

Research Paper



Evaluation of the Accuracy of Metaheuristic Models in Simulating the Discharge of the Karkheh River



Reza Dehghani ¹, Reza Chamanpira ², Taher Farhadinejad ³, Elham Davoudi ⁴

1. PhD in Water Sciences and Engineering, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Lorestan Province Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Areeo, Khorramabad, Iran. r.kh72777@gmail.com
2. Research Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Lorestan Province Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Areeo, Khorramabad, Iran. chamanpirareza45@gmail.com
3. Research Assistant Professor, Department of Soil Protection and Watershed Management, Lorestan Province Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Areeo, Khorramabad, Iran. farhadinejad@yahoo.com
4. PhD in Watershed Science and Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Lorestan Province, Areeo, Khorramabad, Iran. elhamdavoudi90@yahoo.com

Keywords

Hydrometric Station, support Vector Regression, River Discharge, Wavelet, Karkheh watershed.

Received: 2025/02/05

Accepted: 2025/06/24

Published: 2025/10/20

ABSTRACT

Introduction

Water resource management is a highly complex process consisting of various components, each with specific characteristics. Rivers are a major part of water resource systems, and monitoring their quantitative and qualitative parameters is of paramount importance. Water flow is one of the most important indicators in river management, as its changes over time can have significant impacts on natural ecosystems. For example, excessive reduction in river flow can lead to the destruction of aquatic life, while excessive increases in river discharge can cause devastating floods. Therefore, accurate methods should be used in modeling river flow and predicting it in the short and long term. In the past, physical models were mainly used to simulate river flow. These models are generally time-consuming and lack sufficient accuracy. In recent years, artificial intelligence-based methods have emerged, their development requiring less time and cost compared to physical models, and requiring less data compared to numerical models. Artificial intelligence methods are inspired by the nature of living organisms and can be used to model various linear and nonlinear systems. In this research, hybrid models of Support Vector Regression-Wavelet, Support Vector Regression-Innovative gunner, and Support Vector Regression-Black Widow Spider were used to simulate the river discharge at the Cham Anjir, Kashkan, Pol-e Zal, and Jologir hydrometric stations. These rivers are among the most important rivers in western Iran, significantly impacting agricultural growth, aquaculture production, geographical location, and tourism.

*Correspondin Author: Dehghani, R. Email: r.kh72777@gmail.com

How to cite this article: Dehghani, R., Chamanpira, R., Farhadinejad, F., Davoudi, E. (2025). Evaluation of the Accuracy of Metaheuristic Models in Simulating the Discharge of the Karkheh River..Hydrogeomorphology, 12(44): 75 – 94.

DOI:10.22034/hyd.2025.65805.1777



Copyright: ©by the authors

Publisher: University of Tabriz

Methodology

In this research, Support Vector Regression (SVR) models along with wavelet, innovative gunner, and black widow spider algorithms were used to simulate the discharge of rivers in the Karkheh River Basin, including the Cham Anjir and Kashkan rivers located in Lorestan Province and the Jologir and Pol-e Zal rivers in Khuzestan Province. Discharge parameters with time lags $Q(t)$, $Q(t-1)$, $Q(t-2)$, and $Q(t-3)$ were considered as the model's inputs, with $Q(t)$ as the output over the years from 1993 to 2023. To simulate river discharge, hydrometric stations in the Karkheh River Basin employed the Support Vector Regression model, utilizing wavelet, innovative gunner, and black widow spider algorithms. In recent years, due to the random selection of kernel function parameter values in Support Vector Regression, optimization algorithms have been used to enhance accuracy and reduce model error. This research also utilized wavelet, innovative gunner, and black widow spider algorithms to optimize the tuning parameter values to improve model performance. Therefore, in this study, after inputting the input parameter data into the model and optimizing the tuning parameters, a hybrid model structure was formed, leading to computational results. Since the stopping criterion in training artificial intelligence models is based on error levels, the model stops at the lowest error value, resulting in the final output.

Results and Discussion

The results of the models examined in scenario number 4 are presented in Table 4. As indicated in the table, the Support Vector Regression-Wavelet model at the Cham Anjir station achieved a correlation coefficient of 0.970, the lowest root mean square error (RMSE) of 0.022 m³/s, the lowest mean absolute error (MAE) of 0.011 m³/s, and the highest Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) of 0.986. At the Kashkan station, the correlation coefficient was 0.968, with the lowest RMSE of 0.025 m³/s, the lowest MAE of 0.014 m³/s, and the highest NSE of 0.977. For the Pol-e Zal station, the correlation coefficient was 0.941, with the lowest RMSE of 0.054 m³/s, the lowest MAE of 0.028 m³/s, and the highest NSE of 0.962. At the Jologir station, the correlation coefficient was 0.948, with the lowest RMSE of 0.048 m³/s, the lowest MAE of 0.025 m³/s, and the highest NSE of 0.967. All these metrics indicate better performance during the validation phase.

Conclusions

The results of the research, based on the evaluation of scenarios consisting of input parameters, indicated that in all examined models, increasing the number of effective parameters in various modeling approaches leads to better performance in estimating river discharge. Furthermore, the results yielded from the evaluation criteria demonstrated that the Support Vector Regression-Wavelet model has high accuracy and negligible error. Additionally, according to the analyzed graphs, the Support Vector Regression-Wavelet model closely estimates the actual flow discharge values, which is evident in the relative error and Taylor diagrams. Overall, the findings of this research suggest that the use of artificial intelligence models based on the Support Vector Regression approach can be effective in simulating river flow for other regions of the country.

مقاله پژوهشی



ارزیابی دقت مدل‌های فراابتکاری در شبیه سازی دبی رودخانه کرخه

رضا دهقانی^۱، رضا چمن پیرا^۲، طاهر فرهادی نژاد^۳، الهام داودی^۴

- ۱- دکترای علوم ومهندسی آب، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران. r.kh72777@gmail.com
- ۲- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران. chamanpirareza45@gmail.com
- ۳- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران. farhadinejad@yahoo.com
- ۴- دکترای علوم ومهندسی آبخیزداری، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، . elhamdavoodi90@yahoo.com

کلیدواژه‌ها

ایستگاه هیدرومتری،
رگرسیون بردار پشتیبان، دبی
رودخانه، موجک، حوضه آبخیز
کرخه.

چکیده

شبیه سازی جریان رودخانه در ایستگاه های هیدرومتری به منظور آگاهی از دبی رودخانه در دوره های زمانی آینده از مسائل مهمی است که معمولاً توسط سری های زمانی هیدرولوژیکی مرتبط با همان ایستگاه انجام می شود. در این تحقیق، بمنظور پیش بینی دبی جریان رودخانه های چمن انجیر، کشکان، پل زال و جلوگیر از داده های دبی جریان، با تاخیرهای زمانی مختلف، طی چهار سناریو ترکیبی در سالهای ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. جهت مدلسازی از مدل های هوشمند ترکیبی رگرسیون بردار پشتیبان -موجک، رگرسیون بردار پشتیبان -تفنگدار خلاق و رگرسیون بردار پشتیبان -عنکبوت بیوه سیاه استفاده شد. ارزیابی عملکرد مدلها با استفاده از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و ضریب نش ساتکلیف صورت گرفت. همچنین جهت تحلیل نتایج مدلها از نمودار پراکنش و خطای نسبی و تیلور استفاده شد. نتایج نشان داد سناریو ترکیبی متشکل از کلیه داده های ورودی در مدل های مورد بررسی از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین نتایج حاصل از معیار ارزیابی نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان -موجک دارای ضریب همبستگی ۰/۹۷۴-۰/۹۴۱، ریشه میانگین مربعات خطا (m^3/s) ۰/۰۵۴-۰/۰۲۲، میانگین قدر مطلق خطا (m^3/s) ۰/۰۱۱-۰/۰۲۵ و ضریب نش ساتکلیف ۰/۹۸۶-۰/۹۶۲ در مرحله صحت سنجی برخوردار است. در مجموع نتایج نشان داد استفاده از الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری دقت مدل رگرسیون بردار پشتیبان را افزایش داده و می توانند بعنوان راهکاری مناسب در پیش بینی دبی رودخانه ها قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

ارجاع به این مقاله: دهقانی، رضا؛ چمن پیرا، رضا؛ فرهادی نژاد، طاهر؛ داودی، الهام (بعد از گرفتن پذیرش) (۱۴۰۴). ارزیابی دقت مدل های فراابتکاری در شبیه سازی دبی رودخانه کرخه. هیدروژنومورفولوژی، ۱۲ (۴۴): ۹۴ - ۷۵.

