Research Paper

Evaluation of Conceptual Hydrological Model (HBV) Parameters for Predicting Shahid Rajaei Dam Basin Flow by Monte Carlo Method

Fatemeh Safari Sokhtehkolaei[1], Reza NoRooz-Valashedi[2*] Mojtaba Khoshravesh[3]

[1] M.Sc. graduated in Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran,
[2] Assistant Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, 4818168984, P.O. Box 578, Iran.
[3] Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

10.22125/IWE.2022.310410.1562

Received:
October 30, 2021
Accepted:
April 13, 2022
Available online:
October 3, 2023

Keywords:
Conceptual Model, Runoff, Flow, Simulation, Monte Carlo.

Abstract

Water management in water basins requires information on some facts and full acquaintance of basin conditions, which is problematic due to the deficiency of data collection stations in the country. One of the most suitable methods for flow simulation is the use of hydrological models. Uncertainty in models is due to sources such as input variables, parameters, and model structure. In this study, to simulate runoff caused by precipitation and to investigate the apparatus of runoff formation and outflow at the outlet of Shahid Rajaei Dam basin located in Sari, the HBV-Light model was used. The purpose of evaluating the stochastic method is to estimate the model parameters and reduce the uncertainty. The length of the daily statistical period was the variables of temperature, precipitation, runoff and evaporation from 1981 to 2015. The Monte Carlo random method was used to estimate the appropriate parameters for the study area. For a consistent assortment, the values of the parameters with a relatively good coefficient of determination were used in the validation section. Finally, the results show the good aptitude of the model in simulating runoff in the study basin. The values of coefficient of determination 0.87, Nash coefficient (NS) equal to 0.66 in the range of good evaluation and RMSE equal to 0.26 in the validation period indicate this issue. In the analysis of uncertainty caused by model parameters, K1, K2 and UZL parameters were identified as the most sensitive in the model reaction subroutine. Therefore, the results showed the importance of accurate determination of water and soil parameters affecting subsurface runoff. The desired results of using the model to predict the flow in the coming years can be used in planning policies and proper management of water resources.

1. Introduction

Water management in water basins requires information on some facts and full acquaintance of basin conditions, which is problematic due to the deficiency of data collection stations in the country. One of the most suitable methods for flow simulation is the use of hydrological models. Uncertainty in models is due

* **Corresponding Author:** Reza, Norooz-Valashedi
Address: Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
Email: r.norooz@sanru.ac.ir
Tel: +98 1133687560

to sources such as input variables, parameters and model structure. In this study, to simulate runoff caused by precipitation and to investigate the apparatus of runoff formation and outflow at the outlet of Shahid Rajaei Dam basin located in Sari, the HBV-Light model was used. The purpose of evaluating the stochastic method is to estimate the model parameters and reduce the uncertainty.

2. Materials and Methods

Brief description of HBV-light model: The precipitation runoff model HBV (HBV is an acronym formed from Hydrologic Bryon advising for Vattenbalans at SMHI, Sweden), like most of the hydrological models, especially for estimation of snowmelt, is based on the degree day method. The HBV model is a conceptual precipitation-runoff model which is used to simulate the runoff process in a catchment based on the data of precipitation, air temperature and potential evapotranspiration. The model computes snow accumulation, snow melt, and storage in soil moisture and groundwater and runoff from the catchment. The model consists of different routines representing snowmelt by a degree-day method, soil water and evaporation, groundwater described by three linear reservoir equations and channel routing by a triangular weighting function (Seibert 1997). The study area is Tajan River basin situated in Sari, Iran. It extends from Lat. 36°05' to 36°35' and Lon. 53°05' to Lon. 53°45' covering a zone mean elevation of 386 m. Its final outlet point is gauged at Shahid Rajaei Dam. The length of the daily statistical period was the variables of temperature, precipitation, runoff and evaporation from 1981 to 2015. The Monte Carlo random method was used to estimate the appropriate parameters for the study area.

3. Results

For a consistent assortment, the values of the parameters with a relatively good coefficient of determination were used in the validation section. The efficiency E proposed by Nash & Sutcliffe 1970 is defined as one minus the sum of the absolute squared differences between the predicted and observed values normalized by the variance of the observed values during the period under investigation, whereas, the coefficient of determination (R^2) is defined as the squared value of the coefficient of correlation. The Monte Carlo random method was used to estimate the appropriate parameters for the study area. For a consistent assortment, the values of the parameters with a relatively good coefficient of determination were used in the validation section.

4. Discussion and Conclusion

Finally, the results show the good aptitude of the model in simulating runoff in the study basin. The values of coefficient of determination 0.87, Nash coefficient (NS) equal to 0.66 in the range of good evaluation and RMSE equal to 0.26 in the validation period indicate this issue. In the analysis of uncertainty caused by model parameters, K1, K2 and UZL parameters were identified as the most sensitive in the model reaction subroutine. Therefore, the results showed the importance of accurate determination of water and soil parameters affecting subsurface runoff. The desired results of using the model to predict the flow in the coming years can be used in planning policies and proper management of water resources.

5. Six important references

1) Knoben, W. J., Freer, J. E., and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. Hydrology and Earth System Sciences, 23(10), 4323-4331.
2) Lupakov, S. Y., Bugaets, A. N., & Shamov, V. V. (2021). Application of Different Structures of HBV Model to Studying Runoff Formation Processes: Case Study of Experimental Catchments. Water Resources, 48(4), 512-520.
3) Nonki, R. M., Lenouo, A., Tshimanga, R. M., Donfack, F. C., & Tchawoua, C. (2021). Performance assessment and uncertainty prediction of a daily time-step HBV-Light rainfall-runoff model for the Upper Benue River Basin, Northern Cameroon. Journal of Hydrology: Regional Studies, 36, 100849.
4) Seibert, J. (1996). HBV light. User's manual, Uppsala University, Institute of Earth Science, Department of Hydrology, Uppsala.
5) Seibert, J. (1997). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model: Paper presented at the Nordic Hydrological Conference (Akureyri, Iceland-August 1996). Hydrology Research, 28(4-5), 247-262
6) Stefnisdóttir, S., Sikorska-Senoner, A. E., Ásgeirsson, E. I., & Finger, D. C. (2021). Improving the Pareto Frontier in the multi-dataset calibration of hydrological models using metaheuristics. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1-30.

Conflict of Interest
The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments
The authors of the article express their gratitude to the National Meteorological Organization and the Regional Water Company of Mazandaran Province for providing us with the statistics and information needed for this research.

