

**EXTENDED ABSTRACT**

**Uncertainty estimation of rainfall-runoff calibration process using the generalized likelihood method (GLUE) in the HBV model**

M. Ahmadizadeh<sup>1</sup> and S. Marofi<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. of Water Resources Engineering, Department of Water Science Engineering, Bu-Ali Sina University.

2\*-Corresponding Author, Professor, Department of Water Science Engineering, Bu-Ali Sina University (marofi@basu.ac.ir).

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 8 May 2020

Revised: 1 June 2021

Accepted: 2 June 2021

*Keywords:*

Bayesian analysis, Monte Carlo, Equatability, Simulation, Shahid Rajaei Dam.

**TO CITE THIS ARTICLE :**

Ahmadizadeh, M., Marofi, S. (2023). 'Uncertainty estimation of rainfall-runoff calibration process using the generalized likelihood method (GLUE) in the HBV model', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), pp. 111-124. doi: 10.22055/jise.2018.14179.1106.

**Abstract**

The accurate determination of the amount of runoff resulting from precipitation on the surface of the watersheds is accompanied by errors due to the effect of various components, such as soil moisture, evaporation and transpiration, infiltration, and the impossibility of accurately measuring them. Therefore, the simulation of the precipitation-runoff process is associated with uncertainty. Uncertainty in calibrating models is caused by input information, model structure, and used parameters. Quantifying uncertainty is necessary for making decisions in water resource plans. One of the methods of calculating the uncertainty in the simulation process is to use Bayes's theory as the basis of calculations. In this research, an innovative method, which is a combination of Bayes analysis and the Monte Carlo method, taking into account the goodness of fit criteria, under the title of generalized similarity function, was used to calculate uncertainty. To determine the uncertainty of the parameters used in the calibration of the HBV rainfall-runoff model, the equation of daily flow entering the Shahid Rajaei dam in the Tajen catchment was used. The results showed that the mentioned method can detect uncertainty in the model. So the Nash index was obtained in the range of 0.4 to 0.68. The mentioned method is effective in identifying and introducing the co-termination theory, using a set of different parameters in the calibration of the model. So that by using the set of parameters, the same value of the goodness of fit index is obtained.

**Introduction**

In hydrologic studies considering and quantifying uncertainty are of high importance for applying the rainfall-runoff models. In general, the uncertainty sources of rainfall-runoff models are categorized into three major groups namely, the uncertainty of input data, model structure, and model parameters. It is crucial to quantify uncertainty to consider the future risks due to simulated data. The applied equations have multiple parameters. It is possible to quantify the uncertainty, applying the parameters and defining a likelihood function. Uncertainty analysis of models helps to investigate

their efficiency better, comprise the results and finally select the appropriate model. Different methods such as Bayesian inference, data assimilation (Moradkhani, 2005), and Bayesian model averaging are employed and developed for identifying uncertainty. One of the above-mentioned methods which are applied frequently for uncertainty estimation regarding the calibration of models is Bayesian theory. In this research, an innovative method based on the combination of Bayesian theory, Monte Carlo method, and likelihood function have used to quantify the uncertainty, namely generalized likelihood unbiased estimation. This method is based on the equatability principle. This principle suggests that various parameter sets can reach the same value in terms of the likelihood function. This principle shows that by applying the optimization and automatic methods (Soroshian, 1980, Duan et al., 1992) aiming to find the optimum solution, it is not possible to reach acceptable results, as different parameter sets may reach the same likelihood function value. Therefore, it is not logical to consider merely one optimum parameter set, and feasible parameter sets should be used in the analysis phase. With this strategy, one can consider the role of parameter uncertainty in the calibration of rainfall-runoff models. In this regard, it is also necessary to define utility constraints for assessing the calibration results to discard the inappropriate parameter sets. In the past two decades, numerous studies have been implemented, aiming to investigate uncertainty with different methods. In a study, the role of erroneous in the calibration of the rainfall-runoff model has been evaluated to quantify uncertainty with an innovative approach of Bayesian theory, and the Monte Carlo method (Beven & Binely, 1992). Finally, to quantify the uncertainty, generalized likelihood uncertainty estimation is used. It has been applied for calculating the uncertainty of modeling daily stream flow upstream of the Shahid Rajae dam in the Tajan watershed in Mazandaran province with the HBV model.

### **Methodology**

The HBV hydrology model is a computer simulation model developed to analyze river discharge and water pollution. This method contains uncertainty that should be quantified with an appropriate method such as Bayesian inference. Bayesian inference is a method of statistical inference in which Bayes' theorem is employed to update the probability of a hypothesis as more information becomes available. Bayesian inference is a crucial technique in statistics, especially in hydrological statistics. Bayesian updating is particularly important in the dynamic analysis of a sequence of historical data such as streamflow that sheds from a watershed, as outflow.

### **Results and Discussion**

The results showed that it is possible to quantify the uncertainty with the generalized likelihood unbiased estimation approach. Discarding the inappropriate results has been implemented by defining the constraint value of 0.5. Moreover, the Nash-Sutcliffe measure varied between 0.4 and 0.68. The results have shown that the GLUE approach is a suitable method for both quantifications of uncertainty and also an investigation of the equatability theory which states that different parameter sets can result in a similar goodness of fitness index value. The boundary of uncertainty related to extreme values is wider owing to flood events in the Tajan watershed, hence the model results are not satisfactory on days with a flood. However, it is observed that normal daily streamflow due to base flow and the recession limb of the hydrograph have better simulation outputs.

### **Conclusions**

The results of this study showed that uncertainty analysis by applying generalized likelihood unbiased estimation can help in recognizing the role of parameter uncertainty in the calibration of the HBV rainfall-runoff model. It also resulted that the Nash-Sutcliffe efficiency index has a good performance in terms of the defined likelihood function. It is vital to choose a constraint for the rejection of inappropriate simulations. Therefore, the uncertainty of different days is quantified based on the acceptable likelihood functions and regarding the related calculations for 95% and 5%

confidence intervals. Moreover, the average value of the optimum Nash-Sutcliffe is obtained at 0.68. It is worth noting that uncertainty analysis with generalized likelihood unbiased function, not only do consider the different parameter sets, but also investigates the effect of model structures on the amount of uncertainty that rainfall-runoff models contain. The results also showed that various parameter sets may reach the same amount of efficiency function value due to the equitability principle. Hence, it is crucial to consider the equitability principle in the model simulation phase. In conclusion, by applying the abovementioned principle, one can quantify the uncertainty of rainfall-runoff models and consider its role of it in hydrologic studies.

### Acknowledgments

The authors express their special thanks and gratitude to the Bu-Ali Sinal University Managers for their support in providing this research process.

