

Evaluation of the basin hydrological response to the instantaneous storm process using the concepts of MATLAB software simulink control system

Alireza Moradi¹ , Esmail Asadi^{2*} , Ahmad Fakherifard³ 

¹ Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Extended Abstract

Introduction

Rainfall-runoff modeling is one of the most important components of hydrological processes in water resources management and accurate estimation of runoff and river flow in the short and long term can be of great help to various sectors of water engineering. In several types of rainfall-runoff models, the unit hydrograph methods are still a useful tool for flood estimation in many, except non-gauged, basins. The unit hydrograph is the same as the unit pulse response function of a linear hydrological system. The tank model is one of the hydrological models for analyzing river flow characteristics. In hydrological analysis, simulation models are often used to describe and predict basin response to rainfall events based on mathematical and physical knowledge. In this article, using the concept of linear system theory, the pulse response functions of the runoff components (surface runoff and base flow) using the reservoir model for several flood events related to the two Navrood basin in Gilan province and Liqvan basin in the East Azerbaijan province has been extracted. Since Simulink can schematically show the dynamic relationship between hydrological components such as rainfall, runoff, storage, evapotranspiration, and runoff, it can be useful for rainfall-runoff modeling. Therefore, Modeling is done in the Simulink MATLAB environment. The modular design and block library can help users focus on hydrological analysis, including modeling strategy development, parameter estimation, and model application.

Materials and Methods

In the present study, to evaluate the capability of the tank model in different climates, the model has been implemented for two regions with dry and wet climates to evaluate the effectiveness of the tank model by comparing the results. Therefore, the Navrood representative basin in Gilan province was selected for a wet climate, and the Liqvan representative basin in East Azerbaijan province for a dry and semi-arid climate. The response of the entire basin to the rainfall that fell on its surface has been determined using the conceptual model of the tank. In order to extract the unit pulse response function for the runoff caused by precipitation, the model of three tanks in series with holes on the side and bottom has been used to show the types of currents prevailing in the process of forming runoff. The internal dependence of reservoirs is described using exponential functions of model parameters. Estimating the model parameters was performed using the cluttered evolution optimization method or SCE-UA for short, a conceptual optimization method. In addition, to extract unit pulse response functions and evaluate the model's efficiency in predicting flood events, it was tried to select events that have rained in the entire basin and correspond to flood events in terms of occurrence time.

Results and Discussion

The results obtained in this research showed that the tank model provides good results in estimating the peak discharges and the time to reach the peak discharges in the two representative basins of Navrood and Liqvan with two different climates. The parameters of the model, which actually reflect the geomorphological characteristics of the basin, are almost constant, and only the changes in soil moisture storage are variable in the runoff calculations. Response functions as exponential functions of model parameters have simulated the different roles of flow components (quick surface, quick subsurface, delayed subsurface, and underground flow) in relation to the precipitation process. As can be deduced from the results obtained for the Navrood basin, the slow runoff accounts for a major part of the total runoff in the falling limb of the hydrograph. The relations

extracted for the response functions of the unit pulse for ru as a unit input that happened in the duration of Δt have been obtained parametrically, therefore, for different combinations of ru and Δt , several unit pulse response functions can be extracted. Examining the parameters of the model obtained from the SCE-UA algorithm shows that due to the large value of the b_2 parameter compared to other parameters, a major part of the volley losses is penetration losses. In fact, the high permeability of the surface layers of the soil justifies the high value of the b_1 parameter compared to other parameters.

Conclusion

The performance results of the tank model showed that the model has a relatively good capability in predicting the runoff affected by the rainstorm. The comparison of the computational and observed hydrographs shows that the mentioned values have a good correlation. According to the results, it can be seen that the fast runoff, which usually appears in the form of surface flow and waterways in the basin, occupies a significant part of the entire flood hydrograph during the flooding process, and in terms of durability has a shorter duration than slow runoff. Slow runoff hydrograph is slowly affected by precipitation during the flooding process, but in terms of durability, it has a longer duration.

Keywords: Fast runoff, Rainfall-runoff, Simulink, Slow runoff, Tank model, Unit hydrograph

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors of the article are extremely grateful to the cooperation and assistance of the regional water company of Gilan province and the regional water company of East Azerbaijan province for providing data and coordination for field visits. Conflicts of interest. Also, the financial and spiritual support of Tabriz University to conduct this research in the form of a master's thesis is appreciated.

Data availability statement: All information and results related to this research are presented in the text of the article. If you need information about this research, it will be possible to obtain information through correspondence with the responsible author.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research

Authors' contribution

Alireza Moradi: Conceptualization, Software analysis, Writing; **Esmail asadi** and **Ahmad Fakherifard:** Guiding, Editing, Review, Result control.

*Corresponding Author, E-mail: es-asadi@tabrizu.ac.ir

Citation: Moradi, A.R., Asadi, E., & Fakherifard, A. (2024). Evaluation of the basin hydrological response to the instantaneous storm process using the concepts of Simulink control system. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 102-118.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12244.1216

Received: 29 January 2023, Received in revised form: 09 February 2023, Accepted: 09 February 2023, Published online: 09 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp 102-118

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به فرآیند رگبار لحظه‌ای با استفاده از مفاهیم سیستم کنترل سیمولینک نرم‌افزار متلب

علیرضا مرادی^۱، اسماعیل اسدی^۲، احمد فاخری فرد^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در بین انواع متعددی از مدل‌های بارش-رواناب، روش‌های آب‌نمود واحد هنوز یک ابزار مفید برای ارزیابی سیلاب در بسیاری از حوضه‌ها خصوصاً حوضه‌های فاقد آمار است. آب‌نمود واحد همان تابع پاسخ پالس واحد یک سیستم خطی هیدرولوژیکی است. در این پژوهش با استفاده از مفهوم تئوری سیستم خطی، توابع پاسخ پالس واحد اجزای تشکیل‌دهنده رواناب (رواناب سطحی و جریان پایه) به کمک مدل مخازن مرتبط و با استفاده از ابزار سیمولینک در نرم‌افزار متلب (تانک-سیمولینک) برای چند رویداد سیلابی مربوط به دو حوضه ناورود استان گیلان با اقلیم مرطوب و حوضه ليقوان استان آذربایجان شرقی با اقلیم کوهستانی نسبتاً خشک استخراج شده است. پاسخ کل جریان آبراه‌های این حوضه‌ها، به‌عنوان یک تلفیق خطی از آب‌نمودهای واحد جریان رواناب سطحی و جریان پایه نمایش داده شده است. وابستگی داخلی مخازن با استفاده از توابع نمایی از متغیرهای مدل توصیف شده‌اند. ارزیابی متغیرهای مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی تکامل پیچیده مختلط یا به اختصار SCE-UA که یک روش مفهومی برای بهینه‌سازی است، انجام شد. نتایج نشان دادند که ابزار سیمولینک در نرم‌افزار متلب توانایی برآورد مقادیر رواناب ناشی از بارش را که توسط مدل تانک توصیف شده است، دارا بوده و ابزار مناسبی جهت شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی به‌شمار می‌رود.

واژه‌های کلیدی: بارش-رواناب، رواناب سریع، رواناب آهسته، سیمولینک، آب‌نمود واحد، مدل مخزن

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: es-asadi@tabrizu.ac.ir

استناد: مرادی، علیرضا، اسدی، اسماعیل، و فاخری فرد، احمد (۱۴۰۳). ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به فرآیند رگبار لحظه‌ای با استفاده از مفاهیم سیستم کنترل سیمولینک نرم‌افزار متلب. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱۰۲-۱۱۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12244.1216

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۱۰۲ تا ۱۱۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

تهیه و اجرای طرح‌های مختلف، مانند طرح‌های توسعه‌ای، طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و برنامه‌ریزی‌های مربوط به حفاظت آب و خاک، به مجموعه‌ای از اطلاعات مربوط به بارندگی و رواناب نیاز دارد که تهیه هیدروگراف و تعیین اجزای آن بخش مهمی از این کار را تشکیل می‌دهد. تهیه هیدروگراف واحد برای کلیه رگبارهای یک حوضه کار ساده‌ای نیست و نیاز به صرف دقت، هزینه و امکانات زیاد دارد. محدودیت‌های مختلف، مانند عدم کفایت ایستگاه‌های هیدرومتری، مشکل جمع‌آوری داده‌های هیدرومتری و باران‌سنجی هم‌زمان، هزینه‌بر بودن آن‌ها باعث شد تا با توجه به دسترسی آسان به آمار بارندگی، تهیه مدل‌های هیدرولوژی مبتنی بر مشخصه‌ها و اطلاعات بارندگی بسیار کاربردی و منطقی به نظر برسد (Asadi et al., 2011).

مدل تانک به دلیل سادگی مفهوم و محاسبه در حین دستیابی به دقت پیش‌بینی، به‌طور گسترده‌ای در مدل‌سازی‌های بارش-رواناب مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر در این مدل نیازی به تعریف بارش مازاد و جدا کردن رواناب مستقیم نیست و با لحاظ کردن شرایط رطوبتی خاک قبل از رگبار، می‌توان به دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب رسید (Yue and Hashino, 2000). ابزار سیمولینک موجود در نرم‌افزار متلب، به دلیل کاربری آسان و قابل توسعه، دارای پتانسیل مناسب جهت مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی است (Song, 2017). در این راستا، Yue and Hashino (2000) با استفاده از مدل تانک سه مخزنه ساگوارا و اضافه نمودن تانک موازی برای نمایش رواناب سطحی، مقادیر محاسبه شده جریان را بهبود بخشیدند. آن‌ها از روش سیمپلکس برای ارزیابی متغیرهای تانک استفاده کردند که در تعیین ضرایب خطی نتایج مطلوبی به دست داد. در ادامه Kim et al. (2005) از الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA به‌عنوان روش‌های بهینه‌سازی جهانی برای واسنجی متغیرهای مدل تانک استفاده کردند. مدل‌های بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA با توجه به مقادیر آماری در مقایسه با داده‌های مشاهده شده برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه رودخانه پیونگ چانگ و حوضه بوچئونگ در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲، نتایج مطلوبی را نشان می‌داد. در پژوهشی، Asadi et al. (2011) با استفاده از مفهوم تئوری سیستم خطی، توابع پاسخ پالس واحد اجزای رواناب (رواناب سریع و رواناب آهسته) را به کمک مدل مفهومی مخزن استخراج کردند و متغیرهای مدل را با استفاده از روش بهینه‌سازی جست و جوی مستقیم ارزیابی زدند. کارایی و دقت مدل با استفاده از داده‌های بارش-

رواناب حوضه ناورود واقع در استان گیلان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که مدل مفهومی مخزن بدون نیاز به استخراج بارش مازاد و با لحاظ کردن شرایط رطوبتی خاک قبل از رگبار، دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب دارد.

