



Runoff Modeling Using HBV Model and Random Forest Algorithm (Study Area: Chamanjir Watershed, Lorestan Province)

A. Amiri^{1*}, M. Gheysouri², and A. Saberi³

Abstract

Estimating rainfall runoff is an important step in water resources management, especially in watersheds without hydrometric stations. Therefore, it is necessary and inevitable to perform research on models that can simulate river flow in such basins with the least error. Nowadays, due to the issues and problems in the field of water resources, the estimation of the volume of runoff from rainfall is becoming more important everyday in terms of water supply and water resources management. In this study, HBV conceptual model and random forest artificial intelligence (RF) model have been used to simulate the runoff process of Chamanjir watershed in Lorestan province for the statistical period of 2006-2015. For this purpose, first the statistics and information needed by the models, including temperature, precipitation, discharge, and evaporation and transpiration were collected. Then the simulation was carried out in the desired period of time and Nash-Sutcliffe criteria and coefficient of determination were used to evaluate the performance of the models. The results of evaluation criteria for HBV model led to the Nash coefficient of 0.67 and the determination coefficient of 0.68. For RF, the Nash coefficient and the determination coefficient were respectively obtained as 0.82 of 0.86, which indicates better performance of RF model in simulating daily flow in the study area. The model can be used in the future as a new option to simulate the daily flow of the Chamanjir basin.

Keywords: Simulation, Data Mining, RF, HBV.

Received: December 27, 2021

Accepted: August 9, 2022

مدل سازی رواناب با استفاده از مدل HBV و الگوریتم جنگل تصادفی (محدوده مورد مطالعه: حوضه آبخیز چم انجیر، استان لرستان)

عاطفه امیری^{۱*}، مرتضی قیصوری^۲ و عارف صابری^۳

چکیده

برآورد رواناب ناشی از بارندگی، گام مهمی در مدیریت منابع آب به ویژه در آبخیزهای فاقد ایستگاه هیدرومتری است. از این رو پژوهش در ارتباط با مدل‌هایی که بتواند در این حوضه‌ها با کمترین خطا، جریان رودخانه را شبیه‌سازی کند امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. امروزه به دلیل مسائل و مشکلات موجود در زمینه منابع آبی، برآورد حجم رواناب حاصل از بارندگی، از نظر تأمین آب و مدیریت منابع آب روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این مطالعه از مدل مفهومی HBV و مدل هوش مصنوعی جنگل تصادفی (RF) به منظور شبیه‌سازی فرآیند رواناب حوضه آبخیز چم انجیر در استان لرستان برای دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا آمار و اطلاعات مورد نیاز مدل‌ها از جمله دما، بارش، دبی و تبخیر و تعرق جمع‌آوری شد. سپس، شبیه‌سازی در بازه زمانی مورد نظر انجام شد و برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از معیارهای نش-ساتکلیف و ضریب تعیین استفاده شد. نتایج معیارهای ارزیابی برای مدل HBV در ضریب نش ۰/۶۷ و در ضریب تعیین ۰/۶۸ و برای RF در ضریب نش ۰/۸۲ و در ضریب تعیین ۰/۸۶ به دست آمدند که بیانگر عملکرد بهتر مدل RF در شبیه‌سازی جریان روزانه در منطقه مورد مطالعه است و این مدل می‌تواند در آینده به عنوان یک گزینه جدید برای شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه چم انجیر مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، داده کاوی، RF، HBV.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۸

1- Ph.D. Student in Watershed Management Engineering, Shahrekord Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran. Email: aamiri1670@gmail.com

2- Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran. Email: m.gheysouri@ut.ac.ir

3- Ph.D. Student, Department of Land Watershed Management and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. Email: aref.saberi@yahoo.com

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.2.8.8](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.2.8.8)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مدیریت حوضه‌های آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



یک مجموعه چند مدل از هشت مدل جهانی آب و هوای جهانی (GCM)^۳ استخراج شد. نتایج حاصل نشان از کاهش میانگین جریان سالانه در همه سناریوها بوده است. (Amiri and Salimi, 2020) به منظور بررسی عملکرد مدل‌های توزیعی در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز کاکارضا از مدل HBV استفاده کردند. نتایج حاصل نشان از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان رواناب در حوضه مورد نظر را دارد. (Mohamadi et al., 2021) به منظور مدل‌سازی بارش- رواناب آبخیزهای ساحلی منطقه هرمز از مدل RF استفاده کردند. نتایج حاصل نشان از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی رواناب آبخیزهای ساحلی بوده است. (Sohrabi Geshnigani et al., 2021) به منظور مدل‌سازی بارش رواناب حوضه بافت از مدل‌های HBV و RF استفاده کردند. نتایج حاصل نشان از عملکرد مناسب دو مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه بافت بوده است؛ ولی در مجموع مدل RF توانایی شبیه‌سازی بالاتری در مقایسه با مدل HBV داشته است. (Jahanshahi et al., 2022) به من منظور مدل‌سازی جریان در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از روش‌های منطقه‌بندی در حوضه هامون- جازموریان از مدل‌های مفهومی بارش رواناب HBV و IHACRES با استفاده از سه روش اصلی منطقه‌بندی استفاده کردند. روش‌های منطقه‌بندی تحت سه حالت: زمانی (انتقال بین دوره‌های زمانی مختلف)، مکانی (انتقال بین دوره‌های واسنجی یکسان اما حوضه‌های مختلف) و مکانی-زمانی (انتقال بین دوره‌ها و حوضه‌های مختلف) مطالعه شدند. نتایج نشان داد که مدل پیچیده‌تر HBV عملکرد بهتری نسبت به مدل ساده‌تر IHACRES دارد، بطوری که میانگین آماره NSE در دوره‌های مختلف در مدل HBV برای واسنجی، اعتبارسنجی قابل قبول و مناسب‌ترین روش منطقه‌بندی (تشابه فیزیکی) بود، در حالی که این مقادیر برای مدل IHACRES کمتر بدست آمد. همچنین، روش رگرسیون چندمتغیره با میانگین ضرایب NSE به ترتیب برای مدل‌های HBV و IHACRES بدترین نتایج منطقه‌بندی را نشان داد و در مدل HBV پارامترهای مربوط به روال برف و رواناب به ترتیب بیشترین و کمترین عدم قطعیت را داشتند، در حالی که در مدل IHACRES بیشترین و کمترین عدم قطعیت‌ها به ترتیب مربوط به پارامترهای آستانه تنش گیاهی (vs) و سهم جریان آهسته در جریان کل (f) بود.

هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی رواناب در حوضه چم انجیر در استان لرستان با استفاده از مدل جنگل تصادفی و مدل یکپارچه مفهومی HBV و مقایسه عملکرد این دو مدل است. در واقع سؤال اساسی این تحقیق این است که آیا برای شبیه‌سازی رواناب یک حوضه آبخیز، در صورت عدم دسترسی به تمامی اطلاعات یک منطقه یا کمبود داده،

به طور کلی بخش قابل توجهی از نزولات آسمانی با توجه به ویژگی‌های فیزیوگرافی آبخیزها به رواناب تبدیل می‌شود (Worland et al., 2018). از مهمترین مسائل مطرح در مدیریت حوضه‌های آبخیز، مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک هستند (Firat and Gungor, 2007). یکی از فرآیندهای حوضه آبخیز که مدل‌سازی آن نقش بسیار مهمی در ارزیابی و مدیریت منابع آب حوضه دارد، فرایند بارش- رواناب است. برآورد رواناب تولید شده در هر حوضه، با دقت قابل قبول، بخشی مهم و جداناپذیر از اطلاعات لازم برای سیاستگذاری و مدیریت حوضه آبخیز است (Fathabadi et al., 2009; Aronica and Candela, 2007). از سوی دیگر تعداد زیادی از آبخیزها در ایران و بیشتر کشورهای در حال توسعه، فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری هستند و یا داده‌های اندازه‌گیری شده از رواناب در آنها بسیار محدود است؛ به طوری که مناسب برای اهداف برنامه‌ریزی منابع آبی نیستند (Dastorani et al., 2018). لذا، مدیران منابع آب به منظور برنامه‌ریزی به مدل‌های مختلف پیش‌بینی جریان رواناب وابسته هستند (Razavi and Coulibaly, 2013; Luce, 2014). ساختارهای مختلفی از مدل‌های یکپارچه مفهومی ساده تا مدل‌های توزیع شده مبتنی بر فیزیکی با درجات مختلف پیچیدگی جهت مدیریت منابع آبی در دسترس هستند (Bergström and Forsman, 1973). در این راستا، در دسترس بودن اطلاعات پیوسته بارش و سایر متغیرهای اقلیمی که می‌توانند برای مدل‌سازی مقدار رواناب مورد استفاده قرار گیرد، بسیار ضروری است (Lorrai and Sechi, 1995). در میان طیف گسترده‌ای از مدل‌های مفهومی هیدرولوژیک، مدل‌های RF^1 و HBV^2 در طیف وسیعی از مطالعات هیدرولوژیک در مناطق متعددی از زمینه‌های فیزیوگرافی و آب و هوایی مختلف بکار گرفته شده است (Bergstrom., 2006). (Normand et al., 2010). برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک در حوضه نپال شرقی مدل HBV را به کار بردند. نتایج نشان می‌دهد که به استثنای دبی‌های حداقل و حداکثر که مشکلاتی در رابطه با شبیه‌سازی آنها بوده است در بقیه موارد به خوبی فرآیندهای شبیه‌سازی را انجام داده است. (et al., 2018) Klaus به بررسی عملکرد مدل HBV در پنج حوضه نروژ با سیل‌های فصلی پاییزه و بهار پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که مدل برای بررسی سیل‌های با رژیم بارش و رژیم برف منطقی عمل می‌کند. (Hashlm Isam et al., 2019) به منظور بررسی مقایسه مدل‌های مفهومی و توزیعی برای ارزیابی تأثیر تغییرات آب و هوا بر رواناب آینده رودخانه‌ها در استرالیا غربی از مدل HBV برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه استفاده کردند. سیگنال‌های آب و هوای آینده از

۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه و ۱۳ ثانیه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۱۳ دقیقه و ۲۹ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۴۳ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی یکی از زیرحوضه‌های مهم کشکان در استان لرستان می‌باشد. میانگین بارش سالانه در این حوضه ۴۲۴ میلیمتر و میانگین تبخیر سالانه ۲۰۹ میلیمتر است. این حوضه در بخش میانی سلسله جبال زاگرس قرار گرفته است. این زیر حوضه که در بخش جنوبی زیر حوضه هرو و در ناحیه زاگرس رورانده واقع شده از نظر زمین‌شناسی دارای ساختار پیچیده‌ای است.

مدل جنگل تصادفی می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل مفهومی باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه چم انجیر با مساحت ۱۲۲۱ کیلومترمربع در استان لرستان، با موقعیت جغرافیایی طول ۴۸ درجه و ۲ دقیقه و ۵۲ ثانیه تا

