



The HEC-HMS hydrological model performance in the rainfall-runoff process simulation for the upstream watersheds of Gonbad, Iran

Shahnaz Mirzaei¹ | Amir Sadoddin^{2*} | Abdolreza Bahremand³ | Majid Ownegh⁴ | Raof Mostafazadeh⁵

1. Watershed Management Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran. Email: mirzaeishahnaz@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran. Email: amir.sadoddin@gmail.com
3. Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran. Email: bahremand@gau.ac.ir
4. Department of Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Iran. Email: prof.majidownegh@gmail.com
5. Department of Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. Email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received May 12, 2023
Revised June 12, 2023
Accepted July 18, 2023
Published online 12 December 2023

Keywords:
Hydrological impacts,
Flood hazard,
The Muskingum-Cunge flood routing method,
HEC-HMS,
The Arazkuseh Watershed.

ABSTRACT

Large flood events occurrence such as the 18 March 2019 flood event in the city of Gonbad in Golestan Province has been often associated with socioeconomic and ecologic damages. The aim of this research is to simulate flood hydrograph using the HEC-HMS hydrological model and to evaluate model performance at the Arazkuseh Watershed outlet, located in the vicinity of Gonbad, and also for the upstream tributaries namely the Minodasht and the Nodeh Khandooz Watersheds. The HEC-HMS model was run by applying the SCS-Curve Number, the SCS-Unit Hydrograph, and the Muskingum-Cunge methods. The parameters of CN, initial abstraction, lag time, and the Manning's roughness coefficient were calibrated for the river gauge stations. The averaged calibrated parameters were used to validate the model at the gauge stations. The sensitivity analysis indicates that CN has the greatest influence on the model performance. The shapes of the simulated hydrographs in the validation stage show that the model underestimates the peak flows for the Arazkuseh Station. Whereas, the statistical indices of NSE, R2 and KGE for the validated hydrographs at the Arazkuseh Station were 0.81, 0.89 and 0.67, for the Nodeh Station were 0.85, 0.91 and 0.74, and for the Lazoreh Station identified as 0.62, 0.72 and 0.61, respectively. The analysis indicates the acceptable performance of the model. Considering the performance of the HEC-HMS model for the Arazkuseh Watershed and its upstream tributaries, the model can be used to predict the hydrological impacts of applying flood risk reduction scenarios in the upstream watersheds of Gonbad.

Cite this article: Mirzaei, Sh.; Sadoddin, A.; Bahremand, A.; Ownegh, M. & Mostafazadeh, R.. (2023). The HEC-HMS hydrological model performance in the rainfall-runoff process simulation for the upstream watersheds of Gonbad, Iran. *ECO HYDROLOGY*.10 (3), 355-377. Doi: doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734



© Shahnaz Mirzaei, Amir Sadoddin, Abdolreza Bahremand, Majid Ownegh, Raof Mostafazadeh.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734>



کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در آبخیزهای بالادست شهر گنبد

شهناز میرزایی^۱ | امیر سعدالدین^{۲*} | عبدالرضا بهره‌مند^۳ | مجید اونق^۴ | رئوف مصطفی‌زاده^۵

۱. علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. رایانامه: mirzaeishahnaz@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. رایانامه: amir.sadoddin@gmail.com
۳. گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. رایانامه: bahremand@gau.ac.ir
۴. گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. رایانامه: prof.majidownegh@gmail.com
۵. گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی. رایانامه: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

کلیدواژه:

اثرات هیدرولوژیکی،
خطر سیل،
روش روندیابی سیل ماسکینگام کانتر،
HEC-HMS
آبخیز ارازکوسه.

وقوع رخدادهای سیل بزرگ مانند سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ در شهر گنبد به طور معمول با خسارت‌های اجتماعی-اقتصادی و اکولوژیکی همراه است. هدف پژوهش حاضر، شبیه‌سازی جریان سیل با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و ارزیابی عملکرد آن در خروجی آبخیز ارازکوسه مشرف به شهر گنبد و زیرحوضه‌های بالادست آن (آبخیزهای مینودشت و نوده خاندوز) است. مدل HEC-HMS با روش‌های شماره‌گذاری منحنی SCS، هیدروگراف واحد SCS و ماسکینگام کانتر اجرا شد. پارامترهای شماره‌گذاری منحنی، تلفات اولیه، زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ برای ایستگاه‌های ارازکوسه، لزوره و نوده واسنجی شد. سپس، از میانگین پارامترهای واسنجی‌شده، برای اعتبارسنجی مدل در ایستگاه‌های مورد بررسی استفاده شد. نتایج آزمون حساسیت پارامترهای ورودی نشان می‌دهد پارامتر شماره‌گذاری منحنی بیشترین تأثیر را روی عملکرد مدل دارد. شکل هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده در مرحله اعتبارسنجی نشان می‌دهد مدل در برآورد مؤلفه دبی اوج برای ایستگاه ارازکوسه دارای کم‌تخمینی است. در حالی که شاخص‌های آماری NSE، R^2 و KGE برای رویدادهای اعتبارسنجی برای ایستگاه ارازکوسه به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۸۹ و ۰/۶۷، برای ایستگاه نوده به ترتیب برابر با ۰/۸۵، ۰/۹۱ و ۰/۷۴ و برای ایستگاه لزوره به ترتیب برابر با ۰/۶۲، ۰/۷۲ و ۰/۶۱ به دست آمد که عملکرد قابل قبول مدل را نشان می‌دهد. با توجه به عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان برای آبخیز ارازکوسه و آبخیزهای بالادست آن (مینودشت و نوده خاندوز)، می‌توان از مدل برای پیش‌بینی اثرات هیدرولوژیکی اعمال سناریوهای مختلف کاهش ریسک سیل در آبخیزهای بالادست شهر گنبد استفاده کرد.

استناد: میرزایی، شهناز؛ سعدالدین، امیر؛ بهره‌مند، عبدالرضا؛ اونق، مجید و مصطفی‌زاده، رئوف (۱۴۰۲). کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در آبخیزهای بالادست شهر گنبد. *آکو هیدرولوژی*، ۱۰ (۳) ۳۵۵-۳۷۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734>

© شهناز میرزایی، امیر سعدالدین، عبدالرضا بهره‌مند، مجید اونق، رئوف مصطفی‌زاده. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734>



مقدمه

بزرگی و فراوانی رخداد‌های سیل بزرگ در کل جهان طی تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، شهرسازی و سایر فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی نسبت به دهه‌های قبل افزایش یافته است [۱ و ۲]. تغییرات اقلیمی موجب بروز بارش‌های شدید و در نتیجه، سیل در حوضه‌های رودخانه‌ای می‌شود که علاوه بر تغییر مورفولوژی و جریان رودخانه، خسارت‌های جانی و اقتصادی فراوانی را نیز به همراه دارد [۳ و ۴]. از طرفی، شهرسازی موجب افزایش ریسک سیل از طریق افزایش دبی اوج، حجم سیل و کاهش زمان تا اوج می‌شود و در حوضه‌های شهری حدود ۹۰ درصد بارش به صورت رواناب جاری می‌شود [۵]. بنابراین، نیازمند تعریف روش مناسب برای پیش‌بینی سیل‌های بزرگ در مناطق در معرض سیل است [۱]. با توجه به پیامدهای منفی رخداد سیل در دشت‌های سیلابی، برنامه‌ریزی‌ها باید در راستای کاهش خسارت‌های سیل از طریق مدیریت مناسب منابع آبی باشد [۲ و ۶]. نقشه خطر سیل، به تصمیم‌گیران در تعیین مناطق پرخطر و آزمون اثرات توسعه در منطقه کمک می‌کند تا ضمن به‌روزرسانی طرح‌های مناسب برای مدیریت ریسک سیل، با کاهش اثرات مخرب سیل، تلفات جانی و خسارت‌های مالی را محدود کنند [۱].

یک آبخیز، یک واحد هیدرولوژیکی است که ترکیبی از تپه‌های شیب‌دار و شبکه آبراهه است که باران را از ارتفاعات جمع‌آوری و داخل یک رودخانه اصلی (خروجی) زهکش می‌کند. از این‌رو، یک محیط مدل‌سازی ایده‌آل ایجاد می‌کند که دارای ورودی مشخص (باران) و خروجی مشخص (رواناب) است [۷]. درک و کمی‌سازی فرایند هیدرولوژیکی و مؤلفه‌های آن در مدیریت منابع آبی ضرورت دارد و هر گونه تغییر در منابع آب، محیط و سیستم مانند تغییر کاربری و اقلیم در نهایت در چرخه هیدرولوژیکی اثرات خود را نشان می‌دهد [۸ و ۹]. مدل‌سازی هیدرولوژیکی ابزاری برای تخمین پاسخ هیدرولوژیکی حوضه طی بارش است [۱۰ و ۱۱]. مدل‌های هیدرولوژیکی مؤلفه اصلی تحلیل، برآورد و پیش‌بینی‌های مباحث هیدرولوژیکی هستند که در برنامه‌ریزی و طراحی پروژه‌های مدیریتی نقش مهمی دارند [۷ و ۱۲]. پاسخ رواناب آبخیز به ویژگی‌های مختلف هیدرولوژیکی بستگی دارد. در دسترس بودن داده‌ها، هدف از مدل‌سازی و سطح دقت قابل قبول نقش مهمی را در مدل‌سازی فرایند هیدرولوژیکی ایفا می‌کند [۱۳]. از طرفی، اندازه‌گیری همه پارامترهای مؤثر بر فرایند رواناب آبخیز غیرممکن است. بنابراین، انتخاب مدلی مناسب با ساختار ساده، داده‌های ورودی مورد نیاز کم و با دقت مناسب یک رویکرد مهم در شبیه‌سازی است [۱۴ و ۱۵].

غنچه‌پور و همکاران (۲۰۲۱) به منظور انتخاب مدل مناسب بر اساس هدف مدل‌سازی هیدرولوژیکی، الگوی سه‌مرحله‌ای را ارائه دادند. در مرحله اول این الگو، مدل‌ها بر اساس هدف مدل‌سازی در دسته‌بندی‌های یکپارچه/توزیعی، تجربی/فیزیکی/مبنا، رویداد محور/پیوسته، قطعی/تصادفی و جعبه سیاه/جعبه سفید قرار می‌گیرند. در مرحله دوم، مدل‌های هر دسته بر اساس فرایند مدل‌سازی و عملکرد با هم مقایسه می‌شوند. در ارزیابی عملکرد مدل در این مرحله دو رویکرد ارزیابی سطحی (بر اساس هیدروگراف شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی) و عمقی (شناسایی فرایند هیدرولوژیکی ارائه‌شده در مدل و نحوه ارتباط بین آن‌ها) لحاظ می‌شود. در مرحله سوم این الگو، انتخاب مدل بر اساس معیارهای مربوط به مدل از جمله داده‌های مورد نیاز، کاربر مدل و منطقه مطالعاتی انجام می‌شود [۱۶].

مدل‌های فیزیک‌مبنا مبتنی بر فرایند می‌توانند با ادغام تنوع منطقه‌ای در حوضه، یک سیستم هیدرولوژی واقعی را مدل‌سازی کنند [۲]. مدل HEC-HMS، یک مدل فیزیک‌مبنا نیمه‌توزیعی است که برای شبیه‌سازی فرایند کامل هیدرولوژیکی در سیستم‌های آبخیز منشعب طراحی شده است [۱۷]. مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، توسط بخش مهندسی ارتش ایالات متحده^۲ ارائه شده که در شبیه‌سازی جریان (پیوسته و رویدادمحور) در بسیاری از مناطق جهان استفاده شده است [۱۲ و ۱۸]. این مدل با در نظر داشتن پارامترهای فیزیکی مؤثر بر آبخیز مانند اقلیم، کاربری اراضی، خاک و توپوگرافی که ارائه‌دهنده شرایط مرزی مورد نیاز برای شبیه‌سازی رواناب است، شبیه‌سازی رواناب را انجام می‌دهد [۱۹]. در مدل HEC-HMS، عناصر هیدرولوژیکی به صورت شبکه برای شبیه‌سازی رواناب به هم متصل شده و محاسبات از عناصر بالادست به پایین‌دست است [۴ و ۲۰]. این مدل برای حوضه‌های رودخانه‌ای بزرگ تا آبخیزهای کوچک کاربرد دارد و هیدروگراف خروجی آن به طور مستقیم یا در ارتباط با سایر

نرم افزارها در مطالعات آب، زهکش شهری، پیش بینی سیل، اثرات گسترش شهری آینده، طراحی مخازن، کاهش خسارت سیل، مدیریت دشت سیلابی و عملکرد سیستم آبخیز مورد استفاده است [۵ و ۱۷]. این مدل مکانیسم‌های مختلفی را برای شبیه‌سازی در نظر دارد که انتخاب هر روش با توجه به مجموعه داده‌های مورد نیاز مدل انجام می‌شود [۲۱]. مدل HEC-HMS پارامترهای به نسبت محدودی داشته و با GIS در ارتباط است و توزیع مکانی پارامترهای ورودی را در نظر دارد [۱۲ و ۲۲].

