

Evaluation of Empirical Methods to Estimate Streamflow in Ungauged Basins (Case Study: the Sefidroud Watershed)

**Mohsen Nasseri^{1*}, Banafsheh Zahraie², Hamed Poorsepahy Samian³, Maryam Khodadadi⁴,
Neda DolatAbadi⁵**

1- Assistant Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(*Corresponding Author Email: mnasseri@ut.ac.ir)

2- Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Postdoctoral Researcher, University of Tehran Water Institute, Tehran, Iran

4- Research Fellow, University of Tehran Water Institute, Tehran, Iran

5- PhD Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract:

1- Introduction:

Estimation of discharge in ungauged basins is of prominent importance in hydrologic and water resource management studies; however, it is not possible to determine the runoff coefficient in different watersheds without streamflow data. In many study areas of the country (unit of hydrological basis and balance of water resources in the studies of the Ministry of Energy), there is no hydrometric station to measure the surface flow out of the area.

Several methods have been introduced to estimate the discharge of ungauged basins, which can be classified into three main categories. The first category contains the methods that make a relation between precipitation and the produced runoff (such as the Inglis and De'Souza and the Indian Department of Irrigation (IDOI) methods). The second category includes the methods that estimate annual runoff deficit and predict the yearly runoff accordingly (such as Turc, Langbein, Coutagine, and Khosla methods). The third category covers the methods that take into account the physiographic characteristics of basins to estimate runoff (such as the Indian Council of Agricultural Research (ICAR), Justin, and Lacey methods). The SCS Curve Number (CN) method is also among the most common methods of estimating runoff produced by rainfall and considers various conditions in its formulations; nonetheless, determining the CN and its initial absorption coefficient is still challenging. The aim of the present study is to evaluate the efficiency of different empirical methods in the estimation of runoff in watersheds with different hydrologic and physiographic characteristics and climatic conditions in addition to giving some insights on the selection of the proper runoff estimation methods in ungauged basins.

2- Methodology:

In this study, the application of empirical methods in the calculation of the outgoing discharge from various areas in the Sefidroud watershed was investigated. The Sefidroud watershed has a total number of 11 areas, 10 of which have hydrometric stations in their outlets. For these ten sub-basins, the observed annual runoff was compared with the results yielded by the aforementioned empirical

methods, and the efficiency of each method was assessed accordingly for each sub-basin. The Root Mean Squared Error (RMSE), Standard Deviation (SD), Correlation Coefficient, and the Centered Root Mean Squared Deviation (CRMSD) were used to analyze the data. The runoff estimation methods investigated in this study included Khosla, Lacey, Inglis De'Souza, Coutagine, Turc, ICAR, IDOI, Justin, and the SCS-CN methods. Moreover, the authors of the present study tried to find the optimized value of the initial absorption coefficient in the SCS-CN method in order to obtain a reasonably accurate estimation of runoff for each sub-basin.

3- Discussion:

The results of the present study indicated that the Khosla and the SCS-CN methods with an initial absorption coefficient of 0.05 and 0.2 showed the poorest performance in all sub-basins. Moreover, the Inglis De'Souza method was not applicable in Iran's sub-basins due to its different approach in dealing with plains and highlands. Because the study areas in the catchments of Iran are all a combination of plains and elevations and sometimes include a combination of several plains and several elevations with different characteristics.

The optimized values of the initial absorption coefficients varied between 0.0006 and 0.25, which implies that a specific value of initial absorption cannot be used in all of the sub-basins to achieve the best accuracy in the estimation of runoff.

Comparison between the results yielded by other methods (i.e. Turc, Coutagine, IDOI, ICAR, and Justin) with the observed streamflows indicated that the choice of the best method depends on the error index used for comparison. In other words, the Justin method had the best performance in terms of correlation with the observed runoff in the Sefidroud watershed. But, in terms of the RMSE error index, the IDOI method generally performs better. Finally, the Coutagine method had a good performance in terms of both correlation and RMSE in the main study areas.

4- Conclusion:

According to the results of the present study, the Justin method is recommended for areas that have a high altitude and temperature gradient and at the same time have a high flow coefficient. The IDOI method performs best for sub-basins that have a high runoff to rainfall ratio. As this ratio decreases below 0.2, the IDOI method is likely to produce poorer results. The Coutagine method showed a moderate performance in most of the studied areas, which suggests that it can be employed to produce conservative results in many areas under study.

Keywords: Empirical Methods, Runoff Estimation, Ungauged Basins, the Sefidroud Watershed.

References:

- Dalavi, P., Bhakar, S. R., Bhange, H. N., & Gavit, B. K. (2018). Assessment of Empirical Methods for Runoff Estimation in Chaskaman Catchment of Western Maharashtra, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(5), 1511-1515.
- Golshan, M., & Ebrahimi, P. (2014). Estimation of the Runoff by Empirical Equations in Dry and Mid-Dry Mountainous Area without Stations (Case Study: Madan Watershed, Qazvin Province-Iran). *Bulletin of Environment, Pharmacology, and Life Sciences*, 3(3), 97-106.
- Gupta, B. L., & Gupta, A. (1992). *Engineering hydrology*. New Delhi: Standard Publishers.
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., & Van Mullem, J. A. (2009). *Curve Number Hydrology: State of the Practice*. American Society of Civil Engineers.
- Hong, Y., Adler, R. F., Hossain, F., Curtis, S., & Huffman, G. J. (2007). A First Approach to Global Runoff Simulation Using Satellite Rainfall Estimation. *Journal of Water Resources Research*, 43(8), 1-8.
- Horvat, B., & Rubinic, J. (2006). Annual Runoff Estimation - An Example of Karstic Aquifers in the Transboundary Region of Croatia and Slovenia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(2), 314-324.
- Inglis, C. C., & De'Souza, A. J. (1930). A Critical Study of Runoff and Floods of Catchments of Bombay Presidency with a Short Note on Losses from Lake by Evaporation. *Technical Paper*, 30.
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, New Global Gridded Curve Numbers for Hydrologic Modeling and Design. *Journal of Scientific Data*, 6(1), 1-9.
- Khopade, D. K., & Oak, R. A. (2014). Estimation of Runoff Yield for Nira Deoghar Catchment Using Different Empirical Equations. *The International Journal of Engineering and Science*, 3(6), 75-81.
- Khosla, A. N. (1949). *Appraisal of Water Resources Analysis and Utilization of Data*. Proceedings of United Nations Scientific Conference on Conservation and Utilization of Resources.
- Khosravi, K., Mirzai, H., & Saleh, I. (2013). Assessment of Empirical Methods of Runoff Estimation by Statistical Test (Case Study: BandakSadat Watershed, Yazd Province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(3), 285-301.
- Langbein, W. B. (1949). *Annual Runoff in the United States*. Washington DC, USA: US Geol. Survey Circular 52.
- Lewis, D., Singer, M. J., & Tate, K. W. (2000). Applicability of SCS Curve Number Method for a California Oak Woodlands Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(2), 226-230.
- Meresa, H. (2019). Modelling of River Flow in Ungauged Catchment Using Remote Sensing Data: Application of the Empirical (SCS-CN), Artificial Neural Network (ANN) and Hydrological Model (HEC-HMS). *Journal of Modeling Earth Systems and Environment*, 5(1), 257-273.
- Plummer, A., & Woodward, D. E. (1998). *Origin and Derivation of Ia/S in the Runoff Curve Number System*. International Water Resources Engineering Conference, ASCE, Reston, USA, 1260-1265.

- Raghunath, H. M. (2006). *Hydrology, Principles, Analysis, and Design*. New Delhi: New Age International Publishers.
- Rawat, K. S., Singh, S. K., & Szilard, S. (2020). Comparative Evaluation of Models to Estimate Direct Runoff Volume from an Agricultural Watershed. *Journal of Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-15.
- SCS (1985). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. US Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Shi, Z. H., Chen, L. D., Fang, N. F., Qin, D. F. & Cai, C. F. (2009). Research on the SCS-CN Initial Absorption Ratio Using Rainfall-Runoff Event Analysis in the Three Gorges Area, China. *Catena Journal*, 77(1), 1-7.
- Sobhani, G. (1976). *A Review of Selected Small Watershed Design Methods for Possible Adoption to Iranian Conditions*. (n.p).
- Turc, L. (1955). Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Journées de l'hydraulique*, 3(1), 36-44.
- Varshney, R. S. (1979). *Engineering Hydrology*. New Chand and Bros.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۲، پیاپی ۸۱، شماره ۴، بهار ۱۴۰۰، صص ۲۴-۱

نوع مقاله: پژوهشی

وصول: ۱۳۹۹/۸/۹ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

ارزیابی روش‌های تجربی برآورد جریان در حوضه‌های بدون ایستگاه

نمونه پژوهش: حوضه سفیدرود بزرگ

محسن ناصری^{*}، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

mnasseri@ut.ac.ir

بنفشه زهرایی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

bzahraie@ut.ac.ir

حامد پورسپاهی سامیان، محقق پسادکترای مؤسسه آب دانشگاه تهران، تهران، ایران

poresepahy@ut.ac.ir

مریم خدادادی، محقق، مؤسسه آب دانشگاه تهران، تهران، ایران

maryam.khodadadi@ut.ac.ir

ندا دولت‌آبادی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

n.dolatabadi@ut.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت و نقش میزان جریان در مطالعات منابع آب، در این پژوهش روش‌های تجربی برآورد جریان رودخانه در مناطق بدون ایستگاه آب‌سنجی بررسی شده‌اند. عملکرد این روش‌ها در تخمین جریان سطحی خروجی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه سفیدرود بزرگ که ایستگاه آب‌سنجی دارند، بررسی شده است. جریان سطحی تخمینی براساس روش‌های تجربی مختلف با جریان سطحی مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی مقایسه و نتایج از منظر شاخص‌های آماری همچون خطا ارزیابی شده است. انتخاب این حوضه با توجه به گستردگی جغرافیایی، تنوع اقلیمی و ویژگی‌های فیزیوگرافیک متنوع آن صورت گرفته است. روش‌های جاستین، کوتاین، سازمان تحقیقات کشاورزی هندوستان، دپارتمان آبیاری هندوستان، تورک، لازی، خوسلا، انگلی-دی سوزا و SCS-CN مربوط به سازمان حفاظت خاک آمریکا در این پژوهش بررسی شده‌اند. نتایج در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود حاکی از عملکرد بهتر روش‌های دپارتمان آبیاری هندوستان، جاستین و کوتاین بوده است. در پایان با توجه به نتایج به دست آمده، روش جاستین برای محدوده‌هایی با گرادیان ارتقاعی و دامایی شدید و در عین حال ضریب جریان زیاد توصیه می‌شود. روش سازمان آبیاری هندوستان نیز برای محدوده‌های دارای نسبت زیاد رواناب به بارش عملکرد قابل قبولی داشته است؛ اما هرچه نسبت رواناب به بارش کمتر از ۰/۲ باشد، عملکرد این روش ضعیف‌تر می‌شود. روش کوتاین در بیشتر محدوده‌ها عملکردی متوسط دارد که بر این اساس این روش به‌مثابه انتخابی محافظه‌کارانه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روش تجربی، برآورد جریان رودخانه، حوضه بدون ایستگاه، حوضه آبریز سفیدرود بزرگ