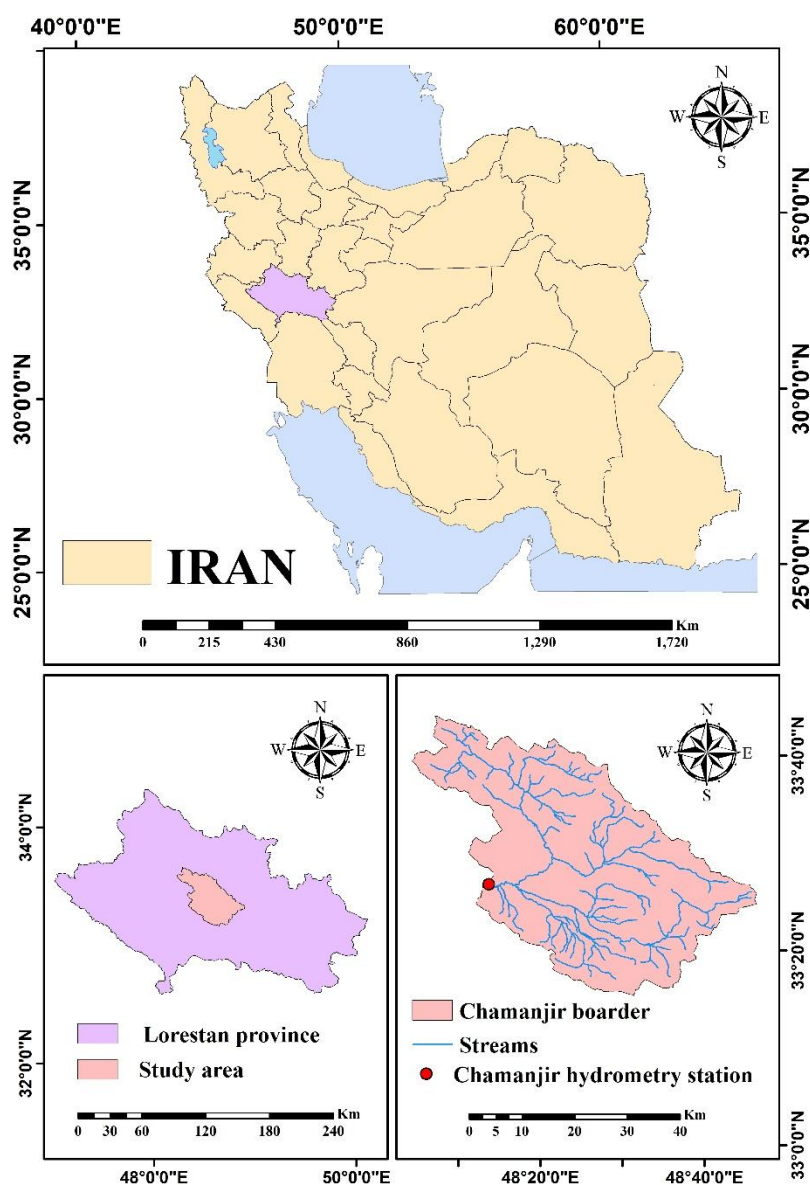


Fig. 1- Map of the location Chamanjir basin in Lorestan province

شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه چم انجیر در استان لرستان و کشور

۲-۲- مدل بارش رواناب HBV

مدل HBV یک مدل مفهومی است که در سالهای اخیر در مطالعات بارش-رواناب حوضه‌ها در کشورهای اسکاندیناوی و بسیاری نقاط دیگر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل در مؤسسه هواشناسی و هیدرولوژی سوئد و در سالهای آغازین دهه ۱۹۷۰ طرح‌ریزی و توسعه داده شده است. HBV دارای نسخه‌های مختلفی است که جدیدترین نسخه آن HBV-light در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه اوپسالا تهیه گردیده است. جدیدترین تصحیح مدل light-HBV در دانشگاه زوریخ ارائه شده است که قابلیت شبیه‌سازی با گام‌های زمانی مختلف و نیز استفاده همزمان در چند زیرحوضه را به توانایی‌های مدل افزوده‌اند. همچنین، بخشی برای شبیه‌سازی یخچال‌های طبیعی نیز در مدل پیش‌بینی شده است (Konz and Seibert, 2010). ساختار این مدل طبق شکل ۲ شامل مراحل توزیعی رواناب برف روال خاک، مرحله مفهومی عکس‌العمل حوضه (فرآیند هیدرولوژیکی تولید رواناب) و روندیابی حوضه است (Driessen et al., 2010). کاربرد این مدل به دلایل زیر است: ساختار ساده ولی انعطاف‌پذیر آن که قابلیت تقسیم‌بندی به ناحیه‌های گوناگون ارتفاعی و گیاهی را دارد،

به اطلاعات زیادی نیاز ندارد و داده‌های ورودی آن در دسترس است، در شرایط آب و هوایی متفاوت، قابلیت استفاده دارد (Yaquobi et al., 2014).

۲-۳- الگوریتم جنگل تصادفی

روش‌های درخت-پایه، روش‌های آماری ناپارامتری (بدون مدل) برای اجرای آنالیز کلاس‌بندی و آنالیز رگرسیونی با استفاده از الگوریتم افزایشی بازگشتی هستند (Breiman, 1984). جنگل‌های تصادفی یک نوع مدرن از روش‌های درخت-پایه هستند که شامل انبوهی از درخت‌های کلاس‌بندی و رگرسیونی هستند (Breiman, 2001). مهمترین ویژگی جنگل تصادفی عملکرد بالای آنها در اندازه‌گیری اهمیت متغیرها برای مشخص کردن این است که هر متغیر چه نقشی در پیش‌بینی پاسخ دارد. جنگل تصادفی درخت‌های تصمیم زیادی تولید می‌کند. برای طبقه‌بندی یک شیء جدید، بردار ورودی در انتهای هر یک از درختان جنگل تصادفی قرار می‌گیرد که هر درخت یک طبقه‌بندی تولید می‌کند و گفته می‌شود این درخت به آن کلاس (رای) می‌دهد.

