

## Evaluation of the Performance of GR4J, GR2M, and GR1A Hydrological Models in Simulating Runoff in the Silakhor Watershed of Lorestan Province

Ali Haghizadeh\*<sup>ID</sup> | Lila Ghasemi<sup>ID</sup>

Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources,  
Lorestan University, Khorramabad, Iran.  
E-mail: [haghizadeh.a@lu.ac.ir](mailto:haghizadeh.a@lu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received: 09 Jan. 2024  
Revised: 31 Mar. 2024  
Accepted: 15 Apr. 2024  
Published online: 22 Oct. 2024

**Keywords:**  
*Streamflow modeling,*  
*Water resources management,*  
*Lorestan province,*  
*Rainfall-runoff model.*

### Abstract

In recent years, the flood situation of headwaters of the Dez River in Lorestan Province has increased. This is due to various factors such as climate change, reduction of vegetation cover, and increase in construction in the riparian zone. In 2022, floods occurred several times in the Dez headwaters in Lorestan province. These floods caused significant damage to life and property. Global conceptual models have been developed for more than two decades and their effectiveness in simulating streamflow has been proven. In this study, simulation of runoff rainfall in Silakhor-Rahimabad watershed was done using three daily (GR4J), monthly (GR2M) and annual (GR1A) models. The Nash-Sutcliffe (Nash), root mean square error (RMSE), and bias criteria were used to evaluate the model performance during the calibration and validation periods. The obtained results were highly significant. The GR1A model has Nash coefficients of 86.1 and 71.7 in both calibration and validation periods, respectively, so this model has a very good performance. For the other two models, the GR2M model and the GR4J model, the Nash coefficients in the two calibration and validation periods are 76.7, 70.2 and 61.4, 86.2, respectively. These coefficients also indicate the good and very good performance of these models in rainfall-runoff simulation. However, considering the satisfactory performance of the two evaluation criteria, RMSE and Bias, in the GR1A model, it can be concluded that the GR1A model had a better performance in simulating rainfall-runoff. Finally, the obtained results indicate that the GR4J, GR2M and GR1A conceptual models are suitable models for simulating the streamflow in the Silakhor-Rahimabad watershed.

**Cite this article:** Haghizadeh, A., Ghasemi, L. (2024). Evaluation of the Performance of GR4J, GR2M, and GR1A Hydrological Models in Simulating Runoff in the Silakhor Watershed of Lorestan Province. *Journal of Range & Watershed Management*, 77 (3), 335-352. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.370851.1742>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

## ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی GR1A و GR2M، GR4J در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز سیلاخور لرستان

علی حقی‌زاده\* | لیلی قاسمی

گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران  
رایانامه: haghizadeh.a@lu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در سال‌های اخیر، وضعیت سیلابی بودن سرشاخه‌های دز در استان لرستان افزایش یافته است. این امر به دلیل عوامل مختلفی از جمله تغییر اقلیم، کاهش پوشش گیاهی و افزایش ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها است. در سال ۱۴۰۱، چندین بار در سرشاخه‌های دز در استان لرستان، سیل اتفاق افتاد. این سیل‌ها باعث خسارات جانی و مالی زیادی شدند. مدل‌های مفهومی جهانی بیش از دو دهه است که توسعه یافته‌اند و اثربخشی آن‌ها در شبیه‌سازی جریان رودخانه به اثبات رسیده است. در این مطالعه با استفاده از سه مدل روزانه (GR4J)، ماهانه (GR2M) و سالانه (GR1A) به شبیه‌سازی بارش-رواناب حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد پرداخته شد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل، در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، از معیارهای ارزیابی نش-ساتکلیف (Nash)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای کل در حجم جریان (Bias) استفاده شد. نتایج به دست آمده کاملاً معنی‌دار بودند. مدل GR1A در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب دارای ضرایب نش ۸۶/۱ و ۷۱/۷ می‌باشد، لذا این مدل دارای عملکرد خیلی خوب می‌باشد. برای دو مدل GR2M و GR4J نیز ضرایب نش در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۷۶/۷، ۷۰/۲ و ۶۱/۴، ۸۶/۲ می‌باشند که بیانگر عملکرد خیلی خوب این مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد. لیکن با توجه به مطلوب بودن دو معیار ارزیابی، یعنی RMSE و Bias در مدل GR1A، این نتیجه حاصل می‌شود که مدل GR1A عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش-رواناب داشت. در نهایت نتایج حاصل بیانگر این است که مدل‌های مفهومی GR4J، GR2M، GR1A مدل‌های مناسبی برای شبیه‌سازی جریان در حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد می‌باشند.

### نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

### کلیدواژه‌ها:

مدل‌سازی جریان،

مدیریت منابع آب،

استان لرستان،

مدل بارش-رواناب.

استناد: حقی‌زاده، علی؛ قاسمی، لیلی (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی GR1A و GR2M، GR4J در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز سیلاخور لرستان. نشریه مرتع و آبخیزداری،

۳۳۵-۳۳۵، (۳)۷۷

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.370851.1742>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## ۱. مقدمه

مدل‌های ماهانه بیلان آب در مدیریت منابع آب به‌ویژه در طراحی و بهره‌برداری مخزن بسیار مفید هستند. از این مدل‌ها حتی برای بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی مورداستفاده قرار گرفته‌اند (Schaake & Liu., 1989; Arnell, 1992). بارش مؤثرترین و مهم‌ترین منبع آب یک حوزه آبخیز می‌باشد. در دسترس بودن اطلاعات پیوسته بارش که فرصت پیش‌بینی مقدار رواناب را فراهم می‌کند و شروع خوبی برای شبیه‌سازی پدیده‌ی بارش-رواناب محسوب می‌شود.

افزایش دقت در برآورد و مدل‌سازی بارش-رواناب برای برنامه‌ریزی و مدیریت حوضه رودخانه مطلوب و مفید است. چرا که با برآورد مناسب جریان، می‌توان پیش از وقوع سیل و خشکسالی، خطرات هیدرولوژیکی آن‌ها را کاهش داد (Swain et al., 2017; Alizadeh et al., 2017). شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی از اولین گام‌های اقدامات مدیریتی و برنامه‌ریزی منابع آب، بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر کاربری اراضی و نیز نحوه بهره‌برداری از منابع آب‌و خاک در یک حوزه آبخیز می‌باشد. شبیه‌سازی فرآیندهای رواناب در حوضه‌های دارای آمار را می‌توان ضمن صرفه‌جویی در هزینه و زمان به حوضه‌های مشابه بدون آمار تعمیم داد (زارعی و همکاران، ۱۳۸۸). حجم رواناب و تغییرپذیری آن به عوامل مختلفی مانند بارندگی، گردش جو، ویژگی‌های فیزیکی و... مربوط می‌شود (Song et al., 2012; Herath et al., 2020; Ha et al., 2021). مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که برای تخمین رواناب از داده‌های تاریخی بارندگی استفاده می‌شود. علاوه بر این، داده‌های هواشناسی مانند تبخیر، دمای هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد و... و ویژگی‌های خاص حوضه مانند مساحت حوضه، طول حوضه، شیب حوضه، طول از مرکز حوضه تا خروجی حوضه و... نیز از عوامل درگیر در رواناب هستند (Alizadeh et al., 2017; Song et al., 2012; Adnan et al., 2021).

مدل بارش-رواناب یک رویکرد ریاضی برای توصیف رابطه بین بارندگی و رواناب است (Liu & et al, 2020). به‌طور کلی، مدل‌های رواناب را می‌توان به سه گروه اصلی مدل مفهومی، مدل فیزیکی و مدل تجربی تقسیم کرد (Chang et al., 2018; Hu et al., 2018; Venkatesan et al., 2019). مدل مفهومی اجزای هیدرولوژیکی (Li & Zhang., 2008) را توصیف می‌کند و به داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی زیادی نیاز دارد (Devia et al., 2015; Huo et al., 2019). همچنین معمولاً ماهیت یکنواخت دارند و تغییرپذیری فضایی ویژگی‌های حوضه را نادیده می‌گیرند و از پارامترهای یکسان برای کل حوضه استفاده می‌کنند (Jaiswal et al., 2020; Chen et al., 2011). با اکثر پارامترهای مدل نیز هیچ معنای فیزیکی مستقیمی ندارند (Lee & et al, 2005). نمونه‌هایی از مدل‌های مفهومی مدل Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) (Bergström., 1992; Bergström & Lindström., 2015)، مدل TANK (Sugawara., 1974)، مدل Xinanjiang (XAJ) (Zhao & Liu., 1995)، مدل (GR4J)<sup>1</sup> (Perrin et al., 2003) و مدل ARNO (Todini., 1996). مدل فیزیکی مدلی است که سعی در توصیف فرآیندهای فیزیکی دارد که به متغیرها یا پارامترهایی در مورد وضعیت اولیه مدل و مورفولوژی حوضه نیاز دارد (Devia et al., 2015). انتخاب مدل‌های GR در مقایسه با مدل‌های دیگر بر اساس در دسترس بودن یک مدل در هر مرحله زمانی، پلت فرم مدل‌سازی یکسان، (داده‌های نمونه و روش مدل‌سازی) در ساخت آن‌ها و عملکرد بهتر در مقایسه با سایر مدل‌های مفهومی جهانی انجام می‌گیرد.