*نویسنده مسئول

Copyright©2021, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/gep.2021.125717.1369](https://doi.org/10.22108/gep.2021.125717.1369)

۱. مقدمه

برآورد جریان رودخانه در حوضه‌های بدون ایستگاه اهمیت ویژه‌ای در مطالعات هیدرولوژی و مدیریت منابع آب این حوضه‌ها دارد؛ همچنین، تعیین ضریب رواناب در حوضه‌های مختلف نیز در صورت نبود داده‌های جریان امکان‌پذیر نیست. بنا بر تعریف متداول، ضریب رواناب (جریان) در حوضه برابر با درصدی از میزان بارندگی است که به رواناب تبدیل می‌شود. این ضریب در کل به عوامل مختلفی مانند شکل، مساحت، شیب، و پوشش حوضه بستگی دارد (علیزاده، ۱۳۸۷: ۵۲۲).

محدوده مطالعاتی حاضر، واحد مبنای هیدرولوژیکی و بیلان منابع آب در مطالعات وزارت نیروی ایران است؛ اما در بسیاری از محدوده‌های مطالعاتی در کشور ایستگاه هیدرومتری در انتهای محدوده قرار ندارد و در بعضی محدوده‌های مطالعاتی نیز در فاصله‌ای نزدیک در پایین دست یا بالادست خروجی محدوده قرار دارد که می‌توان از این ایستگاه برای برآورد جریان بهره گرفت؛ با این حال در بسیاری از محدوده‌های مطالعاتی، چنین ایستگاهی نیز وجود ندارد و در نتیجه به منظور مطالعه هیدرولوژی و بیلان منابع و مصارف آب در این محدوده‌ها به استفاده از روش‌هایی به منظور تخمین جریان سطحی خروجی از محدوده مطالعاتی نیاز است.

روش‌های مختلفی با هدف تخمین جریان خروجی از محدوده‌های مطالعاتی بدون ایستگاه هیدرومتری ارائه شده است که از متغیرهای هیدروفیزیولوژیک همچون نفوذپذیری خاک، بارش، دما، تبخیر، پوشش گیاهی و شیب استفاده می‌کنند. روش استدلالی در برآورد رواناب، روش‌های تجربی و روش مبتنی بر شماره منحنی از سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) از جمله این روش‌ها هستند (Hawkins et al., 2009: 16).

خسروی و همکاران^۱ (2013) روش‌های تجربی برآورد رواناب را به سه دسته مختلف تقسیم کرده‌اند؛ دسته اول روش‌هایی هستند که بین بارش و رواناب رابطه برقرار می‌کنند؛ روش انگلی - دی‌سوزا^۲ (1930) و روش دپارتمان آبیاری هندوستان^۳ (IDOI) (Gupta and Gupta, 1992) در این دسته قرار می‌گیرند؛ دسته دوم روش‌هایی هستند که میزان کمبود جریان سالانه را محاسبه و سپس اختلاف بارش و کمبود جریان سالانه را به مثابه جریان سالانه پیش‌بینی می‌کنند. روش‌های تورک^۴ (1954)، لانگبین^۵ (1949)، کوتاین^۶ و خوسلا^۷ نیز در این دسته جای دارند؛ دسته سوم روش‌هایی هستند که از ویژگی‌های فیزیولوژیکی حوضه به منظور برآورد رواناب بهره می‌گیرند. روش‌های سازمان تحقیقات آبیاری هندوستان^۸ (ICAR)، جاستین^۹ و روش لازی^{۱۰} در این دسته جای دارند.

1. Khosravi et al.

2. Engli de Souza

3. Indian Department of Irrigation

4. Turc

5. Langbein

6. Coutagine

7. Khosla

8. Indian Agricultural Research Institute

9. Justine

10. Lacey

روش انگلی - دی‌سوزا^۱ (1930) را انگلی و دی‌سوزا ارائه کرده‌اند. با اینکه این روش، یکی از روش‌های قدیمی برآورد رواناب محسوب می‌شود، همچنان نتایج برآورد آن مورد توجه پژوهشگران است.

روات و همکاران^۲ (2020) روش‌های تجربی مختلفی از جمله رابطه انگلی و دی‌سوزا، تورک، IDOI، کوتاین، خوسلا، جاستین، لازی، ICAR و SCS-CN را در برآورد رواناب سالانه در یک حوضه آبریز در هندوستان با یکدیگر مقایسه کردند. براساس نتایج این پژوهش، بهترین عملکرد را روش انگلی - دی‌سوزا داشته است؛ البته معیار تعیین عملکرد بهتر در مطالعه آنها، شباهت بیشتر به نتایج SCS-CN بوده است؛ در واقع فرض در این مطالعه این بوده است که نتایج روش SCS-CN دقت قابل قبولی دارد.

روش تجربی دپارتمان آبیاری هندوستان که گوپتا و گوپتا^۳ (1992) تشریح کرده‌اند، از جمله روش‌هایی است که عملکرد آن در مطالعات پیشین به‌ویژه در حوضه‌های آبریز ایران مطلوب بوده است؛ برای نمونه تیموریان و همکاران (۱۳۹۳) در برآورد رواناب حوضه بوشگیان، این روش را برترین روش تشخیص داده‌اند. اسدی و سمیعی (۱۳۸۹) نیز این روش را در برآورد رواناب حوضه بند بهمن در استان فارس به‌منزله روش منتخب (همراه با روش ICAR) پیشنهاد کردند. اسمعی و سمیعی (۱۳۹۰) نیز این روش را در مقایسه با روش‌های دیگر از جمله کوتاین، ICAR و جاستین به‌منزله روش برتر برای برآورد رواناب در حوضه تنگ خسویه شناسایی کرده‌اند.

روش‌های تورک و لانگبین رواناب را بر مبنای کمبود جریان سالانه تخمین می‌زنند. این روش‌ها را هوروات و روبنیک^۴ (2006) به‌منظور برآورد رواناب در یک حوضه کارستی در کشور کرواسی به کار گرفته‌اند؛ براساس نتایج این پژوهش در برآورد هیدرولوژیکی رواناب در کرواسی، روش تورک نسبت به روش لانگبین برتری دارد. یکی از علل این برتری، مناطق توسعه‌یافته این دو روش است؛ زیرا روش تورک و لانگبین به ترتیب براساس داده‌های جمع‌آوری‌شده در اروپا و آمریکا توسعه یافته‌اند.

شهریاری و همکاران (۱۳۹۵) روش‌های تورک، کوتاین و جاستین را به‌منظور برآورد رواناب در حوضه رودخانه سرخاب مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روش تورک دقت مناسب‌تری داشته است.

روش‌های کوتاین و خوسلا نیز رواناب را بر مبنای کمبود جریان سالانه تخمین می‌زنند. جندقی و محمدی (۱۳۸۸) نتایج به‌دست‌آمده از روش تجربی خوسلا را در حوضه‌های آبریز غرب استان گلستان با داده‌های مشاهداتی مقایسه کردند. مقایسه آنها نشان داد نتایج حاصل از این روش خطای زیادی در تخمین جریان سطحی در سه زیرحوضه در استان گلستان داشته است.

خپاد و اوک^۵ (2014) روش‌های تجربی مختلفی را در زمینه برآورد رواناب در حوضه نیرادوگار هندوستان به کار گرفته و کارایی این روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. نتایج حاکی از برتری عملکرد روش‌های خوسلا و کوتاین نسبت به سایر روش‌ها بود.

-
1. English and De'Souza
 2. Rawat et al.
 3. Gupta and Gupta
 4. Horvat and Rubinic
 5. Khopade and Oak

عبادی‌فر و نادری دیزگاه (۱۳۹۶) کاربرد روش‌های تجربی مختلف را درزمینه برآورد حوضه حویق در استان گیلان بررسی و عملکرد آنها را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج حاکی از برتری روش خوسلا از نظر دقت برآورد رواناب بوده است.

دلآوری و همکاران^۱ (۲۰۱۸) عملکرد روش‌های تجربی مختلف شامل کوتاین، IDOI، خوسلا و انگلی - دی‌سوزا را در برآورد رواناب سالانه حوضه چسکمان^۲ در کشور هند با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این پژوهش گویای برتری روش کوتاین در این حوضه بوده است.

روش جاستین و ویژگی‌های فیزیولوژیکی حوضه را در مقایسه با حوضه‌های مجاور یا مشابه در نظر می‌گیرد و رواناب را بر همین اساس تخمین می‌زند.

عزیزنیا کشتلی و بیات ورکشی (۱۳۹۷) کارایی معادلات تجربی مختلف برآورد رواناب را در حوضه بابلرود با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج حاکی از برتری روش جاستین بوده است.

قاسمی و سلطانی (۱۳۹۳) نیز در مقایسه این روش با روش‌های تورک و کوتاین، برتری این روش را در برآورد رواناب در زیرحوضه شهید در حوضه کارون گزارش کرده‌اند.

روش لازمی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی حوضه را براساس پارامتری در نظر می‌گیرد که مقدار آن را به صورت جدولی ارائه‌دهندگان این روش پیشنهاد کرده‌اند.

خسروی و همکاران^۳ (۲۰۱۳) روش‌های تجربی برآورد رواناب را با بهره‌گیری از بررسی آماری در حوضه بنادک سادات استان یزد ایران بررسی کردند. روش‌های تورک، کوتاین، خوسلا، ICAR، لازمی، جاستین و انگلی - دی‌سوزا در این پژوهش بررسی شده است. نتایج حاکی از برتری روش لازمی در مقایسه با سایر روش‌ها از نظر خطا نسبت به رواناب مشاهداتی بود.

گلشن و ابراهیمی^۴ (۲۰۱۴) روش‌های تجربی مختلف را درزمینه برآورد رواناب در منطقه‌ای در شمال شرق استان قزوین به کار گرفتند. نتایج حاکی از برتری روش لازمی بوده است.