از سایر پژوهش‌ها، (Kuok and Harun, 2011) سه نوع مخزن ذخیره‌سری که شامل سه، چهار و پنج سری مخزن ذخیره‌سازی هستند را برای مدل‌سازی رواناب روزانه و ساعتی در حوضه بدآپ^۱ در منطقه روستایی مرطوب انتخاب کردند. نتایج پژوهش نشان داد که بهترین تعداد مخزن برای مناطق مرطوب چهار مخزن است چون تحلیل حساسیت نشان داد که ضریب نفوذ از مخزن چهار به مخزن پنج تأثیر کمی بر تخلیه اوج رواناب دارد و ضریب خروجی جانبی برای مخزن پنجم هیچ تأثیر قابل‌توجهی بر تخلیه اوج رواناب روزانه و ساعتی ندارد. در پژوهش دیگری، (Basri, 2013) با تمرکز بر عوامل مؤثر بر پدیده‌های بارش-رواناب هم‌چون نوع خاک، کاربری اراضی و شدت بارش به بررسی جداگانه این عوامل در زیرحوضه‌های استان آچه اندونزی با استفاده از مدل تانک پرداخت. ایشان نتیجه گرفت که مدل منطقی مخزن را می‌توان نه تنها با واسنجی تخلیه‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، بلکه با در نظر گرفتن نفوذ مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای هر نوع کاربری خاک مربوط به حوضه، به دست آورد. هم‌چنین، (Salmani et al., 2013) از سه روش مفهومی AWBM، Sacramento و تانک در شبیه‌سازی رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه در حوضه گرگان‌رود استان گلستان استفاده کردند. پس از بررسی و مقایسه شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف^۳ (E_{NS}) برای هر یک از روش‌ها، مشخص شد که روش Sacramento در طی دوره واسنجی پنج ساله و دوره اعتبارسنجی چهار ساله دارای بهترین کارایی در بین سایر مدل‌هاست.

در حوضه خرم‌آباد نیز (Gholshan et al., 2016) کارایی روش‌های بهینه‌سازی را برای واسنجی متغیرهای مدل مفهومی بارش-رواناب SIMHID مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در بین تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک، تکامل رقابتی جوامع، نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت و الگوریتم روزنبرگ، و با توجه به ارزش تابع نش-ساتکلیف محاسبه شده از طریق هر یک از روش‌ها، الگوریتم روزنبرگ در مقایسه با سایر

¹ Bedup

² Root mean squared error

³ Nash-Sutcliffe

RMSE و شاخص مربع بازده کلینگ گوپتا (KGEsqr) در پیش‌بینی جریان زیاد و تعادل آب تفاوت معناداری وجود ندارد. با این حال، انتخاب RMSE عملکرد ضعیف‌تری در بازتولید جریان کم نسبت به شاخص KGEsqr ارائه می‌دهد. در پژوهشی، Piramoon et al. (2019) به بررسی کارایی مدل‌های مفهومی TANK و SIMHYD در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب رودخانه بهشت‌آباد پرداختند. این مدل‌ها، همراه با هشت بهینه‌ساز واسنجی در بسته نرم‌افزار RRL اجرای واسنجی شده که ورودی‌های این مدل‌ها شامل بارش روزانه، تبخیر-تعرق پتانسیل و دبی خروجی از حوضه است. کارایی روش‌های بهینه‌ساز بر اساس ضریب کارایی نش-ساتکلیف بررسی شدند. نتایج نشان داد که روش الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری را نسبت به سایر روش‌های بهینه‌ساز ارائه می‌دهد. همچنین، استفاده از دو مدل مذکور در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه بهشت‌آباد نشان‌گر کارایی بهتر مدل TANK با ضریب ناش-ساتکلیف $0/54$ و $0/81$ به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به مدل SIMHYD با ضریب ناش-ساتکلیف $0/56$ و $0/43$ در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بود. در نهایت، Yonesi et al. (2020) از مدل‌های مفهومی AWBM، SACRAMENTO، SIMHYD، SMAR و TANK (که همه آن‌ها در بسته نرم‌افزاری RRL وجود دارند) برای برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوی در حوضه دشت سیلاخور (ایستگاه رحیم‌آباد) استفاده کردند. نتایج نشان داد که در مدل SIMHYD ضریب ناش-ساتکلیف در روش بهینه‌ساز جست و جوی مستقیم در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب $0/70$ و $0/68$ به دست آمد که نشان‌دهنده توانایی نسبی این مدل در شبیه‌سازی رواناب در بین سایر مدل‌ها است. در مدل TANK در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نیز ضریب ناش-ساتکلیف به ترتیب $0/47$ و $0/44$ به دست آمد که کم‌ترین کارایی را بین مدل‌ها داشت. نتایج نشان داد که در بین روش‌های مختلف بهینه‌سازی، روش بهینه‌ساز جست و جوی مستقیم نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. بنابراین، در پژوهش حاضر، استفاده از سیمولینک به عنوان ابزاری برای توسعه و تحلیل مدل هیدرولوژیکی تانک در شبیه‌سازی بارش-رواناب مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲ - مواد و روش‌ها

۲-۱ - منطقه مورد مطالعه

در مطالعه حاضر برای ارزیابی قابلیت ابزار سیمولینک در مدل‌سازی به روش تانک در اقلیم‌های متفاوت، دو حوضه با اقلیم‌های نسبتاً خشک و مرطوب انتخاب شدند تا با مقایسه نتایج،

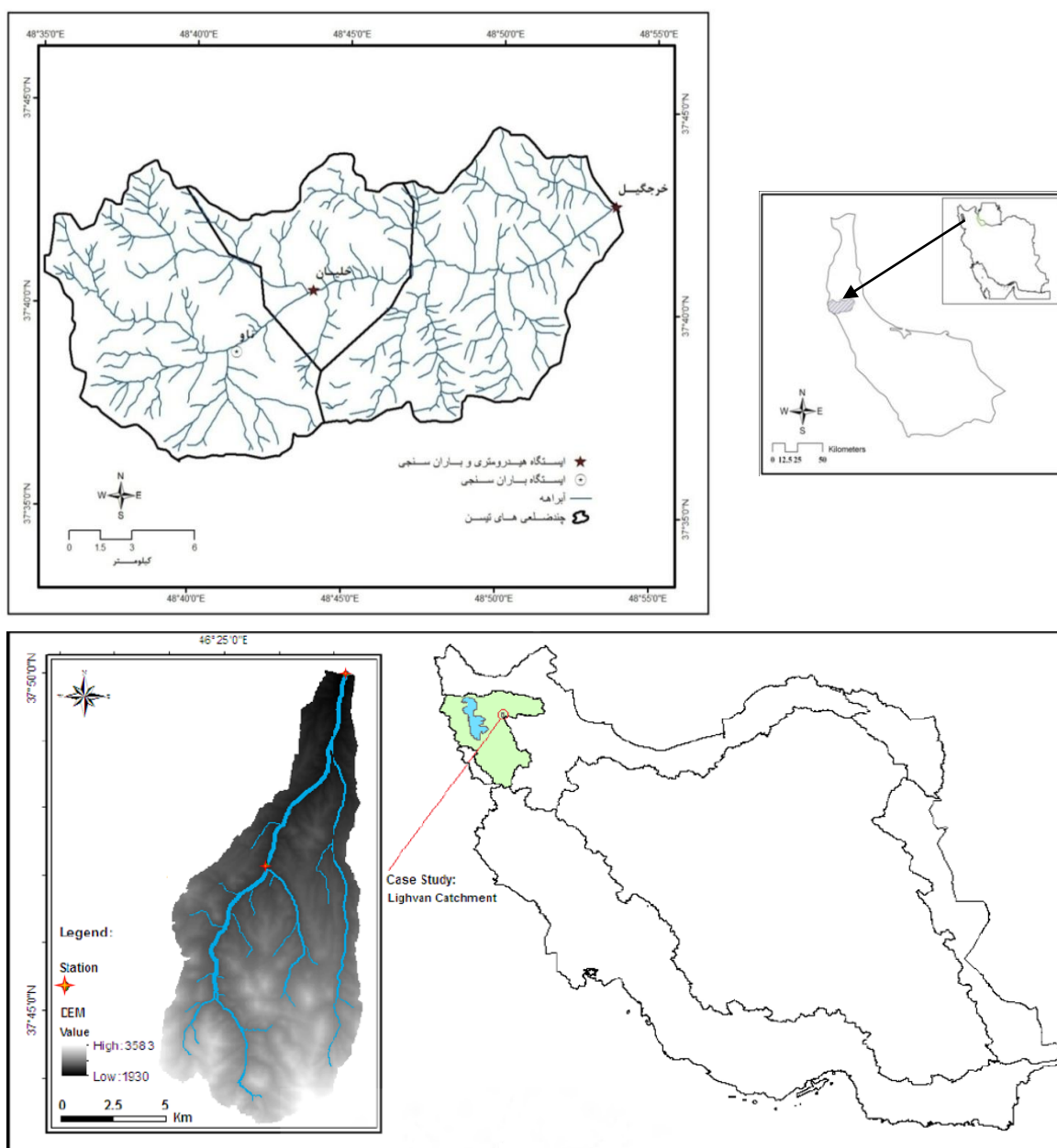
الگوریتم‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. در مطالعه‌ای، Sajikumar et al. (2015) با ترکیب روش غیرخطی ماسکینگ‌هام و روش مخزن غیرخطی و با استفاده از ابزار سیمولینک برای مدل‌سازی، نشان دادند که مدل عملکرد بهتری نسبت به مدل‌هایی دارد که از ترکیب چندین مدل خطی تولید شده باشند. هر چند اختلاف‌هایی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وجود دارد، اما روند کلی جریان شبیه‌سازی شده با جریان مشاهده‌ای مطابقت دارد و دلیل اختلاف، فقدان داده‌های بارندگی ساعتی کافی و یا عدم ارائه محاسبات مؤثر بارندگی اعلام شده است. در مطالعه دیگری، Rezaei et al. (2006) مدل بارش-رواناب تانک را برای حوضه رودخانه نازلوچای، در غرب دریای ارومیه مورد استفاده قرار دادند و مجموعاً ۲۲۴ واسنجی و نیز صحت‌سنجی با به‌کارگیری هفت روش واسنجی، هشت تابع هدف اولیه و چهار تابع هدف ثانویه انجام دادند. مشاهده شد که مدل در شبیه‌سازی مقادیر رواناب بالا خوب عمل نمی‌کند و مقادیر اوج را عموماً کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند، اما در حالت کلی دبی‌های پایه در شرایط خوبی شبیه‌سازی شده و عملکرد مدل قابل قبول است. همچنین، Suryoputro et al. (2017) رویکرد جدیدی را برای برآورد متغیرهای نفوذ در مدل مخزن در حوضه کالی بانگو^۱ در اندونزی ارائه دادند. در واقع متغیرها با ضریب رواناب به روش منطقی تقریب زده شدند و مقدار متغیر نفوذ به‌عنوان نتیجه تفاوت درصد بارندگی کل و درصد رواناب توصیف شد. نتیجه این پژوهش منجر به ساده‌تر و سریع‌تر شدن فرآیند واسنجی متغیرهای نفوذ برای مخزن بالایی در مدل مخزن ساگوارا شد.