برای تخمین رواناب ماهانه، مدل GR2M (مدل دو پارامتری بارش-رواناب ماهانه) به دلیل غلبه بر ضعف پارامترسازی بیش‌از حدی که در مدل‌های پیچیده دیده می‌شود، انتخاب شد (Zamoum & Souag-Gamane., 2019). این مدل با موفقیت در بسیاری از مناطق برای جغرافیا و اقلیم‌های مختلف برای اهداف بسیاری استفاده شده است. نمونه‌هایی از کاربرد مدل GR2M برای مدیریت و برنامه‌ریزی برای منابع آب (Dezetter et al., 2008)، مطالعه اثرات سناریوهای اقلیمی بر پاسخ هیدرولوژیکی (Okkan & Fistikoglu., 2014; Lyon et al., 2020)، پیش‌بینی رواناب ماهانه در حوزه آبریز اندازه‌گیری نشده (Zamoum & Souag-Gamane., 2019)، ارزیابی عملکرد مدل (Boulariah et al., 2017; Topalovic et al., 2020; Rintis & Setyoasri., 2016)

<sup>1</sup> Génie Rural à 4 Paramètres Journalier

ماهانه است (O'Connor et al., 2021). باچیر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند که ساختار مدل GR2M ممکن است برای شبیه‌سازی تخلیه سیل بسیار ساده باشد، اما به‌طور کلی، یک مدل قادر است رواناب ماهانه را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. در مطالعه‌ای که دیتاکیت<sup>۲</sup> و همکاران در سال (۲۰۲۱) انجام دادند، دریافتند که GR2M برای شبیه‌سازی بارش-رواناب ماهانه در حوضه جنوبی تایلند قابل‌اعتماد است و عملکرد خوبی دارد. مدل GR2M به داده‌های ورودی کمی از جمله بارندگی ماهانه و تبخیر و تعرق بالقوه نیاز دارد. علاوه بر این، در مقایسه با سایر مدل‌های بارش-رواناب که به پارامترهای بیشتری نیاز دارند، تنها از ۲ پارامتر برای کالیبراسیون استفاده می‌کند. به دلایل ذکرشده، مدل GR2M را برای انجام مطالعه خود انتخاب کردند. همچنین دیتاکیت و همکاران در تحقیق دیگری در سال (۲۰۲۳) با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و مدل GR2M به پیش‌بینی رواناب ماهانه پرداختند. این مدل‌ها در شش ایستگاه رواناب در حوضه جنوبی تایلند آزمایش شدند. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد مدل، از چهار معیار ارزیابی عملکرد، از جمله کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب همبستگی (r)، شاخص کلی (OI) و شاخص ترکیبی (CI) استفاده کردند. نتایج حاصل بیانگر این بود که الگوریتم‌های ML، در ایستگاه‌هایی با ضریب همبستگی پایین (f) بین مجموعه داده‌های ورودی و خروجی، نسبت به GR2M دارای عملکرد بهتری بودند.

بوگوئرا و منصور<sup>۳</sup> در سال (۲۰۲۳) با استفاده از مدل سالانه (GR1A)، ماهانه (GR2M) و روزانه (GR4J)، به مدل‌سازی بارش-رواناب حوزه آبخیز بنی باهدل (شمال غربی الجزایر) پرداختند. مطابق نتایج حاصل، معیار نش برای مدل GR1A برابر با ۷۱/۳، برای مدل GR2M برابر با ۷۳/۴ و برای مدل GR4J برابر با ۷۲/۸ به دست آمد، که مقادیر قابل قبولی بودند. همچنین نتایج نشان‌دهنده این بود که این مطالعه می‌تواند یک ابزار تصمیم‌گیری برای شبیه‌سازی جریان‌ها باشد و برای پیشرفت‌های هیدرولیکی آینده در منطقه مورد مطالعه بسیار مفید باشد. زندی دره غربی و همکاران در سال (۱۳۹۶) کارایی دو مدل بارش-رواناب GR2M و GR4J در شبیه‌سازی جریان حوضه دره تخت در استان لرستان را در بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۳۹۷ مورد ارزیابی قرار دادند. برای ارزیابی کارایی این دو مدل از ضریب نش ساتکلیف استفاده شد که مقدار آن به ترتیب ۰/۴۲۷ و ۰/۶۶۵ به دست آمد. نتایج نشان داد دو مدل جریان را با دقت متوسط تا خوب شبیه‌سازی می‌کنند، ولی با توجه به معیار نش، کارایی مدل GR2M در شبیه‌سازی جریان از مدل GR4J بیشتر است. تیموری و الوندی در سال (۱۴۰۰) به شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از نرم‌افزار eWater Source در آبخیز چهل‌چای در استان گلستان پرداختند. در این پژوهش دو نرم‌افزار بارش رواناب GR4J و IHACRES در eWater Source با هم مقایسه شدند. به همین منظور از داده‌های مجموعه‌ی زمانی پیوسته در گام زمانی روزانه در نظر گرفته شد. برای اجرای نرم‌افزارها مجموعه زمانی بارش روزانه‌ی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ و تبخیر و تعرق سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ از ایستگاه لزوره به کار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کارایی بهتر نرم‌افزار GR4J از IHACRES در شبیه‌سازی جریان روزانه است. مصطفی‌زاده و عسگری در سال (۱۴۰۰) به بررسی کارایی مدل J4GR در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در آبخیز نیرچای اردبیل پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که علیرغم بیش تخمینی مقادیر شبیه‌سازی‌شده مدل در مرحله اعتبارسنجی، شبیه‌سازی مدل در روند تغییرات جریان و نیز دوره‌های جریان کمینه مناسب بوده است. ارزیابی نتایج مدل با معیار نش-ساتکلیف نشان داد که دامنه تغییر مقادیر این شاخص در سال‌های مختلف بین ۰/۳۱-۰/۷۷ است. امیری و همکاران در سال (۱۴۰۲) با استفاده از دو مدل هیدرولوژیکی MISDc و GR4J به شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز چم انجیر پرداختند. درنهایت ارزیابی نشان داد که مدل MISDc توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه چم انجیر دارد که می‌توان از مدل در مطالعات منابع آب منطقه استفاده کرد.

تجزیه و تحلیل بلندمدت و داده‌های در مقیاس بزرگ به‌طور فزاینده‌ای در هیدرولوژی و منابع آب در بین محققان و مهندسان محبوب شده است (Wang & et al, 2009). این امر به دلیل ابزار کارآمد آن‌ها در تخمین بارندگی-رواناب است (Alizadeh et al., 2021). در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از مدل‌های GR1A، GR2M، GR4J در سه مقیاس زمانی سالانه، ماهانه و روزانه، به شبیه‌سازی

<sup>1</sup> Bachir

<sup>2</sup> Dittthakit

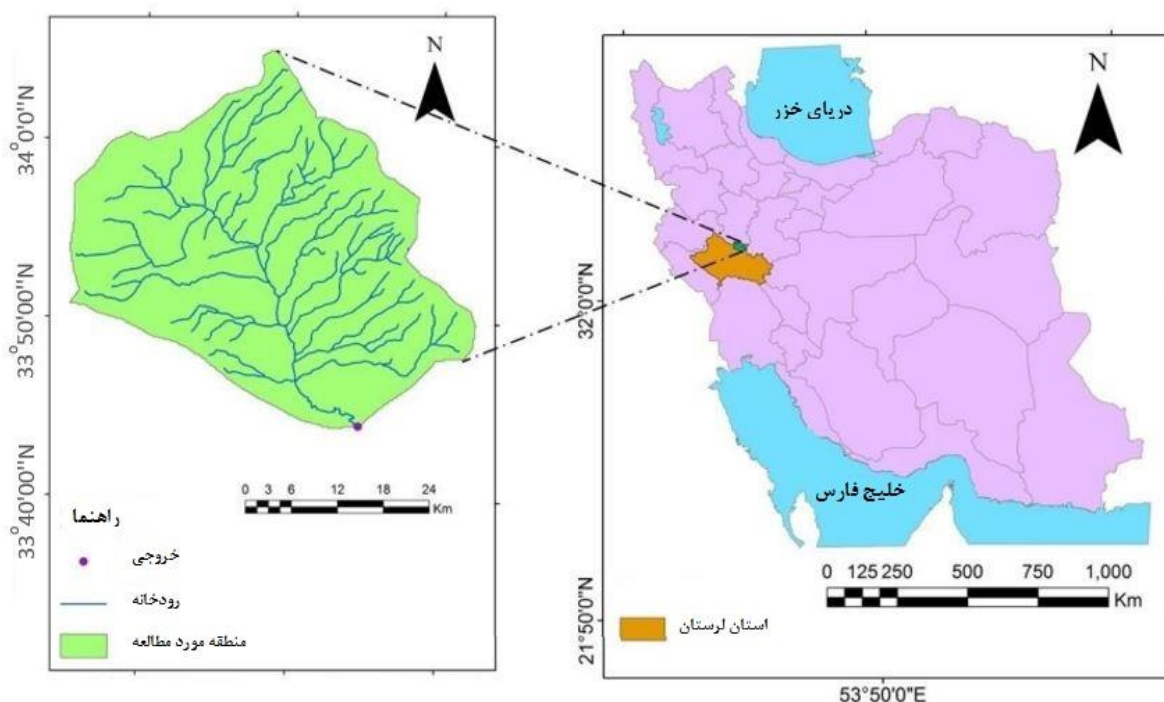
<sup>3</sup> Bouguerra & Mansour

رواناب در حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد پرداخته شده است. در این پژوهش به منظور انتخاب بهترین مدل برای شبیه‌سازی رواناب، سه مدل روزانه، ماهانه و سالانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین عملکرد مدل‌ها در دو دوره سیلابی حادث شده در سال ۱۴۰۱ در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر سیلاب، کاهش خسارات سیل و مدیریت بهتر منابع آب در حوزه آبخیز سیلاخور کمک کند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد از زیر حوزه‌های آبخیز سد دز در شهرستان بروجرد استان لرستان است. مساحت حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد برابر با  $999/02 \text{ km}^2$  کیلومترمربع، شیب متوسط آن ۳۵٪ و نیز بیشینه و کمینه ارتفاع در منطقه به ترتیب ۳۴۷۴ و ۱۴۷۵ متر است. میانگین بارندگی سالانه در طول یک دوره آماری ۳۰ ساله برابر با  $379/3 \text{ mm}$ ، متوسط دمای سالانه  $14/86 \text{ }^\circ\text{C}$  است. همچنین، بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، این منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد و نیز کاربری غالب منطقه، اراضی دیم و مرتع است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