مدل HEC-HMS در برآورد تلفات و رواناب، روندیابی رواناب در حوضه آبخیز، روندیابی رودخانه و برآورد سایر فرایندهای هیدرولوژیکی از روش‌های مختلفی استفاده می‌کند که استفاده از این روش‌ها برای مناطق مختلف نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی دارد [۱۰]. اجرای مدل با داده‌های بارش- رواناب با کیفیت و تعداد مناسب در نتایج شبیه‌سازی می‌تواند اثر مستقیم داشته باشد [۲۱ و ۲۳]. ارزیابی عملکرد مدل با واسنجی پارامترهای چند رویداد بارش- رواناب نتیجه بهتری نسبت به واسنجی پارامترهای یک رویداد دارد [۲۱]. از طرفی، پارامترهای واسنجی شده برای هر رویداد با رویداد دیگر متفاوت است و تغییرات آن از الگوی مشابهی پیروی نمی‌کند. بنابراین، نمی‌توان با قطعیت یک مجموعه پارامتر بهینه را برای مدل در آبخیز مورد مطالعه ارائه داد [۲۴]. با این حال در مدل‌سازی و شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، واسنجی پارامترهای ورودی برای بهبود عملکرد اعتبارسنجی مدل مورد نیاز است [۲۱].

مطالعات متعددی در راستای شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و واسنجی پارامترهای آن انجام شده است. در خارج از کشور، عبدصمد و عبدرضاک (۲۰۱۹)، در پهنه‌بندی سیل با دوره‌بازگشت‌های مختلف در آبخیز شهری عین‌صفراء الجزایر از مدل HEC-HMS و HEC-RAS^۱ استفاده کردند. آن‌ها برای مدل HEC-HMS، از روش شماره منحنی سازمان حفاظت خاک (SCS-CN)^۲، و هیدروگراف واحد سازمان حفاظت خاک (SCS-UH)^۳ به ترتیب برای برآورد تلفات و روندیابی حوضه آبخیز استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل HEC-HMS (معیار کارایی نش- ساتکلیف^۴ (NSE) برابر با ۰/۹۵) در شبیه‌سازی رواناب است [۱]. چنگ و همکاران (۲۰۲۱) کاربرد مدل HEC-HMS را در آبخیزهای کوچک فاقد آمار لوآنچان، گاوچنگ و ژباهکان با استفاده از پارامترهای منطقه‌ای شده برای آبخیز ژونگتان ارزیابی کردند. آن‌ها در برآورد تلفات، روندیابی حوضه آبخیز و روندیابی رودخانه به ترتیب از روش‌های SCS-CN، SCS-UH و ماسکینگام^۵ استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد مدل در شبیه‌سازی فرایند بارش رواناب آبخیزهای کوچک در مناطق تپه‌ای با استفاده از پارامترهای منطقه‌ای کاربرد مناسبی دارد [۱۲]. در یک آبخیز روستایی در تایوان، چیانگ و همکاران (۲۰۲۲) کاربرد مدل HEC-HMS و SVR^۶ را بر اساس ۱۳ رویداد بارش- رواناب مقایسه و ارزیابی کردند. آن‌ها در اعتبارسنجی مدل HEC-HMS از دو نوع روش واسنجی پارامترها (پارامترهای واسنجی شده توسط SVR و میانگین پارامترهای واسنجی شده رویدادها) استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب هر دو مدل در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب است [۲۱]. در شبیه‌سازی رویداد بزرگ بارش- رواناب در آبخیز Irawan فیلیپین، کاکل و همکاران (۲۰۲۳) از مدل HEC-HMS استفاده کردند. آن‌ها در برآورد تلفات، روندیابی حوضه آبخیز و روندیابی رودخانه به ترتیب از روش‌های SCS-CN، هیدروگراف واحد کلارک و ماسکینگام استفاده کردند. نتایج معیار NSE و درصد اریبی^۷ (PBIAS) برای تک‌رویداد شبیه‌سازی به ترتیب برابر با ۰/۹۸ و -۰/۰۶۱۱ برآورد شد [۱۳].

در ایران نیز کمالی و همکاران (۲۰۱۳) در واسنجی خودکار مدل HEC-HMS در آبخیز تمر حوضه گرگانرود، از دو الگوریتم تک و چند تابع هدف (توابع شامل ریشه وزنی میانگین مربعات خطا^۸، درصد خطای دیبی اوج^۹، درصد خطا در حجم سیل و ضریب همبستگی^{۱۰}) برای چهار رویداد بارش- رواناب استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد انتخاب یک یا دو تابع هدف مناسب

1. Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
2. Soil Conservation Service Curve Number
3. Soil Conservation Service Unit Hydrograph
4. Nash-Sutcliffe Efficiency
5. Muskingum
6. Support Vector Regression
7. Percent Bias
8. Weighted Root Mean Squared Error
9. Percentage Error of Peak Flow
10. Correlation Coefficient

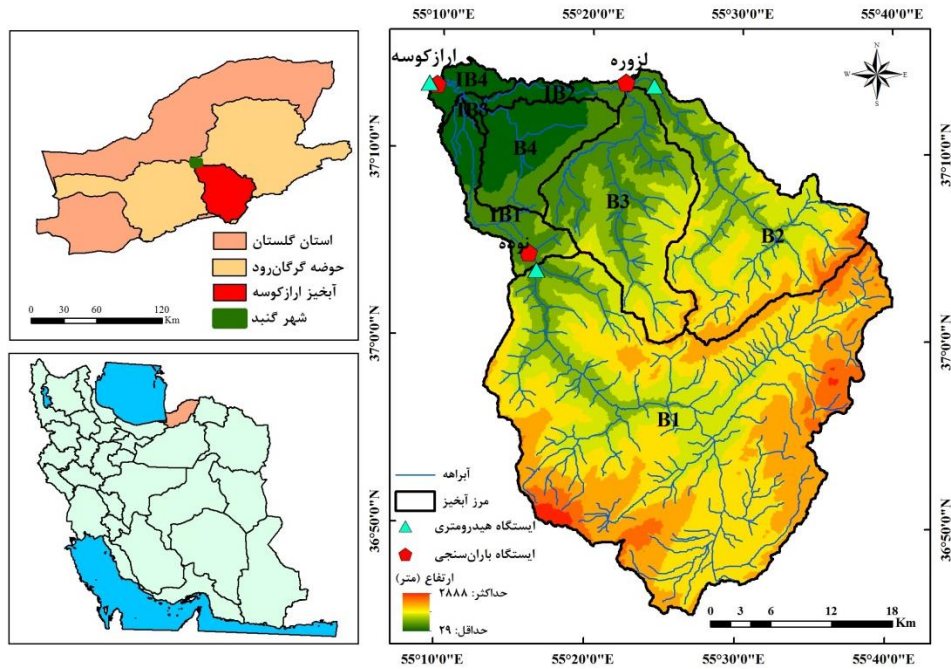
ممکن است عملکرد مناسب‌تری نسبت به ترکیب چند تابع هدف داشته باشد [۲۳]. گرمه‌ای و همکاران (۱۳۹۴) در واسنجی خودکار مدل HEC-HMS با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ (PSO) در حوضه سد کارده استان خراسان رضوی برای چهار رویداد بارش- رواناب، از روش SCS-CN، هیدروگراف واحد کلارک^۲ و ماسکینگام به‌ترتیب برای محاسبه تلفات، روندیابی حوضه آبخیز و روندیابی رودخانه استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد مدل در مرحله اعتبارسنجی برای یک رویداد، بر اساس پارامترهای واسنجی عملکرد مناسبی نداشت [۲۴]. در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان برای حوضه عموقین استان اردبیل با استفاده از مدل HEC-HMS، میرزایی و همکاران (۱۳۹۷) ارتباط مؤلفه‌های هیدروگراف را با سنج‌های سیمای سرزمین بررسی کردند. آن‌ها از شش رویداد برای واسنجی و سه رویداد برای اعتبارسنجی استفاده کردند و میانگین معیار NSE در مرحله اعتبارسنجی ۰/۶۳ برآورد شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد دبی اوج هیدروگراف با سنج سطح سیما، تراکم لکه و شیب آبخیز رابطه مستقیم دارد [۲۵]. حیدری چناری و همکاران (۱۴۰۱) در واسنجی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای آبخیز تجن استان مازندران، برای سه رویداد بارش- رواناب در بخش تلفات از روش SCS-CN و در بخش روندیابی رواناب در حوضه آبخیز از روش SCS-UH استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که نتایج مدل ابتدا نسبت به پارامتر شماره منحنی و سپس نسبت به تلفات اولیه بیشترین حساسیت را برای منطقه مورد مطالعه دارد [۲۶]. در تعیین حد بستر رودخانه ارداک استان خراسان رضوی، میرقاسمی و همکاران (۱۴۰۲) از تلفیق مدل HEC-HMS و HEC-RAS استفاده کردند. آن‌ها در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از مدل HEC-HMS از روش SCS-CN برای تلفات و ماسکینگام برای روندیابی رودخانه استفاده کردند. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای پنج رویداد بارش- رواناب نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل (معیار NSE بالای ۰/۷۵) بوده است [۲۷].

مطالعات انجام‌شده در رابطه با آمار خسارت‌های سیل در نتیجه بارش‌های ۱۳۹۷/۱۲/۲۷ تا ۱۳۹۸/۰۱/۰۲ نشان داد در استان گلستان از جمله شهر گنبد خسارت اقتصادی زیادی وارد شده که موجب نگرانی در مناطق سیل‌خیز شده است [۲۸]. در بالادست آبخیز آرازکوسه، دو حوضه سیل‌خیز مینودشت و نوده خاندوز واقع شده‌اند که رواناب ناشی از نواحی کوهستانی بالادست را زهکش می‌کنند و در پایین‌دست وارد رودخانه آرازکوسه می‌شوند و در نتیجه، احتمال وقوع سیل در محدوده شهر گنبد و بروز خسارت‌ها و تلفات را افزایش می‌دهند. بنابراین مطالعات مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان سیل در مناطق سیل‌خیز می‌تواند با فراهم کردن خصوصیات هیدروگراف سیل برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان در اتخاذ برنامه‌های پیشگیری و آمادگی کمک کند. در این راستا ضروری است مدل‌های مورد استفاده برای منطقه واسنجی و اعتبارسنجی شود تا نتایج قابل اعتمادی را در اختیار قرار دهد. از این‌رو هدف پژوهش حاضر، شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای آبخیز سیل‌خیز آرازکوسه و ارزیابی عملکرد آن با سه ایستگاه موجود در منطقه (ایستگاه آرازکوسه در خروجی آبخیز، ایستگاه لزوره در خروجی حوضه بالادست مینودشت و ایستگاه نوده در خروجی حوضه بالادست نوده خاندوز) است.

مواد و روش

معرفی منطقه مطالعاتی

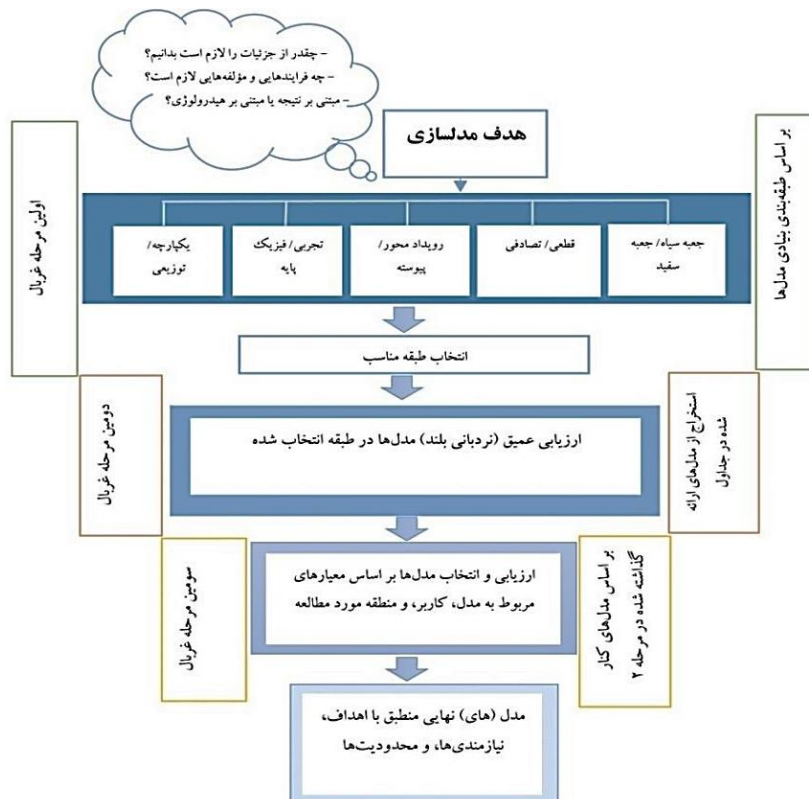
آبخیز آرازکوسه بخشی از حوضه اصلی و مهم حوضه گرگان‌رود است که با مساحتی حدود ۱۵۴ هزار هکتار در محدوده جغرافیایی ۵۵° ۰۹' تا ۵۵° ۴۰' طول شرقی و ۳۶° ۴۵' تا ۳۷° ۱۵' عرض شمالی در استان گلستان قرار دارد. این حوضه از جنوب به حوضه شاهرود و از شمال، شرق و غرب به بخشی از حوضه بزرگ گرگان‌رود محدود می‌شود و از لحاظ تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان‌های آزادشهر، مینودشت و گنبد قرار گرفته است. شاخه‌های رودخانه‌های چهل‌چای، نرماب و خرمالو در پایین‌دست به هم می‌پیوندند و وارد رودخانه آرازکوسه می‌شود. بر اساس نقشه ارتفاع تهیه‌شده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری، کمترین و بیشترین ارتفاع منطقه به‌ترتیب برابر ۲۹ و ۲۸۸۸ متر به دست آمد. کاربری اراضی غالب در این حوضه براساس نقشه طبقه‌بندی‌شده سال ۲۰۲۰ تصاویر ماهواره لندست، به‌ترتیب کاربری‌های مرتع، جنگل و کشاورزی با حدود ۳۷، ۳۶ و ۲۳ درصد است. شکل ۱ موقعیت آبخیز آرازکوسه در استان گلستان را ارائه می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت آبخیز آرازکوسه در استان گلستان

