

# بررسی کارآیی داده‌های بارش ماهواره‌ای در شبیه‌سازی جریان رودخانه به کمک مدل IHACRES (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد طرق)

## چکیده

مدل‌سازی و یا پیش‌بینی مقدار جریان رودخانه یکی از نیازهای اساسی در مدیریت منابع آب است. متأسفانه بسیاری از حوضه‌های آبریز فاقد ایستگاه اندازه‌گیری بارش هستند. استفاده از داده‌های پردازش‌شده ماهواره‌ها یکی از روش‌های مناسب جایگزینی داده‌های بارش مشاهداتی است. این ماهواره‌ها از پوشش مکانی و زمانی بسیار مناسبی برخوردارند، ولی می‌بایست دقت مقادیر برآوردشده بارش استخراج‌شده از داده‌های ماهواره‌ها در مناطق مختلف با داده‌های زمینی مورد مقایسه و کنترل قرار گیرد. در پژوهش حال حاضر، از مدل بارش-رواناب IHACRES جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه طرق در حوضه آبریز سد طرق (به مساحت ۱۶۴/۷۶ کیلومترمربع) استفاده شده است. به این منظور از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های تخیخ‌سنجی و هیدرومتری و همچنین از داده‌های ماهواره‌ای MERRA-2 به صورت روزانه و ماهانه در دو بازه زمانی ۹ ساله (از تاریخ ۱ مهر ۱۳۹۲ تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۱) و ۲۹ ساله (از تاریخ ۱۱ دی ۱۳۷۲ تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۱) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در طول دوره مورد بررسی، به تدریج دقت مقادیر بارش برآوردشده بر اساس ماهواره MERRA-2 در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده افزایش یافته است. در دوره ۲۹ ساله نتایج صحت‌سنجی مدل ضعیف‌تر از دوره ۹ ساله است که این موضوع می‌تواند به دلیل شرایط ناشی از تغییر در کاربری اراضی حوضه و افزایش تدریجی دما در حوضه باشد. باتوجه به ضریب نش‌ساتکلیف (NSE) ۰/۸۴۶ به دست آمده در مرحله صحت‌سنجی دوره ۹ ساله با گام زمانی روزانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و همچنین مقدار ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۲۵، همبستگی خوبی بین جریان روزانه شبیه‌سازی‌شده بر اساس داده‌های ماهواره‌ای و جریان روزانه اندازه‌گیری‌شده وجود دارد. بنابراین، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تولیدشده در دهه اخیر می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های ناقص بارش در ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی در منطقه مورد مطالعه باشد.

**کلیدواژه‌ها:** حوضه آبریز طرق، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، مدل بارش-رواناب، MERRA-2، IHACRES

## Abstract

Modeling and predicting the flow rate of rivers is one of the fundamental needs in water resource management. Unfortunately, many watersheds lack precipitation measurement stations. The use of processed satellite data is one of the suitable alternatives to observational data; but the accuracy of estimated precipitation values extracted from satellite data should be compared and validated with ground data in different regions. In the current study, the IHACRES rainfall-runoff model has been used to simulate river flow in the Toroq dam watershed. For this purpose, daily and monthly data from ground stations and MERRA-2 satellite data have been used on a daily and monthly basis in two time periods of 9 years and 29 years. The results show that over the study period, the accuracy of estimated precipitation values based on the MERRA-2 satellite has gradually increased compared to measured values. In the 29-year period, the model validation results are weaker than the 9-year period, which could be due to conditions resulting from land use changes in the watershed and gradual temperature increase in the watershed. With a NSE coefficient of 0.846 obtained in the validation stage of the 9-year period with daily time steps using satellite data, as well as a Pearson correlation coefficient of 0.925, there is good correlation between the daily simulated flow using satellite data, and the daily measured flow. Therefore, the use of satellite data produced in the past decade can be a suitable substitute for incomplete precipitation data at ground measurement stations.

Keywords: hydrological simulation, IHACRES, MERRA-2, rainfall-runoff model, Toroq watershed.

ظهور تنش شدید آبی و تهدیدهای ناشی از خشک‌سالی و تغییرات اقلیمی، استان خراسان رضوی را به شدت تحت تاثیر قرار داده است (مسعودی و عصار، ۱۳۹۶). در چنین شرایطی رصد هرچه دقیق‌تر مقادیر جریان رودخانه، نقش بسزایی در مدیریت منابع آب، کاهش خطرات ناشی از بروز سیل، نحوه اتخاذ تصمیم در سناریوهای مختلف مدیریتی و به‌طور کلی در جلوگیری از آثار مخرب این تهدیدات دارد. مدل‌های متنوعی برای مدل‌سازی جریان رودخانه وجود دارند، مدل هیدرولوژیکی IHACRES یک مدل بارش-رواناب توده‌ای است که می‌تواند به کمک اطلاعاتی ساده نظیر مقدار بارش، مقدار دبی رودخانه و مقدار تبخیر-تعرق یا دمای متوسط در گام زمانی مورد نظر، برآورد مناسب و قابل قبولی از جریان رودخانه داشته باشد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به داده‌های اندک مورد نیاز، این مدل اغلب در حوضه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که با توجه به موقعیت مکانی و توپوگرافی حوضه، ایستگاه‌های اندازه‌گیری کم و در نتیجه داده‌های اندکی برای آن حوضه موجود باشد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷).

شرط موجود بودن داده‌های مشاهداتی در تمام ایستگاه‌ها برقرار نیست و بسیاری از ایستگاه‌های اندازه‌گیری، داده‌های کافی و موثقی را در طول زمان فراهم نمی‌کنند؛ از این رو، مطالعه دقیق حوضه آبریز با مشکلات قابل توجهی مواجه می‌شود. این شرایط باعث افزایش عدم قطعیت در تحلیل‌ها می‌شود و امکان ارائه تصمیمات موثر را کاهش می‌دهد. در این شرایط، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، جایگزینی مطلوب برای پرکردن کمبود داده‌های ایستگاه‌ها می‌باشد (Oyerinde et al., 2017). ماهواره‌های مختلفی به منظور یاری‌رسانی به هیدرولوژیست‌ها و اقلیم‌شناسان وجود داشته و اطلاعات هواشناسی و اقلیمی خوبی از پایگاه‌های آن ماهواره‌ها در دسترس می‌باشند.

در پژوهشی توسط Dye & Croke (2003) مقادیر جریان رودخانه در دو حوضه با مساحت کم (به ترتیب ۳۱ هکتار و ۷۴ کیلومترمربع) در آفریقای جنوبی، به کمک مدل IHACRES شبیه‌سازی شد و اثرات تغییر کاربری اراضی بر میزان جریان رودخانه ارزیابی شد. آشفته و بوانی (۱۳۸۹) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثری برای حوضه‌ای در آذربایجان شرقی پرداختند. در آن مطالعه از مدل اقلیمی HadCM3 جهت تهیه مقادیر ماهانه دما و بارش استفاده گردید. با استفاده از اطلاعات دما و بارش کوچک‌مقیاس شده، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به تغییر اقلیم، با استفاده از مدل IHACRES مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه‌ای توسط گودرزی و همکاران (۱۳۸۹) کارایی این مدل در پیش‌بینی سیلاب‌های شهری مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن پژوهش، کارایی ۶۰ درصدی این مدل را در پیش‌بینی وقوع سیلاب در حوضه آبریز رودخانه اعظم‌هرات یزد نشان داد. مطالعه‌ای توسط زارعی و همکاران (۱۳۹۰) برای شبیه‌سازی جریان‌های روزانه در حوضه ۳۴۲ کیلومترمربعی کسلیان و ۶۷۸ کیلومترمربعی زیرحوضه معرف کسلیان انجام شد که در آن نتایج نشان دادند که دقت شبیه‌سازی در حوضه آبریز بزرگ‌تر بهتر می‌باشد. خیرقام و همکاران (۱۳۹۲) جریان روزانه هفت زیرحوضه رودخانه گرگان‌رود استان گلستان را با این مدل شبیه‌سازی کردند و به بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه‌های وسیع‌تر پرداختند. در راستای شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در سه مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه، پژوهشی توسط گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) صورت گرفت که در آن به این نتیجه رسیدند که مدل IHACRES، شبیه‌سازی جریان ماهانه را نسبت به جریان روزانه بهتر انجام داده است.

Kim & Kang (2023) تاثیر تنش‌های اقلیمی را بر ورودی مخازن چند سد در کره جنوبی مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها جریان ورودی به مخازن سدها را توسط مدل IHACRES، تحت سناریوهای تنش اقلیمی پیش‌بینی کردند و پس از تایید کارایی این مدل، به آنالیز حساسیت جریانات ورودی به سدها پرداختند. Dawoohund et al. (2017) در حوضه‌ای در جزیره موریس، به بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر مقدار جریان رودخانه در طی ۱۰ سال با استفاده از مدل IHACRES پرداختند، نتایج تحقیق

ایشان نشان داد که با کاهش ۱۷ درصدی حجم پوشش گیاهی در حوضه، میزان جریان رودخانه تقریباً دو برابر شده است. چوبین و بشیرگنبد (۱۴۰۲) از مدل IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه بختیاری استفاده کردند، با توجه به مقادیر ضریب کلینگ‌گوپتا و نش‌ساتکلیف به ترتیب برای مدل هیدرولوژیکی و شبکه عصبی، ۰/۷۴، ۰/۷۵ و ۰/۹۴، ۰/۸۹ نتایج نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل IHACRES توانایی بیشتری در شبیه‌سازی مقادیر جریان داشته و همچنین در برآورد مقادیر دبی‌های اوج بهتر عمل می‌کند. مدرسی و همکاران (۱۴۰۱) به مقایسه عملکرد سه مدل داده‌مبنا شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته (GRNN) و K نزدیک‌ترین همسایگی (KNN) با مدل هیدرولوژیکی IHACRES در حوضه سد کرخه پرداختند که نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل ANN با بیشترین ضریب نش‌ساتکلیف و مدل IHACRES با ضریب ۰/۶۹۹ و مدل KNN با کمترین ضریب نش‌ساتکلیف می‌باشد.

استفاده از سنجش از دور در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی مدل‌ها کمک کند (Lubczynski et al., 2024). ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی، پایش پوشش گیاهی و کاربری اراضی، پایش و مانیتورینگ تغییرات مورفولوژیکی و آبدی رودخانه‌ها، لزوم استفاده از سنجش از دور را در مطالعات هیدرولوژیکی نشان می‌دهد. مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیکی به کمک سنجش از دور و اطلاعات ماهواره‌های مختلف صورت گرفته است. زیدعلی نژاد و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه تراز-هرکش به کمک داده‌های ماهواره‌ای NEX-GDDP<sup>2</sup> و مدل IHACRES پرداختند، با ضریب تعیین ۰/۶ و ۰/۹ به ترتیب برای داده‌های روزانه و ماهانه، نتایج نشان از کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان با داده‌های ماهواره‌ای دارد. در مطالعه‌ای توسط احمدی و همکاران (۱۳۹۹) جریان حوضه‌آبخیز گرگانرود با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای CHIRPS<sup>3</sup>، به کمک مدل IHACRES برآورد شد و نتایج نشان داد که داده‌های این ماهواره کارایی مناسبی برای مطالعه بارش داشته و در مجموع، عملکرد مدل قابل قبول می‌باشد. Guo et al. (2018) جریان روزانه رودخانه لیجیانگ<sup>4</sup> در جنوب چین را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از دو مدل هیدرولوژیکی IHACRES و Sacramento و از مقادیر بارش ماهواره‌ای TMPA-3B42V7 و CMADS استفاده کردند. با توجه به ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۶۹ و ۰/۵۶، به ترتیب برای مدل IHACRES و واسنجی شده توسط ماهواره CMADS و TMPA-3B42V7، عملکرد مناسب مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان و عدم قطعیت کمتر این مدل نسبت به مدل Sacramento ثابت شده است.

Tramblay et al. (2023) به بررسی بارش‌های ماهواره‌ای و توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی جریان رودخانه در ۱۲ زیرحوضه در مراکش پرداختند. از بین مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده، بهترین نتیجه را با توجه به ضریب کلینگ‌گوپتا ۰/۵۳ در مرحله واسنجی، مدل IHACRES واسنجی شده با داده‌های بارش روزانه ماهواره SM2RAIN-ASCAT دارد. Abushandi & Merkel (2013) با بررسی دو مدل هیدرولوژیکی IHACRES و HEC-HMS به مطالعه حوضه‌ای در جنوب اردن پرداختند، آن‌ها از پایگاه داده GSMaP\_MVK+ برای به دست آوردن مقادیر بارش استفاده کردند، نتایج نشان داد که مدل توده‌ای IHACRES با ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۵۱ عملکرد قابل قبول و مدل نیمه‌توزیعی HEC-HMS با ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۸۸ عملکرد بسیار خوبی را نشان داده است. پژوهشی توسط عبدالهی پور و همکاران (۱۳۹۴) صورت گرفت که در آن به شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه ساروق چای در حوضه زربنه‌رود با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی به کمک مدل بارش-رواناب IHACRES پرداخته شد. نتایج گویای عملکرد بهتر مدل آموزش‌دیده با داده‌های بارش روزانه ماهواره TMPA-3B427 در مقایسه با داده‌های دو ماهواره PERSIANN و CMORPH می‌باشد.