*نویسنده مسئول
رایانامه: r.kh72777@gmail.com

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.65805.1777



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مدیریت منابع آب فرآیندی بسیار پیچیده و از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که هر یک از این بخش‌ها دارای ویژگی‌های خاصی هستند (بیرلی و فریز^۱، ۲۰۱۳). رودخانه‌ها یکی از بخش‌های اصلی سیستم‌های منابع آب هستند، و نظارت بر پارامترهای کمی و کیفی آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (یلدیز و همکاران^۲، ۲۰۲۲). جریان آب یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر در مدیریت رودخانه‌ها است، زیرا تغییرات آن در طول زمان می‌تواند تأثیرات مهمی بر اکوسیستم‌های طبیعی داشته باشد (ماریل و همکاران^۳، ۲۰۲۲). به عنوان مثال، کاهش بیش از حد جریان آب رودخانه می‌تواند منجر به نابودی آبزیان شود، در حالی که افزایش بیش از حد در تخلیه آب رودخانه می‌تواند موجب سیلاب‌های مخرب شود (پاریسوج و همکاران^۴، ۲۰۲۰). بنابراین، باید از روش‌های دقیق در مدل‌سازی جریان آب رودخانه و پیش‌بینی آن در کوتاه‌مدت و بلندمدت استفاده کرد (گورانی و شعبانلو^۵، ۲۰۲۱). در گذشته، عمدتاً از مدل‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها استفاده شده است که این مدل‌ها عمدتاً زمانبر و از دقت مطلوبی برخوردار نیستند (ژاو و همکاران^۶، ۲۰۲۱). در سالهای اخیر روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مطرح شدند که توسعه آنها در مقایسه با مدل‌های فیزیکی زمان و هزینه کمتری نیاز دارد و در مقایسه با مدل‌های عددی به داده‌های کمتری نیاز دارد. روش‌های هوش مصنوعی الهام گرفته از طبیعت موجودات زنده و می‌توانند برای مدل‌سازی انواع سیستم‌های خطی و غیر خطی استفاده شوند (مازازه و همکاران^۷، ۲۰۲۴). این مدل‌ها در زمینه پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است که میتوان به موارد زیر اشاره نمود. در پژوهشی به مقایسه مدل‌های عددی و رگرسیون بردار پشتیبان در پیش‌بینی جریان رودخانه آیداهو واقع در ایالات متحده طی سالهای ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ پرداختند نتایج نشان دارد مدل‌های هوش مصنوعی از جمله رگرسیون بردار پشتیبان از خطای کمتری نسبت به مدل‌های عددی برخوردار است (زونات کرمانی و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهشی بمنظور پیش‌بینی دبی سیلابی حوضه اودیشا واقع در کشور هند از مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی انتشار برگشتی و شبکه تابع پایه شعاعی استفاده کردند در این پژوهش از داده‌های دبی و بارش طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در مقیاس زمانی ماهانه استفاده کردند نتایج نشان داد مدل ماشین بردار پشتیبان نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی از عملکرد بهتری برخوردار است (ساهو و همکاران^۸، ۲۰۲۰). در پژوهشی جهت پیش‌بینی جریان رودخانه سوریس واقع در ایالات متحده از مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-موجک استفاده کردند در این پژوهش از داده‌های دبی جریان با تاخیرهای زمانی مختلف روزانه طی سالهای ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ بهره گرفتند نتایج نشان داد مدل هیبریدی از دقت بیشتری نسبت به مدل منفرد رگرسیون بردار پشتیبان برخوردار است (علیزاده و همکاران، ۲۰۲۱). در پژوهشی جهت مدلسازی دبی رودخانه‌های حوضه آبریز دز واقع در کشور ایران از مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان - الگوریتم بهینه‌سازی گیاهان مصنوعی استفاده کردند در این پژوهش از داده‌های دبی جریان با تاخیرهای متفاوت طی سالهای ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ در مقیاس زمانی روزانه استفاده شد نتایج نشان داد مدل هیبریدی جدید رگرسیون بردار پشتیبان-گیاهان مصنوعی نسبت به مدل‌های مورد بررسی رگرسیون بردار پشتیبان-موجک و رگرسیون بردار پشتیبان-بیزین از دقت بیشتری برخوردار است (دهقانی و همکاران، ۲۰۲۱). در پژوهشی جهت مدلسازی آبدهی رودخانه گاماسیاب استان کرمانشاه واقع در کشور ایران از مدل هیبریدی مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های هریس، گرگ خاکستری و ملخ استفاده کردند در این پژوهش از داده‌های دبی، بارش و دما طی سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ بهره گرفتند نتایج نشان داد مدل‌های هیبریدی مبتنی