فرایند انتخاب مدل

در پژوهش حاضر، انتخاب مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS به منظور شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در آبخیز آرازکوسه و ارزیابی عملکرد آن، بر اساس چارچوب ارائه‌شده توسط غنچه‌پور و همکاران (۲۰۲۱) صورت گرفت که در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. چارچوب انتخاب مدل هیدرولوژیکی مناسب

(منبع: غنچه‌پور و همکاران، ۲۰۲۱)

روش پژوهشی

مدل HEC-HMS یکی از ابزارهای پرکاربرد شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در سراسر جهان است که برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی سیستم حوضه‌های آبخیز مبتنی بر شبیه‌سازی رویداد و پیوسته طراحی شده است [۲۱]. به منظور انجام فرایند شبیه‌سازی جریان، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر و موقعیت ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه در خروجی، مرز هیدرولوژیکی آبخیز ارازکوسه و واحدهای هیدرولوژیکی آن بر اساس جریان‌های اصلی تعیین شد [۲۱]. بر این اساس، آبخیز ارازکوسه به هشت زیرحوضه تقسیم شد که خصوصیات فیزیوگرافی هر یک در محیط ArcGIS استخراج شد. سه آبخیز مهم نوده خاندوز (B1)، مینودشت (B2) و نرماب (B3) به عنوان زیرحوضه در بالادست آبخیز ارازکوسه واقع شدند. خصوصیات فیزیوگرافی واحدهای هیدرولوژیکی آبخیز ارازکوسه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیوگرافی واحدهای هیدرولوژیکی آبخیز ارازکوسه

ضریب شکل هورتون	نسب متوسط وزنی (%)	ارتفاع متوسط (متر)	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	مساحت (کیلومتر مربع)	زیرحوضه
۰/۷۸	۲۹/۶۵	۱۵۰۸/۳۵	۵۶/۲۴	۸۵۱/۵۶	B1
۰/۳۸	۴۰/۰۸	۱۱۶۳/۳۸	۳۹/۹۴	۲۶۰/۷۲	B2
۰/۳۴	۳۳/۲۵	۷۱۹/۹۵	۳۰/۶۶	۲۱۲/۲۰	B3
۰/۶۶	۸/۳۱	۱۲۶/۵۳	۱۶/۲۵	۹۸/۱۱	B4
۰/۱۹	۱۳/۴۶	۲۴۵/۳۴	۲۹/۵۴	۶۴/۴۹	IB1
۰/۱۳	۳/۳۲	۸۷/۲۶	۲۳/۳۴	۲۶/۷۹	IB2
۰/۲۵	۱/۷۸	۴۶/۳۴	۴/۲۳	۴/۸۰	IB3
۰/۳۲	۱/۴۹	۴۲/۰۷	۶/۸۱	۲۳/۶۹	IB4
۰/۴۵	۲۸/۹	۱۱۴۹/۱	۹۲/۵۹	۱۵۴۲/۳۵	کل حوضه

سه مؤلفه اساسی این مدل شامل مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصه‌های کنترل است. این مدل قابلیت واسنجی پارامترها را دارد و پس از اعتباریابی می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان و پیش‌بینی اثر تغییر پارامترها به کار رود [۲۹].

الف) مؤلفه مدل حوضه

خواص فیزیکی حوضه آبخیز، زیرحوضه‌ها، رودخانه‌ها و تأسیسات وابسته به آن‌ها در مدل حوضه به نرم‌افزار معرفی می‌شود و محاسبات مربوط به تعیین میزان تلفات و رواناب، روندیابی رواناب در حوضه آبخیز، مقدار جریان پایه، روندیابی رودخانه و شبیه‌سازی جریان در کانال‌ها و مخازن و روندیابی آن‌ها نیز در مدل حوضه انجام می‌پذیرد [۱۷].

محاسبه تلفات و رواناب

روش SCS-CN ارائه شده توسط سازمان حفاظت خاک گروه کشاورزی ایالات متحده^۱، یک روش جامع است که نوع خاک، نوع کاربری اراضی و رطوبت خاک را در شبیه‌سازی فرایند تولید رواناب در نظر می‌گیرد و بر بیلان آب استوار است [۳۰]. این روش توسط محققان در مطالعات کمالی و همکاران (۲۰۱۳)، کافس و هریسانتو (۲۰۱۴)، باربوسا و همکاران (۲۰۱۹)، چنگ و همکاران (۲۰۲۱)، چیانگ و همکاران (۲۰۲۲) و آگنوی و همکاران (۲۰۲۳) نیز در برآورد تلفات مدل HEC-HMS استفاده شده است [۷]. ۱۲، ۱۸، ۲۱، ۲۳ و ۳۱. در این روش رواناب بر اساس رابطه ۱ برآورد می‌شود:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

که در آن، Q ، ارتفاع رواناب، P ، ارتفاع بارش، I_a ، تلفات اولیه^۱ و S ، حداکثر پتانسیل نگهداشت^۲ است. تلفات اولیه بیشتر شامل گیرش گیاهی^۳، نفوذ اولیه سیل^۴ و ذخیره چالابی^۵ است که به صورت تجربی تابعی از حداکثر پتانسیل نگهداشت ($0.2S$) در نظر گرفته می‌شود [۳۰]. حداکثر پتانسیل نگهداشت بر اساس پارامتر بی‌بعد شماره منحنی برآورد می‌شود [۳۲]:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

شماره منحنی به ترکیبی از نوع خاک، کاربری اراضی و شرایط رطوبت پیشین خاک بستگی دارد که بر اساس جدول‌های ارائه شده در شرایط متفاوت، تعیین می‌شود. بر این اساس، سازمان حفاظت خاک آمریکا تمام خاک‌ها را در چهار گروه اصلی A ، B ، C و D به ترتیب با شدت نفوذپذیری بالا، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم می‌کند. شرایط رطوبت پیشین خاک نیز بر اساس مقدار بارش پنج روز قبل تعیین می‌شود [۱۵ و ۳۲]. در پژوهش حاضر، از نقشه خاک تهیه شده توسط آذری و همکاران (۲۰۱۷) استفاده شد [۳۳]. برای نقشه کاربری اراضی نیز از نقشه طبقه‌بندی شده تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال ۲۰۲۰ استفاده شد.

روندیابی حوضه آبخیز

در این بخش، بارش پس از کسر تلفات و تولید رواناب، در سطح آبخیز روندیابی می‌شود. مطالعاتی از جمله کافس و هریسانتو (۲۰۱۴)، باربوسا و همکاران (۲۰۱۹)، بلاینه و همکاران (۲۰۲۰)، چنگ و همکاران (۲۰۲۱) و همدان و همکاران (۲۰۲۱) از روش SCS-UH برای بخش روندیابی رواناب در حوضه آبخیز مدل HEC-HMS استفاده کردند [۷، ۱۲، ۱۸، ۳۴ و ۳۵]. روش SCS-UH، یک هیدروگراف واحد بی‌بعد تک‌اوجی است که رابطه دبی اوج (Q_p) و زمان تا اوج (T_p) هیدروگراف واحد آن به شکل رابطه ۳ است [۳۶]:

$$Q_p = 2.08 \frac{A}{T_p} \quad (3)$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + T_{lag} \quad (4)$$

که در آن، A ، مساحت آبخیز، Δt مدت زمان بارش مازاد و T_{lag} زمان تأخیر (بر حسب ساعت) است. در پژوهش حاضر، مقدار زمان تمرکز حوضه (T_c) بر اساس روابط ارائه شده کرپیچ^۶ (رابطه ۵)، برانسبی-ویلیامز^۷ (رابطه ۶) و SCS (رابطه ۷) محاسبه شد و با استفاده از رابطه پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (رابطه ۸) مقدار زمان تأخیر محاسبه شد [۳۷ و ۳۸].

$$T_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S_r^{0.385}} \quad (5)$$

$$T_c = 0.605 \frac{L}{(100S_r)^{0.2} A^{0.1}} \quad (6)$$

$$T_c = 1.67 \frac{L^{0.8} (S+1)^{0.7}}{1900S_r^{0.5}} \quad (7)$$

$$T_{lag} = 0.6T_c \quad (8)$$

که در آن‌ها، L ، طول آبراهه اصلی (کیلومتر)، S_r ، شیب آبراهه (متر بر متر)، A ، مساحت آبخیز و S ، حداکثر پتانسیل نگهداشت است. مقادیر زمان تمرکز برآوردی آبخیز ارازکوسه و زیرحوضه‌های آن در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج به دست آمده با استفاده از سه روش مورد استفاده نشان داد تفاوت ناچیزی در مقادیر برآوردی زمان تأخیر برای آبخیز مورد مطالعه وجود دارد. بنابراین، از نتایج روش کرپیچ استفاده شد که بیشترین تطبیق با هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی را داشت و در زیرحوضه‌های IB3 و IB4 که طول رودخانه شیب کمتری دارد، مقدار برآوردی زمان تأخیر، قابل قبول‌تر است [۲۹].

1. Initial abstraction
2. Maximum potential retention
3. Interception
4. Infiltration during early parts of the storm
5. Surface depression storage
6. Kirpich
7. Bransby-Williams

جدول ۲. مقادیر زمان تمرکز (ساعت) آبخیز ارازکوسه و زیرحوضه‌های آن به روش کریچ، برانسی- ویلیامز و SCS

SCS	برانسی- ویلیامز	کریچ	زیرحوضه
۶/۰۱	۵/۵۴	۵/۵۳	B1
۴/۳۳	۴/۲۰	۳/۹۳	B2
۳/۲۱	۳/۳۱	۲/۹۷	B3
۳/۱۷	۲/۵۲	۲/۸۱	B4
۵/۹۴	۵/۴۱	۵/۷۲	IB1
۶/۸۳	۶/۴۰	۶/۱۰	IB2
۱/۱۰	۱/۳	۲/۴۸	IB3
۴/۴۵	۳/۹۸	۵/۶۰	IB4
۹/۲۲	۹/۳۳	۹/۳۷	کل حوضه

جریان پایه

در این پژوهش جریان پایه با روش فروکش ثابت^۱ از داده‌های متناظر بارش- رواناب ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری مورد مطالعه جدا شد. سپس، مدل بدون لحاظ کردن جریان پایه اجرا شد. در این روش جریان پایه در هر زمان (Q_{bt}) به صورت زیر برآورد می‌شود [۱۸، ۳۴ و ۳۹]:

$$Q_{bt} = Q_{b0} k^t \quad (9)$$

که در آن، Q_{b0} ، جریان پایه اولیه در زمان صفر و k ، ثابت فروکش است که به صورت نسبت جریان پایه در زمان t به جریان پایه^۲ یک روز قبل تعریف می‌شود. روش‌های ارائه‌شده برای برآورد جریان پایه در مدل HEC-HMS محدود به وقایع پیوسته است. از این رو و با توجه به اینکه مقدار ثابت فروکش برای هر رخداد متفاوت است، هیدروگراف مشاهداتی پس از کسر جریان پایه وارد مدل شد.

روندیابی جریان (روندیابی رودخانه)

برای محاسبه هیدروگراف خروجی در زیرحوضه پایین‌دست بر اساس هیدروگراف ورودی از زیرحوضه بالادست، از روش ماسکینگام کانژ^۲ استفاده شد. در این روش، کانژ معادله انتشار همرفت^۳ و معادله روندیابی ماسکینگام را ترکیب کرد که در آن تعیین پارامترهای X (ضریب وزنی بی‌بعد بیان‌کننده اثر نسبی مقدار دبی ورودی و خروجی) و K (ضریب ذخیره) بر اساس سطح مقطع و ویژگی‌های هیدرولیکی بازه انجام می‌شود. با توجه به اینکه این روش معادله بقای جرم و بقای گشتاور را در نظر دارد، انتظار می‌رود نتایج بهتری ارائه دهد و در محدوده وسیعی از شرایط قابل اجرا باشد [۴۰]. مقادیر پارامترهای X و K به ترتیب بر اساس روابط ۱۰ و ۱۱ برآورد می‌شود [۳۹]:

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{[T(S_0)(c)\Delta x]} \right) \quad (10)$$

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (11)$$

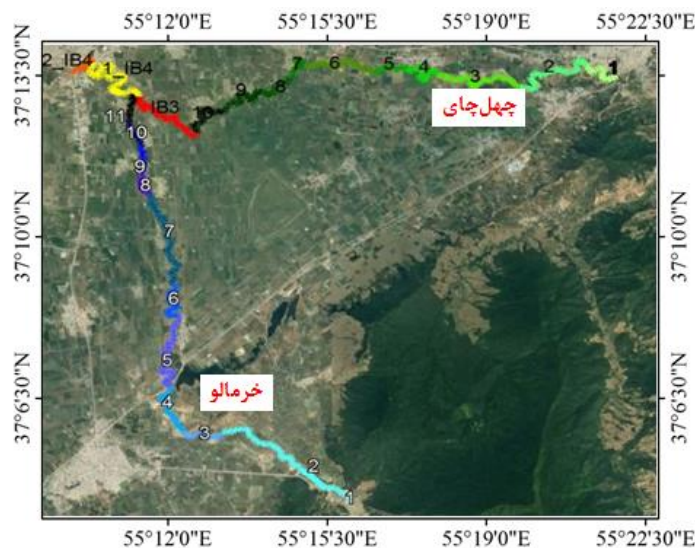
که در آن، Q ، دبی، T ، عرض بالا، S_0 ، شیب کانال در جهت طولی، c ، سرعت موج سیل و Δx ، مراحل فاصله روندیابی است. داده‌های ورودی مدل بر اساس روش ماسکینگام کانژ شامل طول بازه، شیب بازه، ضریب زبری مانینگ^۴ و بر اساس شکل مقطع شامل عرض بستر و شیب کناره است. در برداشت اطلاعات مورد نیاز، با توجه به اینکه بازه‌های روندیابی در اراضی کم‌شیب قرار داشتند، از روی تصاویر ماهواره‌ای Google Earth موقعیت مکانی مقطعی از رودخانه که عرض بستر و پوشش گیاهی بستر و کناره رودخانه تغییرات عمده داشت شناسایی شد و رودخانه به بازه‌های مشابه تفکیک شد. سپس با حضور در

1. Constant recession
2. Muskingum-Cunge
3. Convection diffusion
4. Manning's Roughness Coefficients

مقاطع شناسایی شده اطلاعات مقطع رودخانه اندازه‌گیری شد. در برآورد مقادیر ضریب زبری مانینگ (رابطه ۱۲) از روش کووان^۱ استفاده شد که جزئیات موثر در ارزیابی ضریب زبری را در نظر دارد [۴۱].

