

## Performance evaluation of the conceptual IHACRES model in simulating runoff in data-scarce semi-arid watersheds (case study: Cham Siah river)

F.Avazpour<sup>1</sup>, M.R.Hadian<sup>2\*</sup> and A.Talebi<sup>3</sup>

### Extended Abstract

#### Introduction:

In many watersheds, particularly in semi-arid regions, the lack of long-term hydrometric data and the complexity of hydrological ecosystems pose major challenges for analyzing basin behavior. The difficulties of obtaining accurate and sufficient hydrological data in these regions necessitate the use of conceptual hydrological models that can simulate runoff processes even with limited or incomplete data. Among such models, IHACRES has gained wide recognition for its simple structure, low data requirements, and reliable performance in diverse climatic conditions. Numerous studies worldwide have demonstrated its effectiveness in simulating rainfall-runoff processes at various temporal scales and under climate change scenarios. Despite IHACRES has been successfully applied in humid, semi-arid, and data-scarce catchments, its performance has not yet been evaluated in the Seyedabad watershed, located in a semi-arid region of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, Iran. This study aimed to calibrate and validate the IHACRES model at daily and monthly scales for this understudied basin. By addressing this research gap, the current study contributed to the localization of hydrological modeling approaches in semi-arid environments of Iran.

#### Materials and Methods:

This study was conducted in the Seyedabad watershed, located in a semi-arid region of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province in southwestern Iran. The watershed covers an area of approximately 795 km<sup>2</sup> and includes the Cham Siah river, a tributary of the Kheirabad river. The basin lies between 30° to 41° N latitude and 43° to 50° E longitude. The Seyedabad watershed is crucial for providing water for drinking, agriculture, and ecological purposes in the region. The semi-arid climate leads to significant variations in rainfall and runoff, making accurate hydrological modeling essential for managing the water resources effectively. Daily and monthly climate data (including precipitation and temperature) were obtained from the Seyedabad meteorological station for the period 2007 to 2017. Streamflow data corresponding to this period were sourced from the Cham Siah hydrometric station. For modeling purposes, the dataset was divided into two segments: calibration and validation. Daily data from 2010 to 2017 and monthly data from March 2008 to August 2013 were used for calibration, while the remaining years were allocated for model validation. To simulate rainfall-runoff processes, the IHACRES hydrological model (version 2.1) was utilized. This model integrates a non-linear module to convert rainfall into effective rainfall and a linear module for streamflow routing. Calibration of model parameters was conducted using a manual trial-and-error approach to optimize performance. Key parameters included the drying rate coefficient ( $f$ ), temperature modulation coefficient ( $c$ ), and the catchment drying time constant ( $\tau_w$ ), along with routing parameters such as  $\tau_q$  (quick flow recession constant),  $\tau_s$  (slow flow recession constant), and  $sv$  (scaling factor). The model's performance was evaluated using multiple statistical metrics: Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), Coefficient of Determination ( $R^2$ ), Mean Squared Error (MSE), and Root Mean Square Error (RMSE). These indices were calculated separately for daily and monthly time steps to assess the model's predictive capabilities in varying temporal resolutions. The approach enabled an in-depth understanding of IHACRES performance in semi-arid, data-scarce environments.

#### Results and Discussions:

The IHACRES model was successfully calibrated and validated for the Seyedabad watershed at both daily and monthly time scales. The model's performance indicators revealed acceptable accuracy in simulating

<sup>1</sup> Ph.D Graduate, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Department of Science and Water Engineering, School of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\* Corresponding Author: [mr\\_hadian@yazd.ac.ir](mailto:mr_hadian@yazd.ac.ir)

streamflow, especially considering the semi-arid nature of the basin and limited data availability. At the daily time scale, the model showed moderate accuracy, with a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.51 during the calibration period and 0.47 during the validation period. The Coefficient of Determination ( $R^2$ ) values were 0.55 and 0.49, respectively, indicating a fair fit between observed and simulated streamflow. The Root Mean Square Error (RMSE) values were 1.26 m<sup>3</sup>/s for calibration and 1.38 m<sup>3</sup>/s for validation, suggesting relatively low error levels. These results indicated that while the model successfully captured the daily dynamics of streamflow, the accuracy was limited by the complexity of the runoff processes and the natural variability of precipitation and temperature in the semi-arid environment. The performance of the model improved significantly at the monthly time scale. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) values reached 0.71 during the calibration phase and 0.65 during validation, reflecting better accuracy in simulating the runoff processes over longer time periods. The corresponding Coefficient of Determination ( $R^2$ ) values were 0.72 and 0.67, and the RMSE values were 0.94 m<sup>3</sup>/s and 1.09 m<sup>3</sup>/s, respectively. These improved results at the monthly scale suggested that the IHACRES model was more effective at simulating aggregated flow patterns over extended periods, making it particularly suitable for long-term water resource assessments in semi-arid regions. The improved model performance at the monthly level could be attributed to the smoothing effects of aggregation, which reduces the sensitivity to short-term variability in runoff. Graphical comparisons between observed and simulated flows confirmed the model's ability to reproduce seasonal variations in streamflow and to predict peak discharge events accurately. However, some discrepancies were observed, particularly during low-flow conditions and high-intensity rainfall periods. Despite these differences, the overall performance of the model in simulating streamflow behavior in the Seyedabad watershed was acceptable. These findings demonstrate that the IHACRES model, with its conceptual structure and low data requirements, can be successfully applied to semi-arid catchments with limited hydrological data.

### Conclusion:

This study evaluated the performance of the conceptual IHACRES model in simulating the streamflow of the Cham Siah river, located in the Kheyrahad watershed of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, Iran. Daily and monthly rainfall, temperature, and discharge data from the Seyedabad station (2007–2017) were used as model inputs. The results of the calibration and validation phases demonstrated that IHACRES could simulate the hydrological behavior of the Seyedabad watershed with reasonable accuracy. The model performed better at the monthly scale, likely due to the natural smoothing of data and reduced sensitivity to short-term variations in streamflow. The model's performance at the daily scale was also acceptable, with moderate accuracy in simulating the runoff dynamics of the watershed. Given its simplicity, low data requirements, and efficient performance in semi-arid conditions, IHACRES is a suitable tool for simulating and predicting runoff in data-scarce basins. Its ability to simulate long-term water flow patterns makes it particularly useful for water resource management in semi-arid regions like Iran. The model's application in combination with climate change scenarios can provide valuable insights into the potential impacts of future climatic changes on runoff and water availability. Further research is recommended to integrate IHACRES with other models, such as SWAT or Artificial Neural Networks (ANN), to enhance its predictive capabilities and improve performance under different environmental conditions.

**Keywords:** Hydrological Model, IHACRES, Kheyrahad Watershed, Runoff Prediction.

**Citation:** Avazpour, F., Hadian, M.R., Talebi, A., 2026. Performance evaluation of the conceptual IHACRES model in simulating runoff in data-scarce semi-arid watersheds (case study: Cham Siah river). Iranian Water Research Journal, 20(60), pp. 1-16. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15308.2699>

**Copyright:** © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> ).



## ارزیابی عملکرد مدل مفهومی IHACRES در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های نیمه‌خشک با داده‌های حداقلی (مطالعه موردی: رودخانه چم‌سیاه)

فاطمه عوض‌پور<sup>۱</sup>، محمدرضا هادیان<sup>۲\*</sup> و علی طالبی<sup>۳</sup>

### چکیده

با توجه به محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری همه پارامترهای مؤثر بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز، استفاده از مدل‌های مفهومی ساده و کارآمد که قادر به شبیه‌سازی رواناب سطحی با دقت مناسب و بر اساس داده‌های حداقلی هستند، ضروری به نظر می‌رسد. این مدل‌ها می‌توانند به‌ویژه در مناطقی که محدودیت‌های داده‌ای و منابع وجود دارد، ابزاری مؤثر در تحلیل و مدیریت منابع آبی باشند. در این راستا، هدف تحقیق حاضر بررسی توانایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان رودخانه در یک حوضه نیمه‌خشک با داده‌های محدود است. این موضوع تاکنون در حوضه‌ی سیدآباد واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد بررسی نشده است. نوآوری اصلی پژوهش در ارزیابی عملکرد مدل IHACRES در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه در این منطقه و تحلیل پایداری آن در شرایط اقلیمی خاص آن منطقه است. به این منظور، از داده‌های بارش، دما و دبی ایستگاه سیدآباد در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ استفاده شده و کالیبراسیون مدل به‌صورت دستی انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل در مقیاس ماهانه دقت بالاتری نسبت به مقیاس روزانه دارد و قادر است رفتار کلی جریان را با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۶۳ در مرحله کالیبراسیون و ۰/۴۹ در مرحله اعتبارسنجی شبیه‌سازی کند. این یافته‌ها حاکی از کارایی مناسب مدل در شرایط داده‌محدود مناطق نیمه‌خشک بوده و استفاده از آن برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی جریان در حوضه‌های مشابه پیشنهاد می‌شود. همچنین، پژوهش حاضر می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات و کاربردهای گسترده‌تری در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از داده‌های محدود در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی رواناب، حوضه‌ی آبخیز خیرآباد، مدل هیدرولوژیکی IHACRES

ارجاع: عوض‌پور، ف.، هادیان، م.ر.، طالبی، ع.، ۱۴۰۵. ارزیابی عملکرد مدل مفهومی IHACRES در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های نیمه‌خشک با داده‌های حداقلی (مطالعه موردی: رودخانه چم‌سیاه). مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۰)، صص. ۱-۱۶. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15308.2699>

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران-دانشگاه یزد-یزد.