### References

- 1- Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), pp.279-298. Beven, K.J. 2001. *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*. Wiley, Chichester. 488 pages.
- 2- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), pp.1015-1031.
- 3- Moradkhani, H., Hsu, K.L., Gupta, H. and Sorooshian, S., 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water resources research*, 41(5).
- 4- Sorooshian, S. and Dracup, J.A., 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrology rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, 16(2), pp.430-442.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## تخمین عدم قطعیت در واسنجی فرآیند بارش- رواناب روزانه با استفاده از

### تابع تشابه تعمیم یافته در مدل HBV

مجتبی احمدی زاده<sup>۱</sup> و صفر معروفی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته دوره دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی علوم آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان. marofi@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲

#### چکیده

تعیین دقیق میزان رواناب حاصل از بارش در سطح حوضه‌های آبریز، به دلیل تأثیر مؤلفه‌های مختلف، نظیر رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، نفوذ و عدم امکان اندازه‌گیری دقیق آن‌ها، توأم با خطا است. از این‌روی شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب با عدم قطعیت همراه است. عدم قطعیت در واسنجی مدل‌ها، ناشی از اطلاعات ورودی، ساختار مدل و پارامترهای به کار رفته می‌باشد. کمی‌سازی عدم قطعیت، برای تصمیم‌گیری در طرح‌های منابع آب، ضروری است. یکی از روش‌های محاسبه عدم قطعیت در فرآیند شبیه‌سازی، استفاده از تئوری بیز به عنوان پایه محاسبات است. در این تحقیق از روش ابتکاری که ترکیبی از تحلیل بیز و شیوه مونت کارلو با در نظر گرفتن معیارهای نکویی برازش است، تحت عنوان تابع تشابه تعمیم یافته در محاسبه عدم قطعیت استفاده گردید. به منظور تشخیص عدم قطعیت پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل بارش- رواناب HBV از معادله جریان روزانه ورودی به سد شهید رجایی در حوضه آبریز تجن، استفاده گردید. نتایج نشان داد روش مزبور قابلیت تشخیص عدم قطعیت در مدل را دارد. به طوری که شاخص ناش در در بازه  $0/4$  تا  $0/6$  به دست آمد. روش مزبور در خصوص شناسایی و معرفی نظریه همپایانی، با استفاده از دسته پارامترهای مختلف در واسنجی مدل، موثر است. به طوری که با به کارگیری دسته پارامترها، مقدار یکسانی از شاخص نکویی برازش، حاصل می‌گردد.

کلید واژه‌ها: تحلیل بیز، مونت کارلو، همپایانی، شبیه‌سازی، سد شهید رجایی.

#### مقدمه

با توجه به ماهیت فرآیند بارش- رواناب، امکان محاسبه دقیق رواناب، در حوضه‌های آبریز، به صورت قطعی وجود ندارد. پیچیدگی‌های فراوانی در مؤلفه‌های مختلف موثر بر فرآیند بارش- رواناب، نظیر نفوذ، ذوب برف و تبخیر و تعرق، در محاسبه رواناب در خروجی حوضه‌ها وجود دارد. از این‌روی با استفاده از فرضیات علمی و ساده‌سازی روابط حاکم بر این پدیده‌ها، آن‌ها را مدل نمود. در نتیجه استفاده از روابط توسعه داده شده، عدم قطعیت بر خروجی مدل‌ها وارد می‌گردد. لذا نتایج را به صورت قطعی نمی‌توان به کار برد و همواره تحلیل‌های هیدرولوژیکی با عدم قطعیت همراه است.

در مطالعه‌های هیدرولوژیکی شناخت عدم قطعیت و میزان آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به طور کلی منابع عدم قطعیت موجود در مدل‌های مورد استفاده به سه دسته، شامل از اطلاعات ورودی، ساختار مدل و پارامترهای مدل، تقسیم می‌شود. محاسبه عدم قطعیت برای در نظر گرفتن ریسک‌های آبی در زمینه اطلاعات تولیدی، مورد نیاز می‌باشند. روابط مورد استفاده در مدل‌ها دارای پارامترهای متعددی می‌باشند. می‌توان بر مبنای این پارامترها و نیز تعریف شاخص‌های نکویی برازش، نسبت به

محاسبه عدم قطعیت اقدام نمود. تحلیل عدم قطعیت مدل‌ها، می‌تواند در شناسایی کارایی آن‌ها، مقایسه نتایج و در نهایت انتخاب مدل مناسب، کمک نماید. روش‌های مختلفی نظیر تحلیل کلاسیک بیز، شبه بیز، بروزرسانی متوالی داده‌ها و میانگین‌گیری چندگانه مدل‌ها، برای شناسایی عدم قطعیت معرفی و استفاده شده‌اند (Moradkhani et al., 2005). یکی از روش‌های محاسبه عدم قطعیت در فرآیند واسنجی مدل‌ها استفاده از تئوری بیز به عنوان پایه محاسبات می‌باشد. در این تحقیق روش ابتکاری تخمین عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته که ترکیبی از تحلیل بیز و شیوه مونت کارلو و معیارهای نکویی برازش (Generalized likelihood unbiased estimation) می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. این شیوه بر مبنای نظریه همپایانی (Equiparity) می‌باشد. نظریه همپایانی بیان می‌دارد که مجموعه پارامترهای متعددی می‌توانند به یک معیار مشابه در سنجش کارایی مدل‌های بارش- رواناب منتهی شوند. نظریه همپایانی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و خودکار در یافتن جواب برتر در فضای پارامتری چندان نمی‌تواند اثربخش باشد. همچنین در فضای پارامتری، دسته جواب‌های گوناگون، به شاخص ارزیابی یکسانی، ختم می‌شوند (Sorooshian and Dracup, 1980; Duan et al., )

به کارگیری شیوه ترکیبی نمونه‌گیری مونت‌کارلو و زنجیره مارکف (Markov chain Monte Carlo) در واسنجی سه مدل متفاوت، در دو حوضه آبریز متفاوت، به کار برده شدند (Blasone et al., 2008). نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که شیوه پیشنهادی نسبت به شیوه متداول تخمین عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه تعمیم‌یافته، نتایج بهتری را ارائه می‌نماید. روش تابع تشابه تعمیم‌یافته می‌تواند روابط بین پارامترها و غیرخطی بودن مدل را به شکل ضمنی، از طریق تابع درست‌نمایی مورد تحلیل و بررسی قرار دهد (Vázquez et al., 2009). به دلیل تنوع جغرافیایی در حوضه‌های آبریز، مطالعه عدم قطعیت پارامترهایی که فرآیند مدل‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، دارای اهمیت بالایی می‌باشد (Xu et al., 2011). عدم قطعیت پارامترها در مدل‌سازی هیدرولوژیکی امری اجتناب ناپذیر می‌باشد، به‌طوری‌که تحلیل این مهم، بایستی قبل از پیش‌بینی‌ها، در فرآیند تصمیم‌گیری انجام گیرد. مطالعه‌های عدم قطعیت پارامترها در زمینه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب، Zacharias et al., (2005)، پیش‌بینی مقادیر سیلاب Jorgeson و Julien (2005)، ارزیابی تغییرات تغییر اقلیم Kingston و Taylor (2005) در مطالعه‌های متعدد دیگری انجام شده است. در مطالعه حاضر هدف اصلی کمی‌سازی عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل بارش رواناب روزانه HBV در سد مخزنی شهید رجایی در حوضه آبریز تجن شکل (۱) با مساحت ۱۲۵۰ کیلومتر مربع در استان مازندران در سال‌های آبی ۸۱-۸۰ لغایت ۸۲-۸۱ می‌باشد. با توجه به اهمیت استفاده از مدل‌های بارش- رواناب روزانه، و تعیین عدم قطعیت مدل‌های مزبور در بازه‌های اطمینان مورد نظر و نیز عدم سابقه تحقیقی در این خصوص، دلیل استفاده از روش ترکیبی تحلیل بیز و شیوه مونت-کارلو، در حوضه‌های آبریز کشور می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### HBV Model

این مدل می‌تواند به شکل توزیعی یا نیمه‌توزیعی به وسیله طبقه‌بندی حوضه مورد مطالعه به کار برده شود (Bergström, and Graham, 1998). مدل مذکور از چهار بخش اصلی شامل بخش‌های ذوب برف، رطوبت خاک و بارش موثر، تبخیر- تعرق و رواناب می‌باشد. شکل (۲) فرآیندهای عمومی نسخه یکپارچه و آموزشی مدل را نشان می‌دهد. اطلاعات مورد استفاده در این مدل، شامل بارش، دما و همچنین اطلاعات متوسط بلندمدت ماهانه دما و تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، مدل مذکور دارای بخش تحلیل بارش که شامل باران یا برف، بر پایه دمای ثبت شده در هر گام زمانی می‌باشد. باران یا ذوب برف، سپس در بخش رطوبت خاک مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند و بارش موثر در رواناب محاسبه می‌گردد.

