



Forecasting runoff using statistical methods, artificial intelligence, and meteorological models (case study: Amirkabir Dam)

Samaneh Poormohammadi^{1*} , Sedigheh Anvari² 

¹ Ph.D., Technical Expert of Iran Water and Power Company, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract

Introduction

The runoff generation in a watershed is mainly influenced by the hydrological, geomorphological, and climatic conditions of the region. Regarding rainfall-runoff models, the problem becomes very complicated due to the non-linear response of the watershed to the rain event. Prediction of daily river flow is one of the most important hydrological issues, which is very important for flood management. River flow rates can be estimated by several methods, each of which has strengths and weaknesses. Regarding rainfall-runoff models, the problem becomes very complicated due to the non-linear reaction of a watershed to the rain event. In addition, due to the spatial changes of precipitation in an area, this complexity increases. In this research, the rainfall and runoff model is analyzed with the help of statistical methods and multivariate regression. The purpose of this study predict the inflow to Amirkabir Dam using multivariate regression methods and artificial intelligence (AI) methods, including the network model. It is an artificial neural network (ANN).

Materials and Methods

To investigate the relationship between rainfall and runoff and to estimate the water entering the dam due to the rainfall upstream of the watershed, the rainfall of all the stations of the watershed upstream was received. The 7-year statistics of Karaj river flow (2016-2022) were used. After checking the rainfall data of the upstream stations, the homogeneity of the data was checked and the stations that had a suitable correlation in terms of climate were selected. At this stage, stations with appropriate conditions were selected by using factor analysis between upstream precipitation and runoff and water entering the dam downstream of the watershed. Then, to more properly analyze the relationship between rainfall and runoff, two-day and three-day cumulative rainfall at the selected stations was calculated. Then, the relationship between rainfall and runoff to the dam was investigated using statistical methods of multivariable regression and artificial intelligence. To get more accurate results, different seasons of the year were divided and the relationship between rainfall and runoff entering the dam in different seasons was investigated. Error statistics were calculated for calibration and verification during the test and training period. Finally, the final analysis of the data and the prediction of the runoff entering the dam was estimated using the upstream rainfall.

Results and Discussion

Determining the effective stations in the runoff generation entering the dam as well as the delay time of their precipitation was achieved using multivariable regression and four stations of Nesa, Sira, Shahrstanak, and Amirkabir Dam., the model of the volume of inflow to the dam, and precipitation in the catchment area of Amirkabir Dam. The coefficient of determination (R^2) of the calibrated model was calculated as 76%, which is an acceptable coefficient in the relationship between precipitation and runoff. Based on the calibration and validation models of rainfall-runoff evaluation of rainfall forecasting models in July 2022, good rains are predicted for the watershed of Amir Kabir Dam. The rain system entered the country on July 28th and 29th and until July 31th it had relatively good coverage in the whole country, and on August 1st and 2nd this system weakened and only operates in limited parts of the country such as the Amir Kabir watershed. The results of evaluating the performance of the models with indicators such as coefficient of explanation (R^2), mean absolute value of error (MAE), and root mean square error (RMSE) showed that the ANN model in both calibration (training)



and validation (testing) stages) has performed better than the multivariate regression model. The accuracy indices of the model for the ANN model training stage were equal to $R^2=0.77$ and $RMSE=0.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while these indices for the testing stage were equal to $R^2=0.87$ and $RMSE=0.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. It indicates the better performance of the ANN model.

Conclusion

The research results of this article showed that due to the presence of 5 rain gauge stations in the catchment area of Amir Kabir Dam, all the stations can not have the same effect on the water entering the dam. Using the cluster method, the effect of all the stations on the inflow to Amirkabir Dam was investigated and suitable rain gauge stations were selected. Also, the results showed that the relationship between the rainfall of the watershed and the runoff entering the Amirkabir dam is different in different seasons and it has the highest correlation in the winter season because it is less affected by other factors affecting the runoff of the basin, including water from melting snow or thunderstorms. One of the other results of this study was that the calibrated and validated model had a slightly higher yield in the three seasons of winter, spring, and autumn, and a slightly lower yield in the autumn season.

Keywords: Flow forecasting, Neural network, Regression models, Amirkabir Dam

Article Type: Case study

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the University of Iran Water and Power Company for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article. If there is a conflict of interest, please state it in this section.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Samaneh Poormohammadi: Writing-original draft preparation; **Sedigheh Anvari:** Resources, Software, Manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: s.poormohammadi@gmail.com

Citation: Poormohammadi, S., & Anvari, S. (2024). Forecasting runoff using statistical methods, artificial intelligence, and meteorological models (Case study: Amirkabir Dam). *Water and Soil Management and Modeling*, 4(2), 105-120. DOI:10.22098/mmws.2023.12217.1210

Received: 04 January 2023, Received in revised form: 08 April 2023, Accepted: 08 April 2023, Published online: 08 April 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 2, pp. 105-120

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پیش بینی رواناب به کمک روش های آماری، هوش مصنوعی و مدل های هواشناسی (مطالعه موردی: سد امیرکبیر)

سمانه پورمحمدی^{۱*}، صدیقه انوری^۲

^۱ دکتری، کارشناس فنی شرکت آب و نیروی ایران، تهران، ایران
^۲ استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

پیش بینی جریان رودخانه یکی از مهم ترین مسائل هیدرولوژیکی است که برای مدیریت سیلاب بسیار مهم است. مقادیر دبی عبوری رودخانه را می توان از روش های متعددی برآورد نمود که هر یک از روش ها دارای نقاط ضعف و قوتی هستند. در خصوص مدل های بارش-رواناب به دلیل عکس العمل غیرخطی یک حوزه آبخیز به رویداد باران مسأله بسیار پیچیده می شود. علاوه بر این به دلیل تغییرات مکانی بارش در یک حوزه آبخیز این پیچیدگی بیش تر نیز می شود. در این پژوهش به بررسی مدل بارش-رواناب به کمک روش های آماری و رگرسیون چندمتغیره پرداخته شد. هدف پژوهش حاضر، پیش بینی جریان ورودی به سد امیرکبیر با استفاده از روش های رگرسیون چندمتغیره و روش های هوش مصنوعی (AI) شامل مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) است. بدین منظور از آمار هفت ساله جریان رودخانه کرج (۱۳۹۵-۱۴۰۱) به صورت روزانه استفاده شد. در همین راستا، تقسیم بندی داده های بارش در فصول مختلف سال صورت گرفت و به منظور بررسی ایستگاه های باران سنج مناسب از روش تحلیل خوشه ای استفاده شد تا ایستگاه های مناسب به منظور ورود به مدل انتخاب شود. لازم به ذکر است تلفیق روش های آماری و مدل شبکه عصبی با مدل های پیش بینی هواشناسی از نوآوری های پژوهش حاضر است. نتایج ارزیابی عملکرد مدل ها با شاخص هایی هم چون ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، نشان داد که مدل ANN در هر دو مرحله واسنجی (آموزش) و صحت سنجی (آزمایش) عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون چندمتغیره داشته است. شاخص های دقت مدل برای مرحله آموزش مدل ANN برابر $R^2=0/77$ و $RMSE=0/27$ مترمکعب بر ثانیه بوده است. در حالی که این شاخص ها برای مرحله آزمایش برابر با $R^2=0/87$ و $RMSE=0/46$ مترمکعب بر ثانیه است که حاکی از عملکرد بهتر مدل ANN بوده است. نتایج نشان داد که مدل واسنجی شده به منظور پیش بینی رواناب با استفاده از مدل های هواشناسی کاربردی بوده و دقت قابل قبولی دارد.

واژه های کلیدی: پیش بینی جریان، شبکه عصبی مصنوعی، مدل های رگرسیون، سد امیرکبیر

نوع مقاله: مطالعه موردی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: spoor Mohammadi@gmail.com

استناد: پورمحمدی، سمانه، و انوری، صدیقه (۱۴۰۳). پیش بینی رواناب به کمک روش های آماری، هوش مصنوعی و مدل های هواشناسی (مطالعه موردی: سد امیرکبیر). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۱۰۵-۱۲۰.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12217.1210

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۱۰۵ تا ۱۲۰

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

تشکیل رواناب در یک حوزه آبخیز عمدتاً تحت تأثیر شرایط هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژی و اقلیمی منطقه است. میزان بارش و توزیع آن، پوشش گیاهی، خصوصیات فرآیند تجمع و ذوب برف، لایه خاک و تشکیلات زمین‌شناسی از عمده عواملی هستند که میزان رواناب و مؤلفه‌های بیلان آب حوزه آبخیز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در خصوص مدل‌های بارش-رواناب به دلیل عکس‌العمل غیرخطی حوزه آبخیز به رویداد باران، مسأله بسیار پیچیده می‌شود. علاوه بر این به دلیل تغییرات مکانی بارش در حوزه آبخیز این پیچیدگی بیش‌تر می‌شود. بنابراین تعیین رابطه بارش در بالادست و تبدیل آن به رواناب از اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آب حوزه‌های آبخیز برخوردار است (Moghaddasi et al., 2022; Anvari et al., 2023).