1. Brierley and Fryirs

5. Goorani et Shananolou

2. Yildiz et al

6. Zhao et al

3. Marila et al

7. Mazareh et al

4. Parisouj et al

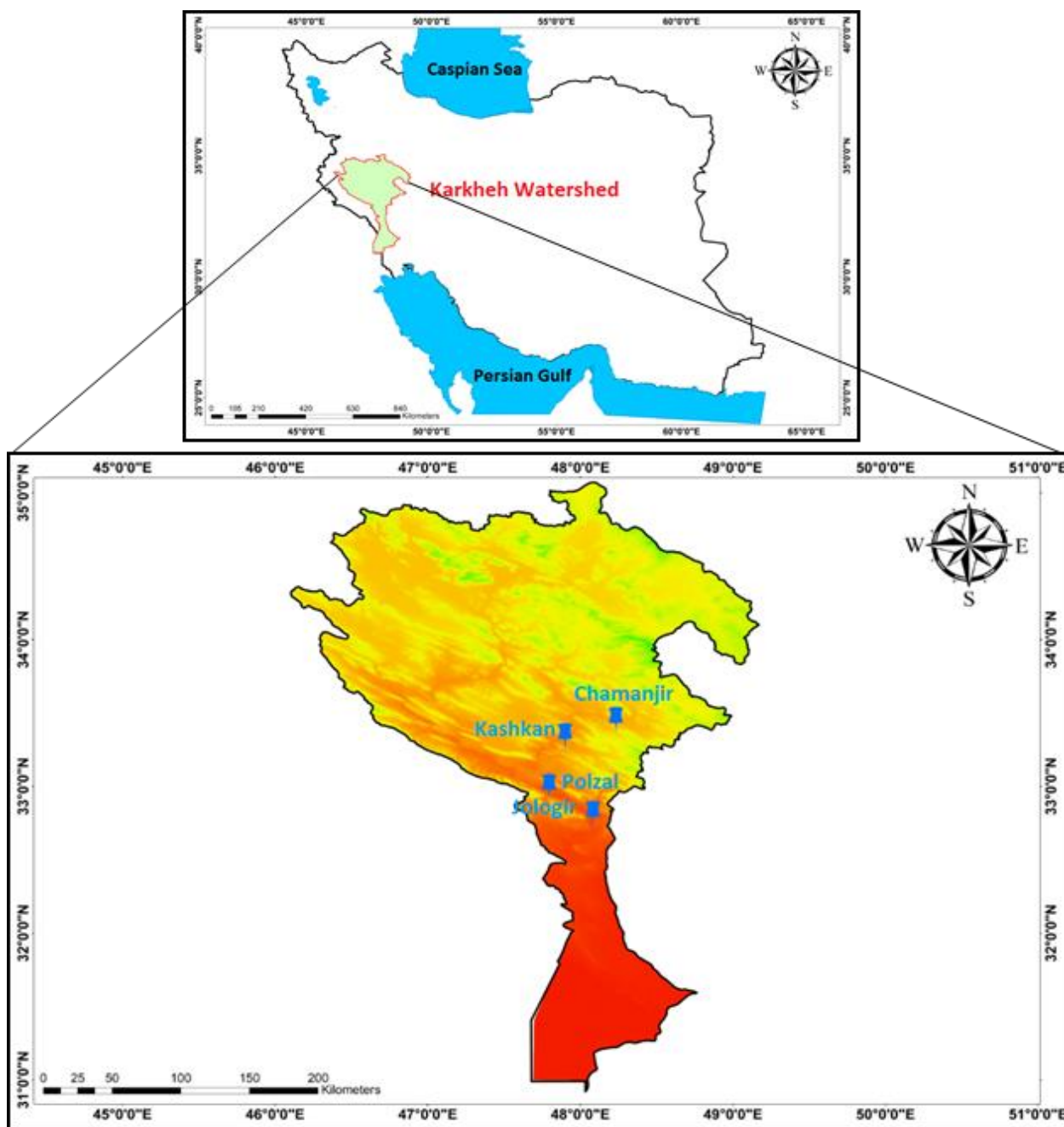
8. Sahoo et al

بر رگرسیون بردار پشتیبان بعنوان ابزاری مفید جهت شبیه سازی جریان رودخانه ها می باشد و همچنین نتایج نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-الگوریتم هریس دقت مناسبی نسبت به سایر مدل های مورد بررسی دارد (کوهانسرباز و همکاران^۱، ۲۰۲۴). درمجموع با توجه به پژوهش های انجام شده، کارایی مدل های هوش مصنوعی در برآورد جریان رودخانه ها و سایر مطالعات منابع آب مورد تایید قرار گرفته است؛ بنابراین مدل های هوش مصنوعی از جمله رگرسیون بردار پشتیبان می تواند بعنوان ابزاری کارآمد در برآورد جریان رودخانه و مسائل هیدرولوژی مورد استفاده قرار گیرد. در سال های گذشته پژوهش های متعددی در زمینه استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان منفرد جهت مدل سازی جریان رودخانه ها انجام شده است و نتایج آن با کاهش دقت مدل همراه بوده است (رجایی و همکاران، ۲۰۲۲). امروزه به منظور افزایش دقت، کاهش خطا و کارایی مدل رگرسیون بردار پشتیبان، از ترکیب این مدل با الگوریتم های فرا ابتکاری بهینه ساز به عنوان یک راهکاری مناسب جهت پیش بینی جریان رودخانه ها استفاده شده است که نتایج مطلوبی ارائه داده است (جلال کمالی و جلال کمالی، ۲۰۱۸). در این پژوهش نیز از مدل های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-موجک، رگرسیون بردار پشتیبان-تفنگدار خلاق و رگرسیون بردار پشتیبان-عنکبوت بیوه سیاه جهت مدل سازی جریان رودخانه برخی ایستگاه های هیدرومتری حوضه آبریز کرخه استفاده شد. حوضه آبریز کرخه جز مهم ترین حوضه های آبریز درجه دو کشور می باشد که سهم بسزایی در تولید محصولات کشاورزی، تولید محصولات آبی، گردشگری و آمایش سرزمین دارد. کمبود منابع آب بویژه خشکسالی بستر مهم ترین رودخانه های این حوضه آبریز، بدلیل افزایش دما، برداشت آب غیر مجاز، کشت محصولات آبدوست و عدم رعایت الگوی کشت مناسب سبب مخاطره جدی این حوضه آبریز شده است. بنابراین در این پژوهش به ارزیابی دقت مدل هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم های فرا ابتکاری جهت برآورد جریان رودخانه ایستگاه های هیدرومتری چم انجیر، کشکان، پل زال و جلوگیر پرداخته شد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه کرخه با مساحت ۵۱۶۴۰ کیلومترمربع در جنوب غرب ایران در محدوده ۳۰ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه عرض شمالی و طول ۴۶ درجه و ۶ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی قرار دارد. حوضه آبریز کرخه جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس بوده که از شمال به حوضه رودخانه های سیروان، سفیدرود، قره چای، از غرب به حوزه مرزی ایران و عراق، از جنوب به قسمتی از مرز غربی کشور و از سمت شرق به رودخانه دز محدود می شود. رودخانه کرخه طولی بالغ بر ۹۰۰ کیلومتر داشته و به عنوان سومین رودخانه بزرگ کشور بر اساس متوسط آبدهی سالانه (۸/۵ میلیارد مترمکعب) است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۵). در شکل ۱ ایستگاه های منتخب حوضه آبریز کرخه از شرکت آب منطقه ای لرستان و سازمان آب و برق خوزستان در دسترس بود، اخذ گردید نشان داده شده است. حوضه آبریز کرخه از شرایط آب و هوایی متنوعی برخوردار است بگونه ای که قسمت های جنوبی حوضه، نیمه خشک با زمستان ملایم و تابستان گرم و طولانی است. بخش های شمالی و مناطق کوهستانی زمستانی سرد و تابستانهایی ملایم دارد. دما در این حوضه از منفی ۲۵ درجه تا حداکثر ۵۰ درجه سانتی گراد نوسان دارد. متوسط سالانه ریزش های جوی در این حوضه آبریز ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی متر در سال متغیر بوده و اغلب در زمستان است.



شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Study area

جدول (۱): مختصات جغرافیایی ایستگاههای مورد بررسی

Table (1): Geographic coordinates of the stations studied

شماره	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت (Km2)
۱	چم انجیر	"۳۸' ۱۴° ۴۸	"۳۷' ۲۶° ۳۳	۱۱۴۰
۲	کشکان	"۳۹' ۵۳° ۴۷	"۵۲' ۱۹° ۳۹	۸۲۰
۳	پل زال	'۹° ۴۸	'۲۵° ۳۲	۹۰
۴	جلوگیر	'۴۳° ۴۷	'۹° ۳۲	۱۲۰

روش

در این پژوهش داده های مورد استفاده بصورت سری زمانی روزانه از شرکت آب منطقه ای لرستان و سازمان آب و برق استان خوزستان اخذ شد. سپس طول دوره آماری که همگن بوده و فاقد داده گمشده می باشد، انتخاب شد. بمنظور یکپارچه سازی داده های مورد استفاده فرآیند نرمالسازی بر روی داده ها صورت گرفت و سپس وارد مدل های هوشمند مبتنی بر رویکرد ماشین بردار پشتیبان شدند. امروزه بدلیل افزایش دقت و کارایی مدل های هوشمند از فرآیند بهینه نمودن پارامترهای تنظیم مدل های هوش مصنوعی استفاده می نمایند که بصورت اختصار مدل و الگوریتم های مورد بررسی در زیر تشریح می گردد. در این پژوهش نیز از الگوریتم های موجک، تفنگدار خلاق و عنکبوت بیوه سیاه جهت بهینه نمودن پارامترهای تنظیم توابع فعالسازی (کرنل) مدل رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شد. جهت فرآیند مدل سازی ۷۰ درصد داده ها از سال ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۲ برای آموزش و ۳۰ درصد باقی مانده از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ برای آزمون یا صحت سنجی بصورت تصادفی انتخاب شدند. سپس، بعد از ساخت مدل داده های ورودی وارد مدل شده و منجر به پاسخ خروجی می گردد. در نهایت پاسخ خروجی طبق شاخص های ارزیابی و نمودارهای کیفی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل زیر فلوچارت تحقیق نشان داده شده است.



شکل (۲): فلوچارت تحقیق

Figure (2): Research flowchart

رگرسیون بردار پشتیبان

رگرسیون بردار پشتیبان یکی از روش های هوش مصنوعی می باشد که بر مبنای تئوری بهینه سازی و از قانون کمینه سازی خطا پیروی می نماید که این امر سبب می گردد به یک جواب بهینه کلی منجر شود (واپنیک^۱، ۱۹۹۵). در مدل رگرسیون SVR که شامل تابعی است با متغیر های وابسته Y می باشد که این متغیر وابسته از چند متغیر مستقل X و مقداری خطا تشکیل شده است. همانطور که در مسائل رگرسیون مشاهده می شود میان متغیر وابسته و مستقل رابطه جبری مانند زیر وجود دارد که در ساختار مدل رگرسیون بردار پشتیبان بصورت زیر می باشد (واپنیک، ۱۹۹۸).

$$f(x) = W^T \cdot \phi(x) + b \quad (1)$$

$$y = f(x) + \text{noise} \quad (2)$$

رگرسیون بردار پشتیبان همانند مدل‌های هوش مصنوعی دارای توابع محرکی بوده که کرنل نام دارند این کرنل‌ها شامل کرنل چندجمله‌ای^۱ و کرنل توابع پایه شعاعی^۲ (RBF) و کرنل خطی می‌باشند و مطابق روابط زیر برآورد می‌شوند (واپنیک و چرونسکی^۳، ۱۹۹۱؛ باساک و همکاران^۴، ۲۰۰۷). در این پژوهش نیز از این سه تابع کرنل استفاده شد. همچنین مدل رگرسیون بردار پشتیبان در نرم افزار متلب کدنویسی شد.

$$k(x, x_j) = (t + x_i \cdot x_j)^d \quad (3)$$

$$K(x, x_j) = \exp\left[-\frac{\|x - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$k(x, x_j) = x_i \cdot x_j \quad (5)$$

تبدیل موجک

تبدیل موجک به عنوان روشی جایگزین برای تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه ارائه شده است و هدف از ارائه‌ی آن، غلبه بر مشکلات مربوط به قدرت تفکیک پذیری فرکانس در تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه است. در تبدیل موجک همانند تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه، سیگنال مورد نظر به پنجره‌هایی تقسیم شده و تبدیل موجک بر روی هر کدام از این پنجره‌ها به صورت جداگانه انجام می‌گیرد (وانگ و همکاران^۵، ۲۰۰۰). اما مهم‌ترین تفاوت آن‌ها در این است که در تبدیل موجک علاوه بر اینکه قدرت تفکیک فرکانس‌های یک سیگنال یا طول پنجره، متناسب با نوع فرکانس تغییر می‌کند، هم‌زمان عرض پنجره یا مقیاس فرکانس نیز متناسب با نوع فرکانس تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، در تبدیل موجک به جای فرکانس، مقیاس وجود دارد. یعنی تبدیل موجک، نوعی تبدیل زمان - مقیاس است. بر همین اساس با استفاده از تبدیل موجک، در مقیاس‌های بالا سیگنال منبسط شده و جزئیات سیگنال قابل تجزیه و تحلیل است و در مقیاس‌های پایین سیگنال منقبض شده و کلیات سیگنال قابل بررسی می‌باشد. یک موجک به معنای موج کوچک، بخشی یا پنجره‌ای از سیگنال اصلی است که انرژی آن در زمان متمرکز شده است. با استفاده از تبدیل یا آنالیز موجک می‌توان یک سیگنال یا سری زمانی مادر را به موجک‌هایی با سطح تفکیک و مقیاس‌های مختلف تجزیه کرد. بنابراین موجک‌ها نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده‌ی سیگنال مادر هستند که نوساناتی در یک طول متناهی داشته و شدیداً میرا هستند (نورانی و همکاران^۶، ۲۰۱۸). بر اساس این ویژگی مهم تبدیل موجک، می‌توان سری‌های زمانی نا مانا و گذرا را به صورت موضعی مورد تجزیه و تحلیل قرارداد (شین و همکاران^۷، ۲۰۰۵).