بنابراین در نظر داشتن صرفاً یک مجموعه پارامتر بهینه، نمی‌تواند چندان منطقی باشد، لذا می‌بایست فضای پارامترها را، به نحوی استفاده نمود که عدم قطعیت حاصل از پارامترها، در فرآیند واسنجی مدل، محاسبه شود. در این خصوص لازم است که با تعریف قید مطلوبیت به‌عنوان معیار واسنجی، نسبت به حذف مجموعه پارامترهای ناکارآمد اقدام گردد. در دو دهه گذشته مطالعه‌های مختلفی به منظور بررسی عدم قطعیت با شیوه‌های مختلف، صورت گرفته است. در تحقیقی، با هدف کمی‌سازی عدم قطعیت، از تلفیق تئوری بیز (Baysian theory) و شیوه مونت‌کارلو (Monte Carlo)، با استفاده از معیار نکویی برازش، برای شناسایی میزان خطا در واسنجی مدل‌های بارش رواناب استفاده گردید (Beven and Binnely, 1992). ایشان میزان عدم قطعیت واقعه‌های مختلف بارش- رواناب را محاسبه و ارائه نمودند. در تحقیقی، تحلیل مونت‌کارلو و الگوریتم متروپلیس- هسستینگ (Metropolis-Hasting Algorithm) ارائه شده توسط Metropolis et al (1953)، به منظور شناسایی عدم قطعیت، سه مدل مختلف با پارامترهای متفاوت، مورد بررسی قرار گرفت (Kuczera and Parent, 1998). تحلیل عدم قطعیت در ناحیه‌بندی و برون‌یابی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری به کار برده شده است (Vrugt et al., 2006). در تحقیقی نشان داده شد که روش پیشنهادی Beven و Binely (1992) در صورتی که با توابع احتمالی مناسب به کار گرفته شود، می‌تواند بازه‌های عدم قطعیت را برای پیش‌بینی‌های آبی به خوبی محاسبه نماید. این موضوع به دلیل آماری نیز قابل قبول می‌باشد (Stedinger et al., 2008). شیوه آماری پیشنهادی Beven و Binely (1992) در شبیه‌سازی مدل‌های بارش- رواناب، با شیوه بیز به منظور شناسایی عدم قطعیت پارامترهای مورد استفاده، به کار برده شد (Jin et al., 2010). در استفاده از تابع تشابه نیز مطالعه‌های مختلفی توسط محققین مورد نظر بوده است (Mantovan and Todini, 2006). در تحقیقی نشان داده شد که عدم قطعیت حاصل از ساختار مدل مفهومی بیلان آب، بیشتر از عدم قطعیت پارامترهای به کار رفته در آن، می‌باشد (Engeland et al., 2005). عدم قطعیت حاصل از داده‌های ورودی، با استفاده از افزودن مقادیر تصادفی به این داده‌ها، بررسی شدند و رابطه تجربی بین خطای پارامترها و مقادیر تصادفی ارائه گردید (Chowdhury and Sharma, 2007). شناسایی عدم قطعیت حاصل از ساختار مدل، با توسعه گزینه‌هایی بررسی شد (Marshall et al., 2004). همچنین در تحقیقی با ترکیب خروجی مدل‌های مختلف، نسبت به تولید مجموعه‌ای از هیدروگراف‌ها، اقدام گردید تا بدین ترتیب عدم قطعیت ساختار مدل مشخص گردد. بررسی مزبور نشان داد که کیفیت اطلاعات بارش‌های به کار برده شده در فرآیند واسنجی، بر خطاهای شبیه‌سازی و نیز مقادیر پارامترها اثرگذار می‌باشند (Xu, 2001). تخمین عدم قطعیت با تابع تشابه تعمیم‌یافته و با

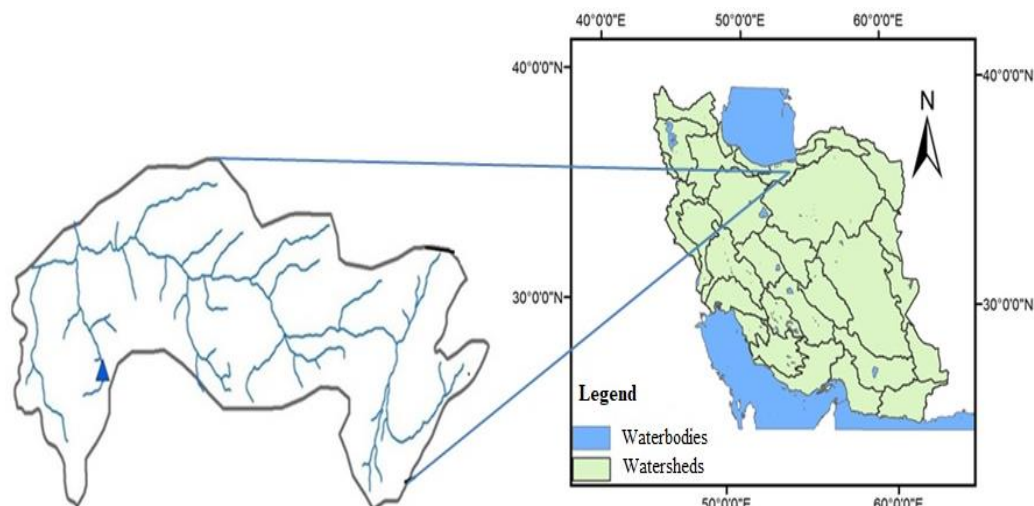


Fig. 1- The location of Shahid Rajaee Dam catchment area in the Tajen catchment area  
 شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز سد شهید رجایی در حوزه آبریز تاجن

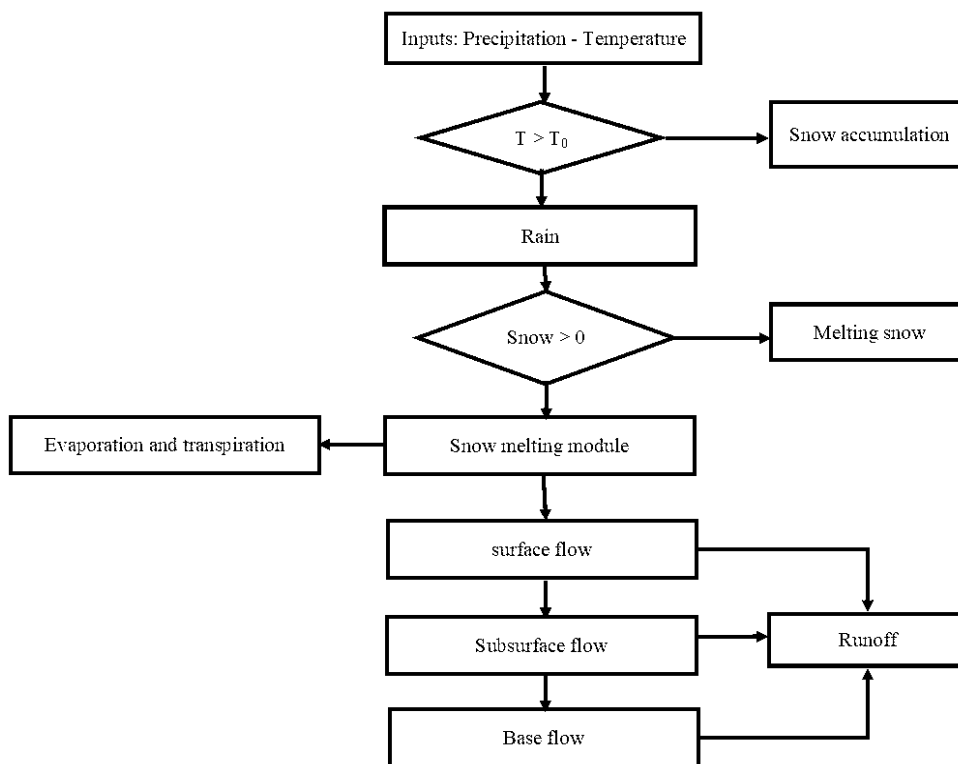


Fig. 2- Process of the HBV model  
 شکل ۲- روندنمای مدل HBV

رواناب بخش‌های مختلف را با توجه به توابع مختلف نشان می‌دهند. در این معادله‌ها ضرایب  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$  و  $L$  و  $A$  به ترتیب معرف ضریب ذخیره جریان سطحی، ضریب ذخیره جریان زیرسطحی، ضریب جریان پایه، سطح آب مخزن زیرین، سطح آب مخزن بالایی، تراز آب و مساحت حوزه آبریز می‌باشند.