### ۲-۲. داده‌های مورد نیاز

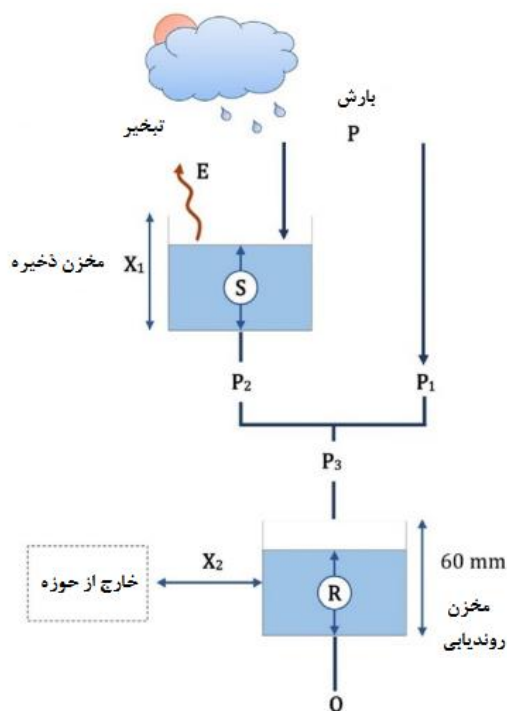
داده‌های مشاهداتی مورد استفاده در این پژوهش، شامل داده‌های بارندگی برحسب میلی‌متر، داده‌های تبخیر و تعرق برحسب میلی‌متر و نیز داده‌های مشاهده‌ای دبی جریان رودخانه برحسب مترمکعب در ثانیه، برای حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد بودند. آمار مذکور از آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شدند.

### ۲-۳. مدل GR4J

ساختار مدل روزانه GR4J ترکیبی از یک مخزن تولید و یک مخزن مسیریابی، هیدرو گراف‌های واحد و تابعی از باز شدن به محیط خارج غیر جوی است که امکان شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه را فراهم می‌کند (شکل ۲). مدل GR4J دارای برخی عملکردهای مشترک با مدل GR2M است (به‌عنوان مثال، تابع تولید به مخزن زمین متصل است). با این حال، ماژول مسیریابی آن پیچیده‌تر از مدل ماهانه است. مدل GR4J تنها چهار پارامتر برای کالیبره کردن دارد،  $X_1$ : ظرفیت ذخیره آب در لایه‌های سطحی خاک (میلی‌متر).  $X_2$ : ضریب تبادل آب زیرزمینی با خود یا بیرون از حوضه (میلی‌متر)؛  $X_3$ : ظرفیت ذخیره روز قبل یا ذخیره مسیر (میلی‌متر)؛ و  $X_4$ : زمان پایه هیدرو گراف واحد (روز) (Bouguerra and Mansour., 2023).

### ۲-۴. مدل GR2M

در اواخر دهه ۱۹۸۰، Demagref یک مدل ماهانه بارش باران را بر اساس یک رویکرد مفهومی به نام مدل GR2M، معرفی کرد. این مدل به‌طور مداوم توسط بسیاری از محققان توسعه یافته است (Mouelhi, 2003; Makhlof & Michel., 1994; Kabouya., 1990; Mouelhi, 2006). در این پژوهش از نسخه مدل ۲۰۰۶b استفاده شد. این مدل فقط دو پارامتر، یعنی توانایی حفظ رطوبت در خاک ( $X_1$ ) و ضریب تبادل آب ( $X_2$ ) دارد که این امر موجب کاربرد بیشتر و ساده‌تر آن شده است (Nounangnonhou et al., 2018). مدل GR2M به سه داده ورودی هواشناسی و هیدرولوژیکی مشاهداتی شامل بارندگی ماهانه، تبخیر و تعرق و رواناب نیاز دارد (Mouelhi, 2006; Nounangnonhou et al., 2018; Fathi, 2019). نتایج شبیه‌سازی آن رواناب، رطوبت خاک، جریان آب زیرزمینی است. رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با توجه به تنظیم پارامترهای  $X_1$  و  $X_2$  در فرآیندهای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مقایسه می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، ساختار مدل شامل دو مخزن بالا و پایین است.



شکل ۲. ساختار مدل GR2M. منبع: برگرفته از Bachir و همکاران (Bachir et al., 2015) و Rwasoka و همکاران (Rwasoka et al., 2014)

در مخزن بالا،  $X_1$  (میلی‌متر) حداکثر ظرفیت رطوبت خاک و  $S$  رطوبت واقعی خاک است. ذخیره پایینی ظرفیت جریان رودخانه ( $R$ ) با حداکثر ظرفیت ۶۰ میلی‌متر است و تغییرات آن به ضریب تبادل آب ( $X_2$ ) بستگی دارد. فرآیندهای جریان آب در هر ذخیره و بین دو ذخیره بر اساس رویکرد تعادل آب است. فرآیندها با ریزش بارش به زمین و سپس نفوذ به خاک آغاز می‌شود و سپس رطوبت خاک در سطح:  $S_1$  (mm) افزایش می‌یابد. هنگامی که خاک اشباع شد، مازاد بارندگی یا جریان آب سطحی  $P_1$  (میلی‌متر) ظاهر می‌شود. آب خاک می‌تواند در سطح ( $S_2$  (mm)) به دلیل تبخیر و تعرق کاهش یابد:  $E$  (mm) و نفوذ به جریان آب زیرسطحی:  $P_2$  (mm) ترکیب جریان آب سطحی ( $P_1$ ) و جریان آب زیرسطحی ( $P_2$ ) رواناب سطحی است:  $P_3$  (mm). این رواناب سطحی با آب موجود از ماه قبل جمع می‌شود:  $R$  (mm).  $R_1$  ناشی از ترکیب رواناب سطحی جاری و ماه‌های قبل ( $R$  و  $P_3$ ) است. رواناب سطحی بسته به جهت جریان آب به داخل یا خارج حوضه تغییر می‌کند که توسط ضریب تبادل آب ( $X_2$ ) که با نماد  $R_2$  نشان داده می‌شود، کنترل می‌شود. این فرآیندها به‌طور معمول تا پایان دوره در نظر گرفته شده ادامه می‌یابد و در نهایت هیدرو گراف رواناب کل به دست می‌آید (Ditthakit et al., 2023).

## ۲-۵. مدل GR1A

مدل GR1A با آزمایش اتصالات متعددی از مؤلفه‌های گام‌های زمانی چندساله، ماهانه و روزانه، دقیق‌تر و بزرگ‌تر ساخته شد. این مدل دارای یک پارامتر است. دبی شبیه‌سازی شده سالانه در مدل GR1A از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (معادله (۱)):

$$Q_k = P_k \cdot \left( 1 - \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X \cdot E_k} \right)^2 \right)^{0.5}} \right) \quad (1)$$

که در آن  $Q_k$ : جریان شبیه‌سازی شده سال  $k$ .  $P_k$ : میزان بارندگی مشاهده شده در سال  $k$ .  $P_{k-1}$ : مقدار بارندگی مشاهده شده در سال  $k-1$ .  $E_k$ : مقدار تبخیر و تعرق بالقوه سال  $k$  (Ditthakit et al., 2023).

## ۲-۶. معیارهای ارزیابی مدل‌ها

ارزیابی کارایی مدل نه فقط در زمان توسعه مدل بلکه در هنگام ارائه نمودن نتایج پژوهش نیز به دیگر پژوهشگران نیز بسیار حائز اهمیت است (Schaeffli & Gupta., 2007). به منظور انجام واسنجی و اعتبارسنجی هر سه مدل مورد استفاده در پژوهش، داده‌ها به دودسته تقسیم شدند. واسنجی مدل‌ها به وسیله‌ی روش واسنجی دستی سعی و خطا و بر اساس حداکثر نمودن تابع هدف نش-ساتکلیف انجام شد و لذا مقادیر پارامترهای واسنجی مدل‌ها به دست آمد. اعتبارسنجی مدل نیز با استفاده از نتایج به دست آمده از واسنجی مدل انجام گرفت و نتایج به دست آمده از مدل با استفاده از معیارها و شاخص‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. بعد از اجرا شدن مدل‌ها، جهت ارزیابی کمی و مقایسه عملکرد داده‌ها و همچنین تجزیه و تحلیل آن‌ها از معیارهای زیر استفاده شد.