ارزیابی پارامترهای مدلِ هیدرولوژیکی مفهومی (HBV) جهت پیش‌یابی جریانِ خروجی حوضه آبریز سد شهید رجایی به روش مونت‌کارلو

فاطمه صفری سوخته کلایی[۱]، رضا نوروز ولاشدی[*۲]، مجتبی خوش‌روش[۳]

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴

مقاله پژوهشی

چکیده

مدیریت آب در حوضه‌های آبی مستلزم آگاهی از برخی داده‌ها و شناخت کامل از شرایط حوضه است که با توجه به کمبود ایستگاه‌های داده‌برداری در کشور به‌سختی امکان‌پذیر است. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها جهت شبیه‌سازی جریان استفاده از مدل‌های هیدرولوژی است. عدم قطعیت در مدل‌ها حاصل از منابعی چون متغیر ورودی، پارامترها و ساختار مدل است. در این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش و بررسی مکانیسم تشکیل رواناب و جریان آن در خروجی حوضه سد شهیدرجایی واقع در شهرستان ساری، از مدل HBV استفاده شد. هدف پژوهش ارزیابی روش تصادفی در برآورد پارامترهای مدل و کاهش عدم قطعیت است. طول دوره آماری روزانه متغیرهای دما، بارش، رواناب و تبخیر از سال ۱۹۸۱ تا سال ۲۰۱۵ بوده است. جهت برآورد پارامترهای مناسب برای منطقه مورد مطالعه از روش تصادفی مونت‌کارلو استفاده شد. برای محدوده قابل‌اعتماد مقادیر پارامترها با ضریب تعیین نسبتاً خوب در بخش صحت‌سنجی استفاده شد. درنهایت نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی رواناب در حوضه مورد مطالعه است. مقادیر ضریب تعیین ۰/۸۷، ضریب نش ساتکلیف (NS) برابر ۰/۶۶ در محدوده ارزیابی خوب و RMSE برابر ۰/۲۶ در دوره صحت‌سنجی مبین این موضوع هستند. در تحلیل عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدل، در ماژول‌های عکس‌العمل مدل پارامترهای K_1، K_2 و UZL به‌عنوان حساس‌ترین‌ها شناسایی شدند. لذا نتایج اهمیت تعیین دقیق پارامترهای آب‌وخاک مؤثر بر رواناب زیرسطحی را نشان داد. نتایج مطلوب حاصل از استفاده مدل موردنظر جهت پیش‌یابی جریان در سال‌های آتی می‌تواند در سیاست‌های برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آبی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: مدل مفهومی، رواناب، دبی، شبیه‌سازی، مونت‌کارلو.

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، پست الکترونیکی: ftm1995sfri@gmail.com
[۲] استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، پست الکترونیکی r.norooz@sanru.ac.ir(*مسئول مکاتبات)، شماره تماس: ۰۱۱۳۳۶۸۷۵۶۰
[۳] دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، پست الکترونیکی: khoshravesh_m24@yahoo.com

مقدمه

امروزه رشد جمعیت و پیشرفت فنّاوری، استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی را به دنبال داشته که موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر شده است. به دنبال افزایش غلظت این گازها، افزایش متوسط دما و تغییرات اقلیمی را شاهد خواهیم بود. تغییرات اقلیمی می‌تواند بر میزان بارندگی و رواناب تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد که با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی در کشور با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک آن، تأثیر مستقیم آن بر سیاست‌گذاری‌های مدیریت آبی کشور را خواهیم دید. پدیده تغییر اقلیم می‌تواند بر تمامی جنبه‌های مختلف مدیریتی کشور شامل منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد اثرات منفی داشته باشد (Steele-Dunne, et al., 2008). شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر و برآورد پارامترهای مختلف یک مدل مفهومی در مطالعات در شرایط کمبود اطلاعات بسیار حائز اهمیت است (خیرفام و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعات متعددی با مدل‌های مختلف آماری و مفهومی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز در سال‌های اخیر انجام شده است. برای مثال در سال ۱۳۹۵ تحقیقی توسط علیپور نصیرمحله و همکاران به‌منظور شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش و بررسی مکانیسم تشکیل رواناب و جریان خروجی در حوضه از مدل HBV در ارومیه استفاده شد. مقادیر ضریب تعیین ۷۰/۳ و ضریب نش ساتکلیف ۶۹/۸۹ و RMSE برابر ۶/۷۸ گویای توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی رواناب است (علیپور نصیرمحله و همکاران، ۱۳۹۵). در آنالیز حساسیت پارامترهای حساس نیز K_1 و K_2 و UZL شناسایی شدند که نشان از تأثیر آب زیرزمینی بر روی خروجی مدل دارد. مسیح و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی مدل مفهومی بارش-رواناب پیوسته HBV-light را در حوضه کوهستانی و نیمه‌خشک کرخه و ۱۱ زیر حوضه آن برای کارایی این مدل و امکان انتقال پارامترهای واسنجی شده این حوضه به حوضه‌های فاقد آمار به کار بردند. نتایج نشان داد که مدل با داشتن ضرایب قابل‌قبول عملکرد در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی برای این حوضه کارایی دارد (Masih, et al., 2010). حیدری و همکاران (۱۳۹۶) نیز به بررسی نتایج مدل HBV در شرایط سناریوهای تغییر اقلیم آینده پرداختند. ایشان با مقایسه جریان شبیه‌سازی‌شده اقلیم کنونی و اقلیم آینده، اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای حوضه را ارزیابی نمودند. نتایج آنان حاکی از افزایش دما و تبخیر و تعرق در کلیه ماه‌های سال و کاهش چشم‌گیر بارش و دبی جریان رودخانه در اغلب ماه‌های سال در آینده است. لذا جریان‌های روزانه کمینه نیز به میزان قابل‌توجهی کاهش خواهد یافت. در مطالعه‌ای دیگر با مدل HBV احمدی‌زاده و معروفی (۱۳۹۸) به تخمین عدم قطعیت در واسنجی فرآیند بارش–رواناب روزانه با استفاده از تابع تشابه تعمیم‌یافته در این مدل پرداختند. نتایج آنان نشان داد، روش بیز در خصوص شناسایی و معرفی نظریه همپایانی، با استفاده از دسته پارامترهای مختلف در واسنجی مدل، مؤثر است. به‌طوری‌که با به‌کارگیری دسته پارامترها، مقدار یکسانی از شاخص نکویی برازش، حاصل می‌گردد. مصطفی‌زاده و عسگری (۱۴۰۰) به ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب GR4J در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در حوزه آبریز نیرچای اردبیل پرداختند. ضمن نتایج نسبتاً قابل‌قبول خروجی مدل اما بیان داشتند رفتار جریان مشاهداتی آبریز نیرچای با واکنش سریع ناشی از شیب و مساحت کم، در مدل بارش-رواناب مذکور به‌طور مناسب شبیه‌سازی نشده است. یکی از دلایل عملکرد نامناسب این مدل به دلیل کم بودن اطلاعات ورودی مدل در زیرحوضه‌های مورد مطالعه و دیگری مساحت کم و شیب تند حوضه است که منجر به واکنش سریع و اختلاف ارتفاعی ایستگاه اندازه‌گیری در حوضه شده است. عوامل متعددی در تحلیل بارش-رواناب می‌تواند در خروجی نتایج مؤثر باشد که در مدل‌های مفهومی نظیر ناش و کلارک در رگبار طرح (مصطفی‌زاده و بهره‌مند، ۱۳۸۸) قابل توجیه هستند. درحالی‌که در مدل‌های آماری دارای توجیه فیزیک حاکم بر روابط و شرایط حوضه نیست. برای مثال کاووسی و خزیمه‌نژاد (۱۴۰۰) به بررسی و مقایسه عملکرد چهار روش آماری مدل‌سازی LS-SVM، NN، GEP و ANFIS-PSO در شبیه‌سازی بارش-رواناب به‌صورت موردی در حوضه هلیل رود-سد جیرفت پرداختند. نتایج نشان داد مدل ANFIS-PSO در هر دو بخش آموزش و