$$Q_0 = K_0 \cdot (S_u - L) \cdot A \quad S_u > L \quad \text{اگر (۱)}$$

بخش باقی‌مانده بارش به شکل رطوبت ذخیره در خاک مشارکت می‌نماید که بخشی از آن از طریق تبخیر از دسترس خارج می‌شود. خروجی اصلی مدل رواناب بوده که شامل سه بخش رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی و رواناب پایه است. این مدل شامل پارامترهای متعددی می‌باشند که بایستی بر مبنای داده‌های مشاهداتی واسنجی شوند. در تحقیق حاضر ۱۰ پارامتر اصلی مبنای تحلیل و بررسی قرارگرفتند و در فرآیند واسنجی مدل ارزیابی شدند. روابط (۱) تا (۵)،

در هر گام زمانی به صورت ضربی در محاسبه توزیع پسین می‌شود. این خاصیت وزن بیشتری را به مقادیر جریان در بازه‌های زمانی جدیدتر تعلق می‌دهد. و نقش خود را در توزیع پسین تابع درستیابی نمایان می‌کند. الگوریتم این شیوه در تحقیق انجام شده توسط Kuczera و Parent (1998) شرح داده شده است. طرح زنجیره مارکف یک شیوه عمومی برای نمونه‌گیری از توزیع پسین می‌باشد. این شیوه بر خلاف نمونه‌گیری معمولی، نمونه‌هایی را بر پایه گام‌های تصادفی که با توزیع پسین تطبیق می‌یابد، تولید می‌نماید. در مواردی که توزیع مینا با توزیع پسین متفاوت است، زنجیره مارکف نمونه‌های مناسب‌تری تولید می‌نماید. یکی از مشکلات عمده در تحلیل بیز انتخاب تابع احتمال پیشنهادی برای تابع درست‌نمایی می‌باشد.

### تخمین عدم قطعیت مدل هیدرولوژیکی

تخمین عدم قطعیت بر مبنای روش بیزی با استفاده از شبیه‌سازی‌های مدل و فضای پارامترهای مدل انجام می‌گیرد. توزیع جریان‌های شبیه‌سازی شده از توزیع پسین محاسبه می‌گردند. توزیع پسین از ضرب نمودن توزیع اولیه پارامترها و تابع درست‌نمایی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در بازه زمانی مورد نظر محاسبه می‌گردند. با استفاده از رابطه بیز، مقدار تابع پسین مدل از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$f(\theta | z) = L(z | \theta) \cdot f(\theta) \quad (7)$$

در این رابطه  $f(\theta)$  توزیع اولیه پارامترها می‌باشد و  $L(z|\theta)$  تابع درست‌نمایی مقادیر مشاهداتی ( $z$ ) است. رابطه (۷) در محاسبه محدوده اطمینان شبیه‌سازی‌های مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رابطه شامل تمام پارامترهای به کار گرفته شده در مدل می‌باشند. برای محاسبه عدم قطعیت نیاز به لحاظ نمودن پارامترها به صورت تفکیکی نمی‌باشد. همچنین توزیع حاشیه‌ای پارامترها به تنهایی یا گروهی از آن‌ها با استفاده از تجمیع توزیع پسین فضای پارامترها قابل محاسبه می‌باشند. در محاسبات هیدرولوژیکی، توزیع‌های پسین بر مبنای توزیع درست‌نمایی در دوره واسنجی به روزرسانی می‌گردد. به منظور به کارگیری روش‌های آماری متداول در تخمین عدم قطعیت و استفاده از روش حداقل مربعات معمولی بایستی شرایطی فراهم باشد که توزیع دنباله خطای حاصل از مقادیر شبیه‌سازی شده دو به دو، مستقل بوده و دارای توزیع یکسان باشند. توزیع پیش‌بینی‌های مدل، بستگی به مدل غیرخطی هیدرولوژیکی و خطاهای مدل دارد. شیوه پیشنهادی برای محاسبه بازه اطمینان جریان پیش‌بینی شده، در به کارگیری روش تخمین ناریب تابع درست‌نمایی، حذف خطاهای آماری از توزیع مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد. معادله این شیوه به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$P_r(Y_t | z) = \int f(\theta | z) d\theta \quad (8)$$

$$Q_0 = 0 \quad S_u \leq L \quad (2) \text{ اگر}$$

$$Q_0 = K_1 \cdot S_u \cdot A \quad (3)$$

$$Q_{perc} = K_{perc} \cdot S_u \cdot A \quad (4)$$

$$Q_2 = K_2 \cdot S_l \cdot A \quad (5)$$

### روش تحلیل بیز

فرض بر این است که متغیر تصادفی  $Y$  با مقدار  $y$  بوده و پارامتر  $\theta$ ، دارای توزیع اولیه  $P(\theta)$  می‌باشد. پارامتر  $\theta$  بر پایه داده‌های مشاهداتی یا بر مبنای قضاوت کارشناسی، تخمین زده می‌شود. همچنین  $L(Y|\theta)$  تابع درست‌نمایی را تعریف می‌کند. این تابع بر مبنای داده‌های مشاهداتی محاسبه می‌گردد. تئوری بیز روشی را برای محاسبه توزیع ثانویه پارامتر  $\theta$ ، فراهم می‌آورد که بر مبنای توزیع اولیه و نیز توزیع درست‌نمایی بوده و مطابق معادله (۶) محاسبه می‌گردد (Beven, 2001).

$$P(\theta | Y) = \frac{L(Y | \theta) \cdot P(\theta)}{L(Y | \theta) \cdot P(\theta)} \propto L(Y | \theta) \cdot P(\theta) \quad (6)$$