روش سازمان تحقیقات آبیاری هندوستان (ICAR) از ویژگی‌های فیزیوگرافیک حوضه به منظور برآورد رواناب بهره می‌گیرد. اسدی و سمیعی (۱۳۸۹) روش‌های کوتاین، جاستین، ICAR، روش سازمان جهانی هواشناسی، روش دپارتمان آبیاری هندوستان و روش خوسلا را با هدف برآورد رواناب در حوضه آبخیز بند بهمن در شهرستان شیراز مقایسه کردند. نتیجه این پژوهش حاکی از برتری دقت روش ICAR و روش IDOI در این حوضه است.

روشنی و همکاران (۱۳۹۴) روش‌های مختلف برآورد آب‌دهی جریان را در حوضه آبریز گرگان‌رود بررسی کردند. در این پژوهش روش‌های کوتاین، ICAR، IDOI، روش تورک و روش خوسلا بررسی شده است. بر مبنای نتایج، روش ICAR بهترین عملکرد را داشته و در رتبه بعدی نیز روش IDOI قرار گرفته است.

-
1. Dalavi et al.
 2. Chaskman
 3. Khosravi et al.
 4. Golshan and Ebrahimi

از دیگر روش‌های استفاده‌شده در برآورد رواناب در مناطق بدون ایستگاه، روش SCS-CN است که سازمان حفاظت خاک آمریکا توسعه داده است. پژوهش‌های فراوانی با تمرکز بر این روش و انتخاب مقدار پارامتر O انجام شده است. مقدار پارامتر O نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان جذب اولیه دارد؛ برای نمونه شی و همکاران^۱ (2009) مقادیر پارامتر معادل ۰/۲ و ۰/۰۵ را بررسی، و بیان کردند مقدار $o=0.05$ تا حدی باعث بهبود دقت در برآورد رواناب می‌شود. لوئیس و همکاران^۲ (2000) روش SCS-CN را در حوضه‌ای جنگلی در کالیفرنیا آمریکا به کار گرفتند. نتایج حاکی از این بود که این روش رواناب را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

هونگ و همکاران^۳ (2007) دقت روش SCS-CN را با در نظر گرفتن شرایط اولیه رطوبت خاک براساس تصاویر ماهواره‌ای در نقاط مختلف جهان بررسی کردند. نتایج حاکی از دقت مناسب این روش در تخمین مقدار متوسط رواناب سالانه و تغییرات آن در طول‌های جغرافیایی مختلف بود.

پلامر و وودوارد^۴ (1998) نیز پیشنهاد تغییرپذیری مقدار $o=0.2$ را در مناطق مختلف ارائه، و بیان کردند برای تمامی مناطق کاربرد ندارد و در هر منطقه باید منحنی‌های CN براساس رابطه Ia-S به‌طور مجزا طراحی شود.

پژوهش‌های مختلفی کاربرد روش SCS-CN را در برآورد رواناب در حوضه‌های بدون اندازه‌گیری بررسی کرده‌اند؛ یکی از آخرین پژوهش‌ها در این زمینه، پژوهش مرسا^۵ (2019) است که روش SCS-CN را در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل Hec-HMS به‌منظور برآورد جریان در یک حوضه بدون ایستگاه در اتیوپی به کار گرفته است. نتایج نشان داد SCS-CN در مقادیر جریان زیاد و ANN در مقادیر جریان کم عملکرد نسبی بهتری داشته‌اند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد کاربرد روش‌های تجربی برآورد رواناب در حوضه‌های مختلف نتایج کاملاً متفاوتی را به همراه دارد؛ به گونه‌ای که نمی‌توان به‌درستی مشخص کرد کدام روش باید در یک حوضه بدون ایستگاه استفاده شود؛ از سوی دیگر در بسیاری از مطالعات فقط یک حوضه بررسی و قضاوت درباره کیفیت روش‌های مختلف براساس یک حوضه انجام شده است.

بهرامی و ایمنی (۱۳۹۸) مدل‌های تجربی مختلف را در برآورد رواناب سالانه در حوضه حصارک در شمال غرب تهران بررسی کردند. روش‌های ICAR، جاستین، انگلی-دی‌سوزا و روش شماره منحنی (SCS-CN)، روش‌های بررسی‌شده در این پژوهش بودند. نتایج حاکی از مطابقت بیشتر روش SCS-CN با رواناب مشاهداتی در این حوضه بود.

در پژوهش حاضر، کاربرد روش‌های تجربی تخمین جریان در برآورد جریان سطحی خروجی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه سفیدرود بررسی شده است. این حوضه در مجموع ۱۱ محدوده مطالعاتی دارد که از این میان، ۱۰ محدوده مطالعاتی ایستگاه هیدرومتری در خروجی محدوده (یا در نزدیک خروجی آن در پایین دست یا بالادست) دارد. نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد روش‌های تجربی در این ۱۰ محدوده بررسی و با مقدار جریان مشاهداتی سالانه

-
1. Shi et al.
 2. Lewis et al.
 3. Hong et al.
 4. Plummer and Woodward
 5. Meresa

ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری مقایسه شده است. در ادامه این مقاله در بخش ۲، روش‌های تجربی بررسی شده شامل عمده روش‌های معرفی شده در پژوهش‌های پیشین تشریح و روابط مربوط ارائه شده است؛ سپس در بخش ۳، نقشه حوضه سفیدرود و موقعیت محدوده‌های مطالعاتی مختلف آن نشان داده شده است. در بخش ۴، نتایج حاصل از کاربرد روش‌های تجربی در محدوده‌های مطالعاتی حوضه سفیدرود ارائه و با جریان مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری مقایسه شده است؛ در نهایت در بخش ۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی ارائه شده است.

۲. شیوه‌های محاسبه جریان در محدوده‌های بدون ایستگاه هیدرومتری

روابط تجربی محاسبه جریان سطحی در مناطق بدون آمار دبی که در ادامه معرفی می‌شوند، بیشتر قدیمی هستند و در پژوهش‌های مختلف در ایران سابقه کاربرد دارند؛ همچنین بعضی از این روش‌ها مانند جاستین در مطالعات بیلان منابع و مصارف در بعضی از محدوده‌های مطالعاتی بدون ایستگاه به کار برده شده‌اند. این روش‌ها، بیشتر به‌منظور برقراری رابطه بین جریان رودخانه در محل خروجی حوضه با متغیرهای محیطی مانند بارش، دما یا خصوصیات فیزیوگرافیک همچون شیب و... توسعه یافته و به کار برده شده‌اند.

a. روش جاستین

جاستین برای پیشنهاد، رابطه بین بارندگی و رواناب سالانه را در حوضه‌های مختلف با شرایط اقلیمی متفاوت بررسی و رابطه خویش را با فرض عملکرد یکسان تولید رواناب در حوضه‌های مختلف پیشنهاد کرد. در زیر رابطه جاستین ارائه شده است (علیزاده، ۱۳۸۷: ۵۲۵):

$$R = K \times SL^{0.155} \times \frac{P^2}{1.8 \times T + 32} \quad (1)$$

$$SL = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

در روابط بالا، K ضریب جاستین نامیده شده که به قابلیت پتانسیل آبی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و پوشش گیاهی در هر محدوده مطالعاتی وابسته است. P مقدار بارندگی سالانه، SL شیب حوضه برحسب متر، T میانگین درجه حرارت سالانه برحسب سانتی‌گراد و R ارتفاع متوسط رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه به متر است؛ همچنین Hmax و Hmin به ترتیب برابر با ارتفاع حداکثر و حداقل حوضه به کیلومتر و A مساحت حوضه به کیلومتر مربع است. به دلیل به‌کارگیری متغیر دما در رابطه بالا، توجه به عامل تبخیر به‌صورت غیرمستقیم مدنظر بوده است. در این روش شیب محدوده، حداکثر و حداقل تراز ارتفاعی آن و مساحت محدوده از عوامل تأثیرگذار و محدودکننده هستند. این روش در حوضه‌های کوچک تخمین دقیق‌تری دارد.

b. روش کوتاین

این روش بر میزان کمبود جریان در حوضه آبریز استوار است. روابط روش کوتاین به شرح زیر است (همان: ۵۲۷):

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 \times T} \quad (3)$$

$$D = \begin{cases} P - \lambda P^2 & \frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \\ P & \frac{1}{8\lambda} > P \\ 0.02 + 0.35 \times T & P > \frac{1}{2\lambda} \end{cases} \quad (4)$$

$$R = P - D = \lambda P^2 \quad (5)$$

در روابط بالا، D برابر با کمبود جریان سالانه برحسب متر، P بارندگی سالانه حوضه به متر، T دمای متوسط حوضه به سانتی‌گراد و R ارتفاع رواناب سالانه به متر است.

c. روش تورک

این روش نیز همانند روش کوتاین بر میزان کمبود مبتنی است (Horvat and Rubinic, 2006: 316):

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (6)$$

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (7)$$

$$R = P - D \quad (8)$$

در روابط بالا، D معادل کمبود برحسب میلی‌متر، P متوسط بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر، R ارتفاع معادل رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه برحسب میلی‌متر، T میانگین دمای سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد و L ضریب تجربی رابطه است.

d. روش ICAR

این رابطه را انجمن تحقیقاتی هند ارائه کرده است و به منظور تخمین جریان خروجی سالانه در حوضه‌های بدون ایستگاه به کار می‌رود (علیزاده، ۱۳۸۷: ۵۲۸):

$$R = \frac{1.115 \times P^{1.44}}{T^{1.34} \times A^{0.0613}} \quad (9)$$

در رابطه بالا، R ارتفاع متوسط رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه برحسب میلی‌متر، P بارندگی سالانه منطقه برحسب میلی‌متر، A مساحت منطقه برحسب کیلومتر مربع و T متوسط دمای سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد را تبیین می‌کند. این روش از ساده‌ترین روش‌های موجود است که با داشتن مقادیر بارش، دما و مساحت محدوده مطالعاتی، ارتفاع رواناب سالانه را با یک رابطه تجربی تخمین می‌زند.

e. روش دپارتمان آبیاری هندوستان (IDOI)