صحت‌سنجی دقت بالاتری نسبت به سه مدل دیگر داشته است. آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۸) نیز به تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب به‌صورت موردی در حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی به روش مونت‌کارلو پرداختند، برای واسنجی مدل شبیه‌سازی سیلاب با تهیه بیش از ۲۰۰۰ سری تصادفی روزانه رواناب رودخانه و برازش توزیع‌های احتمالاتی به بهترین نتایج اکتفا نموده و نتایج حاکی از آن بود روش مونت‌کارلو در تعیین اثر عدم قطعیت نقش مؤثرتری دارد. به‌طوری‌که ضریب همبستگی رواناب روزانه شبیه‌سازی‌شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری معادل ۰/۷۹ بوده است. در مقاله سلامی (۱۳۸۲) به طور کامل موضوع شبیه‌سازی به روش مونت‌کارلو تشریح شده است. پژوهش‌های متعددی در ایران (نیکخو امیری و همکاران، ۱۳۹۸، ابراهیمیان و قادری، ۱۳۹۳ و یعقوبی و مساح بوانی، ۱۳۹۳) به مطالعه موردی شبیه‌سازی جریان رودخانه‌های مختلفی نظیر (Nonki, et al., 2021; Stefnisdóttir, et al., 2021; Shiwakoti, 2017; Lupakov, et al., 2021; Bhattarai, et al., 2018; Niroumandfar, et al., 2018; Steele-Dunne, et al., 2008 و Seibert, 1997) در اقالیم متفاوت در دنیا جهت بررسی کارایی مدل HBV-Llight انجام شده است.

در این پژوهش از میان مدل‌های مختلف مفهومی موجود مدل HBV به دلیل سادگی در انتخاب و کاهش عدم قطعیت در عین استفاده از کمترین اطلاعات ورودی انتخاب شد، در عین حال این مدل می‌تواند برای گسترش سری داده‌های رواناب، کنترل کیفیت داده‌ها، مطالعات تعادل آب، پیش‌بینی سیل، محاسبه سیلاب طرح جهت بررسی ایمنی سدها، بررسی اثر تغییرات در حوضه، شبیه‌سازی تخلیه از حوضه‌های غیرمجاز و شبیه‌سازی اثر تغییرات آب و هوایی مورداستفاده قرار گیرد (Rusli, et al., 2015). در این پژوهش با توجه به وضعیت حوضه آبریز مورد مطالعه و شرایط سختِ اندازه‌گیری‌های میدانی و کمبود برخی اطلاعات در زیرحوضه‌های مورد مطالعه سعی شد از مدلی ساده اما مفهومی ضمن برسی دقیق فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه از کمترین اطلاعات موجود نظیر بارش، دما و دبی‌های اندازه‌گیری شده موجود بر اساس روش‌های پیچیده رایانه‌ای نظیر مونت‌کارلو (Seibert, 1996) با نمونه‌های بیشمار تصادفی به آنالیز حساسیت پارامترها در ماژول‌های مختلف مدل HBV-Light پرداخته شود. تا بهترین پارامترها برآورد و نتایج مورد ارزیابی قرار گیرد. با اجرای این پژوهش ضمن کاهش عدم قطعیت، طبق اصل امساک در مدل‌سازی می‌توان از مدل ساده اما مفهومی HBV-light در شرایطی که اطلاعات اندازه‌گیری حوضه‌های آبریز وجود ندارد، پیش‌بینی‌هایی درخور و نسبتاً خوب برای مدیریت جامع منابع آب در حوضه‌های مذکور ارائه داد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی و اطلاعات مورد نیاز

استان مازندران با وسعتی معادل ۲/۴ میلیون هکتار (۱/۴۵ درصد مساحت کشور)، بین ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این پژوهش در حوضه آبریز سد شهید رجایی واقع در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر ساری و حوضه آبریز رودخانه تجن، به مختصات عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی، انجام شد (شکل ۱).