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (12)$$

که در آن، n_0 ، ضریب زبری پایه برای جنس کانال (یکنواخت، صاف و مستقیم)، n_1 ، درجه نامنظمی سطح مقطع، n_2 ، چگونگی تغییرات سایز و شکل سطح مقطع، n_3 ، وجود موانع در مسیر کانال، n_4 ، پوشش گیاهی و n_5 ، درجه ماریپیچی بودن رودخانه است. این ضرایب بر اساس جدول‌های ارائه‌شده امتیازدهی می‌شوند. در منطقه مطالعاتی، در مسیر رودخانه واقع در زیرحوضه (IB1) با طول حدود ۳۰ کیلومتر) که بازه روندیابی زیرحوضه نوده خاندوز است اطلاعات تعداد ۱۱ بازه، در مسیر رودخانه واقع در زیرحوضه (IB2) با طول حدود ۲۴ کیلومتر) که زیرحوضه مینودشت و نرماب در آن روندیابی می‌شود، اطلاعات تعداد ۱۰ بازه، در محل زیرحوضه (IB3) با طول حدود ۴ کیلومتر) اطلاعات یک بازه و در محل زیرحوضه (IB4) با طول حدود ۷ کیلومتر) اطلاعات تعداد دو بازه جمع‌آوری شد. شکل ۳ بازه‌های رودخانه که عرض بستر و پوشش کناره مشابه دارند و اطلاعات آن اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد. مطالعات کافس و هریسانتو (۲۰۱۴)، کنتی و همکاران (۲۰۱۸)، باریوسا و همکاران (۲۰۱۹)، چیانگ و همکاران (۲۰۲۲) و آنگوی و همکاران (۲۰۲۳) در روندیابی رودخانه مدل HEC-HMS از روش ماسکینگام کانز استفاده کردند [۷، ۹، ۱۸، ۲۱ و ۳۱].



شکل ۳. موقعیت بازه‌های رودخانه اندازه‌گیری شده آبخیز آراز کوسه

(ب) مؤلفه هواشناسی

در مدل هواشناسی تحلیل داده‌های هواشناسی صورت می‌گیرد. روش ورود اطلاعات بارش در این بخش از روش هایتوگراف کاربر بود و برای هر زیرحوضه مقدار و الگوی توزیع زمانی نظیر هر بارش به مدل معرفی شد.

با توجه به محل خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری آراز کوسه و بر اساس داده‌های باران‌سنجی ایستگاه آراز کوسه، طی دوره آماری موجود (از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷)، به تعداد ۱۲ رخداد متناظر بارش- رواناب با گام زمانی یک‌ساعته استخراج شد. در بالادست حوضه نیز برای زیرحوضه مینودشت از ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری لزوره تعداد چهار رخداد متناظر بارش- رواناب و برای زیرحوضه نوده خاندوز از ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری نوده تعداد سه رخداد متناظر بارش- رواناب استخراج شد. از تعداد ۱۲ رخداد بارش- رواناب ایستگاه آراز کوسه، به صورت تصادفی هشت رخداد برای واسنجی و چهار رخداد برای اعتبارسنجی، از چهار رویداد بارش- رواناب ایستگاه لزوره، سه رویداد برای واسنجی و یک رویداد برای اعتبارسنجی و از سه رویداد بارش- رواناب ایستگاه نوده، دو رویداد برای واسنجی و یک رویداد برای اعتبارسنجی استفاده شد. برای ایستگاه آراز کوسه

در مرحله اعتبارسنجی، برای زیرحوضه‌های مینودشت و نوده خاندوز به ترتیب از میانگین پارامترهای واسنجی شده ایستگاه لزوره و نوده استفاده شده.

ج) مؤلفه شاخص کنترلی

در بخش شاخص‌های کنترلی تاریخ و زمان شروع و خاتمه شبیه‌سازی وارد می‌شود. زمان شروع کنترل نباید از زمان شروع بارندگی دیرتر بوده و باید کمتر و یا مساوی زمان شروع بارندگی باشد تا مدل بارش معرفی شده را بشناسد و زمان خاتمه کنترل باید مساوی یا بزرگ‌تر از زمان خاتمه سیل باشد. گام‌های زمانی تعریف شده در این قسمت نیز باید یک عدد صحیح در فاصله زمانی شروع و پایان شبیه‌سازی باشد تا مدل اجرا شود [۱۷].

د) اجرای مدل HEC-HMS با رویدادهای مشاهداتی

پس از طراحی و تکمیل پارامترهای ورودی مدل HEC-HMS در بخش مؤلفه مدل حوضه، مؤلفه هواشناسی و مؤلفه شاخص کنترلی، داده‌های بارش- رواناب ۱۲ رویداد متناظر ایستگاه آرازکوسه، چهار رویداد متناظر ایستگاه لزوره و سه رویداد متناظر ایستگاه نوده وارد مدل شد و مدل برای این رویدادها اجرا شد.

ه) واسنجی

در واسنجی، پارامترهای ورودی اولیه با هدف رسیدن به نتایج مشابه با داده‌های مشاهداتی با استفاده از تابع هدف و روش جست‌وجو واسنجی می‌شوند [۲۳]. تابع هدف میزان تغییرات بین هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را اندازه‌گیری می‌کند که در پژوهش حاضر از معیار NSE (رابطه ۱۳) استفاده شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (13)$$

که در آن، Q_{sim} ، دبی شبیه‌سازی شده، Q_{obs} ، دبی مشاهداتی و $\overline{Q_{obs}}$ ، میانگین دبی مشاهداتی است [۴۱]. به منظور بررسی اثر تغییر هر پارامتر به صورت مجزا بر شبیه‌سازی جریان، از روش گرادینت تک‌پارامتر^۱ به عنوان روش جست‌وجو استفاده شد. در این روش، هر پارامتر در هر بار واسنجی با ثابت بودن سایر پارامترها ارزیابی و واسنجی می‌شود [۷، ۲۲ و ۳۴]. در پژوهش حاضر، مقادیر پارامترها به صورت خودکار و در دامنه قابل قبول هر پارامتر واسنجی شدند.

و) اعتبارسنجی

به منظور ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل، میانگین پارامترهای واسنجی شده سه رویداد بارش- رواناب ایستگاه لزوره برای یک رویداد دیگر ایستگاه لزوره، میانگین پارامترهای واسنجی شده دو رویداد بارش- رواناب ایستگاه نوده برای یک رویداد دیگر ایستگاه نوده و میانگین پارامترهای واسنجی شده هشت رویداد بارش- رواناب ایستگاه آرازکوسه برای چهار رویداد بارش- رواناب ایستگاه آرازکوسه اعتبارسنجی شد. در اعتبارسنجی ایستگاه آرازکوسه برای زیرحوضه‌های مینودشت و نوده خاندوز به ترتیب از میانگین پارامترهای واسنجی ایستگاه لزوره و نوده و برای شش زیرحوضه دیگر از میانگین پارامترهای واسنجی ایستگاه آرازکوسه استفاده شد. در اعتبارسنجی نتایج مدل، شاخص‌های میانگین خطای مطلق^۲ (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE)، PEPF، NSE، PBIAS، ضریب تعیین^۴ (R^2) و کارایی کلینک- گوپتا^۵ (KGE) در محیط برنامه‌نویسی R و با استفاده از بسته hydroGOF برآورد شد [۷ و ۲۱]. مشخصات شاخص‌های ارزیابی در جدول ۳ ارائه شده است [۷، ۲۳، ۴۲، ۴۳ و ۴۴].

1. Univariate-Gradient
2. Mean Absolute Error
3. Root Mean Squared Error
4. Coefficient of determination
5. Kling-Gupta Efficiency

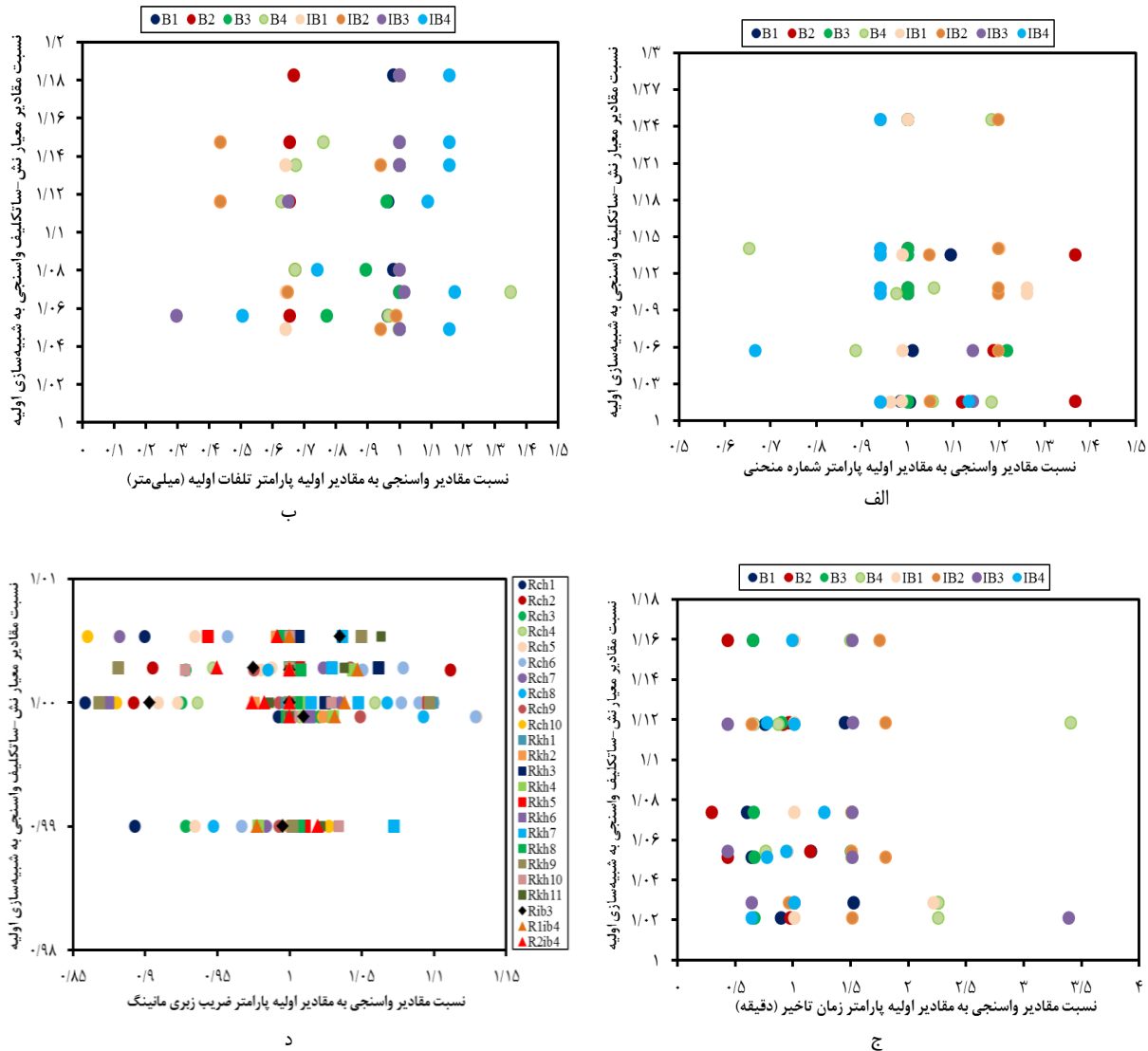
جدول ۳. مشخصات شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب آبخیز آراز کوسه در مرحله اعتبارسنجی