Song et al. (2017) یک مدل مخزن را برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با استفاده از سیمولینک توسعه دادند تا پتانسیل سیمولینک را به‌عنوان ابزاری برای تحلیل هیدرولوژیکی نشان دهند. متغیرهای مدل با استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی متلب بدون هیچ برنامه‌نویسی اضافی برای پیوند الگوریتم‌های واسنجی و مدل، به دست آمدند. نمایش گرافیکی مورد استفاده در نسخه سیمولینک مدل تانک به درک بهتر تعاملات هیدرولوژیکی توصیف شده در مدل کمک کرد. همچنین، مطالعه‌ای توسط Song et al. (2019) برای منطقه‌ای شدن دقیق مدل‌های بارش-رواناب یکنواخت منطقه‌ای (RR) مدل تانک را مورد بررسی قرار دادند و عملکرد مدل‌های منطقه‌ای شده را بر اساس نتایج واسنجی با توابع هدف مختلف ارزیابی کردند و تأثیر انتخاب تابع هدف بر منطقه‌ای شدن مدل RR را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین عملکرد شاخص

¹ Kali-Bangoo

حوضه معروف لیقوان از زیرحوضه‌های مهم آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی در دامنه شمالی کوه سه‌سند واقع شده است. بلندترین نقطه حوضه با ارتفاع ۳۶۲۰ متر از سطح دریا در جنوب شرقی ارتفاعات سه‌سند و پایین‌ترین نقطه آن با ارتفاع ۲۱۴۰ متر در محل ایستگاه هیدرومتری لیقوان (طول جغرافیایی "۵۶' ۲۵' ۴۶" شرقی و عرض جغرافیایی "۵۷' ۴۹' ۳۳" شمالی) است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه و موقعیت ایستگاه‌های واقع در حوضه لیقوان نشان داده شده که مناطق لیقوان، باسمنج و بخشی از شهرستان تبریز را شامل می‌شود.

کارایی مدل ارزیابی شود. از این رو حوضه معرف ناورود در استان گیلان برای اقلیم مرطوب و حوضه معرف لیقوان در استان آذربایجان شرقی برای اقلیم خشک و نیمه‌خشک انتخاب شدند. حوضه ناورود در دامنه‌های شرقی سلسله جبال البرز (رشته‌کوه‌های تالش) واقع شده است و از سمت شمال به حوضه گرگان‌رود، از جنوب به حوضه خاله‌سرا و دیناچال و از غرب به حوضه آریاچای و از شرق به دریا متصل شده است (Asadi et al., 2011). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و جدول ۱ مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های ناورود و لیقوان را نشان می‌دهد. همچنین، خصوصیات داده‌های بارش و رواناب انتخاب شده در حوضه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت حوضه ناورود در استان گیلان (بالا) و حوضه لیقوان در استان آذربایجان شرقی (پایین)
Figure 1- Location of Navrood Basin in Gilan Province (top) and Liqvan Basin in East Azarbaijan Province (bottom)

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی حوضه‌های ناورود و لیقوان

Table 1- Physiographic characteristics of Navrood and Liqvan basins

نام حوضه	مشخصات فیزیوگرافی حوضه	مقدار	واحد
حوضه ناورود	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	274	ار تفاع حداکثر حوضه (متر)
	محیط (کیلومتر)	84	تراکم زهکشی
	ضریب شکل گراولوس	1.44	نسبت انشعاب (BR)
	میانگین وزنی ارتفاع حوضه (متر)	1393.91	طول مستطیل معادل (کیلومتر)
	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	32.5	عرض مستطیل معادل (کیلومتر)
	طول حوضه (کیلومتر)	27.5	شیب متوسط آبراهه اصلی (درصد)
	ارتفاع حداقل حوضه (متر)	130	شیب متوسط حوضه (درصد)
	فاصله خروجی تا مرکز ثقل (کیلومتر)	11.9	فاصله افقی مرکز ثقل تا آبراهه اصلی (متر)
	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	76.19	میانگین ارتفاع حوضه (متر)
	محیط (کیلومتر)	42.13	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)
حوضه لیقوان	ارتفاع حداقل حوضه (متر)	2140	شیب متوسط آبراهه اصلی (درصد)
	ارتفاع حداکثر حوضه (متر)	3620	شیب متوسط حوضه (درصد)
	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	76.19	میانگین ارتفاع حوضه (متر)
	محیط (کیلومتر)	42.13	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)
	ارتفاع حداقل حوضه (متر)	2140	شیب متوسط آبراهه اصلی (درصد)
	ارتفاع حداکثر حوضه (متر)	3620	شیب متوسط حوضه (درصد)

جدول ۲- خصوصیات داده‌های بارش و رواناب حوضه‌های لیقوان و ناورود

Table 2- Characteristics of rainfall and runoff data of Liqvan and Navrood basins

نام حوضه	تاریخ سیلاب	میزان رواناب (میلی‌متر)	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	میزان رگبار (میلی‌متر)	مدت رگبار (ساعت)	متوسط شدت رگبار (میلی‌متر بر ساعت)	S_c (میلی‌متر)
حوضه لیقوان	1396.01.04	2.53	8.30	13.11	10	1.19	4.53
	1397.07.24	3.74	19.5	12.58	9	1.16	3.8
	1398.02.31	2.29	9.8	9.59	9	0.96	3.82
	1396.01.15	2.03	14.5	10.03	8	1.58	4.21
حوضه ناورود	1378.8.10	5.09	19.20	22.59	13	1.74	8.23
	1380.7.9	43.4	117.00	135.89	40	3.4	22
	1380.7.16	6.54	23.40	29.37	12	2.45	17.5
	1383.7.22	13.37	44.90	55.45	27	2.05	13.8
	1383.8.28	2.67	13.5	26.92	24	1.15	25.9