یکی از ساده‌ترین روش‌های موجود، روش دپارتمان آبیاری هندوستان است که با داشتن مقادیر بارش، ارتفاع رواناب سالانه را با یک رابطه تجربی تخمین می‌زند. مدیریت طرح Rihand از سازمان آبیاری هندوستان، رابطه زیر را به منظور برآورد رواناب سالانه ارائه کرد (Khosravi et al., 2013: 288):

$$R = P - 1.17 \times P^{0.86} \quad (10)$$

در این رابطه، R معرف ارتفاع متوسط رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه برحسب سانتی‌متر و P بارندگی سالانه منطقه برحسب سانتی‌متر است.

f. روش انگلی - دی سوزا

روابط انگلی - دی سوزا برای مناطق کوهستانی و دشت‌ها به صورت مجزا ارائه شده است. این رابطه براساس مطالعات صورت پذیرفته در منطقه ماهاراشترا در هند توسعه داده شده است (Raghunath, 2006: 107):

$$R = 0.85 \times P - 30.5 \quad (11) \quad \text{برای کوهستان}$$

$$R = \frac{(P - 17.8) \times P}{254} \quad (12) \quad \text{برای دشت}$$

در روابط بالا، R معرف ارتفاع متوسط رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه برحسب میلی‌متر و P بارندگی سالانه منطقه برحسب میلی‌متر است. چنانچه اطلاعات بارش در محدوده موجود باشد و مشخصات محدوده با فرضیات روش انگلی - دی سوزا همخوانی داشته باشد، از این روش به منظور تخمین جریان استفاده می‌شود.

g. روش خوسلا

یکی دیگر از ساده‌ترین روش‌های برآورد رواناب سالانه، روش خوسلاست که با داشتن مقادیر بارش و دما، ارتفاع رواناب سالانه را تخمین می‌زند. خوسلا به منظور تشخیص این سه متغیر در حوضه‌های آبریز هندوستان و آمریکا رابطه زیر را توسعه داده است (Raghunath, 2006: 106):

$$R = P - \frac{T}{3.74} \quad (13)$$

در رابطه بالا، R مبین ارتفاع متوسط رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه برحسب سانتی‌متر، P بارندگی سالانه منطقه برحسب سانتی‌متر و T متوسط دمای سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد است.

h. روش لازی

رابطه لازی را یک پژوهشگر هندی ارائه و در حوضه‌های آبریز متعددی ارزیابی کرده است. در زیر ساختار ریاضی آن ارائه شده است (Raghunath, 2006: 107):

$$R = \frac{P}{1 + \frac{302.8}{P} \times F_z} \quad (14)$$

در این رابطه، P میانگین بارش سالانه برحسب سانتی‌متر، R ارتفاع متوسط رواناب سطحی سالانه در نقطه تمرکز حوضه برحسب سانتی‌متر و F_z پارامتری است که به دوره بارش و ویژگی‌های فیزیکی و شکل حوضه وابسته است و از جدول ۱ به دست می‌آید.

جدول ۱. مقادیر ضریب F_z در روش لازی

Table 1. Values of F_z parameters in different watershed's condition

خصوصیات حوضه	طول دوره بارش		
	بلند	متوسط	کوتاه
شامل فلات، دشت‌های مسطح با خاک عمیق و پوشش گیاهی	۶	۴	۲
مناطق به نسبت مسطح با خاک عمیق و پوشش گیاهی مرتع	۲/۵	۱/۶۷	۰/۸۳
تپه با خاک کم عمق و پوشش گیاهی نسبتاً ضعیف	۱/۵	۱	۰/۵
شن، ماسه سنگ، زمین‌های شیب‌دار با ارتفاع زیاد	۰/۴۳	۰/۵۸	۰/۲۳
صخره مرتفع و شیب‌دار بدون پوشش گیاهی	۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۱۴

۱. روش شماره منحنی (SCS-CN)

یکی دیگر از روش‌های تجربی موجود در ادبیات موضوع شبیه‌سازی رواناب سطحی که از نظر فنی نیز پشتوانه محکمی دارد، روش شماره منحنی (CN) است که سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) در سال ۱۹۵۴ ارائه کرده و در مطالعات و پژوهش‌های بعدی به شکل گسترده‌ای مدنظر قرار گرفته است (SCS, 1985). روش CN، یکی از پرکاربردترین روش‌ها به‌منظور برآورد رواناب سطحی (بارش مازاد) براساس اطلاعات روزانه در حوضه‌های بدون ایستگاه هیدرومتری است. در این روش، مشخصات هیدروفیزیکولوژیک حوضه مدنظر است که به تخمین صحیح‌تر رواناب سطحی منجر می‌شود. ارتفاع متوسط رواناب سطحی در روش CN براساس بارندگی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (15)$$

$$R = -\frac{(P - \lambda \times S)^2}{P + I_a - S} > I_a \times S \quad (16)$$

$$I_a = \lambda \times S \quad (17)$$

در روابط بالا، R ارتفاع رواناب مستقیم (بارش مؤثر) برحسب میلی‌متر، P بارش روزانه برحسب میلی‌متر، S حداکثر توان نگهداری رطوبت در خاک و نفوذ در خاک برحسب میلی‌متر، I_a ضریبی از S به‌منظور تعیین جذب اولیه و I_a جذب اولیه است؛ همچنین مقدار حداقل و حداکثر S به رطوبت گذشته خاک بستگی دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد به‌طور متوسط I_a پیش از شروع جریان به‌صورت تلفات اولیه عمل می‌کند و بقیه این مقدار در طول بارش صرف نفوذ سطحی و عمقی در خاک می‌شود؛ بنابراین چنانچه ارتفاع بارندگی کمتر از I_a باشد، رواناب تولید نمی‌شود. لازم به تصریح است در روابط بالا عواملی چون تبخیر و تعرق و زهکشی لحاظ نشده است.

مقدار عددی شماره منحنی (CN) به نفوذ آب در خاک حوضه مربوط است که حداکثر مقدار آن برابر با عدد ۱۰۰ است. به‌منظور تعیین پتانسیل تولید رواناب به این روش، به نقشه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک منطقه بررسی شده نیاز است. با تلفیق لایه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک، نقشه شماره منحنی براساس جدول‌های استاندارد این روش به دست می‌آید؛ همچنین می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تعیین مقدار CN در این روش استفاده کرد؛ به همین منظور نخست باید تصاویر ماهواره‌ای دانلودشده در محل بررسی و تطابق داده شوند تا اطلاعات آن را به نحوی و با استفاده از سایر شواهد (مطالعات سایرین و...) تأیید و سپس استفاده کرد. به‌منظور استفاده از تصاویر ماهواره‌ای باید پیش‌پردازش‌های لازم با توجه به نوع تصاویر و اطلاعات مورد نیاز انجام و اطلاعات از تصاویر استخراج شود.

نکته حائز اهمیت درباره روش CN، تناسب این روش با مقیاس زمانی روزانه و کمتر است؛ بنابراین در این پژوهش از داده‌های بارش روزانه برای این روش استفاده شده است. با هدف برآورد رواناب خروجی از محدوده مدنظر با استفاده از روش CN، نقشه‌های CN برای هر سه وضعیت رطوبتی معمول، تر و خشک از مرجع داده‌ها برداشت شده است. مقیاس مکانی این اطلاعات ۲۵۰ متر بوده است (Jaafar et al., 2019: 2). نقشه‌ها روی محدوده مدنظر بریده می‌شود و میانگین وزنی CN برای محدوده به دست می‌آید. مقادیر CN و S در هر محدوده گزارش شده

و سری زمانی رواناب خروجی سالانه براساس اطلاعات روزانه به دست آمده است. توجه شود در این روش جریان خروجی برابر با جریان حاصل از بارش مازاد است؛ در حالی که در روش‌های تجربی، جریان محاسباتی برابر با کل جریان تولیدشده است. برای محاسبه رواناب خروجی از محدوده به روش CN، از این روش به سه حالت مختلف استفاده شده است.

۱- با فرض مقدار O برابر با ۰/۲،

۲- با فرض مقدار O برابر با ۰/۰۵، روابط اصلاح‌شده به شرح زیر است (Hawkins et al., 2009: 35):

$$S_{0.05} = 1.33 \times (S_{0.2})^{1.15} \quad (18)$$

$$CN_{0.05} = \frac{100}{1.879 \times \left(\frac{100}{CN_{0.2}} - 1\right)^{1.15} + 1} \quad (19)$$

$$R = \begin{cases} \frac{\left(\left(\frac{P}{25.4}\right) - 0.05 \times S_{0.05}\right)^2}{\left(\frac{P}{25.4}\right) + 0.95S_{0.05}} \times 25.4 & \text{if } \frac{P}{25.4} > 0.05S_{0.05} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

در روابط بالا، $CN_{0.05}$ و $S_{0.05}$ به ترتیب معادل CN و S برای $o=0.05$ است. به‌منظور محاسبه CN شرایط مرطوب و خشک در این روش از نقشه‌های CN دانلودشده، از رابطه ۲۱ بهره گرفته شده که سبحانی^۱ (1976) ارائه کرده است.

$$\begin{cases} CN(I) = \frac{CN(II)}{2.334 - 0.01334 \times CN(II)} \\ CN(III) = \frac{CN(II)}{0.4036 + 0.0059 \times CN(II)} \end{cases} \quad (21)$$

در حالت سوم، مقیاس زمانی واقعه بارش استفاده شده است؛ به گونه ای که در هر روز بارش تجمعی روزهای قبل (تا روزی که بارش صفر ثبت شده باشد) به دست آمده و این مقدار معادل یک واقعه بارش فرض شده است؛ در نهایت هر واقعه بارش به‌منظور محاسبه رواناب استفاده می‌شود. مقدار O در این حالت با فرایند کالیبراسیون تعیین و حدود مقدار O بین صفر و یک فرض شده است.