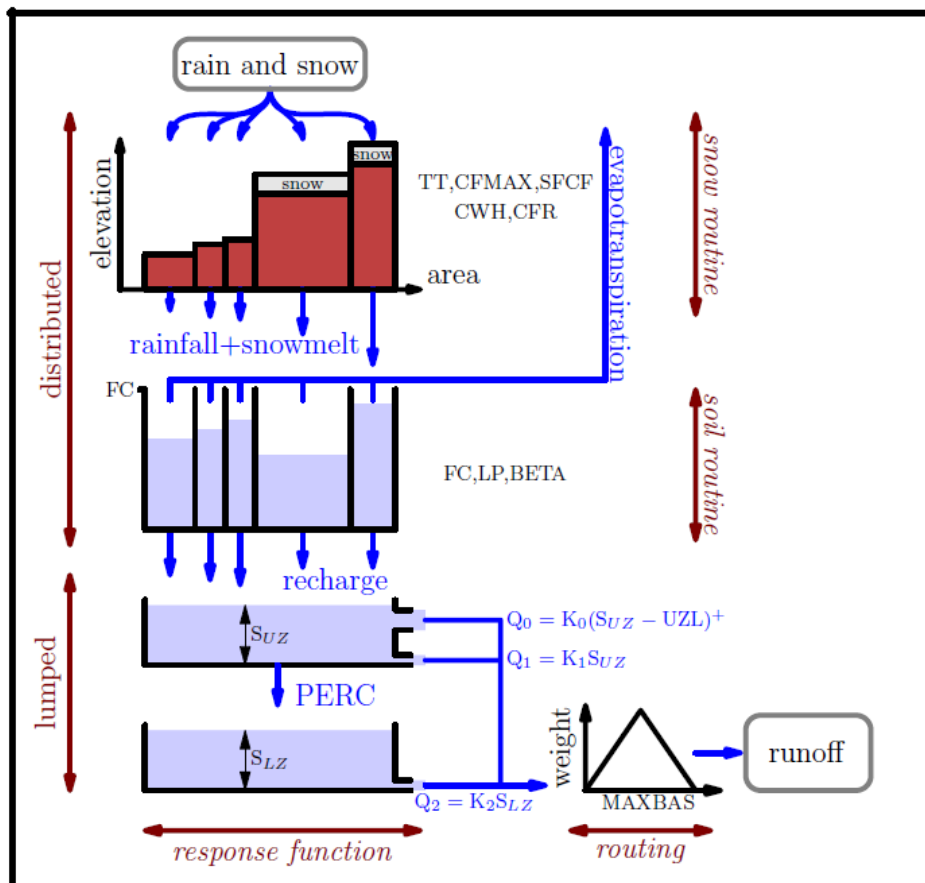


Fig. 2- General structure of the HBV model (Driessen et al., 2010)

شکل ۲- ساختار کلی مدل HBV (Driessen et al., 2010)

جنگل حاصل از طبقه‌بندی که بیشترین رأی را داشته باشد، (بین همه درخت‌های جنگل) انتخاب می‌شود. الگوریتم جنگل تصادفی (RF) مبتنی بر دسته‌ای از درخت‌های تصمیم است و در حال حاضر یکی از بهترین الگوریتم‌های یادگیری است.

هر درخت به صورت زیر تشکیل می‌شود:

- ۱- اگر N تعداد حالت‌ها در مجموعه داده‌های train (مجموعه کار) باشد، N حالت را به صورت تصادفی با جایگذاری از داده‌های اصلی، نمونه‌گیری می‌شود. این نمونه مجموعه کار برای این درخت است.
- ۲- اگر M متغیر داشته باشیم و m را کوچکتر از M در نظر بگیریم، به طوری که در هر گره، m متغیر به صورت تصادفی از M انتخاب می‌شوند و بهترین جداسازی روی این m متغیر برای جداسازی گره استفاده می‌شود. مقدار m در طول ساخت جنگل ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۳- هر درخت به اندازه ممکن بزرگ می‌شود. هیچ هرسی وجود ندارد. شاخص اهمیت متغیر، شاخصی برای رتبه‌بندی متغیرها بر حسب اهمیت آنها در اثرگذاری روی پاسخ است. معروف‌ترین شاخص‌های اهمیت متغیر، شاخص اهمیت جینی و شاخص اهمیت جایگشتی است.

۲-۳-۱- مزیت‌های جنگل تصادفی

- در میان الگوریتم‌های فعلی از نظر دقت کم نظیر است؛
- روی داده‌های بسیار بزرگ قابل اجراست؛
- می‌تواند هزاران متغیر را بدون حذف متغیرها مدیریت کند؛
- برآوردی از مهم‌ترین متغیرها در طبقه‌بندی می‌دهد؛
- راهکارهایی برای برآورد داده‌های گم شده دارد.

۲-۳-۲- معایب جنگل تصادفی

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در یادگیری ماشین، بیش‌برازش است، اما اغلب اوقات این مسأله به آن آسانی که برای دسته‌بند جنگل تصادفی به وقوع می‌پیوندد، اتفاق نمی‌افتد. محدودیت اصلی جنگل تصادفی آن است که تعداد زیاد درخت‌ها می‌توانند الگوریتم را برای پیش‌بینی‌های

جهان واقعی کند و غیر مؤثر کنند. به طور کلی، آموزش دادن این الگوریتم‌ها سریع انجام می‌شود، اما پیش‌بینی کردن پس از آنکه مدل آموزش دیده، اندکی کند به وقوع می‌پیوندد. یک پیش‌بینی صحیح‌تر نیازمند درختان بیشتری است که منجر به کندتر شدن مدل نیز می‌شود. در اغلب کاربردهای جهان واقعی، الگوریتم جنگل تصادفی به اندازه کافی سریع عمل می‌کند، اما امکان دارد شرایطی نیز وجود داشته باشد که در آن کارایی زمان اجرا حائز اهمیت است و به دیگر رویکردها ترجیح داده شوند. البته، جنگل تصادفی یک ابزار مدل‌سازی پیش‌بینی و نه یک ابزار توصیفی است. این یعنی، اگر کاربر به دنبال ارائه توصیفی از داده‌های خود است، استفاده از رویکردهای دیگر ترجیح داده می‌شوند.

۲-۴- داده‌ها

در این تحقیق داده‌های پایه مورد استفاده شامل داده‌های مشاهداتی دما، بارش، دبی و تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ میلادی از ۴ ایستگاه منتخب منطقه و اطراف آن است (جدول شماره ۱). اطلاعات مورد نیاز مدل RF عبارتند از: داده‌های روزانه بارش، دما، دبی و تبخیر و تعرق و داده‌های مورد نیاز مدل HBV شامل داده‌های روزانه بارش، دما، دبی و تبخیر و تعرق ماهانه است.