۲-۲- مدل تانک

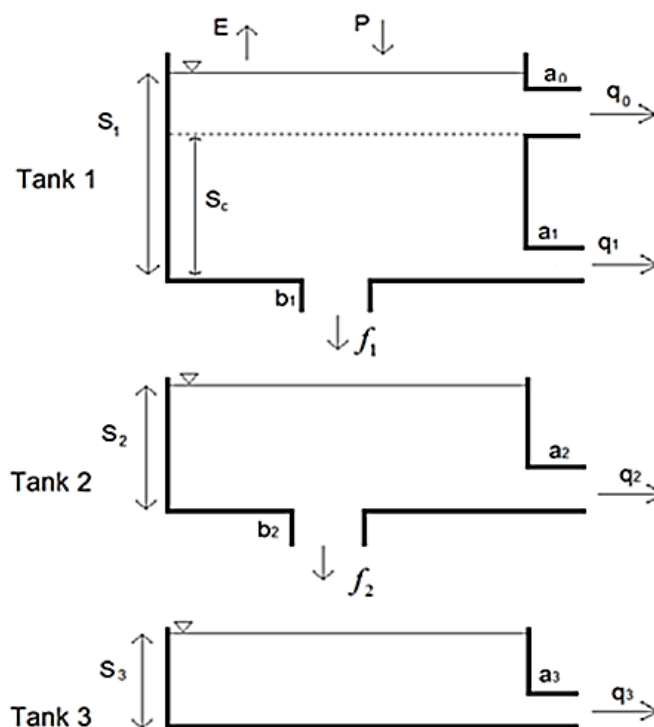
به‌منظور توصیف پاسخ حوضه نسبت به بارش، مدل‌های مفهومی نمایش خوبی از این فرآیند را ارائه می‌کنند. شکل ۲ نمایشی از مدل مفهومی مخزن را نشان می‌دهد. روزهایی در سمت راست و زیر هر مخزن قرار گرفته‌اند و اندازه روزهایی کناری که نشان‌دهنده رواناب خروجی است، توسط متغیرهای a_0 ، a_1 و a_2 و a_3 معرفی می‌شوند. به‌منظور نشان دادن میزان نفوذ از تانک یک به تانک ۲ و از تانک ۲ به تانک ۳ روزهایی در انتهای تانک‌های ۱ و ۲ وجود دارد و برای تانک ۱ و تانک ۲ به ترتیب به‌وسیله b_1 و b_2 توصیف می‌شوند. تمامی این متغیرها به‌عنوان توصیفی از ضرائب ذخیره تانک‌ها است و از لحاظ ابعادی دارای واحد عکس زمان $(\frac{1}{T})$ هستند. هم‌چنین، دامنه تغییرات تمامی متغیرها بین صفر و یک است (Song, 2019). q_1 ، q_2 و q_3 به ترتیب نشان‌دهنده رواناب‌های زیرسطحی سریع و تأخیری و رواناب زیرزمینی است که به ترتیب از تانک ۱، تانک ۲ و تانک ۳ اتفاق می‌افتند. q_0 نیز نشان‌دهنده رواناب سطحی است که در حوضه ایجاد می‌شود.

هم‌چنین، f_1 و f_2 به ترتیب به‌عنوان نفوذ از تانک ۱ به تانک ۲ و از تانک ۲ به تانک ۳ در نظر گرفته می‌شوند. ارتفاع ذخیره‌سازی S_c معادل تلفات اولیه است که به‌عنوان یک شاخص جامع، نشان‌دهنده تأثیر شرایط رطوبتی خاک بر فرآیند تولید رواناب است. از آنجایی که در مدل مخزن نیازی به تعریف بارش مازاد و جداکردن رواناب مستقیم نمی‌باشد تنها با اطلاع از شرایط رطوبتی خاک قبل از رگبار (S_c) می‌توان از دقت قابل‌قبولی در مدل‌سازی برخوردار بود.

در مدل تانک، ابتدا بارش بر تانک ۱ تأثیر می‌گذارد. رواناب زیرسطحی سریع q_1 و نفوذ f_1 از تانک ۱ به تانک ۲ زمانی رخ می‌دهد که تغییرات ذخیره تانک ۱ به ازای بارشی که روی آن می‌بارد بزرگ‌تر از صفر باشد ($S_1 > 0$). رواناب زیرسطحی تأخیری q_1 و نفوذ f_1 از تانک ۲ به تانک ۳ زمانی اتفاق می‌افتد که تغییرات ذخیره تانک ۲ بزرگ‌تر از صفر باشد ($S_2 > 0$). جریان زیرزمینی q_3 زمانی اتفاق می‌افتد که تغییرات ذخیره تانک ۳ بزرگ‌تر از صفر باشد ($S_3 > 0$). رواناب سطحی q_0 نیز توسط

توسط بخشی از بارش جبران شده باشد. در این صورت مقادیر خروجی از روزنه صفر به صورت $Z_0 = S_1 - S_c$ خواهد بود.

بارش مازاد رخ می دهد یعنی زمانی رخ می دهد که $S_1 > S_c$ باشد. این بدان مفهوم است که تلفات رطوبتی خاک تا حد اشباع



شکل ۲- مدل تانک با سه مخزن
Figure 2- Tank model with three tanks

$$S_i(t) = \int_0^{\Delta t} (I_i(\tau) | 0 < t \leq \Delta t) e^{-C_i(t-\tau)} d\tau \quad (6)$$

$$+ \int_{\Delta t}^t (I_i(\tau) | t > \Delta t) e^{-C_i(t-\tau)} d\tau \quad t > \Delta t$$

بعد از محاسبه مقادیر ذخیره S_1 ، S_2 و S_3 به ازای یک ورودی واحد، با توجه به رابطه ۳، تابع پاسخ پالس واحد (آب نمود واحد Δt ساعته) مربوط به رواناب آهسته که مجموع رواناب زیرسطحی سریع از تانک ۱، زیرسطحی تأخیری از تانک ۲ و جریان آب زیرزمینی از تانک ۳ خواهد بود، به صورت زیر قابل محاسبه است که در این رابطه ها $U_{1-3}(t)$ عرض های آب نمود رواناب آهسته Δt ساعته در لحظه t است (Yue and Hashino, 2000):

$$U_{1-3}(t) = \sum_{i=1}^3 q_i(t) = \sum_{i=1}^3 a_i S_i(t) \quad (7)$$

$$= a_1 S_1(t) + a_2 S_2(t) + a_3 S_3(t)$$

$$U_{1-3}(t) = \frac{r_u}{\Delta t} [1 + D_{11}e^{-C_1 t} + D_{12}e^{-C_2 t} + D_{13}e^{-a_3 t}] \quad \begin{matrix} 0 < t \leq \Delta t \\ \leq \Delta t \end{matrix} \quad (8)$$

با فرض این که q_i و f_i توابع خطی از ذخیره S_i باشند، رابطه بین دی و ذخیره را می توان به صورت زیر نوشت (Asadi et al., 2011):

$$q_i(t) = a_i S_i(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$f_i(t) = b_i S_i(t) \quad i = 1, 2 \text{ (mm/hr)} \quad (2)$$

برای تابع ذخیره های که یک سیستم خطی را توصیف می کند تغییرات ذخیره $S_i(t)$ می تواند به میزان ورودی $I_i(t)$ (میلی متر بر ساعت) و $Q_i(t)$ خروجی (میلی متر بر ساعت) از تانک i ام با استفاده از رابطه پیوستگی مرتبط شود:

$$\frac{dS_i(t)}{dt} = I_i(t) - Q_i(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

در ادامه مجموع خروجی های هر یک از تانک ها را می توان به صورت رابطه (۴) در نظر گرفت:

$$Q_i = f_i(t) + q_i(t) = a_i S_i(t) + b_i S_i(t) = (a_i + b_i) S_i(t) \quad (4)$$

به ازای ورودی به اندازه یک واحد که در مدت زمان Δt اتفاق می افتد می توان ارتفاع ذخیره تولید شده برای هر یک از تانک ها را از طریق رابطه های ۵ و ۶ محاسبه نمود:

$$S_i(t) = \int_0^t I_i(\tau) e^{-C_i(t-\tau)} d\tau \quad 0 < t \leq \Delta t \quad (5)$$

شاخص S_c را به صورت زیر محاسبه نمود (Saxton and Lenz, 1967).

$$S_c = \sum_{i=1}^m [ET_{\text{day}}(i) - P_{\text{day}}(i)] \quad (17)$$

در رابطه بالا m فاصله مابین آخرین رگبار تولیدکننده رواناب قبلی با رگبار فعلی (روز)، ET_{day} تبخیر-تعرق روزانه (میلی متر)، P_{day} مقدار بارش روزانه (میلی متر) است. محاسبه S_c بلافاصله پس از آخرین رگبار جریان ساز شروع می شود که در این زمان میزان رطوبت خاک، معادل میانگین منطقه ای رطوبت خاک حوضه در شرایط اشباع خواهد بود.

۲-۳- ارزیابی متغیرهای مدل

برای محاسبه توابع پاسخ پالس واحد رواناب سریع و آهسته (رابطه های ۷ و ۱۴) ابتدا نیاز به برآورد متغیرهای مدل تانک (a₀, a₁, a₂, a₃, b₁ و b₂) است. این متغیرها به طور ترکیبی فرآیندهای ذخیره، انتقال و تخلیه رواناب از حوضه را مدل سازی می کنند. واحد متغیرهای مدل تانک به صورت عکس زمان ($\frac{1}{T}$) تعریف می شود و برای مخازن خطی با داشتن ضریب ذخیره (k) می توان رابطه $\alpha_i = \frac{1}{k_i}$ را برای متغیرهای مدل در نظر گرفت. از آنجایی که تانکها توصیفی از رفتار حوضه را بر اساس ذخیره ارائه می دهند و تانکهای پایینی ضریب ذخیره بیشتری نسبت به تانکهای بالایی دارند، لذا مقادیر متغیر رواناب سطحی (a) از تانک بالایی به تانک پایینی به ترتیب کم تر خواهد شد. همچنین، به دلیل این که حرکت آب در لایه های پایین کندتر از لایه های بالایی است بنابراین، به ترتیب نفوذ از تانک بالا به پایین کاهش می یابد، یعنی متغیر b₁ از متغیر b₂ بزرگ تر خواهد بود (Yue and Hashino, 2000).