۳. منطقه پژوهش

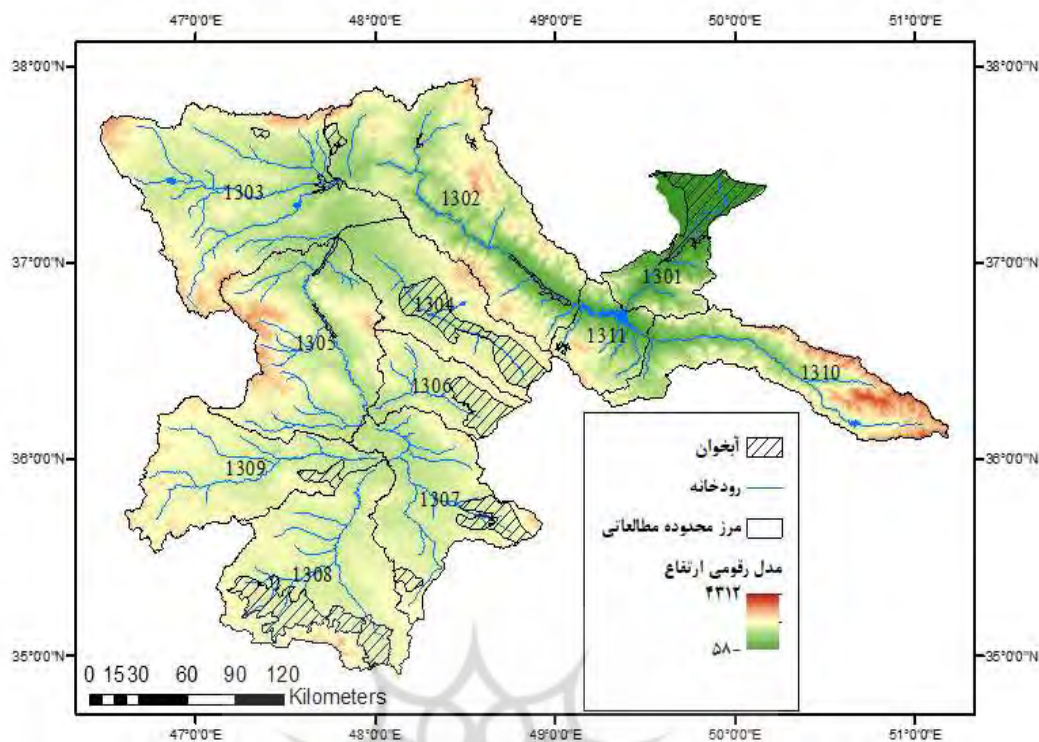
حوضه آبریز سفیدرود در محل تلاقی رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس و مرکزی واقع شده است و به علت داشتن شرایط اقلیمی متنوع و منابع غنی آب و خاک از جنبه‌های مختلفی مهم تلقی می‌شود. از میان ۱۱ محدوده مطالعاتی در این حوضه آبریز، محدوده مطالعاتی آستانه- کوچصفهان به دلیل اینکه بدون اندازه‌گیری جریان سطحی است، در این پژوهش مدنظر قرار نگرفته و این به دلیل ممکن نبودن سنجش دقت روش‌های تجربی در برآورد رواناب در این محدوده (به دلیل نبود داده‌های مشاهداتی) است؛ بنابراین کل حوضه آبریز سفیدرود از سراب تا پایاب (به‌استثنای محدوده آستانه- کوچصفهان) در این پژوهش ارزیابی شده است.

وضعیت آب‌وهوایی قسمت علیای حوضه آبریز سفیدرود با نواحی ساحلی آن (در پایین دست سد سفیدرود) متفاوت است. در نواحی ساحلی شرایط اقلیمی بسیار مرطوب حاکم و بخش عمده ارتفاعات به دلیل این شرایط اقلیمی پوشیده از جنگل است و دشت‌های آن را اراضی زراعی و باغ‌ها تشکیل می‌دهد. سایر قسمت‌های حوضه آبریز سفیدرود اقلیم نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب دارد و از نظر پوشش گیاهی شامل مرتع، اراضی زراعی و باغ‌هاست. نقشه حوضه سفیدرود در شکل ۱ نشان داده شده است. ویژگی‌های محدوده‌های مطالعاتی حوضه سفیدرود که در این پژوهش بررسی شده، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. خصوصیات محدوده‌های مطالعاتی واقع در حوضه سفیدرود

Table 2. Properties of the hydrology study areas in the Sefidroud watershed

نام محدوده	کد محدوده	مساحت (کیلومتر مربع)	متوسط بارش سالانه (در دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۴) (میلی‌متر)	نسبت مساحت دشت به کل	ضریب رواناب	متوسط ارتفاع (متر از سطح دریا)	متوسط شیب
طارم-خلخال	۱۳۰۲	۸۸۳۷	۳۲۴	۰/۰۴	۰/۲۹	۱۶۳۰	۰/۱۶
میانه	۱۳۰۳	۹۲۳۲	۳۶۰	۰/۰۲	۰/۲۵	۱۷۴۲	۰/۰۷
زنجان	۱۳۰۴	۴۶۶۷	۳۱۳	۰/۴۱	۰/۰۸	۱۷۵۷	۰/۰۶
ماه‌نشان-انگوران	۱۳۰۵	۶۷۶۸	۳۰۱	۰/۰۰	۰/۱۲	۱۸۴۷	۰/۱۰
سوجاس	۱۳۰۶	۲۴۶۱	۲۹۸	۰/۳۶	۰/۲۱	۱۹۲۱	۰/۰۵
گل‌تپه-زرین‌آباد	۱۳۰۷	۵۱۵۱	۲۸۷	۰/۲۱	۰/۳۸	۱۹۲۷	۰/۰۴
قروه-دهگلان	۱۳۰۸	۷۲۳۶	۳۰۷	۰/۲۲	۰/۰۹	۱۹۹۴	۰/۰۵
دیوان‌دره-بیجار	۱۳۰۹	۵۳۶۲	۳۱۷	۰/۰۳	۰/۱۸	۱۹۱۹	۰/۰۵
طاقان-الموت	۱۳۱۰	۴۸۵۰	۴۴۸	۰/۰۰	۰/۵۱	۲۱۷۲	۰/۲۲
منجیل	۱۳۱۱	۱۷۲۶	۳۲۱	۰/۰۸	۰/۳۰	۱۳۹۴	۰/۱۸



شکل ۱. نقشه محدوده‌های مطالعاتی بررسی شده در حوضه سفیدرود

Figure 1. Location of the hydrology study areas in the Sefidroud watershed

۴. یافته‌های پژوهش

چنانکه پیش‌تر گفته شد، حوضه سفیدرود در مجموع ۱۱ محدوده مطالعاتی دارد که در خروجی ۱۰ محدوده از آن، ایستگاه هیدرومتری قرار دارد؛ بنابراین رواناب خروجی از محدوده‌های مطالعاتی دارای ایستگاه با استفاده از روش‌های تخمین حوضه‌های بدون ایستگاه به دست آمده و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شده که خلاصه نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

به‌منظور محاسبه براساس روش جاستین به دو روش اقدام شده است؛ در روش اول، سری زمانی ضریب جاستین (K) براساس محدوده مرجع هر محدوده مطالعاتی برای هر سال به دست می‌آید و براساس این سری زمانی، جریان خروجی محاسبه می‌شود. در روش دوم، اطلاعات بلندمدت ۱۶ ساله به‌منظور تخمین ضریب جاستین استفاده و سپس با بهره‌گیری از ضرایب به‌دست‌آمده جریان خروجی از محدوده مطالعاتی شبیه‌سازی شده است. در جدول ۳، محدوده‌های مطالعاتی و مناطق مرجع آنها آورده شده است. مناطق مرجع براساس شباهت بین دو محدوده از نظر تغییرات ارتفاعی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و شیب تعیین شده‌اند. مقادیر رواناب محاسباتی در دو حالت مختلف از کاربرد روش جاستین (به‌صورت یک‌ساله یا سالانه) مشابهت بسیار زیادی با یکدیگر دارد و به همین دلیل فقط حالت سالانه روش جاستین به‌منظور مقایسه با دیگر روش‌ها بررسی شده است. ضرایب بدست آمده روش جاستین در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۳. محدوده‌های مطالعاتی و محدوده‌های مرجع در روش جاستین

Table 3. Study and reference hydrology study areas for Justin method

محدوده مطالعاتی هدف	سوجاس	ماهانشان	زنجان	طارم-خلخال	میانه
محدوده مرجع	زنجان	میانه	سوجاس	طارم-خلخال	محدوده مطالعاتی هدف
محدوده مطالعاتی هدف	منجیل	طالقان-الموت	قروه-دهگلان	دیوان‌دره-بیجار	گل‌تپه-زرین‌آباد
محدوده مرجع	میانه	میانه	دیوان‌دره-بیجار	قروه-دهگلان	قروه-دهگلان

جدول ۴. ضرایب جاستین به دست آمده در محدوده‌های مطالعاتی مختلف حوضه سفیدرود

Table 4. Calibrated Justine parameters in the hydrology study areas of the Sefidroud watershed

محدوده مطالعاتی هدف	سوجاس	ماهانشان	زنجان	طارم-خلخال	میانه
محدوده مرجع	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۱۱
محدوده مطالعاتی هدف	منجیل	طالقان-الموت	قروه-دهگلان	دیوان‌دره-بیجار	گل‌تپه-زرین‌آباد
محدوده مرجع	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۳

به منظور پیاده‌سازی روش SCS، بهینه‌سازی مقدار ضریب O الزامی است. مقدار بهینه این ضریب که در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود به دست آمده، در جدول ۵ ارائه شده است. چنانکه دیده می‌شود مقدار بهینه این ضریب در محدوده‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است؛ با این حال در ۷ محدوده از محدوده‌های مطالعاتی بررسی شده، مقدار ضریب برابر با کران پایین در نظر گرفته شده در فرایند بهینه‌سازی به دست آمده است؛ این به آن معناست که مقدار بهینه واقعی این ضریب در این هفت محدوده حتی از مقدار ۰/۰۰۰۰۰۶ نیز باید کمتر باشد تا دقت مناسبی در تخمین جریان سطحی ایجاد شود.

جدول ۵. مقدار بهینه ضریب O در روش CN در محدوده‌های مطالعاتی مختلف حوضه سفیدرود

Table 5. Calibrated λ parameters of CN method in the hydrology study areas of the Sefidroud watershed

محدوده مطالعاتی هدف	سوجاس	ماهانشان	زنجان	طارم-خلخال	میانه
محدوده مرجع	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۵۷	۰/۱۷۲۵	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶
محدوده مطالعاتی هدف	منجیل	طالقان-الموت	قروه-دهگلان	دیوان‌دره-بیجار	گل‌تپه-زرین‌آباد
محدوده مرجع	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۲۱۲۳	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶

مقدار شاخص خطای RMSE روش‌های مختلف در تخمین جریان خروجی از محدوده‌های مطالعاتی مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. چنانکه دیده می‌شود روش‌های خوسلا و SCS-CN تقریباً در تمام محدوده‌های مطالعاتی

حوضه سفیدرود دقت بسیار کمتری در مقایسه با سایر روش‌ها داشته‌اند. روش انگلی - دی‌سوزا نیز که دو معادله برای نواحی دشت و کوهستان دارد، برای محدوده‌های حوضه سفیدرود که ترکیبی از دشت و کوهستان هستند کاربرد ندارد. به‌طور کلی تقسیم‌بندی محدوده‌های مطالعاتی در ایران همواره ترکیبی از دشت و کوهستان است و محدوده‌های فقط شامل دشت یا فقط شامل کوهستان به‌ندرت در سطح کشور وجود دارد؛ در نتیجه روش انگلی - دی‌سوزا نیز در مقایسه‌های بعدی نتایج حاصل از روش‌های مختلف با روش‌های دیگر مقایسه نشده است. درباره روش SCS نیز فقط نتایج مربوط به حالت‌های $\alpha=0.2$ و $\alpha=0.05$ با نتایج سایر روش‌های تجربی مقایسه شده است؛ زیرا تعیین مقدار α بهینه مستلزم در اختیار داشتن مقادیر مشاهداتی رواناب است و به همین دلیل با فرض نبود داده مشاهداتی، استفاده از α بهینه‌شده نیز امکان‌پذیر نخواهد بود.

