysis, the simulation of future conditions was evaluated based on the results of climate change. Accordingly, the amount of precipitation from the results of climate models and its effect on the amount of aquifer recharge (infiltration from precipitation and runoff) was also considered. According to the water requirement defined in the Qazvin irrigation network cultivation pattern, the effect of precipitation and temperature on the increase in water demand is determined. Accordingly, the amount of discharge or water requirement is defined in the artificial intelligence model. The results obtained indicate a high frequency of uncertainty in the computational results, which is due to changes in precipitation and temperature from climate models and also fluctuations in the change in the cultivation pattern due to the high level of wheat and barley lands due to the lower amount of water requirement. On the other hand, the examination of the uncertainty of the results showed that the amount of fluctuations in the SSP 585 scenarios is greater than in the SSP 126 scenarios. The presented results of the simulation of the inflow to Taleghan Dam until 2030 indicate a decrease in the inflow to Taleghan Dam and certainly the level of exploitation and planning potential is faced with uncertainty. The presented results showed that the average inflow to Taleghan Dam until 2030 will be between 316 and 382 million cubic meters, with the highest inflow corresponding to the SSP 126 scenario in the IPSL-CM6A-LR model and the lowest corresponding to the SSP 585 scenario in the IPSL-CM6A-LR model. The predicted average values compared to the average inflow to the dam in the 10-year period ending in 2021, equal to 410 million cubic meters, and the 20-year period equal to 480 million cubic meters indicate a decreasing trend in the flow. Figure 6 shows the time series of inflow to Taleghan Dam based on the predicted models.

Conclusions

The results showed that part of the flow transferred through Taleghan Dam to this area will decrease due to climate change, and on the other hand, the lack of a governance model in the exploitation of the irrigation network in this area will continue the aquifer deficit. The combination of these two types of water stress will increase the deficit of the Qazvin aquifer to more than 400 million cubic meters per year, which in addition to drying up some of the wells in this area, will definitely exacerbate subsidence and the challenges of water quality and pollutants and environmental problems in this area.

Author Contributions

Atabak Jaffari: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Writing-Original Draft.

Ahmad Sharafati: Writing-Review & Editing, Formal analysis, Supervision.

Aminreza Neshat: Methodology, Software

Seyed Abbas Hosseini: Writing-Review & Editing

Data Availability Statement

Authors have no restrictions on sharing data.

Acknowledgements

No

Ethical considerations

Relevant research content in this study was in accordance with the ethical standards of the institutional and national research committees.

Funding

The authors did not receive support from any organization for the submitted work.

Conflict of interest

All Authors declare that they have no conflict of interest.

چالش‌های حکمرانی منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم و انتقال آب

اتابک جعفری،^۱ احمد شرافتی،^۲ امین‌رضا نشاط،^۳ سید عباس حسینی^۴

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Atabak.jaffari@gmail.com

۲. گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: asharafati@gmail.com

۳. گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: neshat.aminreza@srbiau.ac.ir

۴. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: رویکرد مدیریت منابع آب باید مبتنی بر چارچوب حکمرانی آب در ابعاد مختلف برای تخصیص بهینه از نظر زمانی و مکانی با نگاهی به شرایط آبی تعریف گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱	هدف: با توجه به تنش‌های اقلیمی در کنار عدم برنامه‌ریزی در جهت تخصیص منابع آب، رویکرد شناسایی شرایط آبی برای درک پتانسیل‌های توسعه یا کنترل توسعه ضروری است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸	روش تحقیق: در این مطالعه با توجه به بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدوده مطالعاتی قزوین و استفاده از آب انتقالی سد طالقان، شبیه‌سازی جریان ورودی به این سد و وضعیت آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی شاهین آتشین و پنگوئن امپراتور با استفاده از مدل LSTM انجام گرفت. در این مطالعه دو سناریوی انتشار SSP 126 و SSP 585 به‌عنوان شرایط خوش‌بینانه و بدبینانه با استفاده از ۳ مدل اقلیمی ارزیابی شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵	یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که میزان بارش در محدوده مطالعاتی قزوین روند کاهشی و میزان دما افزایش خواهد داشت. از طرفی نیز با توجه به انتخاب مدل LSTM-FHO به‌عنوان مدل منتخب شبیه‌سازی، آبخوان قزوین از نظر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و نتایج حاکی از روند افزایشی افت و رسیدن کسری آبخوان به بیش از ۴۰۰ میلیون مترمکعب در سال است. این کسری با توجه به کاهش جریان ورودی به سد طالقان نیز هست.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱	نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان داد که شرایط دشت قزوین با توجه به محدودیت منابع آب و انتقال جریان آب از طرف سد طالقان شرایط پایداری را نداشته و این شرایط حاکی از عدم پتانسیل تأمین وضعیت فعلی بوده و نیاز به بازتعریف چارچوب حکمرانی و تخصیص آب در این دشت را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها:

دشت قزوین،

بهره‌برداری تلفیقی،

کسری مخزن،

تغییر اقلیم،

هوش مصنوعی

استناد: جعفری، اتابک؛ شرافتی، احمد؛ نشاط، امین‌رضا؛ حسینی، سید عباس. چالش‌های حکمرانی منابع آب تحت تأثیر تغییر اقلیم و انتقال آب. *اکوهیدرولوژی*، ۱۲(۳)، ۷۹۴-۷۷۹.

<http://doi.org/10.22059/ije.2025.394384.1868>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © اتابک جعفری، احمد شرافتی، امین‌رضا نشاط، سید عباس حسینی.



مقدمه

تأمین آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های کنونی برای متولیان بخش آب مطرح بوده و این موضوع سبب شده تا مدیریت در این بخش بسیار حائز اهمیت باشد (میرداشتوان و همکاران، ۱۴۰۰). رشد جمعیت و به‌تبع آن، توسعه از یک طرف و محدودیت‌های تأمین آب به این واسطه سبب شده تا مدیریت عرضه و تقاضای آب بسیار حساس باشد. یکی از رویکردها در جهت مدیریت این موضوع بحث انتقال آب بین حوضه‌ای برای جبران کمبودهاست. طرح انتقال آب از سد طالقان برای حوزه دریاچه نمک از دیرباز مورد بهره‌برداری قرار گرفته و بخش اعظم این منابع آب به دشت قزوین برای شبکه آبیاری این محدوده تخصیص داده می‌شود. این شبکه علاوه بر تخصیص آب از سد طالقان به‌صورت انتقالی، از منابع آب زیرزمینی نیز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. منابع آب زیرزمینی یکی از اجزای اساسی چرخه هیدرولوژی بوده و برای بهره‌برداری و حفظ فعالیت‌های کشاورزی و اقتصادی (کشاورزی و صنعتی)، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. بررسی بیلان منابع آب در دشت قزوین که بخش عمده آن تحت تأثیر شبکه آبیاری این منطقه است، نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد منابع تأمین آب در این منطقه از منابع آب زیرزمینی تأمین شده و چالش کسری بیش از ۳۰۰ میلیون متر مکعب در هر سال به‌عنوان هشدار اساسی در بهره‌برداری مطرح است. این موارد در کنار وقوع تنش‌های اقلیمی و افزایش تقاضای آب برای شرب تهران از سد طالقان قطعاً چالش تأمین آب در این شبکه را در بر خواهد داشت. از این حیث با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی منطقه، نیاز آب شرب تهران و جریان ورودی به سد طالقان، چه به‌صورت مستقیم و چه به‌صورت غیرمستقیم، تأمین آب مناسب از نظر زمانی و مکانی حائز اهمیت است. بیان این موضوع نشان می‌دهد که دیدگاه مدیریت منابع آب که همواره تحت چالش‌های مختلف قرار می‌گیرد، متأثر از مفهوم حکمرانی است. به گفته بسیاری از محققان، وضعیت منابع آب زیرزمینی به وضعیت حکمرانی آب زیرزمینی وابسته است و پیامدهای عدم مدیریت و بحران‌های ناشی از آن، نتیجه حکمرانی نامناسب در این موضوع است (داک^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ پال وستر^۲، ۲۰۱۵؛ توراجدا و بیسواس^۳، ۱۳۹۲).