داده‌های موردنیاز مدل HBV، از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری (سلیمان تنگه ۱۳۳۳-۱۳۹۴ – ارتفاع ۳۸۶ متر از سطح دریاهای آزاد- عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه و ۱۲ ثانیه و طول جغرافیایی ۵۳ درجه ۱۳ دقیقه و ۴۱ ثانیه) موقعیت مطابق نقشه شکل ۲ دریافت شد. حداقل متغیرهای P (بارش-mm/day)، T (دما-C°)، Q (دبی- mm/day) و E (تبخیر و تعرق- mm/day) بوده است که به‌صورت روزانه و همچنین میانگین ماهانه از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ مورد استفاده قرار گرفته است. از ۷۰ درصد اطلاعات برای واسنجی (۱۹۸۱-۲۰۰۵) و ۳۰ درصد در مرحله صحت‌سنجی (۲۰۰۶-۲۰۱۵) استفاده شد. به‌منظور یافتن بهترین پارامترهای مدل که با هدف کمینه نمودن اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی‌شده به داده‌های مشاهداتی صورت خواهد پذیرفت، از روش تصادفی مونت‌کارلو استفاده‌شده است. این پارامترهای مورد نیاز در اجرای این مدل شبیه‌سازی در ماژول‌های مرتبط (شکل ۳) با آب،

خاک، اقلیم، تابع عکس‌العمل و برف است که در ادامه توضیحاتی در این مورد ارائه شده است.

توضیح مدل مفهومی هیدرولوژیکی

مدل Hydrologiska Byrans Vattenavdelning به اختصار HBV مدلی مفهومی است که در سال‌های اخیر در مطالعات بارش-رواناب حوضه‌ها در بسیاری از نقاط جهان و همچنین کشور اسکاندیناوی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل در موسسه هواشناسی و هیدرولوژی سوئد شامل نسخه‌های متعددی است، که نسخه ابتدایی HBV- light در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه اوپسلا تهیه شد (Seibert, 1996) و در سال ۲۰۱۲ در زبان برنامه‌نویسی جدیدتر و کاربرپسندتری ارائه و تکمیل شد (Seibert and Vis, 2012). این مدل یک مدل مفهومی و شامل محاسبات مفهومی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه‌های آبریز متوسط است (شکل ۳). این مدل می‌تواند در حکم مدلی نیمه توزیعی با تقسیم حوضه به چندین زیرحوضه اجرا شود. هر زیرحوضه باتوجه به ارتفاع، دریاچه، یخچال‌های طبیعی و پوشش گیاهی به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. مدل شامل ماژول‌هایی مطابق شکل ۳ برای انباشت و ذوب برف، محاسبه رطوبت خاک و تولید رواناب است که درنهایت به کمک تابع وزنی ساده مثلثی، رواناب ایجاد شده را روندیابی می‌کند. ماژول برف: انباشت بارش هنگامی که دما کمتر از TT باشد به صورت برف خواهد بود. ذوب برف وقتی شروع می‌شود که دما کمتر از TT باشد و از روش ساده درجه-روز برای آن استفاده می‌شود. (روابط (۱) و (۲))

$$Melt=CFMX(T_t-TT) \quad (۱)$$

$$MeltWater=CFMX\ (Tt-TT)\ (mm.day^{-1}) \quad (۲)$$

CFMX فاکتور درجه-روز، TT آستانه دما، T_t میانگین روزانه، CFR ضریب تصحیح انجماد آب ذوب شده برف است. ماژول خاک: در این قسمت تغذیه آب زیرزمینی و تبخیر واقعی به صورت تابعی از ذخیره واقعی آب شبیه‌سازی می‌شود. این قسمت اصلی‌ترین بخش کنترل شکل‌گیری رواناب است و دارای ۳ پارامتر در رابطه (۳) است.

$$recharge/(P(t)) =[(SM(t))/FC)]^{BETA} \quad (۳)$$

که درآن، BETA: پارامتری که سهم نسبی در رواناب (تابع عکس العمل یا افزایش رطوبت خاک) از هر میلی متر بارش یا ذوب برف را کنترل می‌کند. FC: حداکثر ظرفیت ذخیره رطوبت در خاک است. LP: پارامتر نشانگر محدوده پتانسیل تبخیر است. LP مقدار رطوبت خاک است که بالاتر از آن تبخیر و تعرق به مقدار پتانسیل می‌رسد. تابع عکس العمل: در این بخش رواناب محاسبه شده تبدیل به دبی در خروجی زیرحوضه می‌شود. با درنظر گرفتن دولایه خاک، بارش ورودی باتوجه به رابطه (۴) درحالت‌های زیر از آن خارج می‌شود: خروج از لایه اول با ضریب ذخیره سریع K_1، نفوذ به لایه زیرین خاک با نرخ ثابت نفوذ PERC، اگر آستانه UZL (پارامتر آستانه) از حالت ذخیره تجاوز کند مازاد آن با ضریب ذخیره K_0 خارج می‌شود و درنهایت آب از لایه زیرزمینی با ضریب ذخیره آهسته K_2 خارج می‌شود.

$$Q(t) =KK.SUZ+K_2SLZ+K_0MAX(SUZ-UZL) \quad (۴)$$

که در این رابطه Q(t) خروجی دو مخزن است. و در نهایت ماژول روندیابی: این رواناب در نهایت از تابع وزنی مثلثی با پارامتر MAXBAS برای روندیابی جریان محاسبه شده در خروجی استفاده می‌شود. طراحی سرریز، شبیه‌سازی سیلاب و ارزیابی منابع آب از دیگر موارد استفاده مدل است. این مدل شامل محاسبات مفهومی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه است. معادله کلی بیلان آب در مدل به‌صورت زیر است.

$$P-Q=d/dt\ (SP+SM+UZ+LZ+Lake) \quad (۵)$$

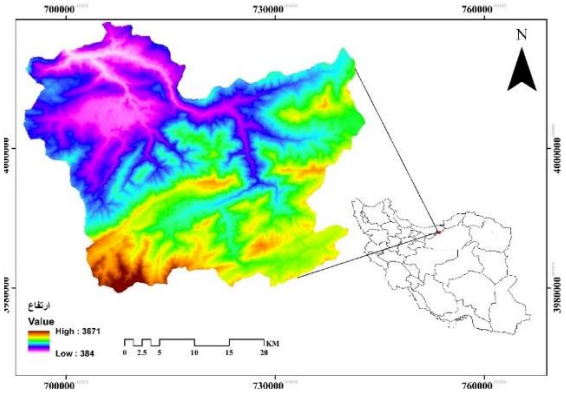
که در این رابطه P بارش، E تبخیر و تعرق، Q رواناب، SP برف، SM رطوبت خاک، UZ و LZ ذخیره لایه زیرزمینی بالا و پایینی آب و Lake حجم آب دریاچه‌هاست.

فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو روشی است برای تعیین یکپارچه و هم‌زمان انواع مختلف عدم قطعیت، که با توابع هدف گوناگون مورداستفاده قرار می‌گیرد. بعضی پارامترهای مورداستفاده در مدل‌های شبیه‌سازی مستقیماً قابل‌اندازه‌گیری نیستند و تعیین آن‌ها مشکل و با عدم قطعیت همراه است. بنابراین بایستی بعد از واسنجی پارامترهای مدل، عدم قطعیت ناشی از وجود خطا در مدل را بررسی کرد و راه‌کارهایی جهت کاهش و کنترل عدم

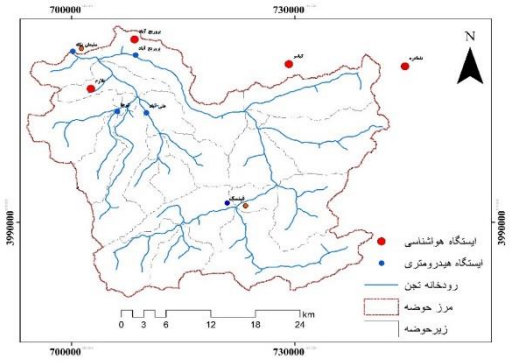
قطعیت نتایج ارائه شود. به همین دلیل در این مطالعه از رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو (Monte-Carlo) استفاده خواهد شد (سروش و ریاحی، ۱۳۹۸). روش مونت‌کارلو در محدوده تعیین شده پارامترهای ارائه شده در مدل مفهومی فوق الذکر به کار گرفته شد تا بهترین ضرایب و بهترین ارقام را برای حصول به نتیجه عالی در فرآیند شبیه‌سازی ارائه کند ((Seibert, 1996) و سلیمی (۱۳۸۲)).

در مدل مفهومی این پژوهش از روش مونت‌کارلو که یک الگوریتم محاسباتی است بر مبنای نمونه‌های تصادفی پارامترهای مختلف در محدوده مورد نظر و تعریف شده از طرف کاربر برای حصول نتایج بهتر استفاده می‌شود. اطلاعات بیشتر از فرآیند انتخاب ضرایب بهینه در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مقاله (Moneim et al., 2009) قابل دریافت است، که در اینجا به دلیل ازدیاد روابط ریاضیاتی مدل و شرح مبسوط آن خودداری شد. روش مونت‌کارلو معمولاً برای شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شوند. در اینجا با اتخاذ اعداد تصادفی در تمام فضای نمونه (یعنی محدوده منطقی پارامتر طبق جدول ۱ پیشنهادی موجود در راهنمای شبیه ساز HBV)، مطالعات پیشین و تجربیات حاصل از سایر پژوهشگران و انتخاب R^2 مناسب و با پیمایش تمام فضای مسئله جواب را می‌یابد.

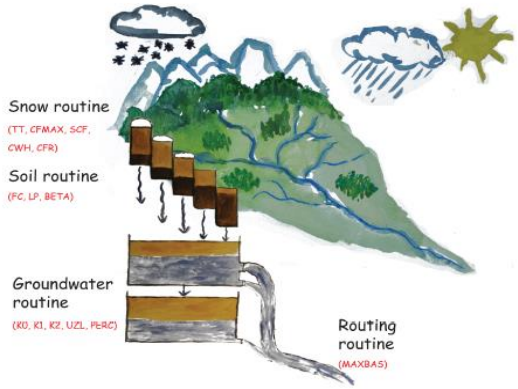
از دیگر مزایای روش مونت‌کارلو این است با توجه به انتخاب تصادفی پارامتر و پیمایش در تمام محدوده در زمانی که از پارامترهای مختلف استفاده می‌شود، ضمن کاهش عدم قطعیت انجام کار ساده‌تر است. در روش مونت‌کارلو چون از توزیع احتمال استفاده می‌شود و محدوده پارامتر و فرضیات ابتدایی توسط کاربر بر مبنای تحلیل فیزیکی و منطقی ارائه می‌شود، لذا ضمن تخمین بهتر پارامتر، شبیه‌سازی بهتری از دبی در نقطه خروجی حوضه حاصل خواهد شد. البته تخمین در این شرایط ممکن است بسیار سخت و زمان‌بر باشد، که با استفاده از نمایه خطا و حدود منطقی تعریف شده این مسئله توسط کاربر تعیین و قابل کنترل است.



شکل (۱): موقعیت حوضه آبریز تجن در تقسیمات سیاسی کشور و محدوده ارتفاعی منطقه مورد مطالعه



شکل (۲): موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه آبریز بالادست سد شهید رجایی



شکل (۳): نمایی از ساختار مدل مفهومی هیدرولوژیکی HBV-light (Seibert, 1996)

در نهایت پارامترهای مورد نیاز در ماژول‌های (شکل ۳) تعریف شده در خروجی حوضه آبریز سد شهید رجایی و بر اساس بهترین خروجی در جدول شماره ۱ ارائه شده است. از نمایه‌های آماری RMSE، NS، R^2 و معیار KGE (Kling Gupta Efficiency) نیز برای بررسی دقت خروجی مدل مطابق جدول شماره ۲ ارائه شده است (Abbaspour, et a*l*., 2008 and Kult, et al.,2014). در سال ۲۰۰۳ مقدار نمایه آماری R^2 بیش از ۰/۹ را عالی، ۰/۹-۰/۸ را نسبتاً خوب، ۰/۸-۰/۷ را قابل قبول، ۰/۷-۰/۶ را قابل بحث، ۰/۶-۰/۵ را ضعیف و کمتر از ۰/۵را غیر قابل قبول معرفی کردند(George and Mallery, 2003). همچنین در مورد آماره RMSE هر چه مقدار آن کمتر باشد، نشان از کارایی بهتر مدل است. یکی از معیارهای مفید جهت بررسی تعیین کارایی مدل معیار KGE به شرح زیر است (Knoben et al., 2019). هرچه مقدار KGE بیشتر باشد، مدل عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

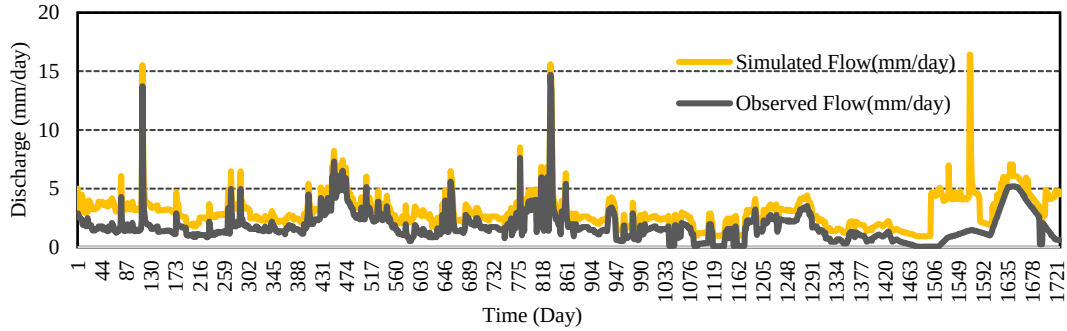
$$\mathbf{KGE} = 1 - \sqrt{(\mathrm{CC}-1)^2 + (a-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (۶)$$

که در رابطه ۶، عبارت CC ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده و مقادیر β و a به ترتیب نسبت انحراف معیار داده مشاهداتی به شبیه‌سازی‌شده و نسبت میانگین مشاهداتی به شبیه‌سازی‌شده است.