روش‌های آماری و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۱ یک تکنیک قابل انعطاف با ساختار ریاضی است که بدون توجه به ماهیت فیزیکی پدیده‌های طبیعی، روابط پیچیده غیرخطی بین داده‌های ورودی و خروجی را تشخیص می‌دهد. روش‌های مدل‌سازی جریان رودخانه در حالت کلی به دو دسته مدل‌های مفهومی^۲ (بر مبنای روش‌های آماری) و مدل‌های داده محور^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های مفهومی که عموماً به صورت مدل‌های رگرسیونی، مدل‌های سری زمانی شامل AR^۴، ARMA^۵، ARIMA^۵، مدل نزدیک‌ترین همسایگی^۶ (K-NN) هستند قادر به شبیه‌سازی جریان رودخانه می‌باشند. در این مدل‌ها، متغیرهای وابسته به زمان باید دارای سری‌های زمانی کامل و جامعی باشند تا نتایج پیش‌بینی در سطح قابل اعتمادی باقی بماند. بر این اساس، عملکرد مدل‌های سری زمانی دارای پتانسیل پایینی برای پیش‌بینی جریان است مخصوصاً هنگامی که اطلاعات سری زمانی جریان رودخانه ناقص باشند. با ظهور مدل‌های هوش مصنوعی داده‌محور، طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های هوش مصنوعی^۸ (AI) برای پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها استفاده شد (Saghafian et al., 2013; Azarpira, 2022; and Shahabi, 2021).

در پژوهشی، (Xiang et al. (2020) یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر LSTM و ساختار seq2seq برای تخمین بارندگی-رواناب ساعتی ارائه کردند. با تمرکز بر دو حوزه آبخیز غرب میانه

در آبوا، نتایج نشان می‌دهد که مدل LSTM-seq2seq در تمامی ایستگاه‌های این دو حوزه آبخیز از رگرسیون خطی، رگرسیون کمند، رگرسیون ریح، رگرسیون بردار پشتیبان، رگرسیون فرآیندهای گاوسی و LSTM بهتر عمل می‌کند. در پژوهش دیگری که توسط Poormohammadi and Javadianzadeh (2018) صورت گرفت شبیه‌سازی جریان خروجی از حوزه آبخیز تفت-دهشیر به کمک ANN، GA و مدل پیوسته EC-HMS بود. در این پژوهش با در نظر گرفتن سناریوهای افزایش بارش توسط فناوری باروری ابرها اثر این سناریو در افزایش رواناب خروجی از حوزه آبخیز بررسی شد. در نهایت مدل ANN توانست با دقت بالاتری رواناب خروجی حوزه آبخیز را برآورد کند. همچنین، باروری ابرها نقش به‌سزایی در افزایش رواناب خروجی از حوزه آبخیز داشته است. در پژوهش Rezai Haruni et al. (2021) کارایی مدل IHACRES به منظور شبیه‌سازی رواناب خروجی از حوزه آبخیز بررسی شد. با استفاده از این مدل، رواناب حوزه آبخیز بهشت‌آباد برای یک سال نرمال شبیه‌سازی شد. دو سناریوی افزایش ده درصد بارش برای ماه فوریه و شش ماه سال (فوریه، ژانویه، دسامبر، مارس، نوامبر و آوریل) (نسبت به یک سال متوسط) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ده درصدی بارش در ماه فوریه ۳/۶ درصد و افزایش ده درصدی بارش در شش ماه مذکور ۱۳/۷ درصد به حجم آورد سالانه رودخانه بهشت‌آباد اضافه می‌کند. در حوضه رودخانه گاماسیاب نیز به مدل‌سازی جریان پرداخته شده است. در این پژوهش از مدل‌های AI شامل، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) از نوع پرسپترون چندلایه^۹ (MLP)، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF) و مدل حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) استفاده شده است. علاوه بر این برای ارزیابی بهتر مدل‌های AI از مدل تخصصی نیمه مفهومی بارش-رواناب (IHACRES) بهره گرفته شد. نتایج برای منطقه مورد مطالعه، حاکی از عملکرد بهتر مدل‌های ANN، RBF و LSTM به‌ویژه در نقاط اوج جریان نسبت به IHACRES است. در مجموع مدل‌های AI، ابزار مفیدی برای مدل‌سازی نوسانات جریان معرفی شدند (Momeneh, 2022).

در ارتباط با اثر بارش‌های سنگین بر سیل نیز Bani Naeimeh et al. (2023) پژوهشی در حوزه آبخیز دز انجام دادند و به بررسی بارش‌های سنگین ۳۰ ساله اخیر بر سیلاب‌های رخ داده پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که سامانه مؤثر در ایجاد بارش‌های فوق سنگین سامانه کم‌فشار سودان بوده است. در پژوهش دیگری که توسط Mirzania et al. (2021)

¹ Artificial neural network

² Conceptual models

³ Data driven models

⁴ Auto-regressive

⁵ Auto regressive moving average

⁶ Auto regressive moving integrated average

⁷ K-Nearest neighborhood

⁸ Artificial intelligence

⁹ Multilayer perceptron

تلفیق روش‌های آماری و مدل‌های هواشناسی رویکرد جدیدی است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سد امیرکبیر بر رودخانه کرج در ۲۵ کیلومتری شمال شهر کرج به‌عنوان اولین سد چندمنظوره ایران محسوب می‌شود. حجم آب ذخیره شده در پشت این سد، علاوه بر تولید انرژی برقی و تأمین بخشی از آب آشامیدنی شهر تهران، دریاچه‌ای پدید آورده که از مراکز طبیعی مهم پرورش ماهی بوده و نیز موجب استفاده‌های گردشگری و تفریحی از سد کرج شده است. شکل ۱ نقشه حوزه آبخیز بالادست سد امیرکبیر و پراکنش ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در آن را نشان می‌دهد. مطابق این شکل پنج ایستگاه نساء، سیرا، شهرستانک، مورود و سد امیرکبیر در حوزه آبخیز سد واقع شده‌اند. در سال‌های اخیر بر اثر تغییرات اقلیمی، خشکسالی هواشناسی و رفتارهای انسانی دچار کمبود چشم‌گیر حجم آب شده است. ذخیره آب سد کرج از ۱۶۱ میلیون مترمکعب در سال گذشته به ۸۴ میلیون مترمکعب کاهش یافت (<https://www.wrm.ir>). مشخصات ایستگاه‌های مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. سه ایستگاه نساء، سیرا و امیرکبیر جزء ایستگاه‌های مبنای شرکت مدیریت منابع آب است و ایستگاه‌های مورود و شهرستانک که هر دو از نوع ایستگاه‌های باران‌سنجی است مبنای نیستند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه باران‌سنج حوزه آبخیز امیرکبیر

Table 1- Characteristics of the rain station in Amirkabir watershed

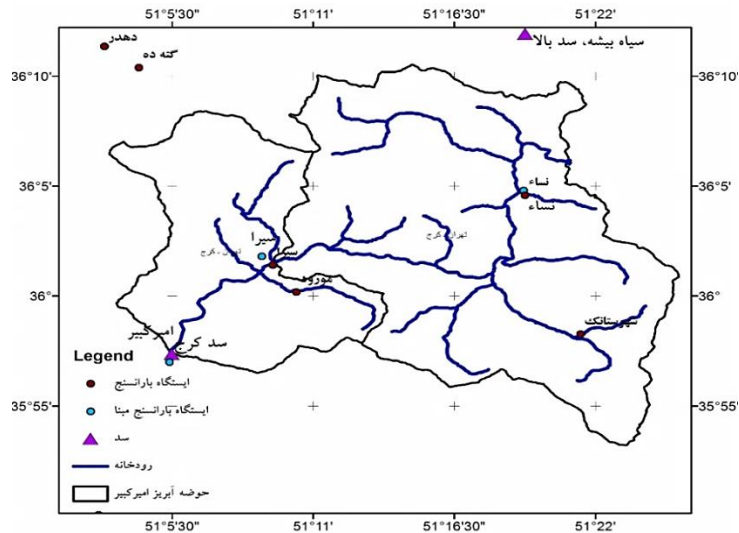
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)
سیرا	بارانسنج (مینا)	1790
نساء	بارانسنج (مینا)	2193
سد امیرکبیر	بارانسنج (مینا)	2202
مورود	بارانسنج	2150
شهرستانک	بارانسنج	1613

صورت گرفت فرآیند بارش-رواناب در حوضه صوفی‌چای با استفاده از مدل‌های ANN و هیبرید موجک-شبکه عصبی (WANN)^۱ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد بهترین ورودی برای این مدل‌ها، مربوط به سناریوی پنج بوده که در آن از دبی با یک تأخیر، بارش ماه مورد نظر و بارش با یک تأخیر استفاده شده است. در حالت کلی نتایج حاکی از دقت قابل‌قبول هر دو مدل است. از لحاظ اولویت نیز مدل WANN با بیش‌ترین دقت ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) به ترتیب برابر ۰/۹۷، ۰/۲۳/۹۹ و ۰/۹۵ برای مرحله آموزش و ۰/۸۲، ۰/۶۲/۳۳ و ۰/۶۸ برای مرحله آزمون کم‌ترین خطا در اولویت اول و مدل ANN در اولویت بعدی با مقادیر ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۰/۴۱ و ۰/۸۷ برای بخش آموزش و ۰/۸۱ و ۰/۷۳/۴۰ و ۰/۵۶ برای بخش آزمون قرار گرفتند. نتایج گویای این بود که موجک باعث بهبود نتایج پیش‌بینی در مدل‌سازی بارش-رواناب شده است. همچنین، MahdiNasab et al. (2015) جهت انجام مدل‌سازی بارش-رواناب و نیز برآورد احتمال وقوع سیل، از داده‌های ۱۴ رگبار با آب نمود لحظه‌ای طی دوره آماری ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۹ (زیرحوزه آبخیز پلدختر) استفاده کردند. نتایج نشان داد که از میان انواع روش‌های رگرسیون یک متغیره، روش‌های خطی، مرکب و توانی دارای بیش‌ترین ضریب تبیین برای مدل‌سازی بارش-رواناب هستند. نتایج روش سری‌های جزئی نشان داد که هر سال به احتمال ۹۹/۹۹ درصد سیلی با میزان دبی ۶۰۶/۳۲ مترمکعب به‌وقوع می‌پیوندد. در نهایت، Saghafian et al. (2013) با استفاده از مدل‌های ANN، ANFIS^۲ و K-NN جریان یک تا سه ماه بعد رودخانه کارون (ایستگاه پل شالو) را پیش‌بینی نموده و تأثیر داده‌های توزیع مکانی اقلیمی بر دقت نتایج پیش‌بینی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های مکانی به‌جای داده‌های ایستگاهی، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده است.