در اغلب موارد به‌ویژه در مدل‌های هیدرولوژی توزیع پسین دارای یک توزیع استاندارد نمی‌باشد و توزیع‌های مختلفی را می‌توان با توجه به خواص اطلاعات مورد تحلیل برای این توزیع تعریف نمود. در این توزیع‌ها نقش خطا و اطلاعات شبیه‌سازی شده بسیار اهمیت دارد. در تحلیل بیز، الگوریتم متروپلیس - هستینگ، شیوه مونت‌کارلو زنجیره مارکف مجموعه‌ای از پارامترها بر پایه زنجیره مارکف تولید می‌نماید که به توزیع پسین همگرا می‌گردند. این مجموعه از یک مقدار اولیه شروع شده و سپس با استفاده از توزیع مورد نظر، پارامترها تولید می‌شوند. سپس با توجه به معیار رد یا پذیرش پارامترها، مجموعه پارامترهای برتر تکمیل می‌شوند. در استفاده از توزیع بیز فرآیند انجام در اغلب موارد به‌ویژه در مدل‌های هیدرولوژی توزیع پسین دارای یک توزیع استاندارد نمی‌باشد و توزیع‌های مختلفی را می‌توان با توجه به خواص اطلاعات مورد تحلیل برای این توزیع تعریف نمود. در این توزیع‌ها نقش خطا و اطلاعات شبیه‌سازی شده بسیار اهمیت دارد. در تحلیل بیز، الگوریتم متروپلیس - هستینگ، شیوه مونت‌کارلو زنجیره مارکف مجموعه‌ای از پارامترها بر پایه زنجیره مارکف تولید می‌نماید که به توزیع پسین همگرا می‌گردند. این مجموعه از یک مقدار اولیه شروع شده و سپس با استفاده از توزیع مورد نظر، پارامترها تولید می‌شوند. سپس با توجه به معیار رد یا پذیرش پارامترها، مجموعه پارامترهای برتر تکمیل می‌شوند. در استفاده از توزیع بیز فرآیند انجام محاسبات به صورت متوالی و بازگشتی می‌باشد و توزیع‌های پسین محاسبه شده در هر گام به‌عنوان توزیع اولیه گام بعدی در محاسبات لحاظ می‌شوند. استفاده متوالی از توزیع بیز سبب ورود مجموع خطاها

معیارناش - ساتکلیف با توجه به نتایج محاسبه شد ( Nash and Sutcliffe, 1970). گزینه‌های نامطلوب از دسته پارامترهای مختلف حذف شدند. قید مطلوبیت ۰/۵ برای حذف نتایج نامناسب در نظر گرفته شد و دسته پارامترهایی که نتایج شاخص آن‌ها کمتر از این حد بود، حذف گردیدند و با توجه به دسته‌های باقی‌مانده، تابع تجمعی احتمال به مقادیر باقی‌مانده برازش داده شد. همچنین نسبت به محاسبه دامنه چارکی برای محاسبه عدم قطعیت فرآیند واسنجی اقدام گردید. لازم به ذکر است که توزیع پسین با توجه به تحلیل بیز و محاسبات انجام شده در پایان مطابق رابطه (۱۲) می‌باشد که برابر با ضریبی از تابع تشابه است. در صورتی که بخواهیم تابع تجمعی احتمال را بر آن برازش دهیم، بایستی مقادیر تابع به حاصل جمع مقایر تابع تشابه طبق رابطه (۱۳) در بازه مورد نظر تقسیم شوند.

$$R_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^f - Q_t^b)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^f - \bar{Q}_0)^2} \quad (11)$$

$$f_{\theta|Q}[\theta|Q] = k \exp \left[ -\frac{n.S^2}{2\sigma^2} \right] \quad (12)$$

$$P_i = \frac{f_{\theta|Q}[\theta_i|Q]}{\sum_{i=1}^m f_{\theta|Q}[\theta_i|Q]} \quad (13)$$

جدول (۱) محدوده پارامترهای مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد.

در این رابطه  $Y_t$  مقدار قطعی جریان می‌باشد. بازه اطمینان معمولاً در محدوده ۹۰ درصد محاسبه می‌شود. برای محاسبه این محدوده از رابطه‌های (۹) و (۱۰) استفاده می‌گردد.

$$P(z_t < z_l | z) = 0.05 \quad (9)$$

$$P(z_t < z_u | z) = 0.95 \quad (10)$$

### تخمین عدم قطعیت با استفاده از روش GLUE

روش تخمین عدم قطعیت، با استفاده از تابع تشابه تعمیم‌یافته در سال ۱۹۹۲، بر اساس مبانی قبلی توسعه داده شد (Hastings, 1970). مراحل انجام این روش در روند نمای شکل (۳) نشان داده شده است. در این شیوه مقادیر تابع تشابه به‌عنوان وزن‌های نسبی از هر مجموعه پارامتر، محاسبه می‌شوند. در این شیوه تابع تشابه و مقادیر آستانه پذیرش، اختیاری بوده و با توجه به شرایط انتخاب می‌شوند. در تحقیق حاضر با توجه به اینکه در مطالعات مختلف، تابع تشابه ناش - ساتکلیف رابطه (۱۱)، مورد استفاده قرار گرفته است. لذا این تابع به‌عنوان معیار نکویی برازش مورد استفاده قرار گرفت.  $Q_0^f$  و  $Q_0^b$  به ترتیب مقدار جریان شبیه‌سازی شده، جریان مشاهداتی و متوسط جریان مشاهداتی در دوره زمانی مورد نظر می‌باشند. با توجه به شیوه پیشنهادی در ابتدا با استفاده از توزیع یکنواخت نسبت به تولید اعداد تصادفی با توجه به محدوده پارامترها به‌عنوان توزیع اولیه به جداسازی پارامترها اقدام گردید. لذا فضای حالت مورد نظر مطابق شکل (۴) در فرآیند واسنجی ایجاد گردید مدل به تعداد ۵۰۰۰ بار اجرا شد و