حکمرانی آب، مجموعه‌ای از سامانه‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و اجرایی به‌منظور توسعه و مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در بخش‌های مختلف جامعه است (وودهوس و مولر^۴، ۱۳۹۶). لذا در بحث مدیریت باید با درک دقیقی از وضعیت فعلی و آتی با در نظر گرفتن ابعاد مختلف تأثیرگذاری یک موضوع تلاش و هماهنگی جهت برقراری یک تراز آبی انجام شود. لذا درک مفهوم تأثیر عدم حکمرانی مناسب به‌خصوص در بخش کشاورزی، که آب را به‌عنوان منبع امر و معاش می‌داند، باید بسیار دقیق و در ابعاد مختلف تدوین گردد. هدف اصلی این مطالعه بررسی ابعاد تأثیرگذاری تغییر اقلیم بر وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت قزوین و پیش‌بینی حجم آب قابل بهره‌برداری از سد طالقان برای تأمین کسری منابع آب در این محدوده است.

پیشینه پژوهش

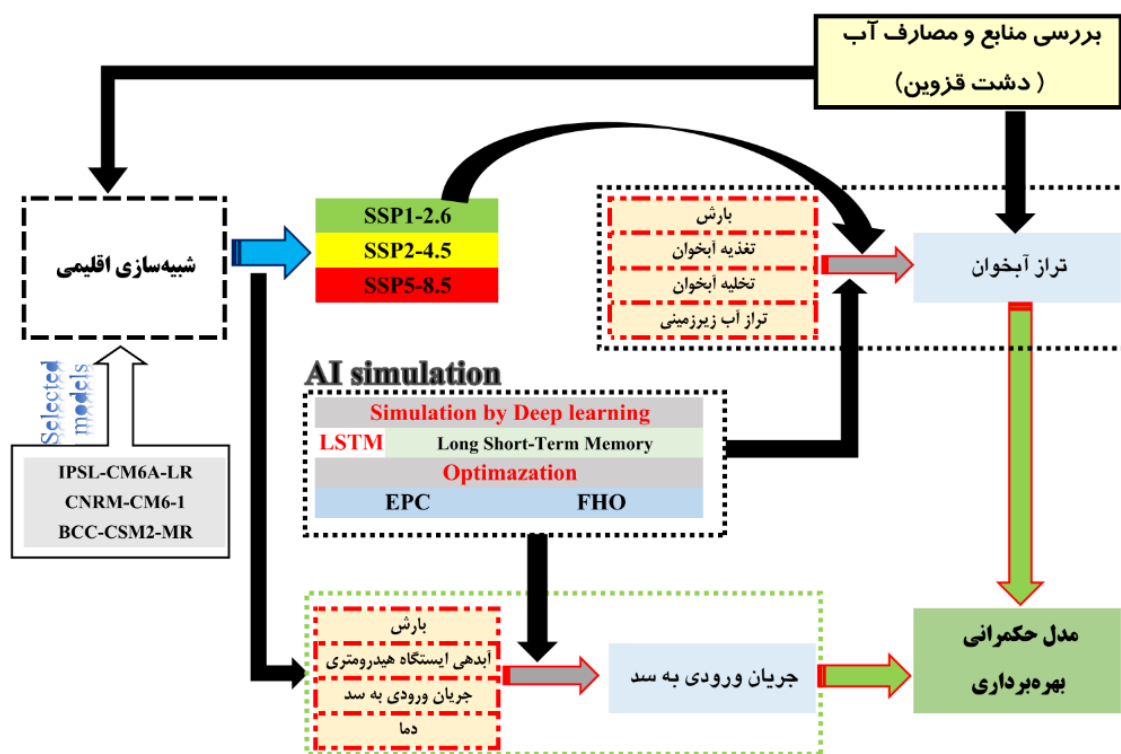
مطالعات گسترده‌ای با توجه به اهمیت و قدمت شبکه آبیاری قزوین در این محدوده انجام شده است؛ ازجمله اکبری و همکاران (۱۳۹۸) الگوی کشت مناسب تحت سناریوی‌های گزارش چهارم تغییر اقلیم را مورد آنالیز قرار داده که نتایج نشان داد که الگوی کشت به‌سمت محصولات با ثبات بالاتر خواهد رفت و کشت گندم کاهش خواهد داشت. نظری و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی اثر سناریوهای مختلف بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محدوده شبکه آبیاری پرداخته و نتایج نشان داد که الگوی کشت بهینه ضمن مدیریت تنش‌های آبی می‌تواند در افزایش بهره‌وری تأثیر مثبتی داشته باشد. همچنین رویکرد سیستمی را برای برنامه‌ریزی منابع آب مبتنی بر روش‌های نوین آبیاری، کم‌آبیاری، بهینه‌سازی الگوی کشت، و بهبود کارایی شبکه‌های آبیاری پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار سبب افزایش بهره‌وری فیزیکی آب می‌شود. اسدی و همکاران (۱۳۹۹) با تعریف سناریوهای مختلف کاهش برداشت از منابع آب، چرخه مدیریت مصرف را تحت سه معیار اقتصادی، اجتماعی و

1. Duc
2. Pahl-Wostl
3. Tortajada & Biswas
4. Woodhouse & Muller

زیست‌محیطی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کشت یونجه ضمن مصرف کمتر آب دارای بعد اقتصادی مناسب و کاهش ۵ درصد مصرف آب در شبکه می‌تواند در مدیریت کمبود منابع آب مؤثر باشد. پذیرش و همکاری (۱۴۰۲) رویکردهای افزایش ارتقای بهره‌وری آب در شبکه آبیاری قزوین با استفاده از آزمون‌های آماری را مورد بررسی قرار داده و نتایج نشان داد که نظارت بر برداشت آب، بازنگری برنامه توزیع آب، تأکید بر واردات محصولات با نیاز آبی بیشتر، مشارکت ذی‌نفعان در مدیریت شبکه به‌عنوان مهم‌ترین رویکردهای افزایش بهره‌وری معرفی شد.

روش‌شناسی پژوهش

با توجه به هدف این پژوهش، مدل بهره‌برداری از منابع آب و تأثیر عوامل مختلف بر تراز آب زیرزمینی در قالب یک مدل مفهومی با پایه زمانی ماهانه تعریف و براساس آن از رویکرد یادگیری عمیق LSTM با دو مدل بهینه‌سازی شاهین آتشین و پنگوئن امپراتور برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. همچنین به‌منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم، از نتایج سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم برای بهره‌برداری در محدوده آبخوان و جریان ورودی به سد طالقان به‌عنوان یک منبع ورودی جریان سطحی استفاده می‌شود. در شکل ۱، طرح‌واره این پژوهش ارائه شده است.