با توجه به ضرورت پیش‌بینی دقیق جریان روخانه و اهمیت آن در مدیریت منابع آب کشور، پژوهش حاضر در تلاش است تا با تحلیل مقادیر بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز سد امیرکبیر و انتخاب ورودی‌های مؤثر، با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی و ANN جریان ورودی به سد امیرکبیر را پیش‌بینی نماید. همان‌گونه که در بالا اشاره شد با توجه به اهمیت سد امیرکبیر به‌عنوان تأمین‌کننده آب شرب مردم تهران و کرج، به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. لازم به ذکر است که

¹ Wavelet based artificial neural networks

² Adaptive neuro fuzzy inference system



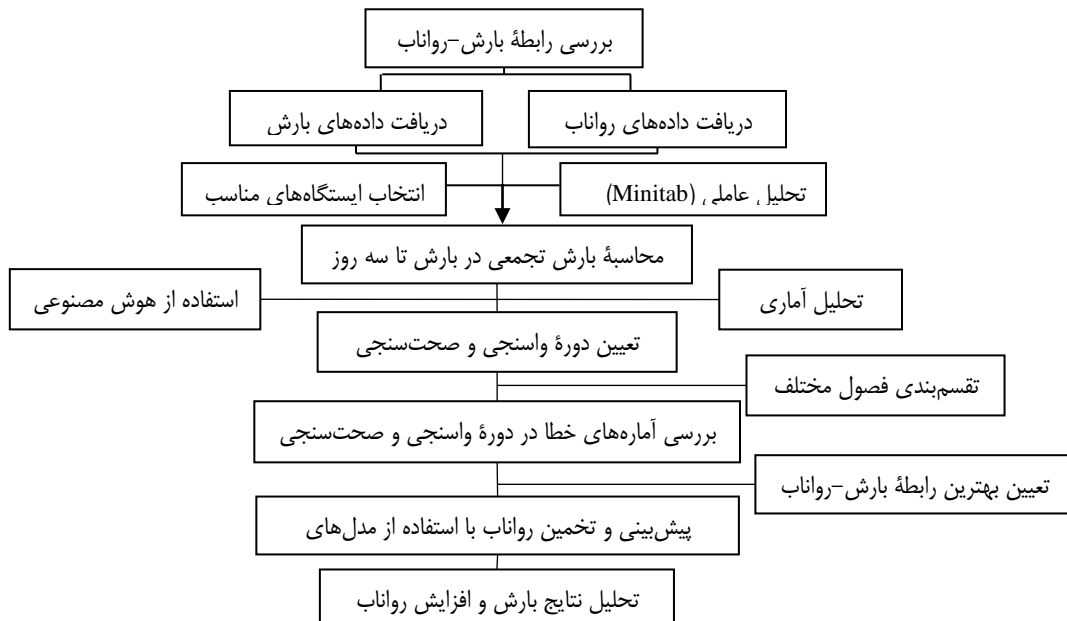
شکل ۱- نقشه حوزه آبخیز و پراکنش ایستگاه‌های بالادست سد امیرکبیر

Figure 1- Map of the watershed and distribution of stations upstream of Amirkabir Dam

آماري رگرسيون چندمتغیره و ANN برای پیش‌بینی جریان ورودی به سد استفاده شد. به‌منظور دریافت نتایج دقیق‌تر تقسیم‌بندی فصول مختلف سال صورت گرفت و رابطه بارش-رواناب ورودی به سد در فصول مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آماره‌های خطا (میانگین مربعات، میانگین خطای مطلق) به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی در دوره آزمون و آموزش محاسبه شد. در نهایت تحلیل نهایی داده‌ها و پیش‌بینی رواناب ورودی به سد با استفاده از بارش بالادست تخمین زده شد. در شکل ۲ نمودار جریانی مراحل انجام پژوهش نشان داده شده است.

۲-۲- روش پژوهش

به‌منظور بررسی رابطه بارش-رواناب و تخمین آب ورودی به سد ناشی از بارش بالادست حوزه آبخیز، بارش تمامی ایستگاه‌های حوزه آبخیز در بالادست از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی، همگنی داده‌ها بررسی و ایستگاه‌هایی که از نظر اقلیمی، همبستگی مناسب داشتند انتخاب شدند. در این مرحله با استفاده از تحلیل خوشه‌ای بین بارش بالادست و رواناب ورودی به سد در پایین‌دست حوزه آبخیز، ایستگاه‌ها با شرایط مناسب انتخاب شد. سپس به‌منظور تحلیل مناسب‌تر رابطه بارش-رواناب، بارش تجمعی دو و سه روزه در ایستگاه‌های منتخب محاسبه شد. در ادامه از روش‌های



شکل ۲- نمودار جریانی روش‌شناسی پژوهش

Figure 2- Flow chart of research methodology

خروجی، بستگی به نوع مسأله دارد، ولی تعداد نرون‌های لایه پنهان با سعی و خطا به دست می‌آید (Sajikumar Thandaveswara, 1999; ASCE, 2000; Coulibaly et al., 2000; Alvisi et al., 2006).

۲-۵-۳- مدل هواشناسی GFS

سیستم پیش‌بینی جهانی (GFS) یک سیستم پیش‌بینی عددی آب و هوا است که شامل یک مدل کامپیوتری جهانی و تحلیل تغییرات است که توسط سرویس ملی آب و هوای ایالات متحده (NWS) اجرا می‌شود. این مدل چهار بار در روز اجرا شده و پیش‌بینی‌هایی را تا ۱۶ روز از قبل ارائه می‌کند، اما پس از ۱۰ روز وضوح فضایی کاهش می‌یابد. مهارت پیش‌بینی عموماً با گذشت زمان کاهش می‌یابد (مانند هر مدل عددی پیش‌بینی آب و هوا) و برای پیش‌بینی‌های بلندمدت، تنها مقیاس‌های بزرگ‌تر دقت قابل توجهی را حفظ می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انتخاب ایستگاه‌های مناسب باران‌سنج در منطقه

نتایج تحلیل درختی بین ایستگاه‌های باران‌سنج در منطقه و جریان ورودی به سد در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق این شکل، ایستگاه‌های سیرا، نساء، سد امیرکبیر و شهرستانک با سطح شباهت ۹۲ بیش‌ترین رابطه را با حجم جریان رودی به سد دارند. ایستگاه با سطح شباهت ۷۵ مرتبه بعدی را شامل می‌شود. در ادامه تحلیل فصلی ارتباط بین بارش‌های حوزه آبخیز و حجم آب ورودی به سد امیرکبیر نیز انجام گرفت (جدول ۲). نتایج نشان داد که در فصول پاییز، زمستان و بهار دو ایستگاه سیرا و نساء بیش‌ترین میزان همبستگی را با حجم آب پشت سد داشتند. ایستگاه‌های شهرستانک و سد امیرکبیر نیز مراتب بعدی را شامل می‌شوند. کم‌ترین میزان همبستگی هم متعلق به ایستگاه مورود است که می‌تواند به علت ورود مستقیم باران این دو ایستگاه به سد امیرکبیر و فیزیوگرافی حوزه آبخیز منطقه باشد. به‌عنوان مثال در فصل زمستان، ایستگاه سیرا و نساء با R^2 برابر $0/73$ بیش‌ترین همبستگی را داشته و ایستگاه‌های شهرستانک و سد امیرکبیر به ترتیب با R^2 برابر $0/68$ و $0/58$ در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. لازم به ذکر است ایستگاه مورود که در بررسی شباهت ایستگاه‌های باران‌سنج حوزه آبخیز نیز تشابه کمی با سایر ایستگاه‌ها داشت کم‌ترین میزان $R^2 = 0/19$ را دارد.

۲-۳- واسنجی مدل بارش-رواناب در حوزه آبخیز

به‌منظور واسنجی مدل از داده‌های بارش و حجم آب ورودی به سد طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. در این دوره برای دریافت نتایج بهتر ابتدا داده‌ها جدا از فصول مختلف، به‌طور کامل در کنار هم مورد تحلیل قرار گرفت و از بارش تجمعی دو و سه روزه استفاده شد و در مرحله بعد داده‌ها به سه فصل پاییز، زمستان و بهار تقسیم‌بندی شد و تحلیل‌های لازم صورت گرفت.