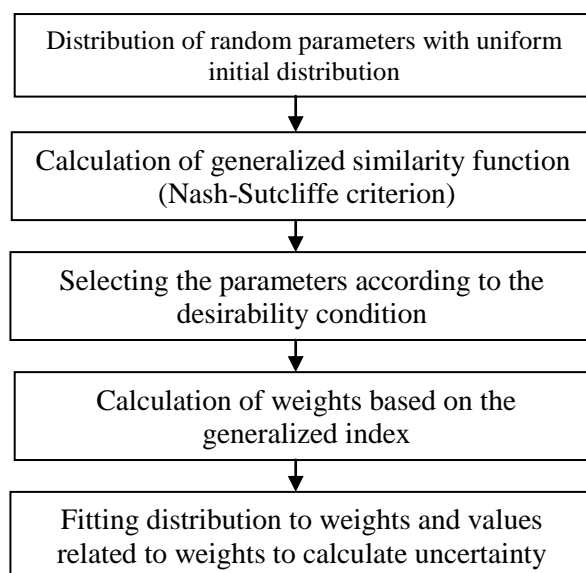


Fig. 3- The uncertainty estimation method using the GLUE method

شکل ۳- شیوه برآورد عدم قطعیت با استفاده از روش GLUE



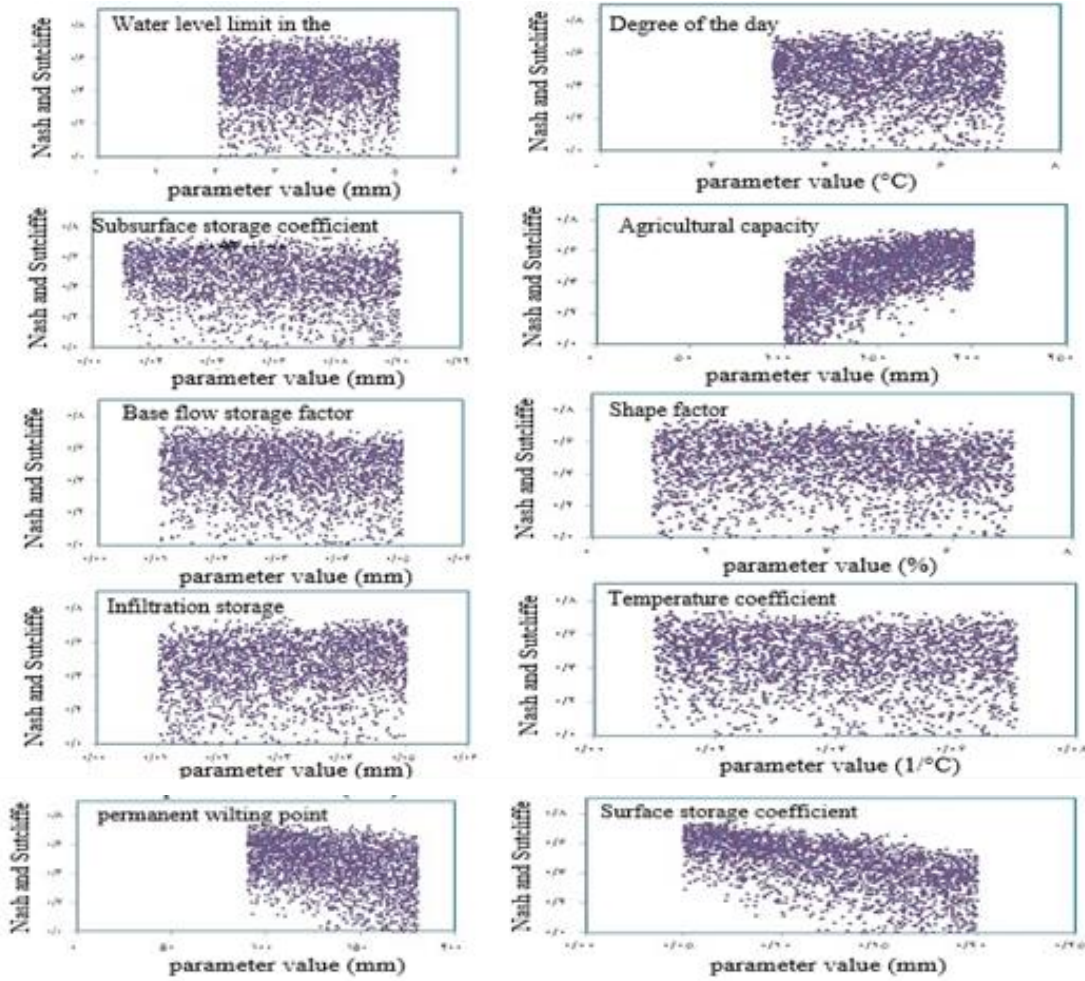


Fig. 4- The graph of the produced values of the parameters using the initial distribution and the degree of similarity function resulting from them in the implementation of the model based on the Nash-Sutcliffe index

شکل ۴- نمودار مقادیر تولید شده پارامترها با استفاده از توزیع اولیه و میزان تابع تشابه حاصل از آنها در اجرای مدل بر مبنای شاخص ناش- ساتکلیف

جدول ۱- محدوده مقادیر پارامترهای مدل HBV

Table 1- The range of values of the HBV model parameters

| Row | Parameter                   | Equivalent | Unit | Range  | Row | Parameter                      | Equivalent | Unit     | Range  |
|-----|-----------------------------|------------|------|--------|-----|--------------------------------|------------|----------|--------|
| 1   | Day degree                  | DD         | °C   | 2-8    | 6   | Water level limit in the tank  | L          | mm       | 0-6    |
| 2   | Agricultural capacity       | FC         | mm   | 75-225 | 7   | Infiltration storage           | $K_p$      | mm       | 0-0.06 |
| 3   | Shape factor                | Beta       | -    | 0-8    | 8   | Subsurface storage coefficient | $K_1$      | mm       | 0-0.15 |
| 4   | Surface storage coefficient | $K_0$      | mm   | 0-0.25 | 9   | Permanent wilting point        | pwp        | mm       | 70-220 |
| 5   | Base flow storage factor    | $K_2$      | mm   | 0-0.06 | 10  | Temperature coefficient        | c          | $C^{-1}$ | 0-0.08 |

## نتایج و بحث

### توزیع اولیه پارامترها

با توجه به مراحل انجام تحلیل، در گام اول تخمین عدم قطعیت، توزیع اولیه پارامترها تعیین می‌گردد. در انتخاب توزیع اولیه لازم است با توجه به تجربه، برای انتخاب توزیع مناسب برای تولید مجموعه پارامترها اقدام نموده و توزیع مورد نظر، تمام فضای حالت را پوشش دهد تا در مرحله واسنجی مدل، بتوان شبیه‌سازی مناسبی از مشاهدات به دست آورد. در تئوری بیز، تعیین توزیع اولیه پارامترها به معنی شناخت اولیه از پارامتر مورد نظر می‌باشد. به عبارت دیگر به منظور رفع ابهام از پارامترها، توزیع اولیه پارامترها تعیین می‌گردد، تا بررسی‌های لازم در خصوص فرآیند شبیه‌سازی انجام گیرد. در این تحقیق توزیعی یکنواخت، به عنوان توزیع اولیه در ایجاد مجموعه پارامترها، برای واسنجی مدل HBV مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به پارامترهای ده‌گانه مدل نسبت به شبیه‌سازی با توجه به داده‌های ورودی اقدام شد.

در شکل (۴) محدوده پارامترها و مقادیر محاسبه شده شاخص ناش- ساتکلیف برای پارامترهای مدل نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، پارامترهای ظرفیت زراعی و ضریب ذخیره سطحی، در محدوده مورد نظر تراکم یکنواختی نداشته و در مقادیر پایینی، مقادیر بیشتری را در محاسبات شامل شده‌اند. اما برای سایر پارامترها مقادیر لحاظ شده به صورت یکنواخت در محدوده عددی پارامترها در شبیه‌سازی مشارکت داشته‌اند.

با توجه به عدم شناخت از توزیع مناسب قابل برازش بر پارامترهای مورد استفاده در مدل، توزیع یکنواخت، توزیعی نارایب محسوب می‌گردد که می‌توان از آن در محاسبات مورد نیاز، در قالب فرمول بیز استفاده نمود. توزیع مورد نظر را توزیع غیرمعرف می‌نامند. زیرا وضعیت واقعی توزیع برازش یافته بر پارامترها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است دو پارامتر ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در محدوده مورد نظر تغییرات یکنواختی را نداشته و تجمع بیشترین مقادیر برای این دو پارامتر به ترتیب در حد پایین و بالا می‌باشد. اما در خصوص پارامترهای ضرایب توزیع به شکل یکنواخت می‌باشند. این موضوع نشان‌گر پویا بودن پارامترهای مربوط به مشخصات فیزیکی خاک می‌باشد. اما در بین ضرایب، صرفاً ضریب ذخیره سطحی تغییرات غیریکنواختی را در خصوص شاخص نشان می‌دهد. با توجه به استفاده از تابع احتمال پسین در قالب شاخص درست‌نمایی، اکثر مقادیر پارامترها در محدوده خاص متمرکز شده‌اند. همچنین بخشی از رفتار پارامترها بر مبنای تصادفی بودن و عدم قطعیت شکل می‌گیرد. از این‌روی تحلیل فیزیکی نیز در این خصوص قابل ارائه نمی‌باشد.

جدول (۱) محدوده پارامترهای مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد. پس از انتخاب توزیع اولیه و ایجاد فضای پارامترهای تصادفی، از این پارامترها برای شبیه‌سازی مدل استفاده می‌شود. بر

مبنای شبیه‌سازی انجام شده و تعریف توزیع پسین که معرف درست‌نمایی محاسبات می‌باشد و استفاده از فرمول بیز توزیع پسین محاسبه گردید. توزیع تحلیل شده با توجه به روش الگوریتم متروپلیس محاسبه گردید (Kuczera and Parent, 1998). در این الگوریتم زنجیره مارکف توالی پارامترها را ایجاد می‌نماید. بر مبنای خاصیت ارگودیک، توزیع ایجاد شده به توزیع ایستای پسین همگرا می‌گردد.