مطالعه‌ای توسط Oyerinde et al. (2017) صورت گرفت که در طی آن به شبیه‌سازی جریان رودخانه نیجر به کمک مدل IHACRES پرداختند، در این پژوهش از اطلاعات دو پایگاه ماهواره‌ای ECMWF ERA-Interim و GPCP جهت به دست آوردن

2. NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections  
3. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station  
4. Lijiang River

مقدار بارش استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های پایگاه GPCP در مدل‌سازی رواناب همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی دارد. (2022) Mohammadi et al. حوضه‌ای پوشیده از برف در سوییس را به کمک سه مدل هیدرولوژیکی IHACRES، GR4J و MISD مورد بررسی قرار دادند. مدل IHACRES نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری در فرایند شبیه‌سازی از خود نشان داد. آن‌ها همچنین، عملکرد مدل‌ها را با کمک رویکردهای یادگیری ماشین بهبود بخشیدند و نشان دادند که مدل IHACRES بهبود یافته به کمک الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ، ۲۷ درصد نسبت به مدل هیدرولوژیکی IHACRES عملکرد بهتری دارد. (2023) Guo et al. در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی حوضه‌آبریز چانگ جیانگ<sup>۵</sup> در جنوب چین توسط چهار مدل هیدرولوژیکی IHACRES، HBV، GR4J، Sacramento پرداختند. به‌عنوان ورودی به این مدل‌ها، از محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس روزانه از پایگاه‌های CHIRPS، CMORPH، GPCP، GSMaP، PERSIANN، MSWEP و SM2RAIN استفاده شده است. با توجه به معیار کالیبره‌گوشا، عملکرد ماهواره‌های MSWEP و GSMaP از سایر پایگاه‌های ماهواره‌ای بهتر می‌باشد.

پژوهش‌های صورت گرفته نشان‌دهنده کاربرد وسیع مدل IHACRES در ابعاد مختلف زمانی و مکانی، پیش‌بینی جریان‌های سیلابی، مدیریت بحران و همچنین ارزیابی تأثیرات تغییر کاربری اراضی و تنش‌های اقلیمی مانند تغییر الگوهای بارش و دما بر میزان جریان رودخانه و ورودی به سد‌ها می‌باشد؛ همچنین از ماهواره‌های مختلفی نیز در شبیه‌سازی‌های مختلف هیدرولوژیکی استفاده شده است. پایگاه‌هایی همچون SM2RAIN<sup>۱۱</sup>، PERSIANN<sup>۱۰</sup>، MSWEP<sup>۱۲</sup>، GSMaP<sup>۹</sup>، GPM<sup>۸</sup>، GPCP<sup>۷</sup>، CMORPH<sup>۶</sup> از جمله پایگاه‌های مورد استفاده در تحقیقات متنوع می‌باشند. با توجه به این که تاکنون از اطلاعات پایگاه قدرتمندی مانند MERRA در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌آبریز استفاده نشده است، هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی جریان رودخانه طرق با استفاده از داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای MERRA-2 در دو گام زمانی روزانه و ماهانه در حوضه‌آبریز سد طرق با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES می‌باشد. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند در پیش‌بینی هیدروگراف جریان ناشی از بارش‌های پیش‌بینی شده و یا بارش‌هایی که توسط ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری شده‌اند، به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود و یا ناقص، مفید باشد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده:

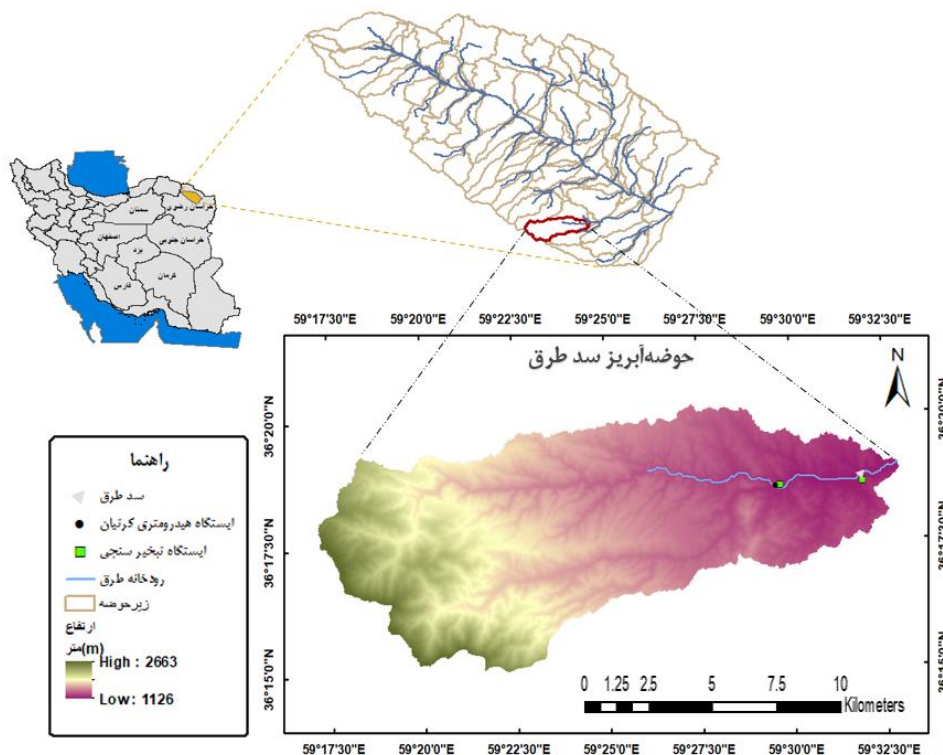
حوضه‌آبریز سد طرق در شمال شرق ایران و در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر مشهد بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است شکل (۱). منطقه مورد مطالعه دارای مساحت ۱۶۴/۷۶ کیلومتر مربع می‌باشد. رودخانه طرق مهم‌ترین رودخانه دائمی در بخش جنوبی مشهد است و از کوه‌های شمالی بینالود سرچشمه می‌گیرد و یکی از سرشاخه‌های کشف‌رود می‌باشد. این رودخانه به دلیل جنس سازندهای زمین‌شناسی، پرشیب بودن حوضه و پوشش گیاهی کم‌پشت، از رسوب‌دهی بالایی برخوردار است (ولایتی و کامکار یزدنژاد، ۱۳۸۷). رودخانه‌های فصلی از جمله رودخانه اردمه در طول فصل زمستان و بهار که میزان بارندگی حداکثر است؛ جاری می‌شوند. پوشش گیاهی حوضه شامل مراتع نیمه‌متراکم و متراکم، زراعت دیم، آبی و باغات می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۷). مرتفع‌ترین نقطه

5. Xiangjiang River basin
6. Climate Prediction Center morphing method
7. Global Precipitation Climatology Project
8. Global Precipitation Measurement
9. Global Satellite Mapping of Precipitation
10. Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
11. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
12. Soil Moisture to Rain

حوضه ۲۶۶۳ متر در جنوب غربی و پست‌ترین نقطه آن ۱۱۲۶ متر در شمال شرقی حوضه نسبت به سطح دریا ارتفاع دارند (زندی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرزندی و همکاران، ۱۳۹۹؛ دستورانی و همکاران، ۱۴۰۱).

برای به‌دست‌آوردن داده‌های زمینی بارش و دما، از ایستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در حوضه استفاده شده‌است. با توجه به نواقص آماری فراوان و اختلاف ارتفاع بسیار زیاد بین ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه و ایستگاه هیدرومتری، اطلاعات بارش و همچنین دمای حداقل و حداکثر به صورت روزانه از ایستگاه تبخیرسنجی سد طرق از تاریخ ۱۳۷۲/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۱/۰۶/۳۱ گرفته شده‌است؛ همچنین داده‌های روزانه جریان رودخانه نیز از ایستگاه هیدرومتری کرتیان برای همین دوره زمانی گرفته شده و سپس از آن‌ها در واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شده‌است. جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری بارش و دبی را در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در این پژوهش، به‌منظور به‌دست‌آوردن مقادیر دما و بارش ماهواره‌ای از داده‌های مدل مبنای NASA-MERRA-2 استفاده شده‌است. داده‌های دما و بارش با فرمت csv با گام‌های زمانی روزانه و ماهانه از تاریخ ۱۳۷۲/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۱/۰۶/۳۱ در محل ایستگاه تبخیرسنجی کرتیان از وبگاه [nasa.gov/data-access](http://nasa.gov/data-access) استخراج گردید؛ پس از استخراج داده‌ها، عملیات پردازش بر روی آن‌ها به کمک نرم‌افزار SPSS صورت‌گرفت تا از همگنی داده‌ها اطمینان حاصل شود. نتایج آزمون ران‌تست نشان می‌دهد که تمامی داده‌ها در سطح ۵ درصد همگن می‌باشند.



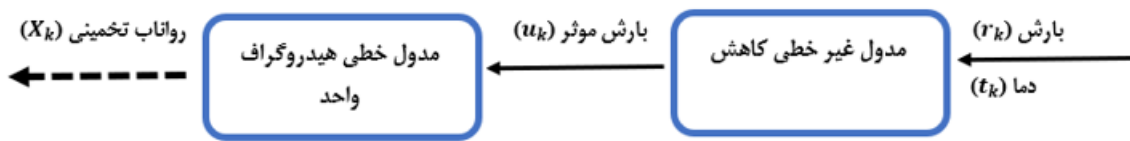
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز سد طرق در محدوده مطالعاتی دشت مشهد-چناران

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در حوضه آبریز سد طرق

کد ایستگاه	نام ایستگاه	طول دوره آماری	نوع ایستگاه	مختصات (XUTM), (YUTM)	ارتفاع (متر)
۶۴-۰۴۴	سد طرق	۱۳۷۲/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۱/۰۶/۳۱	تبخیرسنجی	۴۰۰۶۱۳۲, ۷۲۹۵۸۷	۱۲۴۲
۶۴-۰۲۹	کرتیان	۱۳۷۲/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۱/۰۶/۳۱	هیدرومتری	۴۰۰۵۸۸۲, ۷۲۵۹۰۳	۱۲۳۲

## ساختار مدل هیدرولوژیکی IHACRES:

در ساختار این مدل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی مدول کاهش (تلفات) و خطی مدول هیدروگراف واحد وجود دارد (شکل ۲). مدول غیرخطی کاهش با گرفتن دو پارامتر بارش و دما در گام زمانی مشخص، مقدار بارش موثر را در همان گام زمانی مشخص می‌کند و با فرض غیرقابل نفوذ بودن حوضه آبریز، بارش مازاد توسط تبخیر تعرق حوضه از بین می‌رود و صرفاً بارش موثری باقی می‌ماند که در ادامه به کمک تابع تبدیل مدول خطی هیدروگراف و همچنین به کمک تئوری‌های سیستم‌های خطی (Dooge, 1973)، این بارش به مقدار دبی رودخانه تبدیل و در نهایت مقدار جریان رودخانه شبیه‌سازی می‌شود.



شکل ۲. فرایند شبیه‌سازی مدل IHACRES به کمک دو بخش خطی و غیرخطی (Jakeman & Hornberger, 1993)

بخش اول مدل که در آن بارش به بارش موثر (بخش غیرخطی) تبدیل می‌شود، بارش موثر از حاصل ضرب بارش کل در شاخص رطوبت خاک حوضه در هر بازه زمانی محاسبه می‌شود.

$$u_k = [C(\Phi_k - I)]^p r_k \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن C ظرفیت ذخیره رطوبت حوضه (میلی‌متر)، I آستانه شاخص رطوبت خاک (بدون بعد)، P فاکتور واکنش غیرخطی (بدون بعد) و  $r_k$  بارش مشاهداتی (میلی‌متر بر روز) می‌باشد.  $\Phi_k$  شاخص رطوبت خاک است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$\Phi_k = r_k + \left\{ 1 - \frac{1}{\tau_k} \right\} \Phi_{k-1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن  $\tau_k$  شدت خشکی خاک است که تابعی از دماست و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\tau_k = \tau_w \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن  $\tau_w$  شدت خشکی خاک مبنا (روز)، f فاکتور تعدیل دما (تاثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات  $(^{\circ}C^{-1})$ ،  $T_{ref}$  دمای مرجع ( $^{\circ}C$ ) و  $T_k$  دما در بازه زمانی مورد نظر می‌باشند؛ بعد از محاسبه بارش موثر، هیدروگراف واحد کل با استفاده از بخش خطی در مدل محاسبه می‌گردد.