نتایج و بحث

برای به دست آوردن مناسب‌ترین داده‌های ماژول برف، خاک و پارامترهای مدل در تابع روندیابی و عکس‌العمل (شکل ۳) از الگوریتم تصادفی مونت‌کارلو استفاده شد. بعضی پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیستند و تعیین آن‌ها مشکل و با عدم قطعیت همراه است. بنابراین بایستی بعد از واسنجی پارامترهای مدل، عدم قطعیت ناشی از وجود خطا در مدل را بررسی کرد و راه‌کارهایی جهت کاهش و کنترل عدم قطعیت نتایج ارائه شود. پارامترهای مورد استفاده مدل و محدوده آن‌ها طی واسنجی خودکار مدل با الگوریتم مونت‌کارلو در جدول ۱ نشان داده شده است. در آنالیز حساسیت پارامترهای ماژول عکس‌العمل (Response routine) مدل پارامترهای ضریب فروکش K_1، K_2 و آستانه خروجی از مخزن UZL به عنوان پارامترهای حساس شناسایی شدند که نشان از تأثیر آب زیرزمینی بر خروجی دبی روزانه‌ی مدل مذکور در محل خروجی سد شهید رجایی دارد. لازم به ذکر است با توجه به حساسیت بالای پارامترهای مذکور در اقلیم و حوضه مورد مطالعه مقادیر فرین بالا و پایین نیز بر اساس مطالعات مختلف و شرایط لایه‌های خاک در منطقه مقداری فراتر از مقادیر پیشنهادی در راهنما و سایر پژوهش‌های موردی انجام شده در اقلیم مختلف نظیر مطالعات (احمدی‌زاده و معروفی (۱۳۹۸)، حیدری و همکاران (۱۳۹۶)، علیپور نصیرمحله و همکاران (۱۳۹۵) و (Seibert, 1997; Shiwakoti, 2017) در نظر گرفته شد، تا نتایج بهتری حاصل شود. برای مثال آستانه خروجی مخزن در محدوده صفر تا ۵۰ در پیشنهاد شده است (Seibert, 1996). در حالیکه در این پژوهش در اجرای شبیه‌ساز مونت‌کارلو صفر تا ۷۰ در نظر گرفته شد. تا خروجی مناسب مطابق ستون آخر

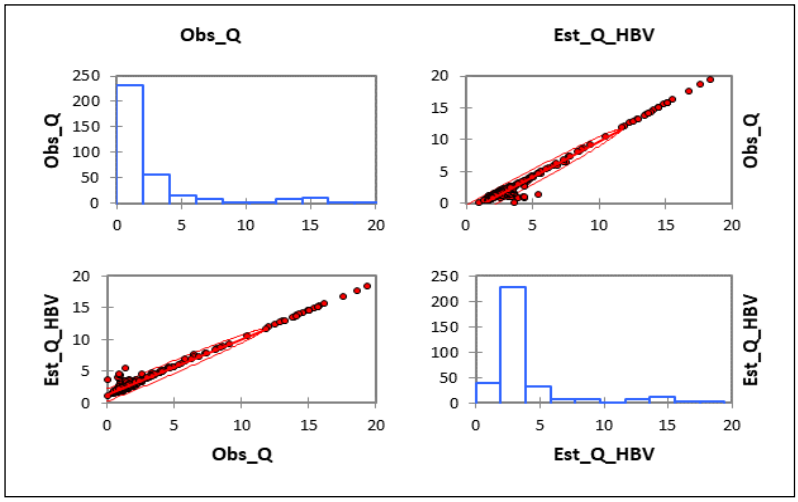
جدول شماره ۱ حاصل شد. تفسیر نتایج شبیه‌سازی مدل در شکل ۴ و ۵ در مرحله صحت‌سنجی بر مبنای پارامترهای خروجی شبیه‌ساز مونت‌کارلو ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود و ضرایب و آماره‌های کارایی مدل نشان می‌دهد ضریب نش ساتکلیف (NS) ۰/۶۶ به دست آمده که مطابق مقاله (Kult, et al.,2014) در محدوده خوب ارزیابی شده است. این خروجی نسبتاً خوب از شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای خروجی شبیه‌ساز مونت‌کارلو در مدل HBV کاملاً در شکل ۴ نمایان شده است. با توجه به توزیع آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در حوضه آبریز که از توزیع نرمال پیروی نمودند، از رویکرد پارامتری برای بررسی همخوانی نقاط پراکنش (شکل ۵) به روش همبستگی پیرسون استفاده شد. در سطح اعتماد ۹۵ درصد همخوانی خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۵) مشاهده شده است.