شاخص	رابطه	دامنه	توضیحات
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{obs} - Q_{sim} $	$MAE \geq 0$ و عدد صفر آن تطابق کامل	نشان‌دهنده سطح تطابق بین مجموعه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن بزرگی رویداد
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{obs} - Q_{sim} ^2}$	$RMSE \geq 0$ و عدد صفر آن تطابق کامل	محاسبه میانگین بزرگی خطا بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی روی مجذور اختلافها
PEPF	$PEPF = 100 \times \left \frac{Q_{sim}(peak) - Q_{obs}(peak)}{Q_{obs}(peak)} \right $	$PEPF \geq 0$ و عدد صفر آن عدم خطا	میزان درصد خطا در برآورد دبی اوج
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$	$NSE \leq 1$ و عدد یک آن تطابق کامل	نشان‌دهنده تطابق بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی
PBIAS	$PBIAS = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})} \right]$	$-\infty < PBIAS < +\infty$ و عدد صفر آن تطابق کامل، مقادیر مثبت کم‌تخمینی و مقادیر منفی بیش‌تخمینی	ارزیابی متوسط تمایل مقادیر شبیه‌سازی شده به بیشتر یا کمتر از مقادیر مشاهداتی
R ²	$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{obs} - \bar{Q}_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \right]^2$	$0 \leq R^2 \leq 1$ و عدد صفر آن عملکرد ضعیف و عدد یک تطابق کامل	نشان‌دهنده نسبت کل واریانس آماری در مجموعه داده‌های مشاهداتی
KGE	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$	$KGE \leq 1$ و عدد یک آن تطابق کامل	بر اساس تجزیه شاخص NSE و میانگین مربعات خطا ^۱ (MSE) و نشان‌دهنده ارزیابی هم‌بستگی و اندازه‌گیری تنوع نسبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی

که در آن‌ها، $Q_{sim}(peak)$ ، دبی اوج شبیه‌سازی شده و $Q_{obs}(peak)$ ، دبی اوج مشاهداتی، \bar{Q}_{sim} ، میانگین دبی شبیه‌سازی، r ، ضریب هم‌بستگی پیرسون بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی، α ، نسبت بین میانگین شبیه‌سازی و میانگین مشاهداتی و β ، ارزیابی است.

نتایج و بحث

پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی نتایج مدل دارند، به عنوان پارامتر حساس معرفی می‌شوند. در پژوهش حاضر اثر پارامترهای ورودی (شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ) روی عملکرد مدل طی مرحله واسنجی بررسی شد. شکل ۴ عملکرد مدل در نسبت مقادیر واسنجی شده هر یک از پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ به مقادیر اولیه آن‌ها را برای هر یک از زیرحوضه‌های آبخیز آراز کوسه به ازای هشت رویداد بارش- رواناب نشان می‌دهد.



شکل ۴. عملکرد مدل در نسبت مقادیر واسنجی شده به مقادیر پارامترهای ورودی شماره منحنی (الف)، تلفات اولیه (ب)، زمان تأخیر (ج) و ضریب زبری مانینگ (د) در مدل HEC-HMS آبخیز ارازکوسه

بر اساس نتایج، عمده تغییرات پارامتر شماره منحنی در دامنه تغییرات نسبت ۰/۹ و ۱/۲ برای زیرحوضه‌های مختلف است. در دامنه تغییرات مقادیر نسبت شماره منحنی (۰/۶۵ تا ۱/۳۷)، عملکرد مدل با نسبت بین ۱/۰۲ تا ۱/۲۵ بر اساس معیار کارایی نش- ساتکلیف افزایش یافته است. بیشترین تغییر پارامتر شماره منحنی مربوط به زیرحوضه‌های B4 (نسبت ۰/۶۵ تا ۱/۱۸) و IB4 (نسبت ۰/۶۷ تا ۱/۱۳) و کمترین تغییرات مربوط به زیرحوضه‌های IB3 (نسبت ۰/۹۴ تا ۱/۱۴) و B3 یا زیرحوضه نرماب (نسبت ۱ تا ۱/۲۲) است. در دامنه تغییرات مقادیر نسبت تلفات اولیه (۰/۳ تا ۱/۳۵)، عملکرد مدل با نسبت بین ۱/۰۵ تا ۱/۱۸ بر اساس معیار کارایی نش- ساتکلیف افزایش یافته است. بیشترین تغییرات در تلفات اولیه نشان‌دهنده کاهش مقدار تلفات اولیه واسنجی شده نسبت به مقدار اولیه است. بیشترین تغییر پارامتر تلفات اولیه مربوط به زیرحوضه‌های B4 (نسبت ۰/۶۳ تا ۱/۳۵) و IB3 (نسبت ۰/۳ تا ۱/۰۱) است و زیرحوضه‌های B1 (نسبت ۰/۹۶ تا ۱) و B3 (نسبت ۰/۷۷ تا ۱) کمترین تغییر پارامتر تلفات اولیه را دارند. بر اساس شکل (۴ ج)، عمده تغییرات پارامتر زمان تأخیر در دامنه تغییرات نسبت ۰/۵ تا ۱/۵ برای زیرحوضه‌های مختلف است و فقط در ۴ مورد مقدار زمان تأخیر واسنجی شده به نسبت بالای ۲ برابری مقادیر اولیه رسیده است که این مقادیر بالا در دو زیرحوضه IB3 و B4 مشاهده می‌شود. کمترین تغییر پارامتر زمان تأخیر مربوط به زیرحوضه‌های B2 و IB4 به ترتیب با

نسبت‌های ۰/۶۴ تا ۱/۲۷ و ۰/۳ تا ۱/۱۵ است. در دامنه تغییرات مقادیر نسبت زمان تأخیر (۰/۳ تا ۳/۴۱) نیز، عملکرد مدل بر اساس معیار کارایی نش- ساتکلیف با نسبت ۱/۰۲ تا ۱/۱۶ افزایش یافته است.

مدل HEC-HMS از مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند، ولی در فرایند شبیه‌سازی و واسنجی، پارامترهای فیزیکی مؤلفه هیدرولوژیکی بیشترین حساسیت را دارند [۳۱]. در پژوهش حاضر نیز بر اساس نتایج شکل (۴ د)، پارامتر ضریب زبری مانینگ (به عنوان پارامتر هیدرولیکی) طی واسنجی ایستگاه آرازکوسه دامنه تغییر کم (نسبت بین ۰/۸۶ تا ۱/۱۳) در برخی از بازه‌ها را نشان داد که در عملکرد مدل اثر بسیار کمی داشت.

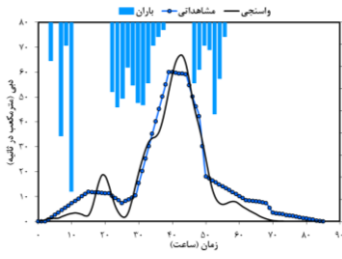
در مجموع، پارامترهای زیرحوضه‌های B4 و IB3 بیشترین حساسیت و زیرحوضه B3 کمترین حساسیت را نسبت به واسنجی داشتند. با توجه به بهبود قابل توجه عملکرد مدل در دامنه کم تغییر پارامتر شماره منحنی نسبت به سایر پارامترها، می‌توان گفت که پارامتر شماره منحنی بیشترین تأثیر را روی نتایج و عملکرد مدل دارد. در این راستا، رفیعی ساردویی و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه سد امیرکبیر تهران، ابوشاندی و مرکل (۲۰۱۳) در منطقه‌ای خشک در کشور اردن، ال‌آلفی (۲۰۱۶) در عربستان سعودی و آگنوی و همکاران (۲۰۲۳) در منطقه مراکش نیز بیان کردند که پارامتر شماره منحنی اثر معناداری روی شبیه‌سازی و واسنجی نتایج مدل دارد چون ترکیبی از کاربری اراضی و نوع خاک است [۵، ۲۹، ۳۱ و ۴۵]. پارامتر حساس دوم روی عملکرد مدل، پارامتر تلفات اولیه است. حیدری چناری و همکاران (۱۴۰۱) نیز برای آبخیز تجن، ابتدا شماره منحنی و سپس تلفات اولیه را به عنوان پارامترهای حساس معرفی کردند [۲۶]. در حالی که بر اساس نتایج بلاینه و همکاران (۲۰۲۰) در منطقه جنوب غرب ایتوپی، ابتدا زمان تأخیر و سپس تلفات اولیه بیشترین تأثیر را روی عملکرد مدل داشت [۳۴]. در مطالعه مجیدی و شاهدی (۲۰۱۲) نیز برای حوضه آب‌نما هرمزگان، پارامتر زمان تأخیر بیشترین حساسیت را روی اوج داشت [۱۴].

نتایج واسنجی پارامترهای مدل با سه رویداد بارش- رواناب ایستگاه لزوره نشان داد برای زیرحوضه مینودشت، به ترتیب پارامترهای شماره منحنی، زمان تأخیر و تلفات اولیه بیشترین حساسیت را نسبت به نتایج مدل داشتند. در حالی که برای حوضه نوده خاندوز با واسنجی دو رویداد بارش- رواناب ایستگاه نوده، پارامترهای حساس به ترتیب شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تأخیر هستند. هیدروگراف‌های سه رویداد بارش- رواناب ایستگاه لزوره، دو رویداد بارش- رواناب ایستگاه نوده و هشت رویداد بارش- رواناب ایستگاه آرازکوسه در مرحله واسنجی برای پارامتر شماره منحنی در شکل ۵ ارائه شده است.

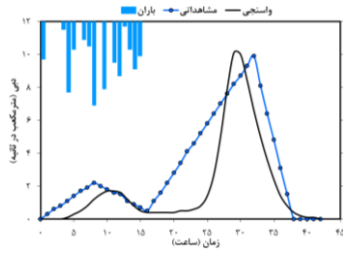
پس از واسنجی پارامترهای ورودی مدل HEC-HMS، برای سه رویداد ایستگاه لزوره، دو رویداد ایستگاه نوده و هشت رویداد متناظر بارش- رواناب ایستگاه آرازکوسه، میانگین پارامترهای واسنجی شده هر زیرحوضه و بازه رودخانه، به عنوان مقادیر پارامتر ورودی برای یک رویداد ایستگاه لزوره، یک رویداد ایستگاه نوده و چهار رویداد دیگر ایستگاه آرازکوسه در نظر گرفته شد. جدول ۴ مقادیر اولیه و میانگین مقادیر واسنجی پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تأخیر و جدول ۵ مقادیر اولیه و میانگین مقادیر واسنجی پارامتر ضریب زبری مانینگ را نشان می‌دهند.

شکل ۶ هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رویداد مورخ ۱۳۹۸/۰۱/۲۹ تا ۱۳۹۸/۰۲/۰۳ ایستگاه لزوره و رویداد مورخ ۲۰ و ۱۳۹۶/۰۵/۲۱ ایستگاه نوده را در مرحله اعتبارسنجی نشان می‌دهد. هیدروگراف‌های جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای چهار رویداد ایستگاه آرازکوسه در مرحله اعتبارسنجی نیز در شکل ۷ ارائه شده است.

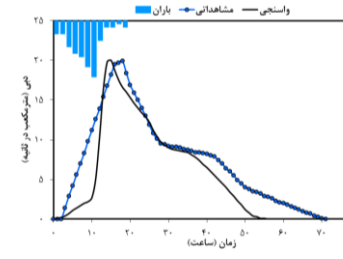
بر اساس شکل ۶ هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده برای ایستگاه‌های لزوره و نوده، می‌توان مشاهده کرد که مدل بر اساس الگوی بارش، شکل هیدروگراف مشابه با هیدروگراف مشاهداتی را شبیه‌سازی کرده است [۲۹].