۲- استادیار مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران-دانشگاه یزد-یزد.

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

\* نویسنده مسئول: [mr\\_hadian@vazd.ac.ir](mailto:mr_hadian@vazd.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

## مقدمه

در بسیاری از حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری با آمار بلندمدت و پیچیدگی اکوسیستم‌های هیدرولوژیکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ها است. این شرایط، ضرورت بهره‌گیری از مدل‌هایی را ایجاد می‌کند که امکان برآورد رواناب ناشی از بارش را حتی در حوضه‌های فاقد ایستگاه یا دارای داده‌های ناقص فراهم کنند (Croke et al., 2005). مدل‌های بارش-رواناب، به‌ویژه مدل IHACRES، به‌دلیل ساختار ساده و ورودی‌های محدود، توانسته‌اند در شرایط مختلف اقلیمی عملکرد مطلوبی از خود نشان دهند (Bayatikhatabi et al., 2024). این مدل در بسیاری از مطالعات در مناطق گوناگون جهان به‌کار گرفته شده است و به‌ویژه برای شبیه‌سازی جریان خروجی حوضه‌ها در مناطق با داده‌های محدود کاربرد دارد.

Ghorbani et al. (2021) با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه زولاچای، از مدل LARS-WG برای پیش‌بینی بارش و دما تا سال ۲۰۸۰ تحت سناریوهای RCP استفاده کردند و سپس مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب بر اساس داده‌های آینده به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که میانگین دبی سالانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه، بین ۳۳/۳۴ درصد تا ۳۹/۴۲ درصد افزایش خواهد یافت. این مطالعه توان بالقوه IHACRES را در تحلیل اثرات اقلیمی بلندمدت بر جریان رودخانه تأیید می‌کند. Fattahi et al. (2022) با هدف بهبود شبیه‌سازی رواناب در ۱۹ زیرحوضه گیلان، مدل IHACRES را با مدل هوشمند GMDH ترکیب کردند. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به IHACRES دارد و در برخی زیرحوضه‌هایی که IHACRES عملکرد ضعیفی داشت، توانست شبیه‌سازی قابل قبولی ارائه دهد. به‌طور میانگین، ادغام مدل‌ها باعث افزایش ۴۴ درصد در شاخص NSE در مرحله کالیبراسیون شد. این پژوهش برتری مدل‌های ترکیبی مفهومی-داده‌محور را در شرایط داده‌محدود تأیید می‌کند. (Nazeri et al., 2023) با هدف ارزیابی دقت و کارایی مدل بارش-رواناب IHACRES در شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه سیمینه‌رود در جنوب حوضه دریاچه ارومیه، از دو رویکرد مدل‌سازی جنگل تصادفی<sup>۱</sup> و شبیه‌سازی مبتنی بر کاپولا استفاده کرد. در این مطالعه، یک مدل کاپولای سه‌متغیره با استفاده از داده‌های روزانه دبی، بارش و دما در دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۸ ایجاد شد و خانواده مدل‌های Vine و

چگالی‌های شرطی آن‌ها برای پیاده‌سازی مدل کاپولا به کار رفت. پس از واسنجی مدل IHACRES و انتخاب دنباله درختی متناسب با داده‌ها، شبیه‌سازی بارش-رواناب انجام شد. ارزیابی عملکرد با شاخص‌های RMSE و NSE و همچنین نمودار ویولن و تیلور نشان داد که مدل Vine-کاپولا به‌ترتیب حدود ۱۴/۵ و ۱۶/۵ درصد RMSE را نسبت به مدل‌های IHACRES و جنگل تصادفی کاهش می‌دهد. (Jaberzadeh et al., 2024) در پژوهشی روی حوضه‌ی آبریز دز (با وسعت ۱۶۰۰۰ کیلومتر مربع) با هدف شبیه‌سازی بارش-رواناب در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰، عملکرد دو مدل SWAT و IHACRES را با استفاده از داده‌های اقلیمی مرکز جهانی NCEP CFSR بررسی کردند. مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های  $R^2$  و NSE ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که مدل SWAT با مقادیر  $R^2=0.75$  و  $NSE=0.78$  در مرحله کالیبراسیون عملکرد بهتری نسبت به IHACRES داشت. اگرچه IHACRES نیز توانست رواناب را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند ( $NSE=0.69$ ) و  $R^2=0.63$ . این مطالعه بیانگر قابلیت به‌کارگیری مدل‌های مفهومی و فیزیکی در شرایط کمبود داده است و اهمیت منابع اقلیمی جهانی را برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی برجسته می‌سازد.

Rezvani et al. (2024) عملکرد سه مدل بارش-رواناب IHACRES، AWBM و Tank را در حوضه‌ی سیل‌خیز گالیکش در دوره‌ای ۳۰ ساله بررسی کردند. نتایج نشان داد مدل‌های IHACRES و AWBM عملکرد مشابه و قابل قبولی دارند، در حالی که مدل Tank ضعیف‌تر عمل کرد. تحلیل حساسیت نشان داد پارامترهای کلیدی مانند  $f$  در IHACRES بیشترین تأثیر را بر نتایج دارند. هر سه مدل در دوره‌های مرطوب دقت بالایی داشتند، اما در دوره‌های خشک عملکرد قابل قبولی نداشتند. در مجموع، IHACRES در شبیه‌سازی جریان کم‌دبی نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشت، اما برای بهبود دقت در شرایط خشک‌سالی، نیاز به توسعه بیشتر مدل‌ها وجود دارد. (Bayatikhatabi et al., 2024) با هدف بررسی عملکرد مدل IHACRES در شرایط اقلیم نیمه‌خشک، اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه‌ی آبخیز قره‌سو واقع در استان کرمانشاه کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های روزانه شامل بارش، دما و دبی، مدل را در دوره ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۰ واسنجی و در بازه ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد که گرچه مدل در برآورد دبی‌های اوج با اندکی کم‌برآورد مواجه بوده، اما در مجموع

<sup>1</sup> Random Forest

اقلیمی خاص منطقه تحلیل و اعتبارسنجی نماید. این مطالعه با پر کردن خلأ مطالعاتی موجود، گامی نوین در بومی‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی برای مناطق نیمه‌خشک ایران به‌شمار می‌رود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه‌ی مورد مطالعه

پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب در حوضه‌ی آبخیز سیدآباد واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد انجام شده است. این حوضه با مساحت ۷۹۵ کیلومتر مربع، یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه‌ی بزرگ‌تر خیرآباد است که تأمین‌کننده منابع آب شرب، کشاورزی و اکولوژیکی منطقه می‌باشد. جغرافیای حوضه‌ی سیدآباد در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۴۳ تا ۵۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۴۱ درجه شمالی قرار دارد. رودخانه خیرآباد و شاخه آن، چم‌سیاه، نقش کلیدی در تأمین آب دارد و حوضه‌ی خیرآباد با وسعت ۴۲۳۹ کیلومتر مربع، از مناطق تأثیرگذار استان به‌شمار می‌رود. اقلیم نیمه‌خشک تا خشک منطقه باعث نوسانات قابل توجه در بارش و رواناب سالانه می‌شود، که این امر استفاده از مدل‌های دقیق هیدرولوژیکی را ضروری می‌سازد. همچنین، پوشش اراضی در این منطقه شامل مرتع، اراضی کشاورزی و مناطق صخره‌ای است که بر واکنش‌های هیدرولوژیکی حوضه تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه از داده‌های هیدرومتری ایستگاه سیدآباد برای ورودی‌های مدل استفاده شده است. موقعیت مکانی ایستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.

عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی مقادیر جریان حداقل و میانگین ارائه داده است. ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) به‌ترتیب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی حدود ۰/۶۴ و ۰/۶۲ گزارش شد که حاکی از کارایی مناسب مدل در این حوضه داده‌محدود است. (Pourhosein and Moradzadeh (2024). اهداف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش، رواناب و خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه‌ی آبریز رودزرد، از مدل اقلیم منطقه‌ای LARS-WG و مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده کردند. داده‌های تاریخی دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ به‌عنوان دوره پایه و سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای پیش‌بینی آینده به‌کار رفت. نتایج نشان داد میانگین دمای سالانه حدود ۱/۰۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و الگوی فصلی بارش تغییر خواهد کرد؛ به‌طوری‌که در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس افزایش و در سپتامبر و اکتبر کاهش پیش‌بینی می‌شود. الگوی رواناب نیز روندی مشابه بارش داشت. همچنین ارزیابی شاخص SPI حاکی از افزایش فراوانی و شدت خشکسالی در آینده نسبت به دوره پایه بود. این یافته‌ها بر ضرورت تدوین راهبردهای سازگاری و مدیریت منابع آب در حوضه‌ی رود زرد تأکید دارد.

با وجود کاربرد گسترده‌ی مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان‌های سطحی در اقلیم‌های متنوع، تاکنون عملکرد این مدل در حوضه‌ی آبخیز سیدآباد - واقع در منطقه‌ای نیمه‌خشک از استان کهگیلویه و بویراحمد - مورد بررسی علمی قرار نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر برای نخستین‌بار با هدف کالیبراسیون و ارزیابی دقت مدل IHACRES در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه در این حوضه طراحی و اجرا شده و می‌کوشد تا کارایی مدل را در شرایط



شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های حوضه‌ی آبخیز خیرآباد و رودخانه چم‌سیاه

## داده‌های ورودی مدل

در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی آبدهی رودخانه با استفاده از مدل IHACRES، داده‌های مشاهداتی شامل دبی جریان، بارش و دمای هوا از ایستگاه سیدآباد در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ به‌عنوان ورودی مدل استفاده شدند. داده‌ها به دو صورت روزانه و ماهانه جمع‌آوری و تحلیل شدند. برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل، دوره‌های زمانی با استفاده از رویکرد سعی و خطا انتخاب شدند تا بهترین نتایج به‌دست آیند. در مقیاس روزانه، داده‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ برای کالیبراسیون و ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ برای اعتبارسنجی استفاده شد. در مقیاس ماهانه، دوره‌ی کالیبراسیون از مارس ۲۰۰۸ تا اگوست ۲۰۱۳ و دوره‌ی اعتبارسنجی شامل داده‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۸ و ۲۰۱۳-۲۰۱۷ بود (جداول ۱ و ۲).

جدول ۱- دوره‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی روزانه

بازه‌ی زمانی	شروع دوره	پایان دوره
دوره مورد بررسی	۲۱ مارس ۲۰۰۷	۳۱ دسامبر ۲۰۱۷
دوره کالیبراسیون	۲۶ فوریه ۲۰۱۰	۳۱ دسامبر ۲۰۱۷
دوره اعتبارسنجی	۲۱ مارس ۲۰۰۷	۲۵ فوریه ۲۰۱۰

جدول ۲- دوره‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی ماهانه

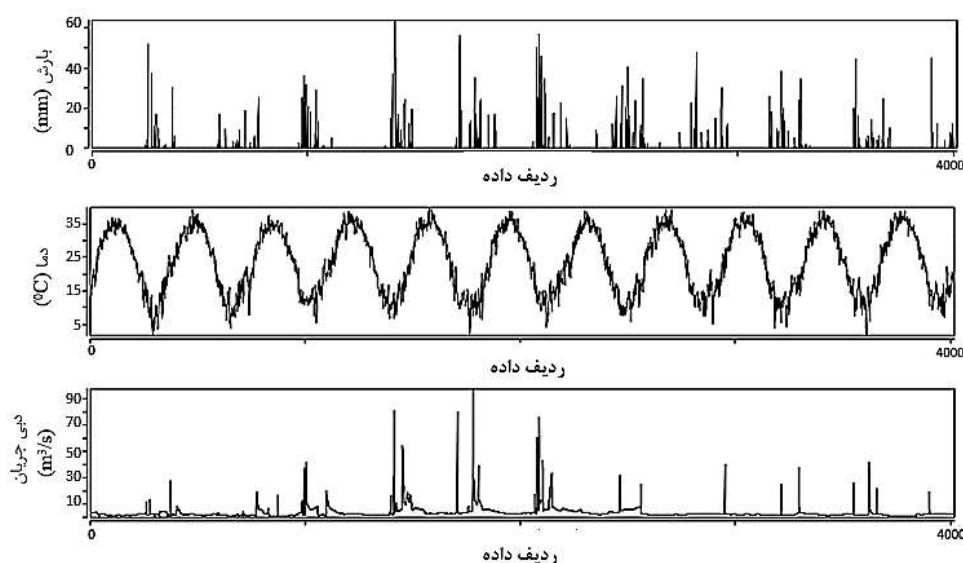
بازه‌ی زمانی	شروع دوره	پایان دوره
دوره مورد بررسی	۲۱ مارس ۲۰۰۷	۲۳ دسامبر ۲۰۱۷
دوره کالیبراسیون	۱۵ مارس ۲۰۰۸	۱۶ اگوست ۲۰۱۳
دوره اعتبارسنجی	۲۱ مارس ۲۰۰۷	۱۴ مارس ۲۰۰۸
	۱۷ اگوست ۲۰۱۳	۲۳ دسامبر ۲۰۱۷

## تحلیل سری زمانی داده‌ها

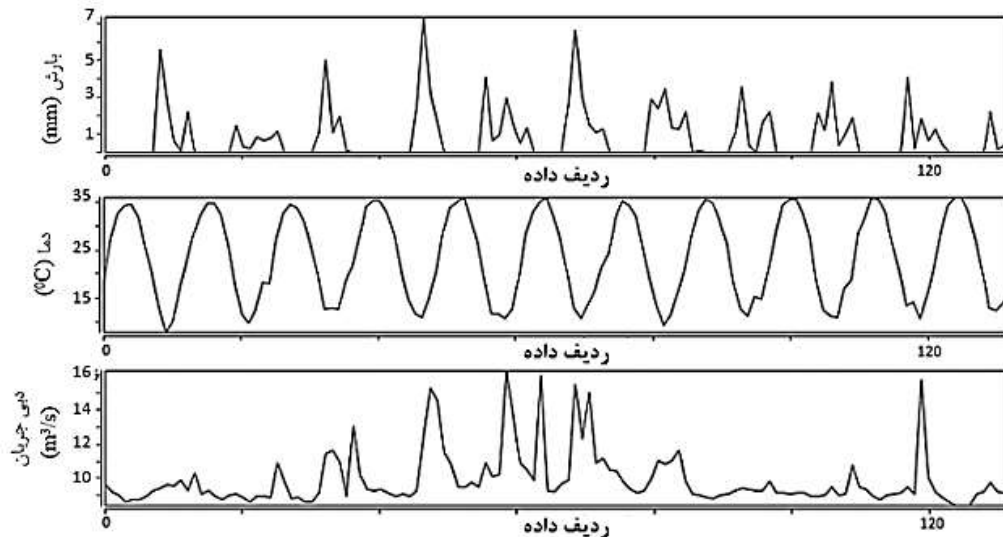
برای ارزیابی عملکرد مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان رودخانه چم‌سیاه، سری‌های زمانی متغیرهای بارش، دما و دبی در ایستگاه سیدآباد در دو مقیاس روزانه و ماهانه تولید و در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شدند. در نمودارهای ارائه شده، تغییرات زمانی بارش در ردیف اول، دما در ردیف دوم و دبی جریان در ردیف سوم قرار دارند. داده‌های روزانه با دقت زمانی بالاتر، امکان بررسی دقیق رفتار کوتاه‌مدت حوضه را فراهم می‌کنند، در حالی که داده‌های ماهانه روند‌های فصلی و میان‌مدت را بهتر نمایان می‌سازند.

بررسی نمودارهای روزانه (شکل ۲) نشان می‌دهد که بارش الگوی پراکنده و ناگهانی دارد که نشان‌دهنده وقوع بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت است. نوسانات دما نیز سینوسی و بیانگر تفاوت‌های فصلی دما در طول سال است. دبی جریان با تأخیری نسبت به بارش‌های شدید افزایش یافته و پیک‌های آن با رویدادهای بارشی هماهنگ است که نشان‌دهنده واکنش سریع حوضه به بارش‌ها است. در مقیاس ماهانه (شکل ۳)، بارش، دما و دبی به‌طور قابل توجهی هموارتر شده و رفتار میانگین‌گیری شده آن‌ها بیشتر نمایان است. پیک‌های جریان در این مقیاس شدت کمتری دارند اما تداوم بیشتری دارند که نشان‌دهنده همگرایی اثر بارش‌ها در طول ماه و کاهش نوسانات روزانه است.