بخش خطی (تبدیل بارش موثر به رواناب)، دارای سه پارامتر  $V_s$ ،  $\tau_s$ ،  $\tau_q$  می‌باشد. ترکیب دو مولفه جریان سریع  $X_k^q$  و جریان آهسته  $X_k^s$  منجر به تولید رواناب  $X_k$  می‌شود که با استفاده از روابط (۴) تا (۶) محاسبه می‌شوند:

$$X_k = X_k^{(q)} + X_k^{(s)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$X_k^{(q)} = -\alpha_q X_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$X_k^{(s)} = -\alpha_s X_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن  $\alpha_q$  و  $\beta_q$  به ترتیب، ثابت زمانی جریان سریع و  $\alpha_s$  و  $\beta_s$ ، ثابت زمانی جریان آهسته،  $\Delta$  بازه زمانی و  $\tau_q$  و  $\tau_s$  ثابت زمانی فروکش برای جریان سریع و آهسته (بر حسب روز) می‌باشند؛ این ضرایب با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند؛ همچنین، نسبت حجمی جریان سریع و آهسته در رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$V_q = 1 - V_s = \frac{\beta_q}{1 + \alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1 + \alpha_s} \quad \text{رابطه (۹)}$$

به منظور تحلیل جریان رودخانه و بررسی کارایی مدل در کوتاه مدت و میان مدت، فرایند ارزیابی مدل IHACRES، با دو دوره زمانی ۹ و ۲۹ ساله صورت گرفت. طول دوره ۹ ساله از تاریخ ۱ مهر ۱۳۹۲ (شروع سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲) تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۱ (انتهای سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰) و طول دوره ۲۹ ساله از تاریخ ۱۱ دی ۱۳۷۲ تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۱ می‌باشد.

### ماهواره MERRA-2:

استفاده از ماهواره‌ها با توجه به پوشش گسترده آنها نسبت به ایستگاه‌های اندازه‌گیری بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Goodarzi et al. 2022, Goodarzi et al. 2023). یکی از ماهواره‌های مورد استفاده در مطالعات هیدرولوژیکی ماهواره NASA-MERRA-2 است. داده‌های این ماهواره دومین نسخه از پایگاه MERRA<sup>۱۳</sup> می‌باشد که توسط مرکز مدل‌سازی و داده‌پردازی سازمان فضایی و هوانوردی ملی آمریکا (NASA<sup>۱۴</sup>) ارائه شده‌است. این پایگاه نیز مانند پایگاه‌های ECMWF و NCEP/NCAR یک پایگاه اطلاعاتی بازتحلیل است که هدف آن قراردادن مشاهدات مختلف ناسا در یک چارچوب اقلیمی و ارائه داده‌های شبکه‌ای برای کل جهان است. پروژه MERRA که بر تجزیه و تحلیل بلندمدت شرایط آب‌وهوایی از ژانویه ۱۹۸۰ میلادی تاکنون تمرکز نموده‌است، برای طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های آب و هوا، مجموعه‌ای از مشاهدات و نتایج بازکاوی شده مبتنی بر پایش‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های سنجش از دور را در اختیار کاربران قرار می‌دهد (Bloom et al., 1996). داده‌های این مدل از قدرت تفکیک قابل قبولی برخوردار بوده و از کیفیت و دقت بسیار بالاتری نسبت به ابزارهای مشابه (ECMWF<sup>۱۵</sup>, NCEP/NCAR<sup>۱۶</sup>) برخوردار است. در این میان، نسخه MERRA-2 یکی از قابل‌اعتمادترین مدل‌های پایگاه MERRA می‌باشد که با هدف کمک به محققان از جمله اقلیم‌شناسی و محیط زیست برای پاسخگویی به مسائل مربوط به تحقیقات آب‌وهوایی و تغییرات اقلیمی برای بهره‌برداری بهینه از مشاهدات ماهواره‌ای، به کار گرفته شده‌است (Inness et al., 2019; Molod et al., 2012). داده‌های این ماهواره از گام مکانی  $0.625^\circ \times 0.5^\circ$  برخوردار بوده و اطلاعات مربوط به مقادیر دما را در فاصله ۲ متری از سطح زمین برآورد می‌کند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این ماهواره، پایش و شبیه‌سازی مقدار بارش و دما، خصوصاً در نواحی فاقد ایستگاه اندازه‌گیری می‌باشد (Baratto et al., 2024).

13. Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications

14. National Aeronautics and Space Administration

15. National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research

16. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

## شاخص‌های ارزیابی مدل:

برای ارزیابی عملکرد مدل IHACRES بر اساس استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای از شاخص‌های نش‌ساتکلیف (NSE<sup>۱۷</sup>)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>۱۸</sup>)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال‌شده (NRMSE<sup>۱۹</sup>)، میانگین خطا مطلق (MAE<sup>۲۰</sup>)، انحراف<sup>۲۱</sup>، انحراف نسبی<sup>۲۲</sup> و ضریب همبستگی پیرسون (R<sup>۲۳</sup>) بر اساس روابط ۱۰ تا ۱۶ استفاده شد.

$$NSE=1-\frac{\sum(Q_o-Q_m)^2}{\sum(Q_o-\bar{Q}_o)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum(Q_o-Q_m)^2}{N}} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$NRMSE=\frac{RMSE}{Q_{o\max}-Q_{o\min}} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$MAE=\frac{\sum|Q_o-Q_m|}{N} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$Bias=\frac{\sum(Q_o-Q_m)}{N} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$Relative\ Bias=\frac{\sum(Q_o-Q_m)}{\sum Q_o} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$R=\frac{\sum_{t=1}^N(Q_o-\bar{Q}_o)\times(Q_m-\bar{Q}_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N(Q_o-\bar{Q}_o)^2}\times\sqrt{\sum_{t=1}^N(Q_m-\bar{Q}_m)^2}} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در روابط بیان شده،  $Q_o$  مقدار جریان مشاهداتی،  $Q_m$  مقدار جریان شبیه‌سازی شده،  $\bar{Q}_o$  متوسط جریان مشاهداتی،  $N$  تعداد داده‌ها،  $Q_{o\max}$  و  $Q_{o\min}$  به ترتیب، بیشترین و کمترین مقدار جریان مشاهداتی می‌باشند. مقدار نمایه نش‌ساتکلیف بین یک و منفی بی‌نهایت قرار می‌گیرد؛ مقدار یک، به معنای تطابق کامل و همخوان نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی است و مقادیر کمتر از آن به معنای عملکرد ضعیف‌تر مدل می‌باشد. به‌طور کلی، اگر مقدار این شاخص بین ۰/۷۵ تا ۱ باشد، نتایج مدل‌سازی خوب می‌باشد؛ اگر این شاخص بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، نتایج مدل‌سازی رضایت‌بخش و اگر از ۰/۳۶ کمتر باشد، مدل نتایج غیرقابل قبولی را ارائه کرده‌است (Motovilov et al., 1999). شاخص ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE) از صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت نتایج مدل‌سازی بیشتر است. شاخص Bias مقدار انحراف مدل را نشان می‌دهد؛ با توجه به رابطه (۱۴)، مقدار این شاخص اگر منفی باشد، نشان‌دهنده این است که مدل به‌طور میانگین مقادیر جریان شبیه‌سازی را بیشتر از داده‌های مشاهداتی، برآورد می‌کند و به اصطلاح، مدل به سمت بیش‌برآوردی انحراف دارد. ضمن آن که هرچه ضریب همبستگی پیرسون (R) به ۱ نزدیک‌تر باشد، به معنای همبستگی مثبت کامل بین متغیرهای مورد بررسی می‌باشد و نشان می‌دهد که مدل از صحت بیشتری برخوردار است.

از نمودار تیلور (Taylor Diagram) برای مقایسه عملکرد مدل IHACRES در دو دوره زمانی کوتاه‌مدت ۹ ساله و میان‌مدت ۲۹ ساله با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای استفاده شد. این نمودار، روشی مشخص برای تعیین خطای شبیه‌سازی مدل در مقایسه با داده‌های واقعی است و به داشتن درکی بهتر از عملکرد مدل کمک می‌کند (Taylor, 2001).

17. Nash–Sutcliffe Efficiency coefficient
18. Root Mean Square Error
19. Normalized Root Mean Square Error
20. Mean Absolute Error
21. Bias
22. Relative Bias
23. Pearson Correlation Coefficient



## یافته‌های پژوهش و بحث

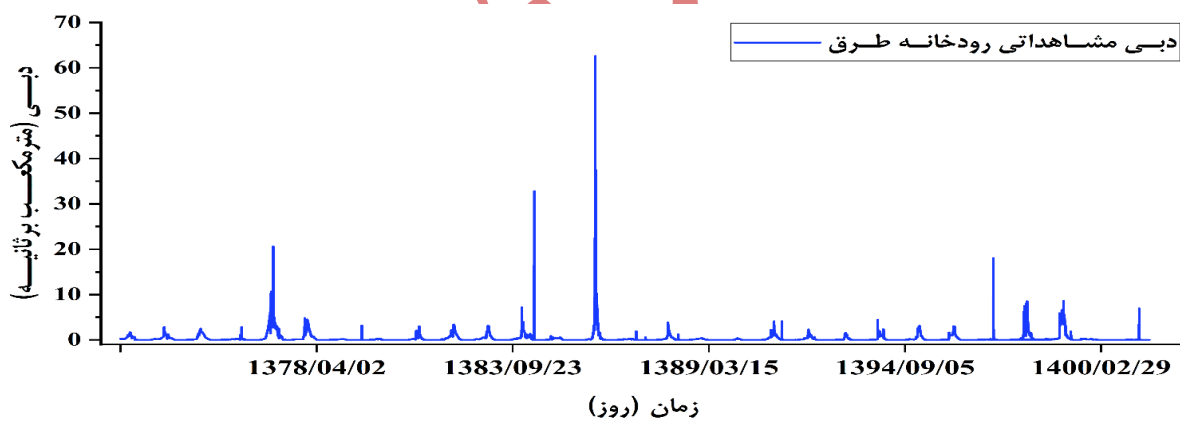
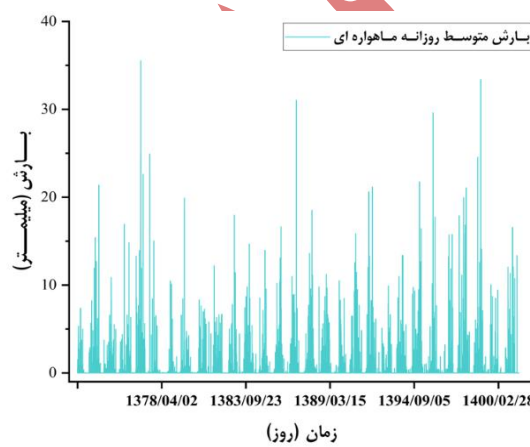
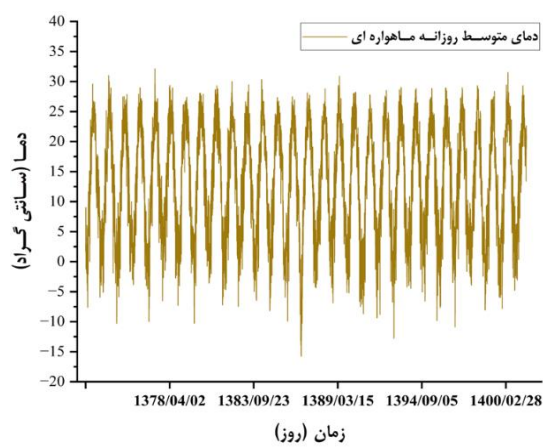
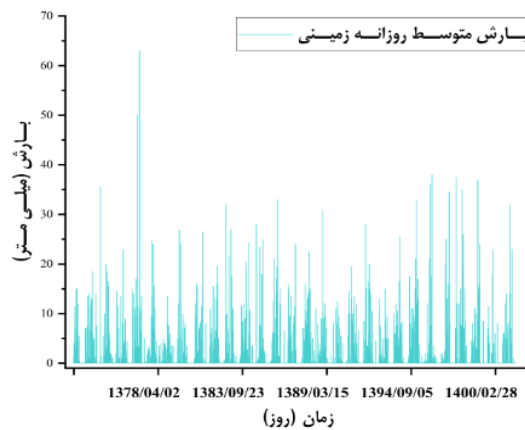
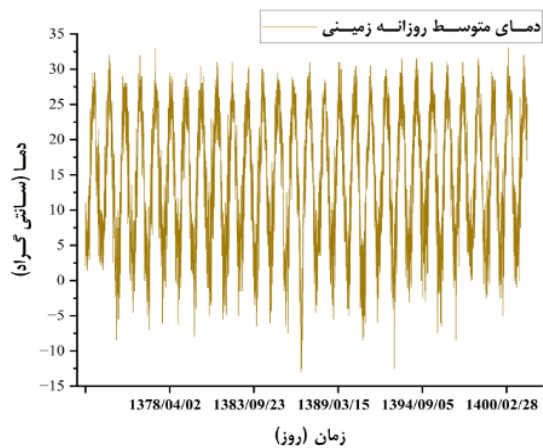
پس از اخذ داده‌های بارش، دما و دبی روزانه رودخانه طرق از ایستگاه‌های تبخیرسنجی سد طرق و هیدرومتری کرتیان و همچنین داده‌های دما و بارش روزانه ماهواره MERRA-2 در بازه‌های زمانی ۹ساله و ۲۹ساله، سری زمانی این مقادیر مورد بررسی قرار گرفت. سری زمانی متغیرهای بارش، دما و دبی روزانه زمینی و ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۹ساله، از تاریخ ۱۳۷۲/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۱/۰۶/۳۱، در شکل (۳) نشان داده شده‌است.