۱- معیار نش (Nash): این معیار را می‌توان به صورت معادله ۲ نوشت.

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

۲- مجذور میانگین مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_o - Q_s)^2}{n}} \quad (3)$$

## ۳- خطای کل در حجم جریان

$$Bias = \frac{\sum(Q_o - Q_s)}{n} \quad (4)$$

در روابط مذکور n: تعداد کل مقادیر محاسبه شده و مشاهداتی برای هر حوزه آبخیز Q<sub>o</sub> و Q<sub>s</sub>: دبی مشاهداتی و محاسبه شده (به میلی متر در هر گام زمانی).  $\bar{Q}$ : میانگین داده‌های مشاهداتی (برحسب میلی متر در هر مرحله زمانی). زمانی که جریان‌های برآورد شده به جریان‌های مشاهداتی نزدیک‌تر می‌شوند، یعنی زمانی که مقدار نزدیک به ۱ باشد، مدل دارای عملکرد بهتری است. به عبارتی اگر میزان نش از ۰/۷۵ بزرگ‌تر باشد، نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شود، ولی در صورتی که مقدار نش بین ۰/۳۶-۰/۷۵ باشد، نتایج حاصل از مدل رضایت‌بخش می‌باشد (Motovilov et al., 1999). در یک طبقه‌بندی دیگر، هنریکسون و همکاران (۲۰۰۳)، میزان کارایی مدل‌ها بر اساس ضریب نش را به صورت جدول (۱) تقسیم‌بندی نموده‌اند.

جدول ۱. طبقه‌بندی میزان کارایی مدل‌ها بر اساس معیار نش

شاخص کارایی	خیلی ضعیف	ضعیف	خوب	خیلی خوب	عالی
ضریب نش	< ۰/۲۰	۰/۲۰ - ۰/۵۰	۰/۵۰ - ۰/۶۵	۰/۶۵ - ۰/۸۵	> ۰/۸۵

RMSE یکی از معیارهای خطا است که پایین بودن مقدار آن بیانگر عملکرد بهتر مدل می‌باشد؛ و Bias نیز خطای کل در حجم جریان است که بیانگر بیشتر یا کمتر بودن جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی می‌باشد. در واقع این معیار حاکی از آن است که مدل جریان را کمتر یا بیشتر از میزان جریان مشاهداتی، شبیه‌سازی می‌کند (Croke et al., 2005).

## ۳. نتایج و بحث

## ۳-۱. شبیه‌سازی جریان توسط مدل روزانه GR4J

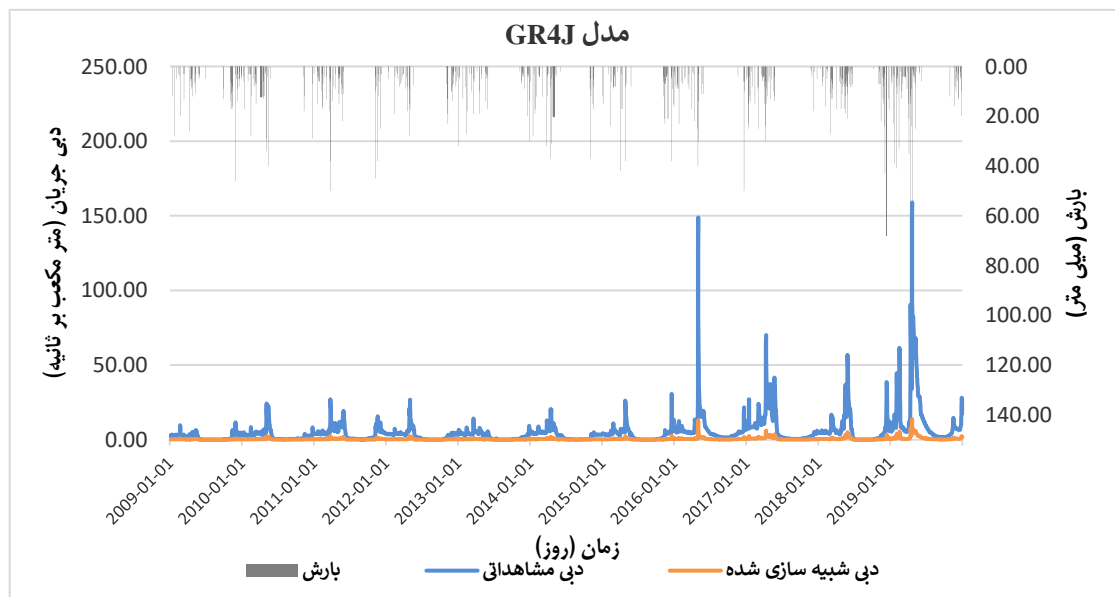
مدل روزانه GR4J، یکی از مدل‌های یکپارچه است. این مدل علاوه بر این که دارای سه داده‌ی ورودی اصلی بارش، تبخیر و تعرق و دبی مشاهداتی است، چهار پارامتر  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$  و  $X_4$  را نیز در برمی‌گیرد. مقادیر پارامترهای مذکور با استفاده از سعی و خطا و نیز بر اساس تابع نش-سانکلیم تعیین شدند.

به منظور تعیین این که آیا مدل GR4J قابلیت پیش‌بینی رواناب را جهت دوره‌ی خارج از واسنجی دارد یا خیر، مدل مذکور در طول دوره‌ی آماری ۲۰۱۴-۲۰۰۹ واسنجی شد و در ادامه نیز در طول دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۱۴ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج مدل GR4J در شبیه‌سازی روزانه در شکل (۳) ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) نتایج مربوط به عملکرد و پارامترهای مدل برای سری داده‌ها، در طول دوره آماری ارائه گردیده است. در جدول (۳) و اشکال (۴) و (۵) نیز نتایج مربوط به عملکرد و پارامترهای مدل و همچنین نتیجه شبیه‌سازی، برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر ضرایب  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$  و  $X_4$  و ضریب نش سری داده‌های مدل GR4J

پارامتر	$X_1$ (mm)	$X_2$ (mm)	$X_3$ (mm)	$X_4$ (day)	Nash(Q)%	Nash(VQ)%	Nash(LnQ)%	Bais%
مقادیر	۰/۵۰	۰/۶۰	۲/۸۹	۳/۰۴	۶۱/۰	۶۹/۸	۶۷/۰	۱۰۱/۶