۲-۴- تابع هدف

تابع هدف بر اساس مربعات خطا که به صورت رابطه ۱۸ تعریف می شود و نمایانگر مقداری مشابه واریانس باقی مانده ها در تحلیل رگرسیون است مورد استفاده قرار می گیرد (Asadi et al. 2011):

$$F(a_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot b_1 \cdot b_2) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left\{ \frac{[Q_{\text{Obs}}(t) - Q_{\text{Cal}}(t)]^2}{Q_{\text{Obs}}(t)} \right\} \quad (18)$$

در آن $Q_{\text{Obs}}(t)$ مقادیر دبی های مشاهداتی و $Q_{\text{Cal}}(t)$ مقادیر دبی های محاسباتی در زمان t و n تعداد عرض های آب نمود سیل مشاهداتی در یک رویداد مشخص می باشد.

$$U_{1-3}(t) = \frac{r_u}{\Delta t} [1 + D_{21}e^{-c_1 t} + D_{22}e^{-c_2 t} + D_{23}e^{-a_3 t}] \quad t > \Delta t \quad (9)$$

به ازای یک ورودی واحد (r_u) که در مدت Δt اتفاق افتاده باشد تغییرات ذخیره در تانک صفر به صورت زیر خواهد بود (Yue and Hashino, 2000):

$$S_0(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \left[\frac{1 - e^{-a_0 t}}{a_0} \right] \quad 0 < t \leq \Delta t \quad (10)$$

$$S_0(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \left[\frac{(e^{a_0 \Delta t} - 1)e^{-a_0 t}}{a_0} \right] \quad t > \Delta t \quad (11)$$

با محاسبه تغییرات ذخیره به ازای یک واحد بارش ورودی که در مدت زمان Δt رویداده باشد، تابع پاسخ پالس واحد برای رواناب سریع از تانک صفر به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$u_0(t) = q_0(t) = a_0 S_0(t) \quad (12)$$

$$u_0(t) = \frac{r_u}{\Delta t} (1 - e^{-a_0 t}) \quad t > \Delta t \quad (13)$$

$$u_0(t) = \frac{r_u}{\Delta t} (e^{a_0 \Delta t} - 1)e^{-a_0 t} \quad 0 < t \leq \Delta t \quad (14)$$

داده های بارش-رواناب در عمل در فواصل زمانی مشخص Δt متوسط گرفته شده و به صورت یک سیستم منقطع نشان داده می شوند. بنابراین، با محاسبه توابع پاسخ پالس واحد با تداوم زمانی Δt می توان به کمک رابطه انتگرال پیچشی سیستم زمانی منقطع، با استفاده از اصول اساسی حاکم بر سیستم های خطی، اجزای جریان رودخانه ای را که در اثر وقوع رگبار به وجود آمده اند با رابطه ۱۵ محاسبه کرد (Yue and Hashino, 2000). در رابطه ۱۵، $Q(n)$ میزان دبی جریان در زمان $t = n\Delta t$ (مترمکعب بر ثانیه)، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع)، P_m ارتفاع بارش (میلی متر) در بازه زمانی m ، Z_0 میزان جریان سطحی است وقتی که $S_1 > S_c$ باشد. هرگاه $S_1 > S_c$ باشد $q_0 = 0$ و اگر $S_1 > S_c$ باشد $q_0 = S_1 - S_c$ خواهد بود.

$$Q(n) = \frac{A}{3.6} \left[\sum_{m=1}^{n \leq M} \frac{P_m}{r_u} U_{1-3}(n-m+1) + \sum_{m=1}^{n \leq M} \frac{Z_0(m)}{r_u} U_0(n-m+1) \right] \quad (15)$$

مؤلفه های جریان که با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه می شوند، اجزایی از جریان هستند که تحت تأثیر رگبار قرار گرفته اند که با اضافه نمودن جریان پایه دائمی رودخانه که قبل از وقوع رگبار در رودخانه وجود داشته است (Q_0) میزان دبی جریانی که از خروجی حوضه زهکشی می شود حاصل خواهد شد:

$$Q_T(n) = Q_0 + Q(n) \quad (16)$$

ارتفاع ذخیره S_c در تانک شماره ۱ به عنوان شاخصی که تأثیر شرایط رطوبتی پیشین خاک را در تولید رواناب نشان می دهد در نظر گرفته می شود. با دسترسی به اطلاعات بارش و تبخیر-تعرق روزانه، با استفاده از رابطه بیلان روزانه می توان

۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی

در مطالعه حاضر از روش تکامل پیچیده^۱ مختلط^۱ یا به اختصار SCE-UA استفاده شده است که در دانشگاه آریزونا توسط Duan et al. (1993) ارائه شد و توسعه یافت. این روش بر اساس ترکیبی از بهترین ویژگی‌ها از بین چندین روش موجود، از جمله الگوریتم ژنتیک شکل گرفته و مفهوم جدیدی را ارائه می‌دهد. این روش به‌طور خاص برای مقابله با مشکلاتی که در واسنجی مدل‌های مربوط به حوضه وجود دارد، طراحی شده است. آزمایش‌های گسترده روی یک نسخه پژوهشی ساده توسط Duan et al. (1994) نشان داد که این روش از نسبت به سایر روش‌ها کارآمدتر و مؤثرتر است. براساس مفاهیم فیزیک حوضه محدودیت‌هایی مانند محدودیت‌های رابطه^{۱۹} برای متغیرهای مدل تانک باید تعریف شود تا از ارزیابی مقادیر اشتباه که وجود خارجی و واقعی ندارند تا حد امکان جلوگیری شود.

$$\begin{aligned} a_0 - a_1 &> 0 \\ a_1 - a_2 &\geq 0 \\ a_2 - a_3 &\geq 0 \\ 1 - (a_1 + b_1) &\geq 0 \\ 1 - (a_2 + b_2) &\geq 0 \\ b_1 - b_2 &> 0 \end{aligned} \quad (19)$$

برای نمونه‌گیری^۲ در الگوریتم SCE-UA از ۱۵ گروه با ۲۰ نقطه (جمعیت) در هر گروه استفاده شده است. نمونه‌گیری تا جایی ادامه یافت که تفاوت بین مقادیر تابع هدف و نمونه‌گیری شده در ۱۰ نقطه آخر کم‌تر از ۰/۱ درصد باشد.

۲-۶- اعتبارسنجی مدل

برای ارزیابی دقت مدل از آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین نسبی خطای مطلق^۳ (RMAE)، ضریب راندمان^۴ (E) و خطای مطلق نسبی دبی اوج استفاده شد: (Yue and Hashino.2000):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)]^2}{n}} \quad (20)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]^2} \quad (21)$$

$$R = \frac{Q_{pobs} - Q_{pcal}}{Q_{pobs}} \quad (22)$$

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)|}{Q_{obs}(t)} \quad (23)$$

در روابط بالا، Q_{obs} و Q_{cal} به ترتیب دبی‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در زمان T ، Q_{pobs} و Q_{pcal} به ترتیب دبی اوج مشاهده‌ای و محاسباتی و \bar{Q}_{obs} متوسط دبی‌های مشاهده‌ای است.

۲-۷- ابزار سیمولینک

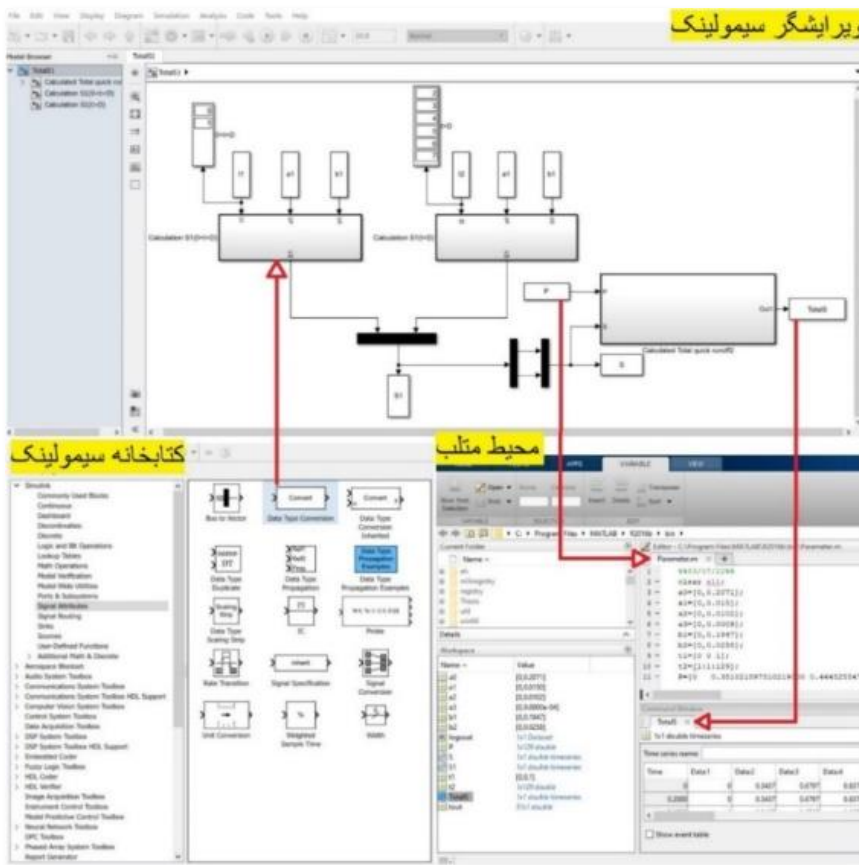
سیمولینک یک رابط گرافیکی است که بستری برای ساخت مدل را به‌صورت نمودارهای بلوک و پیکان فراهم می‌کند. در واقع در محیط سیمولینک می‌توان به‌جای نوشتن کدهای طولانی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌ها، از بلوک‌های محاسباتی استفاده کرد و ارتباط بین این محاسبه‌گرها را به‌وسیله سیگنال‌هایی که به‌صورت فلش یا پیکان هستند، برقرار کرد (Song et al., 2017). بلوک‌های مورد نیاز برای محاسبات را می‌توان از قسمت کتابخانه بلوک به محیط نرم‌افزار انتقال داد و سپس از طریق متصل کردن سیگنال‌های خروجی و ورودی به بلوک‌ها ارتباط بین آن‌ها را برقرار کرد (شکل ۳). کتابخانه بلوک سیمولینک شامل توابع ریاضی و منطقی، ابزارهای گرافیکی برای نمایش بهتر نتایج که به‌صورت نمودارها و غیره نمایش داده می‌شوند و ابزارهای دیگری مانند منطق فازی، سیستم‌های کنترل و شبکه‌های عصبی و غیره است. همچنین، می‌توان چند زیرسیستم را برای مدل تعریف کرد که هر کدام شامل اجزاء و فرآیندهای مختلفی هستند که یک هدف را دنبال می‌کنند.