میانگین تعداد روزهای بارانی در سه دهه (از ۱۳۷۲/۱۰/۱۱ تا ۱۳۸۲/۱۰/۱۰ دهه اول، از ۱۳۸۲/۱۰/۱۱ تا ۱۳۹۲/۱۰/۱۰ دهه دوم و از ۱۳۹۲/۱۰/۱۱ تا ۱۴۰۱/۰۶/۳۱ دهه سوم) برای بارش زمینی و ماهواره‌ای محاسبه شده‌است شکل (۴). با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که اختلاف بین تعداد روزهای بارانی اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی با تعداد روزهای بارانی برآورد شده بر اساس ماهواره در دهه اخیر کاهش یافته‌است. همچنین از شاخص‌های آماری برای مقایسه داده‌های ایستگاهی و داده‌های حاصل از ماهواره برای دو متغیر بارش و دما استفاده شده‌است، (جدول ۲). بر اساس این جدول، انحراف معیار بارش در داده‌های ایستگاهی همواره بالاتر از داده‌های ماهواره‌ای است. این تفاوت می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که داده‌های بارش ماهواره‌ای نوسانات کمتری را نسبت به داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهند. همچنین، بیشتر بودن انحراف معیار در دوره ۹ساله در مقایسه با دوره ۲۹ساله نشان می‌دهد که نوسانات بارش در سال‌های اخیر افزایش یافته‌است. انحراف معیار دما در هر دو نوع داده (زمینی، ماهواره‌ای) تغییر چندانی نکرده و به‌طور نسبی ثابت مانده و نشان می‌دهد نوسانات دما در طول زمان تقریباً یکسان باقی مانده‌است. بارش سالانه مشاهداتی با مقادیر بارش سالانه حاصل از ماهواره MERRA-2 و مقادیر اختلاف این دو در هر سال، در بازه زمانی ۲۹ساله (از ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۱) در شکل (۵) مورد مقایسه قرار گرفته‌است. با توجه به شکل‌های ۵الف و ۵ب و مشاهده می‌شود که در طول زمان اختلاف بین مقادیر بارش مشاهده‌شده (ایستگاهی) با مقادیر بارش ماهواره‌ای کاهش یافته‌است. مشاهده می‌شود که در طول زمان دقت مدل ماهواره‌ای بهتر شده‌است و با نزدیک‌تر شدن به زمان حال، نه تنها اختلاف بین مقادیر بارش ماهواره‌ای و مشاهداتی کمتر شده‌است؛ بلکه اختلاف بین تعداد روزهای بارانی نیز کاهش یافته‌است. در نتیجه به نظر می‌رسد که بتوان از اطلاعات بارش ماهواره MERRA-2 در حوضه‌هایی با اقلیم مشابه که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری شده بارش و دمای زمینی وجود ندارد، استفاده کرد.

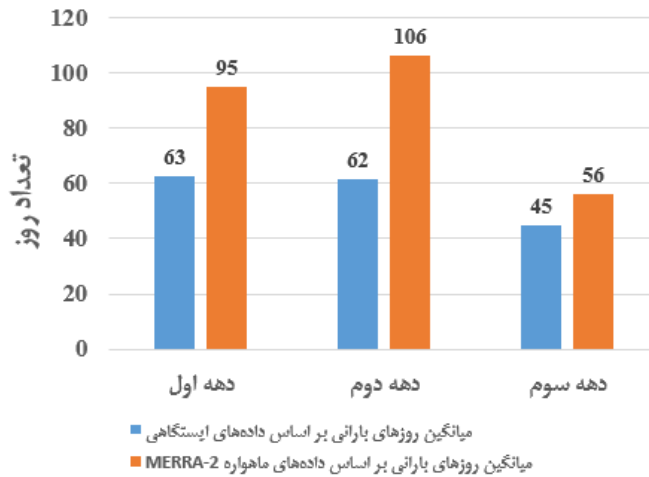
پس از تعیین مقدار متوسط بارندگی سالانه در طول این دوره ۲۹ساله، سال‌هایی که در آن‌ها بارندگی از میانگین دوره بیشتر بوده‌است، به‌عنوان سال‌های مرطوب (پرباران) و سال‌هایی که در آن‌ها بارندگی از متوسط سالانه دوره کمتر بوده‌است، به‌عنوان سال‌های خشک (کم‌باران) در نظر گرفته شد (شکل ۶). با توجه به شکل‌های ۵الف و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که مدل ماهواره‌ای، مقادیر بارش سالانه را کمتر از مقادیر بارش واقعی برآورد نموده‌است. ضمن اینکه با توجه به این شکل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین اختلاف بین بارش مشاهداتی و بارش ماهواره‌ای مربوط به سال‌های پرباران (سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۲، ۱۳۸۴) است.

جدول ۲. مقایسه خصوصیات آماری داده‌های بارش و دمای ماهواره‌ای و اندازه‌گیری شده زمینی

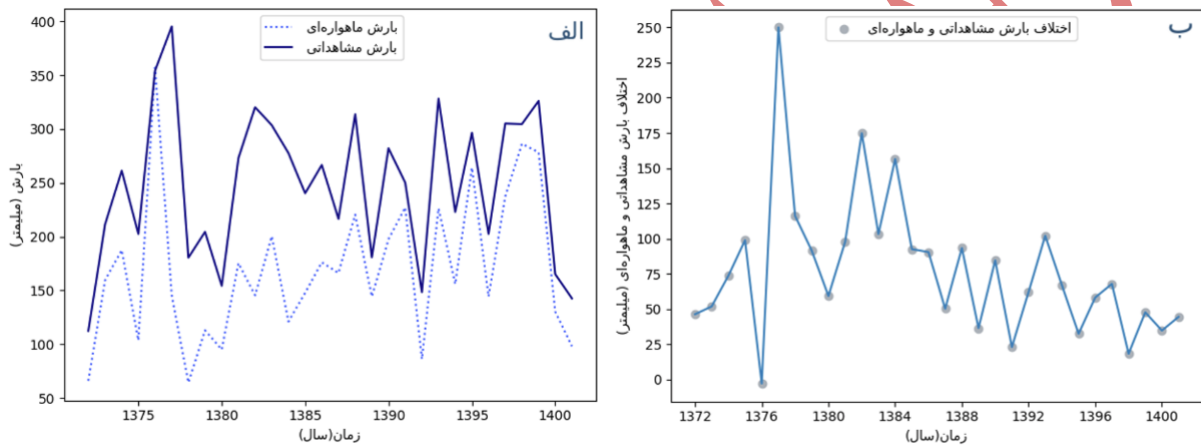
معیار آماری	میانگین		انحراف معیار		چولگی	
	داده‌های ایستگاهی	داده‌های ماهواره‌ای	داده‌های ایستگاهی	داده‌های ماهواره‌ای	داده‌های ایستگاهی	داده‌های ماهواره‌ای
نوع داده	داده‌های ایستگاهی	داده‌های ماهواره‌ای	داده‌های ایستگاهی	داده‌های ماهواره‌ای	داده‌های ایستگاهی	داده‌های ماهواره‌ای
طول دوره	۹ساله	۹ساله	۹ساله	۹ساله	۹ساله	۹ساله
بارش (mm)	۰٫۷۱	۰٫۵۷	۰٫۴۹	۰٫۲۴	۰٫۲۴	۰٫۲۴
دما (°C)	۱۴٫۵۲	۱۲٫۸۴	۱۳٫۰۲	۱۳٫۱۵	۱۳٫۰۲	۱۳٫۱۵



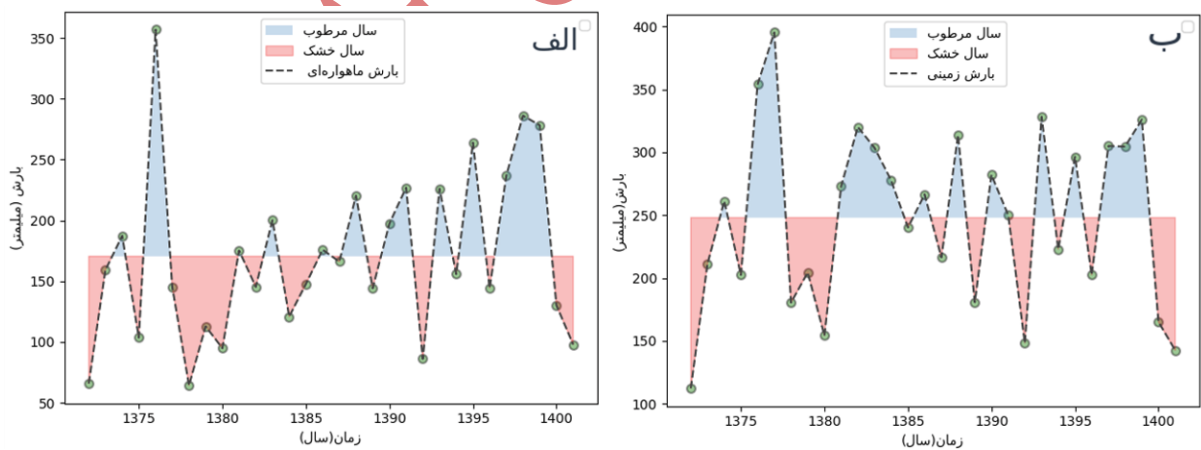
شکل ۳. سری زمانی مقادیر داده‌های بارش و دما زمینی و ماهواره‌ای و همچنین مقادیر دبی روزانه مشاهداتی مورد استفاده در مدل در طول بازه زمانی ۱۱ بهمن ۱۳۷۲ تا ۳۱ شهریور ۱۴۰۱



شکل ۴. مقایسه میانگین تعداد روزهای بارانی در دهه‌های مختلف بر اساس داده‌های ایستگاهی و ماهواره‌ای



شکل ۵. الف) مقایسه مقادیر سالانه بارش ماهواره‌ای و بارش زمینی اندازه‌گیری شده در طول دوره آماری ۲۹ ساله (ب) مقادیر اختلاف سالانه بارش ماهواره‌ای و بارش زمینی اندازه‌گیری شده در طول دوره آماری ۲۹ ساله



شکل ۶. مقایسه نوسانات و مقادیر بارندگی سالانه در سال‌های خشک و مرطوب بر اساس مقادیر بارش ماهواره‌ای (الف) و زمینی (ب)

در فرایند آموزش و تربیت مدل IHACRES، مدل به‌طور کلی برای ۴ وضعیت مورد آموزش و آزمون قرار گرفت. به عبارت دیگر، مدل برای دو دوره زمانی (۹ ساله و ۲۹ ساله) و برای دو گام زمانی (روزانه و ماهانه) مورد استفاده واقع شد و مقادیر دبی خروجی از حوضه مدل‌سازی شدند. طول دوره واسنجی مدل در هر وضعیت در جدول (۳) مشخص شده‌است.

جدول ۳. طول دوره واسنجی مدل IHACRES

شماره وضعیت	طول دوره آماری و گام زمانی	شروع دوره	پایان دوره
۱	۹ ساله، روزانه	۱۳۹۲/۰۶/۳۱	۱۳۹۸/۱۰/۱۸
۲	۹ ساله، ماهانه	۱۳۹۲	آذر ۱۳۹۸
۳	۲۹ ساله، روزانه	۱۳۷۲/۱۰/۱۱	۱۳۹۴/۰۵/۰۷
۴	۲۹ ساله، ماهانه	بهمن ۱۳۷۲	تیر ۱۳۹۹

در مرحله واسنجی، مقادیر شدت خشکی خاک مینا ( $\tau_w$ ) و فاکتور تعدیل دما ( $f$ ) با روش سعی و خطا به گونه‌ای تعیین شدند که بر اساس معیارهای ارزیابی خطا، کمترین خطا و بهترین برازش حاصل شود. مقدار این پارامترها در مطالعه حاضر در جدول (۴) نشان داده شده است. پارامتر  $c$  حاصل از مرحله واسنجی مدل، توانایی حوضه در نگهداری رطوبت را نشان می‌دهد؛ پارامتر  $V_s$  نیز میزان مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه را نشان می‌دهد.