۲-۴- صحت‌سنجی مدل

در دوره صحت‌سنجی که از خرداد ۱۴۰۰ تا آخر تیر ۱۴۰۱ است آماره‌های خطا برآورد شده است. در این دوره نیز آماره‌های خطا به‌صورت فصلی و سالانه برآورد شد. به‌منظور دریافت نتایج دقیق‌تر تقسیم‌بندی فصول مختلف سال صورت گرفت و رابطه بارش-رواناب ورودی به سد در فصول مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت تحلیل نهایی داده‌ها و پیش‌بینی رواناب ورودی به سد با استفاده از بارش بالادست تخمین زده شد.

۲-۵- مدل‌های پیش‌بینی حجم آب ورودی به سد

امیرکبیر

۲-۵-۱- مدل رگرسیون چندمتغیره

یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چندمتغیره، تکنیک رگرسیون خطی چندگانه^۱ (MLR) است. بر اساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیر وابسته^۲ با یک یا چند متغیر مستقل^۳ برقرار شد. اگر رابطه خطی بین یک متغیر پاسخ و یک متغیر مستقل برقرار شود، تکنیک رگرسیون را رگرسیون خطی ساده^۴ می‌نامند. ولی در صورت به‌کارگیری چندین متغیر توصیفی یا مستقل در مدل رگرسیونی، روش رگرسیونی را چندگانه^۵ می‌گویند.

۲-۵-۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم پردازش‌گر توزیعی اطلاعات هستند. نحوه کار مدل ANN بدین‌گونه است که پردازش اطلاعات در واحدهایی به‌نام نرون انجام می‌شود. نرون‌ها با اتصالات وزن‌دار به هم وصل می‌شوند. هر نرون مجموع وزنی سیگنال‌های ورودی را با به‌کار بردن یک تبدیل غیرخطی موسوم به تابع تحریک^۶، به سیگنال خروجی تبدیل می‌کند. کاربردی‌ترین نوع ANN، شبکه‌های پیش‌رو سه لایه هستند که تعداد نرون‌های لایه ورودی و

¹ Multiple linear regression

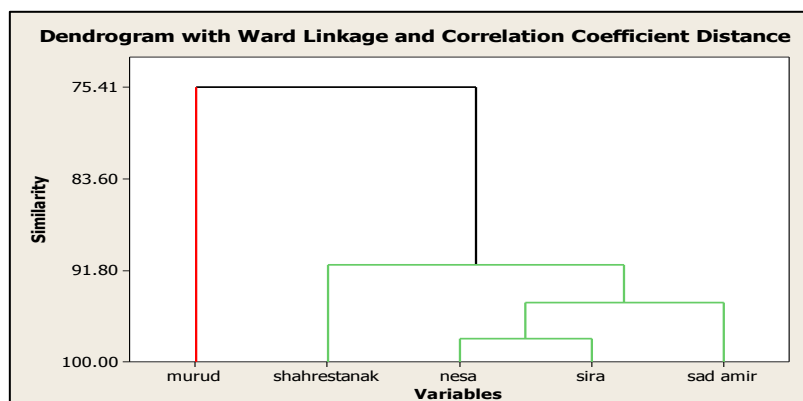
² Dependent variable

³ Independent variables

⁴ Simple linear regression

⁵ Multiple linear regression

⁶ Activation function



شکل ۳- نمودار شباهت ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوزه آبخیز سد امیرکبیر

Figure 3- Similarity diagram of rain gauge stations in the watershed of Amirkabir Dam

جدول ۲- همبستگی بارش ایستگاه‌های باران‌سنج حوزه آبخیز با حجم آب پشت سد امیرکبیر در فصل زمستان، پاییز و بهار

Table 2- Correlation of rain gauge stations in the watershed with the volume of water behind the Amirkabir Dam in winter, autumn, and spring

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	میزان همبستگی زمستان (R^2)	میزان همبستگی پاییز (R^2)	میزان همبستگی بهار (R^2)
سیرا	مینا	0.73	0.54	0.65
نساء	مینا	0.73	0.53	0.75
سد امیرکبیر	بارانسنج	0.58	0.43	0.59
شهرستانک	بارانسنج	0.68	0.31	0.54
مورود	بارانسنج	0.19	0.45	0.63

پس از آن دو ایستگاه شهرستانک با $R^2 = 0.56$ برابر و سپس ایستگاه سد امیرکبیر با $R^2 = 0.59$ برابر قرار دارند. ایستگاه مورود که در بررسی شباهت ایستگاه‌های باران‌سنج حوزه آبخیز نیز تشابه کمی با سایر ایستگاه‌ها داشت، کم‌ترین میزان همبستگی با $R^2 = 0.56$ را دارد.

۳-۲- انتخاب ایستگاه‌های مناسب باران‌سنج در منطقه

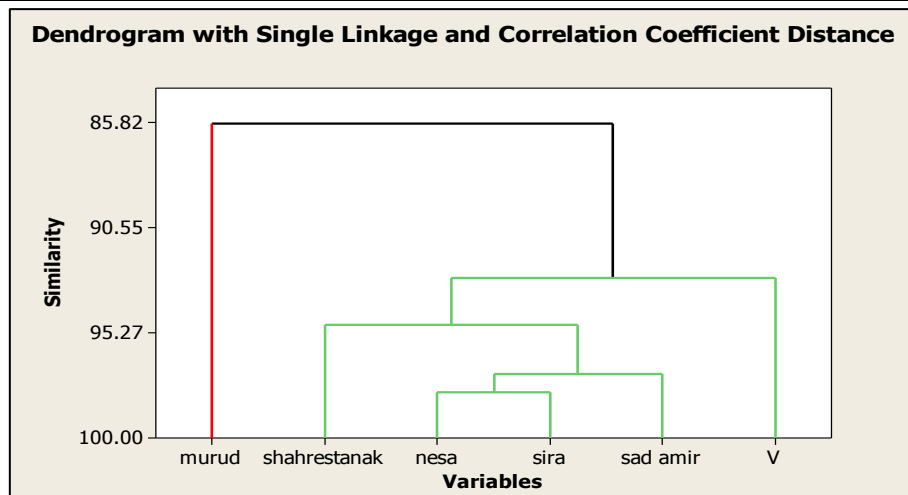
تحلیل شاخه درختی برای بررسی رابطه اولیه ایستگاه‌های باران‌سنج در منطقه و آب ورودی به سد صورت گرفت. همان گونه که شکل ۴ نشان می‌دهد ایستگاه‌های سیرا، نساء، سد امیرکبیر و شهرستانک با سطح شباهت ۹۳ درصد بیش‌ترین رابطه را با حجم دبی رودی به سد دارند و سطح شباهت ایستگاه مورود با حجم آب ورودی به سد امیرکبیر تا ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. البته با توجه به تحلیل‌های قبلی هم انتظار می‌رفت چنین نتیجه‌ای حاصل شود. بنابراین، در دوره واسنجی داده‌های ایستگاه مورود با توجه به تحلیل‌های فصلی و نمودار شاخه درختی در نظر گرفته نشد.

فصل پاییز

ایستگاه‌های سیرا و نساء بیش‌ترین میزان همبستگی را با دبی آب پشت سد داشتند که به ترتیب R^2 برابر ۰/۵۴ و ۰/۵۴۳ است بعد از آن ایستگاه شهرستانک با R^2 برابر ۰/۴۵ و سپس ایستگاه سد امیرکبیر با R^2 برابر ۰/۴۳ است. ایستگاه مورود که در بررسی شباهت ایستگاه‌های باران‌سنج حوزه آبخیز نیز تشابه کمی با سایر ایستگاه‌ها داشت، کم‌ترین میزان همبستگی با $R^2 = 0.31$ را دارا بود. نمودارهای ۱۱ تا ۱۵ همبستگی هر یک از ایستگاه‌های باران‌سنج با حجم آب ورودی به سد امیرکبیر را نشان می‌دهد. علت آن می‌تواند عوامل اقلیمی و فیزیوگرافی حوزه آبخیز باشد چرا که در پاییز زمین خشک است و میزان نفوذپذیری خاک بالاست در نتیجه مقدار بارش بالادست و آب ورودی به سد هم‌خوانی کامل ندارد و البته بارش‌های نامنظم پاییزی و محلی بوده است. ویژگی بارش نیز در این ماه می‌تواند دلیل دیگر همبستگی بین بارش-رواناب ورودی به سد باشد.

فصل بهار

ایستگاه‌های سیرا و نساء بیش‌ترین میزان همبستگی را با دبی آب پشت سد داشتند که به ترتیب R^2 برابر ۰/۶۵ و ۰/۷۵ است.



شکل ۴- نمودار شاخه درختی ارتباط ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز و حجم آب ورودی به سد امیرکبیر (بر مبنای بارش روزانه)
 Figure 4- The tree branch diagram of the relationship between the rain gauge stations of the watershed and the volume of water entering the Amirkabir Dam (based on daily rainfall)

و کم‌ترین مربوط به ایستگاه سد امیرکبیر با مقدار ۰/۵۴ در زمان تأخیر یک روزه است. دلیل رابطه کاهش ایستگاه سد امیرکبیر این است که ایستگاه دقیقاً در مجاورت سد واقع شده است و بارش همان روز تأثیرگذار بر حجم مخزن است و زمان تأخیر آب بارش برای ورود به سد در این ایستگاه وجود ندارد. در جدول ۴ مشخصات واسنجی شامل رابطه بارش-رواناب و آماره‌های خطا و میزان همبستگی ارائه شده است. ضریب تعیین مدل واسنجی شده ۷۶ درصد است که ضریب قابل‌قبولی است.