۲-۵- معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق از معیارهای ارزیابی نش- ساتکلیف و ضریب تعیین به شرح زیر استفاده شد:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o) (Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

در روابط فوق، n تعداد داده‌ها، Q_o داده‌های مشاهداتی، \bar{Q} میانگین داده‌های مشاهداتی و Q_s داده‌های محاسباتی می‌باشد. ضریب کارایی نش- ساتکلیف می‌تواند از $-\infty$ تا ۱ تغییر کند، هرچه مقادیر به عدد یک نزدیک باشد، مدل برازش بهتری دارد و عدد یک برازش عالی را نشان می‌دهد.

Table 1- Details of the studied stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

Row	Elevation name	Coordinates		(m) Elevation
		X	Y	
1	Khorramabad	48.283	33.433	1147
2	Aleshtar	48.25	33.81	1567
3	Kohdasht	47.63	33.53	1199
4	Dehno	48.76	33.51	1770

ضریب تعیین قدرت توضیح دهندگی مدل را نشان می‌دهد. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. این شاخص یکی از شاخص‌های برازش مدل است، مقدار این شاخص بین صفر تا یک می‌باشد و اگر از $0/6$ بیشتر باشد نشان می‌دهد متغیرهای مستقل تا حد زیادی توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند.

۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- مدل‌سازی رواناب توسط مدل HBV

به منظور شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل HBV داده‌های مورد نیاز مدل شامل داده‌های روزانه بارش، دما، دبی و تبخیر و تعرق ماهانه آماده گردید. ابتدا یک دوره ۷ سال (۲۰۱۲-۲۰۰۶) برای واسنجی مدل انتخاب گردید. در ادامه پارامترهای مدل به صورت دستی تغییر پیدا می‌کنند تا مقادیر مناسب انتخاب گردند. بدین منظور ابتدا یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر معیارهای ارزیابی نش- ساتکلیف و ضریب تعیین برای مرحله واسنجی به ترتیب $0/75$ و $0/76$ محاسبه شد. بنابر نتایج معیارهای ارزیابی در دوره واسنجی و همچنین مقایسه هیدروگراف‌ها، بیانگر این نکته است که مدل توانسته روند تغییرات دبی مشاهداتی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کند.

سپس برای نشان دادن اینکه آیا مدل برای این منطقه قابلیت پیش‌بینی رواناب را برای دوره خارج از دوره واسنجی دارد یا خیر، دوره (۲۰۱۳-۲۰۱۵) برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. در ادامه با توجه به مقادیر به دست آمده از پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، صحت‌سنجی مدل انجام شده است. نتایج به دست آمده از معیارهای ارزیابی نش- ساتکلیف و ضریب تعیین برای مرحله اعتبارسنجی $0/67$ و $0/68$ هستند که مقایسه گرافیکی نتایج حاصل از صحت‌سنجی بیانگر این است که در این مرحله امکان شبیه‌سازی دقیق جریان بالا با مجموعه پارامترهای مرحله واسنجی را نمی‌دهد. یعنی در برخی موارد دبی را کمتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است. بر اساس مطالعات (Santhi et al., 2001) و همچنین Binaman and Shoemak (2005) هنگامی شبیه‌سازی توسط مدل HBV رضایت‌بخش است که ضریب همبستگی بیشتر از $0/8$ است. همچنین (Radchenko et al., 2014) بیان کردند که مقدار ضریب نش- ساتکلیف بیشتر از $0/5$ برای مدل HBV قابل قبول است. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در سطح جهان (Normand et al., 2010; Abebe et al., 2010; Havangi et al., 2014; Yaqubi et al., 2014; Amiri & Salami, 2020) نشان می‌دهد که دقت شبیه‌سازی مدل قابل قبول و نزدیک به نتایج سایر محققین به دست آمده است.

در شکل ۳ نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی در ایستگاه چم انجیر در برابر مقادیر شبیه‌سازی شده دبی‌های روزانه توسط مدل HBV برای داده‌های مرحله صحت‌سنجی نشان داده شده است.