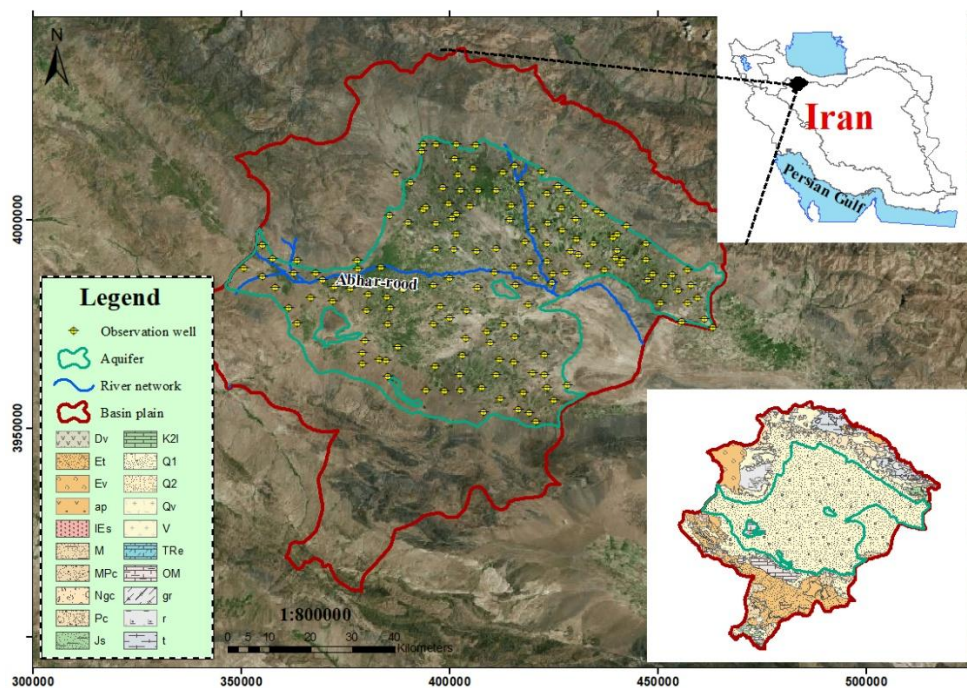


شکل ۱. طرح‌واره پژوهش

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی قزوین در شمال حوضه آبریز دریاچه نمک واقع شده است. این محدوده مطالعاتی ۹۵۵۱/۷ کیلومتر مربع وسعت دارد که ۵۰۵۹ کیلومتر مربع آن، دشت و مابقی، نواحی کوهستانی و ارتفاعات است. حداکثر و حداقل ارتفاع این محدوده مطالعاتی به‌ترتیب ۲۹۰۲ و ۱۱۳۱ متر است. شهرهای مهم قزوین و تاکستان در این محدوده واقع شده‌اند. آبخوان این محدوده در بخش مرکزی با مساحت ۳۹۵۰ کیلومتر مربع قرار دارد. منابع بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی شامل ۷۹۸۱ حلقه چاه با تخلیه سالانه ۱۳۸۰/۸۷ میلیون متر مکعب، ۲۷۳ رشته قنات با تخلیه سالانه ۳۶/۹۷ میلیون متر مکعب و ۲۱۹۶ دهنه چشمه با تخلیه ۲۵/۵۱ میلیون متر مکعب در سال است. مصرف آب در این محدوده شامل ۱۷۲۹/۴۲ میلیون متر مکعب در سال و در سطح آبخوان نیز ۱۶۱۸/۰۵ میلیون متر مکعب است که سهم بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت به‌ترتیب ۱۳۷۱/۶۱، ۱۶۰/۴۵ و ۸۵/۹۹ میلیون متر مکعب در سال است. بررسی شبکه چاه‌های مشاهده‌ای این آبخوان حاکی از افت ۳۰/۵ متر در طی ۲۳ سال

است که کسری آبخوان نیز براساس آخرین بیلان منابع آب برابر با $308/3$ میلیون متر مکعب است. در شکل ۲ موقعیت آبخوان ارائه شده است.



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه

بیلان آبخوان آبرفتی قزوین با کسری $308/3$ میلیون متر مکعب مواجه بوده که این موضوع و تحلیل پارامترهای تغذیه و تخلیه آبخوان حاکی از بالا بودن تخلیه آبخوان به میزان $1365/1$ میلیون متر مکعب است. در جدول ۱، بیلان آبخوان آبرفتی و در جدول ۲ بیلان عمومی محدوده مطالعاتی قزوین منتهی به سال آبی $1397-1398$ ارائه شده است.

جدول ۱. بیلان آبخوان آبرفتی قزوین - میلیون متر مکعب

تغییرات	تخلیه			تغذیه						
	جمع	خروجی	تبخیر از آب	نفوذ از آب	جمع	نفوذ از آب	نفوذ از آب	نفوذ از آب	نفوذ از آب	جریان زیرزمینی ورودی
حجم ذخیره	تخلیه	زیرزمینی	زیرزمینی	زهکشی	چاه، چشمه و قنات	شرب و صنعت	زراعی	سطحی	بارش	
-۳۰۸/۳	۱۳۷۱/۲	۳/۰۷	۰/۹۳	۲/۱۱	۱۳۶۵/۱	۱۰۶۳	۱۷۳	۳۴۳	۶۷/۵	۴۲/۳
										۴۳۷/۳

جدول ۲. بیلان عمومی محدوده مطالعاتی قزوین - میلیون متر مکعب

تغییرات حجم			عوامل خروجی						عوامل ورودی					
آب زیرزمینی	آب سطحی	جمع	آب انتقالی	جریان زیرزمینی خروجی	جریان سطحی خروجی	تبخیر و تعرق			جمع	آب انتقالی	جریان زیرزمینی ورودی	جریان سطحی ورودی	بارندگی	
						مصرف خالص	آبخوان	آب آزاد						بارش
-۳۰۸/۳	۰	۳۴۸۸	۰	۳	۷	۱۱۰۳	۱	۳۹	۲۳۳۵	۳۱۸۱	۲۳۵	۹	۹۵	۲۸۴۲

شبکه آبیاری قزوین با وسعت ۸۰۰۰۰ هکتار در بخش مرکزی دشت قزوین واقع شده است. شبکه آبیاری قزوین مشتمل بر سد مخزنی طالقان، تونل انتقال، خروجی تونل تا محل بند انحرافی زیاران و سد انحرافی زیاران است. بخشی از تأمین آب در شبکه آبیاری قزوین از سد خاکی طالقان با حجم مفید ۴۲۰ میلیون متر مکعب تأمین می‌شود. حداکثر آب ورودی به شبکه به میزان ۳۳۰ میلیون متر مکعب و حداقل آن به میزان ۱۱۱ میلیون متر مکعب در دوره‌های ترسالی و خشکسالی ثبت شده است. براساس

ارزیابی‌های انجام‌شده متوسط راندمان انتقال آب در کانال‌های فرعی و اصلی ۸۰ درصد و راندمان کاربرد آب ۴۵ درصد است. الگوی کشت قالب منطقه گندم و جو (۴۶ درصد) و در جدول ۳ محصولات کشاورزی شبکه آبیاری قزوین ارائه شده است.

جدول ۳. الگوی کشت محصولات شبکه آبیاری دشت قزوین

محصول	سطح (هکتار)	نیاز آبی (m^3/ha)	محصول	سطح (هکتار)	نیاز آبی (m^3/ha)	محصول	سطح (هکتار)	نیاز آبی (m^3/ha)
گندم	۲۰۳۱۵	۲۸۷۰	سیب	۳۰۰	۸۸۹۰	چغندر قند	۶۱۶	۸۴۸۰
یونجه	۲۵۲۴	۸۳۶۰	لوبیا	۲۶۷	۴۵۲۰	ذرت علوفه‌ای	۱۰۶۰	۶۸۴۰
عدس	۲۱۷۸	۳۸۲۰	ذرت دانه‌ای	۲۲۶	۶۴۰۰	انگور	۴۰	۵۲۲۰
جو	۱۹۷۷	۲۳۵۰	نخود	۱۴۱	۳۸۲۰	سیب‌زمینی	۵۰	۷۳۵۰
گوجه‌فرنگی	۱۰۸۱	۷۵۱۰						

تدوین مدل بهره‌برداری

مدل بهره‌برداری در دشت قزوین مبتنی بر بیلان منابع آب سطحی و آب زیرزمینی به‌صورت مجزا تعریف و با استفاده از مدل شبیه‌سازی LSTM^۵ با تلفیق دو مدل بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج این دو مدل با در نظر گرفتن تغییر اقلیم، بیانگر جریان ورودی به سد طالقان و کمبود تخصیص از این سد و برآورد کسری آبخوان با توجه به برداشت از منابع آب زیرزمینی است. استفاده از این مدل شبیه‌سازی با توجه به قابلیت برگشت‌پذیری و حل مسئله با فرایند حافظه کوتاه‌مدت مربوط به انتخاب گام زمانی ماهانه انتخاب شده است.