شکل (۴): مقایسه دبی جریان شبیه‌سازی شده با پارامترهای حاصل از تحلیل مونت‌کارلو در خروجی حوضه سد شهید رجایی

جدول (۱): محدوده‌ی پارامترها و مقادیر نهایی در فرآیند واسنجی مدل مفهمومی HBV با الگوریتم مونت‌کارلو

پارامتر	واحد	توضیح پارامتر	محدوده	خروجی مناسب نهایی
		Snow routine		
TT	C	آستانه دما	-2-0/5	-1.29
CFMAX	mm $\overset{\circ}{C}^{-1}d^{-1}$	فاکتور درجه – روز	0/5-4	3.20
SFCF	-	فاکتور تصحیح برف	0/5-0/9	0.87
CFR	-	ضریب انجماد مجدد	0/05	0.05
CWH	-	ظرفیت ذخیره آب	0/1	0.10
		Soil routine		
FC	mm	بیشینه ذخیره در خاک	100-550	422.7
LP	-	آستانه کاهش تبخیر	0/3-1	0.98
BETA	-	ضریب ذخیره و نفوذ عمقی خاک	1-5	3.44
		Response routine		
PERC	$mm.d^{-1}$	جریان بیشینه از لایه بالایی به پایین	0-4	1.37
UZL	mm	آستانه خروجی از مخزن پایین	0-70	69.26
K_0	d^{-1}	ضریب فروکش (بالای مخزن پایین)	0/1-0/5	0.47
K_1	d^{-1}	ضریب فروکش (پایین مخزن بالایی)	0/01-0/2	0.18
K_2	d^{-1}	ضریب فروکش (مخزن پایین)	0/001-0/05	0.06
		Routing routine		
MAXBAS	d	روند یابی، طول تابع وزنی	1-2/5	2.20



شکل (۵): نمودار نقاط پراکنش و هیستوگرام توزیع داده‌ها جهت مقایسه دقت مدل HBV-light مقادیر شبیه‌سازی شده (Est) در مقابل مقادیر مشاهداتی (Obs) دبی جریان (Q) (راست بالا-مرحله واسنجی، راست پایین-مرحله صحت‌سنجی)

جدول (۲): نتایج نهایی ارزیابی کارایی مدل HBVبرای شبیه‌سازی دبی جریان در خروجی حوضه

مرحله	دوره آماری	نمایه‌های آماری			
		RMSE	NS	R^2	KGE
واسنجی	۱۹۸۱ لغایت ۲۰۰۵	۰/۴۴	۰/۷۳	۰/۷۹*	۰/۷۶
صحت‌سنجی	۲۰۰۶ لغایت ۲۰۱۵	۰/۲۶	۰/۶۶	۰/۸۷*	۰/۶۱

*درسطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است

نتیجه‌گیری

پرواضح است مدل‌های شبیه‌سازی، ساده شده‌ای از سامانه‌های طبیعی هستند، لذا در این مسیر بسته به ساختار مدل، ورودی‌ها و پارامترهای مدل دارای عدم قطعیت هستند. به ویژه منحصر به فرد نبودن مقادیر پارامترها در ماژول‌های (شکل ۳) مختلف مدل HBV منجر به عدم قطعیت در خروجی نتایج خواهند شد. لذا با شناسایی منابع خطا و ایجاد عدم قطعیت می‌توان کنترل بهتری بر خروجی مدل داشت. در این راستا به روش کنترل شده و تصادفی مونت‌کارلو در سرتاسر محدوده منطقی پارامترهای مختلف مدل HBV در خروجی حوضه آبریز سد شهید رجایی انجام شد. با اختصاص کمی پارامترهای مختلف در ترکیب‌ها متفاوت بهترین مقادیر کمی برآورد شد. آن ترکیبی که دارای بهترین شاخص عملکرد بوده انتخاب و در مرحله صحت‌سنجی نتایج دبی برآورد شده با دبی‌های مشاهداتی مقایسه شد. همانطور که نتایج مشاهده شد همخوانی بسیار خوب و بالایی میان آن دو مشاهده شد. این نتایج با دیگر مطالعات موردی که در دنیا انجام شد مقایسه شد. همخوانی بالایی با نتایج مطالعات (Nonki, et al., 2021; Stefnisdóttir, et al., 2021; Shiwakoti, 2017; Lupakov, et al., 2021; Bhattarai, et al., 2018; Niroumandfar, et al., 2018; Steele-Dunne, et al., 2008 و Seibert, 1997) دارد. این نشان دهنده کارایی مدل HBV و استفاده از روش مونت‌کارلو در برآورد پارامترهای بهینه جهت شبیه‌سازی جریان در یک منطقه یا حوضه آبریز دارد، که اندازه‌گیری‌های منطقه‌ای و محلی و میدانی زیادی در آن صورت نپذیرفته است. لذا با توصیه استفاده از این مدل ساده که نسبتاً پیچیدگی کمتری نسبت به سایر مدل‌های مفهومی شبیه‌سازی جریان دارد قابل اعتماد است. همان‌طورکه در دامنه بالا و پایینی پارامترها نیز مشاهده شد مقادیر حاصل نهایی تفاوت چندانی با هم ندارند و بهترین عملکرد بر اساس خروجی شبیه‌ساز مونت‌کارلو

ارائه شد. با توجه به تعیین سطح دقت مدل که مطابق محدوده (۰/۹-۰/۸) ارائه شده در مقاله (George and Mallery, 2003) از دقت خوبی برخوردار بوده است. کارایی روش مونت‌کارلو در تعیین پارامترها در ماژول‌های شکل ۳ در مدل HBV ضمن تایید با نتایج پژوهش نیکخو امیری و همکاران (۱۳۹۸) و احمدی‌زاده و معروفی (۱۳۹۸) تطابق دارد. لذا با حداقل متغیرهای اقلیمی نظیر بارش، دمای حداکثر و حداقل و تبخیر اندازه‌گیری شده در حوضه یا برآوردشده‌ی آن متغیر می‌توان با ارائه پارامترهای مناسب در هر حوضه با اقلیمی متناسب با آن به شبیه‌سازی جریان پرداخت.

مقادیر شاخص نش ساتکلیف و ضریب تعیین در دوره صحت‌سنجی گواه این مدعاست. لذا تعیین پارامترها برای حوضه آبریز متفاوت به روش مونت‌کارلو و ارائه فاکتورهای برف، خاک و توابع هیدرولوژیکی در مدل HBV قادر است تا حدود بسیار مناسبی از عدم قطعیت ناشی از پارامتر را در این مدل مفهومی بکاهد. ارائه پارامترهای بهینه جهت کاهش عدم قطعیت در خروجی مدل و کنترل یکی از منابع مهم بوجود آورنده عدم قطعیت در علم شبیه‌سازی امروزه می‌تواند به دقت نتایج در محدوده‌های اقلیمی مختلف راهگشای مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز باشد

.

قدردانی

از سازمان هواشناسی کشور و شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران که آمار و اطلاعات مورد نیاز این پژوهش را در اختیار نویسندگان قرار داده‌اند، کمال تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

منابع

ابراهیمیان، ص.، قادری، ج. (۱۳۹۳). ارزیابی و واسنجی مدل WMS/HEC-HMS در حوضه آبریز سد مهاباد. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۴(۴)، ۷۰-۸۰.