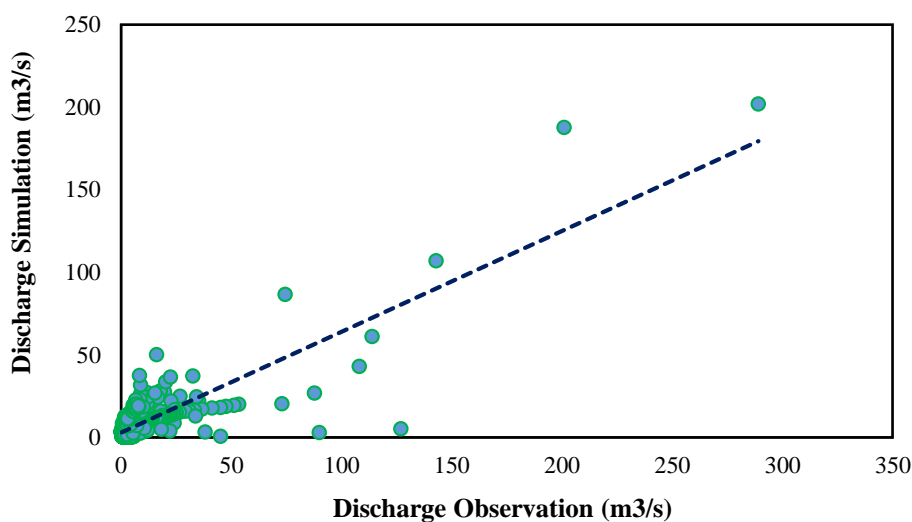


Fig. 3- Daily flow distribution diagram using HBV model

شکل ۳- نمودار پراکنش دبی روزانه با استفاده از مدل HBV

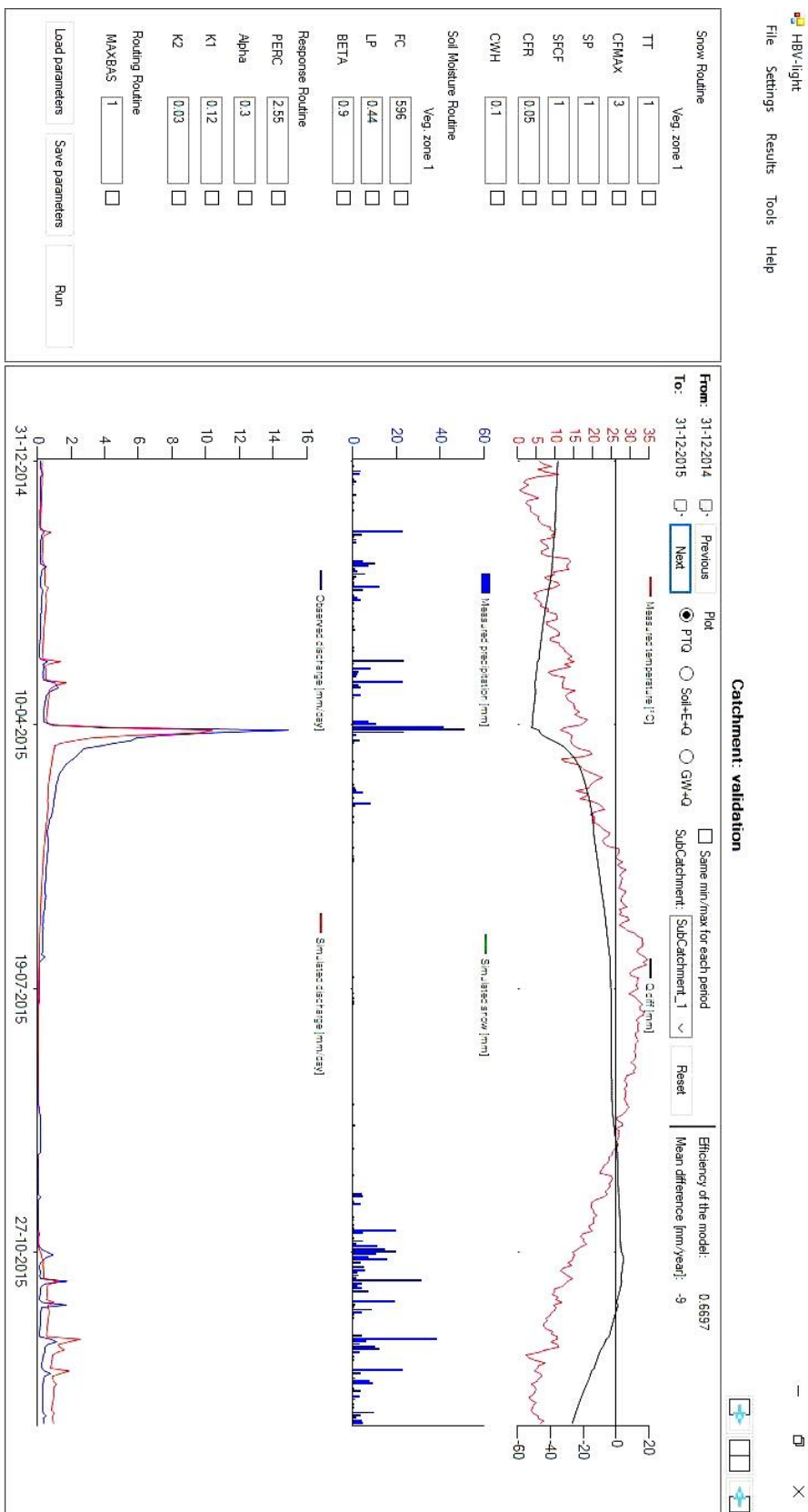


Fig. 4- Runoff simulation in the statistical period of 2015 in the HBV model
 شکل ۴- شبیه‌سازی رواناب در دوره آماری ۲۰۱۵ در مدل HBV

۲-۳- مدل‌سازی رواناب توسط مدل RF

در این مطالعه، برای مدل‌سازی رواناب در حوضه چم انجیر با استفاده از مدل RF، داده‌های بارندگی روزانه، جریان روزانه رودخانه، دمای متوسط روزانه و تبخیر-تعرق روزانه مورد استفاده قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی رواناب، در مرحله واسنجی مدل، پارامترهای مدل به صورت دستی تغییر پیدا می‌کنند تا مقادیر مناسب انتخاب گردند. بدین منظور ابتدا یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند. دین منظور، پارامترهای مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار وکا (WEKA) به صورت جدول ۲ تنظیم شد.

Table 2- The values of the parameters used in the random forest model

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل جنگل تصادفی

Parameter	The optimal amount
Bag Size Percent	98
Batch Size	100
Maximum Depth of Tree	0
Number of Execution Slots	1
Seed	1

در شکل ۵ نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر شبیه‌سازی شده دبی‌های روزانه توسط مدل جنگل تصادفی برای داده‌های بخش صحت‌سنجی نشان داده شد. همانطور که از شکل مشخص است، بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، به غیر از چند نقطه روی خط نیمساز قرار گرفته و این امر دلالت بر تطابق خوب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس خط $(Y=X)$ است.

با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین به ترتیب $0/82$ و $0/86$ محاسبه شد. بنابراین نتایج معیارهای ارزیابی در دوره صحت‌سنجی و همچنین مقایسه هیدروگراف‌ها، بیانگر این نکته است که مدل توانسته روند تغییرات دبی مشاهداتی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کند. در شکل ۶ تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی‌های روزانه نسبت به زمان برای مدل جنگل تصادفی (RF) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد اگر چه در کل تطابق مناسبی میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده جریان وجود دارد، ولی عملکرد این مدل در برآورد مقادیر اوج جریان نسبتاً ضعیف بوده است. مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات انجام شده (Mohamadi et al. (2021 و Sohrabi Geshnigani et al. (2021) نشان می‌دهد نتایج مدل نزدیک به نتایج سایر تحقیقات است و مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی دارد.