به‌منظور تدوین مدل آبخوان، پارامترهای مؤثر بر تراز آب زیرزمینی با توجه به مطالعات مختلف شامل بارش، تغذیه آبخوان، تخلیه آبخوان و تراز آب زیرزمینی با تأخیر زمانی به‌عنوان ورودی و تراز آب زیرزمینی در ماه فعلی به‌عنوان هدف شبیه‌سازی انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفت. در مدل در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی جریان ورودی به سد طالقان و با توجه به مطالعات نوبیه و همکاران شرایط حوزه آبریز سد طالقان، چهار معیار بارندگی، دما، جریان آبدی در بالادست سد و جریان ورودی به سد با تأخیر یک ماه به‌عنوان ورودی و جریان ورودی به سد به‌عنوان هدف شبیه‌سازی در نظر گرفته شد (نوبیه و همکاران، ۱۳۹۹). به‌منظور تحلیل پارامترهای هواشناسی از ایستگاه تبخیرسنجی جویستان در مرکز ثقل حوزه آبریز سد طالقان استفاده می‌شود. پارامترهای در نظر گرفته‌شده برای دو مدل آب زیرزمینی و آب سطحی برای یک دوره ۲۰ ساله به‌صورت ماهانه شبیه‌سازی می‌شود. در هر ۲ مدل، ۱۶ سال به‌عنوان آموزش و ۴ سال به‌عنوان آزمایش در نظر گرفته شده است.

روش شبیه‌سازی LSTM

روش LSTM یکی از مدل‌های شبکه عصبی بازگشتی (RNN^۶) است که با در نظر گرفتن توالی زمانی با MLP^۷ متفاوت است. طراحی هوشمند سلول حافظه در LSTM می‌تواند به‌طور مؤثر مشکل ناپدید شدن گرادیان را که یک مشکل رایج در شبکه‌های عصبی عمیق است، حل کند (اکبری اسموندی و همکاران، ۱۴۰۳). از این رو، LSTM می‌تواند توالی ورودی را با گام‌های زمانی طولانی‌تر یاد بگیرد؛ بنابراین معمولاً برای حل برنامه‌های مربوط به مسائل سری زمانی مانند دو رویکرد در نظر گرفته‌شده در این پژوهش کارایی مناسبی دارد. حالات سلولی در LSTM را می‌توان با یک مقررات دروازه‌ای متشکل از سه دروازه (Γ) به‌روز کرد:

۱. دروازه ورودی (Γ_1)؛ ۲. دروازه فراموشی (Γ_2)؛ ۳. دروازه خروجی (Γ_3). فرمول خاص LSTM به شرح زیر است:

$$\Gamma_i = \delta(w_i[c^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_i) \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{رابطه ۱})$$

جایی که $x^{(t)}$ ورودی در مرحله فعلی t است، δ یک تابع فعال‌سازی غیرخطی از نظر عنصر است، و b و w به‌ترتیب نشان‌دهنده ماتریس‌های بایاس و وزن هستند.

$$c^{(t)} = \Gamma_1 C_c^{(t)} + \Gamma_2 c^{(t-1)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

5. Long short-term memory

6. Recurrent neural network

7. Multilayer perceptron

که در آن، $C_c^{(t)}$ بردار حالت سلولی است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_c^{(t)} = \tanh(w_c[a^{(t)}, x^{(t)}] + b_c) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$a^{(t)} = \Gamma_3 \tanh(c^{(t)}) \quad \text{رابطه ۴}$$

الگوریتم بهینه سازی شاهین آتشین

الگوریتم شاهین آتشین در سال ۱۴۰۱ توسط عزیزی و همکاران ارائه شده است (عزیزی، طلاطاهی و گندمی، ۱۴۰۲). این الگوریتم مناسب شبیه سازی در شرایط پیچیده غیرخطی و غیرمحدب است (عابد، ۱۴۰۲). این الگوریتم مبتنی بر رفتار پرندگان در زمان آتش طراحی شده است که در زمان فراگرفتن آتش، با جابه جایی چوب های سوزان به مکان های نسوخته باعث خروج حیوانات دیگر و شکار آن ها می شود (مودهش و همکاران، ۱۴۰۲). بر این اساس، با یک رفتار اولیه تصادفی، موقعیت های اولیه شناسایی شده مطابق رابطه (۵) تعیین می شود.

$$X_{ij} = rand * (U_j - L_j) + L_j, j = 1, 2, \dots, D \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه، مقادیر U_j و L_j محدودیت دامنه جستجو را که متعلق به اعداد تصادفی است نشان می دهد. براساس هر راه حل X_i مقدار متناسب و بهترین مقدار X_b براساس هر شعله آتش محاسبه می شود. در ادامه فاصله بین FH و PR بصورت رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$D_{lk} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, l = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه ۶}$$

در ادامه، مقدار FH مورد بازنگری قرار می گیرد.

$$FH_l(t+1) = FH_l(t) + (r_1 * X_b - r_2 * FH_n(t)), l = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه، مقدار $FH_n(t)$ یک شاهین آتشین است که براساس مقادیر تصادفی r_1 و r_2 محاسبه شده است. همچنین محدوده ای که طعمه در آن قرار دارد، با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می گردد.

$$SP_l = \frac{\sum_{q=1}^r PR_q}{r}, q = 1, 2, \dots, r, l = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۸}$$

در این شرایط، موقعیت شکار با توجه به حرکت شبیه سازی شده و موقعیت به صورت رابطه (۹) تعیین می شود.

$$PR_q(t+1) = PR_q(t) + (r_3 * FH_l - r_4 * SP_l(t)), l = 1, 2, \dots, n, q = 1, 2, \dots, r \quad \text{رابطه ۹}$$

در این شرایط، موقعیت امن به روز شده و به صورت رابطه (۱۰) تعیین می شود.

$$SP = \frac{\sum_{k=1}^m PR_k}{r}, k = 1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این زمان، طعمه نیز موقعیت خود را به روز می کند.

$$PR_q(t+1) = PR_q(t) + (r_5 * FH_a - r_6 * SP(t)), l = 1, 2, \dots, n, q = 1, 2, \dots, r \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در این زمان، شرط توقف با دستیابی به بهترین راه حل مورد سنجش قرار گرفته و در صورت عدم دستیابی فرایند به روزرسانی تکرار می شود.

الگوریتم بهینه سازی پنگوئن امپراتور

الگوریتم پنگوئن های امپراتور که به اختصار الگوریتم EPC نامیده می شود، از جمله کاربردی ترین الگوریتم های فراابتکاری است. این الگوریتم را ساسان حریفی در سال ۱۳۹۷ ابداع کرد (حریفی و همکاران، ۱۳۹۸). الگوریتم متاهیوریستیک پنگوئن های امپراتور، با الهام از طبیعت و با استفاده از دو فاکتور گرمای بدن پنگوئن ها و نحوه حرکتشان در کلونی، یک راه حل مناسب برای مسئله بهینه سازی را ارائه می دهد. فرض اولیه در الگوریتم پنگوئن های امپراتور، این است که پنگوئن ها در سراسر محیط مسئله، پراکنده شده باشند. بنابراین موقعیت هر پنگوئن نسبت به پنگوئن دیگر حائز اهمیت است. یک پنگوئن، معمولاً به سمت پنگوئنی می رود که هزینه جذب پایینی دارد. بنابراین فاکتور دوم مورد سنجش هم، هزینه جذب هر پنگوئن است که با توجه به شدت گرما و میزان مسافت، مورد سنجش قرار می گیرد. طی این الگوریتم، در هر مرحله از جذب، در واقع یک راه حل جدید برای مسئله مورد بررسی، ارزیابی شده و شدت گرما به روزرسانی می گردد. در این شرایط، تمام راه حل ها مرتب سازی و بهترینشان انتخاب می گردد. البته در این