الگوریتم تفنگدار خلاق

الگوریتم تفنگدار خلاق^۸ (AIG) یکی از الگوریتم‌های بهینه سازی فرا ابتکاری بسیار جدید است که توسط پیچارسکی و کاسجو^۸ (۲۰۱۹) ارائه شد. با توجه به ساختار بسیار پر قدرت و نیرومند این الگوریتم، پیش بینی می‌شود که در آینده با موفقیت و بصورت چشمگیری در زمینه‌های مختلف علمی و فناوری مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم دارای کارایی و سرعت بالا در زمینه حل کارهای مختلف بهینه سازی (مثل زمینه مکانیک و عملکردهای ریاضی بنچمارک) می‌باشد. سرعت همگرایی بالا و قابلیت پیدا کردن جواب بهینه در کمترین زمان و با کمترین هزینه و با دقت بسیار بالا از جمله مزیت‌های این الگوریتم می‌باشد. همچنین این الگوریتم به خاطر استفاده از

1. Polynomial

5. Wang et al

2. Radial Basis Functions (RBF)

7. Shin et al

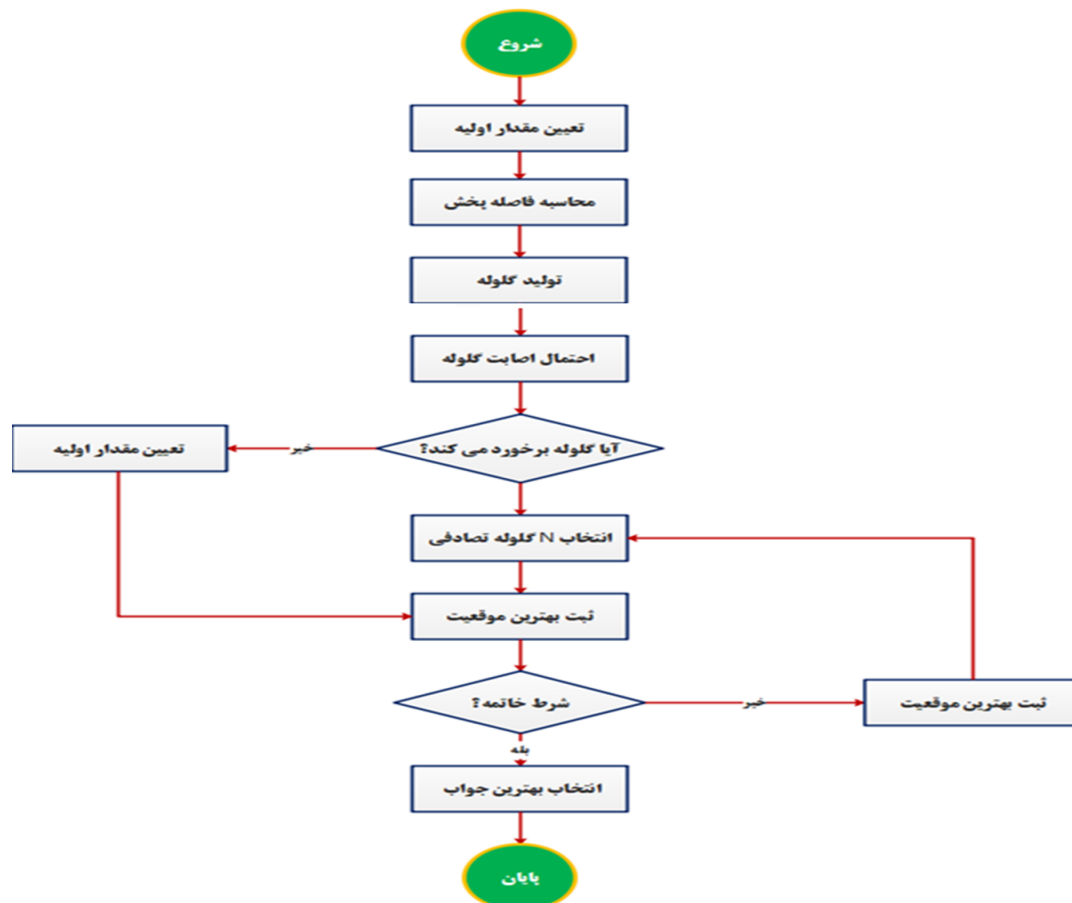
3. Vapnik and Chervonenkis

6. Algorithm Innovative Gunner

4. Basak et al

8. Pijarski and Kacejko

بردارهای جواب، بر مبنای روش‌های هوش ازدحامی، اکتشاف بسیار زیادی در فضای جستجو انجام می‌دهد و این امر در یافتن جواب بهینه و همگرایی کمک شایانی می‌کند. الگوریتم تفنگدار خلاق راه‌حل‌ها و جوابهای گوناگونی را به دست می‌آورد که دارای کارایی بسیار بالا در اجتناب از جواب‌های بهینه محلی دارد (گیر افتادن در جواب‌های بهینه محلی). از این الگوریتم می‌توان بصورت حیرت‌آوری برای حل توابع هدف با اشکال مختلف و تابع چند بعدی مختلف به کار رود. پیش‌بینی می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از این مدل، کارایی رقابتی و بالاتری در برابر سایر روش‌های شناخته‌شده هوش ازدحامی (از قبیل الگوریتم ژنتیک- ازدحام ذرات-ملخ-میگو و ...) داشته باشد. در شکل زیر فلوچارت الگوریتم نشان داده شده است.



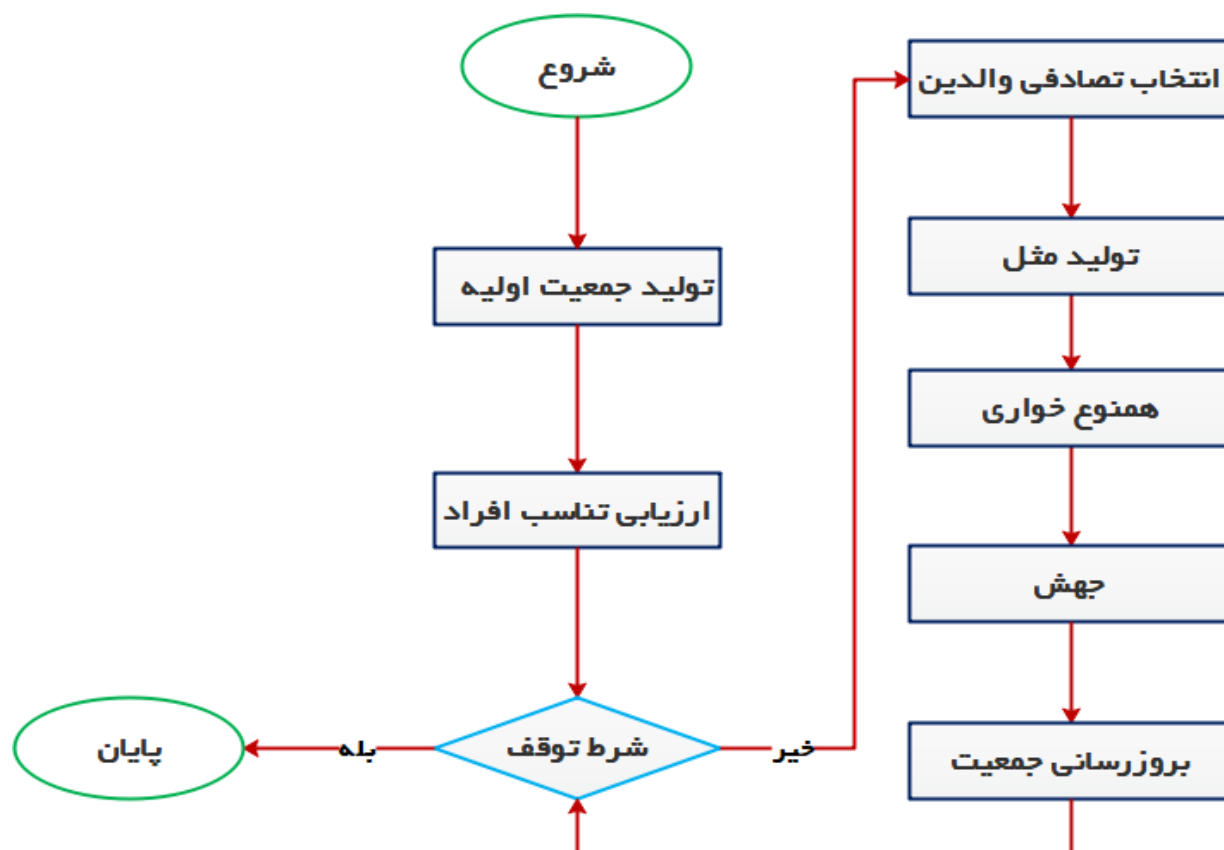
شکل (۳): فلوچارت الگوریتم تفنگدار خلاق

Algorithm Figure (3): Flowchart of the Innovative gunner

الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه

این الگوریتم اولین بار توسط سباستین و پتر (۲۰۰۹) معرفی شد و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است، بگونه‌ای که عنکبوت‌های اولیه، به‌صورت جفت، سعی در تولید مثل نسل نوین داشته و بیوه سیاه ماده، نر را در حین جفت‌گیری یا بعد از آن خورده و سپس او نطفه‌های ذخیره‌شده در حفره‌های اسپرم خود حمل می‌کند و آنها را در کیسه‌های تخمک آزاد می‌کند. برای حل یک مسئله بهینه‌سازی، مقادیر متغیرهای مسئله باید به‌عنوان یک ساختار مناسب برای حل مسئله فعلی تشکیل شوند. در اصطلاحات الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، این ساختار به ترتیب "کروموزوم" و "موقعیت ذره" نامیده می‌شود، اما در الگوریتم بهینه‌سازی بیوه سیاه (BWO)

به آن "بیوه" گفته می‌شود. در الگوریتم بهینه‌سازی بیوه سیاه (BWO)، راه‌حل بالقوه هر مسئله به‌عنوان عنکبوت بیوه سیاه در نظر گرفته شده است. در شکل زیر فلوچارت الگوریتم نشان داده شده است.