این تحلیل کیفی نشان می‌دهد که در مقیاس روزانه، واکنش حوضه به بارش‌های مقطعی سریع است، در حالی که در مقیاس ماهانه، تأخیر و هموارسازی بیشتری در پاسخ جریان مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها لزوم استفاده از مدل‌هایی مانند IHACRES را که قادر به شبیه‌سازی دینامیک هیدرولوژیکی در هر دو مقیاس زمانی هستند، در حوضه‌های نیمه‌خشک تأکید می‌کند.



شکل ۲- نمودارهای مربوط به داده‌های مشاهداتی بارش، دما و دبی در مقیاس روزانه مربوط به رودخانه چم‌سیاه (ایستگاه سیدآباد)

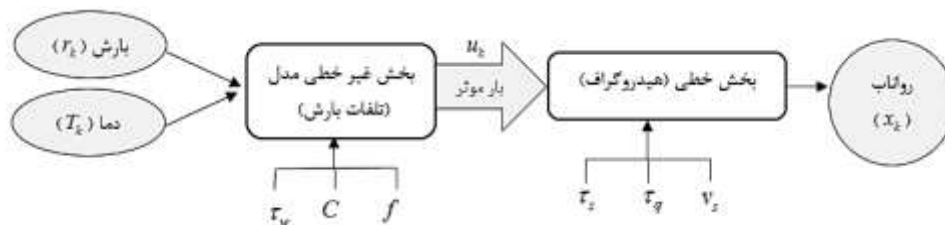


شکل ۳- نمودارهای مربوط به داده‌های مشاهداتی بارش، دما و دبی در مقیاس ماهانه مربوط به رودخانه چم سیاه (ایستگاه سیدآباد)

بارش مؤثر تبدیل کرده و سپس آن‌ها را به رواناب و جریان رودخانه تبدیل می‌کند. مدل IHACRES دارای شش پارامتر اصلی است که سه پارامتر آن مربوط به بخش غیرخطی و سه پارامتر دیگر مربوط به هیدروگراف واحد می‌باشد. در این مدل، کاربر می‌تواند با کالیبره کردن مقادیر پارامترها، ضریب کارایی مدل را بهینه‌سازی کند. ساختار مدل IHACRES در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ساختار مدل IHACRES

مدل IHACRES یک مدل مفهومی و یکپارچه برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه‌های مختلف است که نسخه IHACRES2.1 آن برای حوضه‌های با داده‌های بارش، دما و رواناب کاربرد دارد. این مدل از دو مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل شده که ابتدا بارش و دما را به



شکل ۴- ساختار مدل IHACRES

شاخص رطوبت خاک،  $p$  فاکتور مدول غیرخطی و  $\phi_k$  شاخص رطوبت خاک است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\phi_k = r_k + [1 - 1/\tau_k] \phi_{k-1} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\tau_k$  شدت خشکی حوضه بوده که تابعی از دمای محیط است و از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$\tau_k = \tau_w \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \quad (4)$$

که در رابطه‌ی بالا  $\tau_w$  شدت خشکی مبنای  $f$  تابع تعدیل دما،  $T_{ref}$  دمای مرجع،  $T_k$  دما در بازه زمانی  $k$  است. بعد از محاسبه‌ی بارش مؤثر، هیدروگراف واحد کل با استفاده از بخش خطی در مدل محاسبه می‌گردد (Croke et al., 2005).

### بخش غیر خطی (تبدیل بارش به بارش مؤثر)

در این بخش، بارش مؤثر ( $u_k$ ) از حاصل ضرب بارش کل در شاخص رطوبت خاک حوضه در هر بازه‌ی زمانی و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$u_k = [c(\phi_k - l)]^p \quad (1)$$

$$u_k = S_k \times r_k \quad (2)$$

که در آن؛  $S_k$  شاخص رطوبتی خاک حوضه است که بنا به خشک یا خیس بودن حوضه، مقدار آن به ترتیب بین صفر تا یک متغیر است. یعنی اگر پیش از بارندگی حوضه به کلی مرطوب باشد، تمام بارش به بارش مؤثر تبدیل خواهد شد.  $l$  حد آستانه

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,o} - \bar{X}_o)(X_{i,s} - \bar{X}_s)}{\sum_{i=1}^n (X_{i,o} - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^n (X_{i,s} - \bar{X}_s)^2} \quad (11)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2 \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (13)$$

### بحث و نتایج

بر اساس یافته‌های پیشین، در مدل‌های بارش-رواناب مانند IHACRES، تعیین طول دوره‌ی کالیبراسیون متأثر از ویژگی‌های اقلیمی منطقه است. در مناطق مرطوب، به دلیل فراوانی بارش و وقوع مکرر رواناب، امکان تنظیم مدل در دوره‌های کوتاه‌تر فراهم است. اما در مناطق خشک و نیمه‌خشک که وقوع بارندگی محدود و پراکنده است، به‌منظور پوشش دادن طیف گسترده‌تری از شرایط هیدرولوژیکی، لازم است دوره‌ی کالیبراسیون طولانی‌تری در نظر گرفته شود (Croke et al., 2005).

با توجه به قرارگیری منطقه‌ی مورد مطالعه در اقلیم نیمه‌خشک، در این پژوهش دوره‌ی کالیبراسیون بلندمدتی برای مدل انتخاب شد. پس از اجرای مدل و اعمال روش دستی و گام‌به‌گام سعی و خطا، مقادیر نهایی پارامترهای به‌دست‌آمده برای مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه به‌ترتیب در جداول ۳ و ۴ گزارش شده‌اند.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل، نسبت حجمی جریان آهسته ( $\theta_s$ ) است که نشان‌دهنده‌ی میزان مشارکت جریان پایه در تولید دبی رودخانه است. مقدار این پارامتر در دوره‌ی روزانه برابر با ۰/۸۸۲ و در دوره‌ی ماهانه ۰/۸۲۸ گزارش شده است. این مقادیر بیانگر سهم قابل توجه جریان پایه در جریان رودخانه است، که در شرایط اقلیم نیمه‌خشک منطقی به نظر می‌رسد. پارامتر کلیدی دیگر، C یا ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه است که بیانگر حساسیت و واکنش‌پذیری حوضه نسبت به بارش است. در مقیاس روزانه، مقدار این پارامتر برابر با ۰/۰۰۳۰۱ میلی‌متر بوده که نشان‌دهنده‌ی واکنش سریع حوضه به بارش‌های ورودی است. این مقدار در مقیاس ماهانه به ۰/۰۶۰۴ میلی‌متر افزایش یافته که همچنان کم‌دامنه محسوب می‌شود و تأییدکننده‌ی رفتار هیدرولوژیکی سریع و غیرنفوذی حوضه است. این واکنش سریع را می‌توان به عدم یا ناچیز بودن پوشش گیاهی، پوشش جنگلی و مزارع و مراتع

### بخش خطی (تبدیل بارش مؤثر به رواناب)

همان‌طور که گفته شد بخش خطی نیز دارای سه پارامتر می‌باشد که ترکیب دو مؤلفه جریان سریع  $x_k^q$  و جریان آهسته  $x_k^s$  منجر به تولید رواناب  $x_k$  می‌شود که با استفاده از روابط ۵ تا ۷ محاسبه می‌گردد.

در این معادلات  $\alpha_q$  و  $\beta_q$  به ترتیب، ثابت زمانی جریان سریع و  $\alpha_s$  و  $\beta_s$  به ترتیب ثابت زمانی جریان آهسته هستند.

$$x_k = x_k^q + x_k^s \quad (5)$$

$$x_k^q = -\alpha_q x_{k-1}^q + \beta_q u_k \quad (6)$$

$$x_k^s = -\alpha_s x_{k-1}^s + \beta_s u_k \quad (7)$$

از روابط زیر می‌توان برای محاسبه ضرایب نام‌برده استفاده کرد (Amiri and Roudbari Mousavi, 2016).