جدول ۴. پارامترهای حاصل از مرحله واسنجی مدل IHACRES

بازه زمانی	$\tau_s$ (day)	$V_s$	$\alpha_s$	$\beta_s$	$c$ (mm)	$\tau_w$ (day)	$f$ ( $^{\circ}C^{-1}$ )
۹ ساله، روزانه	۱۷/۹۲۱	۱/۰۰۰	-۰/۹۴۶	-۰/۰۵۴	۰/۰۰۳۰۱۲	۱۷/۰۰۰	۴/۰۰۰۰
۹ ساله، ماهانه	۱/۰۶۶	۱/۰۰۰	-۰/۳۹۱	-۰/۶۰۹	۰/۰۰۱۹۴۵	۲/۳۰۰	۴/۰۰۰۰
۲۹ ساله، روزانه	۲۶۴/۱۸	۱/۰۰۰	-۰/۹۶۳	-۰/۰۳۷	۰/۰۰۶۳۲۹	۳/۰۰۰۰	۳/۹۵۰۰
۲۹ ساله، ماهانه	۱/۰۲۲	۱/۰۰۰	-۰/۳۷۶	-۰/۶۲۴	۰/۰۰۲۷۷۳	۲/۰۰۰۰	۲/۵۰۰۰
۹ ساله، روزانه	۱۶/۵۴۴	۱/۰۰۰	-۰/۹۴۱	-۰/۰۵۹	۰/۰۰۴۳۴۵	۱۸/۶۰۰	۴/۰۰۰۰
۹ ساله، ماهانه	۰/۴۳۳	۱/۰۰۰	-۰/۰۶۴	-۰/۹۳۶	۰/۰۰۴۲۰۹	۲/۰۰۰۰	۲/۸۰۰۰
۲۹ ساله، روزانه	۳۱/۱۱۹	۱/۰۰۰	-۰/۰۹۹	-۰/۹۰۱	۰/۰۰۴۰۴۸	۲/۰۰۰۰	۲/۸۰۰۰
۲۹ ساله، ماهانه	۰/۶۹۱	۱/۰۰۰	-۰/۲۳۵	-۰/۷۶۵	۰/۰۰۷۴۴۵	۲/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰

داده‌های زمینی

MERRA-2

داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش، بازه بهینه برای پارامترهای فاکتور تعدیل دما ( $f$ ) در محدوده ۰ تا ۴، شدت خشکی خاک ( $\tau_w$ ) در محدوده ۲ تا ۳۰ در نظر گرفته شده است؛ در این بازه بهترین واسنجی مدل حاصل شده است. مقدار پارامتر  $V_s$  بین ۰ و ۱ متغیر است؛ هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، حوضه از دبی پایه بیشتری برخوردار است. با توجه به مقدار ۰/۰۰۳ پارامتر  $c$  برای دوره کوتاه مدت ۹ ساله روزانه با داده‌های زمینی که از مقدار ۰/۰۰۶۳ برای دوره میان مدت ۲۹ ساله روزانه با داده‌های زمینی، کمتر می‌باشد؛ می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت زمان، ظرفیت و توانایی حوضه در حفظ و نگهداری رطوبت دستخوش تغییراتی شده است که می‌تواند ناشی از تغییرات وسیع در کاربری اراضی در طی ۲۹ سال باشد؛ شکل ۷ نمونه‌ای از تغییر کاربری اراضی (تبدیل اراضی طبیعی به باغ ویلا) را در بخشی از این حوضه نشان می‌دهد. مقدار پارامتر  $V_s$  برای داده‌های زمینی ۱ می‌باشد که نشان می‌دهد حوضه آبریز سد طرق از جریان پایه بالایی برخوردار است؛ مطالعات خیرفام و همکاران (۱۳۹۲) در حوضه گرگان رود و زارعی و همکاران (۱۳۹۰) در حوضه کسلیان نیز جریان پایه بالایی را در حوضه‌های مورد مطالعه آنها نشان داد؛ در حالی که حوضه آبریز کن در مطالعه گودرزی و همکاران (۱۳۹۶) از جریان پایه نسبتاً متوسطی برخوردار می‌باشد.

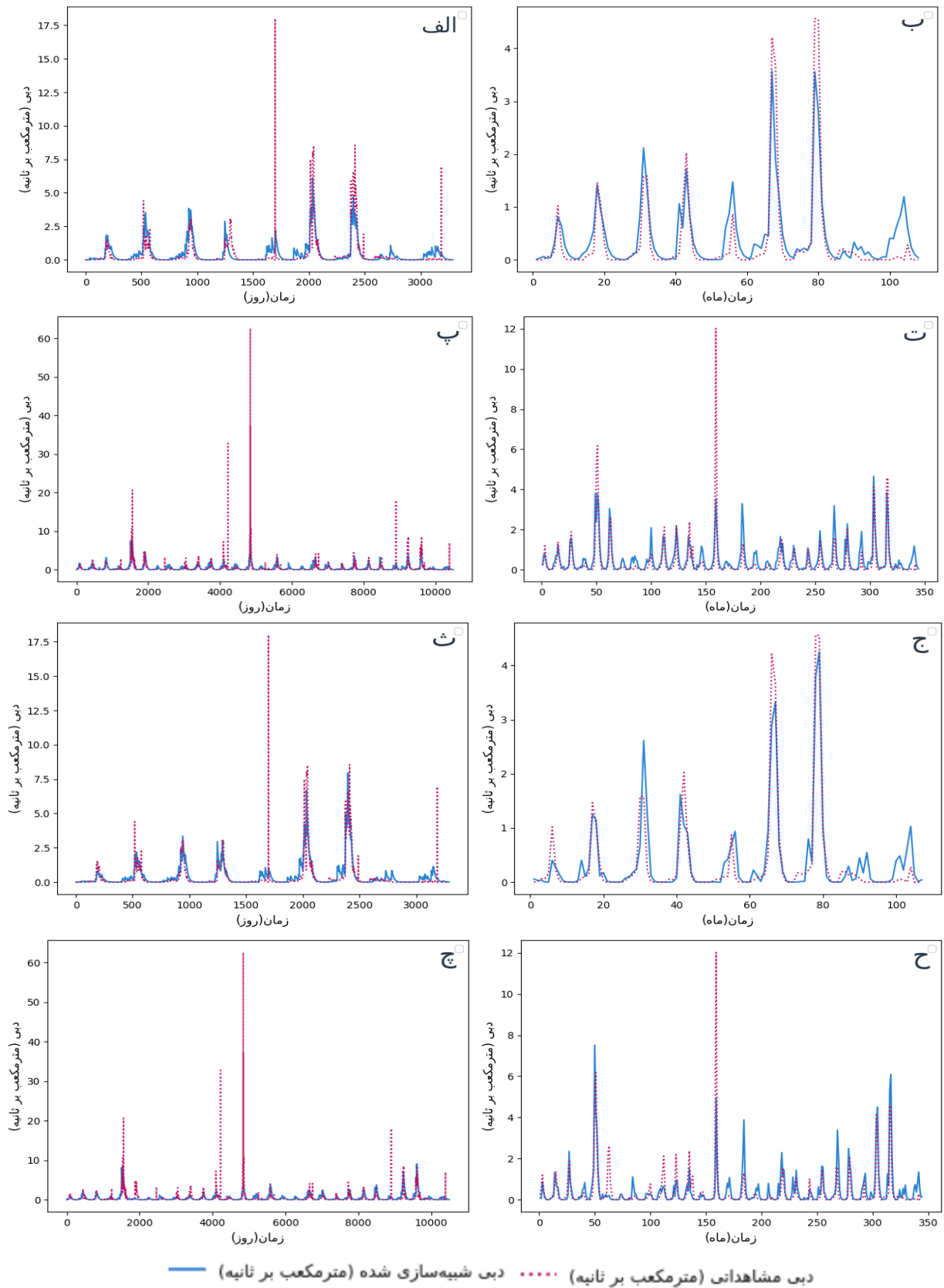
به منظور مقایسه عملکرد مدل در وضعیت‌های مختلف (طول دوره آماری مختلف و گام‌های زمانی مختلف) و همچنین مقایسه عملکرد مدل در استفاده از داده‌های زمینی با داده‌های ماهواره‌ای، مقادیر شاخص‌های خطاسنجی بر اساس روابط ۱۰ تا ۱۶ تعیین شدند؛ که نتایج آن‌ها در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. نمودار مقایسه‌ای مقادیر دبی مشاهده شده و مدل‌سازی شده در هر یک از وضعیت‌ها و هر یک از دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷. نمونه‌ای از تغییر کاربری اراضی و تبدیل آنها به باغ‌ویلا در بخشی از حوضه آبریز سد طرق الف) سال ۲۰۰۹ ب) سال ۲۰۲۲

با توجه به تحلیل داده‌های زمینی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری و داده‌های ماهواره‌ای MERRA-2، پژوهش حاضر نتایج قابل قبولی را درباره عملکرد مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان نشان می‌دهد. با توجه به جدول‌های ۵ و ۶، شاخص‌های ارزیابی مدل نشان می‌دهند که عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان در دوره ۲۹ ساله ضعیف‌تر از دوره ۹ ساله است؛ علت این امر را می‌توان ناشی از تغییر کاربری اراضی و احیانا پدیده گرمایش جهانی و افزایش تدریجی دمای حوضه و تاثیر این پدیده‌ها بر سایر پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه دانست (زندگی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرزندی و همکاران، ۱۳۹۹؛ دستورانی و همکاران، ۱۴۰۱). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که این مدل در شبیه‌سازی جریان در مقیاس زمانی ماهانه نسبت به مقیاس روزانه بهتر عمل می‌کند که با یافته‌های پژوهش گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) تطابق دارد.

با مقایسه مقادیر ضریب نش‌ساتکلیف  $0/8461$  حاصل از داده‌های ماهواره‌ای در برابر مقدار  $0/7688$  حاصل از داده‌های زمینی در گام زمانی روزانه در دوره کوتاه‌مدت ۹ ساله و همچنین؛ مقدار ضریب نش‌ساتکلیف  $0/6046$  حاصل از داده‌های ماهواره‌ای در برابر مقدار  $0/5793$  حاصل از داده‌های زمینی در گام زمانی روزانه در دوره میان‌مدت ۲۹ ساله، و همچنین با مقایسه سایر شاخص‌های خطاسنجی، می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد مدل IHACRES با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در مقیاس روزانه در مجموع مشابه و یا کمی بهتر از عملکرد این مدل با استفاده از داده‌های زمینی در مقیاس روزانه است.



**شکل ۸.** الف) نمودار واسنجی مدل IHACRES در دوره ۹ ساله روزانه با داده‌های زمینی ب) نمودار واسنجی مدل در دوره ۹ ساله ماهانه با داده‌های زمینی  
 پ) نمودار واسنجی مدل در دوره ۲۹ ساله روزانه با داده‌های زمینی ت) نمودار واسنجی مدل در دوره ۲۹ ساله ماهانه با داده‌های زمینی  
 ث) نمودار واسنجی مدل در دوره ۹ ساله روزانه با داده‌های ماهواره‌ای ج) نمودار واسنجی مدل در دوره ۹ ساله ماهانه با داده‌های ماهواره‌ای  
 چ) نمودار واسنجی مدل در دوره ۲۹ ساله روزانه با داده‌های ماهواره‌ای ح) نمودار واسنجی مدل در دوره ۲۹ ساله ماهانه با داده‌های ماهواره‌ای

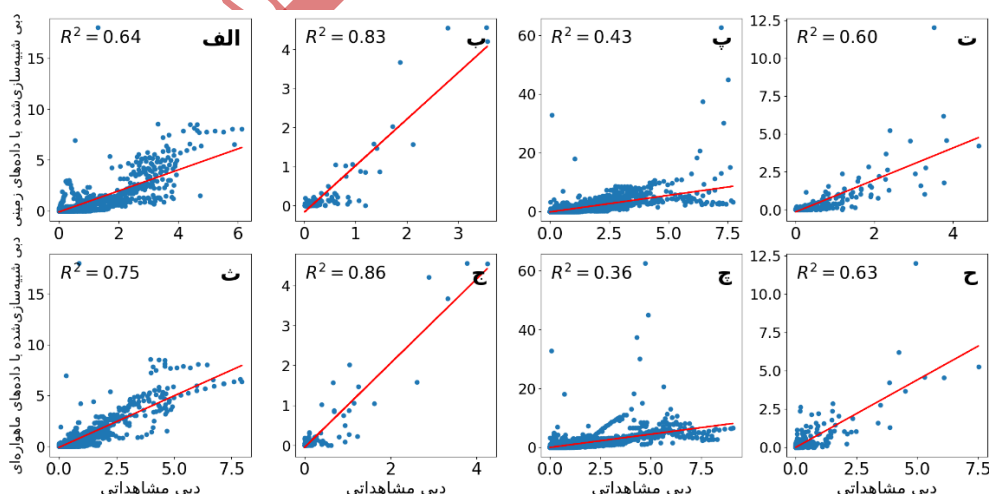
جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی مدل IHACRES در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های زمینی

طول آماری	R	Relative Bias	Bias (m <sup>3</sup> /s)	MAE (m <sup>3</sup> /s)	NRMSE	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	NSE
۹ ساله، روزانه	۰/۷۵۱۲	-۰/۳۸۰۴	-۰/۱۲۲۸	۰/۲۸۰۱	۰/۰۳۵۶	۰/۶۴۱۱	-۰/۵۳۷۶
۹ ساله، ماهانه	۰/۹۰۰۵	-۰/۲۶۷۱	-۰/۰۸۶۴	۰/۱۹۵۴	۰/۰۸۰۱	۰/۳۳۶۹	-۰/۷۹۰۹
۲۹ ساله، روزانه	۰/۶۳۳۰	-۰/۳۴۱۱	-۰/۱۲۲۴	۰/۲۸۶۴	۰/۰۱۷۷	۱/۱۰۹۹	-۰/۳۹۱۰
۲۹ ساله، ماهانه	۰/۷۴۸۵	۰/۰۰۰۶	۰/۱۱۳۴	۰/۲۷۲۰	۰/۰۵۶۷	۰/۶۸۱۶	-۰/۵۴۱۲
۹ ساله، روزانه	۰/۹۱۹۶	-۰/۲۰۵۲	-۰/۰۰۰۲	۰/۲۵۶۶	۰/۰۶۵۶	۰/۵۶۱۵	-۰/۷۶۸۸
۹ ساله، ماهانه	۰/۹۳۰۱	-۰/۲۲۷۱	-۰/۰۷۷۹	۰/۳۷۶۸	۰/۱۰۴۵	۰/۴۷۶۷	-۰/۸۰۹۳
۲۹ ساله، روزانه	۰/۷۹۳۴	-۰/۰۲۹۲	-۰/۰۱۰۹	۰/۲۹۵۲	۰/۰۴۰۲	۰/۷۲۲۹	-۰/۵۷۹۳
۲۹ ساله، ماهانه	۰/۸۸۱۷	-۰/۴۷۶۸	-۰/۱۷۷۸	۰/۲۸۸۹	۰/۱۰۵۲	۰/۴۸۰۰	-۰/۷۳۸۷