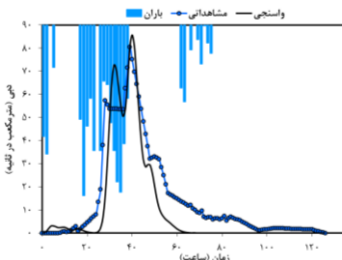
رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۵ ایستگاه لزوره



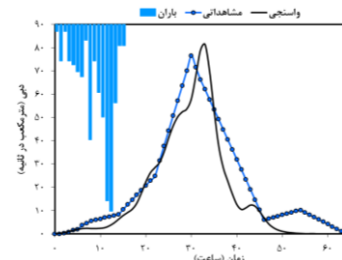
رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۸ ایستگاه لزوره



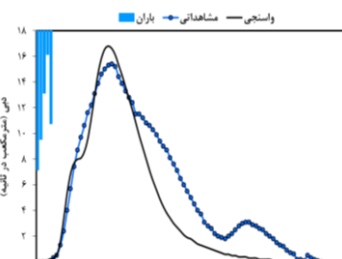
رویداد مورخ ۱۳۹۱/۰۱/۱۰ ایستگاه لزوره



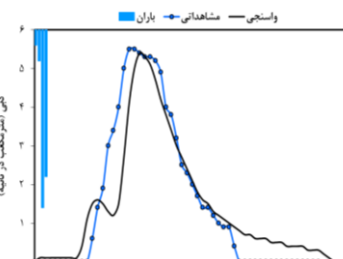
رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ ایستگاه نوده



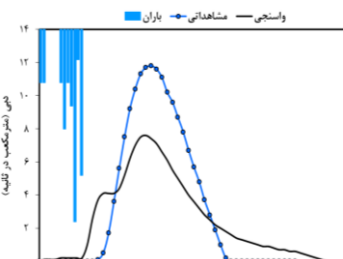
رویداد مورخ ۱۳۹۵/۰۱/۲۸ ایستگاه نوده



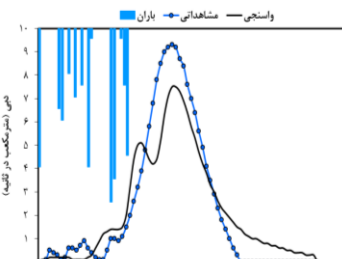
رویداد مورخ ۱۳۹۴/۱۲/۱۰ ایستگاه ارازکوسه



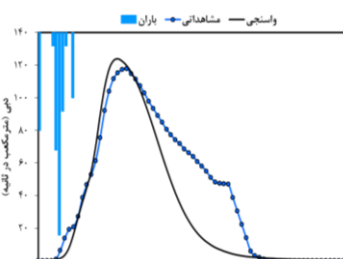
رویداد مورخ ۱۳۹۴/۱۰/۱۶ ایستگاه ارازکوسه



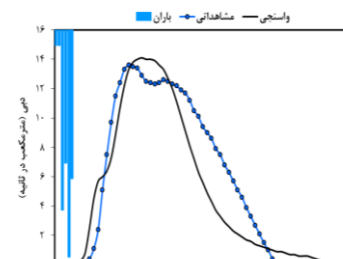
رویداد مورخ ۱۳۹۴/۰۹/۲۴ ایستگاه ارازکوسه



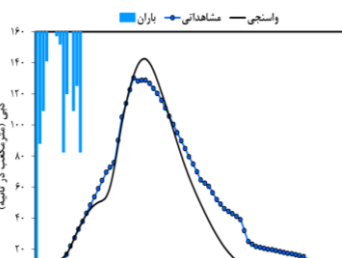
رویداد مورخ ۱۳۹۶/۱۰/۱۲ ایستگاه ارازکوسه



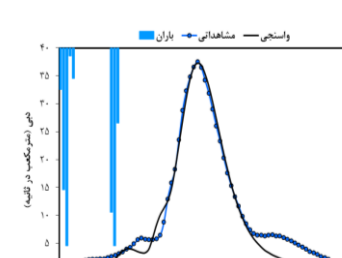
رویداد مورخ ۱۳۹۵/۰۱/۲۹ ایستگاه ارازکوسه



رویداد مورخ ۱۳۹۵/۰۱/۰۳ ایستگاه ارازکوسه



رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۹ ایستگاه ارازکوسه



رویداد مورخ ۱۳۹۶/۱۱/۲۴ ایستگاه ارازکوسه

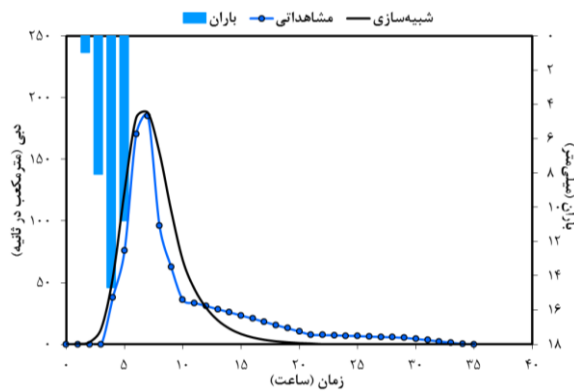
شکل ۵. هیدروگراف‌های جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای ایستگاه‌های هیدرومتری لزوره، نوده و ارازکوسه در مرحله واسنجی مدل HEC-HMS برای پارامتر شماره منحنی

جدول ۴. مقادیر اولیه و میانگین مقادیر واسنجی پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تأخیر زیرحوضه‌های آبخیز آرازکوسه

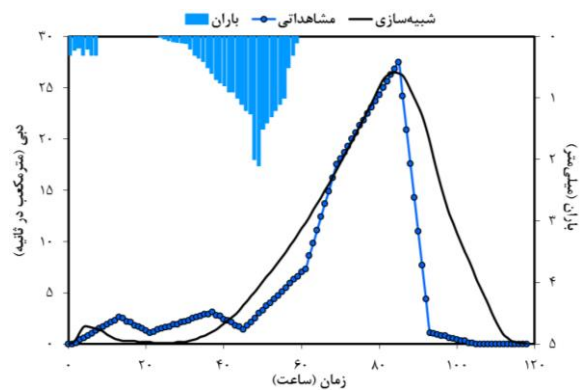
واحد هیدرولوژیکی	میانگین مقادیر واسنجی			مقادیر اولیه		
	زمان تأخیر (دقیقه)	تلفات اولیه (میلی‌متر)	شماره منحنی	زمان تأخیر (دقیقه)	تلفات اولیه (میلی‌متر)	شماره منحنی
B1	۲۰۲/۷۹	۱۴/۲۹	۷۵/۵۳	۱۹۹/۱۶	۱۶/۶۴	۷۵/۳۲
B2	۱۴۲/۶۴	۱۷/۹۰	۷۳/۷۳	۱۴۱/۵۵	۱۹/۳۱	۷۲/۴۶
B3	۱۰۶/۴۶	۲۱	۷۱/۶۵	۱۰۶/۹۴	۲۲/۰۳	۶۹/۷۵
B4	۱۷۷/۸۹	۸/۷۸	۸۲/۹۴	۱۰۱/۰۵	۹/۹۷	۸۳/۵۹
IB1	۲۴۱/۷۴	۱۱/۰۶	۸۴/۸۸	۲۰۵/۷۸	۱۳/۹۴	۷۸/۴۷
IB2	۳۱۵/۴۶	۸/۵۵	۹۳/۲۴	۲۱۹/۶۶	۱۰/۷۰	۸۲/۶۰
IB3	۱۲۲/۳۲	۶/۸۱	۸۵/۹۲	۸۹/۲۱	۷/۸۳	۸۶/۶۵
IB4	۱۸۷/۱۱	۶/۴۷	۸۱/۳۱	۲۰۱/۷۷	۷/۳۶	۸۷/۳۵

جدول ۵. مقادیر اولیه و میانگین مقادیر واسنجی پارامتر ضریب زبری مانینگ بازه‌های روندیابی آبخیز آرازکوسه

بازه روندیابی	میانگین مقادیر واسنجی				مقادیر اولیه			
	IB4	IB3	IB2	IB1	IB4	IB3	IB2	IB1
۱	-/۱۳۶	-/۱۵۳	-/۰۸۷	-/۰۶۲	-/۱۳۴	-/۱۵۵	-/۰۹	-/۰۶۱
۲	-/۱۰۶	-/۰۸۹	-/۰۹۶	-/۰۸۴	-/۱۰۸	-/۰۹	-/۰۹۸	-/۰۸۴
۳		-/۰۸۴	-/۱۶۵	-/۱۶۳		-/۰۸۵	-/۱۵۳	-/۱۶۳
۴		-/۰۷۷	-/۱۵۵	-/۱۰۴		-/۰۸۴	-/۰۷۸	-/۱۰۴
۵		-/۰۸۳	-/۱۰۵	-/۰۷۸		-/۱۷۳	-/۰۸۲	-/۰۷۸
۶		-/۱۷۱	-/۰۸۳	-/۰۸۲		-/۱۰۸	-/۱۰۹	-/۰۸۲
۷		-/۱۱	-/۱۰۹	-/۱۰۹		-/۱۲۱	-/۱۰۳	-/۱۰۹
۸		-/۱۲۲	-/۱۰۱	-/۱۰۳		-/۱۳۷	-/۰۹۷	-/۱۰۳
۹		-/۱۳۱	-/۰۹۶	-/۰۹۷		-/۱۴۳	-/۰۹۷	-/۰۹۷
۱۰		-/۱۴۴	-/۱۴۴	-/۱۴۳				-/۱۴۳
۱۱								

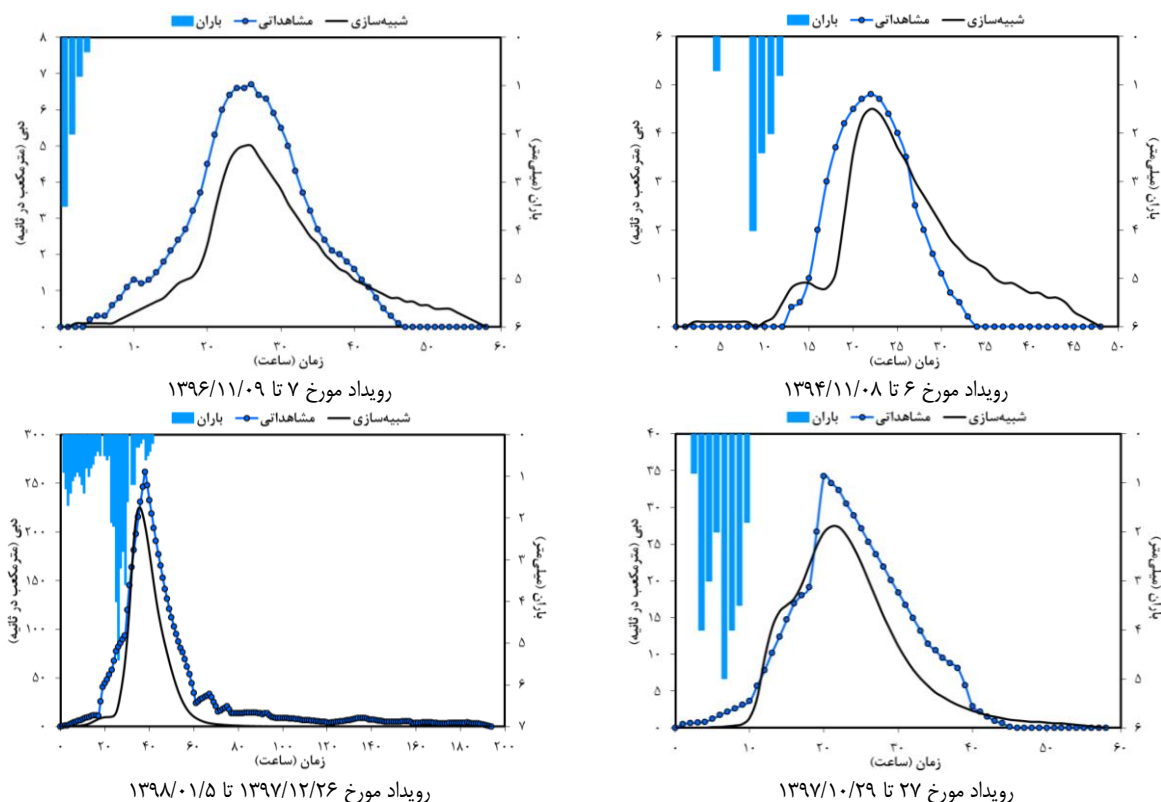


رویداد مورخ ۲۰ و ۱۳۹۶/۰۵/۲۱ ایستگاه نوده



رویداد مورخ ۱۳۹۸/۰۱/۲۹ تا ۱۳۹۸/۰۲/۰۳ ایستگاه لزوره

شکل ۶. هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی ایستگاه لزوره و نوده در مرحله اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

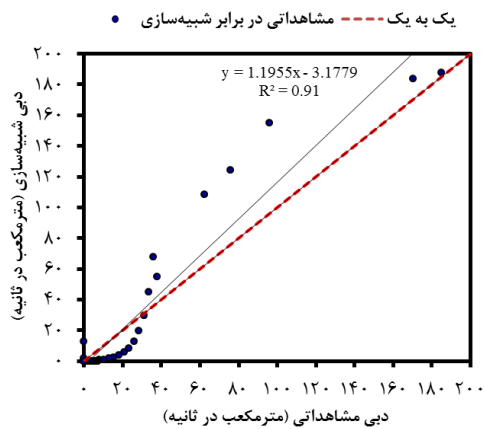


شکل ۷. هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی ایستگاه آرازکوسه در مرحله اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

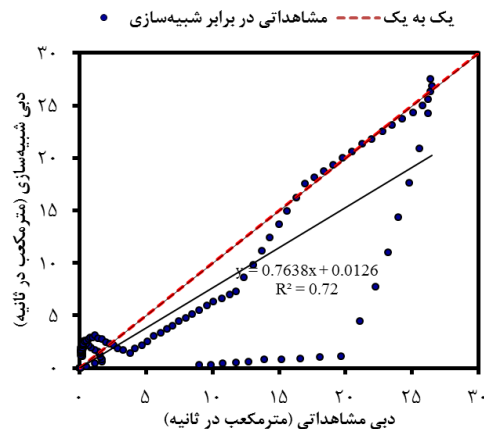
هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده برای ایستگاه آرازکوسه در مرحله اعتبارسنجی نشان می‌دهد مدل در برآورد دبی اوج دارای کم‌تخمینی است و تفاوت آن با هیدروگراف مشاهداتی در رویدادهای مورخ ۷ تا ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ و ۲۷ تا ۱۳۹۷/۱۰/۲۹ قابل ملاحظه است. در این راستا، آگنوی و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که مدل HEC-HMS در برآورد دبی اوج عملکرد مناسبی ندارد هرچند که در کل عملکرد مناسب دارد [۳۱]. برای رویداد مورخ ۶ تا ۱۳۹۴/۱۱/۰۸ و رویداد مورخ ۷ تا ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ نشان می‌دهد مدل زمان پایه هیدروگراف را طولانی‌تر شبیه‌سازی کرده است. بر اساس شکل ۷، بین مؤلفه زمان تا اوج هیدروگراف شبیه‌سازی با زمان تا اوج هیدروگراف مشاهداتی تفاوت ناچیزی مشاهده می‌شود که عملکرد مناسب مدل در برآورد این مؤلفه را نشان می‌دهد. نتایج پژوهش همدان و همکاران (۲۰۲۱) برای منطقه شمالی عراق نیز نشان داد مدل در شبیه‌سازی شکل هیدروگراف و روند تغییرات هیدروگراف عملکرد مناسبی دارد، با اینکه در برآورد دبی اوج دارای بیش تخمینی است [۳۵]. جدول ۶ مقادیر مؤلفه‌های هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی برای هر سه ایستگاه لزوره، نوده و آرازکوسه را ارائه می‌دهد.