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad (8)$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad (9)$$

### معیارهای ارزیابی

در این تحقیق از چهار معیار برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شده است: ضریب نش-ساتکلیف (NSE) که نشان‌دهنده تناسب بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است و مقادیر بالاتر از ۰/۷۵ به‌عنوان نتایج خوب توصیف می‌شوند (رابطه ۱۰). ضریب تبیین ( $R^2$ ) که ارتباط خطی بین داده‌ها را نشان می‌دهد و مقدار بهینه آن برابر با یک است (رابطه ۱۱). میانگین مربعات خطا (MSE) که میزان خطا در شبیه‌سازی را بیان می‌کند و از صفر تا بی‌نهایت متغیر است (رابطه ۱۲) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و به‌عنوان شاخصی معمول برای ارزیابی خطا شناخته می‌شود (رابطه ۱۳). این چهار معیار به‌طور جامع برای سنجش دقت و کارایی مدل در شبیه‌سازی استفاده شده‌اند (Chicco et al., 2021; Avazpour et al., 2025).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2} \quad (10)$$

در نهایت، پارامتر زمان پاسخ کاهش جریان آهسته ( $T^S$ ) نیز در مقیاس روزانه برابر با ۱۸۰/۴۳۱ روز و در ماهانه برابر با ۷/۳۷ روز به دست آمد. اختلاف قابل توجه این دو مقدار، ناشی از تغییر مقیاس زمانی تحلیل و تغییر رفتار تجمیعی سیستم در بازه‌های زمانی بلندمدت‌تر است. مقدار بالای ( $T^S$ ) در مقیاس روزانه، بیانگر وجود بخشی از جریان با پاسخ کند و پایدار در طول زمان است؛ در حالی که مقدار پایین‌تر آن در مقیاس ماهانه نشان‌دهنده‌ی تجمع و هموارسازی این اثر در مقیاس زمانی بزرگ‌تر می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل این پارامترها نشان می‌دهد که مدل IHACRES توانسته با تنظیم مناسب ضرایب، به‌ویژه فاکتور دما و پارامترهای جریان پایه، رفتار هیدرولوژیکی منطقه‌ی نیمه‌خشک را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

در منطقه دانست که موجب می‌شود رواناب تقریباً بلافاصله پس از بارش وارد جریان رودخانه شود. فاکتور تعدیل دما ( $f$ ) از دیگر پارامترهای کلیدی مدل IHACRES است که در مدول غیرخطی مدل نقش دارد و بر شدت خشک شدن خاک تأثیر می‌گذارد. این پارامتر بیان می‌کند که چگونه دمای محیط نرخ کاهش رطوبت خاک را تغییر می‌دهد. در واقع،  $f$  مشخص می‌کند که با هر درجه افزایش دما نسبت به دمای مرجع، شدت خشک شدن خاک چه قدر افزایش می‌یابد. مقدار این پارامتر در مدل روزانه برابر با ۱ و در مدل ماهانه ۲/۵ تعیین شده است. افزایش مقدار  $f$  در مقیاس ماهانه نشان‌دهنده‌ی حساسیت بیشتر مدل به دمای هوا در بازه‌های بلندمدت است، به‌ویژه در مناطقی با تابستان‌های گرم و تبخیر زیاد، همانند منطقه‌ی مورد مطالعه.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای به‌دست آمده در مرحله کالیبراسیون مدل برای دوره روزانه

پارامترها	مقادیر در نظر گرفته شده
$\theta_s$ : نسبت حجمی جریان آهسته موثر بر ایجاد جریان رودخانه	۰/۸۸۲
C: ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه (mm)	۰/۰۰۰۳۰۱
$f$ : فاکتور تعدیل دما ( $^{\circ}C^{-1}$ )	۱
$T^S$ : ثابت زمانی کاهش پاسخ جریان آهسته (روز)	۱۸۰/۴۳۱

جدول ۴- مقادیر پارامترهای به‌دست آمده در مرحله کالیبراسیون مدل برای دوره ماهانه

پارامترها	مقادیر در نظر گرفته شده
$\theta_s$ : نسبت حجمی جریان آهسته موثر بر ایجاد جریان رودخانه	۰/۸۲۸
C: ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه (mm)	۰/۰۶۰۴
$f$ : فاکتور تعدیل دما ( $^{\circ}C^{-1}$ )	۲/۵
$T^S$ : ثابت زمانی کاهش پاسخ جریان آهسته (روز)	۷/۳۷

دبی مشاهده شده بیشتر از دبی مدل شده است، که احتمالاً به نوسانات شدید بارش و رواناب در این سال‌ها مرتبط می‌شود و مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق آن‌ها نبوده است. در مقیاس روزانه، مدل توانسته است روند کلی جریان را با دقت نسبی قابل قبولی شبیه‌سازی کند، اما در بازه‌هایی که پیک‌های دبی رخ داده، اختلاف‌های زیادی بین داده‌های مشاهده‌ای و مدل شده وجود دارد.

نمودار جعبه‌ای دوره ماهانه (شکل ۶)، مقایسه‌ای بین دبی مشاهده شده و دبی مدل شده در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، در برخی از سال‌ها، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، دبی مشاهده شده به‌طور قابل توجهی بیشتر از دبی مدل شده است.

### ارزیابی گرافیکی نتایج کالیبراسیون مدل

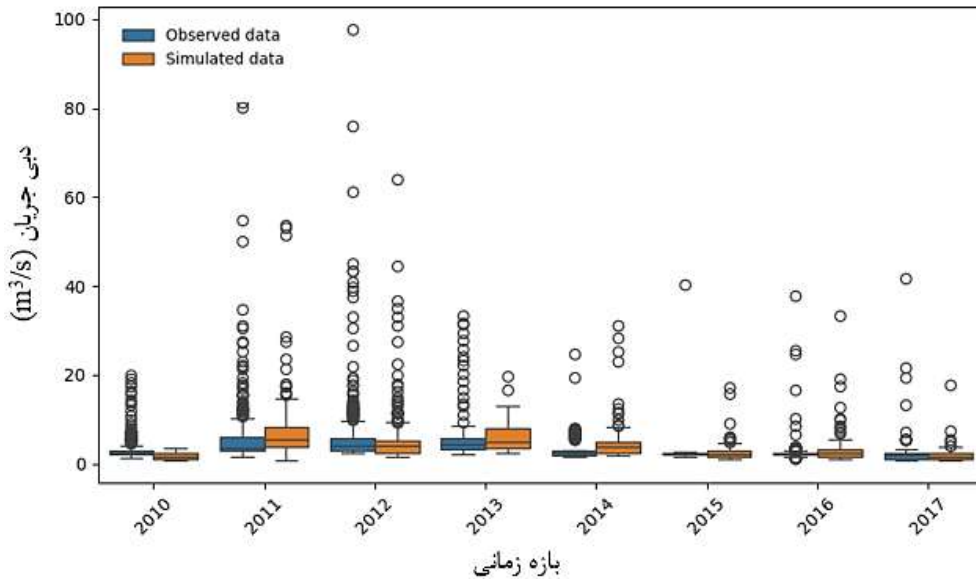
برای ارزیابی بصری عملکرد مدل IHACRES در مرحله کالیبراسیون، مقادیر دبی محاسبه شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه شده و نتایج در قالب نمودارهای جعبه‌ای در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه گردیده است.

در نمودار جعبه‌ای دوره روزانه (شکل ۵)، دبی مشاهده شده (آبی) در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ به‌طور قابل توجهی بیشتر از دبی مدل شده (نارنجی) است. این اختلاف‌ها نشان‌دهنده ضعف مدل در شبیه‌سازی پیک‌های دبی ناشی از بارش‌های شدید و پراکنده است، به‌ویژه در دوره‌هایی که جریان‌های اوج به سرعت افزایش یافته‌اند. مدل نتوانسته است به درستی این افزایش‌ها را پیش‌بینی کند. علاوه بر این، مشاهدات پرت در

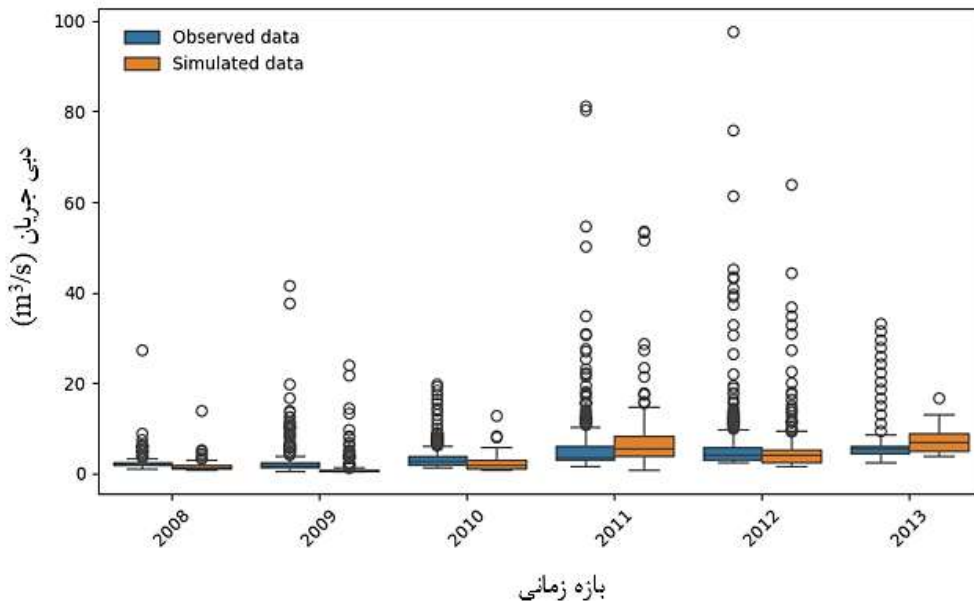
مشاهده شده بیشتر از دبی مدل شده است، که می‌تواند به بارش‌های شدید و نوسانات زیاد در سال‌های خاص (مانند ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲) مربوط باشد.

مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه، مدل IHACRES دقت بالاتری داشته و خطای کمتری را در شبیه‌سازی دبی‌های جریان نشان داده است.

این اختلاف‌ها به‌ویژه در پیک‌های شدید بارش که باعث افزایش دبی می‌شوند، مشهود است و نشان‌دهنده ضعف مدل در شبیه‌سازی دقیق پیک‌های دبی است. علاوه بر این، توزیع دبی مدل شده به‌طور کلی هموارتر و بیشتر به تراکم مرکزی تمایل دارد، در حالی که دبی مشاهده شده دارای پراکندگی بیشتری است. این مسئله بیانگر نوسانات بیشتر دبی در شرایط بارش‌های شدید و رواناب سریع است. همچنین، مشاهدات پرت در دبی



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای دبی مشاهده شده و مدل شده روزانه در مرحله کالیبراسیون مدل IHACRES برای رودخانه چم سیاه (ایستگاه سیدآباد)



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای دبی مشاهده شده و مدل شده ماهانه در مرحله کالیبراسیون مدل IHACRES برای رودخانه چم سیاه (ایستگاه سیدآباد)

جدول، ضرایب تبیین ( $R^2$ ) تحت تبدیل‌های مختلف شامل جذر، لگاریتم و معکوس مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا پایداری مدل نسبت به تغییرات داده‌های مشاهده‌ای بررسی شود.

تحلیل نتایج آماری مدل در مرحله کالیبراسیون نتایج عددی حاصل از ارزیابی عملکرد مدل IHACRES در مرحله کالیبراسیون، در جدول ۵ ارائه شده است. در این

در مقیاس روزانه و ماهانه است. در مقیاس روزانه، مقدار ضریب نش-ساتکلیف (NSE) برابر با ۰/۴۸۵ و ضریب تبیین ( $R^2$ ) برابر با ۰/۸۱۸ به دست آمد که بیانگر تطابق نسبتاً مناسب بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دبی جریان است. با این حال، مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE) معادل ۱۰/۴۱۸ و ریشه دوم آن (RMSE) برابر با ۳/۲۲۸ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد که مدل در مقیاس زمانی کوتاه‌تر با خطای بیشتری مواجه بوده، به‌ویژه در بازه‌های زمانی با دبی‌های اوج که معمولاً دقت مدل‌های مفهومی در آن‌ها کاهش می‌یابد.

در مقابل، در مقیاس ماهانه، عملکرد مدل به‌طور چشمگیری بهبود یافته است. مقدار NSE برابر با ۰/۶۳۸ و  $R^2$  معادل ۰/۹۲۲ نشان از دقت بالای مدل در بازتولید رفتار کلی جریان در بازه‌های زمانی بلندمدت دارد. همچنین مقادیر MSE و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۰۸۸ و ۰/۲۹۷ بوده که حاکی از خطای بسیار پایین مدل در این مقیاس است.

جدول ۶- نتایج ارزیابی عملکرد مدل IHACRES بر اساس

شاخص‌های ارزیابی در مرحله‌ی کالیبراسیون

دوره	NSE	$R^2$	MSE	RMSE
روزانه	۰/۴۸۵	۰/۸۱۸	۱۰/۴۱۸	۳/۲۲۸
ماهانه	۰/۶۳۸	۰/۹۲۲	۰/۰۸۸	۰/۲۹۷

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که مدل IHACRES در مرحله کالیبراسیون توانسته رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبخیز مورد نظر را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند و دقت آن در مقیاس ماهانه به مراتب بهتر از مقیاس روزانه است. در مقیاس ماهانه، به دلیل میانگین‌گیری داده‌ها، نوسانات کمتری مشاهده می‌شود و پیک‌های شدید دبی که در مقیاس روزانه به‌طور بارزتری دیده می‌شوند، کاهش می‌یابند. این امر به مدل این امکان را می‌دهد که روند کلی جریان را راحت‌تر شبیه‌سازی کرده و پیک‌های دبی را دقیق‌تر پیش‌بینی کند. در مقیاس روزانه، به دلیل تغییرات لحظه‌ای سریع و بارش‌های پراکنده، مدل با چالش‌های بیشتری در شبیه‌سازی پیک‌های دبی مواجه است. اما در مقیاس ماهانه، این نوسانات کاهش می‌یابند و مدل قادر به شبیه‌سازی رفتار کلی سیستم به‌طور دقیق‌تر می‌باشد. به‌طور کلی، مقیاس ماهانه به دلیل هموار شدن نوسانات و کاهش پیچیدگی‌های

در مقیاس روزانه، مقدار  $R^2$  در حالت بدون تبدیل ( $R^2$  sqrt) برابر با ۰/۴۸۲ به دست آمده که نشان می‌دهد حدود ۴۸٪ از واریانس جریان مشاهداتی توسط مدل قابل تبیین است. در حالی که در مقیاس ماهانه، این مقدار به ۰/۵۵۲ افزایش یافته است که بیانگر دقت بهتر مدل در شبیه‌سازی جریان در مقیاس بزرگ‌تر زمانی می‌باشد. همچنین در تبدیل لگاریتمی، که حساسیت بیشتری به مقادیر پایین دبی دارد، مقدار  $R^2$  از ۰/۴۸۰ (روزانه) به ۰/۶۰۱ (ماهانه) افزایش یافته که خود نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در بازتولید مقادیر پایه و میان‌دبی‌ها در بازه‌های ماهانه است.

در تبدیل معکوس نیز، که بیشترین حساسیت را به مقادیر پیک دارد، ضریب تبیین از ۰/۳۷۴ در مقیاس روزانه به ۰/۶۱۶ در مقیاس ماهانه افزایش یافته است. این به‌خوبی نشان می‌دهد که مدل IHACRES در مقیاس ماهانه توان بالاتری در شبیه‌سازی رفتار دبی‌های بالا و پایین دارد و ساختار مفهومی آن برای تحلیل رفتار کلی جریان در بازه‌های زمانی طولانی‌تر مناسب‌تر است.

به‌طور کلی، بر اساس ضرایب تبیین گزارش شده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل IHACRES با ضریب تبیین متوسط حدود ۰/۵ در مقیاس روزانه و بیش از ۰/۶ در مقیاس ماهانه، عملکردی قابل قبول در شبیه‌سازی الگوی تغییرات جریان در حوضه‌ی مورد مطالعه از خود نشان داده است. این مقادیر در مقایسه با استانداردهای مدل‌سازی مفهومی در مناطق نیمه‌خشک، نشان‌دهنده دقت و پایداری مناسب مدل در شرایط موجود می‌باشند.

جدول ۵- نتایج به‌دست آمده از مدل IHACRES در مرحله

کالیبراسیون

دوره	R sqrt	$R^2$ sqrt	$R^2$ log	$R^2$ Inv
روزانه	۰/۴۸۲	۰/۴۸۶	۰/۴۸	۰/۳۷۴
ماهانه	۰/۵۲	۰/۵۷۶	۰/۶۰۱	۰/۶۱۶

در مرحله‌ی کالیبراسیون، عملکرد مدل بر اساس چهار شاخص کلیدی شامل ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (MSE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) برای دو مقیاس روزانه و ماهانه ارزیابی شده است که نتایج آن در جدول ۶ ارائه گردیده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه چم‌سیاه در هر دو

جدول ۷- نتایج ارزیابی عملکرد مدل IHACRES بر اساس

شاخص‌های ارزیابی در مرحله اعتبارسنجی

دوره	NSE	R <sup>2</sup>	MSE	RMSE
روزانه	۰/۴۵۶	۰/۸۱۱	۱۲/۱۴۴	۳/۴۸
ماهانه	۰/۴۹۷	۰/۸۸	۰/۱۹۲	۰/۴۳۸

نتایج گرافیکی اعتبارسنجی مدل IHACRES برای مقیاس‌های روزانه و ماهانه در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در مقیاس روزانه نتایج نشان می‌دهد مدل در پیش‌بینی روند کلی جریان موفق بوده، اما نتوانسته است به درستی افزایش‌های شدید دبی را شبیه‌سازی کند. در مقیاس ماهانه، مدل عملکرد به مراتب بهتری از خود نشان داده است. در این مقیاس، مدل توانسته است روند کلی جریان را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند و در شبیه‌سازی پیک‌های جریان در بازه‌های بلندمدت عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این نشان می‌دهد که مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان‌های میان‌مدت و بلندمدت مناسب‌تر است، چرا که تمایل به هموارسازی و تعدیل نوسانات دارد.