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه

Figure (4): Black Widow Spider Algorithm Flowchart

معیار ارزیابی

در این پژوهش جهت ارزیابی مدل‌های مورد بررسی بمنظور شبیه سازی دبی رودخانه های حوزه آبریز کرخه از شاخص های ارزیابی زیر استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad 1 \leq R \leq 1 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (8)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{y})^2} \quad \infty \leq NS \leq 1 \quad (9)$$

در روابط بالا، R ضریب همبستگی، $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا برحسب m^3/s ، NS معیار نش ساتکلیف، x_i و y_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی i ام، N تعداد گام‌های زمانی، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. علاوه بر معیارهای فوق از نمودارهای پراکنش و سری زمانی مقادیر مشاهداتی-محاسباتی نسبت به زمان نیز جهت مقایسه و تحلیل بیشتر استفاده می‌گردد.

نتایج و بحث

در این پژوهش به منظور شبیه سازی دبی رودخانه های حوزه آبریز کرخه شامل چم انجیر و کشکان واقع در استان لرستان و جلوگیری پل زال واقع در استان خوزستان از مدل رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های موجک، تفنگدار خلاق و عنکبوت بیوه سیاه استفاده شد. پارامترهای دبی با تاخیر زمانی $Q(t)$ ، $Q(t-1)$ ، $Q(t-2)$ و $Q(t-3)$ بعنوان ورودی مدل و پارامتر $Q(t)$ بعنوان خروجی مدل طی سالهای ۱۴۰۲-۱۳۷۲ در نظر گرفته شد. قابل ذکر است تاخیر زمانی پارامترهای دبی و میزان دبی جریان رودخانه براساس ضریب همبستگی این پارامترها با خروجی مدل می باشد بگونه ای که تاخیر زمانی تا مرحله ای صورت پذیرفت که همبستگی معنی داری بین پارامترها وجود داشته باشد (رجایی و همکاران، ۲۰۱۱). هدف کلی از مدل‌های هوشمند بیان ارتباط بین متغیرهایی است که یافتن پیچیدگی آن‌ها در طبیعت کاری دشوار با عدم قطعیت بالا است. دبی جریان از پارامترهای مهم هیدرولوژیکی است که تخمین آن در گام‌های زمانی آینده از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور در جهت کاهش خطا و همچنین برآورد دبی جریان با دقت بالا با استفاده از کمترین پارامترهای ورودی روش ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت که در مقایسه با روش‌های تقریبی به مراتب عملکرد بهتری را ارائه می‌نماید. هدف از این پژوهش دریافت این پیچیدگی طبیعی بین پارامترهای هیدرولوژیکی و ارائه مدل جهت پیش‌بینی در آینده است. در جدول ۲ میزان همبستگی پارامتر دبی جریان طی تاخیرهای مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر است جهت مدل‌سازی ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده جهت تست، بصورت تصادفی، که گستره وسیعی از انواع داده‌ها را پوشش دهد، انتخاب شد (ناگای و همکاران، ۲۰۰۲؛ کیسی و کارهان، ۲۰۰۶). یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی، انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی است. در مدل‌های هوشمند انتخاب ورودی‌های اولیه مناسب و تأثیرگذار در پدیده به منظور آموزش ماهیت سازوکار حاکم بر پدیده باعث بهبود عملکرد خواهد شد بنابراین در سناریو سازی شبیه سازی دبی جریان رودخانه نیز سعی گردید تا مؤثرترین داده‌های مشاهداتی به عنوان داده‌های آموزشی انتخاب شود (دهقانی و همکاران، ۲۰۲۰). بدین منظور ترکیب‌های مختلفی از پارامتر ورودی به منظور دستیابی به مدل بهینه استفاده شد که در جدول ۳ آمده است.

به منظور شبیه سازی دبی رودخانه ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه آبریز کرخه از مدل رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های موجک، تفنگدار خلاق و عنکبوت بیوه سیاه استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است مدل‌های هیبریدی در سناریو شماره چهار که شامل کلیه پارامترهای ورودی به مدل می باشد از خطای کمتری نسبت به سایر سناریوها برخوردار است بنابراین افزایش تعداد پارامترهای مؤثر در مدل‌های هیبریدی مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان منجر به افزایش عملکرد مدل می شود. همچنین کلیه مدل‌ها در تابع کرنل پایه شعاعی از دقت بهتری برخوردار هستند. نتایج مدل‌های مورد بررسی در سناریو شماره چهار در جدول ۴ نشان داده شده است همان‌طور که در جدول مشخص است مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک در ایستگاه چم انجیر با ضریب همبستگی ۰/۹۷۰، کمترین

1. Nagy et al

2. Kisi et al

ریشه میانگین مربعات (m^3/s) $0/022$ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا (m^3/s) $0/011$ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف $0/986$ و در ایستگاه کشکان ضریب همبستگی $0/968$ ، کمترین ریشه میانگین مربعات (m^3/s) $0/025$ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا (m^3/s) $0/014$ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف $0/977$ و ایستگاه پل زال ضریب همبستگی $0/941$ ، کمترین ریشه میانگین مربعات (m^3/s) $0/054$ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا (m^3/s) $0/028$ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف $0/962$ و ایستگاه جلوگیر ضریب همبستگی $0/948$ ، کمترین ریشه میانگین مربعات (m^3/s) $0/048$ ، کمترین میانگین قدر مطلق خطا (m^3/s) $0/025$ و بیشترین ضریب نش ساتکلیف $0/967$ در مرحله صحت سنجی عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

جدول (۲): همبستگی متقابل بین پارامترهای ورودی و خروجی حوضه آبریز کرخه

Table (2): Cross-correlation between input and output parameters of the Karkheh watershed

ایستگاه		Q(t-1)	Q(t-2)	Q(t-3)	Q(t-4)
چم انجیر	Q(t)	0/940	0/921	0/893	0/854
مادیان رود		0/890	0/864	0/814	0/754
افرینه		0/914	0/892	0/865	0/813
کشکان		0/925	0/904	0/876	0/834
پل زال		0/920	0/896	0/885	0/822
جلوگیر		0/924	0/897	0/880	0/826

جدول (۳): ترکیب های منتخب پارامترهای ورودی به مدل

Table (3): Selected combinations of input parameters to the model

شماره	ساختار ورودی	خروجی
۱	Q(t-1)	Q(t)
۲	Q(t-1)Q(t-2)	Q(t)
۳	Q(t-1) Q(t-2)Q(t-3)	Q(t)
۴	Q(t-1) Q(t-2)Q(t-3) Q(t-4)	Q(t)

جدول (۴): عملکرد مدل‌های مورد بررسی

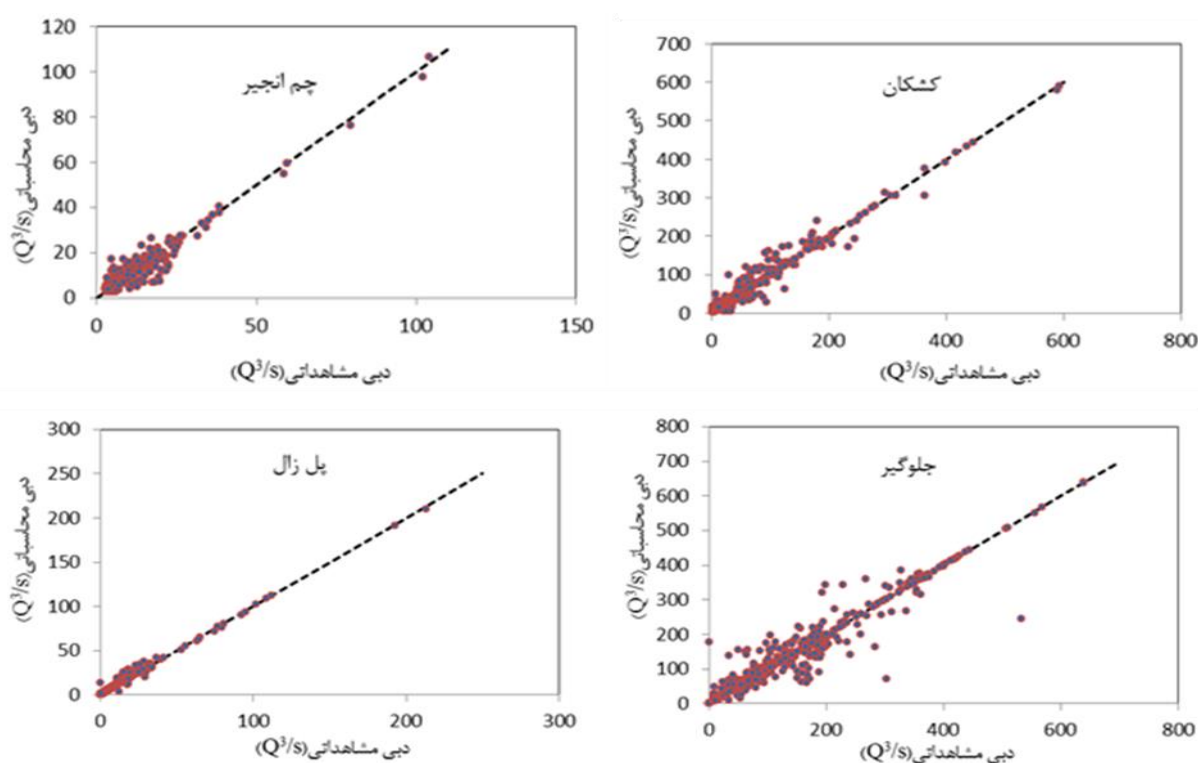
Table (4): Performance of the models under study