### تخمین عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها

با توجه به معیار ناش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe)، خروجی‌های مختلف بر مبنای دسته پارامترهای تولیدی در محاسبه معیار مورد نظر استفاده گردیدند. به منظور تخمین عدم قطعیت از بین مقادیر تابع تشابه محاسبه شده، مقادیر برتر با لحاظ قید مطلوبیت انتخاب گردیدند. در این خصوص Montanari (2005) و Mantovan و Todini (2006) به منظور تخمین پارامترهای مدل‌های زیست محیطی در بازه‌های مختلف پیش‌بینی اقدام به تخمین عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه نمودند. در این مطالعه نیز این موضوع در خصوص مدل HBV به کار برده شد و بر مبنای آن میزان عدم قطعیت محاسبه گردید. سپس به منظور محاسبه عدم قطعیت، به مقادیر باقی‌مانده تابع توزیع تجمعی، برازش داده شود. همچنین در هر گام زمانی مقادیر دبی محاسباتی حاصل از واسنجی‌های مختلف، به صورت صعودی مرتب می‌شوند. با استفاده از وزن‌های تابع تشابه حاصل از هر بار اجرای مدل، تابع توزیع احتمال تجمعی محاسبه می‌شود. بر مبنای تابع محاسبه شده در هر گام زمانی، میزان عدم قطعیت در سطح‌های پنج و ۹۵ درصد، با استفاده از روابط (۸) و (۹)، درگام‌های زمانی روزانه محاسبه و مشخص شدند. لذا میزان عدم قطعیت پارامترها در فرآیند شبیه‌سازی طبق شیوه تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته محاسبه شد. در جدول (۲) مقادیر حد بالا و پایین داده‌های جریان آب در سطوح پنج و ۹۵ درصد آماری به عنوان نمونه برای یک ماه نشان داده شده است.

ضمن به‌کارگیری تئوری هم‌پایانی و نظر به اینکه دسته جواب‌های مختلف می‌توانند به‌عنوان راه‌حل برتر در نظر گرفته شوند، لذا ترکیب‌های مختلف از پارامترها محاسبه عدم قطعیت به کار گرفته شدند. لذا با توجه به این تئوری و نیز شیوه استفاده از تابع تشابه تعمیم یافته بازه عدم قطعیت هیدروگراف محاسباتی محاسبه گردید. شکل (۵) نمودار دبی محاسباتی و نیز محدوده عدم قطعیت محاسباتی این هیدروگراف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است میزان بازه عدم قطعیت مقادیر حدی مربوط به وقوع سیل در حوضه تجن با عدم قطعیت بیشتری روبه‌رو می‌باشد و مدل در شبیه‌سازی مقادیر پیشینه عملکرد خوبی ندارد.

اما در خصوص جریان‌های روزانه نرمال که ناشی از آبدهی حاصل از جریان پایه رودخانه و منحنی فروکش جریان آبنمود

مشاهده می‌شود خطا در مقایسه با توزیع نرمال، برازش قابل قبولی دارد. استفاده از مجموعه پارامترهای گوناگون و تابع تشابه تأثیر این مقادیر بر ساختار مدل، بررسی شد و نتایج نشان داد که پارامترها همان‌طور که در شکل (۴) نیز نشان داده شده‌اند، نقش بسزایی در مرحله شبیه‌سازی و انتخاب محدوده برتر ایفا می‌نمایند. این نتیجه اهمیت ایده تأثیرپذیری مدل و نقش پارامترها را که در مطالعات Beven و Binely (1992) به آن پرداخته شده است نشان می‌دهد.

روزانه می‌باشند شبیه‌سازی در مجموع مقادیر بهتری را با استفاده از مدل HBV نسبت به بهینه‌سازی که عموماً در بهینه‌های موضعی متوقف می‌گردد، نتیجه می‌دهد. همچنین با توجه به شبیه‌سازی‌های مختلف، مقادیر شاخص ناش ساتکلیف در دامنه ۰/۴ تا ۰/۶۸ به دست آمد. با توجه به مقدار حداقل لازم شاخص ناش (۰/۵) شبیه‌سازی‌های نامطلوب حذف گردیدند. همچنین به منظور بررسی خطای حاصل از مدل و تبعیت نتایج از توزیع نرمال در شکل (۶) نمودار تابع توزیع خطا رسم شده است. همان‌طور که

جدول ۲- حدود بالا و پایین عدم قطعیت در سطوح اطمینان ۵ و ۹۵ درصد برای داده‌های جریان آب (متر مکعب بر ثانیه) در یک ماه

Table 2- Upper and lower bounds of uncertainty at 5 and 95 % confidence levels for water flow data (cubic meters per second) in a month

| Day | Observation | Level (%) |      | Day | Observation | Level (%) |      |
|-----|-------------|-----------|------|-----|-------------|-----------|------|
|     |             | 5         | 95   |     |             | 5         | 95   |
| 1   | 7.9         | 1.94      | 13.5 | 16  | 4.1         | 0.52      | 3.8  |
| 2   | 11.9        | 2.4       | 18   | 17  | 3.9         | 0.55      | 3.3  |
| 3   | 10.4        | 1.8       | 16.7 | 18  | 3.7         | 0.57      | 4.1  |
| 4   | 10.4        | 1.1       | 13   | 19  | 3.7         | 0.65      | 3.9  |
| 5   | 8.5         | 0.65      | 10.7 | 20  | 3.5         | 0.31      | 7.4  |
| 6   | 6.8         | 0.31      | 8.7  | 21  | 4.5         | 0.5       | 10   |
| 7   | 6.1         | 0.07      | 7.1  | 22  | 16.9        | 1.5       | 22.9 |
| 8   | 7.6         | 0.13      | 7.7  | 23  | 14.8        | 5.1       | 39   |
| 9   | 9.5         | 0.12      | 10.5 | 24  | 13.1        | 7.9       | 40   |
| 10  | 10.3        | 0.11      | 8.4  | 25  | 12.5        | 8.3       | 34.6 |
| 11  | 9.2         | 0.24      | 6.9  | 26  | 11.7        | 7.2       | 26   |
| 12  | 7.3         | 0.33      | 5.7  | 27  | 10.4        | 6         | 21.3 |
| 13  | 6.1         | 0.39      | 4.8  | 28  | 12          | 7.3       | 23.7 |
| 14  | 5.2         | 0.5       | 4.4  | 29  | 14.4        | 12.3      | 35   |
| 15  | 4.5         | 0.47      | 4.5  | 30  | 14.8        | 14        | 33.1 |