جدول ۶. شاخص‌های ارزیابی مدل IHACRES در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MERRA-2

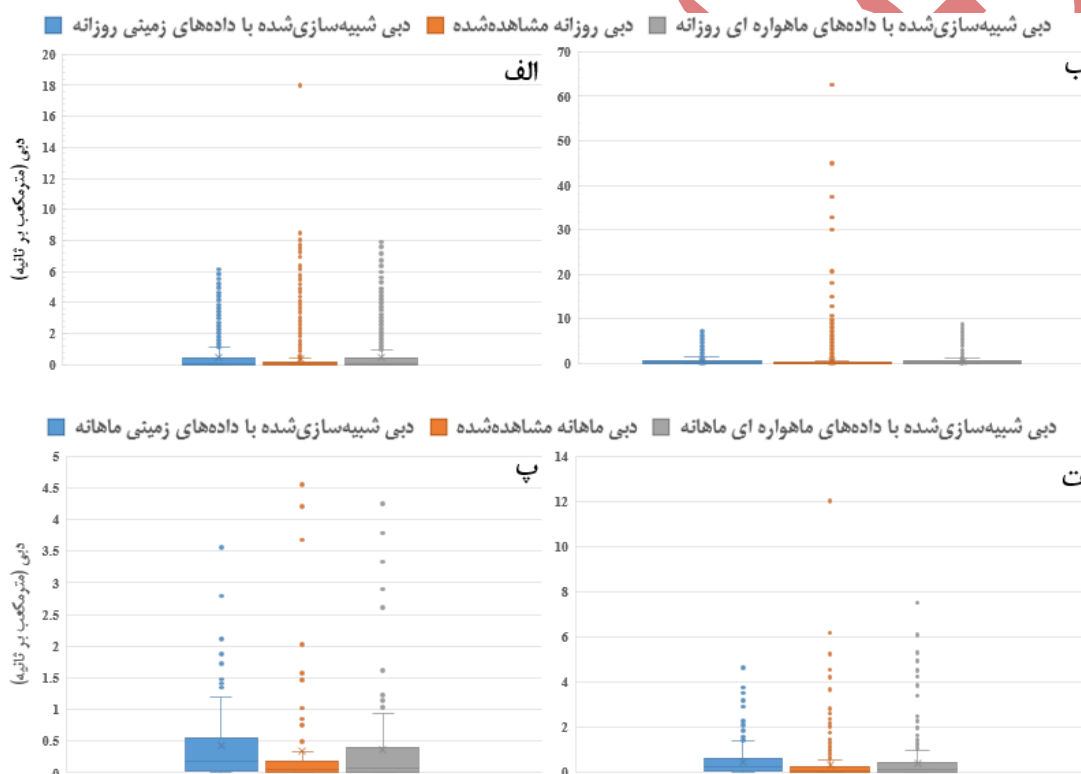
طول آماری	R	Relative Bias	Bias (m <sup>3</sup> /s)	MAE (m <sup>3</sup> /s)	NRMSE	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	NSE
۹ ساله، روزانه	۰/۸۲۱۰	-۰/۱۹۸۹	-۰/۰۶۴۲	۰/۱۹۱۲	۰/۰۳۰۲	۰/۵۴۳۰	-۰/۶۶۸۲
۹ ساله، ماهانه	۰/۸۹۶۰	-۰/۰۲۳۷	-۰/۰۰۷۷	۰/۱۶۷۰	۰/۰۷۸۳	۰/۳۲۹۶	-۰/۸۰۲۴
۲۹ ساله، روزانه	۰/۵۵۰۱	-۰/۱۷۰۱	-۰/۰۶۱۱	۰/۳۰۱۴	۰/۰۱۹۰	۱/۱۹۰۰	-۰/۳۰۰۷
۲۹ ساله، ماهانه	۰/۷۷۲۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۸	۰/۲۵۸۹	۰/۰۵۲۲	۰/۶۳۹۳	-۰/۵۹۶۴
۹ ساله، روزانه	۰/۹۲۵۰	-۰/۲۹۰۲	-۰/۱۱۱۳	۰/۲۲۷۸	۰/۰۵۲۵	۰/۴۵۸۴	-۰/۸۴۶۱
۹ ساله، ماهانه	۰/۹۶۶۶	-۰/۲۲۷۱	-۰/۰۸۴۷	۰/۲۰۰۶	۰/۰۶۶۱	۰/۳۰۱۵	-۰/۹۲۱۴
۲۹ ساله، روزانه	۰/۸۵۷۴	-۰/۸۰۳۷	-۰/۲۹۹۶	۰/۳۶۶۷	۰/۰۳۸۹	۰/۶۹۹۶	-۰/۶۰۴۶
۲۹ ساله، ماهانه	۰/۹۲۴۱	-۰/۷۰۵۹	-۰/۲۶۳۳	۰/۳۱۶۹	۰/۱۱۶۲	۰/۵۳۰۲	-۰/۶۸۱۲

در مرحله صحت‌سنجی با داده‌های زمینی مقدار ضریب همبستگی پیرسون (R) برای دوره ۲۹ ساله در مقیاس ماهانه ۰/۸۸۱۷ و مشابه همین شرایط با داده‌های ماهواره‌ای ۰/۹۲۴۱ می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی بسیار خوب بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی جریان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و یا زمینی است؛ همچنین با توجه به شکل ۹ و مقایسه ضریب تعیین نمودارها، به‌طور کلی، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های ماهانه نسبت به داده‌های روزانه بهتر می‌باشد؛ ضمن آن که مدل در دوره ۹ ساله نسبت به دوره ۲۹ ساله نتایج بهتری را ارائه کرده‌است. دوره ۲۹ ساله ماهانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مقادیر جریان را نسبت به همین دوره با استفاده از داده‌های زمینی بهتر شبیه‌سازی کرده‌است.



شکل ۹. الف) نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره ۹ ساله روزانه با داده‌های ایستگاهی و ث) با داده‌های ماهواره‌ای ب) نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره ۹ ساله ماهانه با داده‌های ایستگاهی و ج) با داده‌های ماهواره‌ای پ) نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره ۲۹ ساله روزانه با داده‌های ایستگاهی و چ) با داده‌های ماهواره‌ای ت) نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل در دوره ۲۹ ساله ماهانه با داده‌های ایستگاهی و ح) با داده‌های ماهواره‌ای

مقدار خطای مطلق (MAE) در مرحله صحت‌سنجی با داده‌های زمینی برای دوره ۲۹ ساله در مقیاس ماهانه ۰/۲۸۸۹ مترمکعب بر ثانیه و با داده‌های ناشی از ماهواره MERRA-2، ۰/۳۱۶۹ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. به عبارت دیگر، مدل بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده ایستگاهی، به‌طور متوسط جریان ماهانه را با خطای ۲۸۹ لیتر بر ثانیه برآورد می‌کند که نسبت به داده‌های ماهواره‌ای، خطای کمتری دارد. با توجه به مقادیر منفی Bias و رابطه ۱۴، مدل به‌طور میانگین، مقادیر جریان بیشتری را نسبت به مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده‌است؛ به عبارت دیگر، مدل بیش برآورد می‌باشد که با نتایج سیفی و همکاران (۱۳۹۷) همپوشانی دارد. با توجه به شکل‌های ۸ و ۱۰، می‌توان دریافت که این مدل به‌خوبی توانسته‌است جریان‌های کم و متوسط را شبیه‌سازی کند؛ ولی در شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر رودخانه توانایی اندکی از خود نشان داده‌است. از طرف دیگر، با توجه به نمودار جعبه‌ای در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که مدل در برآورد دبی‌های اوج، در دوره ۹ ساله روزانه با داده‌های ماهواره‌ای نسبت به دوره ۹ ساله روزانه با داده‌های زمینی بهتر عمل کرده‌است.



شکل ۱۰. الف) نمودار جعبه‌ای دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده برای دوره ۹ ساله روزانه و ب) برای دوره ۲۹ ساله روزانه و پ) برای دوره ۹ ساله ماهانه و ت) برای دوره ۲۹ ساله ماهانه

در بخش دیگری از پژوهش، توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی رودخانه در سال‌های خشک و مرطوب مورد مقایسه قرار گرفت؛ که نتایج به تفکیک هر سال در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج ارائه‌شده در این دو جدول، می‌توان دریافت که در سال‌های خشک، متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده جریان با داده‌های ماهواره‌ای MERRA-2، به متوسط جریان مشاهداتی رودخانه طرق نزدیک‌تر می‌باشد؛ در حالی که در سال‌های مرطوب، داده‌های زمینی نتیجه بهتری را در مقایسه با داده‌های ماهواره‌ای ارائه داده‌اند؛ ضمن این‌که در تمام وضعیت‌ها مدل تمایل به برآورد بیشتر دبی دارد.



جدول ۷. متوسط مقادیر سالانه جریان رودخانه (مترمکعب بر ثانیه) مشاهداتی و مدل سازی شده بر اساس داده های زمینی و ماهواره ای، رودخانه طرق در سال های خشک

شماره سال	متوسط جریان رودخانه	متوسط دبی شبیه سازی شده با داده های زمینی	متوسط دبی شبیه سازی شده با داده های ماهواره ای
۱۳۷۲	۰/۳۵۶۸	۰/۳۹۹۱	۰/۱۸۵۵
۱۳۷۳	۰/۲۶۰۱	۰/۳۴۴۰	۰/۲۹۰۹
۱۳۷۵	۰/۳۲۱۷	۰/۴۴۳۷	۰/۳۰۹۲
۱۳۷۸	۰/۳۷۱۱	۰/۵۶۵۹	۰/۰۷۷۷
۱۳۷۹	۰/۰۵۰۱	۰/۳۴۸۴	۰/۲۱۶۲
۱۳۸۰	۰/۰۴۶۴	۰/۲۰۷۱	۰/۱۵۲۵
۱۳۸۵	۰/۱۳۷۹	۰/۳۹۰۹	۰/۲۵۰۵
۱۳۸۷	۰/۰۵۸۱	۰/۲۵۰۹	۰/۳۲۸۲
۱۳۸۹	۰/۰۴۷۰	۰/۱۹۲۷	۰/۲۲۹۹
۱۳۹۲	۰/۱۴۱۶	۰/۱۸۶۸	۰/۳۰۵۰
۱۳۹۴	۰/۱۵۸۱	۰/۲۵۴۸	۰/۴۳۳۳
۱۳۹۶	۰/۲۶۵۶	۰/۱۵۷۳	۰/۴۹۸۲
۱۴۰۰	۰/۰۱۲۶	۰/۱۵۹۴	۰/۲۲۰۵
۱۴۰۱	۰/۰۶۲۶	۰/۲۸۹۸	۰/۲۹۱۱
<u>میانگین</u>	<u>۰/۱۶۳۶</u>	<u>۰/۳۰۶۵</u>	<u>۰/۲۷۰۶</u>

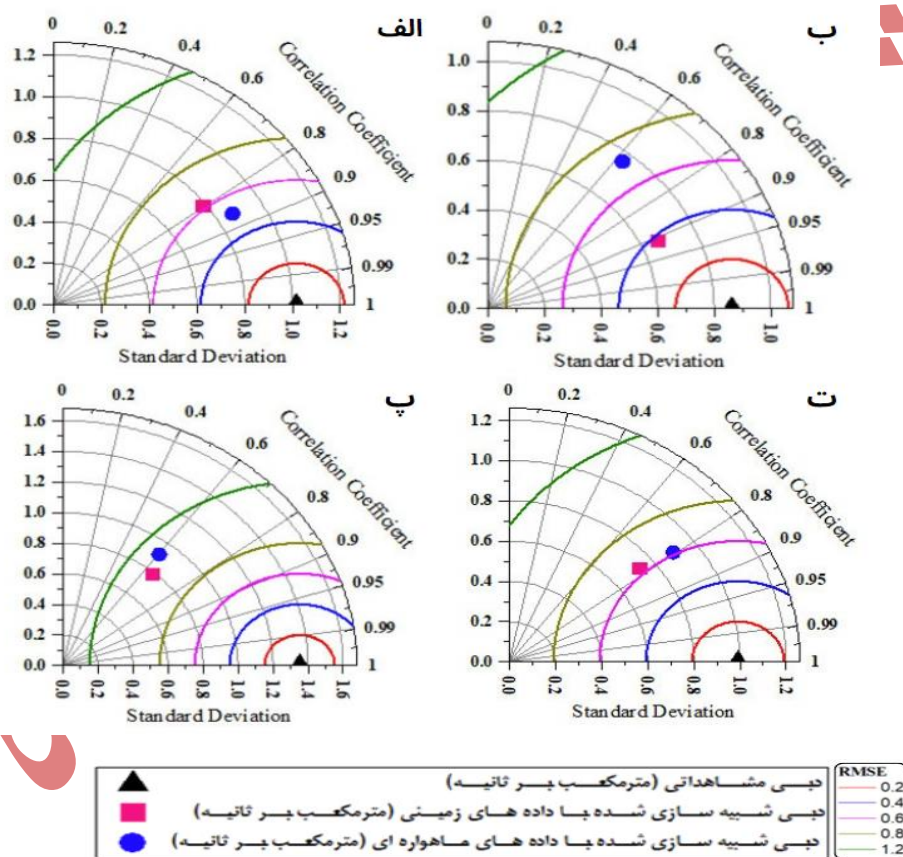
جدول ۸. متوسط مقادیر سالانه جریان (مترمکعب بر ثانیه) مشاهداتی و مدل سازی شده بر اساس داده های زمینی و ماهواره ای، رودخانه طرق در سال های مرطوب