با توجه به این نقاط ضعف در پیش‌بینی پیک‌های جریان، پیشنهاد می‌شود برای بهبود دقت پیش‌بینی مدل IHACRES، از مدل‌های ترکیبی استفاده شود. ترکیب مدل IHACRES با مدل‌های داده‌محور مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یا مدل‌های یادگیری عمیق (DL) می‌تواند به شبیه‌سازی دقیق‌تر پیک‌های جریان و تغییرات سریع‌تر کمک کند. همچنین، افزودن پارامترهای جدید نظیر نفوذ آب به خاک و تخلیه سریع رواناب می‌تواند به دقت مدل در شبیه‌سازی جریان‌های لحظه‌ای کمک کرده و عملکرد آن را بهبود بخشد. تحقیقات آینده می‌توانند بر این موضوعات تمرکز و به بهبود قابلیت‌های مدل‌های مفهومی مانند IHACRES کمک کنند. به‌ویژه، ارزیابی و توسعه مدل‌های ترکیبی و شبیه‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده می‌تواند زمینه‌ساز پیشرفت‌های قابل توجهی در پیش‌بینی رواناب در مناطق نیمه‌خشک باشد.

روزانه، عملکرد مدل را بهبود داده و خطای پیش‌بینی دبی را کاهش داده است.

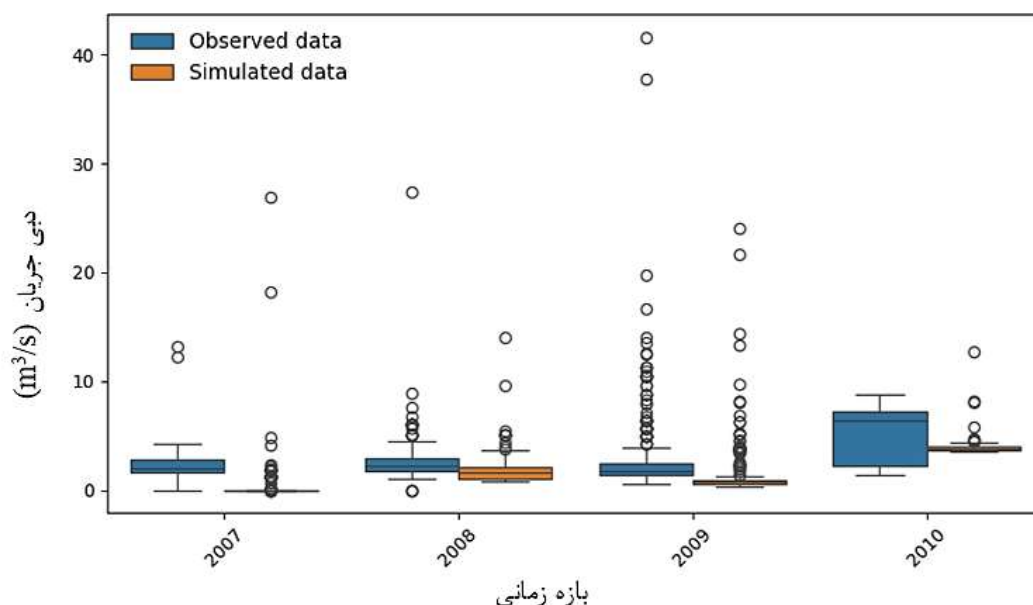
### ارزیابی عملکرد مدل در مرحله اعتبارسنجی

برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل IHACRES در خارج از بازه کالیبراسیون، عملکرد آن در مرحله اعتبارسنجی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به‌دست آمده، در مقیاس روزانه، مقدار R<sup>2</sup> از ۰/۸۱۸ در مرحله کالیبراسیون به ۰/۸۱۱ در مرحله اعتبارسنجی کاهش یافته (جدول ۷) که کاهش ناچیزی است. مقدار NSE نیز برابر با ۰/۴۵۶ بوده که بیانگر دقت متوسط مدل در بازتولید جریان‌های روزانه است.

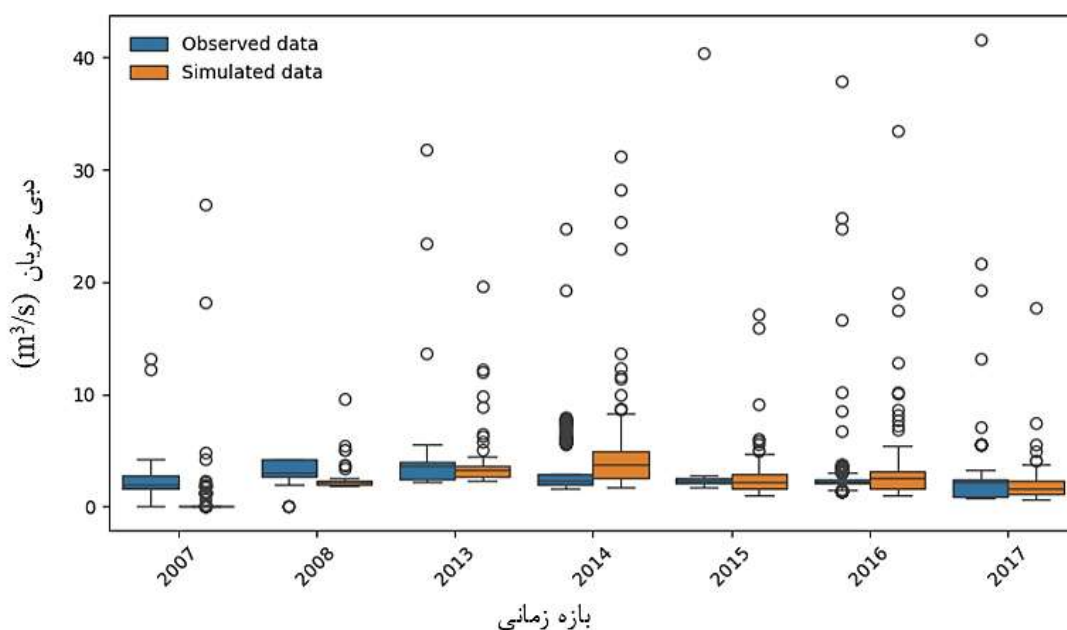
در مقیاس ماهانه، R<sup>2</sup> با مقدار ۰/۸۸ و NSE با مقدار ۰/۴۹۷ نشان می‌دهند که مدل در بازه اعتبارسنجی همچنان عملکردی قابل قبول دارد، هرچند نسبت به مرحله کالیبراسیون (با R<sup>2</sup> = 0.92) با افت اندکی مواجه شده است.

همچنین، مقدار خطای مدل نیز در مقیاس ماهانه کمتر از مقیاس روزانه بوده است. مقایسه‌ی MSE و RMSE بین دو مقیاس نشان می‌دهد در مقیاس روزانه، MSE از ۱۰/۴۱۸ در مرحله کالیبراسیون به ۱۲/۱۴۴ و RMSE از ۳/۲۲۸ به ۳/۴۸ افزایش یافته است. در مقیاس ماهانه نیز، MSE از ۰/۸۸ به ۰/۱۹۲ و RMSE از ۰/۲۹۷ به ۰/۴۳۸ افزایش یافته است.

این افزایش خطاها کاملاً قابل انتظار است، زیرا مدل در مرحله اعتبارسنجی با داده‌هایی مواجه می‌شود که در فرایند کالیبراسیون لحاظ نشده‌اند. با این حال، پایداری شاخص‌های آماری، به‌ویژه ضریب تبیین و ضریب نش، نشان‌دهنده‌ی عملکرد رضایت‌بخش مدل IHACRES در بازه بلندمدت و در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه است.