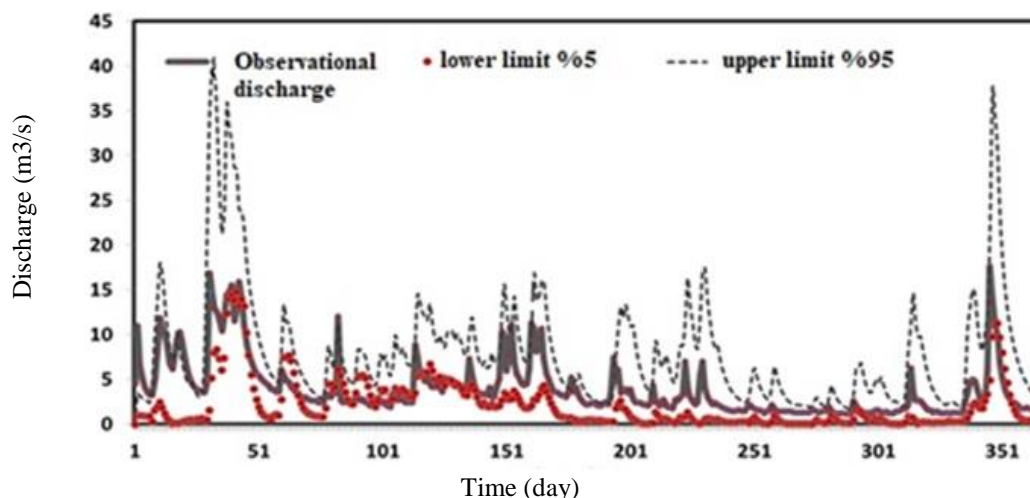
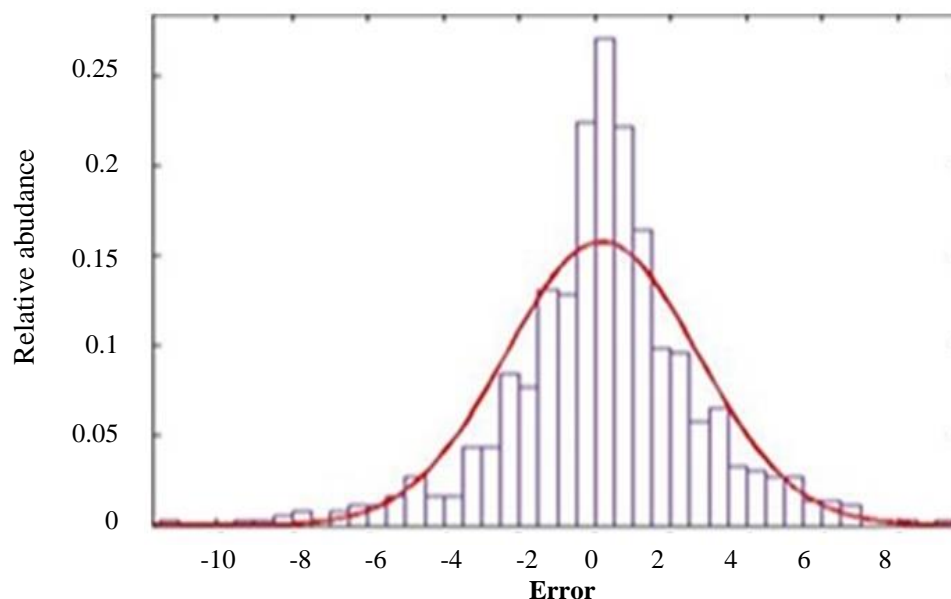


Fig. 5- Calculation flow chart and calculated uncertainty limits

شکل ۵- نمودار دبی محاسباتی و حدود عدم قطعیت‌های محاسبه شده



**Fig. 6- The diagram of the error of the simulation process and its dependence on the normal distribution**

شکل ۶- نمودار خطای فرآیند شبیه‌سازی و تبعیت آن از توزیع نرمال

نمودن مجموعه پارامترهای گوناگون، تأثیر ساختار مدل‌های مختلف را در میزان عدم قطعیت مدل‌های بارش-رواناب مورد بررسی قرار دهد. همچنین بررسی انجام شده در خصوص نظریه همپایانی بیانگر این موضوع می‌باشد که مجموعه پارامترهای مختلف به یک مقدار یکسان از تابع تشابه منتهی می‌شوند. لذا بایستی در فرآیند شبیه‌سازی پدیده همپایانی لحاظ گردد. لذا بر مبنای همپایانی می‌توان عدم قطعیت موجود در فرآیند شبیه‌سازی مدل‌های بارش رواناب را محاسبه و نتایج را در مطالعه‌های هیدرولوژیکی بکار برد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت و کمک مدیران دانشگاه بوعلی سینا به‌منظور ایجاد شرایط مناسب انجام این تحقیق تشکر نمایند.

#### نتیجه‌گیری

بررسی انجام شده نشان داد که تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه، می‌تواند در محاسبه و شناسایی عدم قطعیت پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل بارش-رواناب HBV مفید باشد. همچنین کارایی تابع تشابه ناش-ساتکلیف در ارزیابی نکویی برازش نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل، به‌خوبی مشخص گردید. در به‌کارگیری تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه بایستی قید مورد نظر برای حذف مقادیر نامطلوب تابع تشابه تعریف گردد. لذا بر مبنای مقادیر تابع تشابه مورد قبول و انجام محاسبات مربوطه، میزان عدم قطعیت در روزهای مختلف، با استفاده از دامنه اطلاعات بدست آمده در سطوح پنج درصد و ۹۵ درصد مشخص گردید. همچنین مقدار متوسط شاخص ناش در گزینه برتر برابر با ۶۸ درصد به‌دست آمد. باید در نظر داشت که تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تابع تشابه می‌تواند ضمن لحاظ

#### References

- Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B.A. and Zyvoloski, G.A., 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31(4), pp.630-648.
- Bergström, S. and Graham, L.P., 1998. On the scale problem in hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), pp.253-265.
- Beven, K. and Binley, A., 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), pp.279-298. Beven, K.J. 2001. *Rainfall-Runoff Modeling: The Primer*. Wiley, Chichester. 488 pages.
- Beven, K.J., 2001. *Rainfall-runoff modelling: The primer*. John Wiley & Sons, Chichester. *Rainfall-runoff modelling: The primer*. John Wiley & Sons, Chichester.

- 5- Chowdhury, S. and Sharma, A., 2007. Mitigating parameter bias in hydrological modelling due to uncertainty in covariates. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), pp.197-204.
- 6- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), pp.1015-1031.
- 7- Engeland, K., Xu, C.Y. and Gottschalk, L., 2005. Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology/Estimation bayésienne des incertitudes au sein d'une modélisation conceptuelle de bilan hydrologique. *Hydrological Sciences Journal*, 50(1).
- 8- Hastings, W.K., 1970. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 57(1), pp.97-109.
- 9- Jorgeson, J. and Julien, P., 2005. Peak flow forecasting with radar precipitation and the distributed model CASC2D. *Water International*, 30(1), pp.40-49.
- 10- Jin, X., Xu, C.Y., Zhang, Q. and Singh, V.P., 2010. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, 383(3-4), pp.147-155.
- 11- Kingston, D.G. and Taylor, R.G., 2010. Sources of uncertainty in climate change impacts on river discharge and groundwater in a headwater catchment of the Upper Nile Basin, Uganda. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), p.1297.
- 12- Kuczera, G. and Parent, E., 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), pp.69-85.
- 13- Mantovan, P. and Todini, E., 2006. Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 330(1-2), pp.368-381.
- 14- Marshall, L., Nott, D. and Sharma, A., 2004. A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 40, W02501.
- 15- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. and Teller, E., 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), pp.1087-1092.
- 16- Montanari, A., 2005. Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations. *Water Resources Research*, 41(8).
- 17- Moradkhani, H., Hsu, K.L., Gupta, H. and Sorooshian, S., 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, 41(5), (In Persian).
- 18- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282-290.
- 19- Sorooshian, S. and Dracup, J.A., 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, 16(2), pp.430-442.
- 20- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Lee, S.U. and Batchelder, R., 2008. Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. *Water Resources Research*, 44(12).
- 21- Vázquez, R.F., Beven, K. and Feyen, J., 2009. GLUE based assessment on the overall predictions of a MIKE SHE application. *Water Resources Management*, 23(7), pp.1325-1349.

- 
- 22- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Dekker, S.C., Sorooshian, S., Wagener, T. and Bouten, W., 2006. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. *Journal of Hydrology*, 325(1-4), pp.288-307.
- 23- Xu, C.Y., 2001. Statistical analysis of parameters and residuals of a conceptual water balance model—methodology and case study. *Water Resources Management*, 15(2), pp.75-92.
- 24- Xu, H., Taylor, R.G. and Xu, Y., 2011. Quantifying uncertainty in the impacts of climate change on river discharge in sub-catchments of the Yangtze and Yellow River Basins, China, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), pp.333-344.
- 25- Zacharias, I., Dimitriou, E. and Koussouris, T., 2005. Integrated water management scenarios for wetland protection: application in Trichonis Lake. *Environmental Modelling & Software*, 20(2), pp.177-185.