بررسی عملکرد روش SCS-CN با دو مقدار α مختلف از نظر شاخص RMSE نشان می‌دهد جز محدوده ماهنشان - انگوران که در آن مقدار $\alpha=0.2$ عملکرد نسبی بهتری داشته، در سایر محدوده‌ها عملکرد این روش با دو مقدار α مختلف بسیار نزدیک به یکدیگر بوده است. با اعمال این روش در محدوده‌های مختلف نتیجه‌گیری شد اصلاح روابط براساس α تأثیرگذار نیست و می‌توان در مراحل بعدی از این اصلاح صرف‌نظر کرد.

جدول ۶. مقدار شاخص خطای RMSE برای روش‌های مختلف

در محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز سفیدرود بزرگ

Table 6. RMSE values between observed and computed streamflow of the empirical methods for the hydrology study areas

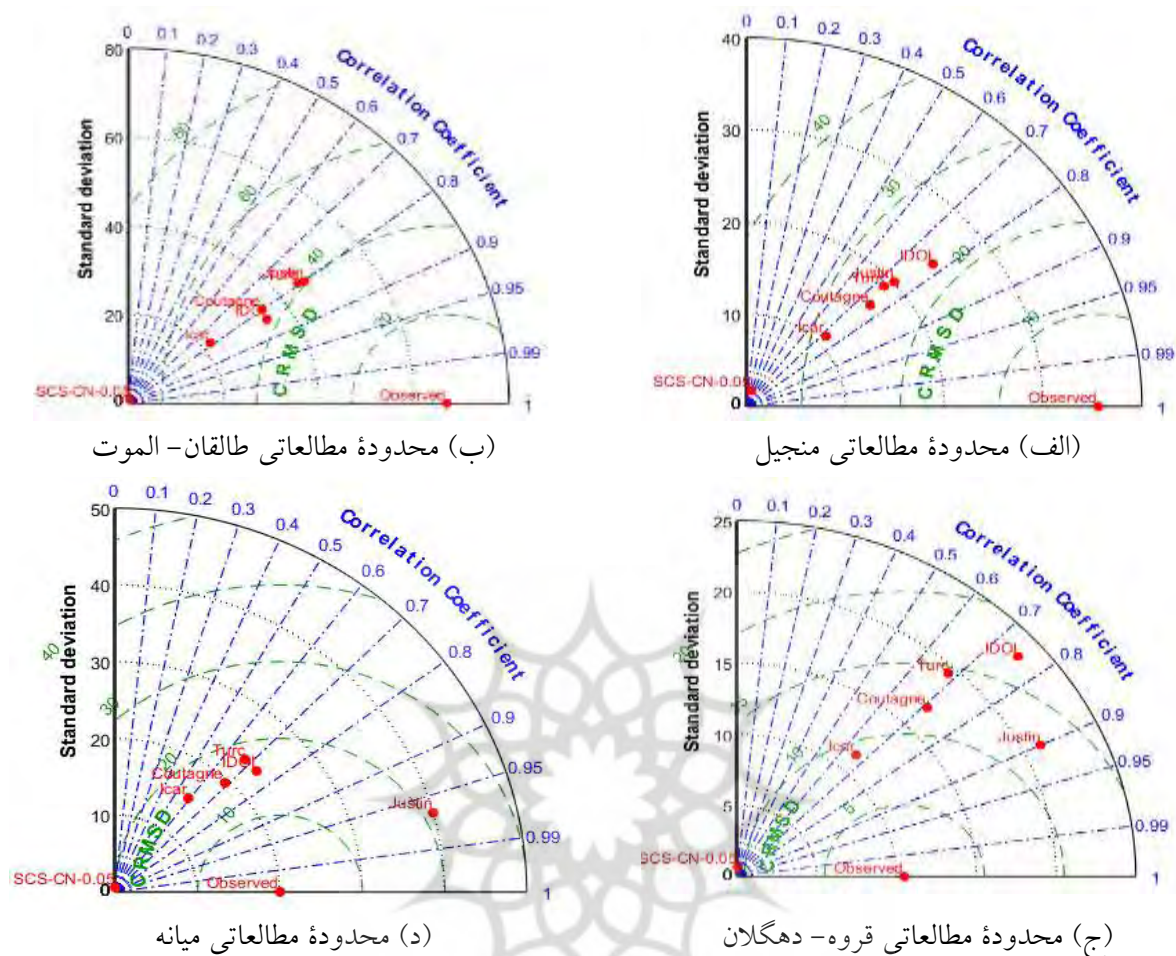
کوتابین	تورک	ICAR	IDOI	انگلی - دی‌سوزا (ارتفاعات)	خوسلا	لازی	روش انگلی - دی‌سوزا (دشت)	پاستین	SCS-CN; $\alpha=0.2$	SCS-CN; $\alpha=0.05$	روش استفاده‌شده
۷۸۱	۹۴	۹۰	۳۹	۱۱۹	۱۷۹	۲۰۱	۱۰۹	۵۷	۱۳۰	۱۳۰	طارم - خلخال
۲۹	۴۰	۳۸	۲۷	۶۶	۲۵۲	۱۰۵	۵۸	۶۴	۸۶	۸۵	میانه
۲۳	۱۴	۱۵	۷۰	۲۱	۲۶۹	۹۳	۱۲	۶۰	۲۵	۲۵	زنجان
۱۶	۱۹	۱۶	۵۲	۳۷	۲۴۴	۱۱۸	۲۴	۲۶	۸۳	۱۱۴	ماهنشان - انگوران
۳۶	۵۱	۳۹	۱۴	۷۳	۲۰۳	۹۶	۵۸	۵۵	۷۵	۷۵	سوجاس
۵۶	۷۲	۶۲	۱۳	۸۸	۱۷۳	۸۵	۷۵	۶۵	۸۸	۸۸	گل تپه - زرین‌آباد
۱۶	۱۵	۹	۶۲	۲۶	۲۶۰	۵۰	۱۴	۳۵	۳۱	۳۱	قروه - دهگلان
۲۶	۴۰	۳۳	۳۰	۶۰	۲۳۱	۱۱۰	۴۹	۳۷	۶۹	۶۹	دیوان‌دره - بیچار
۱۳۷	۱۳۶	۱۶۰	۹۴	۱۴۴	۲۰۸	۲۵۵	۱۸۳	۸۲	۲۳۶	۲۳۷	طالقان - الموت
۴۵	۵۷	۵۲	۲۵	۷۷	۲۱۸	۱۶۶	۶۷	۲۶	۸۸	۸۷	منجیل

در حوضه سفیدرود، رواناب تخمین زده شده براساس رابطه تجربی خوشلا نسبت به دیگر روش‌ها بیش‌برآورد چشمگیری دارد و به همین دلیل در مقایسه نتایج روش‌ها، این روش نادیده گرفته شده است. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های جندقی و محمدی (۱۳۸۸) و باجلان و همکاران (۱۳۸۴) نیز مطابقت دارد؛ براساس نتایج آنها روش خوشلا دقت بسیار کمی در برآورد رواناب داشته است. ضریب رواناب حوضه‌های بررسی شده در این دو مطالعه کمتر از ۳۰ درصد بوده است، ولی روش خوشلا رواناب بسیار بیشتری را برآورد کرده بود.

خپاده و اوک^۱ (2014) در حوضه‌ای در هندوستان روش خوشلا را با سایر روش‌های بررسی شده مقایسه و به برتری این روش اشاره کرده بودند. بررسی اطلاعات ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد حوضه بررسی شده ضریب رواناب حدود ۶۵ درصد داشته است؛ بنابراین اینگونه استدلال می‌شود که این روش برای مناطق با ضریب رواناب بسیار زیاد (بیش از ۵۰ درصد) مناسب است؛ همچنین روش لازمی دقت بسیار کمی در حوضه سفیدرود داشته است.

در شکل ۲ نمودارهای تیلور به منظور ارزیابی آماری نتایج ارائه شده است. نمودار تیلور از سه شاخص همبستگی (در شکل با خطوط خط نقطه آبی رنگ نشان داده شده است)، انحراف معیار (خطوط با حالت نقطه چین سیاه‌رنگ در شکل نشان داده شده است) و جذر میانگین مربعات خطای مرکزی (CRMSD) (که در شکل با خطوط خط چین سبزرنگ نشان داده شده است) برای مقایسه نتایج استفاده می‌کند. نمودار تیلور کمک می‌کند درجه تطابق بین رفتار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ارزیابی شود. در این نمودار شاخص‌های معرفی شده روی نمودار دوبعدی نشان داده می‌شوند. با قرارگیری آماره‌های بالا در یک نمودار، امکان بررسی درجه تطابق الگوها با سهولت بیشتری فراهم می‌شود.

در شکل ۳، نمودار تیلور مقایسه روش‌های ICAR، جاستین، کوتاین، سازمان آبیاری هندوستان (IDOI)، SCS-CN با مقدار $0.05=0$ و تورک در محدوده‌های منجیل، طالقان- الموت، قروه- دهگلان و میانه به‌مثابه نمونه ارائه شده است. این محدوده‌ها شامل مرتفع‌ترین و شرقی‌ترین محدوده مطالعاتی حوضه سفیدرود (محدوده طالقان- الموت)، کم‌ارتفاع‌ترین محدوده از بین ۱۰ محدوده بررسی شده (محدوده مطالعاتی منجیل)، محدوده مطالعاتی منتهی الیه جنوب غربی حوضه (محدوده مطالعاتی قروه- دهگلان) و محدوده مطالعاتی منتهی الیه شمال غربی حوضه (محدوده مطالعاتی میانه) هستند و در نتیجه بررسی نتایج در این ۴ محدوده، پوشش مناسبی را برای کل حوضه ارائه می‌دهد.