¹ Shuffled complex evolution method

² Sampling

³ Relative mean absolute error

⁴ Coefficient of efficiency



شکل ۳- مدل سازی در سیمولینک نرم افزار متلب
Figure 3- Modeling in Simulink MATLAB Software

۳- نتایج و بحث

لیقوان، برای استخراج متغیرهای مدل تانک انتخاب شدند. با داشتن مقادیر بارش و رواناب متناظر آن و مقادیر ارتفاع ذخیره S_c در تانک شماره ۱ مقادیر متغیرهای مدل تانک از طریق فرآیند بهینه سازی به دست آمدند (جدول های ۳ و ۴).

چهار رویداد سیلابی ۱۳۷۸/۸/۱۰، ۱۳۸۰/۷/۹، ۱۳۸۰/۷/۱۶ و ۱۳۸۳/۷/۲۲ متعلق به حوضه ناورود و سه رویداد سیلابی ۱۳۹۶/۱/۴، ۱۳۹۷/۲/۲۴ و ۱۳۹۸/۲/۳۱ متعلق به حوضه

جدول ۳- مقادیر متغیرهای مدل تانک برای حوضه ناورود با استفاده از سیمولینک

Table 3- Tank model parameter values for Navrood Basin using Simulink

تابع هدف	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	رویدادهای سیلابی
0.00231	0.05231	0.00152	0.00198	0.00002	0.1698	0.0100	1378.08.10
0.00122	0.05123	0.00201	0.00293	0.00002	0.1704	0.0123	1380.07.09
0.00097	0.1643	0.00265	0.00201	0.00002	0.1554	0.0204	1380.07.16
0.00131	0.07621	0.00312	0.00189	0.00002	0.1875	0.0291	1383.07.22
-	0.06071	0.00232	0.00220	0.00002	0.1707	0.0179	متوسط

جدول ۴- مقادیر متغیرهای مدل تانک برای حوضه لیقوان با استفاده از سیمولینک

Table 4- Values of tank model parameters for Liqvan Basin using Simulink

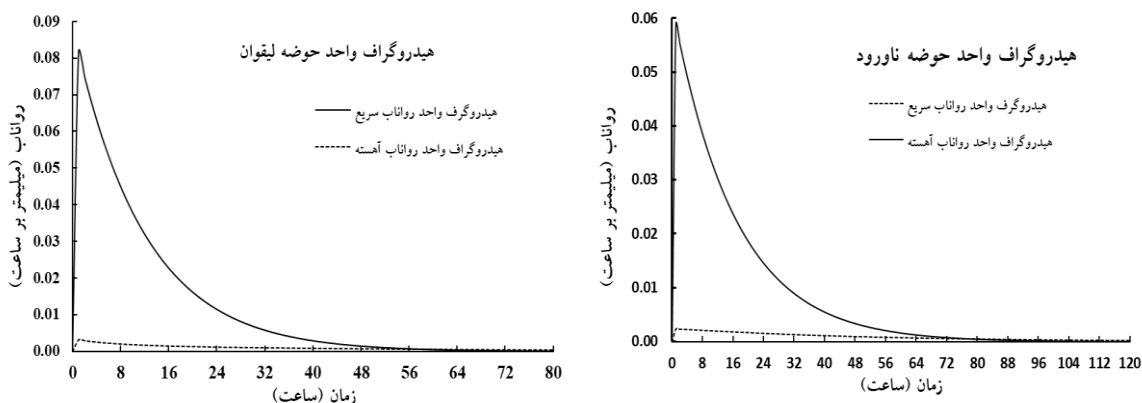
تابع هدف	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	رویدادهای سیلابی
0.00895	0.088	0.0049	0.0020	0.000001	0.169	0.015	1396.01.04
0.00763	0.102	0.0018	0.0018	0.000001	0.148	0.021	1397.02.24
0.00914	0.067	0.0031	0.0011	0.000001	0.139	0.017	1398.02.31
-	0.0856	0.0032	0.0016	0.000001	0.152	0.0176	متوسط

به دست آمد. با متغیرهای بهینه و در نظر گرفتن زمان تداوم فرآیند ایجاد رواناب (T) و مقادیر S_c، تابع پاسخ پالس واحد

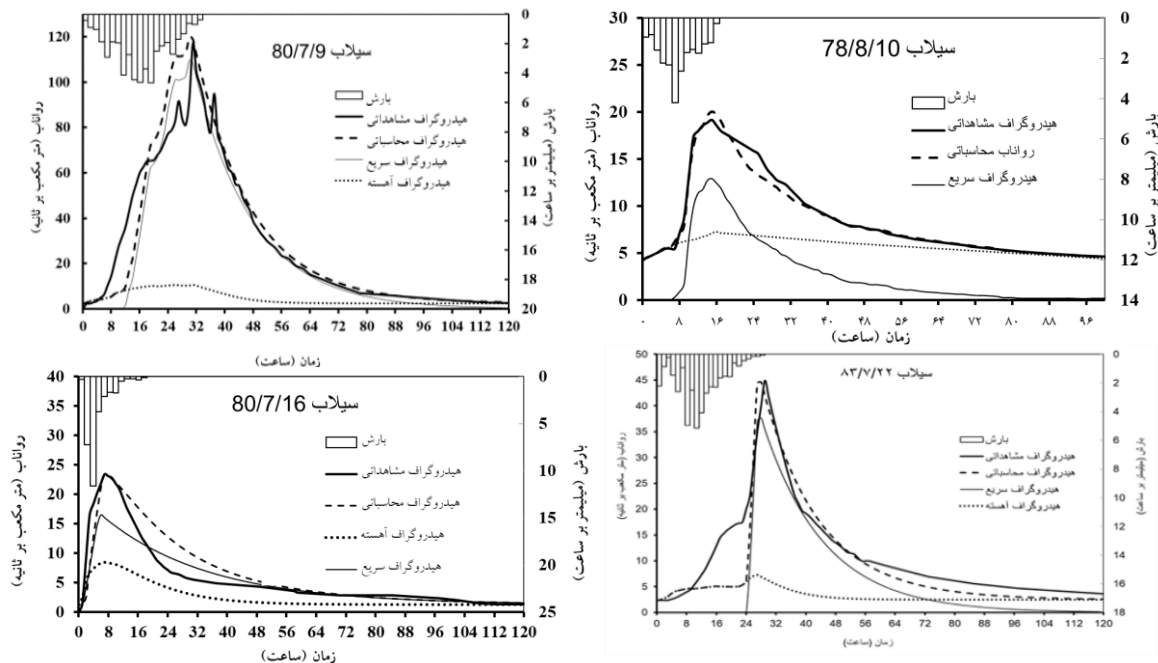
با میانگین گیری از متغیرهای محاسبه شده از مرحله واسنجی، یک سری متوسط از متغیرهای بهینه مدل تانک

آب‌نمودهای سیلاب مورد استفاده قرار گرفتند. برای بررسی کارایی مدل در پیش‌بینی رواناب، توابع پاسخ پالس واحد حوضه برای یک رویداد دیگر و رویدادهایی که در استخراج متغیرها مورد استفاده قرار گرفته بودند، مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند. شکل‌های ۵ الی ۸ نتایج مدل برای رویدادهای ذکر شده در جدول‌های ۵ و ۶ را نشان می‌دهند.

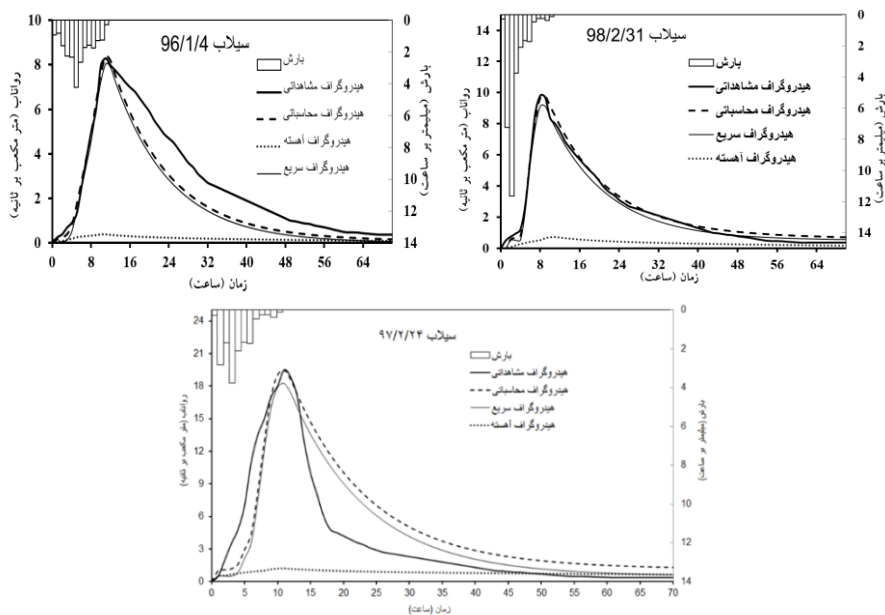
رواناب آهسته و سریع در محیط سیمولینک مدل‌سازی و محاسبه شدند و نتایج به‌صورت شکل ۴ برای دو حوضه استخراج شدند. با توجه به نتایج مشخص شد که مقدار دبی اوج آب‌نمود واحد رواناب آهسته به مراتب کم‌تر از مقدار دبی اوج آب‌نمود واحد رواناب سریع است. مجموع این دو آب‌نمود آب‌نمود واحد کل را به‌دست می‌دهد (شکل ۴). مقادیر رواناب سریع و آهسته برای هر رویداد، از مقادیر حاصل از توابع پاسخ پالس واحد محاسبه شدند و به‌همراه ذخیره S_1 در تعیین