در جدول ۳ رابطه همبستگی بارش‌های تجمعی حوزه آبخیز و حجم ورودی به سد امیرکبیر ارائه شده است. هدف از این تحلیل، بررسی اثرات زمان تأخیر آب ورودی به سد است. از آن جایی که حوزه آبخیز سد کوچک و فاصله ایستگاه‌ها تا سد کم است (دورترین ایستگاه‌ها به ترتیب نساء و شهرستانک با حدود ۲۴ و ۲۵ کیلومتر فاصله از سد هستند) لذا، تأخیر یک روزه (با میزان تجمعی بارش همان روز و یک روز بعد) بیش‌ترین رابطه با حجم آب ورود به سد را دارد. بیش‌ترین رابطه همبستگی مربوط به ایستگاه سیرا با مقدار ۰/۷۷ در بارش تجمعی یک روزه

جدول ۳- رابطه همبستگی بارش‌های تجمعی حوزه آبخیز و حجم ورودی به سد امیرکبیر

Table 3- Correlation relationship between the cumulative rainfall of the watershed area and the volume of input to the Amirkabir Dam

نام ایستگاه	میزان همبستگی (R ²)	میزان همبستگی-تجمعی یک روزه (R ²)	میزان همبستگی-تجمعی دو روزه (R ²)	میزان همبستگی-تجمعی سه روزه (R ²)
سیرا	0.73	0.77	0.66	0.52
نساء	0.73	0.78	0.69	0.57
سد امیرکبیر	0.58	0.54	0.52	0.47
شهرستانک	0.68	0.70	0.57	0.36

جدول ۴- فرمول واسنجی شده بارش و حجم ورودی به سد امیرکبیر به همراه ضریب تعیین

Table 4- Recalibrated formula of precipitation and input volume to Amirkabir Dam along with determination coefficient

S	R ² (درصد)	Sq (adj) (درصد)	مدل واسنجی شده
0.326522	79.0	76.6	$V = 0.255 + 0.0221 \text{ shahrestanak} + 0.0096 \text{ nesa} + 0.0172 \text{ sira} + 0.0002 \text{ sad amir}$

بارش‌های سیل‌آسا است در واقع بهترین زمان برای تعیین رابطه بارش با رواناب ورودی به فصل زمستان است که دخالت سایر پارامترهای مؤثر بر تولید رواناب از جمله ذوب برف مناطق کوهستانی، بارش‌های تندی و خشکی زیاد خاک کم است و مهم‌ترین عامل ایجاد رواناب بارش در بالادست حوزه آبخیز است. مدل در سه فصل زمستان، بهار و تابستان دارای بیش برآورد و در پاییز دارای مقدار جزئی کم برآورد است. شکل ۶ نمودار باقی‌مانده داده‌های برازش داده شده بارش و دبی ورودی

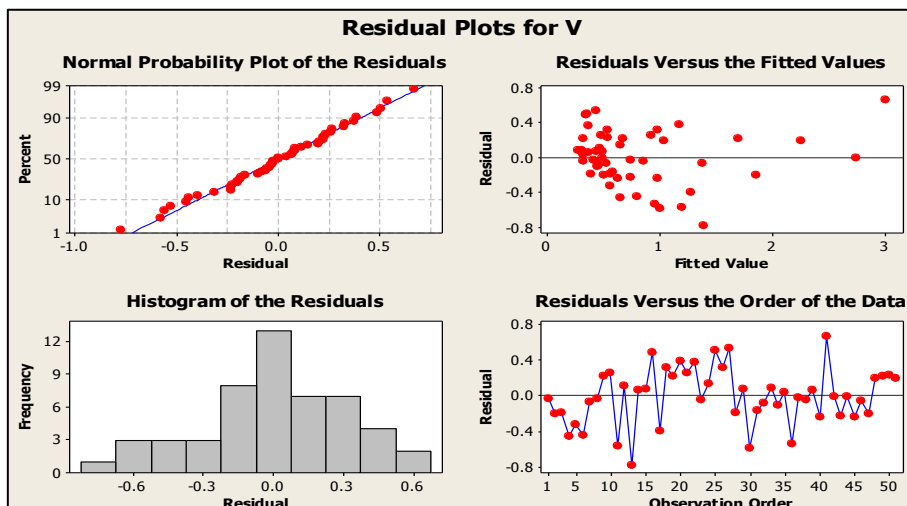
همان‌طور که در جدول ۵ نمایش داده شده است، هر چه آماره خطای میانگین مطلق (MAE) کم‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد به این معنی است مدل کارایی بیش‌تری در آن فصل دارد و دقت بیش‌تری را در برآورد حجم آب پشت سد با استفاده از داده‌های بارش اعمال می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کم‌ترین خطای مدل مربوط به فصل زمستان و بعد از آن پاییز است. دلیل آن هم وجود بارش‌های بیش‌تر در فصل زمستان و کاهش اثرگذاری سایر عوامل از جمله ذوب شدن برف یا وجود

جدول ۵- آماره‌های خطای مدل واسنجی شده با داده‌های تاریخی

Table 5- Error statistics of the calibrated model with historical data

فصل	آماره خطای MAE	بیش برآورد	کم برآورد
زمستان	0.21	0.01	-
بهار	1.8	2.3	-
تابستان	0.54	0.5	-
پاییز	0.37	-	0.08

به سد را نمایش می‌دهد. نمودار باقی‌مانده‌ها نشان از برازش مناسب داده‌های متغیر و وابسته مدل ایجاد شده است. این نمودارها داده‌های برازش شده و داده‌های واقعی را با باقیمانده‌ها مقایسه نموده‌اند.



شکل ۶- نمودار باقی‌مانده داده‌های برازش داده شده
Figure 6- Residual plot of fitted data

۳-۳- صحت‌سنجی مدل

همانند دوره واسنجی سه فصل زمستان، بهار و تابستان مدل دچار بیش برآورد و فصل بهار مقادیر خروجی مدل دارای کم‌برآورد است. رابطه واسنجی شده در دوره تاریخی در دوره آزمون هم بررسی شد و برای کل سال مقدار همبستگی ۰/۶۸ به دست آمد که عدد قابل‌قبولی در رابطه بارش-رواناب است (جدول ۷). خطای میانگین مطلق و میانگین مربعات خطا هم بررسی شد که مقادیر آن به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۱ میلیون مترمکعب است. با توجه به ماهیت بارش و از سوی دیگر پیچیدگی‌های طبیعت در حوزه‌های آبخیز، ارتباط بین بارش-رواناب در حوزه آبخیز امیرکبیر به خوبی برآورد شده است.

در دوره صحت‌سنجی که از خرداد ۱۴۰۰ تا آخر تیر ۱۴۰۱ است نتایج آماره‌های خطا در جدول ۶ برآورد شده است. در این دوره نیز آماره‌های خطا به صورت فصلی و سالانه برآورد شد. در دوره صحت‌سنجی نیز مانند دوره واسنجی مدل برای فصل زمستان کم‌ترین میزان آماره خطا را با عدد ۰/۲۱ میلیون مترمکعب دارد و بعد از آن فصل پاییز با مقدار ۰/۳۷ میلیون مترمکعب است. بیش‌ترین خطا مانند مدل واسنجی شده در فصل بهار و با مقدار ۱/۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است. تحلیل علمی هم منطقی به نظر می‌رسد چرا که در فصل بهار علاوه بر ابرهای کومولس که ایجاد بارش‌های رگباری می‌کنند ذوب شدن برف زمستانه هم به علت گرم شدن هوا وجود دارد که هر دو منابع اثرگذار بر ایجاد رواناب و آب ورودی به سد هستند. بنابراین، تأثیر بارش مستقیم بر رواناب ورودی به سد را کم رنگ‌تر می‌کنند.