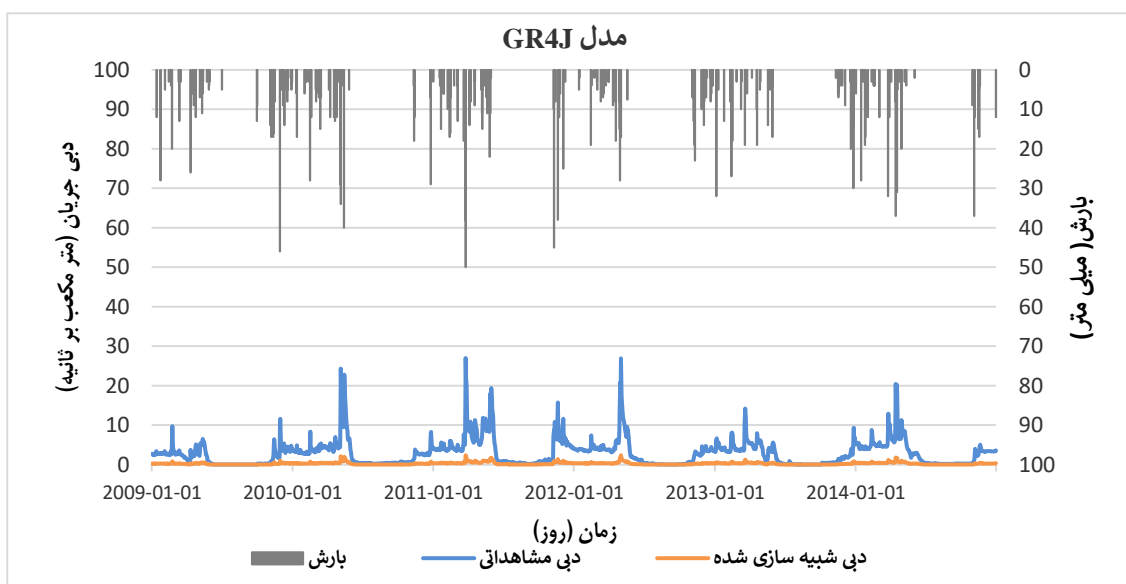




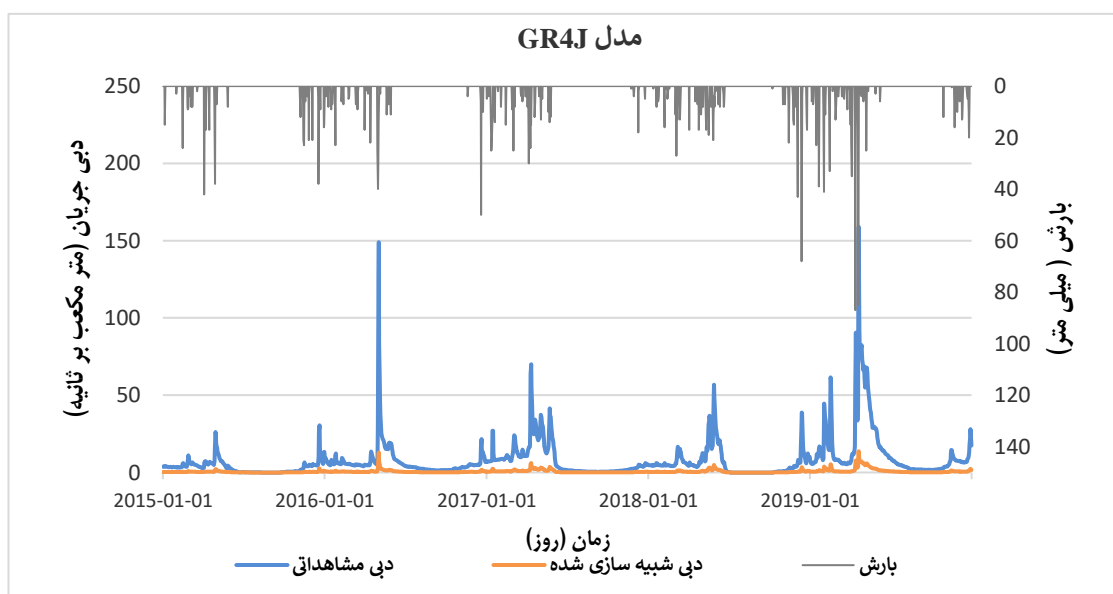
شکل ۳. جریان روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی سری زمانی داده‌ها با مدل GR4J

جدول ۳. مقادیر ضرایب X1, X2, X3 و X4 و ضریب نش سری داده‌های مدل GR4J در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

Bais%	Nash(LnQ)%	Nash(VQ)%	Nash(Q)%	X <sub>4</sub> (day)	X <sub>3</sub> (mm)	X <sub>2</sub> (mm)	X <sub>1</sub> (mm)	دوره
۹۹/۷	۷۴/۹	۷۳/۷	۶۱/۴	۳/۰۴	۲/۸۸	۰/۶۰	۰/۵۰	واسنجی
۱۰۱/۳	۷۶/۲	۸۴/۰	۸۶/۲	۲/۸۹	۳/۲۲	۰/۶۰	۰/۵۰	اعتبارسنجی



جدول ۴. جریان روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با مدل GR4J در مرحله واسنجی



شکل ۵. جریان روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با مدل GR4J در مرحله اعتبارسنجی

مقایسه گرافیکی نتایج به دست آمده از مرحله اعتبارسنجی نشان دهنده این است که مدل GR4J قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان دارد. لیکن این مدل در بخشی از شبیه‌سازی‌های انجام شده، دبی شبیه‌سازی شده را بیشتر از دبی مشاهده‌ای نشان داد. شایان ذکر است که این امر ممکن است به دلیل ساختار نسبتاً ساده و مفهومی مدل باشد.

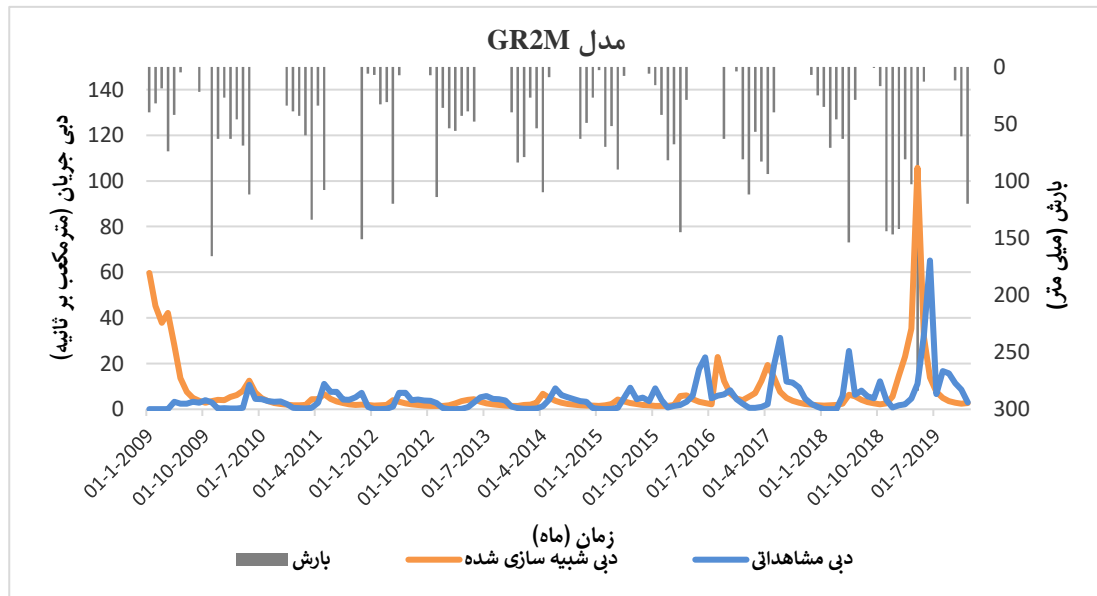
### ۲-۳. شبیه‌سازی جریان توسط مدل ماهانه GR2M

تغییرپذیری جریان در مدل ماهانه GR2M بیشتر مدل سالانه است. در شکل (۶) وضعیت سری داده‌های مورد استفاده برای مدل ماهانه GR2M نشان داده شده است. در جدول (۴) نیز نتایج حاصل از مدل برای سری زمانی ارائه شده است. مطابق با این جدول ضریب  $X_1$  ظرفیت پذیرش آب در لایه‌های خاک ۷/۰۴ میلی‌متر، ضریب  $X_2$  ظرفیت تبادل حوضه با بیرون از خود ۱/۱۱ میلی‌متر تعیین شد. ضریب  $X_1$  منعکس‌کننده رفتار هیدرولوژیکی حوضه است و بالا بودن آن نشان دهنده بارش بالا در حوضه، تخلخل مناسب و همچنین عمق خاک زیاد است. همچنین مثبت بودن ضریب  $X_2$  نیز بیانگر این است که حوضه مورد پژوهش از حوضه‌های مجاورش آب دریافت می‌نماید.

لازم به ذکر است که در اشکال (۷) و (۸) و جدول (۵) نیز نتایج حاصل از مقایسه هیدرو گراف دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نمایش داده شده است. مدل GR2M در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۴ و واسنجی و در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۱۴ مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در دوره واسنجی یعنی شکل (۷)، تطابق بیشتری میان دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده وجود دارد. علاوه بر این در روی نمودارها تاخیر بین بارش و رواناب نمایان است.

جدول ۴. مقادیر ضرایب  $X_1$  و  $X_2$  و ضریب نش سری داده‌های مدل GR2M

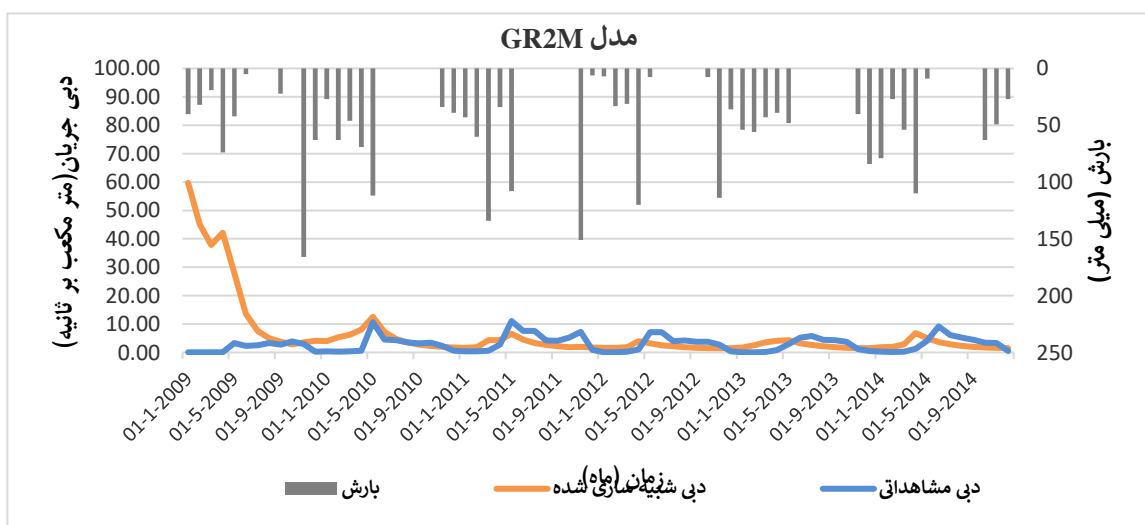
پارامتر	$X_2$ (mm)	$X_1$ (mm)	Nash(Q)%	Nash(VQ)%	Nash(LnQ)%	Bais%
مقادیر	۱/۱۱	۷/۰۴	۷۶/۷	۷۴/۷	۶۶/۰	۱۱۳/۰