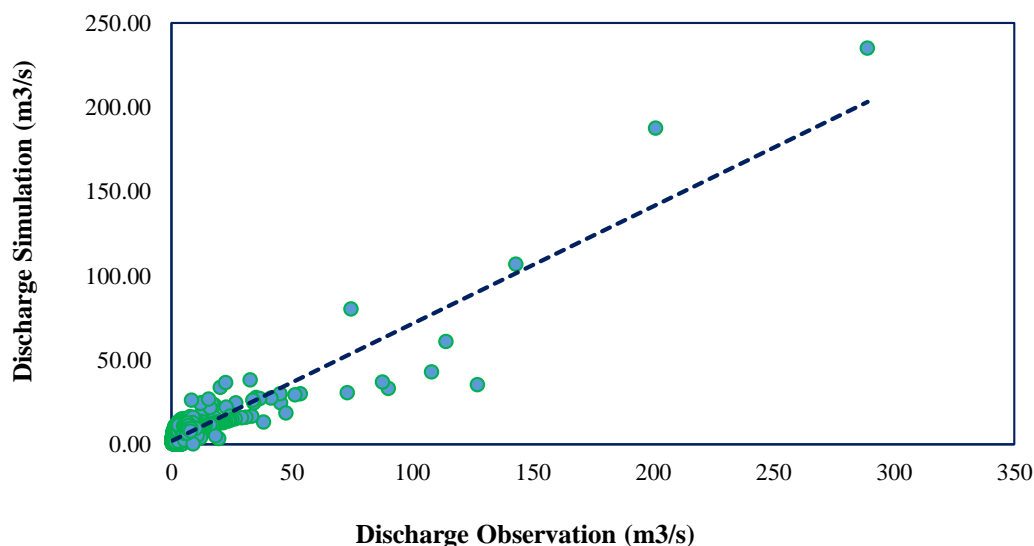


Fig. 5- Daily flow distribution diagram using RF model

شکل ۵- نمودار پراکنش دبی روزانه با استفاده از مدل RF

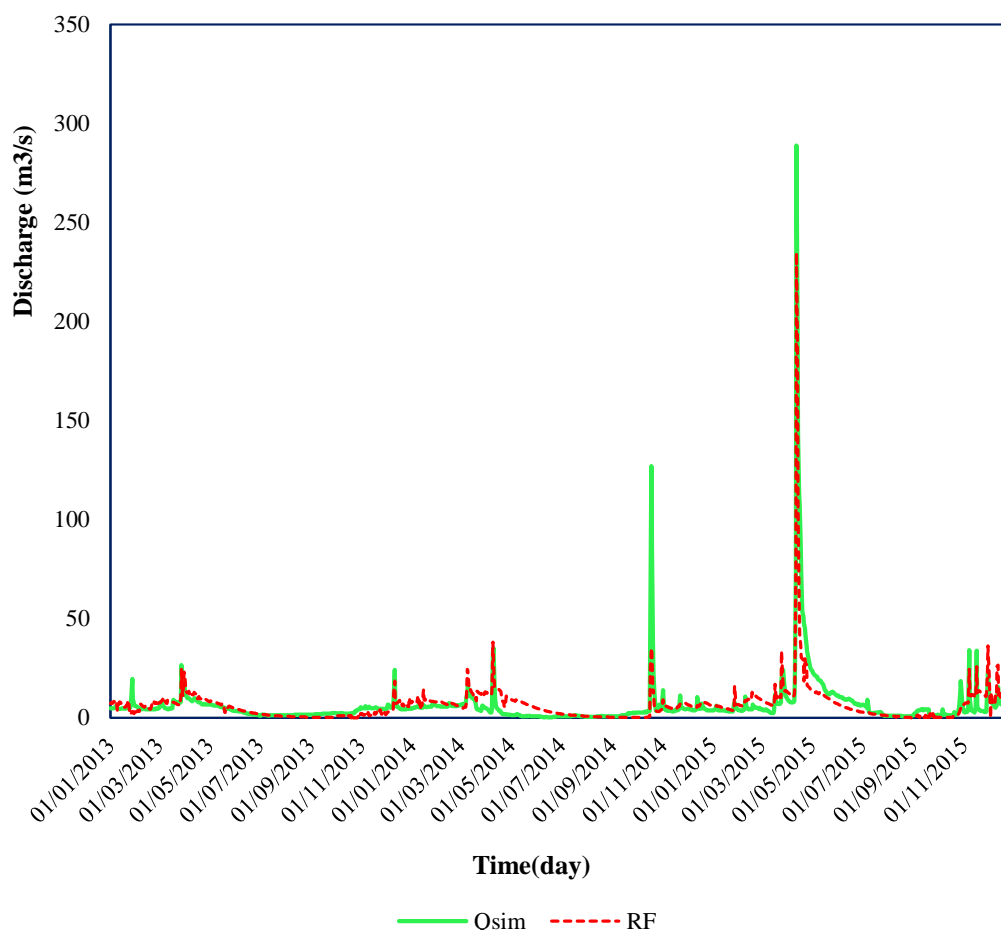


Fig. 6- Observational runoff and the runoff simulated by the RF model

شکل ۶- نمودار رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل RF

داد که اگر چه دقت مدل جنگل‌های تصادفی در برآورد مقادیر دبی پایه و متوسط رواناب روزانه خوب بود، ولی عملکرد این مدل در برآورد مقادیر اوج جریان نسبتاً ضعیف بوده است که این ممکن است به دلیل کوهستانی بودن منطقه و رژیم برفی منطقه باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آبی رواناب حاصل از ذوب برف نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شود؛ زیرا بخش عمده‌ای از بارش مناطق کوهستانی به صورت برف است و رواناب حاصل از ذوب برف در مطالعات منابع آب این مناطق از اهمیت بالایی برخوردار است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Random Forest
- 2- Hydrological Byrans Vattenbalansavedelning
- 3- General Circulation Model