جدول ۷- مقدار همبستگی و آماره‌های خطای کل سال در دوره آزمون

Table 7- Correlation value and error statistics of the whole year in the test period

زمان	R ²	MAE	RMSE
کل سال	0.68	0.46	0.1

جدول ۶- آماره‌های خطای مدل با داده‌های آزمون

Table 6 - Model error statistics with test data

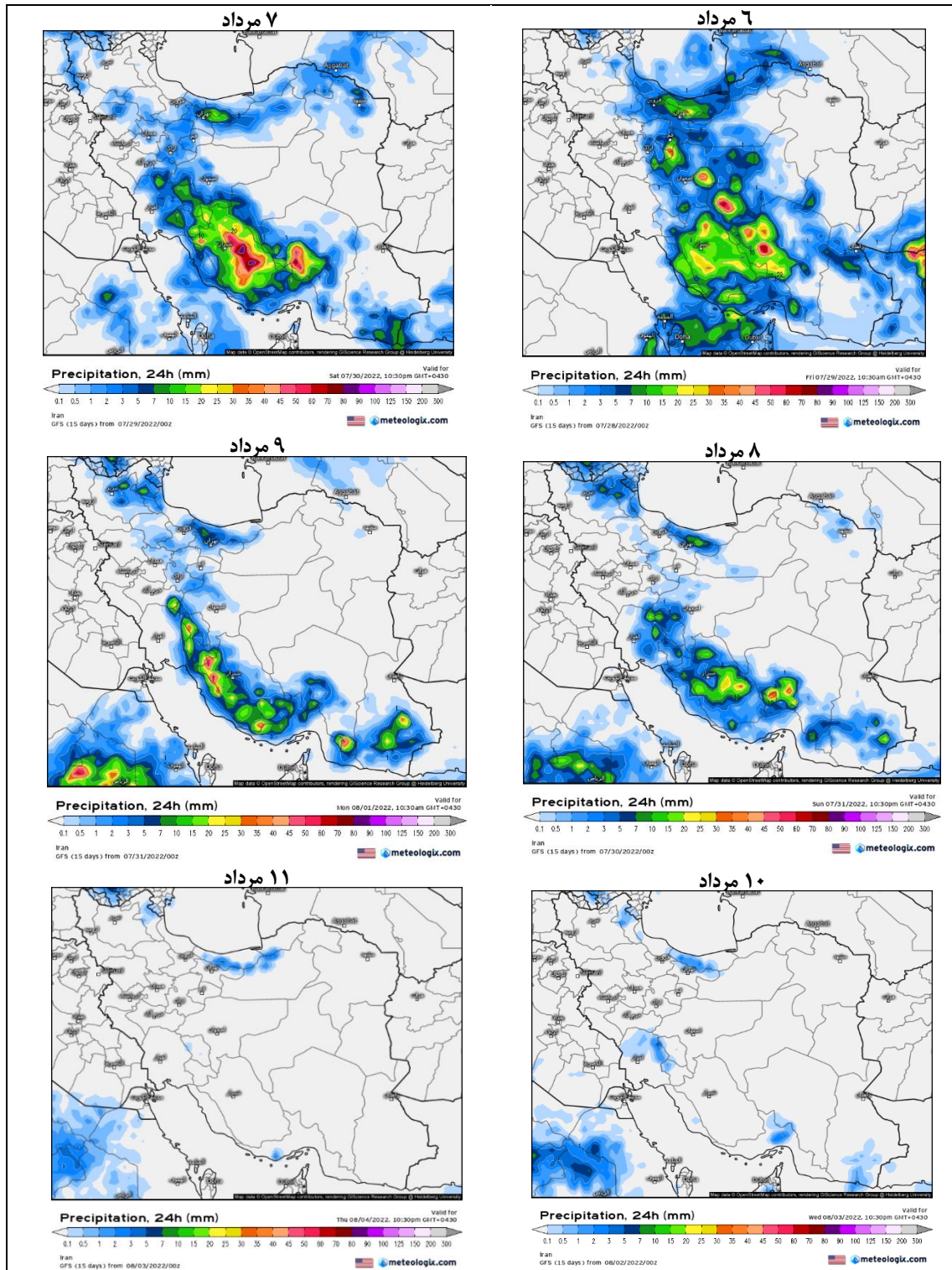
فصل	آماره خطای MAE	بیش برآورد	کم برآورد
زمستان	0.21	0.01	-
بهار	1.8	2.3	-
تابستان	0.54	0.5	-
پاییز	0.37	-	0.08

۳-۴- پیش‌بینی حجم آب ورودی به سد امیرکبیر

بر اساس مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده بارش-رواناب مدل‌های پیش‌بینی بارش در مرداد ۱۴۰۱، در شکل ۷ مدل پیش‌بینی هواشناسی GFS برای روزهای بارشی مرداد از ۶ تا ۱۱

پوشش نسبتاً خوبی در کل کشور داشته و در روزهای ۱۰ و ۱۱ مرداد این سامانه ضعیف شده و فقط در بخش‌های محدود کشور مانند حوزه آبخیز امیرکبیر فعالیت دارد.

مرداد ارائه شده است. با توجه به شکل ۷، در این دوره برای حوزه آبخیز سد امیرکبیر بارش‌های خوبی پیش‌بینی شده است. سامانه بارشی در روزهای ۶ و ۷ مرداد وارد کشور شده و تا ۹ مرداد

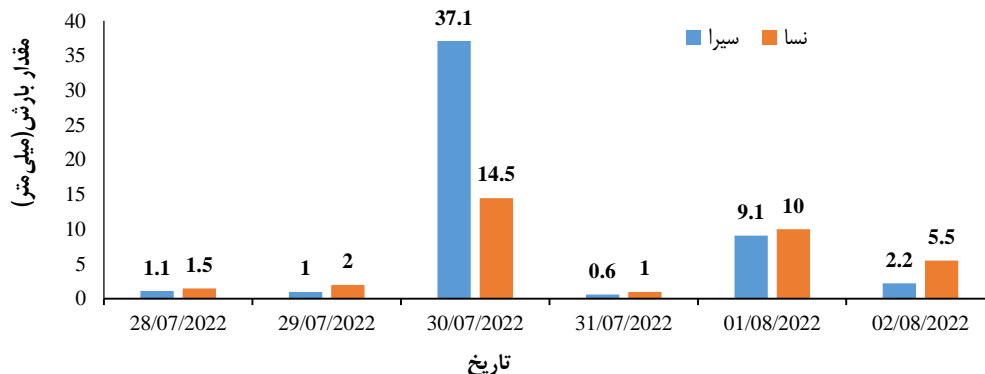


شکل ۷- نقشه‌های پیش‌بینی بارش بر اساس خروجی مدل GFS در حوزه آبخیز سد امیرکبیر

Figure 7- Precipitation forecast maps based on the output of the GFS model in the watershed area of Amirkabir Dam

مقدار بارش در هشت مرداد ۱۴۰۱ در این دوره بارشی بوده است که برای ایستگاه‌های سیرا و نساء به ترتیب ۳۷/۱ و ۱۴/۵ میلی‌متر است.

۳-۵- بررسی میزان بارش‌های مرداد ۱۴۰۱ در حوزه آبخیز سد امیرکبیر در شکل ۸ مقادیر بارش رخ داده در دو ایستگاه مبنای سیرا و نساء واقع در حوزه آبخیز سد امیرکبیر مشاهده می‌شود. بیش‌ترین

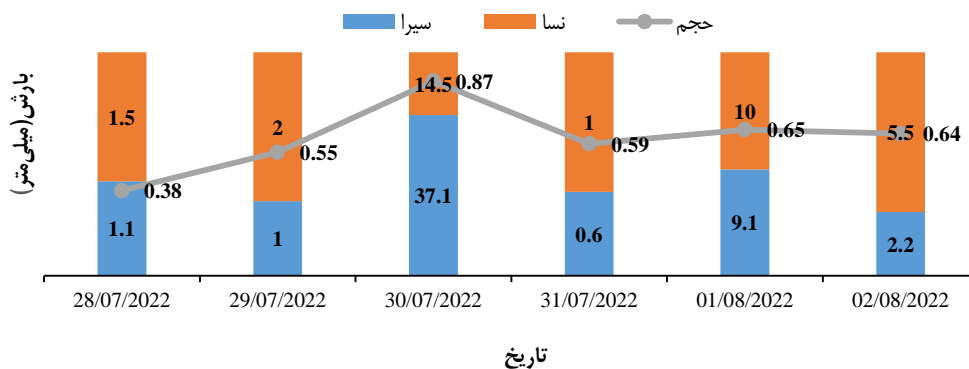


شکل ۸- مقایسه بارش ایستگاه‌های مبنای مرداد (بارش مرداد ۱۴۰۱ در دو ایستگاه مبنای سیرا و نساء)

Figure 8- Comparison of precipitation of base stations in August (rainfall of August 2022 in two base stations of Sira and Nessa)

افزایش قابل توجهی داشته و از ۰/۵۵ میلیون مترمکعب در ۷ مرداد به ۰/۸۷ میلیون مترمکعب در ۸ مرداد رسیده است. یعنی بیش از یک و نیم برابر حجم ورودی به سد در روز قبل و این مورد تأثیر گذاری بارش در این دو ایستگاه مبنای بر دبی ورودی به سد امیرکبیر را نشان می‌دهد.