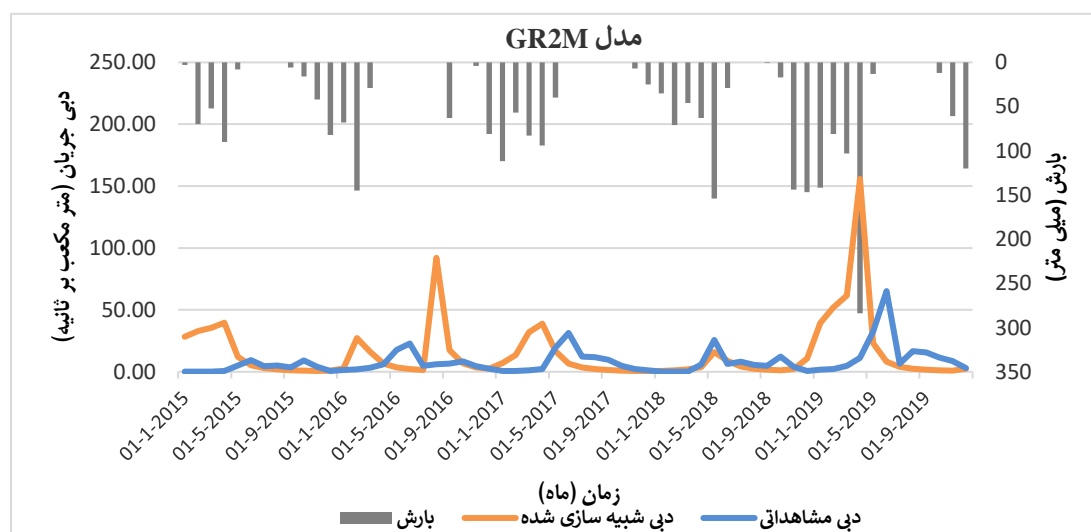
شکل ۶. جریان ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی سری زمانی داده‌ها با مدل GR2M

جدول ۵. مقادیر ضرایب X1 و X2 و ضریب نش سری داده‌های مدل GR2M در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

Bais%	Nash(LnQ)%	Nash(VQ)%	Nash(Q)%	X <sub>2</sub> (mm)	X <sub>1</sub> (mm)	دوره
۱۱۳/۰	۶۶/۰	۷۴/۷	۷۶/۷	۱/۱۱	۷/۰۴	واسنجی
۷۰/۹	۵۲/۱	۶۷/۹	۷۰/۲	۰/۹۶	۶/۱۴	اعتبارسنجی



شکل ۷. جریان ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مدل GR2M در مرحله واسنجی



شکل ۸. جریان ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مدل GR2M در مرحله اعتبارسنجی

### ۳-۳. شبیه‌سازی جریان توسط مدل سالانه GR1A

در مدل GR1A میزان رواناب در هر سال، به‌عنوان تابعی از میزان بارندگی سال گذشته و سال جاری می‌باشد. علاوه بر این در این مدل فرض بر این است که کل جریان‌های زیر قشری و عمقی از حوضه خارج شده و تلفات آن با تبخیر و تعرق واقعی در ارتباط است. در شکل (۹) سری داده‌های مورد استفاده برای مدل سالانه GR1A نشان داده شده است، در جدول (۶) نیز نتایج عملکرد مدل برای سری داده‌ها ارائه شده است. به‌منظور استفاده از مدل سالانه GR1A از دوره داده‌های آماری سری زمانی ۲۰۱۹-۱۹۹۴ استفاده شد. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) و جدول (۷) نیز به شبیه‌سازی جریان سالانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در طول مراحل واسنجی و اعتبارسنجی پرداخته شده است. به همین منظور از داده‌های آماری سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۹۴ برای واسنجی و از ۲۰۱۹-۲۰۰۷ جهت انجام اعتبارسنجی استفاده شد. در طول سری زمانی داده‌های مورد استفاده، در سال ۲۰۱۹ بیشترین جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. دلیل این امر، سیلاب‌هایی که در این سال به ثبت رسیده است. در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، هر دو نمودار جریان‌های سالانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی تقریباً با هم مطابقت دارند.

### ۳-۴. مقایسه عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش-رواناب

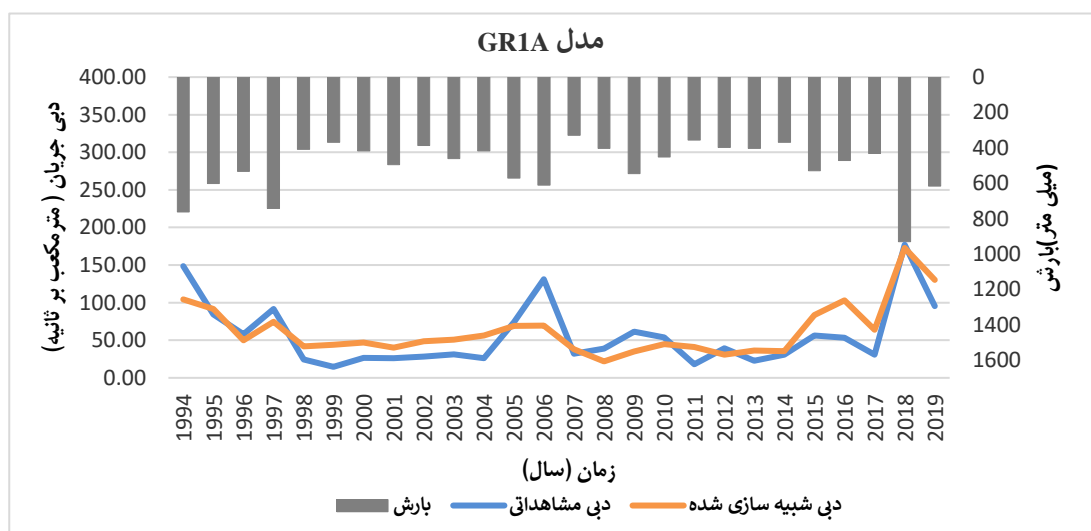
در این مطالعه به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش-رواناب از معیارهای ارزیابی مدل استفاده شد. در این قسمت بعد از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های GR1A، GR2M و GR4J و نیز شبیه‌سازی بارش-رواناب، به بررسی کارایی مدل‌ها با استفاده از سه معیار نش-ساتکلیف (Nash)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای کل در حجم جریان (Bias) پرداخته شد. نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی در جدول (۸) ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در معیار ارزیابی Bias مقادیر مثبت و منفی، به ترتیب نشان‌دهنده کمتر و بیشتر بودن متوسط جریان که به‌وسیله‌ی مدل‌ها شبیه‌سازی شده است نسبت به جریان مشاهداتی می‌باشد (زندى دره غریبی، ۱۳۹۵)؛ بنابراین در هر سه مدل، با توجه به نتایجی که در جدول (۸) ارائه شده است، در دوره‌های واسنجی، به دلیل مثبت بودن این معیار ارزیابی، میزان جریان مشاهداتی نسبت به شبیه‌سازی کمتر است و در دوره‌های اعتبارسنجی، برعکس این حالت اتفاق افتاده است و میزان جریان مشاهداتی نسبت به

شبیه‌سازی بیشتر است.

نتایج حاصل از این سه مدل در رابطه با توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی جریان، با نتایج حاصل از پژوهش بوگوئرا و منصور (۲۰۲۳) مطابقت دارد. علاوه بر این دیتاکیت و همکاران در سال (۲۰۲۱) نیز به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب ماهانه در حوضه جنوبی تایلند از مدل GR2M استفاده کردند، نتایج آنها حاکی بود که مدل مفهومی مورد استفاده با دارا بودن تنها ۲ پارامتر برای کالیبراسیون دارای عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی می‌باشد. در پژوهش حاضر نیز این امر مشاهده شد، با این تفاوت که به جای استفاده از فقط یک مدل مفهومی، از سه مدل روزانه (GR4J)، ماهانه (GR2M) و سالانه (GR1A) استفاده شد، و در نهایت نیز کارایی مناسب این مدل‌ها در شبیه‌سازی نشان داده شد. در پژوهش حاضر نشان داده شد که از بین مدل‌های مورد استفاده، مدل روزانه GR1A دارای عملکرد بهتری است.

در مدل‌های روزانه (GR4J)، ماهانه (GR2M)، ضریب  $X_2$ ، ضریب تبادل آب زیرزمینی می‌باشد. در این مدل‌ها این ضریب به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۱/۱۱ بودند، مثبت بودن آن‌ها بیانگر این است که حوضه سیلاخور از حوضه‌های مجاور خود آب دریافت می‌کند و این نتیجه با پژوهش زندگی دره غریبی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. علاوه بر این ضریب  $X_1$  نیز در این مدل‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۷/۰۴ به دست آمد که مثبت بودن این ضریب نشان‌دهنده بارش بالای حوضه، عمق خاک مناسب این حوضه و تخلخل مناسب می‌باشد.