احمدی‌زاده، م.، معروفی، ص. (۱۳۹۸). تخمین عدم قطعیت در واسنجی فرآیند بارش–رواناب روزانه با استفاده از تابع تشابه تعمیم‌یافته در مدل HBV. علوم و مهندسی آبیاری. **Doi: 10.22055/jise.2018.14179.1106**

آشفته، س.، و مساح بوانی.، ع. (۱۳۸۸). تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب مطالعه موردی حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی. تحقیقات منابع آب ایران، ۵(۲)، ۲۷-۳۹.

حیدری، م.، خزایی، م.ر.، اختری، ع. (۱۳۹۶). اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی و رواناب حوضه توسط مدل HBV تحت سناریوهای مدل BCM2. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۲)، ۱۲۹-۱۳۹.

خیرفام، ح.، مصطفی زاده، ر. و صادقی، س. ح. ر. (۱۳۹۲). تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان گلستان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۴(۷)، ۱۱۴-۱۲۷.

سروش، ف.، و ریاحی مدوار، ح. (۱۳۹۸). تحلیل عدم قطعیت پارامترهای نفوذ مدل شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای WinSRFR با روش مونت‌کارلو. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران). ۵۰(۴)، ۹۹۱-۱۰۰۷.

سلامی، امیر بهداد. (۱۳۸۲). مروری بر روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو. پژوهشنامه اقتصادی، ۳(۸)، ۱۱۷-۱۳۸.

علیپور نصیرمحله. ف.، ح. رضایی.، م. منتظری. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد و آنالیز حساسیت مدل مفهومی بارش رواناب (HBV) مطالعه موردی: حوضه آبریز نازلوچای، ارومیه، چهارمین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری. تهران.

کاووسی، م. و خزیمه نژاد، ح. (۱۴۰۰). بررسی و مقایسه عملکرد ۴ روش مدل‌سازی LS-SVM،NN، GEP و-NFIS PSO در شبیه‌سازی بارش – رواناب (منطقه مورد مطالعه: هلیل رود-سد جیرفت). مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۳)، ۹۶-۱۱۰. **Doi: 10.22125/iwe.2021.128115**

مصطفی‌زاده ر.، بهره‌مند ع. (۱۳۸۸) شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از مدل مخزن خطی ناش در آبخیز جعفرآباد استان گلستان. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۳ (۶) :۱۶-۹.

مصطفی‌زاده، ر.، عسگری، ا. (۱۴۰۰). ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب GR4J در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در حوزه آبخیز نیرچای اردبیل. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۳)، ۷۹-۹۵. **Doi: 10.22125/iwe.2021.128114**

نیکخو امیری، ص.، خوش روش، م. و نوروز ولاشدی، ر. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی سری زمانی جریان در محل خروجی سد شهید رجایی با استفاده از مدل SWAT. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰(۱)، ۶۶-۸۰ . **Doi: 10.22125/iwe.2019.95875**

یعقوبی، م.، و مساح بوانی، ع. (۱۳۹۳). تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد سه مدل مفهومی IHARCES,HBV و HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه‌های نیمه خشک (بررسی موردی: حوضه اعظم هرات-یزد). فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۲)، ۱۵۳-۱۷۱.

Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S., and Yang, H. (2008). Assessing the impact ofclimate change on water resources in Iran. Water Resources Research. 45: 1-16.

Bhattarai, S., Zhou, Y., Shakya, N. M., and Zhao, C. (2018). Hydrological modelling and climate change impact assessment using HBV light model: a case study of Narayani River Basin, Nepal. Nature Environment and Pollution Technology, 17(3), 691-702.

Knoben, W. J., Freer, J. E., and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. Hydrology and Earth System Sciences, 23(10), 4323-4331.

Kult, J. M., Fry, L. M., Gronewold, A. D., and Choi, W. (2014). Regionalization of hydrologic response in the Great Lakes basin: Considerations of temporal scales of analysis. Journal of Hydrology, 519, 2224-2237.

Lupakov, S. Y., Bugaets, A. N., and Shamov, V. V. (2021). Application of Different Structures of HBV Model to Studying Runoff Formation Processes: Case Study of Experimental Catchments. Water Resources, 48(4), 512-520.

Mallery, M., and George, D. (2003). Using SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference. Revista Cubana de Farmacia, 51.

Masih, I., Uhlenbrook, S., Maskey, S., and Ahmad, M. D. (2010). Regionalization of a conceptual rainfall–runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. Journal of hydrology, 391(1-2), 188-201.

Moneim, I. A., Al-Ahmed, M., & Mosa, G. A. (2009). Stochastic and Monte Carlo simulation for the spread of thehepatitis B. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(3), 1607-1615.

Niroumandfar, F., Zaherinia, M., and Yazarloo, B. (2018). Investigating the effect of climate change on river flow using HBV-light rainfall-runoff model; Case study MohammadAbad watershed, Golestan. Irrigation and Water Engineering, 7(4), 152-163.

Nonki, R. M., Lenouo, A., Tshimanga, R. M., Donfack, F. C., and Tchawoua, C. (2021). Performance assessment and uncertainty prediction of a daily time-step HBV-Light rainfall-runoff model for the Upper Benue River Basin, Northern Cameroon. Journal of Hydrology: Regional Studies, 36, 100849.

Rusli, S. R., Yudianto, D., and Liu, J. T. (2015). Effects of temporal variability on HBV model calibration. Water Science and Engineering, 8(4), 291-300.

Seibert, J. (1996). HBV light. User's manual, Uppsala University, Institute of Earth Science, Department of Hydrology, Uppsala.

Seibert, J. (1997). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model: Paper presented at the Nordic Hydrological Conference (Akureyri, Iceland-August 1996). Hydrology Research, 28(4-5), 247-262.

Seibert, J., & Vis, M. J. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrology and Earth System Sciences, 16(9), 3315-3325.

Shiwakoti, S. (2017). Hydrological modeling and climate change impact assessment using HBV light model: a case study of Karnali River basin. Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment, 8(4), 296-304.

Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., Hanafin, J., and Nolan, P. (2008). The impacts of climate change on hydrology in Ireland. Journal of hydrology, 356(1-2), 28-45.

Stefnisdóttir, S., Sikorska-Senoner, A. E., Ásgeirsson, E. I., and Finger, D. C. (2021). Improving the Pareto Frontier in multi-dataset calibration of hydrological models using metaheuristics. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1-30