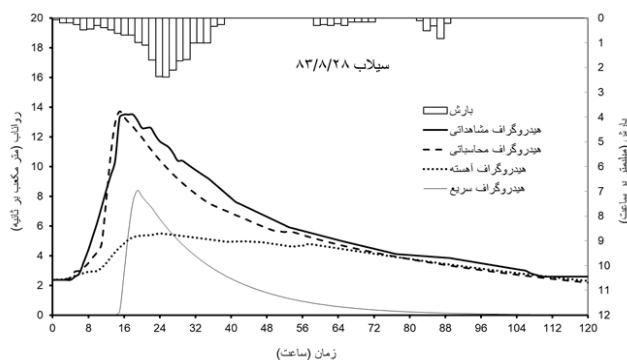
شکل ۴- آب‌نمود واحد رواناب سریع و آهسته برای دو حوضه ناورود و لیقوان
Figure 4- Unit Hydrograph of fast and slow runoff for Navrood and Liqvan basins



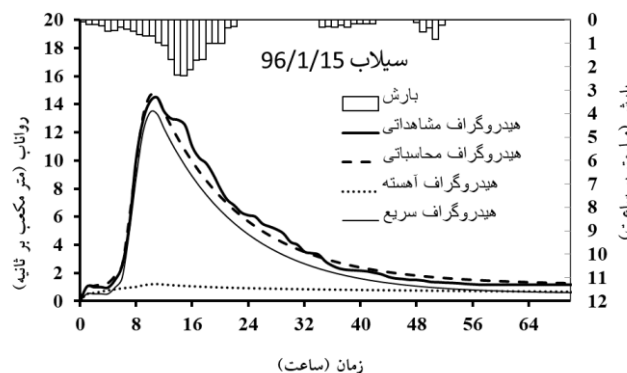
شکل ۵- بارش‌نمود و آب‌نمود سیلاب برای واسنجی مدل در حوضه ناورود
Figure 5- Flood hyetograph and hydrograph for model Calibration in Navrood Basin



شکل ۶- بارش نمود و آب نمود سیلاب برای واسنجی مدل در حوضه لیقوان
 Figure 6- Flood hyetograph and hydrograph for model calibration in Liqvan Basin



شکل ۷- بارش نمود و آب نمود سیلاب برای صحت سنجی مدل در حوضه ناورود
 Figure 7- Flood hyetograph and hydrograph for model validation in Navrood Basin



شکل ۸- بارش نمود رگبار و آب نمودهای رواناب برای صحت سنجی مدل در حوضه لیقوان
 Figure 8- Flood hyetograph and hydrograph for model validation in Liqvan Basin

مدل در پیش بینی رواناب متأثر از رگبار از قابلیت خوبی برخوردار است. مقایسه هیدروگراف های محاسباتی و مشاهداتی نشان می دهد که مقادیر مذکور از همبستگی خوبی برخوردار می باشند.

جدول های ۵ و ۶ مقادیر شاخص های کمی مدل تانک برای دو حوضه ناورود و لیقوان را نشان می دهند. نتایج ارزیابی مدل تانک با استفاده از ابزار سیمولینک در حوضه ناورود نشان داد که

با توجه به شکل‌های ۵ تا ۸ می‌توان دریافت که رواناب سریع که معمولاً به صورت جریان‌های روزمینی و آبراه‌های در حوضه نمایان می‌شود در طول فرآیند سیلاب بخش قابل‌توجهی از هیدروگراف کل سیلاب را به خود اختصاص داده و از لحاظ دوام، دارای زمان تداوم کوتاه‌تری نسبت به رواناب آهسته است. هیدروگراف رواناب آهسته در طول فرآیند سیلاب به آرامی تحت تأثیر بارش قرار گرفته، اما از لحاظ دوام، دارای زمان تداوم طولانی‌تری است. با توجه به شکل ۵ آب‌نمود سیلاب‌های ۱۳۷۸/۸/۱۰ و ۱۳۸۳/۸/۲۸ حوضه ناورود، استنباط می‌شود که سهم رواناب آهسته در مقایسه با رواناب سریع به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که میزان سرریز از تانک ۱ (Z_0) که معادل ۳/۳۱ میلی‌متر است ۶۵ درصد از رواناب کل که معادل ۵/۵۹ میلی‌متر است را به خود اختصاص می‌دهد. مهم‌ترین دلیل افزایش سهم رواناب آهسته در این سیلاب پایین بودن شدت بارش است؛ به‌طوری‌که متوسط شدت رگبار برای دو رویداد به ترتیب تقریباً معادل ۱/۷۴ و ۱/۱۵ میلی‌متر بر ساعت است، به همین دلیل باران، بیش‌تر فرصت نفوذ یافته و باعث افزایش حجم رواناب آهسته شده است.

در رگبارهای ۸۰/۷/۹ و ۸۳/۷/۲۲ حجم بالای رگبار و نیز شدت زیاد آن سبب شده سیلاب‌های قابل‌توجهی در سطح حوضه اتفاق افتد. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که در تمامی رویدادها به‌غیر از رویداد ۸۰/۷/۱۶، زمان رسیدن به دبی پیک، در آب‌نمودهای محاسباتی از یک تاخیر یک تا دو ساعت برخوردار است. هم‌چنین، دبی اوج محاسباتی از دبی اوج مشاهداتی مقداری بیش‌تر برآورد شده است.

با توجه به نتایج مستخرج برای حوضه ليقوان می‌توان گفت مدل در برآورد آب‌نمودها به‌ویژه دبی‌های اوج آب‌نمود از کارایی خوبی برخوردار است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که مقدار رواناب سریع قسمت عمده رواناب کل را شامل می‌شود. مساحت کم و نفوذپذیری بالای حوضه ليقوان که از جمله عوامل تأثیرگذار روی متغیرهای مدل و در نتیجه شکل آب‌نمود است، طولانی بودن شاخه نزولی آب‌نمودها را توجیه می‌کنند.

در حوضه ليقوان بارش‌های کم با زمان تداوم کم رخ می‌دهند. از طرف دیگر بیش‌تر مقادیر بارش در حوضه ليقوان به صورت برف بوده که فرآیند تبدیل به رواناب در این شرایط متفاوت و با تأخیر انجام می‌شود. به همین دلیل اوج آب‌نمودها و زمان رسیدن به دبی اوج در حوضه ليقوان کم‌تر است که نتایج مدل نیز این موضوع را نشان می‌دهد.

در رگبارهای ۸۰/۷/۹، ۸۰/۷/۱۶ و ۸۳/۷/۲۲ (شکل ۵) مقادیر سرریز از تانک ۱ به ترتیب معادل ۶۹، ۶۷ و ۶۹ درصد از رواناب کل را تشکیل می‌دهند که با توجه به شکل هیدروگراف سیلاب‌های مذکور، نقش رواناب سریع در این رویدادها به مقدار قابل‌توجهی رواناب کل را تحت تأثیر قرار داده است. خصوصیات رگبارها نظیر شدت و نیز تلفات رطوبتی خاک، منجر به شکل‌گیری چنین نتایجی شده است. به‌عنوان مثال، در رویداد

جدول ۵- شاخص‌های کمی ارزیابی مدل تانک در پیش‌بینی رواناب حوضه ناورود

Table 5- Quantitative indicators of the evaluation of the tank model in predicting the runoff of the Navrood Basin

Z_0 (میلی‌متر)	E (درصد)	RMSE (میلی‌متر)	RMAE (میلی‌متر)	RAEp	زمان اوج محاسباتی (ساعت)	زمان اوج مشاهداتی (ساعت)	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)		تاریخ سیلاب	ردیف
							محاسباتی	مشاهداتی		
3.31	88	0.631	0.056	-0.979	15	16	20.08	19.20	1378.8.10	1
30.07	83	1.696	0.096	0.144	30	32	119.7	119	1380.7.9	2
4.40	89	0.948	0.165	0.016	7	7	23.47	23.40	1380.7.16	3
9.32	73	1.032	0.113	-0.033	28	29	44.59	44.90	1383.7.22	4
2.16	84	0.087	0.093	-0.029	15	16	13.70	13.54	1383.8.28	5

جدول ۶- شاخص‌های کمی ارزیابی مدل تانک در پیش‌بینی رواناب حوضه ليقوان

Table 6- Quantitative indicators of evaluating the tank model in predicting the runoff of the Liqvan Basin

Z_0 (میلی‌متر)	E (درصد)	RMSE (میلی‌متر)	RMAE (میلی‌متر)	RAEp	زمان اوج محاسباتی (ساعت)	زمان اوج مشاهداتی (ساعت)	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)		تاریخ سیلاب	ردیف
							محاسباتی	مشاهداتی		
8.22	78	0.9115	0.4177	-0.00602	13	11	8.35	8.30	1396.1.4	1
9.06	86	1.8124	1.4802	0.00205	11	11	19.46	19.5	1397.2.24	2
7.21	89	0.2945	0.3717	0.00408	9	8	9.76	9.8	1398.2.31	3
9.26	78	0.8630	1.0732	-0.00965	10	11	14.64	14.5	1396.1.15	4

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان داد که مدل Simulink-Tank می‌تواند به راحتی توسعه و واسنجی شود و مدل واسنجی شده عملکرد قابل قبولی را در بازتولید آب‌نمودهای رواناب لحظه‌ای حوضه مورد مطالعه ارائه دهد. همچنین، رابط کاربری گرافیکی سیمولینک به درک سریع ساختار مدل هیدرولوژیکی و ارتباط بین اجزای هیدرولوژیکی کمک کرده و امکان توصیف دقیق فرآیندهای فرعی مورد استفاده را فراهم کرد، حتی با وجود این که ساختار اصلی مدل بدون تغییر باقی بماند. کاربرد سیمولینک در این مطالعه به مدل تانک محدود شده با این حال، توسعه مدل سیمولینک که در پژوهش نشان داده شده است، برای هر مدل بارش-رواناب، قابل استفاده خواهد بود. توابع پاسخ به‌عنوان توابع نمایی از متغیرهای مدل نقش متفاوت اجزای جریان (سطحی سریع، زیرسطحی سریع، زیرسطحی تأخیری و جریان زیرزمینی) را به خوبی نسبت به فرآیند بارش شبیه‌سازی نموده‌اند.