شکل ۷- نمودار جعبه‌ای دبی مشاهده‌شده و مدل‌شده روزانه در مرحله اعتبارسنجی مدل IHACRES برای رودخانه چم سیاه (ایستگاه سیدآباد)



شکل ۸- نمودار جعبه‌ای دبی مشاهده‌شده و مدل‌شده ماهانه در مرحله اعتبارسنجی مدل IHACRES برای رودخانه چم سیاه (ایستگاه سیدآباد)

نزدیکی خط تطابق کامل دارند که نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در مقیاس ماهانه است. در مقابل، داده‌های روزانه پراکندگی بیشتری به‌ویژه در محدوده‌های دبی بالا دارند که بیانگر ضعف نسبی مدل در بازتولید رواناب‌های روزانه، به‌ویژه در شرایط اوج دبی است. این پراکندگی می‌تواند ناشی از عواملی نظیر عدم دقت داده‌های ورودی روزانه، پیچیدگی بیشتر فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های زمانی کوتاه یا پاسخ سریع حوضه به بارندگی باشد که در

به‌منظور ارزیابی کیفی عملکرد مدل IHACRES، نمودار پراکندگی دبی‌های شبیه‌سازی‌شده در برابر دبی‌های مشاهداتی برای داده‌های روزانه و ماهانه رسم شد (شکل ۹). در این نمودار، نقاط آبی مربوط به داده‌های روزانه و نقاط سبز مربوط به داده‌های ماهانه هستند. همچنین خط چین قرمز با شیب ۱ نشان‌دهنده خط تطابق کامل بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده است. با توجه به نمودار، مشخص است که داده‌های ماهانه تراکم بیشتری در

در کنار سناریوهای تغییر اقلیم، می‌تواند در تحلیل اثرات آبی این پدیده بر رواناب سطحی و جریان رودخانه‌ای مفید واقع شود. بر این اساس، توسعه مدل در بستر سناریوهای اقلیمی آینده و نیز تلفیق آن با مدل‌های دیگر مانند SWAT یا مدل‌های هوشمند می‌تواند مسیر مناسبی برای تحقیقات آینده باشد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور و همچنین شرکت آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنند.

### تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور و همچنین شرکت آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد دریافت شد.

### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این پژوهش به شرح زیر است: نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، اجرای مدل و نگارش مقاله.

نویسندگان دوم و سوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله و کنترل نتایج.

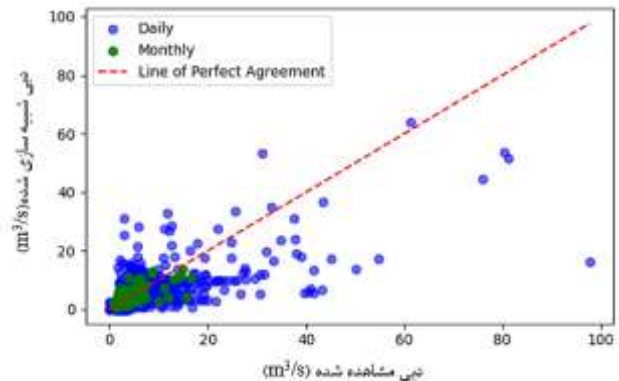
### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آن‌ها می‌باشد.

### منابع:

- Amiri, E. and Roudbari Mousavi, M.M., 2016. Evaluation of IHACRES hydrological model for simulation of daily flow (case study Polrood and Shalmanrood rivers). *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4), pp. 533–543. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.60356>
- Avazpour, F., Hadian, M.R., Talebi, A. and Torabi Haghghi, A., 2025. Impact of Climate Change on River Flow, Using a Hybrid Model of LARS\_WG and LSTM: A Case Study in the Kashkan Basin.

مدل به‌خوبی بازنمایی نشده است. به‌طورکلی، تحلیل نمودار پراکندگی نشان می‌دهد که مدل در مقیاس ماهانه دقت بالاتری دارد و برای کاربردهای مدیریتی و تحلیل‌های درازمدت مناسب‌تر از تحلیل‌های روزانه است.



شکل ۹- نمودار پراکندگی دبی‌های مشاهده‌ای در برابر دبی‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در مقیاس‌های روزانه و ماهانه

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به ارزیابی عملکرد مدل مفهومی IHACRES در شبیه‌سازی جریان رودخانه چم‌سیاه واقع در حوضه‌ی آبخیز خیرآباد استان کهگیلویه و بویراحمد پرداخته شد. به این منظور، داده‌های روزانه و ماهانه‌ی بارش، دما و دبی جریان از ایستگاه هیدرومتری سیدآباد در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ به‌عنوان ورودی مدل استفاده شدند.

نتایج حاصل از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل، بر اساس شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (MSE) و مجذور آن (RMSE)، نشان دادند که مدل IHACRES توانسته است رفتار هیدرولوژیکی حوضه را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نماید. عملکرد مدل در مقیاس ماهانه نسبت به مقیاس روزانه دقیق‌تر ارزیابی شد که دلیل آن را می‌توان به هموارسازی طبیعی داده‌ها در بازه‌های زمانی طولانی‌تر و کاهش حساسیت به پیک‌های لحظه‌ای جریان نسبت داد. این یافته با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات Zareie et al. (2009) در حوضه‌ی کسلیان و Goodarzi et al. (2018) همسو است.

با توجه به دقت قابل قبول مدل در شرایط اقلیم نیمه‌خشک منطقه، ساختار ساده، نیاز پایین به داده‌های ورودی و قابلیت اجرای سریع، مدل IHACRES را می‌توان به‌عنوان ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای در حوضه‌های مشابه به‌کار برد. همچنین، استفاده از این مدل

12. Rezvani, F.S., ghorbani, KH., Salarijazi, M., yazarloo, B. and Rezaei Ghaleh, L., 2024. Comparative assessment of IHACRES, AWBM, and Tank models for daily runoff simulation in wet and dry periods. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(1), pp. 51–72. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.21968.3697>
13. Zarei, M., Ghanbarpour, M.R., Habibnezhad Roshan, M. and Shahedi, K., 2009. Simulation of river flow using IHACRES: A case study in Kasilian Basin. *Journal of Iranian Engineering Sciences and Watershed Management*, 8, pp. 10–20. [In Persian]. <https://doi.org/10.1001.1.20089554.1388.3.8.2.2>
- Results in Engineering*, p. 104956. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104956>
3. Bayatikhatabi, M., Kakapour, V. and SADEGI, M., 2024. Daily Discharge Prediction Using IHACRES Semi-conceptual Model (Case Study: Gharasoo Basin of Kermanshah province). *Quantitative Geomorphological Research*, 13(3), pp. 104–119. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.384992.1417>
4. Chicco, D., Warrens, M.J. and Jurman, G., 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science*, 7, p. e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
5. Croke, B.F.W., Andrews, F., Jakeman, A.J., Cuddy, S.M. and Luddy, A., 2005. Redesign of the IHACRES rainfall-runoff model', in *29th hydrology and water resources symposium*, pp. 21–23. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.003>
6. Fattahi, P. Ashrafzadeh, A., Pirmoradian, N. and Vazifedoust, M., 2022. Integrating IHACRES with a data-driven model to investigate the possibility of improving monthly flow estimates', *Water Supply*, 22(1), pp. 360–371. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.267>
7. Ghorbani Dailari, M., Darbandi, M., Asadi, E. and Samadian, M., 2021. Simulation of Parameters Affecting the River Flow Trend using the IHACRES Rainfall-runoff Model in Future Periods (Case Study: Zolachai River). *Journal of Ecohydrology*, 8(1), pp. 177–193. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.311773.1394>
8. Goodarzi, M., Salahi, B. and Hoseini, A., 2018. Assessment of IHACRES Model in Simulating River Discharge in Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(43), pp. 1–10. [In Persian]. <https://doi.org/10.1001.1.20089554.1397.12.43.1.4>
9. Jaberzadeh, M., Saremi, A., Ghorbanizadeh Kharazi, H. and Babazadeh, H., 2024. SWAT and IHACRES models for the simulation of rainfall-runoff of Dez watershed. *Climate Dynamics*, 62(4), pp. 2823–2835. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06215-2>
10. Nazeri Tahroudi, M., Ahmadi, F. and Mirabbasi, R., 2023. Performance comparison of IHACRES, random forest and copula-based models in rainfall-runoff simulation. *Applied Water Science*, 13(6), p. 134. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01929-y>
11. Pourhosein, M., Moradzadeh, H., 2024. Assessing the Impact of Climate Change on Drought (Case Study: Part of the Karoon Basin). *Journal of Environmental Sciences Studies*, 4, pp. 9405–9415. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.435259.2212>