در شکل ۹ حجم بارش ورودی به سد امیرکبیر در مقایسه با بارش ایستگاه‌های مبنای در روزهای بارشی مرداد ۱۴۰۱ نمایش داده شده است. نکته قابل توجه آن که در روزی که بارش ایستگاه نساء ۳۷ میلی‌متر بوده است (هشت مرداد) و ایستگاه سیرا ۱۴ میلی‌متر بارش داشته است. حجم آب ورودی به سد

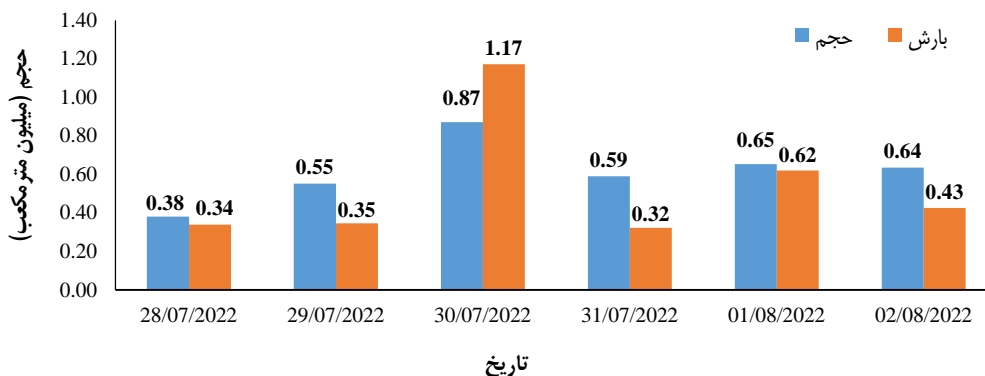


شکل ۹- مقایسه حجم رواناب ورودی به سد امیرکبیر و مقدار بارش ایستگاه‌های مبنای در روزهای بارشی مرداد ۱۴۰۱

Figure 9- Comparison of the amount of runoff entering the Amirkabir Dam and the amount of precipitation at the base stations on the rainy days of August 2022

مدل واسنجی شده و بارش رخ داده در ایستگاه‌های مبنای بالادست سد امیرکبیر، به جز تاریخ هشت مرداد در بقیه روزها حجم آب ورودی به سد بیش از مقدار برآورد شده با مدل است.

شکل ۱۰ مقایسه حجم آب ورودی به سد امیرکبیر برآورد شده از مدل واسنجی شده و داده واقعی را نمایش می‌دهد. همان گونه که در نمودار نیز نمایش داده شده است با توجه به



شکل ۱۰- مقایسه حجم آب ورودی به سد امیرکبیر مدل واسنجی شده و داده واقعی

Figure 10- Comparison of the volume of water entering Amirkabir Dam, calibrated model, and real data

آب‌خیز ایجاد شده است. در این دوره مجموع حجم پیش‌بینی شده مدل ۳/۲۳ میلیون مترمکعب است، در حالی که حجم واقعی ورودی به سد ۳/۶۹ میلیون مترمکعب است که این بدان معناست که دقت برآورد مدل ۸۸ درصد است.

در جدول ۸ مقادیر شبیه‌سازی حجم ورودی به سد امیرکبیر در مقایسه با حجم واقعی در روزهای بارشی مرداد ارائه شده است. با توجه به جدول ۸، مدل نهایی واسنجی و اعتبارسنجی شده تنها با دو ایستگاه نساء و سیرا از ایستگاه‌های مبنای موجود در حوزه

جدول ۸- مقادیر شبیه‌سازی حجم ورودی به سد امیرکبیر در مقایسه با حجم واقعی

Table 8- Simulation values of the input volume to the Amirkabir Dam compared to the actual volume

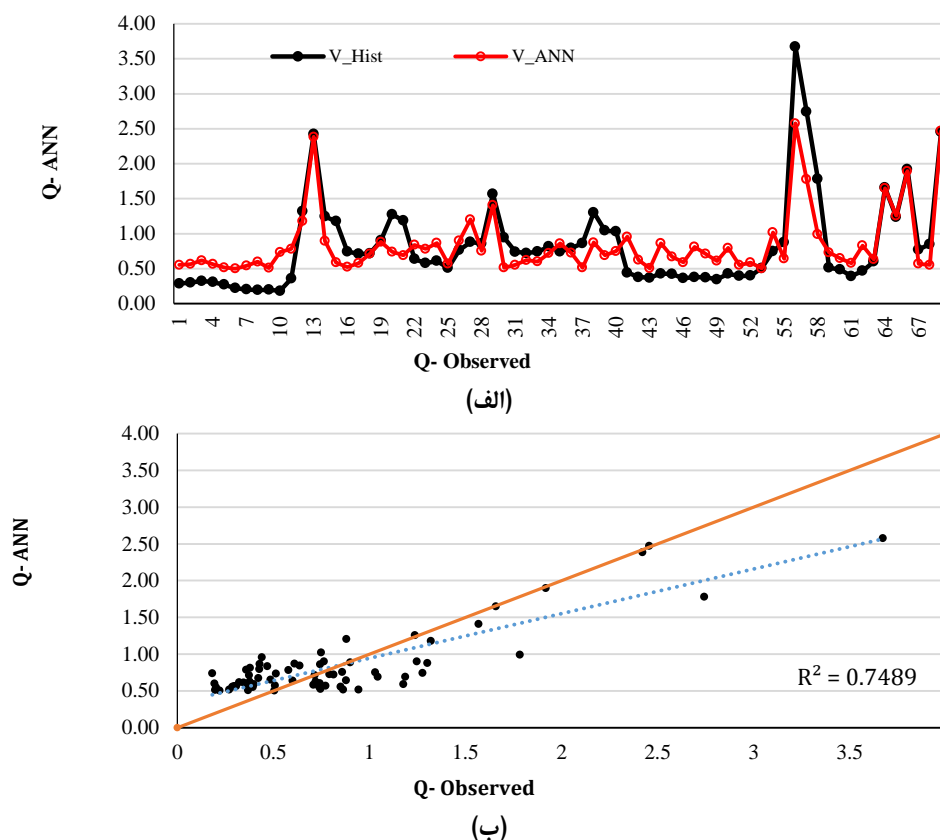
میزان دقت (درصد)	مجموع حجم واقعی (میلیون مترمکعب)	مجموع حجم پیش‌بینی شده (میلیون مترمکعب)	مدل نهایی واسنجی شده
88	3.62	3.23	$V = 0.296 + 0.0170 \text{ sira} + 0.0169 \text{ nesa}$

آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۲۷ و ۰/۴۶ است. مقادیر شاخص MAE برابر با ۰/۲۲ و ۰/۳۷، به ترتیب برای مراحل آموزش و آزمون محاسبه شده است. مقایسه نتایج دو مدل رگرسیون خطی و مدل ANN نشان داد که با توجه به تمامی شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها، مدل ANN عملکرد بهتری داشته و از دقت بالاتری برخوردار بوده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است علاوه بر خط رگرسیون که توانایی مدل در ترسیم رفتار نزولی یا صعودی پدیده مورد بررسی را نشان می‌دهد، خط ۴۵ درجه برای تعیین میزان خطای مدل ANN ترسیم شده است. مطابق این شکل مدل در تخمین مقادیر کم جریان رودخانه، عملکرد بهتری داشته، حال آن‌که در تخمین اوج‌های جریان، در چندین مورد برآوردهای دست‌پایینی داشته است. علت هم می‌تواند به کم بودن تعداد الگوهای اوج در سری زمانی آموزشی مدل ANN مربوط باشد. در پژوهش‌های مشابه جهت پیش‌بینی جریان رودخانه، مدل‌های ANN در قیاس با مدل‌های مرسوم رگرسیون و سری‌های زمانی، عملکرد بهتری داشته‌اند که با نتایج پژوهش حاضر هم مطابقت دارد (Coulibaly et al., 2000; Zoratipour et al., 2009).

۳-۶- مدل ANN برای پیش‌بینی مقادیر ورودی به سد امیرکبیر

با توجه به این‌که بیش از ۹۰ درصد شبکه‌های عصبی کاربردی در هیدرولوژی، شبکه‌های پیشرو با یک لایه پنهان هستند، در این پژوهش نیز، از این شبکه‌ها استفاده شد. همچنین، با انجام سعی و خطا بر معماری و توابع مدل‌های شبکه عصبی، تابع تحریک سیگموئیدی به دلیل ارائه نتایج بهتر مورد استفاده قرار گرفت (Saghafian et al., 2013; Anvari et al., 2022). به‌منظور اجتناب از اشباع سیگنال خروجی و کوچک شدن بیش از حد وزن‌های شبکه، داده‌های ورودی و خروجی باید در محدوده‌ای خاص، بسته به نوع تابع تحریک استفاده شده در شبکه، تغییر شکل پیدا کنند. در این پژوهش به دلیل استفاده از تابع سیگموئیدی با خروجی‌های بین صفر و یک و نیز با بررسی منابع، داده‌های ورودی و خروجی در محدوده [۰/۹-۰/۱] تغییر مقیاس یافتند (ASCE 2000; Coulibaly et al., 2000; Alvisi et al., 2006). شکل ۱۱ نیز نمودار پیش‌بینی‌های حجم جریان ورودی به سد امیرکبیر را در مرحله آموزش و آزمون مدل ANN نشان می‌دهد.

برای مدل ANN شاخص‌های R^2 در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۸۷ و مقادیر RMSE در مرحله



شکل ۱۱- پراکنش مقادیر پیش‌بینی شده با مدل ANN در قیاس با مقادیر مشاهداتی برای کل دوره آموزش و آزمون: الف) مقادیر خطا و ب) نمودار همبستگی

Figure 11- Distribution of predicted values with ANN model in comparison with observed values for the entire training and testing period: a) error values and b) correlation diagram

روردی به سد در روزهای بارشی مرداد ۱۴۰۱ که توسط مدل پیش‌بینی شده برابر $۳/۲۳$ میلیون مترمکعب در این دوره بوده است در حالی که حجم واقعی ورودی به سد $۳/۶۹$ میلیون مترمکعب است و بدان معناست که $۰/۴۵$ میلیون مترمکعب آب بیش‌تری به سد وارد شده است که نشان از دقت ۸۸ درصد مدل دارد. مقایسه نتایج دو مدل رگرسیون خطی و ANN نشان داد که مدل ANN عملکرد بهتری داشته است. لازم به ذکر است که یکی از مشکلات مدل ANN مورد استفاده در پژوهش حاضر، تعداد کم الگوهای اوج در مرحله آموزش و در نتیجه برآوردهای دست پایین این مدل در مرحله آزمون است. برای رفع این نقص و افزایش مصنوعی تعداد الگوهای آموزشی، استفاده از روش‌های Bootstrap و تولید مصنوعی داده‌ها، برای پژوهش‌های آینده قابل پیشنهاد است.