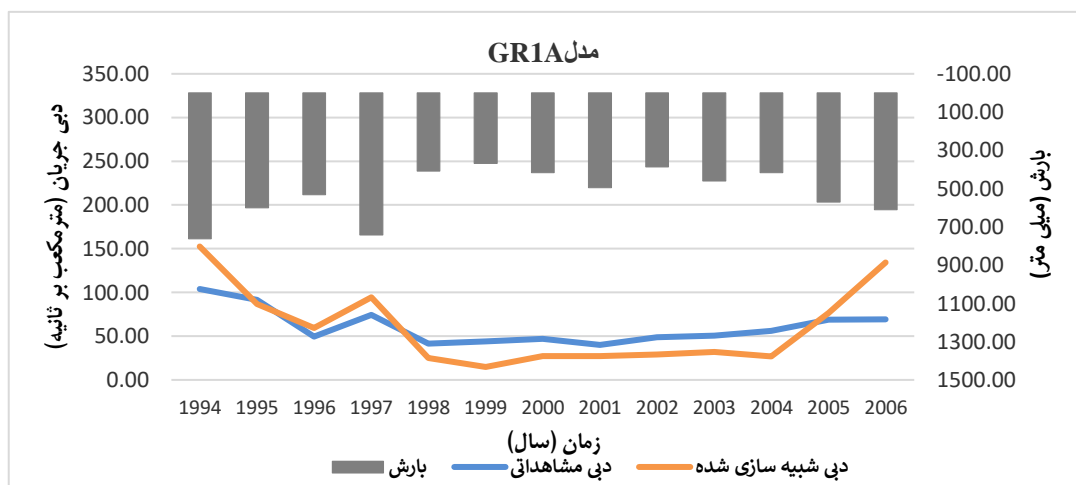
شکل ۹. جریان سالانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی سری زمانی داده‌ها با مدل GR1A

جدول ۶. مقادیر ضریب X و ضریب نش سری داده‌های مدل GR1A

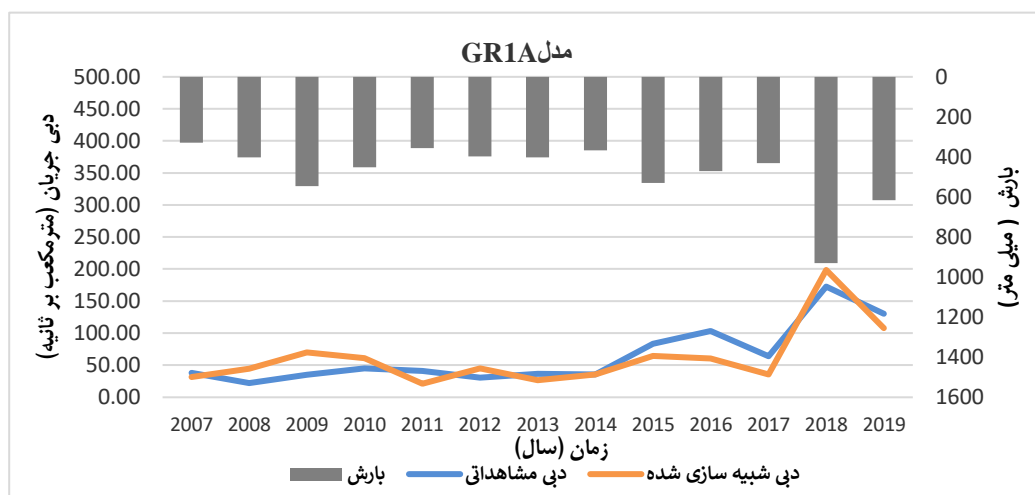
پارامتر	X(mm)	Nash(Q)%	Nash(VQ)%	Nash(LnQ)%	Bais%
مقادیر	۰/۸۵	۸۶/۳	۸۵/۵	۸۴/۲	۱۰۰/۶

جدول ۷. مقادیر ضریب X و ضریب نش سری داده‌های مدل GR1A در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

دوره	X	Nash(Q)%	Nash(VQ)%	Nash(LnQ)%	Bais%
واسنجی	۰/۸۳	۸۶/۱	۸۳/۷	۸۰/۹	۱۰۳/۶
اعتبارسنجی	۰/۷۷	۷۱/۷	۶۱/۴	۴۵/۲	۹۶/۴



شکل ۱۰. جریان سالانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مدل GR1A در مرحله واسنجی



شکل ۱۱. جریان سالانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مدل GR1A در مرحله اعتبارسنجی

جدول ۸. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های GR1A، GR2M و GR4J

مدل	دوره	معیارهای ارزیابی مدل		
		Nash	RMSE	Bias (mm/yr)
GR1A	واسنجی	۸۶/۱	۲۸/۳	-۰/۰۵
	اعتبارسنجی	۷۱/۷	۲۳/۰۸	۲/۷
GR2M	واسنجی	۷۶/۷	۱۱/۸۳	-۳/۲
	اعتبارسنجی	۷۰/۲	۲۸/۷۴	-۶/۶۲
GR4J	واسنجی	۶۱/۴	۳/۹۷	۲/۶۴
	اعتبارسنجی	۸۶/۲	۱۳/۹	۷/۲۲

#### ۴. نتیجه‌گیری

بر اساس تنوع مدل‌های هیدرولوژیکی در دسترس، انتخاب بهترین مدل با کارایی بالا برای شبیه‌سازی جریان در حوزه‌های آبخیز امری دشوار می‌باشد. لذا ضروری است به ارزیابی کارایی مدل‌ها و نتایج آن‌ها به منظور تشخیص قابلیت و محدودیت‌های آن‌ها در حوزه‌های آبخیز و مناطق مورد مطالعه پرداخته شود.

در این پژوهش با استفاده از سه مدل روزانه (GR4J)، ماهانه (GR2M) و سالانه (GR1A) به شبیه‌سازی بارش رواناب حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد پرداخته شد. مدل‌های مذکور از نوع یکپارچه هستند. سری زمانی داده‌های آماری مورد استفاده برای مدل سالانه GR1A از سال ۲۰۱۹-۱۹۹۴ و برای دو مدل روزانه (GR4J)، ماهانه (GR2M) از ۲۰۱۹-۲۰۰۹ می‌باشد. علاوه بر این در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد مدل، در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، از سه معیارها ارزیابی نش-ساتکلیف (Nash)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای کل در حجم جریان (Bias) استفاده شد. نتایج به دست آمده کاملاً معنی‌دار بودند.

در مدل GR4J دوره واسنجی و اعتبارسنجی جریان کمتری را نسبت به دوره مشاهداتی پیش‌بینی کرد، این امر می‌تواند به علت پارامترهای مورد بررسی جهت شبیه‌سازی جریان در مدل GR4J باشد.

مدل سالانه GR1A در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب دارای ضرایب نش  $۸۶/۱$  و  $۷۱/۷$  بودند، لذا این مدل دارای عملکرد خیلی خوب بود. برای دو مدل دیگر یعنی مدل ماهانه GR2M و مدل روزانه GR4J نیز ضرایب نش در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با  $۷۶/۷$ ،  $۷۰/۲$  و  $۶۱/۴$ ،  $۸۶/۲$  بودند که این ضرایب نیز بیانگر عملکرد خیلی خوب این مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد. لیکن با توجه به مطلوب بودن دو معیار ارزیابی دیگر، یعنی RMSE و Bias در مدل روزانه GR4J، این نتیجه حاصل شد که در این پژوهش، مدل روزانه GR1A عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش-رواناب داشت. براساس نتایج به دست آمده و معیارهای ارزیابی، مدل روزانه کارایی بهتری نسبت به مدل ماهانه و نیز مدل کارایی بهتری نسبت به مدل سالانه برای انجام شبیه‌سازی داشت.

در نهایت این نتیجه به دست آمد که با توجه به داده‌های ورودی محدود، صرف هزینه و زمان و اندک برای تهیه آن‌ها و همچنین در دسترس بودن این ورودی‌ها، مدل‌های مفهومی روزانه (GR4J)، ماهانه (GR2M) و سالانه (GR1A) مدل‌های مناسبی برای شبیه‌سازی جریان در حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد استان لرستان بودند. همچنین این مدل‌ها به دلایل مذکور قابلیت استفاده و کاربرد عملی در حوضه‌های بدون آمار را دارند.

محدودیت اصلی انجام این پژوهش در تعداد تکرار سعی و خطا تا رسیدن به نتیجه مطلوب برای پارامترهای مدل بود. پیشنهاد می‌شود که با هدف مدیریت و نیز ارزیابی بهتر منابع آب حوضه، علاوه بر مدل‌های یکپارچه، از روش‌های دیگر نظیر روش‌های ریاضی نیز استفاده گردد و نتایج حاصل از روش‌ها با هم مقایسه گردند. همچنین روش‌های مورد استفاده در این پژوهش، به دلیل محدود بودن تعداد ورودی‌های مدل و نیز در دسترس بودن این ورودی‌ها در اکثر حوضه‌ها، می‌توان در زمینه‌های دیگر همچون اثرات هیدرولوژیکی نوسانات اقلیمی از آن‌ها استفاده کرد.