بررسی متغیرهای مدل که از الگوریتم SCE-UA حاصل شده‌اند، نشان می‌دهد که با توجه به بزرگ بودن مقدار متغیر b_1 نسبت به دیگر متغیرها، بخش عمده‌ای از تلفات رگبار به صورت تلفات نفوذ است. در واقع نفوذپذیری بالای لایه‌های سطحی خاک، زیاد بودن مقدار متغیر b_1 نسبت به متغیرهای دیگر را توجیه می‌کند. شاخه نزولی نسبتاً طولانی آب‌نمودها که حاکی از نقش رواناب آهسته در زمان فروکش سیلاب پس از اتمام رگبار است نیز همین موضوع را نشان می‌دهد. عوامل متعددی در ایجاد رواناب مؤثر بوده که بررسی هم‌زمان این عناصر و بررسی تأثیرات آن‌ها روی فرآیند ایجاد رواناب مشکل بوده و در برخی موارد امکان‌پذیر نیست. اما نتایج پژوهش حاضر نشان داد سیمولینک یک ابزار کارآمد جهت مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب به روش مخازن مرتبط برای حوضه‌هایی با اقلیم‌های متفاوت است. همچنین، نتایج نشان داد که آن در برآورد پاسخ حوضه به رگبارهای لحظه‌ای، هم در شرایط اقلیمی خشک و هم در شرایط اقلیمی مرطوب با پوشش‌های گیاهی متفاوت نیز نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد. ابزار سیمولینک تعریف شده در محیط نرم‌افزار متلب می‌تواند پیوند دینامیکی بین اجزای هیدرولوژیکی مانند بارندگی، ذخیره‌سازی، تبخیر-تعرق و رواناب را به صورت نمادین نشان دهد؛ بنابراین، این ابزار می‌تواند برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب در یک حوضه به صورت مفهومی و توزیعی به صورت مفید و آسان مورد استفاده قرار گیرد، به طوری که کاربران می‌توانند به راحتی یک مدل سیمولینک را با وارد کردن واحدهای توسعه یافته قبلی سفارشی کنند؛ زیرا سیمولینک چندین عملکرد را برای تسهیل بازخورد و

انتقال داده ارائه می‌دهد. از آنجایی که انواع نیازهای شبیه‌سازی به سرعت در حال رشد هستند، پیش‌بینی می‌شود که سیمولینک بتواند به طور گسترده برای تحلیل هیدرولوژیکی استفاده شود. اما اخذ رویدادهای هم‌زمان رگبار و سیلاب و نیز شکل نامتعارف آب‌نمودهای سیلاب در حوضه‌ها هم‌چنان، یکی از محدودیت‌های مدل‌سازی بارش-رواناب است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از همکاری و مساعدت شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان و شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌ها و هماهنگی برای بازدیدهای میدانی نهایت سپاس را دارد. همچنین از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه تبریز برای انجام این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد، قدردانی می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج مربوط به این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است. در صورت نیاز به اطلاعات این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول، امکان اخذ اطلاعات فراهم خواهد بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

مشارکت نویسندگان

علیرضا مرادی: مفهوم‌سازی، تحلیل‌های نرم‌افزاری و نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **اسماعیل اسدی و احمد فاخری‌فرد:** راهنمایی، ویرایش، بازبینی مقاله و کنترل نتایج.

منابع

- اسدی، اسماعیل، فاخری‌فرد، احمد، و قربانی، محمدعلی (۱۳۹۰). کاربرد مدل مخزن جهت استخراج هیدروگراف‌های واحد رواناب سریع و آهسته در فرآیند بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه ناورود). *دانش آب و خاک*، ۲۱(۳)، ۲۳-۳۵. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_1197_36.html
- پیرامون، نسرین، عبدالهی، خدایار، میرعباسی نجف‌آبادی، رسول، و نکوئی‌مهر، محمد. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی مدل‌های بارش-رواناب TANK و SimHyd در شبیه‌سازی جریان رودخانه بهشت آباد. هشتمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آگیر باران، ۵ آذر، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- <https://civilica.com/doc/1164428>
- رضایی، حسین، جباری، آناهیتا، بهمنش، جواد، و حصاری، بهزاد. (۱۳۹۵). مدل‌سازی رواناب روزانه حوضه نالوچای در غرب

گلشن، محمد، اسمعیل عوری، آباذر، و اسدی، هانیه. (۱۳۹۵). مقایسه روش‌های بهینه‌سازی روزنبرک، ژنتیک، URS و SCE-UA جهت تعیین پارامترهای مدل سیم هاید برای شبیه‌سازی دبی جریان. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۶(۱)، ۶۷-۸۰. <https://civilica.com/doc/1410490>

یونسی، حجت‌الله، یوسفی، حسین، ارشیا، آزاده، و یاراحمدی، یزدان (۱۳۹۹). شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از ابزار RRL (مطالعه موردی: ایستگاه رحیم‌آباد-دشت سیلاخور). *آبیاری و زهکشی ایران*، ۴(۴)، ۱۳۴۸-۱۳۶۱. doi:20.1001.1.20087942.1399.14.4.19.8

References

- Asadi, E., Fkheri fard, A., & Ghorbani, M.A. (2011). Tank model application to derive unit hydrographs of quick and slow runoff for rainfall- runoff process (case study: Navrood Basin). *Water and Soil Science*, 21(3), 23-35. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_1197_36.html?lang=en. [In Persian]
- Basri, H. (2013). Development of Rainfall-runoff model using tank model: problems and challenges in province of aceh, Indonesia. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 2(1), 26-36. doi: 10.13170/aijst.2.1.574
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V.K. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), 501-521. doi:10.1007/BF00939380
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V.K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3-4), 265-284. doi: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.
- Gholshan, M., Esmali Aori, A., & Asadi, H. (2016). Comparison of Rosenberk, Genetics, URS and SCE-UA optimization methods to determine the parameters of SYMHID Model for simulation of flow. *Geography and Environmental Sustainability*, 18, 67-80. <https://civilica.com/doc/1410490>. [In Persian]
- Kim, S.J., Jee, Y.G., & Kim, P.S. (2005). The Comparative analysis of optimization methods for the parameter calibration of rainfall-runoff models. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 47(3), 3-13. doi: 10.5389/KSAE.2005.47.3.003
- Kuok, K.K., Harun, S., & Chiu, P.C. (2011). Investigation best number of tanks for hydrological tank model for rural catchment in humid region. *International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications*, 3(3), 1-17. <http://dspace.unimap.edu.my/bitstream/handle/123456789/18973/2.investigation.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>
- Piramoon, N., Abdollahi, K., Mirabbasi-Najafabadi, R., & Nekooei, M. (2009). Evaluating the effectiveness of Tank and SIMHYD rainfall-runoff models in the simulation of Behesht Abad river flow. 8th National Conference on Rainwater Catchment Systems, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. <https://civilica.com/doc/1164428>. [In Persian]
- Rezaei, H., Jabbari, A., Behmanesh, J., & Hesari, B. (2006). Modeling the daily runoff of the Nazlochai basin in the west of Lake Urmia using the tank model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 123-141. doi:10.22069/jwfst.2017.9735.2401. [In Persian]
- Salmani, H., Bahremand, A., Saber Chenari, K., & Rostami Khalaj, M. (2013). Evaluation of the efficiency of AWBM, sacramento and tank rainfall runoff model in runoff simulation in Arazkoose-Goorganrood Basin, Golestan porovince. *Ecohydrology*, 1(2), 207-221. doi:10.22059/ije.2014.54225. [In Persian]
- Saxton, K.E., & Lenz, A.T. (1967). Antecedent retention indexes predict soil moisture. *Journal of Hydrology Div ASCE*, 93(4), 223-241. doi:10.1061/jyceaj.0001647
- Song, J.H., Her, Y., Park, J., Lee, K.D., & Kang, M.S. (2017) Simulink implementation of a hydrologic model: A Tank model case study. *Water*, 9(9), 639. doi.10.3390/w9090639.
- Song, J.H., Her, Y., Suh, K., Kang, M.S., & Kim, H. (2019). Regionalization of a rainfall runoff model: limitations and potentials. *Water*, 11, 2257. Doi:10.3390/w11112257.
- Suryoputro, N., Suhardjono, S., Widandi, & Suhartanto, E. (2017). Calibration of infiltration parameters on hydrological tank model using runoff coefficient of rational method. Cite as: AIP Conference Proceedings 1887(1), 020056. doi:10.1063/1.5003539.
- Yonesi, H., Yosefi, H., Arshia, A., & Yarahmadi, Y. (2020). runoff rainfall simulation using rrl toolkit (case study: Rahim Abad station-Silakhor plain). *Irrigation and Drainage*, 4,

- 1348-1361. doi:20.1001.1.20087942.1399.14.4.19.8 [In Persian]
- Yue, S., & Hashino, M. (2000). Unit hydrographs to model quick and slow runoff components of streamflow. *Journal of Hydrology*, 227(1-4), 195-206. doi:10.1016/S0022-1694(99)00185-7.