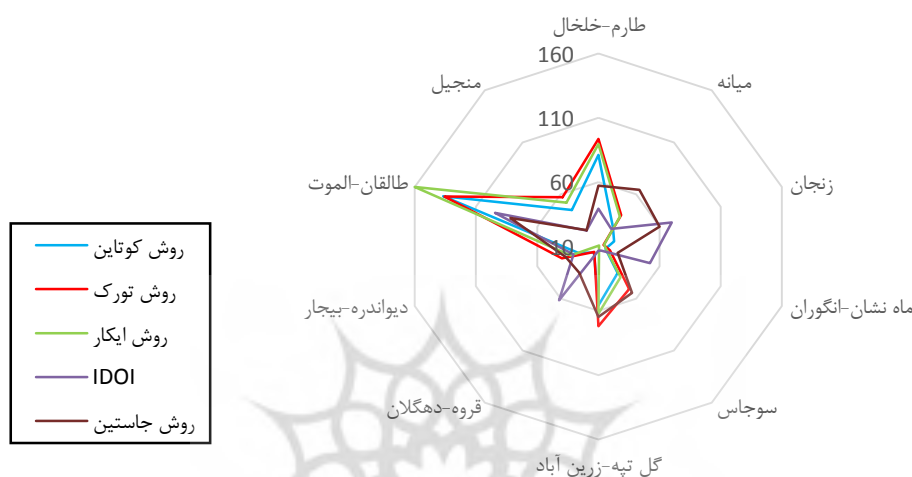
شکل ۲. دیاگرام تیلور روش‌های کوتاین، جاستین، تورک، سازمان آبیاری هندوستان (IDOI)، ICAR، جاستین و SCS-CN در محدوده‌های مطالعاتی مختلف در حوضه سفیدرود

Figure 2. Taylor diagrams of Coutagine, Turk, IDOI, ICAR, Justine and SCS-CN methods, the hydrology study areas of the Sefidroud watershed

بر اساس نتایج نمودارهای شکل ۲ در محدوده مطالعاتی منجیل، روش سازمان آبیاری هندوستان (IDOI) بهترین عملکرد را دارد و پس از آن به ترتیب روش‌های جاستین، تورک، کوتاین و ICAR قرار دارند (با توجه به میزان نزدیکی به نقطه مشاهداتی). در محدوده مطالعاتی طالقان-الموت، روش‌های جاستین و تورک عملکرد تقریباً مشابه و عملکردی بهتر از سایر روش‌ها از نظر شاخص CRMSD دارند؛ اما از نظر همبستگی، روش IDOI بهتر عمل کرده است. در محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان نیز روش‌های جاستین و ICAR بهتر از سایر روش‌ها بوده‌اند؛ به گونه‌ای که جاستین از نظر همبستگی و ICAR از نظر خطای CRMSD و از نظر انحراف معیار عملکرد مطلوب‌تری نسبت به یکدیگر داشته‌اند. در محدوده مطالعاتی میانه، روش IDOI و کوتاین از نظر خطای CRMSD عملکرد مطلوبی داشته است؛ اما روش جاستین از نظر همبستگی بهتر از این روش عمل کرده است؛ ضمن اینکه کوتاین از نظر تخمین انحراف معیار نیز بهتر عمل کرده است؛ بنابراین بررسی این ۴ محدوده نشان می‌دهد روش‌های جاستین، ICAR، IDOI،

کوتاین و تورک برتر از سایر روش‌ها هستند.

بر اساس تحلیل بالا، در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. براساس این دو شکل از نظر ضریب همبستگی، بهترین عملکرد کلی در بین روش‌های مختلف به روش جاستین و پس از آن به روش IDOI مربوط بوده است. از نظر شاخص RMSE نیز، روش IDOI بهترین عملکرد را به طور کلی در محدوده‌های بررسی شده داشته و پس از این روش نیز روش‌های جاستین و کوتاین بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها داشته‌اند؛ البته روش کوتاین در محدوده‌های طالقان-الموت، منجیل و طارم-خلخال عملکرد نسبتاً ضعیفی داشته است.



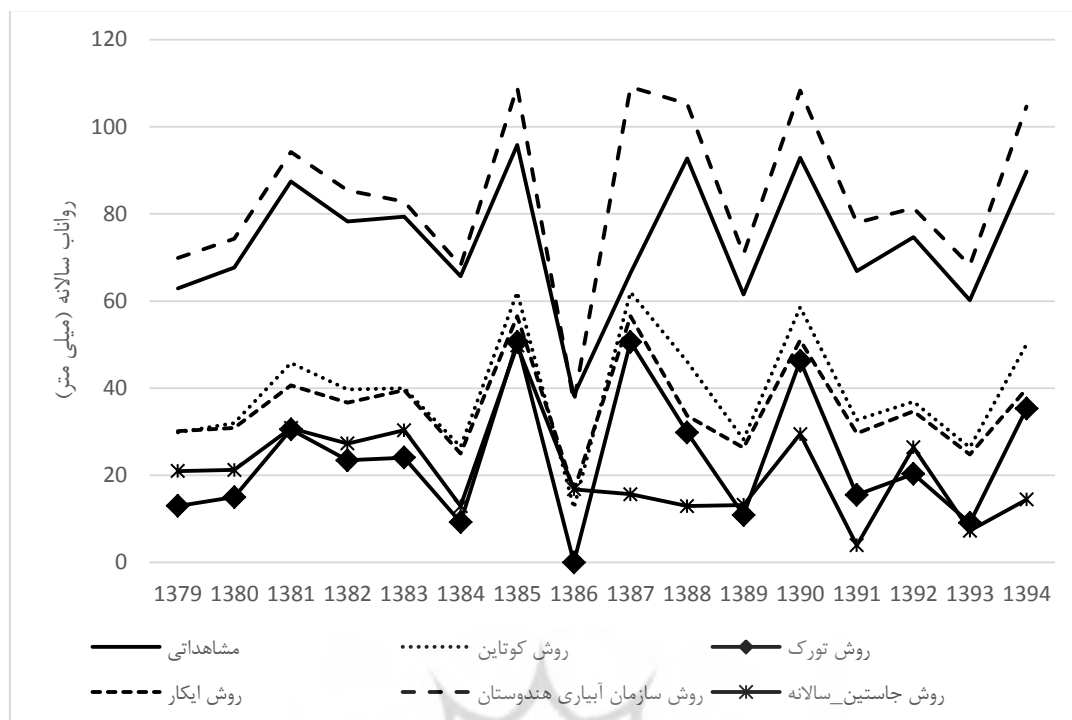
شکل ۳. دیاگرام راداری شاخص RMSE مربوط به ۵ روش منتخب در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود

Figure 3. Radar diagram of RMSE values over the five-selected methods of the hydrology study areas of Sefidroud watershed



شکل ۴. دیاگرام راداری ضریب همبستگی مربوط به ۵ روش منتخب در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود

Figure 4. Comparison of correlation coefficient values between observed and computed streamflow of the selected methods over the hydrology study areas of the Sefidroud watershed



شکل ۵. مقایسه سری زمانی رواناب محاسبه‌شده با روش‌های منتخب با جریان مشاهداتی خروجی از محدوده مطالعاتی سوچاس

Figure 5. Time series of the observed and computed streamflow values using the selected methods in the Sojas hydrology study area

در شکل ۵ به‌مثابه نمونه‌ای از مقایسه سری زمانی رواناب، رواناب محاسبه‌شده با پنج روش منتخب با جریان مشاهداتی خروجی از محدوده مطالعاتی سوچاس در حوضه سفیدرود مقایسه شده است؛ چنانکه دیده می‌شود روش IDOI در این محدوده عملکرد بسیار مناسبی در تمام سال‌ها داشته و پس از آن نیز روش کوتاین عملکرد مطلوبی داشته است. ضعیف‌ترین عملکرد نیز به روش تورک مربوط بوده است.

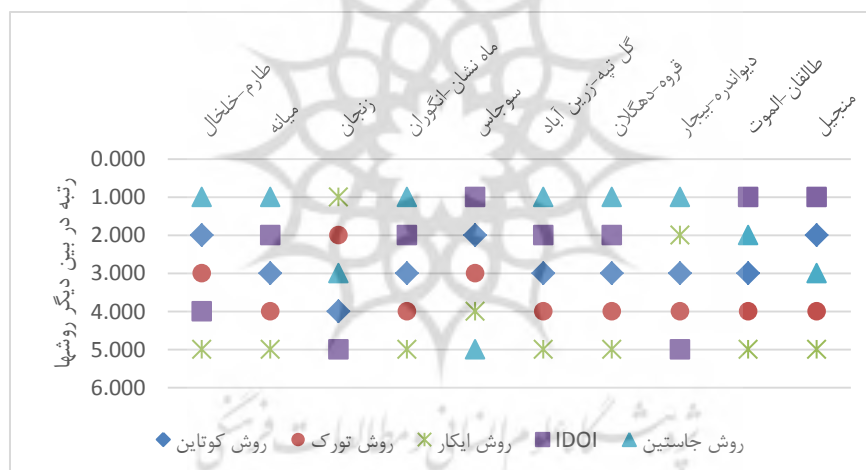
در شکل ۶ رتبه هر روش در محدوده‌های مختلف از نظر شاخص RMSE ارائه شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد روش IDOI در ۵ و ۳ محدوده مطالعاتی به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را در مقایسه با روش‌های دیگر داشته است؛ همچنین روش جاستین در ۱ و ۷ محدوده به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکردها را از نظر شاخص RMSE بروز داده است. عملکرد روش کوتاین از این نظر جالب توجه است؛ این روش فقط در دو محدوده بهترین عملکرد را داشته و در هیچ محدوده‌ای ضعیف‌ترین عملکرد را در مقایسه با سایر روش‌ها نداشته است؛ همچنین فقط در یک محدوده جزو دو روش با ضعیف‌ترین عملکرد بوده است؛ به‌منظور تبیین مقایسه‌ای عملکردها از نظر شاخص همبستگی، شکل ۷ ارائه شده است. از نظر این شاخص روش کوتاین هیچ‌گاه بهترین یا بدترین عملکرد را در حوضه سفیدرود نداشته است. روش ICAR نیز در بسیاری از محدوده‌ها بدترین عملکرد و روش جاستین در بسیاری از محدوده‌ها بهترین عملکرد را داشته است.