جدول ۶. مقادیر دبی اوج، حجم سیل و زمان تا اوج هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی مدل HEC-HMS برای ایستگاه‌های لزوره، نوده و آرازکوسه

رویداد	دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)		حجم سیل (هزار مترمکعب)		زمان تا اوج (ساعت)	
	مشاهداتی	اعتبارسنجی	مشاهداتی	اعتبارسنجی	مشاهداتی	اعتبارسنجی
ایستگاه لزوره	۲۷/۵	۲۶/۵	۲۶۳۲	۳۶۰۱/۵	۸۵	۸۴
ایستگاه نوده	۱۸۵/۱	۱۸۷/۸	۳۴۳۴	۳۶۹۴	۷	۷
ایستگاه آرازکوسه	۳۴/۲	۲۷/۴	۱۹۸۴/۷	۱۵۸۷/۹	۲۰	۲۱
	۲۶۱/۶	۲۲۴/۴	۲۳۶۶۹/۶	۱۸۲۳۵/۲	۳۸	۳۵

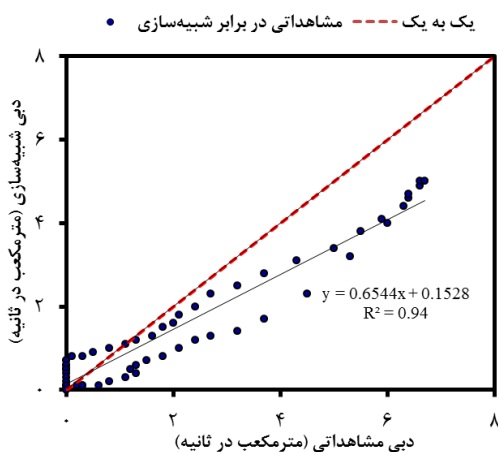


رویداد مورخ ۲۰ و ۱۳۹۶/۰۵/۲۱ ایستگاه نوده

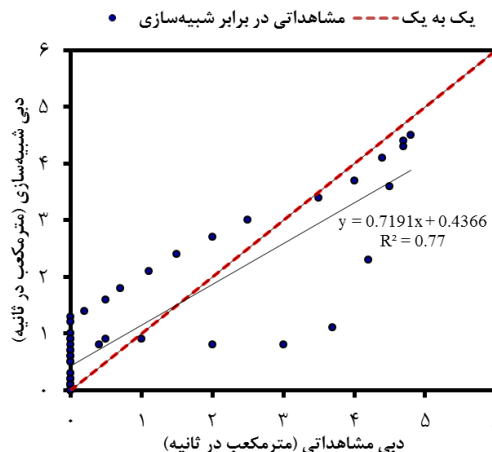


رویداد مورخ ۱۳۹۸/۰۱/۲۹ تا ۱۳۹۸/۰۲/۰۳ ایستگاه لزوره

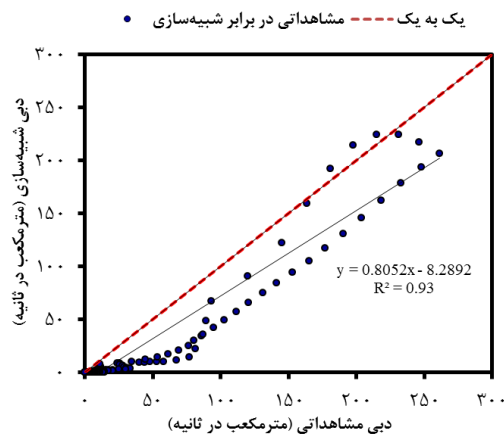
شکل ۸. خط یک به یک جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی ایستگاه‌های لزوره و نوده



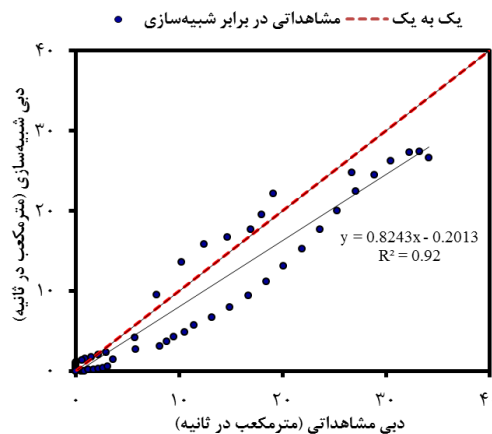
رویداد مورخ ۷ تا ۱۳۹۶/۱۱/۰۹



رویداد مورخ ۶ تا ۱۳۹۴/۱۱/۰۸



رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ تا ۱۳۹۸/۰۱/۵



رویداد مورخ ۲۷ تا ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

شکل ۹. خط یک به یک جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی ایستگاه آرازکوسه

یکی از مؤلفه‌های مهم هیدروگراف که در سیل‌های بزرگ موجب خسارت‌های فراوان شده و حائز اهمیت است، مؤلفه حجم سیل است. مقدار مؤلفه حجم سیل شبیه‌سازی شده برای رویداد ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ ایستگاه آرازکوسه کاهش حدود ۵۴۳۰ هزار مترمکعب را نشان می‌دهد. در حالی که برای ایستگاه‌های لزوره و نوده در رویدادهای مورد بررسی مقدار مؤلفه حجم سیل

شبیه‌سازی شده افزایش نسبت به حجم سیل مشاهداتی دارد. شکل ۸ نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی در برابر شبیه‌سازی و خط یک‌به‌یک هیدروگراف‌های ایستگاه لزوره و نوده را ارائه می‌دهد. نمودار خط یک‌به‌یک هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مرحله اعتبارسنجی ایستگاه‌های آرازکوسه نیز در شکل ۹ ارائه شده است.

بر اساس شکل ۸ برای ایستگاه لزوره، الگوی پراکنش دبی شبیه‌سازی نشان‌دهنده کم‌تخمینی مدل است. عکس این حالت، برای ایستگاه نوده در دبی‌های بالاتر بیش‌تخمینی نشان داده شده است. کم‌تخمینی و بیش‌تخمینی جریان توسط مدل HEC-HMS در مطالعات ورما و همکاران (۲۰۱۰) در شرق هند و چاتورانکیا و همکاران (۲۰۲۲) در یک منطقه گرمسیری تایلند نیز اشاره شده است [۸ و ۲۰].

بر اساس نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه آرازکوسه (شکل ۹)، برای رویداد مورخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۷، مدل در برآورد دبی‌های کم عملکرد مناسب داشته، ولی در دبی‌های بالاتر نسبت به مشاهداتی کم‌تخمینی دارد. منیو و همکاران (۲۰۱۲) نیز بیان کردند که مدل برآورد کمتری در دبی‌های بالاتر نسبت به مشاهداتی دارد [۳]. در حالی که کم‌تخمینی دبی‌های کم در رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ دیده می‌شود. نتایج معیارهای ارزیابی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در مرحله اعتبارسنجی برای ایستگاه‌های لزوره، نوده و آرازکوسه، در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. مقادیر معیارهای ارزیابی هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مرحله اعتبارسنجی مدل HEC-HMS ایستگاه لزوره، نوده و آرازکوسه

رویداد	MAE	RMSE	PEPF	R ²	PBIAS	NSE	KGE
ایستگاه لزوره	۲/۶	۴/۷	۴	۰/۷۲	۲۶	۰/۶۲	۰/۶۱
ایستگاه نوده	۶/۷	۱۳/۶	۱	۰/۹۱	۷/۹	۰/۸۵	۰/۷۴
۶ تا ۱۳۹۴/۱۱/۰۸	۰/۶	۰/۸	۶	۰/۷۷	۱۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۳
۷ تا ۱۳۹۶/۱۱/۰۹	۰/۷	۰/۹	۲۵	۰/۹۴	-۲۷/۳	۰/۸۲	۰/۶
۲۷ تا ۱۳۹۷/۱۰/۲۹	۳/۱	۴/۴	۲۰	۰/۹۲	-۱۹/۶	۰/۸۳	۰/۷۵
۱۳۹۸/۰۱/۰۵ تا ۱۳۹۷/۱۲/۲۶	۱۴/۹	۲۲/۷	۱۴	۰/۹۳	-۳۴/۲	۰/۸۴	۰/۵۹
میانگین	۴/۸۳	۷/۲	۱۶/۲۵	۰/۸۹	-۱۷/۶۵	۰/۸۱	۰/۶۷

نتایج شاخص‌های MAE و RMSE برای ایستگاه‌های لزوره و نوده نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل است. مقادیر این شاخص‌ها برای ایستگاه آرازکوسه نیز به‌جز رویداد مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ نشان‌دهنده تطابق مناسب هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص PEPF برای ایستگاه آرازکوسه به‌جز رویداد مورخ ۱۳۹۴/۱۱/۰۶ نشان‌دهنده بیش‌تخمینی مدل در دبی اوج است که بوسال و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیان کردند که مدل HEC-HMS دبی اوج را بیش از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است [۲]. نتایج مقادیر شاخص R² برای هر سه ایستگاه مطالعاتی عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد. در ارزیابی عملکرد مدل در مطالعه ورما و همکاران (۲۰۱۰) مقدار شاخص R² نیز برابر ۰/۷۷ است. با توجه به اینکه مقدار درصد اریبی تا بازه ± 25 دارای عملکرد مناسب است [۲]؛ مدل بر اساس این شاخص در رویدادهای ۱۳۹۶/۱۱/۰۷ و ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ ایستگاه آرازکوسه عملکرد مناسبی نداشته است، با این حال مقدار منفی شاخص PBIAS برای رویدادهای این ایستگاه نشان‌دهنده بیش‌تخمینی مدل است. نتایج شاخص PBIAS در مطالعه چاتورانکیا و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان‌دهنده بیش‌تخمینی مدل است [۲۰]. ولی در مطالعه میرقاسمی و همکاران (۱۴۰۲) مقدار شاخص درصد اریبی مثبت است [۲۷]. مقادیر شاخص NSE بالاتر از ۰/۸ برای ایستگاه نوده و آرازکوسه، نشان‌دهنده تطابق مناسب هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است که در مطالعات تراجان و رادهاکریشن (۲۰۱۹)، موراس و همکاران (۲۰۱۸) و میرقاسمی و همکاران (۱۴۰۲) نیز ارائه شده است [۱۵، ۱۷ و ۲۷]. نتایج شاخص KGE برای ایستگاه‌های لزوره و نوده به‌ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۷۴ است و میانگین این شاخص برای چهار رویداد ایستگاه آرازکوسه برابر ۰/۶۷ است که عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان بر اساس پارامترهای واسنجی مناسب را نشان می‌دهد. باربوسا و همکاران (۲۰۱۹) نیز با ارائه مقدار شاخص حدود ۰/۷۵ بیان کردند که مدل عملکرد خوب در شبیه‌سازی هیدروگراف دارد [۷].

در مجموع، بر اساس شاخص‌های ارزیابی برای ایستگاه‌های لزوره، نوده و آرازکوسه می‌توان بیان کرد که مدل HEC-HMS

عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان برای هر سه ایستگاه را دارد. نتایج اعتبارسنجی مدل در دو ایستگاه بالادست (لزوره و نوده) و استفاده از پارامترهای واسنجی آن‌ها برای ایستگاه آرازکوسه و به دست آمدن نتایج خوب بر اساس شاخص‌های آماری، نشان می‌دهد مدل HEC-HMS هم در بالادست و هم پایین‌دست آبخیز عملکرد مناسب داشته و نتایج آن قابل اعتماد است. در پژوهش حاضر شبیه‌سازی جریان به صورت رخدادی و با گام زمانی یک‌ساعته انجام شد. در حالی که در شبیه‌سازی جریان رواناب در آبخیز آرازکوسه، اوژن و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل WetSpa-Python و سلمانی و همکاران [۲۰۱۸] با استفاده از مدل SWAT بیان کردند که هر دو مدل توانایی شبیه‌سازی جریان به صورت پیوسته برای آبخیز آرازکوسه را دارند [۴۶ و ۴۷]. از طرفی، نکته قابل توجه در روند شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب دسترسی به داده‌های مشاهداتی بارش- رواناب با کیفیت خوب است. در این راستا، کمالی و همکاران (۲۰۱۳)، کاکل و همکاران (۲۰۲۳) و حیدری چناری و همکاران (۱۴۰۱) نیز بیان کردند که در صورت وجود داده‌های بارش- رواناب مناسب، می‌توان عملکرد مدل را با دقت بیشتر ارزیابی کرده و نتایج بهتری را ارائه کرد [۱۳، ۲۳ و ۲۶]. از این‌رو، ضروری است که در مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب عدم قطعیت‌های ناشی از داده، مدل و کاربر نیز تحلیل شود [۱۲].