میان، یک نسبت میرایی هم برای هر پنگوئن ارزیابی می‌شود که عواملی همچون حرکت هر پنگوئن، تابش گرما و جذب حرارت در میزان آن، تأثیر می‌گذارد. هرچه نسبت میرایی کمتر باشد، آن راه‌حل مناسب‌تر است. برای محاسبه دو فاکتور اصلی الگوریتم یعنی شدت گرما و جذابیت، انتقال تابش گرما باید محاسبه شود. برای محاسبه تابش حرارتی هر پنگوئن، باید اندازه سطح بدن آن را محاسبه کرد. محاسبه مساحت بدن هر پنگوئن شامل بدن اصلی، سر، منقار، باله‌ها و پاهاست. در الگوریتم EPC از معیار انتقال حرارت توسط تابش استفاده شده که تابش ملاک جذابیت پنگوئن‌هاست. با فرض اینکه پنگوئن با محیط خود در یک تعادل حرارتی قرار دارد؛ برای محاسبه انتقال حرارت کلی، باید حرارت منتقل شده از هر ناحیه بدن پنگوئن را به شرح زیر داشته باشیم:

$$q_{total} = q_{trunk} + q_{head} + q_{flippers} + q_{feet} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

شبیه‌سازی اقلیمی

با توجه به محدودیت در میزان دسترسی به آمار و اطلاعات دوره پایه و آتی سه مدل اقلیمی CNRM-IPSL-CM6A-LR، CEMS2 و CM6-1 انتخاب شده و براساس آن، ارزیابی دما و بارش با توجه به ایستگاه سینوپتیک قزوین انجام می‌شود. بر این اساس، پارامترهای اقلیمی برای دوره پایه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ میلادی شبیه‌سازی می‌شود. به منظور کاهش عدم قطعیت و بررسی توانمندی هریک از مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی اطلاعات دوره تاریخی، پارامترهای اقلیمی بارش و دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دوره پایه مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور مقادیر دما و بارش دوره پایه مدل‌های اقلیمی برای هر ایستگاه محاسبه شده و نتایج مقادیر بارش و دمای شبیه‌سازی شده مدل‌های اقلیمی و اختلاف آن‌ها با پارامترهای مزبور در دوره مشاهداتی ارزیابی می‌شود. دقت این مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا RMSE، ضریب تبیین R^2 و شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا مورد ارزیابی قرار گرفت. کم بودن مقدار شاخص RMSE و نزدیک بودن ضریب تبیین به یک مناسب‌ترین حالت است. شاخص کلینگ-گوپتا بین -0.1 تا $+1$ در تغییر است و هرچه به مقدار یک نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر است. به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی، شبیه‌سازی دوره پایه برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ انجام و نتایج براساس شاخص‌های آماری مورد سنجش قرار می‌گیرد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده می‌شود. در این روش برای عامل دما، تغییر براساس تفاضل و برای بارش براساس نسبت داده‌های GCM استفاده می‌شود. این روز ابتدا در دوره پایه ارزیابی و پس از تأیید برای دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از محاسبه عامل تغییر، برای دما عامل تغییر به مقدار دمای دوره پایه اضافه و برای بارش عامل تغییر در مقدار بارش دوره پایه ضرب می‌شود تا مقادیر تصحیح‌شده دما و بارش برای دوره پیش‌بینی به دست آید. نحوه محاسبه به صورت روابط زیر ارائه شده است:

$$T_0^f = T_0 + (\mu_m^f - \mu_m^c) \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$P_0^f = P_0 * \frac{\mu_m^f}{\mu_m^c} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

در این روابط، T دما برحسب درجه سانتی‌گراد، P مقدار بارش برحسب میلی‌متر، f دوره آینده، c دوره پایه، m داده‌های مدل و o داده‌های مشاهداتی است.

یافته‌های پژوهش

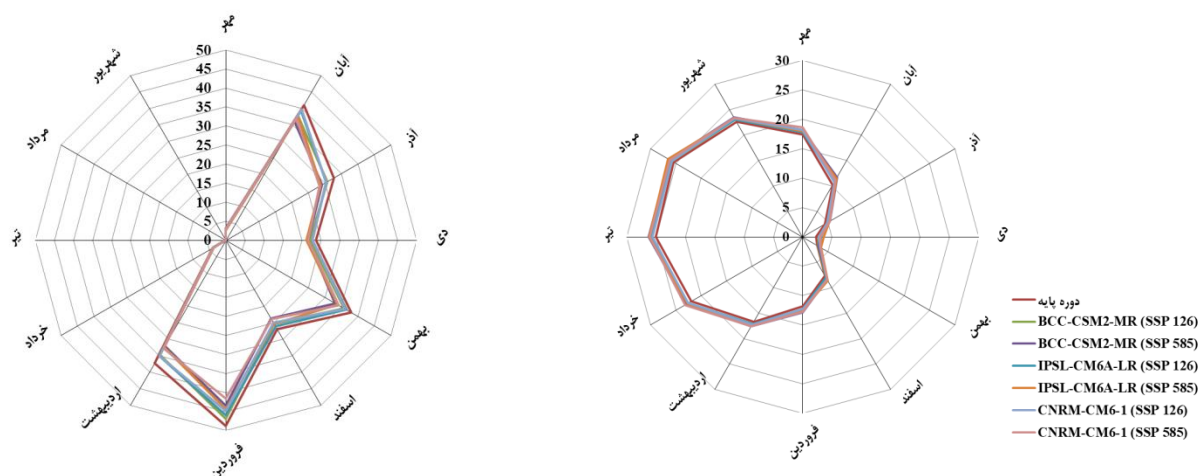
شبیه‌سازی تغییر اقلیم

با توجه به انتخاب سه مدل اقلیمی برای شبیه‌سازی تغییرات بارش و دما در شرایط آتی، در ابتدا ارزیابی کارایی سه مدل با استفاده از سه شاخص آماری برای دوره پایه انجام گرفت. مطابق جدول ۴، ارزیابی آماری برای سه مدل انجام گرفت که نتایج حاکی از برتری هر سه مدل و مناسب بودن مدل IPSL-CM6A-LR برای شبیه‌سازی پارامتر بارش و مدل BCC-CSM2-MR برای پارامتر دماست. نتایج به دست آمده برای ارزیابی مدل با توجه به مطالعات انصاری و همکاران (۱۴۰۱) که در سطح حوضه‌های آبریز کشور بوده است نیز همخوانی دارد.

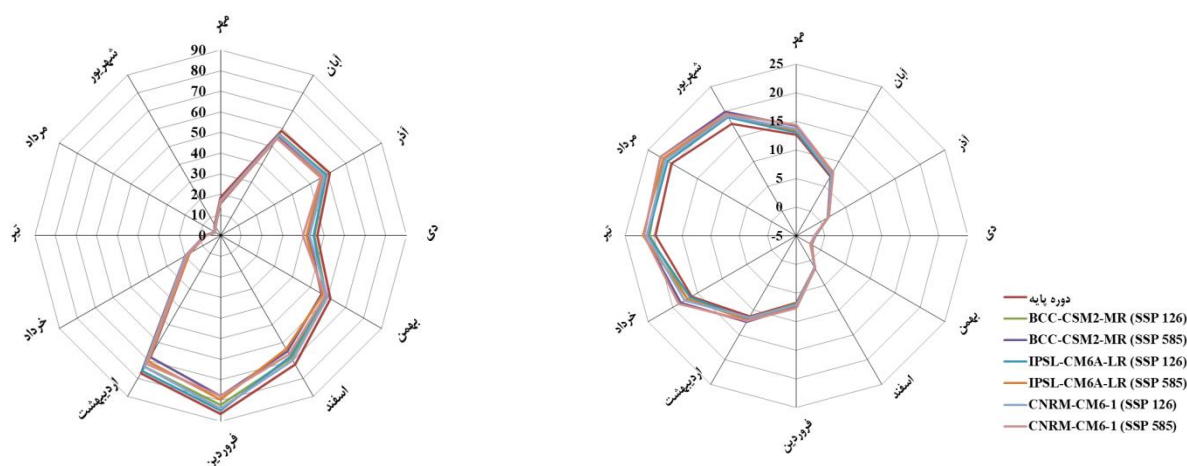
جدول ۴. ارزیابی آماری نتایج دوره پایه برای پارامتر بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک قزوین