رگرسیون بردار پشتیبان-موجک								
صحت سنجی				آموزش				ایستگاه
NS	MAE (m3/s)	RMSE (m3/s)	R2	NS	MAE (m3/s)	RMSE (m3/s)	R2	
۰/۹۸۶	۰/۰۱۱	۰/۰۲۲	۰/۹۷۴	۰/۹۷۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۳	۰/۹۵۶	چم انجیر
۰/۹۷۷	۰/۰۱۴	۰/۰۲۵	۰/۹۶۸	۰/۹۷۲	۰/۰۱۴	۰/۰۳۰	۰/۹۵۱	کشکان
۰/۹۶۲	۰/۰۲۸	۰/۰۵۴	۰/۹۴۱	۰/۹۳۷	۰/۰۳۱	۰/۰۶۴	۰/۹۲۳	پل زال
۰/۹۶۷	۰/۰۲۵	۰/۰۴۸	۰/۹۴۸	۰/۹۵۱	۰/۰۳۰	۰/۰۶۱	۰/۹۳۶	جلوگیر

رگرسیون بردار پشتیبان-تفنگدار خلاق								
صحت سنجی				آموزش				ایستگاه
NS	MAE (m3/s)	RMSE (m3/s)	R2	NS	MAE (m3/s)	RMSE (m3/s)	R2	
۰/۹۷۸	۰/۰۱۵	۰/۰۳۱	۰/۹۶۴	۰/۹۶۸	۰/۰۲۳	۰/۰۴۸	۰/۹۴۲	چم انجیر
۰/۹۶۸	۰/۰۲۱	۰/۰۴۴	۰/۹۵۶	۰/۹۴۸	۰/۰۳۷	۰/۰۶۳	۰/۹۳۲	کشکان
۰/۹۴۱	۰/۰۶۳	۰/۰۸۱	۰/۹۲۷	۰/۹۱۸	۰/۰۷۴	۰/۰۸۸	۰/۸۹۴	پل زال
۰/۹۵۷	۰/۰۵۱	۰/۰۷۷	۰/۹۴۲	۰/۹۲۵	۰/۰۶۳	۰/۰۸۴	۰/۹۱۴	جلوگیر

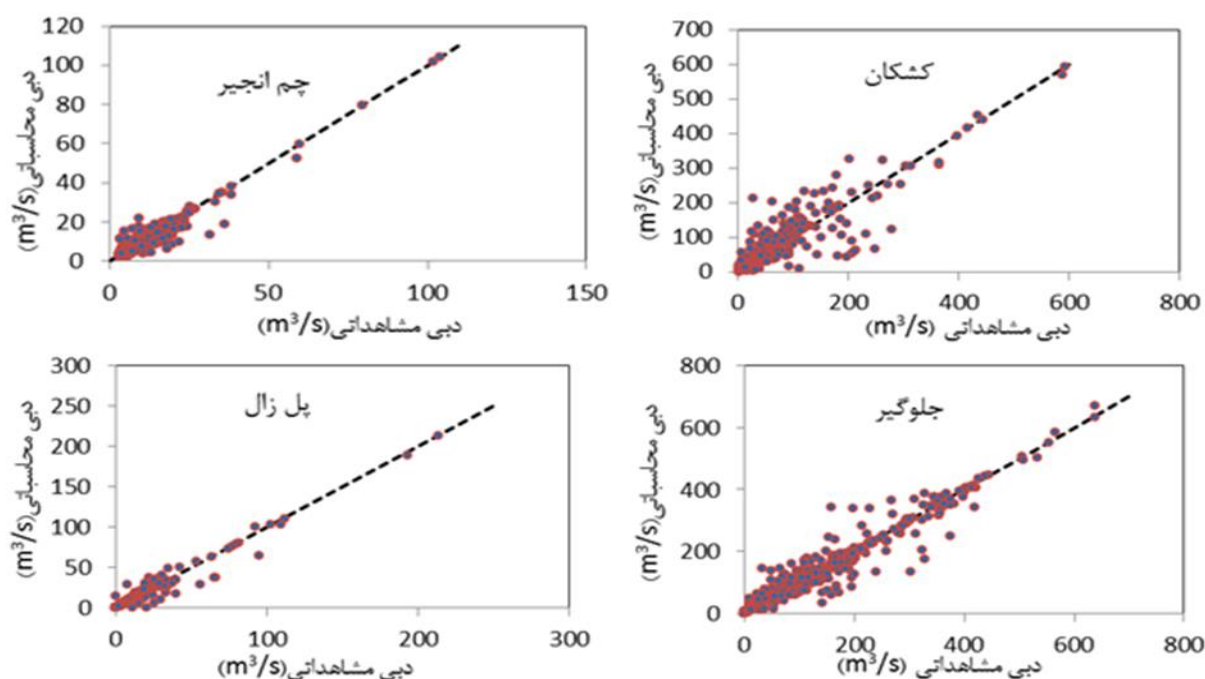
رگرسیون بردار پشتیبان-عنکبوت بیوه سیاه								
صحت سنجی				آموزش				ایستگاه
NS	MAE (m3/s)	RMSE (m3/s)	R2	NS	MAE (m3/s)	RMSE (m3/s)	R2	
۰/۹۷۳	۰/۰۲۲	۰/۰۴۵	۰/۹۵۱	۰/۹۵۲	۰/۰۳۷	۰/۰۵۴	۰/۹۳۶	چم انجیر
۰/۹۶۰	۰/۰۳۲	۰/۰۵۸	۰/۹۴۵	۹۴۴	۰/۰۴۱	۰/۰۶۸	۰/۹۲۶	کشکان
۰/۹۳۰	۰/۰۷۸	۰/۰۹۳	۰/۹۱۰	۰/۹۱۷	۰/۰۸۶	۰/۱۰۵	۰/۸۸۴	پل زال
۰/۹۴۲	۰/۰۵۷	۰/۰۸۴	۰/۹۲۳	۰/۹۲۲	۰/۰۷۴	۰/۰۹۵	۰/۸۸۶	جلوگیر

در شکل ۵-۷ نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نشان داده شده است همان طور که مشاهده می گردد مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک نسبت به مدل های هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان-تفنگدار خلاق و رگرسیون بردار پشتیبان-عنکبوت بیوه سیاه در تخمین اکثر نقاط از جمله مینیمم، ماکزیمم و میانی دقت قابل قبولی از خود نشان داده است بگونه ای که در کلیه ایستگاه های مورد بررسی این مقادیر را نزدیک به مقادیر مشاهداتی تخمین زده است. مدل رگرسیون بردار پشتیبان-تفنگدار خلاق در برآورد برخی مقادیر مینیمم و ماکزیمم عملکرد مطلوبی داشته است اما مدل رگرسیون بردار پشتیبان-عنکبوت بیوه سیاه در برآورد مقادیر میانی دقت مطلوبی از خود نشان داده است.



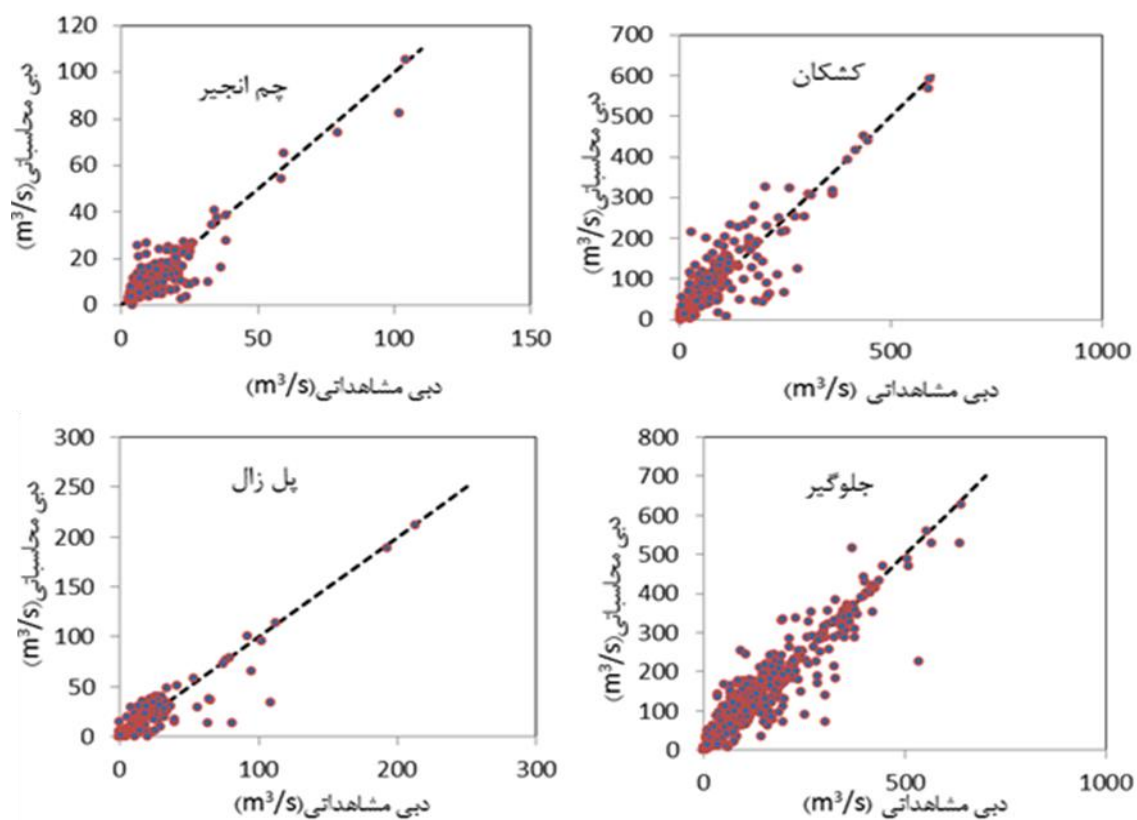
شکل (۵): نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک

Figure (5): Scatter plot of observed and calculated values of the wavelet-support vector regression model



شکل (۶): نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی مدل رگرسیون بردار پشتیبان-تفنگدار خلاق

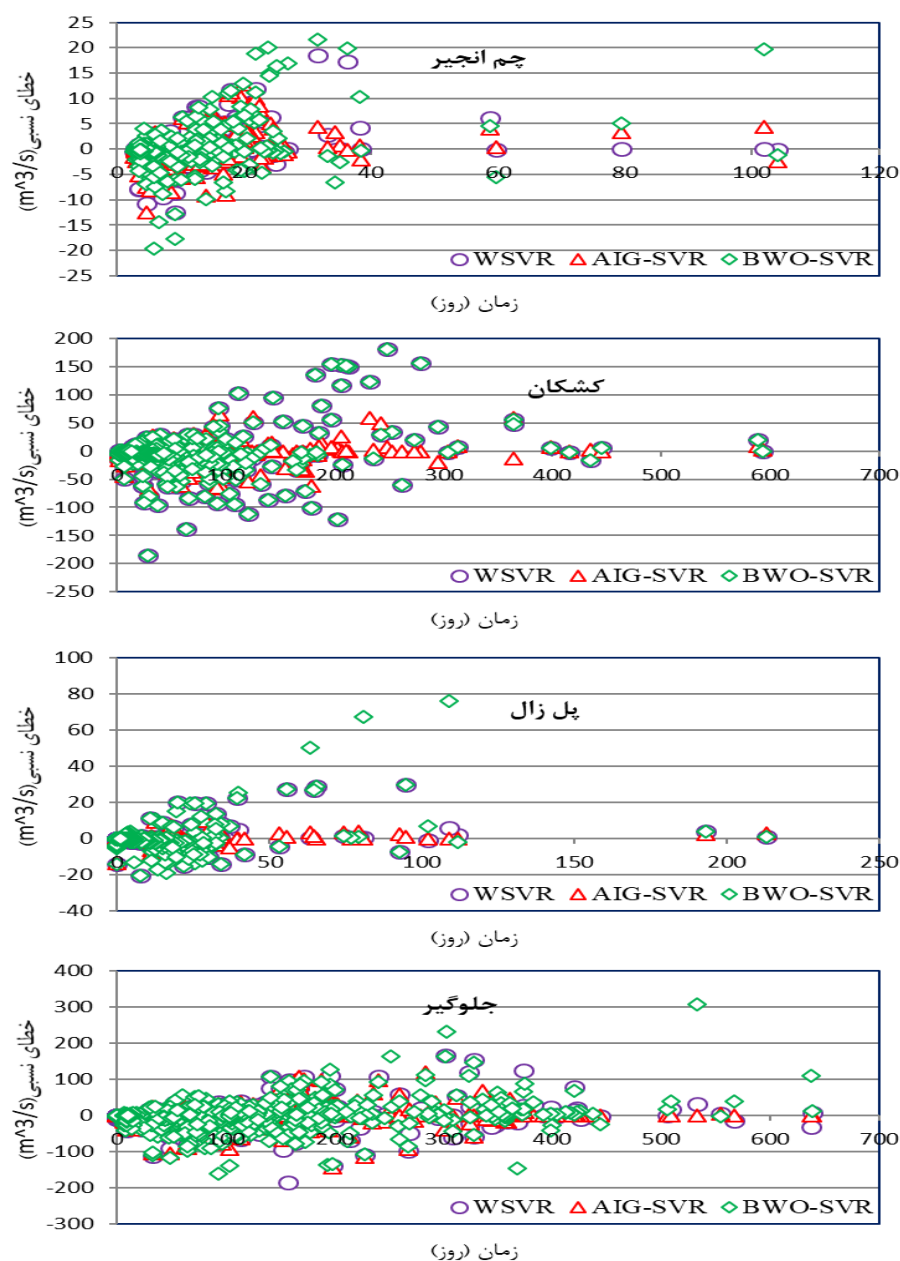
Figure (6): Scatter plot of observed and calculated values of the support vector regression model - Innovative gunner



شکل (۷): نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی مدل رگرسیون بردار پشتیبان-عنکبوت بیوه سیاه

Figure (7): Scatter plot of observed and calculated values of the support vector regression model - black widow spider

همچنین در شکل ۸ نمودار خطای نسبی مدلهای مورد بررسی نشان داده شده است همانطور که مشاهده می گردد مدل رگرسیون بردار پشتیبان - موجک از خطای نسبی کمتری نسبت به سایر مدلها در کلیه ایستگاهها برخوردار است. همانطور که مشاهده می گردد در ایستگاه چم انجیر و پل زال مدل رگرسیون بردار پشتیبان-عنکبوت بیوه سیاه عملکرد ضعیفی دارد و در ایستگاه جلوگیر و کشکان مدلها تقریباً از عملکرد مناسبی برخوردار است.



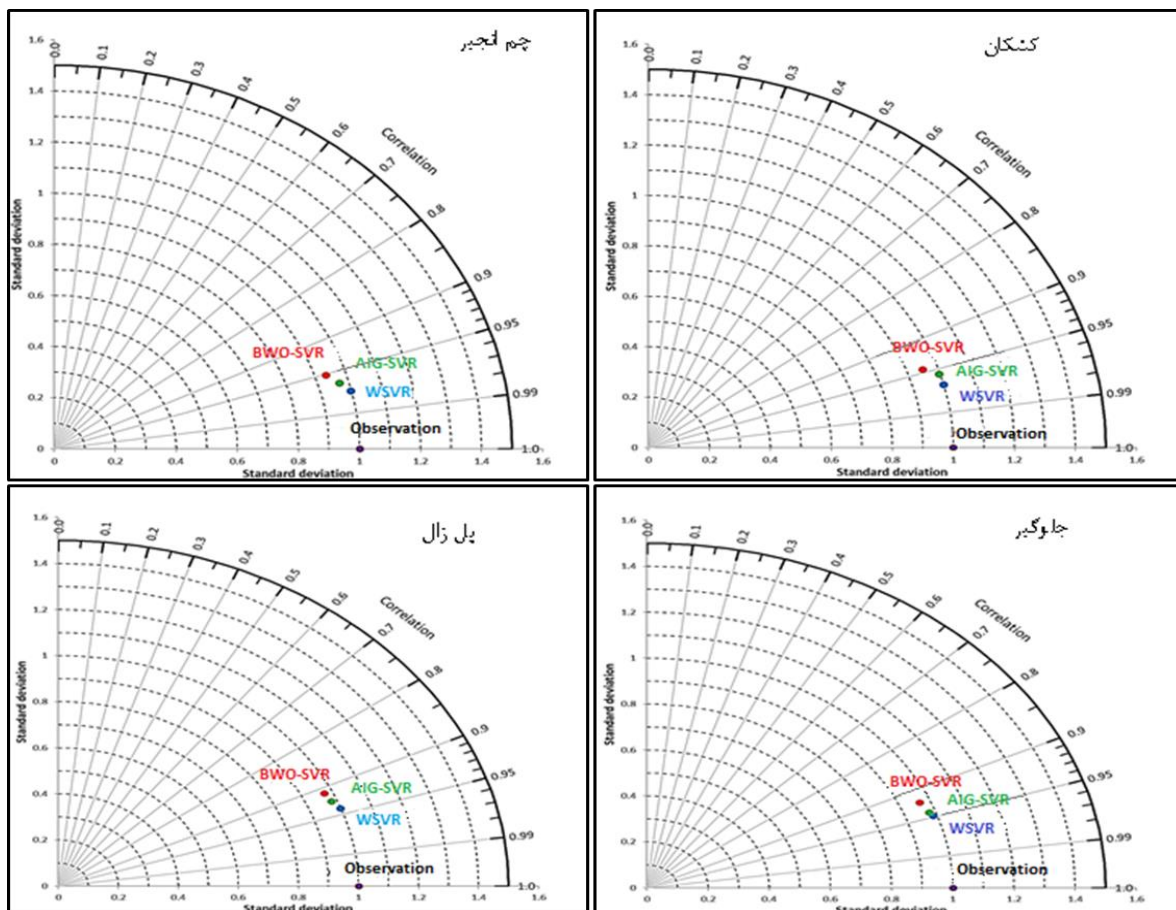
شکل (۸): نمودار خطای نسبی مدلهای مورد بررسی

Figure (8): Relative error chart of the models under study

همچنین در شکل ۹ نمودار تیلور مدل‌های مورد بررسی قابل مشاهده است مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک از عملکرد بهتری برخوردار است زیرا انحراف معیار پیش‌بینی شده دبی رودخانه نزدیک‌ترین فاصله به انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی را دارد و ضریب همبستگی نیز بالاترین میزان را نشان می‌دهد. در ایستگاه چم انجیر و پل زال عملکرد مدل‌های مورد بررسی فاصله نزدیکی نداشته اما در ایستگاه‌های جلوگیر و کشکان مدل‌های مورد بررسی فاصله مناسبی با یکدیگر دارند.