نتیجه‌گیری

در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی جریان با مدل HEC-HMS، انتخاب روش محاسبه فرایندها و برآورد پارامترهای مورد نیاز آن‌ها، تابع هدف مرحله واسنجی و وجود داده‌های بارش- رواناب مناسب و کافی بسیار حائز اهمیت است. در اجرای مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای آبخیز آرازکوسه، در بخش برآورد تلفات و رواناب روش SCS-CN، در بخش روندیابی رواناب در حوضه روش SCS-UH و در روندیابی رودخانه روش ماسکینگام کاتر استفاده شد. از این‌رو، پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ به عنوان پارامترهای ورودی روش‌های انتخابی واسنجی شدند. نتایج واسنجی (شکل ۳) نشان داد پارامتر شماره منحنی تأثیر بیشتری روی نتایج مدل دارد. بنابراین، ضرورت دارد در تهیه نقشه کاربری اراضی و خاک در مدل‌سازی توجه بیشتری شود.

برای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، مدل برای دو ایستگاه لزوره و نوده که در خروجی دو زیرحوضه بالادست آبخیز آرازکوسه واقع شدند، واسنجی و اعتبارسنجی شد. سپس میانگین پارامترهای این دو ایستگاه به همراه میانگین پارامترهای واسنجی شده شش زیرحوضه دیگر با هشت رویداد ایستگاه آرازکوسه، برای اعتبارسنجی مدل در خروجی نهایی آبخیز آرازکوسه استفاده شد. در مرحله اعتبارسنجی، مدل برای رویدادهای مختلف عملکرد متفاوتی در برآورد مؤلفه‌های هیدروگراف از جمله حجم سیل، دبی اوج، زمان تا اوج و زمان پایه نشان داد. نتایج شاخص‌های آماری (جدول ۶) نشان داد مدل در برآورد مؤلفه دبی اوج دارای خطای بیشتری است. در حالی که مقادیر سایر شاخص‌های ارزیابی برای هر سه ایستگاه عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف را نشان دادند.

با توجه به اینکه زیرحوضه‌های مینودشت و نوده خاندوز قسمت اعظم آبخیز آرازکوسه را در بر می‌گیرند، در هیدروگراف خروجی کل آبخیز نقش عمده‌ای دارند و با توجه به توپوگرافی کوهستانی و ترکیب کاربری مختلف آن‌ها، از نظر مدیریتی نیز حائز اهمیت هستند. بنابراین، اعتبارسنجی مدل در خروجی این دو آبخیز نشان داد مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان برای آبخیز مینودشت و نوده خاندوز با در نظر داشتن آن‌ها به صورت یک آبخیز یکپارچه عملکرد مناسبی دارد.

در مجموع، نتایج اعتبارسنجی مدل HEC-HMS برای آبخیز آرازکوسه و زیرحوضه‌های بالادست آن نشان داد در منطقه مورد مطالعه مدل یادشده توانسته است در ایستگاه‌های چندگانه نتایج مشابه و قابل قبولی در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب ارائه دهد. بنابراین، می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی جریان سیل برای دوره بازگشت‌های مختلف استفاده کرد. هیدروگراف خروجی این مدل در تلفیق با روش‌های پهنه‌بندی از جمله HEC-RAS می‌تواند در زمینه‌های مختلف مطالعاتی و مدیریتی از جمله تعیین پهنه سیل برای رویدادهای حدی مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو، با توجه به محل قرارگیری شهر گنبد در خروجی آبخیز، برنامه‌ریزان و مدیران سیلاب در شهر گنبد می‌توانند به منظور پیش‌گیری و کنترل سیل و در نتیجه، کاهش خسارت‌های اجتماعی و اقتصادی آن، از نتایج پژوهش حاضر استفاده کنند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، از داوران محترم برای مطالعه دقیق مقاله حاضر و ارائه نظرات و پیشنهادهای سازنده تشکر می‌کنند. این تحقیق توسط دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در قالب گرنت رساله دکتری حمایت مالی شده است.

منابع

- [1]. Abdessamed D, and Abderrazak B. Coupling HEC- RAS and HEC- HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. *Environmental Earth Sciences*. 2019; 78(586): 1-17.
- [2]. Bhusal A, Parajuli U, Regmi S, and Kalra A. Application of Machine Learning and process-based models for Rainfall-Runoff simulation in DuPage River Basin, Illinois. *Hydrology*. 2022; 9(117): 1-20.
- [3]. Meenu R, Rehana S, and Mujumdar P.P. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Processes*. 2012; 27(11): 1572-1589.
- [4]. Teng F, Huang W, and Ginis I. Hydrological modeling of storm runoff and snowmelt in Taunton River Basin by applications of HEC-HMS and PRMS models. *Natural Hazards*. 2018; 91: 179-199.
- [5]. El Alfy M. Assessing the impact of arid area urbanization on flash floods using GIS, remote sensing, and HEC-HMS rainfall-runoff modeling. *Hydrology Research*. 2016; 47.6: 1142-1160.
- [6]. Namara W.G, Damisse T.A, and Tufa F.G. Application of HEC- RAS and HEC- GeoRAS model for flood inundation mapping, the case of Awash Bello flood plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2022; 8: 1449-1460.
- [7]. Barbosa J.H.S, Fernandes A.L.T, Lima A.D, and Assis L.C. The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: a case study. *International Journal of Hydrology*. 2019; 3(5): 442-449.
- [8]. Verma A.K, Jha M.K, and Mahana R.K. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy Water Environ*. 2010; 8: 131-144.
- [9]. Koneti S, Sunkara S.L, and Roy P.S. Hydrological modeling with respect to impact of Land-Use and Land-Cover change on the runoff dynamics in Godavari River Basin using the HEC-HMS model. *International Journal of Geo-Information*. 2018; 7(206): 1-17.
- [10]. Halwatura D, and Najim M.M.M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software*. 2013; 46: 155-162.
- [11]. Bhuiyan H.A.K.M, McNairn H, Powers J, and Merzouki A. Application of HEC-HMS in a cold region watershed and use of RADARSAT-2 soil moisture in initializing the model. *Hydrology*. 2017; 4(9): 1-19.
- [12]. Cheng X, Ma X, Wang W, Xiao Y, Wang Q, and Liu X. Application of HEC- HMS parameter regionalization in small watershed of hilly area. *Water Resources Management*. 2021; 35: 1961-1976.
- [13]. Cacal J.C, Austria V.A, and Taboada E.B. Extreme event-based rainfall-runoff simulation utilizing GIS techniques in Irawan watershed, Palawan, Philippines. *Civil Engineering Journal*. 2023; 9(1): 220-232.
- [14]. Majidi A, and Shahedi K. Simulation of rainfall-runoff process using Green-Ampt method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran). *Hydraulic Engineering*. 2012; 1(1): 5-9.
- [15]. Natarajan S, and Radhakrishnan N. Simulation of extreme event- based rainfall-runoff process of an urban catchment area using HEC- HMS. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2019; 5: 1867-1881.
- [16]. Ghonchepour D, Sadoddin A, Bahremand A, Croke B, Jakeman A, and Salmanmahiny A. A methodological framework for the hydrological model selection process in water resource management projects. *Natural Resource Modeling*. 2021; 34(3): 1-31.
- [17]. Scharffenberger W.A, and Fleming M.J. Hydrologic modeling system HEC-HMS User's. Manual, USACE. 2010; 1-306.
- [18]. Kaffas K, and Hrissanthou V. Application of a continuous rainfall-runoff model to the basin of Kosynthos river using the hydrologic software HEC-HMS. *Global NEST Journal*. 2014; 16(1): 188-203.
- [19]. Moraes T.C, Santos, V.J, Calijuri M.L, and Torres F.T.P. Effects on runoff caused by changes in land cover in a Brazilian southeast basin: evaluation by HEC- HMS and HEC- GEOHMS. *Environmental Earth Sciences* 2018; 77(250): 1-14.
- [20]. Chathuranika I.M, Gunathilake M.B, Baddewela P.K, Sachinthanie E, Babel M.S, Shrestha S, Jha M.K, and Rathnayake U.S. Comparison of two hydrological models, HEC-HMS and SWAT in runoff estimation: Application to Huai Bang Sai Tropical Watershed, Thailand. *Fluids*. 2022; 7(267): 1-14.
- [21]. Chiang S, Chang C.H, and Chen B. Comparison of rainfall-runoff simulation between Support Vector Regression and HEC-HMS for a rural watershed in Taiwan. *Water*. 2022; 14(191): 1-18.
- [22]. Dariane A.B, Javadianzadeh M.M, and James D. Developing an Efficient Auto-Calibration Algorithm for HEC-HMS Program. *Water Resource Management*. 2016; 30: 1923-1937.
- [23]. Kamali B, Jamshid Mousavi S, and Abbaspour K.C. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. *Hydrological Processes*. 2013; 27: 4028-4042.
- [24]. Garmeh R, Faridhosseini A, Hasheminia S.M, and Hojjati A. Calibration and validation parameter of hydrologic model HEC-HMS using Particle Swarm Optimization algorithms – Single Objective. *Water and Soil*. 2015; 29(3): 615-626. [Persian]

- [25]. Mirzaei SH, Esmali Ouri A, Mostafazadeh R, Ghorbani A, and Mirzaei S. Flood hydrograph simulation and analysis of its components with landscape metrics in Amoughin watershed, Ardabil Province. *Ecohydrology*. 2018; 5(2): 357-372. [Persian]
- [26]. Heidari Chenari F, Fazloulou R, and Nikzad Tehrani E. Calibration and evaluation of HEC-HMS hydrological model parameters in simulation of single Rainfall-Runoff events (Case study: Tajan Watershed). *Watershed Management Research*. 2023; 13(26): 69-81. [Persian]
- [27]. Mirghasemi S.H, Banejad H, and Farid Hosseini A. Application of remote sensing in hydraulic modeling and determination of riverbed boundaries (Case study: Ardak River). *RS & GIS for Natural Resources*. 2023; 14(1): 24-48. [Persian]
- [28]. Solaimani K, Sharifipour M, and Abdoli Boozhaneh S. Flood Damage Detection Algorithm Using Sentinel-2 Images (Case Study: Golestan Flood of March 2019). *Ecohydrology*. 2020; 7(2): 303-312. [Persian]
- [29]. Abushandi E, and Merkel B. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resource Management*. 2013; 27: 2391-2409.
- [30]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Chapter 10. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. 2004; 79p.
- [31]. Aqnouy M, Ahmed M, Ayele G.T, Bouizrou I, Bouadila A, and El Messari J.E.S. Comparison of hydrological platforms in assessing rainfall-runoff behavior in a Mediterranean watershed of Northern Morocco. *Water*. 2023; 15(447): 1-18.
- [32]. Subramanya K. *Engineering Hydrology*, 3th Edition, The McGraw-Hill Companies. 2008; 434 pages.
- [33]. Azari M, Saghafian B, Moradi H.R, and Faramarzi M. Effectiveness of soil and water conservation practices under climate change in the Gorganroud basin, Iran. *Clean-Soil, Air, Water*. 2017; 45(8): 1-12.
- [34]. Belayneh A, Sintayehu G, Gedam K, and Muluken T. Evaluation of satellite precipitation products using HEC- HMS model. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2020; 6: 2015-2032.
- [35]. Hamdan A.N.A, Almuktar S, and Scholz M. Rainfall-Runoff modeling using the HEC-HMS model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*. 2021; 8(58): 1-17.
- [36]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Hydrographs. Chapter 16. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. 2007; 50p.
- [37]. Zolghadr M, Rafiee M.R, Esmaeilmanesh F, Fathi A, Tripathi R.P, Rathnayake U, Gunakala S.R, and Azamathulla H.M. Time of concentration based on two-dimensional hydraulic simulation. *Water*. 2022; 14(3155): 1-20.
- [38]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Time of concentration. Chapter 15. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. 2010; 29p.
- [39]. Chow V.T, Maidment D.R, and Mays L.W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book series in Water Resources and Environmental Engineering. 1988; 572p.
- [40]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Flood routing. Chapter 17. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. 2014; 78p.
- [41]. Arcement G.J, and Schneider V.R. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. *United States Geological Survey, Water Supply*. 1989; 2339: 38p.
- [42]. Moriasi D.N, Arnold J.G, Van Liew M.W, Bingner R.L, Harmel R.D, and Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2007; 50(3): 885-900.
- [43]. Gupta H.V, Kling H, Yilmaz K.K, and Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009; 377: 80-91.
- [44]. Dawson C.W, Abrahart R.J, and See L.M. HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling & Software*, 2007; 22: 1034-1052.
- [45]. Rafiei Sardoi E, Rostami N, Khalighi Sigaroudi S, and Taheri S. Calibration of loss estimation methods in HEC-HMS for simulation of surface runoff (Case Study: Amirkabir Dam Watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*. 2012; 6(1): 343-348.
- [46]. Azhan M, Bahremand A, Sheikh V.B, Bairam Komaki Ch, and Mohammadrezaei M. Simulation of stream flow hydrographs using flexible distributed hydrological modelling (WetSpa-Python). *Iran-Water Resources Research*. 2022; 17(4): 242-251. [Persian]
- [47]. Salmani H, Sheikh V.B, Salman Mahiny A, Ownegh M, and Fathabadi A. Evaluation of Hydrological Response in Tilabad Watershed of Golestan for Future Periods as Affected by the Predicted Land use Change. *Ecohydrology*. 2018; 5(2): 399-418. [Persian]