منطقه	پارامتر	BCC-CSM2-MR			مدل IPSL-CM6A-LR			مدل CNRM-CM6-1		
		KGE	R ²	RMSE	KGE	R ²	RMSE	KGE	R ²	RMSE
ایستگاه قزوین	بارش	0.231	0.84	18	0.142	0.82	19	0.295	0.86	16
	دما	0.37	0.91	0.6	0.3	0.9	0.78	0.33	0.88	0.48
ایستگاه جویستان	بارش	0.214	0.81	24	0.191	0.76	27	0.274	0.83	22
	دما	0.31	0.85	0.8	0.286	0.82	0.91	0.281	0.81	0.98

با توجه به نتایج به دست آمده به منظور تحلیل با در نظر گرفتن عدم قطعیت بارش و دما در محدوده مورد مطالعه، از تحلیل هر ۳ مدل براساس ۲ سناریوی انتشار SSP 126 و SSP 585 به عنوان خوش بینانه ترین شرایط و بدبینانه ترین شرایط در نظر گرفته شد. نتایج کلیه مدل ها و سناریوها حاکی از این موضوع است که میزان بارش کاهش و میزان دما افزایش داشته است. روند تأثیرپذیری سناریوی SSP 585 نسبت به سناریوی SSP 126 مشهود است. میزان بارش روند کاهشی را داشته و برای هر دو ایستگاه قزوین و جویستان، کمترین بارش شبیه سازی شده مربوط به سناریوی SSP 585 مدل BCC-CSM2-MR و بیشترین بارش شبیه سازی شده نیز مربوط به سناریوی SSP 126 مدل IPSL-CM6A-LR است. در شکل ۴-الف تغییرات ماهانه بارش و دما تحت تأثیر ۳ مدل و ۲ سناریوی انتشار برای ایستگاه قزوین و در شکل ۴-ب برای ایستگاه جویستان ارائه شده است.



الف) ایستگاه قزوین



ب) ایستگاه جویستان

شکل ۴. تغییرات ماهانه دما و بارش تحت شرایط تغییر اقلیم با دو سناریوی انتشار در ایستگاه قزوین و جویستان

نتایج ارائه شده نشان داد که میزان تغییرات بارش و دما در این منطقه تحت تأثیر تغییر اقلیم دارای انحراف بوده و میزان بارش روند کاهشی و میزان دما افزایش خواهد داشت. این نوسانات در منحنی‌ها به صورت ماهانه ارائه شده است که میزان دما در ماه‌های گرم و بارش در ماه‌های سرد دارای نوسانات بیشتر و عدم قطعیت بالاتر است.

شبیه‌سازی کسری آبخوان قزوین

به منظور شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در آبخوان قزوین، از تعداد ۱۵۰ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال در این آبخوان که دارای سری زمانی درازمدت است استفاده شد. بر این اساس، بارش (P)، تغذیه آبخوان (R)، تخلیه آبخوان (D) و تراز آب زیرزمینی با تأخیر زمانی ماهانه (G) به عنوان متغیر ورودی تعریف شد. با توجه به تنوع متغیرهای ورودی به مدل هوش مصنوعی، حالات مختلف مطابق جدول ۳ در دو مدل LSTM-FHO و LSTM-EPC مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. مبنای تقسیم‌بندی داده‌ها به صورت ۸۰ درصد برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمایش است. مبنای تصمیم‌گیری در خصوص روش برتر نیز با شاخص‌های آماری مورد آنالیز قرار گرفت. در جدول ۵، نتایج شبیه‌سازی برای دو مدل با در نظر گرفتن ۶ حالت متغیرهای ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر محاسباتی آماری براساس میانگین داده‌های در ۱۵۰ چاه مشاهده‌ای در این جدول ارائه شده است.

جدول ۵. ارزیابی آماری مدل‌های شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در آبخوان قزوین

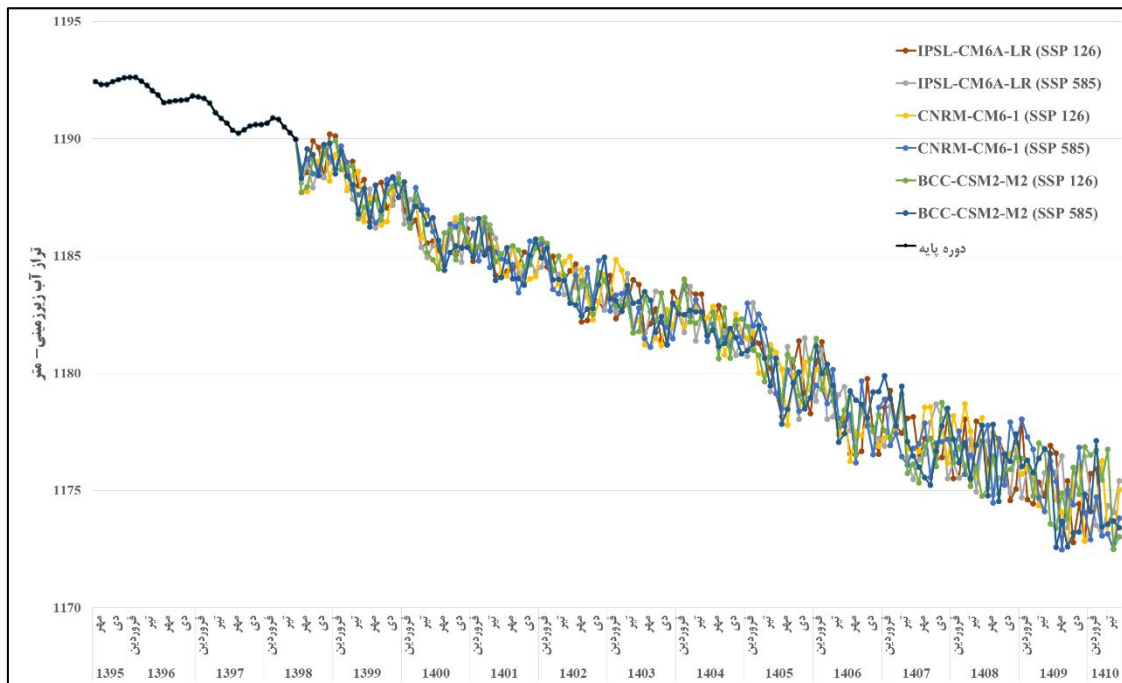
مدل	متغیر ورودی				دوره آموزش				دوره آزمایش			
	G	D	R	P	RMSE	NRMSE	NASH	R	RMSE	NRMSE	NASH	R
LSTM-FHO	-1	-1	-1	-1	0.492	0.056	0.88	0.9	0.552	0.062	0.84	0.86
	-1			-1	0.586	0.078	0.85	0.9	0.660	0.082	0.83	0.88
	-1; -2	-1	-1	-1	0.471	0.041	0.89	0.92	0.532	0.047	0.86	0.9
	-2; -3	-1	-1	-1	0.485	0.062	0.87	0.88	0.525	0.066	0.84	0.85
	-3	-1	-1		0.785	0.055	0.79	0.85	0.864	0.061	0.75	0.80
	-1; -2; -3	-1	-1	-1	0.578	0.074	0.77	0.78	0.644	0.081	0.73	0.76
LSTM-EPC	-1	-1	-1	-1	0.625	0.075	0.82	0.85	0.712	0.079	0.76	0.82
	-1			-1	0.643	0.085	0.78	0.84	0.740	0.092	0.72	0.80
	-1; -2	-1	-1	-1	0.728	0.060	0.79	0.85	0.797	0.063	0.74	0.83
	-2; -3	-1	-1	-1	0.562	0.080	0.82	0.81	0.637	0.085	0.77	0.80
	-3	-1	-1		0.858	0.066	0.72	0.78	0.920	0.073	0.72	0.77
	-1; -2; -3	-1	-1	-1	0.670	0.088	0.72	0.74	0.691	0.090	0.68	0.69

* مفهوم اعداد ۱-، ۲- و ۳- به معنای تأخیر زمانی یک، دو و سه ماهه در ورودی هر مدل است.