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه، جهت پیش‌بینی جریان روزانه حوضه چم انجیر خرم آباد، از مدل مفهومی هیدرولوژیک HBV و مدل هوش مصنوعی جنگل تصادفی (RF) استفاده گردید. مقادیر بارش، دما، تبخیر و تعرق و دبی به عنوان ورودی به این مدل‌ها وارد شد. سپس، مقادیر رواناب روزانه مشاهداتی با رواناب روزانه تخمین زده شده توسط هر کدام از مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد بررسی گرفت. نتایج نشان داد که هر دو مدل از عملکرد قابل قبولی در برآورد رواناب روزانه برخوردار بودند. مقایسه نتایج دو مدل نشان داد که مدل RF عملکرد بهتری نسبت به مدل HBV داشت و دقت شبیه‌سازی با مدل RF بیشتر از مدل HBV بود. در عین حال استفاده از مدل HBV هم بستگی به نوع مطالعه و دقت مورد نظر دارد. همچنین، نتایج نشان

۵- مراجع

- Abebe N, Ogden F L, and Pradhan N R (2010) Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implications for parameter estimation. *Journal of Hydrology* 389(3): 301-310
- Amiri A, Salimi H (2020) Comparison of the performance of two MISDc and HBV hydrologic models in runoff simulation of Kakareza basin in Lorestan province. *Journal of Water and Sustainable Development* 7(4):51-60
- Aronica G T, and Candela A (2007) Derivation of flood frequency curves in poorly gauged Mediterranean catchments using a simple stochastic hydrological rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 347(1):132-142
- Bergström S, and Forsman A (1973) Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff mode. *Hydrology Research* 4(3):147-170
- Bergstrom S (2006) Experience from applications of the HBV hydrological model from the perspective of prediction in ungauged basins. *IAHS publication* 307:97-107
- Binaman J, Shoemaker C A (2005) An analysis of high-flow sediment event data for evaluating model performance. *Journal of Hydrological Processes* 19(3):605-620
- Breiman L (1984) Classification and regression trees CA, Wadsworth International Groups. *Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery* 248-276
- Breiman L (2001) Random forests. *Machine Learning* 45(1):5-32
- Dastorani M T, Mahjoobi J, Talebi A, and Fakhar F (2018) Application of machine learning approaches in rainfall-runoff modeling (Case Study: Zayandeh_Rood Basin in Iran). *Civil Engineering Infrastructures Journal* 51(2):293-310
- Driessen T L A, Hurkmans R T W L, Terink W, Hazenberg P, Torfs P J J F, and Uijlenhoet R (2010) The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(15):651-665
- Fathabadi A, Salajegheh A, and Mahdavi M (2009) Streamflow forecasting using neuro-fuzzy and time series methods. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 2(5):21-30 (In Persian)
- Firat M, and Güngör M (2007) River flow estimation using adaptive neuro fuzzy inference system. *Mathematics and Computers in Simulation* 75(3-4):87-96
- Jahanshahi A, Shahidi K, Soleimani K, Moghadamnia A, and Mertes R (2022) Flow simulation in basins without statistics using zoning methods in Hamon-Jazmurian basin. *Science of Water and Soil (Agriculture Science)* 32(2):159-177
- Hashim Isam J, Hamideh K, and Ranjan S (2020) Comparative study of conceptual versus distributed hydrologic modelling to evaluate the impact of climate change on future runoff in unregulated catchments. *Journal of Water and Climate Change* 11(2):341-366
- Hawngi M, Masah Bavani A R (2014) Comparison of the performance of two hydrological models IHACRES and HBV light in simulation of Dez basin. *National Conference on Watershed Management Science and Engineering (Sustainable Watershed Management)*, 18-19 February, Birjand, Iran
- Konz M, and Seibert J (2010) On the value of glacier mass balances for hydrological model calibration. *Journal of Hydrology* 385(1-4):238- 246
- Klaus V, Maik H, Axel B, and Deborah L (2018) Hydrological model parameter (in)stability- "crash testing" the HBV model under contrasting flood seasonality conditions. *Journal Hydrological Sciences Journal* 63(7):991-1007
- Luce C (2014) Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales: Edited by Günter Blöschl, Murugesu Sivapalan, Thorsten Wagener, Alberto Viglione, and Hubert Savenije Cambridge University Press, 2013, 465 pp., ISBN: 978-1107028180, 140(hardback), 112 (eBook). *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(2):22-22
- Lorrai M, and Sechi G M (1995) Neural nets for modelling rainfall-runoff transformations. *Water Resources Management* 9(4):299-313
- Mohammadi M, Vagharfard H, Mahdavi Najafabadi R, Daneshkar Arasteh P, and Nazemosadat M (2021) Rainfall-runoff modelling of coastal watersheds near the Strait of Hormuz using data mining. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(2):313-327 (In Persian)
- Normand S, Konz M, and Merz J (2010) An application of the HBV model to the Tamor Basin in Eastern Nepal. *Journal of Hydrology and Meteorology* 7(1):49-58

- Radchenko I, Breuer L, Forkutsa I, and Frede H G (2014) Simulating water resource availability under data scarcity- a case study for the Ferghana Valley (Central Asia). *Water* 6(11):3270–3299
- Razavi T, and Coulibaly P (2013) Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. *Journal of hydrologic engineering* 18(8):958-975
- Santhi C, Arnold J G, Williams J, Dugas W A, and Hauck L (2001) Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association* 37(5):1169–1188
- Sohrabi Geshnigani F, Mirabbasi najafabadi R, Golabl M R (2021) Rainfall- runoff modeling using HBV Model and random forest algorithm in Bazoft Watershed. *Iranian Soil and Water Research* 52(5):1395-1407 (In Persian)
- Yaghoubi M, and Massah Bavani A (2014) Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in SEMI-ARID Basins. *Journal of the Earth and Space Physics* 40(2):153-172 (In Persian)
- Worland S C, Farmer W H, and Kiang J E (2018) Improving predictions of hydrological low-flow indices in ungaged basins using machine learning. *Environmental Modelling and Software* 101:169-182