شماره سال	متوسط جریان رودخانه	متوسط دبی شبیه سازی شده با داده های زمینی	متوسط دبی شبیه سازی شده با داده های ماهواره ای
۱۳۷۴	۰/۳۳۸۹	۰/۳۱۶۵	۰/۳۷۵۱
۱۳۷۶	۰/۶۴۵۸	۰/۸۹۷۶	۱/۱۰۲۵
۱۳۷۷	۱/۱۴۶۴	۱/۰۰۲۰	۰/۸۵۷۲
۱۳۸۱	۰/۲۲۳۵	۰/۲۸۰۷	۰/۲۶۹۰
۱۳۸۲	۰/۴۴۹۴	۰/۵۱۵۲	۰/۲۳۰۲
۱۳۸۳	۰/۴۳۴۸	۰/۵۵۵۴	۰/۴۴۳۱
۱۳۸۴	۰/۵۱۱۰	۰/۴۸۰۷	۰/۳۲۴۰
۱۳۸۶	۱/۳۴۲۳	۰/۹۱۹۶	۰/۷۲۲۳
۱۳۸۸	۰/۲۹۹۳	۰/۵۹۲۲	۰/۷۱۷۲
۱۳۹۰	۰/۱۵۳۷	۰/۵۶۶۰	۰/۴۴۹۸
۱۳۹۱	۰/۳۱۸۰	۰/۵۱۶۴	۰/۶۶۳۴
۱۳۹۳	۰/۲۴۸۶	۰/۴۹۲۲	۰/۴۲۲۶
۱۳۹۵	۰/۳۹۱۸	۰/۵۳۲۵	۰/۶۸۵۴
۱۳۹۷	۰/۱۷۷۰	۰/۴۵۲۷	۰/۴۷۸۷
۱۳۹۸	۰/۸۳۶۹	۰/۵۶۰۹	۱/۲۵۴۹
۱۳۹۹	۰/۹۴۱۴	۰/۶۱۹۴	۱/۴۱۱۸
<u>میانگین</u>	<u>۰/۵۲۸۷</u>	<u>۰/۵۸۱۳</u>	<u>۰/۶۵۰۵</u>

به منظور مقایسه عملکرد مدل IHACRES در شبیه سازی مقادیر دبی در گام های زمانی روزانه و ماهانه و همچنین بر اساس مدل سازی با استفاده از داده های زمینی و یا ماهواره ای، از دیاگرام تیلور هم استفاده شده است که نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس این روش هر نقطه ای که نزدیک تر به نقطه مرجع (داده های مشاهده شده، مثلث سیاه رنگ) باشد، قابل اعتمادتر می باشد. با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می شود که مدل شبیه سازی شده با داده های ماهواره ای در بازه زمانی ۹ ساله با داده های

روزانه فاصله کمتری تا نقطه مرجع دارد و به عبارتی از دقت و صحت بالاتری برخوردار است. فاصله بیشتر نقطه صورتی رنگ (که مربوط به روش شبیه‌سازی جریان توسط مدل IHACRES در دوره ۹ ساله با داده‌های زمینی روزانه است) از نقطه مرجع (مثلث سیاه‌رنگ، که مقادیر جریان مشاهداتی رودخانه می‌باشند)، نشان‌دهنده دقت پایین مدل (بر اساس داده‌های زمینی) در شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه طرق در بازه زمانی ۹ ساله می‌باشد. در گام زمانی ۲۹ ساله روزانه، با توجه به فاصله‌ی تقریباً یکسان نقطه‌ها تا نقطه‌ی مرجع (مثلث سیاه‌رنگ) و برابر بودن مقادیر RMSE و انحراف از معیار دو نقطه، می‌توان گفت مدل با هر نوع داده‌ای (ماهواره‌ای و یا زمینی) خروجی‌های تقریباً یکسانی را نتیجه می‌دهد.

با مقایسه مقادیر RMSE با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۱ و مقایسه دو دوره کوتاه‌مدت ۹ ساله و میان‌مدت ۲۹ ساله، عملکرد مدل در دوره کوتاه‌مدت مناسب‌تر از دوره میان‌مدت می‌باشد و در نتیجه قابلیت اطمینان و دقت مدل در این دوره بیشتر است. با توجه به جدول‌های ۵ و ۶ و همچنین دیاگرام تیلور، در دوره ۲۹ ساله عملکرد مدل در گام زمانی ماهانه با استفاده از هر نوع داده‌ای (زمینی و یا ماهواره‌ای) بهتر از گام زمانی روزانه با همان نوع داده است. در دوره ۹ ساله، مدل IHACRES با استفاده از داده‌های زمینی در گام زمانی ماهانه نسبت به روزانه با صحت و دقت بیشتری مقدار دبی را برآورد نموده‌است.



شکل ۱۱. مقایسه عملکرد مدل در وضعیت‌های مختلف بر اساس دیاگرام تیلور. الف) دوره ۹ ساله بر اساس داده‌های روزانه، ب) دوره ۹ ساله بر اساس داده‌های ماهانه، پ) دوره ۲۹ ساله بر اساس داده‌های روزانه، ت) دوره ۲۹ ساله بر اساس داده‌های ماهانه.

## نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، داده‌های زمینی بارش و دما در محل ایستگاه تبخیرسنجی سد طرق و داده‌های بارش و دمای حاصل از محصولات ماهواره‌ای MERRA-2 در همین محدوده و همچنین مقادیر دبی روزانه در محل ایستگاه هیدرومتری کرتیان، واقع در حوضه آبریز

سد طرق در یک دوره ۲۹ ساله مورد استفاده قرار گرفتند. پس از اطمینان از همگن بودن این داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد، کارایی مدل IHACRES با استفاده از داده‌های بارش و دمای زمینی و ماهواره‌ای در دو گام زمانی روزانه و ماهانه، در دو دوره کوتاه مدت ۹ ساله و میان مدت ۲۹ ساله مورد بررسی قرار گرفت. هرچند در دوره میان مدت ۲۹ ساله، داده‌های ماهواره‌ای نتایج تقریباً مشابهی با داده‌های زمینی از خود نشان دادند؛ اما به طور کلی، عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان در دوره میان مدت ۲۹ ساله ضعیف‌تر از دوره کوتاه مدت ۹ ساله است. در واقع، ضعف عملکرد مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان ۲۹ ساله، ممکن است به دلیل تغییرات کاربری اراضی، تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی و همچنین تغییر در دقت برآورد مقادیر بارش ماهواره‌ای در طول زمان باشد. همچنین نتایج نشان داد که مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان ماهانه در مقایسه با شبیه‌سازی جریان روزانه عملکرد بهتری دارد. ضمن آنکه بهترین عملکرد این مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه برای دوره ۹ ساله می‌باشد.

مقایسه مقادیر ضریب نش ساتکلیف و سایر آماره‌های خطاسنجی از جمله RMSE و ضریب همبستگی پیرسون (R)، نشان می‌دهند که شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل IHACRES، در مقیاس روزانه برای سال‌های اخیر، بر اساس استفاده از داده‌های ماهواره MERRA-2، خطای کمتری را در مقایسه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی دارد. بنا بر این، می‌توان پیشنهاد نمود که استفاده از مقادیر بارش برآورد شده بر اساس داده‌های ماهواره MERRA-2 در سال‌های اخیر، در مناطقی که در آنها داده‌های ایستگاهی از کفایت لازم برخوردار نمی‌باشند و یا نقص آماری در آنها زیاد است، راهی مناسب به منظور برآورد آبدی رودخانه می‌باشد.

### "هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

### منابع

- احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی و دیرمجان، آیدا. (۱۳۹۹). برآورد رواناب با استفاده از مدل IHACRES بر اساس داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS و مدل‌های CMIP5 (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود-منطقه آق‌قلا). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۳)، ۶۵۹-۶۷۱.
- عبداللهی پور، آرمان؛ معظمی گودرزی، صابر و ذاکری نیری، محمود. (۱۳۹۴). ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در شبیه‌سازی جریان روزانه رود ساروق چای با استفاده از شبیه IHACRES. *مهندسی منابع آب*، ۸(۲۷)، ۷۱-۵۹.
- آشفته، پریسا سادات و مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۸۹). تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی. *علوم آب و خاک (Isfahan University of Technology)*، ۱۴(۵۳)، ۲۸-۳۸.
- چوبین، مرتضی و بشیرگنبد، محمد. (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی IHACRES و شبکه مصنوعی به منظور پیش‌بینی جریان در رودخانه بختیاری. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۴(۲۷)، ۱۲۲-۱۱۵.
- خیرفام، حسین؛ مصطفی‌زاده، رئوف و صادقی، سید حمیدرضا. (۱۳۹۲). تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان گلستان. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۴(۷)، ۱۲۷-۱۱۴.
- دستورانی، محمدتقی؛ حاجی‌بیگلو، محبوبه و شجاعی، حسن. (۱۴۰۱). شناسایی نوع تغییرات کاربری اراضی موجود در بستر سیلاب رودخانه و تأثیر گذار بر روی کیفیت آب مخزن سد، مطالعه موردی: سرشاخه‌های بالادست سد مخزنی کارده. *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۲۰(۶۶)، ۲۸۲-۲۵۵.
- زارعی، مهدی؛ حبیب نژاد روشن، محمود؛ شاهدی، کاکا و قنبرپور، محمدرضا. (۱۳۹۰). کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۵(۱)، ۱۱۴-۱۰۴.
- زندی، رحمان؛ کرمی، مختار و طاهری، جلال. (۱۳۹۸). نقش تغییرات کاربری اراضی بر فرم فضایی جزایر حرارتی در شهر مشهد. *برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*، ۱۶(۴)، ۱۰۴-۹۳.

زیدعلی نژاد، نجات؛ ناصری، حمیدرضا؛ شکبیا، علیرضا و علیجانی، فرشاد. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه تراز-هرکش، استان خوزستان، با استفاده از مجموعه داده NEX-GDDP و مدل بارش-رواناب IHACRES. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۲(۲)، ۱۶۲-۱۷۸.

سیفی، سهیلا؛ خدائیان، سعیدرضا و مساعدی، ابوالفضل. (۱۳۹۷). بررسی کارایی مدل بارش-رواناب IHACRES در شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن سد طرق. *هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.*

فرزندی، محبوبه؛ رضائی-پژند، حجت و میرکماندار، بهاره. (۱۳۹۹). تحلیل جزیره گرمایی و بررسی روند غیرخطی تغییرات دمای ۱۳۰ ساله مشهد. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۳(۴)، ۳۷۵-۳۸۹.

گودرزی، الهه؛ دستورانی، محمدتقی؛ مساح بوانی، علیرضا و طالبی، علی. (۱۳۸۹). بررسی کارایی مدل بارش-رواناب IHACRES در پیش بینی سیلاب‌های شهری (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه اعظم هرات-یزد). *اولین کنفرانس ملی مدیریت سیلاب‌های شهری، تهران، ایران.*

گودرزی، مسعود؛ صلاحی، برومند و حسینی، سید اسعد. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۳)، ۱-۱۰.

گودرزی، محمدرضا؛ دهبیون، باقر؛ مساح بوانی، علی‌رضا و کمال، علی‌رضا. (۱۳۹۱). مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. *مدیریت آب و آبیاری*، ۲(۱)، ۲۵-۴۰.

گودرزی، مسعود؛ معتمد وزیری، بهارک و میرحسینی، محمدرضا. (۱۳۹۶). ارزیابی کاربست مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب سطحی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کن). *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۱(۳۸)، ۹۴-۸۳.

مدرسی، فرشته؛ ابراهیمی، کیومرث و عراقی نژاد، شهاب. (۱۴۰۱). ارزیابی رتبه‌ای دو رویکرد مدل‌سازی داده‌مبنای و مفهومی فرآیند بارش-رواناب در مقیاس زمانی ماهانه. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۲(۴۸)، ۲۷۳-۲۵۸.