نتایج محاسباتی نشان داد که شاخص‌های آماری در دوره آزمایش، دارای دقت پایین‌تری نسبت به دوره آموزش داشته و از بین دو مدل شبیه‌سازی، مدل LSTM-FHO دارای قابلیت بالاتری نسبت به مدل LSTM-EPC است. میزان شاخص‌های آماری در همه ۶ حالت تعریف شده برای متغیرهای ورودی نیز بیانگر این موضوع است. از طرفی نیز از بین ۶ حالت در نظر گرفته شده، متغیرهای بارش، تغذیه آبخوان، تخلیه آبخوان و تراز آب زیرزمینی با تأخیر یک و دو ماهه دارای بیشترین قابلیت برای شبیه‌سازی است. بر این اساس، این متغیرهای ورودی برای شبیه‌سازی وضعیت آبخوان تحت شرایط تغییر اقلیم انتخاب گردید.

با توجه به انتخاب مدل و متغیرهای ورودی منتخب برای شبیه‌سازی تراز آبخوان و هیدروگراف آبخوان برای تحلیل کسری آبخوان، شبیه‌سازی شرایط آبی بر مبنای نتایج تغییر اقلیم ارزیابی گردید. بر این اساس، میزان بارش از نتایج مدل‌های اقلیمی و تأثیر آن بر میزان تغذیه آبخوان (نفوذ از بارش و رواناب) نیز در نظر گرفته شد. با توجه به نیاز آبی تعریف شده در الگوی کشت شبکه آبیاری قزوین، تأثیر بارش و دما بر میزان افزایش تقاضای آب تعیین می‌گردد. بر این اساس، میزان تخلیه یا نیاز آبی در مدل هوش

مصنوعی تعریف می‌گردد. با توجه به تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای ورودی مدل LSTM-FHO، شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهده‌ای انجام و در نهایت هیدروگراف آبخوان مطابق شکل ۵ ترسیم گردید. هیدروگراف آبخوان برای ۶ حالت مختلف تا سال ۱۴۱۰ شبیه‌سازی گردید که در همه حالات شبیه‌سازی آبخوان دارای افت و افزایش کسری مخزن نسبت به شرایط فعلی است.

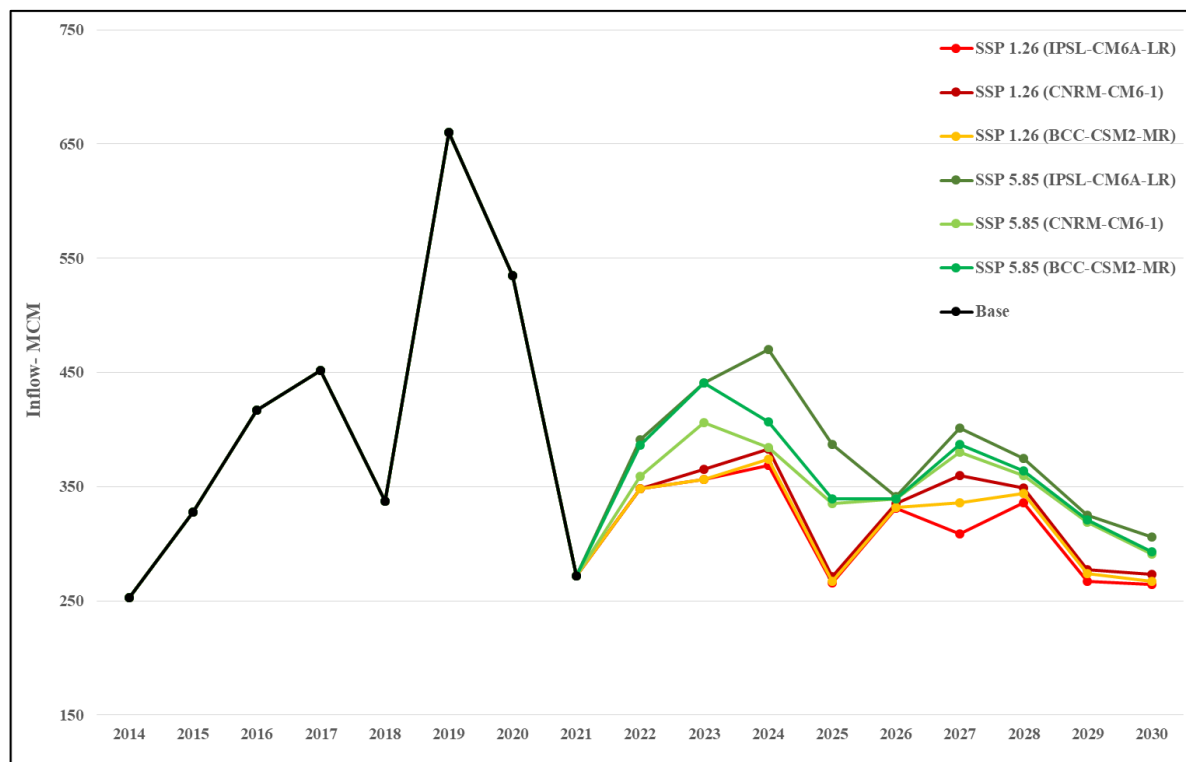


شکل ۵. هیدروگراف آبخوان قزوین تحت شرایط تغییر اقلیم

نتایج به دست آمده حاکی از تناوب بالای عدم قطعیت نتایج محاسباتی بوده که این موضوع با توجه به تغییرات بارش و دما از مدل‌های اقلیمی و همچنین نوسانات تغییر الگوی کشت با توجه به بالا بودن سطح اراضی گندم و جو به دلیل پایین تر بودن میزان نیاز آبی به دست آمده است. از طرفی نیز بررسی عدم قطعیت نتایج نشان داد که میزان نوسانات در سناریوهای SSP 585 نسبت به سناریوهای SSP 126 بیشتر است.

پیش‌بینی جریان ورودی به سد طالقان تحت شرایط تغییر اقلیم

به منظور شبیه‌سازی جریان ورودی به سد طالقان با توجه به مطالعات انجام شده و متغیرهای تعریف شده به عنوان ورودی به مدل هوش مصنوعی، شبیه‌سازی برای دوره آتی با در نظر گرفتن دو سناریو و ۳ مدل اقلیمی ارائه گردید. نتایج ارائه شده تا سال ۲۰۳۰ حاکی از کاهش جریان ورودی به سد طالقان بوده و قطعاً میزان پتانسیل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی با عدم قطعیت مواجه می‌شود. نتایج ارائه شده نشان داد که متوسط آبدهی ورودی به سد طالقان تا سال ۲۰۳۰ بین ۳۱۶ تا ۳۸۲ میلیون متر مکعب خواهد بود که بیشترین میزان ورودی مربوط به سناریوی SSP 126 در مدل IPSL-CM6A-LR و کمترین میزان مربوط به سناریوی SSP 585 در مدل IPSL-CM6A-LR است. مقادیر متوسط پیش‌بینی شده در مقابل متوسط آبدهی ورودی به سد در دوره ۱۰ ساله منتهی به ۲۰۲۱ برابر با ۴۱۰ میلیون متر مکعب، ۲۰ ساله برابر با ۴۸۰ میلیون متر مکعب حاکی از روند کاهشی جریان را نشان می‌دهد. در شکل ۶، سری زمانی آبدهی ورودی به سد طالقان براساس مدل‌های پیش‌بینی شده ارائه شده است.