بنابراین مدل رگرسیون بردار پشتیبان-موجک نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی از عملکرد بهتری برخوردار است که این نتایج با پژوهش‌های زیدعلی نژاد و دهقانی (۲۰۲۳) و باباعلی و دهقانی (۲۰۲۲) مطابقت دارد در تحلیل این نتایج می‌توان بیان داشت برتری این مدل ناشی از تبدیل موجک می باشد که سیگنال‌های دریافتی را به دو دسته بالاگذر و پایین گذر تقسیم نموده و در دسته بالاگذر قدرت تفکیک افزایش یافته که سبب می‌گردد مقادیر بیشینه سیگنال با دقت مطلوبی تجزیه و تحلیل گردد.

مدل رگرسیون بردار پشتیبان- الگوریتم تفنگدار خلاق ترکیبی از بهینه‌سازی پیوسته و گسسته است که زمان رسیدن به یک راه حل بهینه را در یک منطقه جستجوی وسیع کاهش می‌دهد زیرا از راه‌حل‌های بهینه محلی اجتناب می‌کند. این امر باعث می شود که الگوریتم برای حل مسائل غیر خطی با ابعاد بزرگ با سرعت مناسب در همگرایی به سمت یک جواب بهینه قابل قبول باشد. که این امر سبب گردیده این مدل از دقت بالایی نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار باشد.



شکل (۹): نمودار تیلور مدل‌های مورد بررسی

Figure (9): Taylor diagram of the models under study

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر مطالعه موردی جهت ارزیابی عملکرد مدل فرا ابتکاری هیبریدی رگرسیون بردار پشتیبان با الگوریتم‌های موجک، تفنگدار خلاق و عنکبوت بیوه سیاه به منظور برآورد جریان رودخانه ایستگاههای هیدرومتری چم انجیر، کشکان، پل زال و جلوگیر واقع در حوضه آبریز کرخه صورت گرفت. جهت مدل‌سازی از پارامترهای دبی جریان با تاخیرهای زمانی روزانه مختلف طی سالهای ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. جهت ارزیابی مدل‌های موردبررسی از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و ضریب نش ساتکلیف استفاده شد. همچنین جهت تحلیل نتایج از نمودارهای سری زمانی، خطای نسبی و تیلور استفاده گردید. نتایج تحقیق طبق سناریوهایی متشکل از پارامترهای ورودی نشان داد که در کلیه مدل‌های موردبررسی افزایش تعداد پارامترهای مؤثر منجر به عملکرد بهتر در برآورد جریان رودخانه می‌شود. علاوه بر این، نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی نشان داد مدل رگرسیون بردار پشتیبان موجک از دقت بالا و خطای ناچیزی برخوردار است. همچنین مطابق نمودارهای موردبررسی مدل رگرسیون بردار پشتیبان موجک مقادیر جریان رودخانه را نزدیک به مقدار واقعی‌شان برآورد نموده است که در نمودارهای سری زمانی و تیلور مشهود می‌باشد. تبدیل موجک با ارائه تحلیل زمان فرکانس، تحلیل چند رزولوشن، قابلیت حذف نویز، انعطاف‌پذیری بالا سبب افزایش دقت مدل رگرسیون بردار پشتیبان گردیده است. همچنین در الگوریتم‌های تفنگدار خلاق و عنکبوت بیوه سیاه به دلیل به عدم گسترش فضای جستجو دقت مدل کاهش یافته است. درمجموع، پیشنهاد می‌گردد به منظور ارزیابی دقت مدل منتخب در سایر مناطق کشور پیش بینی جریان رودخانه صورت گیرد.

References

- Alizadeh, F., Gharamaleki, A., Jalilzadeh, M. and Akhoundzadeh, A. 2020. Prediction of river stage-discharge process based on a conceptual model using EEMD-WT-LSSVM Approach, *Water Resources*. 47(2), 41-53.
- Basak, D., Pal, S., and Patranabis, D.C.(2007). Support vector regression. *Neural Inf Process*, 11(2), 203-225.
- Brierley GJ, Fryirs KA (2013) *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*. John Wiley & Sons.
- Dehghani, R., Babaali, H.(2023). Evaluation of Statistical Models and Modern Hybrid Artificial Intelligence in Simulation of Runoff Precipitation Process. *Sustain. Water Resour. Manag*, 8: 154-172. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00743-9>.
- Dehghani, R., Torabi Poudeh, H., Younesi, H., Shahinejad, B. 2020.. Daily streamflow prediction using support vector machine-artificial flora (SVM-AF) hybrid model. *Acta Geophys*. **68(7)**, 1763–1778 . <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00472-7>.
- Dehghani, R., Torabi Poudeh, H., Younesi, H., Shahinejad, B.(2020). Daily Streamflow Prediction Using Support Vector Machine-Artificial Flora (SVM-AF) Hybrid Model. *Acta Geophysica*, 68(6): 51-66.
- Dehghani, R., Torabi, H.(2021). Dissolved oxygen concentration predictions for running waters with using hybrid machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2): 64-78. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01253-x>.
- Goorani Z, Shabanlou S (2021) Multi-objective optimization of quantitative-qualitative operation of water resources systems with approach of supplying environmental demands of Shadegan Wetland. *J Environ Manage* 292:112769.
- Kisi, O., Karahan, M., Sen, Z. (2006). River suspended sediment modeling using fuzzy logic approach. *Hydrol Process*, 20(2): 4351-4362.

- Kohansarbaz, A., Yaghoubi, B., Shabanlou, S. Yosefvand. F., Izadbakhsh, M.A., Rajabi, A. 2024. . Simulation of monthly river flow using SVR neural network improved with population-based optimization algorithms. Model. Earth Syst. Environ. **10**(4), 4525–4547 <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02040-0>.
- Marlia M, Syaharuddin S, Handy MRN, Subiyakto B, Ilhami MR (2022) Changes in the behavior of the riverside community of Banua Anyar Village towards river management policies. Kalim- antan Soc Stud J 4(1):48–55.
- Mazraeh A, Bagherifar M, Shabanlou S, Ekhlasmad R (2024) A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: a combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. Groundw Sustain Dev 24:101062.
- Nagy, H., Watanabe, K., Hirano, M. (2002). Prediction of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model. Journal of Hydraulics Engineering, 128: 558-559.
- Parisouj P, Mohebzadeh H, Lee T (2020) Employing machine learning algorithms for streamflow prediction: a case study of four river basins with different climatic zones in the United States. Water Resour Manage 34(13):4113–4131.
- Pijarski, P., & Kacejko, P. 2019. A new metaheuristic optimization method: the algorithm of the innovative gunner (AIG). Engineering Optimization, 51(12):2049-2068.
- Rajaei, T., Nourani, V., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O. 2011. River suspended sediment load prediction: application of ANN and wavelet conjunction model. J Hydrol Eng, 16(2):613–627.
- Sahoo, A., Singh, U. K., Kumar, M. H., & Samantaray, S. (2021). Estimation of Flood in a River Basin Through Neural Networks: A Case Study. In Communication Software and Networks (pp. 755-763). Springer, Singapore.
- Sebastian, P.A., & Peter, K.V. 2009. Spiders of India. Universities press.
- Shin, S., Kyung, D., Lee, S., Taik & Kim, J., and Hyun, J. (2005). An application of support vector machines in bankruptcy prediction model. Expert Systems with Applications, 28(4), 127-135.
- Vapnik, V., Chervonenkis, A. (1991). The necessary and sufficient conditions for consistency in the empirical risk minimization method. Pattern Recognition and Image Analysis, 1(3), 283-305.
- Vapnik, V.N. (1995). The nature of statistical learning theory. Springer, New York, 3(1), 250-320.
- Vapnik, V.N. (1998). Statistical learning theory. Wiley, New York, 4(1), 250-320.
- Wang, D., Safavi, A.A., and Romagnoli, J.A. (2000) Wavelet-based adaptive robust M-estimator for non-linear system identification. AIChE Journal, 46(4), 1607-1615.
- Yildiz BS, Pholdee N, Bureerat S, Yildiz AR, Sait SM (2022) Enhanced grasshopper optimization algorithm using elite opposition-based learning for solving real-world engineering problems. Eng Com put 38(5):4207–4219.
- Zeidalinejad, N., Dehghani, R. (2023). Use of meta-heuristic approach in the estimation of aquifer's response to climate change under shared socioeconomic pathways. Groundwater for Sustainable Development, 20(4): 112-132.
- Zhao G, Bates P, Neal J, Pang B (2021) Design flood estimation for global river networks based on machine learning models. Hydrol Earth Syst Sci 25(11):5981–5999.
- Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Adamowski, J., Ramezani-Charmahineh, A. (2016). Evaluation of data driven models for river suspended sediment concentration modeling. Journal of Hydrology, 535(4), 457-472.