مسعودی، مسعود؛ عصار، زهره. (۱۳۹۶). ارزیابی خطر خشکسالی و تغییر اقلیم در استان خراسان رضوی. *مجله علمی و ترویجی نیوار*، ۴۱(۹۸-۹۹)، ۶۱-۷۲.

ولایتی، سعد اله و کامکار یزدنژاد، مریم. (۱۳۸۷). بررسی اثرات سدهای مخزنی بر کمیّت و کیفیت آب زیرزمینی مخروط افکنه پایین‌دست (نمونه‌ی موردی: سد طرق مشهد). *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۶(۱۱)، ۱۸۵-۱۶۸.

## REFERENCES

- Abdollahi-pour, A., Moazami-Goudarzi, S., & Zakeri-Nayeri, M. (2016). Evaluation of Three Algorithms for the Daily Hydrological Modeling of the Sarough Chai Basin Using the Satellite Precipitation Products and Applying the IHACRES Model. *Water Resources Engineering*, 8(27), 59-72. (in Persian)
- Abushandi, E., & Merkel, B. (2013). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water resources management*, 27, 2391-2409.
- Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A., & Deyrmajai, A. (2020). Runoff Estimation Using IHACRES Model Based on CHIRPS Satellite Data and CMIP5 Models (Case Study: Gorganroud Basin- Aq Qala Area). *Journal of Soil And Water Research*, 51(3), 659-671. (in Persian )
- Ashofteh, P., & Massah Bouani, A. R. (2010). Impact of Climate Change on Maximum Discharges: Case Study of Aidoghmoush Basin, East Azerbaijan. *Journal of Water and Soil Science*, 14(53), 28-38. (in Persian)
- Baratto, J., de Bodas Terassi, P. M., de Beserra de Lima, N. G., & Galvani, E. (2024). Precipitation Anomalies and Trends Estimated via Satellite Rainfall Products in the Cananea-Iguape Coastal System, Southeast Region of Brazil. *Climate*, 12(2), 22.
- Bloom, S., Takacs, L., Da Silva, A., & Ledvina, D. (1996). Data assimilation using incremental analysis updates. *Monthly Weather Review*, 124(6), 1256-1271.
- Choubin, M., & Bashirgonbad, M. (2023). Evaluation of IHACRES, Conceptual Rainfall Runoff Model and Artificial Neural Network Models in Simulation and Stream flow Prediction in Bakhtiari River Basin. *journal of watershed management research*, 14(27), 115-122. (in Persian)
- Dastorani, M. T., Hajibigloo, M., & Shojaee, H. (2022). Identification of the land use changes on river flooding bed, affective on reservoir water quality (Case study: headwater of Kardeh reservoir). *Geography and Development*, 20(66), 255-282. <https://doi.org/10.22111/j10.22111.2022.6739> (in Persian)
- Dawoochund, R., Patra, K., & Swain, J. B. (2017). *Adequacy of IHACRES Model on Streamflow Resulting from Landuse Changes in A Mauritius Catchment* 22nd International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (HYDRO), Ahmedabad, Gujarat, India.
- Dooge, J. (1973). *Linear theory of hydrologic systems*. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

- Dye, P. J., & Croke, B. F. (2003). Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modelling & Software*, 18(8-9), 705-712.
- Farzandi, M., Rezaee-Pazhand, H., & Mirkamandar, B. (2021). Analysis of heat Island and investigation of nonlinear trend of 130-year temperature changes in Mashhad. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(4), 375-389. <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.296910.1148> (in Persian)
- Goodarzi, E., dastorani, M., Massah Bouani, A. R., & Talebi, A. (2010). *Assessing the Performance of the IHACRES Rainfall-Runoff Model in Predicting Urban Floods (Case Study: Azam-Harat Yazd watershed)* First National Conference on Urban Flood Management, Tehran, Iran.(in Persian)
- Goodarzi, M., Motamed Vaziri, B., & Mir hoseini, M. (2017). Assessment of IHACRES Model in Surface Run-off Simulation in Climate Change Status: A case study Kan Basin [case report]. *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering*, 11(38), 83-94 (in Persian)
- Goodarzi, M., Salahi, B., & Hoseini, A. (2018). Assessment of IHACRES Model in Simulating River Discharge in Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering*, 12(43), 1-10.(in Persian)
- Goodarzi, M. R., Pooladi, R., & Niazkar, M. (2022). Evaluation of Satellite-Based and Reanalysis Precipitation Datasets with Gauge-Observed Data over Haraz-Gharehsoo Basin, Iran. *Sustainability*, 14(20), 13051. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13051>.
- Goodarzi, M. R., Sabaghzadeh, M., & Niazkar, M. (2023). Evaluation of winter snow properties effects on spring soil moisture using satellite images in the Northwest of Iran. *Acta Geophysica*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01177-3>.
- Goodarzi, M. R., Zahabiyoun, B., Massah Bavani, A. R., & Kamal, A. R. (2012). Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharesou basin. *Water and Irrigation Management*, 2(1), 25-40. <https://doi.org/10.22059/jwim.2012.25090>. (in Persian)
- Guo, B., Xu, T., Yang, Q., Zhang, J., Dai, Z., Deng, Y., & Zou, J. (2023). Multiple Spatial and Temporal Scales Evaluation of Eight Satellite Precipitation Products in a Mountainous Catchment of South China. *Remote Sensing*, 15(5), 1373.
- Guo, B., Zhang, J., Xu, T., Croke, B., Jakeman, A., Song, Y., Yang, Q., Lei, X., & Liao, W. (2018). Applicability Assessment and Uncertainty Analysis of Multi-Precipitation Datasets for the Simulation of Hydrologic Models. *Water*, 10(11), 1611.
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., & Flemming, J. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6), 3515-3556.
- Jakeman, A., & Hornberger, G. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water resources research*, 29(8), 2637-2649.
- Kheirfam, H., Mostafazadeh, R., & Sadeghi, S. H. (2013). Daily Discharge Prediction Using IHACRES Model in Some Watersheds of Golestan Province. *Watershed Management Research*, 4(7), 114-127.(in Persian )
- Kim, T., & Kang, B. (2023). Climate stress impacts on the reservoir inflows: a decision-scaling and IHACRES modeling approach in South Korean basins. *Journal of Water and Climate Change*, 14(9), 3071-3085.
- Lubczynski, M. W., Leblanc, M., & Batelaan, O. (2024). Remote sensing and hydrogeophysics give a new impetus to integrated hydrological models: A review. *Journal of Hydrology*, 633, 130901. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130901>
- Masoudi, M., & Assar, Z. (2017). Hazard assessment of drought and climate change in Khorasan Razavi Province. *Nivar*, 41(98-99), 61-72. <https://doi.org/10.30467/nivar.2017.51901>. (in Persian)
- Modaresi, F., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2022). Ranking Evaluation of Data-driven and Conceptual Modelling of Rainfall-Runoff Process in Monthly Time Scale. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 258-273. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150737> (in Persian)
- Mohammadi, B., Safari, M. J. S., & Vazifehkhah, S. (2022). IHACRES, GR4J and MISD-based multi conceptual-machine learning approach for rainfall-runoff modeling. *Scientific Reports*, 12(1), 12096. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16215-1>
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., & Rodhe, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98, 257-277.
- Oyerinde, G. T., Fademi, I. O., & Denton, O. A. (2017). Modeling runoff with satellite-based rainfall estimates in the Niger basin. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1363340.
- Seifi, S., Khdoashenas, S., & Mosaedi, A. (2018). *Evaluation of the Efficiency of the IHACRES Rainfall-Runoff Model in Simulating the Inflow Runoff to the Toroq Reservoir*. 7th National Conference on Water Resources Management, Yazd University, Yazd, Iran.(in Persian)
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.

- Tramblay, Y., El Khalki, E. M., Ciabatta, L., Camici, S., Hanich, L., Saidi, M. E. M., Ezzahouani, A., Benaabidate, L., Mahé, G., & Brocca, L. (2023). River runoff estimation with satellite rainfall in Morocco. *Hydrological Sciences Journal*, 68(3), 474-487.
- Velaayati, S. d., & Kamkar yzad nejad, M. (2008). The study of the effects of dams on the quality and quantity of underground water of detrital fan of the lowest area. *Journal of Geography and Regional Development*, 6(11), 167-185. <https://doi.org/10.22067/geography.v6i11.4284> (in Persian)
- Zandi, R., Karami, M., & Taheri, J. (2020). The role of land use changes in spatial form of heat islands in Mashhad city. *Physical Social Planning*, 6(4), 93-104. <https://doi.org/10.30473/psp.2020.6590> (in Persian)
- Zarei, M., Habibnejad roshan, M., Shahedi, K., & Ghanbarpour, M. R. (2011). Calibration and Evaluation of IHACRES Hydrological Model for Daily Flow Simulation. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 25(1), 104-114.(in Persian )
- Zeydalinejad, N., Nassery, H. R., Shakiba, A., & Alijani, F. (2019). Simulation of Taraz-Harkesh River's Flow, Khuzestan Province, Under Climate Change with NEX-GDDP Data Set and IHACRES Rainfall-Runoff Model. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 2(2), 162-178.(in Persian)

فصلنامه علمی و تخصصی  
پژوهش‌های جغرافیایی

# Evaluation of the Efficiency of Satellite Precipitation Data in Simulating River Flow using the IHACRES Model (Case Study: Toroq Dam Watershed)

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

In the realm of water resource management, accurate modeling and prediction of river flow rates are essential tasks, often relying on measured or estimated data, particularly precipitation data. In watersheds lacking sufficient precipitation measurement stations, the utilization of satellite data emerges as a viable alternative due to its extensive spatial and temporal coverage. This study focuses on the application of the IHACRES rainfall-runoff model to simulate river flow in the Toroq dam watershed using ground station and MERRA-2 satellite data over 9-year and 29-year periods. The findings of this study can be useful in predicting the flow hydrograph due to predicted rainfall, especially in areas with limited data.

### Methods

In this study, the IHACRES rainfall-runoff model has been used to simulate river flow in the Toroq dam watershed (with an area of 164.76 square kilometers). daily discharge amounts at the Kertian hydrometric station were used along with ground precipitation and temperature data from the evaporation station and MERRA-2 satellite data within the vicinity of the Kertian hydrometric station located in the Toroq dam watershed over a 29-year period. After ensuring the homogeneity of these data at a 95% confidence level, the performance of the IHACRES model was investigated using ground and satellite precipitation data with simulating watershed discharge in daily and monthly time steps over two time-periods of 9 years (from 23 September 2013 to 22 September 2022) and 29 years (from 1 January 1994 to 22 September 2022). Various model performance indicators, including Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Pearson correlation coefficient (P), Bias and Relative Bias, were employed. Additionally, a Taylor diagram was utilized to provide a comprehensive assessment of the IHACRES model's accuracy in simulating the discharge within the study area.

### Results & Discussion

The results show that over the study period, the accuracy of estimated precipitation values based on the MERRA-2 satellite has gradually increased compared to measured values. In the 29-year period, the model validation results are weaker than the 9-year period, which could be due to conditions resulting from changes in land use and gradual temperature increase in the watershed. With a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient of 0.8461 obtained in the validation stage of the 9-year period with daily time steps using satellite data, as well as a Pearson correlation coefficient of 0.9250, there is good correlation between the daily simulated flow with satellite data, and the daily measured flow. The IHACRES model has shown effectiveness in simulating low and moderate flows; however, it has demonstrated limited capability in simulating peak river flows. Notably, the model performed better in estimating peak flows on a daily basis over a 9-year period when utilizing MERRA-2 satellite data compared to using ground-based data. After determining the average annual rainfall over this 29-year period, years with rainfall above the period's average were considered as wet years, while years with below-average rainfall were classified as dry years. In wet years, the satellite model underestimated annual precipitation compared to actual rainfall, with the largest discrepancy between observed and satellite rainfall. Over time, the accuracy of the satellite model has improved, with the discrepancy between satellite precipitation values and observations decreasing as we approach the present. In dry years, the average simulated river flow values using MERRA-2 satellite data were closer to the observed river flow averages, whereas in wet years, ground-based data provided better results compared to satellite data. Additionally, in all scenarios, the model tended to overestimate the flow rates.

### Conclusions

Although the satellite data showed almost similar results to the ground-based data over the 29-year medium-term period, overall, the model's performance in simulating flow during the 29-year medium-term period was weaker than the 9-year short-term period. In fact, the weaker performance of the IHACRES model in simulating flow over the 29-year period may be due to changes in land use, Climate changes caused by global warming, and changes in the accuracy of satellite precipitation estimates over time. Furthermore, the results showed that the IHACRES model performs better in monthly streamflow simulation compared to daily streamflow simulation, with the best performance of this model in simulating monthly streamflow for the 9-year period. The use of MERRA-2 satellite data on a daily scale for the 9-year period showed a higher Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient compared to ground-based data for the same time period. Based on the Taylor diagram and other error evaluation parameters such as RMSE and Pearson correlation coefficient (R), which had better values compared to ground-based data for this period, it can be suggested that using estimated precipitation values based on MERRA-

2 satellite data in recent years is a suitable approach for estimating river discharge in areas where station data are insufficient or statistically flawed.

**Keywords:** *hydrological simulation, IHACRES, MERRA-2, rainfall-runoff model, Toroq watershed.*

فیلد استادی نشانه