شکل ۶. سری زمانی جریان ورودی به سد طالقان تحت شرایط تغییر اقلیم

نتایج به‌دست‌آمده از میزان ورودی به سد طالقان حاکی از کاهش جریان ورودی نسبت به دوره کوتاه‌مدت و بلندمدت است که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی ایجاد شده است. این موضوع با توجه به روند کاهشی بارش و افزایش دما کاملاً همخوانی دارد (مقدم و همکاران، ۱۴۰۴).

بحث

ارزیابی شرایط تغییر اقلیم نشان داد که متوسط آب‌دهی ورودی به سد طالقان به‌عنوان یک منبع تکمیلی در شبکه آبیاری قزوین قطعاً با چالش همراه بوده و این موضوع با توجه به افزایش جمعیت، خط انتقال شرب تهران و توسعه، نیازمند مدیریت است. از طرفی نیز رفتار بهره‌برداری از آبخوان با توجه به حجم بالای تخلیه از چاه، چشمه و قنوات نیز حاکی از افت شدید تراز آبخوان و کسری مخزن است که این موضوع در شرایط تغییر اقلیم در دوره منتهی به سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد داشت. تلفیق نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با کاهش جریان ورودی به سد طالقان، قطعاً حجم آب انتقالی به شبکه آبیاری قزوین روند کاهشی داشته و توسعه بدون برنامه‌ریزی‌شده در این محدوده با چالش تأمین آب همراه خواهد بود. ارزیابی کمی منابع آب دشت قزوین با توجه به بیلان محدوده قطعاً در دوره ۵ ساله آتی با کسری آبخوان بیش از ۴۰۰ میلیون متر مکعب مواجه خواهد شد. مدیریت و تدوین سیستم مناسب برای حکمرانی در این محدوده با توجه به کارایی شبکه آبیاری قزوین، مهم‌ترین رویکرد مدیریتی در این محدوده است.

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های متولیان آب در شرایط فعلی که با تنش آبی و عدم برنامه‌ریزی مواجه‌اند، برنامه‌ریزی و تدوین سیاست مناسب بهره‌برداری مبتنی بر حکمرانی خوب است. بررسی ابعاد یک حکمرانی مناسب بیانگر چندوجهی بودن نهادهای درگیر در سیاست‌گذاری مبتنی بر تعاملات است که باید به‌صورت شفاف و دقیق ارزیابی گردد. بر این اساس، در این مطالعه دشت قزوین به‌عنوان یک قطب کشاورزی و پتانسیل توسعه از نظر ظرفیت منابع آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه مبتنی بر استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی در ارزیابی و شبیه‌سازی کمی منابع آب سطحی و زیرزمینی آنالیز گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که

بخشی از جریان انتقالی از طریق سد طالقان به این محدوده با توجه به تغییر اقلیم روند کاهشی را در تخصیص خواهد داشت و از طرفی نیز عدم الگوی حکمرانی در بهره‌برداری از شبکه آبیاری این محدوده نیز کسری آبخوان را تداوم خواهد داشت. تلفیق این دو نوع تنش آبی سبب افزایش کسری آبخوان قزوین به بیش از ۴۰۰ میلیون متر مکعب در سال خواهد بود که علاوه بر خشک شدن بخشی از چاه‌های این منطقه، قطعاً فرونشست و چالش کیفیت و آلاینده‌های آب و مشکلات زیست‌محیطی نیز در این منطقه تشدید می‌گردد. لذا مهم‌ترین وجه در مدیریت و سیاست‌گذاری در بهره‌برداری از منابع آب این محدوده باید در حکمرانی مناسب آب در این منطقه مبتنی بر نهادهای وزارت نیرو و جهاد کشاورزی از یک طرف و صنعت و محیط‌زیست از طرف دیگر انجام گیرد. نهادهای درگیر با ایجاد پتانسیل استعدادپذیری و محیط‌شناسی برنامه‌های کشاورزی را به طرف صنعت و افزایش بهره‌وری سوق دهد. رویکردهای کلان تعریف‌شده در بعد حکمرانی می‌تواند در احیای آبخوان و امر معاش ذی‌نفعان این محدوده با حداقل تنش همراه باشد.

References

- Abed, W. N. (2023). Solving Probabilistic Optimal Power Flow with Renewable Energy Sources in Distribution Networks Using Fire Hawk Optimizer. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, No. 6, 100370.
- Akbari Osmavandani, S., Sharafati, A., Kardan Moghaddam, H. (2024). Assessing the Effectiveness of Artificial Intelligence Models in Predicting Zayanderud Dam Inflow at Different Time Scales. *Acta Geophysica*, 72(5), 3511–27. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11600-023-01257-4> (April 29, 2025).
- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), 11-24. doi: 10.22034/iwrj.2022.11204 [In persian].
- Asaadi, M., Khalilian, S., & Mousavi, S. (2019). Management of Irrigation Water Allocation and Cropping Pattern with emphasis on Deficit Irrigation Strategy (Case study: Qazvin Irrigation Network). *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 1-14 [In persian].
- Azizi, M., Talatahari, S., & Gandomi, A.H., (2023). Fire Hawk Optimizer: A Novel Metaheuristic Algorithm. *Artificial Intelligence Review*, 56(1), 287–363. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-022-10173-w> (April 29, 2025).
- Duc, N. H., et al. (2024). A Systematic Review of Water Governance in Asian Countries: Challenges, Frameworks, and Pathways Toward Sustainable Development Goals. *Earth Systems and Environment* 2024 8:2, 8(2), 181–205. <https://link.springer.com/article/10.1007/s41748-024-00385-1> (April 29, 2025).
- Harifi, S., Khalilian, M., Mohammadzadeh, J., & Ebrahimnejad, S. (2019). Emperor Penguins Colony: A New Metaheuristic Algorithm for Optimization. *Evolutionary Intelligence*, 12(2), 211–26. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12065-019-00212-x> (April 29, 2025).
- Mirdashtvan, M., Najafinejad, A., Malekian, A., & Sa'doddin, A. (2021). Sustainable Water Supply and Demand Management in Semi-Arid Regions: Optimizing Water Resources Allocation Based on RCPs Scenarios. *Water Resources Management*, 35(15), 5307–24. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-021-03004-0> (April 29, 2025).
- Moghaddam, H. K., Abtahizadeh, E., & Abolfathi, S. (2025). Sustainable water allocation under climate change: Deep learning approaches to predict drinking water shortages. *Journal of Environmental Management*, No. 385, 125600.
- Mudhsh, M., et al. (2023). Modelling of Thermo-Hydraulic Behavior of a Helical Heat Exchanger Using Machine Learning Model and Fire Hawk Optimizer. *Case Studies in Thermal Engineering*, No. 49, 103294.
- Nazari, B., Liaghat, A., & Parsinejad, M. (2021). Investigation of Irrigation Systems Development, Cropping Pattern Scenarios, and Deficit Irrigation on Water Productivity in Qazvin Irrigation Network by Systems Dynamics. *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(4), 93-108. doi: 10.22055/jise.2020.28076.1819 [In persian]
- Noorbeh, P., Roozbahani, A., & Kardan Moghaddam, H. (2020). Annual and Monthly Dam Inflow Prediction Using Bayesian Networks. *Water Resources Management*, 34(9), 2933–51.
- Pahl-Wostl, C. (2015). Water Governance in the Face of Global Change: From Understanding to Transformation. *Water Governance in the Face of Global Change: From Understanding to Transformation*, 1–287.
- Pazireh, H., Nazari, B., & Sotoodehnia, A. (2023). Evaluation of Water Productivity Improvement Strategies in Upstream and Downstream Regions of Qazvin Irrigation Network. *Water and Irrigation Management*, 13(1), 141-156. doi: 10.22059/jwim.2022.342528.987 [In persian]
- Tortajada, C., & Biswas, A. (2013). Future Water Governance: Problems and Perspectives: 1–11. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315874722-1/future-water-governance-problems-perspectives-asit-biswas-cecilia-tortajada> (April 29, 2025).
- Woodhouse, P., & Muller, M. (2017). Water Governance—An Historical Perspective on Current Debates. *World Development*, No. 92, 225–41.