سپاسگزاری

از شرکت آب و نیروی ایران جهت حمایت معنوی از پژوهش حاضر تشکر می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های این پژوهش نشان داد که علیرغم وجود پنج ایستگاه باران‌سنج در حوزه آبخیز سد امیرکبیر، تمامی ایستگاه‌ها نمی‌توانند تأثیر یکسان و مشابهی در آب ورودی به سد داشته باشند. با استفاده از روش خوشه‌بندی تأثیر تمامی ایستگاه‌ها بر دبی ورودی به سد امیرکبیر بررسی شد و ایستگاه‌های باران‌سنج مناسب انتخاب شد. هم‌چنین، نتایج نشان داد رابطه بارش حوزه آبخیز با رواناب ورودی به سد امیرکبیر در فصول مختلف متفاوت بوده و در فصل زمستان بیش‌ترین همبستگی را دارد چرا که کم‌تر تحت تأثیر سایر عوامل تأثیرگذار بر رواناب حوزه آبخیز شامل آب حاصل از ذوب برف یا بارش‌های تندی است. از نتایج دیگر پژوهش حاضر این است که مدل واسنجی و اعتبارسنجی شده در سه فصل زمستان، بهار و پاییز درای کمی بیش برآورد و در فصل پاییز دارای کمی کم برآورد است. در رابطه واسنجی شده نهایی و برای کل سال مقدار همبستگی $۰/۶۸$ به‌دست آمد که عدد قابل‌قبولی در رابطه بارش-رواناب است. خطای میانگین مطلق و میانگین مربعات خطا هم بررسی شد که مقادیر آن به‌ترتیب $۰/۴۶$ و $۰/۱$ میلیون مترمکعب است. در نهایت این‌که مجموع حجم آب

افزایش منابع ناشی از بارورسازی ابرها. هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه یزد. <https://civilica.com/doc/845389>

ذرتی‌پور، امین، سلاجقه، علی، المعالی، نگار، و عسگری محمدحسین (۱۳۸۸). بررسی مدل بارش-رواناب با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون دومتغیره آماری (مطالعه موردی در حوزه آبخیز میناب). *پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)*، ۲۲(۲)، ۶۹-۷۴. <https://www.sid.ir/paper/74-69-200677/fa>

رضایی هارونی، عباس، زارع بیدکی، رفعت، و پورمحمدی، سمانه (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثر بارورسازی ابرها بر رواناب حوزه آبخیز بهشت‌آباد با استفاده از مدل IHACRES. *مرتع و آبخیزداری*، ۷۴(۴)، ۱۲۰-۱۳۶. doi:10.22059/jrwm.2022.295490.1450

مومنه، صادق (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان روزانه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۳)، ۱-۱۶. doi:10.22098/mmws.2022.9972.1076

مهدی‌نسب، مهدی، نگارش، حسین، و طاوسی، تقی (۱۳۹۴). مدل‌سازی بارش-رواناب حوزه آبخیز کشکان براساس مدل‌های آماری. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۶(۲)، ۲۰۵-۲۱۷. doi:20.1001.1.20085362.1394.26.2.5.6

میرزاتیا، احسان، ملک احمدی، حسین، شاه‌محمدی، یادگار، ابراهیم‌زاده، علی (۱۴۰۰). تأثیر موجک بر افزایش دقت مدل‌های تخمینی در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه صوفی‌چای). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۳)، ۶۷-۷۹. doi:10.22098/mmws.2021.9335.1035

References

Alvisi, S., Mascellani, G., Franchini, M., & Bardossy, A. (2006). Water level forecasting through fuzzy logic and artificial neural network approaches. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 1-17. doi:10.5194/hess-10-1-2006, 2006.

Anvari, S., Moghaddasi, M., & Bagheri, M.H. (2023). Drought mitigation through a hedging-based model of reservoir-farm systems considering climate and streamflow variations. *Theoretical and Applied Climatology*, 152, 723-737. doi:10.1007/s00704-023-04402-7

Anvari, S., Rashedi, E., & Lotfi, S. (2022). A coupled metaheuristic algorithm and artificial intelligence for long-lead stream flow forecasting. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 12(1), 91-104. <http://ijocoe.iust.ac.ir/article-1-506-en.html>

ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, (2000). Artificial neural networks in hydrology, I: preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115-123. <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50701000/cswq-0332-hjelmfelt.pdf>

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

بخش اعظم اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. سایر اطلاعات از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سمانه پورمحمدی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله و تحلیل‌های آماری؛ **صدیقه انوری:** راهنمایی، مدل‌سازی بخش هوش مصنوعی، نگارش و انجام بخشی از تحلیل‌های آماری، ویرایش متن مقاله.

منابع

بنی‌نعیمه، سارا، لشکری، حسن، قربانپان، جبرئیل، مرشدی، جعفر (۱۴۰۲). تحلیل همبندی بارش‌های فوق سنگین و تأثیر آن بر آبدهی اوج سیلاب‌های رودخانه دز (سیلاب سال‌های ۱۹۹۳ و ۲۰۰۵). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۳۷-۵۵. doi:10.22098/mmws.2022.11216.1107

پورمحمدی، سمانه، و جوادیان‌زاده، محمدمهدی (۱۳۹۸). مقایسه کارایی روش‌های هوش مصنوعی و مدل مفهومی HEC-HMS در برآورد

Azarpira, F., & Shahabi, S. (2021). Evaluating the capability of hybrid data-driven approaches to forecast monthly streamflow using hydrometric and meteorological variables. *Journal of Hydroinformatics*, 23(6), 1165-1181. doi:10.2166/hydro.2021.105

Bani Naeimeh, S., Lashkari, H., Ghorbanian, J., & Morshedi, J. (2023). Synoptic analysis of extremely heavy rains and its effect on the peak discharge of Dez river floods (floods of 1993 and 2005). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 37-55. doi:10.22098/mmws.2022.11216.1107 [In Persian].

Coulibaly, P., Anctil, F., & Bobée, B. (2000). Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology*, 230(3-4), 244-257. doi:10.1016/S0022-1694(00)00214-6

Mirzania, E., Malek Ahmadi, H., Yadegar Shahmohammadi, Y., & Ebrahimzadeh, A. (2021). Impact of wavelet on accuracy of estimated models in rainfall-runoff modeling (Case study: Sufichay). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(3), 67-79. doi:10.22098/mmws.2021.9335.1035. [In Persian]

- Moghaddasi, M., Anvari, S., & Akhondi, N. (2022). A trade-off analysis of adaptive and non-adaptive future optimized rule curves based on simulation algorithm and hedging rules. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1-2), 65-78. doi:10.1007/s00704-022-03930-y
- Momeneh, S. (2022). Performance comparison of Artificial Intelligence models with IHACRES model in daily streamflow modeling. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 1-16 doi:10.22098/mmws.2022.9972.1076 [in Persian].
- MahdiNasab, M., Negaresh, H., & Tavousi, T. (2015). Modeling of rainfall-runoff Kashkan River catchment based on statistical models. *Geography and Environmental Planning*: 26(2), 67-84 dor:20.1001.1.20085362.1394.26.2.5.6 [In Persian].
- Poormohammadi S., & Javadianzadeh, M.M. (2018). Comparing the efficiency of artificial intelligence methods and the HEC-HMS conceptual model in estimating the increase in resources due to cloud fertilization. The 7th National Conference on Water Resources Management of Iran, Yazd, Iran, Pp1-10. [In Persian].
- Rezai Haruni, A., Zare Bidaki, R., & Pourmohammadi, S., (2021) Predicting the effect of cloud seeding on runoff in Beheshtabad watershed using IHACRES model. *Journal of Range and Watershed Management*, 74(4), 905-916 doi:10.22059/jrwm.2022.295490.1450 [In Persian].
- Saghafian, B., Anvari, S., & Morid, S. (2013). Effect of southern oscillation index and spatially distributed climate data on improving the accuracy of artificial neural network, adaptive neuro-fuzzy inference system and K-Nearest Neighbour streamflow forecasting models. *Expert System* 30(4), 367-380. doi:10.1111/exsy.12009
- Sajikumar, N., & Thandaveswara, B.S. (1999). A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 216(1-2), 32-55. doi:10.1016/S0022-1694(98)00273-X
- Xiang, Z., Yan, J., & Demir, I. (2020). A Rainfall-runoff model with LSTM-Based sequence-to-sequence learning. *Water Resources Research*, 56(1), doi:10.1029/2019WR025326.
- Zoratipour, A., Salajegheh, A., & Al-Maali, N., & Asgari, M.H. (2009). Investigation of rainfall-runoff model using artificial neural network and statistical bivariate regression methods (case study in Minab watershed). *Watershed Management Research (Pajouhesh-Va-Sazandegi)*, 22(2), 69-74 doi:10.3390/ECWS-7-14232 [In Persian].