#### References

- Zarei, M., Ghanbarpour, M.R., Habibnezhad Roshan, M., & Shahedi, K. (2009). Streamflow Simulation Using IHACRES Rainfall-Runoff Model (Case Study: Kasilian Catchment). *Jwmseir*, 3 (8): 11-20. URL: <http://jwmsei.ir/article-1-115-fa.html>. (In Persian)
- Zandi Dareh Gharibi, F., Khorsandi Kouhanestani, Z., Mozayan, M., & Arman, N. (2017). Technical Note: Evaluating the proficiency of GR2M and GR4J rainfall-runoff models in Darehtakht Basin runoff simulation. *Jwem*, 9(3), 360-370. doi: 10.22092/ijwms.2017.112377. (In Persian)

- Amiri, A., Baharvand, S., & Rad, M. (2023). Evaluating the effectiveness of MISDC and GR4J rainfall-runoff models in simulating the daily discharge of ChamAnjir Khorramabad watershed. *Integrated Watershed Management*, 3(3), 84-94. doi: 10.22034/iwm.2023.2009002.1098. (In Persian)
- Teimouri, M., & Alvandi, E. (2021). Rainfall-Runoff Modeling Using the eWater Source in the Chel-Chay Watershed, the Province of Golestan. *Watershed Management Research Journal*, 34(1), 16-29. doi: 10.22092/wmej.2020.342744.1334. (In Persian)
- Mostafazadeh, R., & Asgari, E. (2021). Performance assessment of GR4J rainfall-runoff model in daily flow simulation of Nirchai Watershed, Ardabil province. *Irrigation and Water Engineering*, 11(3), 79-95. doi: 10.22125/iwe.2021.128114. (In Persian)
- Adnan, R. M., Petroselli, A., Heddad, S., Santos, C. A. G., & Kisi, O. (2021). Short term rainfall-runoff modelling using several machine learning methods and a conceptual event-based model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(3), 597-616.
- Alizadeh A, Rajabi A, Shabanlou S, Yaghoubi B, & Yosefvand F. (2021). Modeling longterm rainfall-runoff time series through wavelet-weighted regularization extreme learning machine. *Earth Sci Inf*, 14(2):1047–63.
- Alizadeh, A., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yaghoubi, B., & Yosefvand, F. (2021). Modeling long-term rainfall-runoff time series through wavelet-weighted regularization extreme learning machine. *Earth Science Informatics*, 14, 1047-1063.
- Bachir, S., Nouar, B., Hicham, C., Azzedine, H., & Larbi, D. (2015). Application of GR2M for rainfall-runoff modeling in Kébir Rhumel Watershed, north east of Algeria. *World applied sciences journal*, 33(10), 1623-1630.
- Bergström, S., & Lindström, G. (2015). Interpretation of runoff processes in hydrological modelling—experience from the HBV approach. *Hydrological Processes*, 29(16), 3535-3545.
- Bergström, S. (1992). The HBV model—its structure and its applications. *SMHI RH*, (4).
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1976). Towards a simple, physically-based, variable contributing area model of catchment hydrology. University of Leeds.
- Bouguerra, S. A., & Mansour, B. (2023). Rainfall-flow Modeling Using a Global Conceptual Model: Case of the Beni Bahdel Watershed (Northwest of Algeria). *Journal of Water Management Modeling*.
- Boulariah, O., Longobardi, A., & Meddi, M. (2017). Statistical comparison of nonlinear rainfall-runoff models for simulation in Africa North-West semi-arid areas. In *Proceedings of the 15th International Conference on Environment Science and Technology, Rhodes, Greece* (Vol. 31).
- Chang, T. K., Talei, A., Chua, L. H., & Alaghmand, S. (2018). The impact of training data sequence on the performance of neuro-fuzzy rainfall-runoff models with online learning. *Water*, 11(1), 52.
- Chen, Y., Ren, Q., Huang, F., Xu, H., & Cluckie, I. (2011). Liuxihe model and its modeling to river basin flood. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(1), 33-50.
- Croke, B., Andrew, F., Spate, J., & Cuddy. (2005). S. www.toolkit.net.au/ihacres.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007.
- Dezetter, A., Girard, S., Paturel, J. E., Mahé, G., Ardoin-Bardin, S., & Servat, E. (2008). Simulation of runoff in West Africa: Is there a single data-model combination that produces the best simulation results? *Journal of Hydrology*, 354(1-4), 203-212.
- Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Binnui, F., Khwanchum, L., Kuriqi, A., ... & Pham, Q. B. (2021). Performance evaluation of a two-parameters monthly rainfall-runoff model in the Southern Basin of Thailand. *Water*, 13(9), 1226.
- Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Weekaew, J., Tran, T. T., & Pham, Q. B. (2023). Comparative study of machine learning methods and GR2M model for monthly runoff prediction. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(4), 101941.
- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., Abdelbaki, A. M., & Haggag, M. (2019). A new Budyko framework extension using time series SARIMAX model. *Journal of hydrology*, 570, 827-838.
- Flores, N., Rodríguez, R., Yépez, S., Osoreo, V., Rau, P., Rivera, D., & Balocchi, F. (2021). Comparison of three daily rainfall-runoff hydrological models using four evapotranspiration models in four small forested watersheds with different land cover in South-Central Chile. *Water*, 13(22), 3191.
- Ha, S., Liu, D., & Mu, L. (2021). Prediction of Yangtze River streamflow based on deep learning neural network with El Niño–Southern Oscillation. *Scientific reports*, 11(1), 11738.
- Hadour, A., Mahé, G., & Meddi, M. (2020). Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100671.



- Henriksen, H. J., Trolborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T. O., Refsgaard, J. C., & Madsen, B. (2003). Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280(1-4), 52-71.
- Herath, H. M. V. V., Chadalawada, J., & Babovic, V. (2021). Hydrologically informed machine learning for rainfall-runoff modelling: towards distributed modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(8), 4373-4401.
- Hu, C., Wu, Q., Li, H., Jian, S., Li, N., & Lou, Z. (2018). Deep learning with a long short-term memory networks approach for rainfall-runoff simulation. *Water*, 10(11), 1543.
- Huo, W., Li, Z., Wang, J., Yao, C., Zhang, K., & Huang, Y. (2019). Multiple hydrological models' comparison and an improved Bayesian model averaging approach for ensemble prediction over semi-humid regions. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 33, 217-238.
- Jaiswal, R. K., Ali, S., & Bharti, B. (2020). Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Applied water science*, 10, 1-14.
- Kabouya, M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale (Doctoral dissertation, Paris 11).
- Kratzert, F., Klotz, D., Shalev, G., Nevo, S., Klambauer, G., Nearing, G., & Hochreiter, S. (2020). Towards deep learning-based flood forecasting for ungauged basins (No. EGU2020-8932). Copernicus Meetings.
- Lee, H., McIntyre, N., Wheeler, H., & Young, A. (2005). Selection of conceptual models for regionalisation of the rainfall-runoff relationship. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 125-147.
- Li, Z. J., & Zhang, K. (2008). Comparison of three GIS-based hydrological models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(5), 364-370.
- Liu, Y., Zhang, K., Li, Z., Liu, Z., Wang, J., & Huang, P. (2020). A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology*, 590, 125440.
- Lyon, S. W., King, K., Polpanich, O. U., & Lacombe, G. (2017). Assessing hydrologic changes across the Lower Mekong Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 303-314.
- Makhlouf, Z., & Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162(3-4), 299-318.
- 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.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 200-214.
- Mouelhi, S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier (Doctoral dissertation, ENGREF Paris).
- Nounangnonhou, T. C., Fifatin, F., Lokonon, B. E., Acakpovi, A., & Sanya, E. A. (2018). Modelling and prediction of Ouémé (Bénin) river flows by 2040 based on GR2M approach.
- O'Connor, P., Murphy, C., Matthews, T., & Wilby, R. L. (2021). Reconstructed Monthly River flows for Irish catchments 1766–2016. *Geoscience Data Journal*, 8(1), 34-54.
- Okkan, U., & Fistikoglu, O. (2014). Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and applied climatology*, 117, 343-361.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Rintis, H., Suyanto, & Setyoasri, Y. P. (2016). Rainfall-discharge simulation in Bah Bolon Catchment area by Mock method, NRECA method, and GR2M method. *Applied Mechanics and Materials*, 845, 24-29.
- Rwasoka, D. T., Madamombe, C. E., Gumindoga, W., & Kabobah, A. T. (2014). Calibration, validation, parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2-parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 67, 36-46.
- Schaefli, B., & Gupta, H. V. (2007). Do Nash values have value? *Hydrological processes*, 21, 2075-2080.
- Song, X. M., Kong, F. Z., Zhan, C. S., & Han, J. W. (2012). Hybrid optimization rainfall-runoff simulation based on Xinanjiang model and artificial neural network. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1033-1041.

- Sugawara, M. (1974). Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River, and Nam Mune. *Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention, 12*, 1-64.
- Swain, J. B., & Patra, K. C. (2017). Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *Journal of Hydrology, 554*, 420-433.
- Todini, E. (1996). The ARNO rainfall—runoff model. *Journal of hydrology, 175*(1-4), 339-382.
- Topalović, Ž., Todorović, A., & Plavšić, J. (2020). Evaluating the transferability of monthly water balance models under changing climate conditions. *Hydrological Sciences Journal, 65*(6), 928-950.
- Venkatesan, E., & Mahindrakar, A. B. (2019). Forecasting floods using extreme gradient boosting-a new approach. *International Journal of Civil Engineering and Technology, 10*(2), 1336-1346.
- Wang, W. C., Chau, K. W., Cheng, C. T., & Qiu, L. (2009). A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. *Journal of hydrology, 374*(3-4), 294-306.
- Zamoum, S., & Souag-Gamane, D. (2019). Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters. *Arabian Journal of Geosciences, 12*, 1-14.
- Zhao, R. J., & Liu, X. R. (1995). The Xinanjiang model. *Computer models of watershed hydrology.*, 215-232.