شکل ۱. رتبه روش‌های منتخب در مقایسه با یکدیگر از نظر شاخص RMSE

در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود بزرگ

Figure 6. Compared the ranks of the RMSE values between observed and computed streamflow of the hydrology study areas



شکل ۲. رتبه روش‌های منتخب در مقایسه با یکدیگر از نظر ضریب همبستگی

در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود بزرگ

Figure 7. Compared the ranks of the correlation coefficient values between observed and computed streamflow of the hydrology study areas

با توجه به نتایج بالا از میان ۵ روش منتخب، روش‌های جاستین، IDOI و کوتاین برتر از دیگر روش‌ها دسته‌بندی می‌شوند. عملکرد هرکدام از این روش‌ها در محدوده‌های خاصی بهتر بوده است. بررسی خصوصیات این محدوده‌های مطالعاتی مانند کاربری اراضی، شیب، نوع خاک، ضریب رواناب، نفوذپذیری، مساحت، ارتفاع متوسط و تغییرات دمایی نشان می‌دهد عملکرد هرکدام از روش‌های بررسی شده به‌طور خاص تابع شیب، ضریب رواناب و تغییرات دمایی و ارتفاعی محدوده‌هاست. براساس نتایج ارائه‌شده، مطالب زیر درباره این سه روش و ارتباط عملکرد آنها با خصوصیات حوضه جمع‌بندی می‌شود:

روش جاستین: این روش در محدوده‌های طالقان- الموت، منجیل و طارم- خلخال عملکرد مناسبی داشته است. بررسی خصوصیات این سه محدوده حاکی است ضریب رواناب زیاد و متوسط شیب زیادی دارند؛ از سوی دیگر با توجه به اینکه این روش اختلاف ارتفاع حداکثر و حداقل حوضه آبریز مربوطه را نیز در نظر می‌گیرد، تخمین خوبی از جریان در محدوده طالقان- الموت ارائه داده است؛ در حالی که دیگر روش‌ها به دلیل بی‌توجهی به تغییرات ارتفاعی در این محدوده عموماً خطای زیادی داشته‌اند؛ بنابراین در حوضه‌هایی که شیب و ضریب رواناب زیاد و تغییرات ارتفاعی شدید دارند، استفاده از روش جاستین توصیه می‌شود. بدترین عملکرد این روش نیز در محدوده‌های میانه و سوجاس است که ضریب رواناب زیادی دارند، اما شیب متوسط در این محدوده‌ها کم است؛ بنابراین بهتر است از این روش در محدوده‌هایی با شیب متوسط کم استفاده نشود. نتیجه پژوهش عزیزنیا کشتلی و بیات ورکشی (۱۳۹۷) نیز مؤید این مطلب است که در حوضه‌های با ضریب رواناب و شیب زیاد دقت روش جاستین بهتر از روش‌های دیگر است.

روش IDOI: این روش نیز در تمام محدوده‌های دارای ضریب رواناب بیش از ۰/۲ عملکرد بسیار خوبی داشته است؛ با این حال در محدوده طالقان- الموت به دلیل بی‌توجهی به دما و شیب و تغییرات ارتفاع در این روش، جواب به دست آمده از روش جاستین بهتر از این روش بوده است؛ بنابراین استفاده از این روش در نواحی خشک یا نواحی دارای گرادیان ارتفاعی و دمایی زیاد توصیه نمی‌شود. در مواقعی جز این نتایج حاصل از این روش برخلاف سادگی روش، مناسب هستند. نتیجه به دست آمده با نتیجه پژوهش اسدی و سمیعی (۱۳۸۹) نیز مطابقت دارد؛ در آن پژوهش نیز در حوضه‌ای با ضریب رواناب حدود ۳۰ درصد روش IDOI (همراه با روش ICAR) عملکرد مناسبی در مقایسه با روش‌های دیگر داشته است؛ همچنین نتیجه پژوهش اسمعی و سمیعی (۱۳۹۰) و تیموریان و همکاران (۱۳۹۳) مؤید همین نتیجه است.

روش کوتاین: بدترین عملکرد این روش به محدوده مطالعاتی طالقان- الموت مربوط است که چنانکه گفته شد خصوصیات ارتفاعی و دمایی ویژه‌ای دارد. در نواحی غیر از این محدوده، جواب‌های به دست آمده از روش کوتاین همواره در حالت میانه قرار دارد؛ به گونه‌ای که این روش هم از نظر شاخص RMSE و هم از نظر ضریب همبستگی در هیچ‌کدام از محدوده‌های مطالعاتی بررسی شده بدترین عملکرد را در مقایسه با دیگر روش‌ها نداشته است. این نتیجه با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های پیشین نیز مطابقت دارد؛ زیرا در پژوهش‌های پیشین نیز معمولاً روش کوتاین عملکرد محافظه‌کارانه‌ای داشته و عملکرد ضعیفی در هیچ‌یک از مطالعات پیشین نداشته است؛ در بعضی پژوهش‌ها نیز بهترین عملکرد را در مقایسه با روش‌های دیگر نشان داده است (Khopade and Oak, 2014: 75; Dalavi et al., 2018: 1515)؛ بنابراین می‌توان این روش را به‌مثابه روشی محافظه‌کارانه توصیه کرد.

همچنین چنانکه پیش‌تر گفته شد، در مناطقی که ضریب رواناب بیش از ۰/۵ تخمین زده شده باشد، استفاده از روش خوسلا نیز قابل بررسی است؛ زیرا این روش برای چنین مناطقی توسعه یافته و در مطالعات پیشین نیز در مناطق با ضریب رواناب بیش از ۰/۵ عملکرد خوبی داشته است.

۵. نتیجه‌گیری

مقایسه روش‌های تجربی مختلف در برآورد جریان در محدوده‌های مطالعاتی حوضه سفیدرود نشان داد روش‌های خوشلا، لازمی و شماره منحنی جواب‌های قابل قبولی در این حوضه ارائه نمی‌کنند. جواب‌های حاصل از روش خوشلا و لازمی بسیار بیش از جریان مشاهداتی و جواب‌های به‌دست‌آمده از روش شماره منحنی عموماً کمتر از جریان مشاهداتی است. به نظر می‌رسد کم‌بودن جواب‌های به‌دست‌آمده از روش شماره منحنی ناشی از تولید جریان حاصل از بارش مازاد با این روش بوده است و در نتیجه بقیه اجزای جریان سطحی را لحاظ نمی‌کند. کالیبره کردن مقدار ضریب O در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود نشان داد در بسیاری از محدوده‌های حوضه سفیدرود ضریب O باید بسیار کمتر از مقدار $0/05$ توصیه شده در ادبیات فنی باشد؛ با این حال در دو محدوده نیز مقدار بهینه ضریب O نزدیک به $0/2$ محاسبه شده است.

به نظر می‌رسد یکی از عیوب اصلی روش انگلی-دی سوزا، تبیین یک رابطه برای نواحی شامل فقط دشت یا ارتفاع است؛ این در حالی است که تقریباً تمام محدوده‌های مطالعاتی در ایران شامل ترکیبی از دشت و ارتفاع و حتی گاهی ترکیب چندین دشت با چندین ارتفاع (مانند محدوده مطالعاتی قروه-دهگلان یا گل‌تپه-زرین‌آباد در حوضه سفیدرود) هستند. از میان دیگر روش‌ها، جواب‌های حاصل از روش‌های IDOI، جاستین و کوتاین در محدوده‌های مختلف حوضه سفیدرود نسبت به دیگر روش‌ها برتری دارد. بررسی انجام شده نشان داد روش IDOI با توجه به معادله ساده آن فقط برای محدوده‌هایی مناسب است که ضریب رواناب در آنها بیش از ۲۰ درصد است و در نواحی با ضریب رواناب کمتر خطای زیادی خواهد داشت؛ از سوی دیگر روش جاستین برای نواحی دارای شیب و ضریب رواناب زیاد توصیه می‌شود؛ اما در صورتی که ضریب رواناب زیاد همراه با شیب کم باشد (مانند محدوده میانه در حوضه سفیدرود)، استفاده از این روش توصیه نمی‌شود.

روش کوتاین، روشی است که در تمام محدوده‌های حوضه سفیدرود عملکرد متوسط داشته است و می‌توان از این روش به‌مثابه انتخابی محافظه‌کارانه در مطالعات عملی بهره برد. با توجه به تنوع اقلیمی در ایران پیشنهاد می‌شود محدوده‌های مطالعاتی متعددی در مناطق کوهستانی، خشک و به‌ویژه نیمه‌خشک با هدف رسیدن به پیشنهادی جامع بررسی شوند. با توجه به اینکه روابط تجربی بررسی شده همگی در مناطقی جز ایران پیشنهاد شده‌اند، در پژوهش‌های آتی می‌توان با استفاده از روش‌های فراکوشی (مانند برنامه‌ریزی ژنتیک) روابطی مناسب برای شرایط حوضه‌های آبریز ایران به دست آورد. با توجه به عملکرد بهتر روش‌های IDOI، جاستین و کوتاین، پیشنهاد می‌شود از بارش متوسط سالانه، دمای متوسط سالانه و ارتفاع حداکثر و حداقل حوضه به‌مثابه متغیرهای اصلی در تدوین روابط تجدید بهره گرفته شود.

۶. تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از دستاوردهای پژوهشی است که با حمایت مالی وزارت نیرو در قالب قرارداد شماره ۹۵/۳۲۱۶۶/۷۲۰ و عنوان «ارزیابی فنی دستورالعمل تهیه بیان منابع و مصارف آب کشور و تهیه دستورالعمل جدید و تدقیق نتایج بیان در حوضه‌های آبریز درجه ۲ کشور» و همکاری و مساعدت شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران انجام شده است.

منابع

- اسدی، تورج، سمیعی، مسعود، (۱۳۸۹). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد رواناب در حوضه آبخیز بند بهمن در استان فارس، دومین همایش ملی کشاورزی و توسعه پایدار: فرصت‌ها و چالش‌های پیش رو، شیراز: دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.
- اسمعی، اباذر، سمیعی، مسعود، (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد رواناب در حوضه آبخیز تنگ خسویه در استان فارس، مجموعه مقالات هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.
- باجلان، آیت، محمودیان شوشتری، محمد، اولی پور، مسعود، (۱۳۸۴). پیش‌بینی رواناب ماهانه با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با نتایج روش‌های تجربی در حوضه آبریز کسلیان، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان: دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- بهرامی، شهرام، ایمنی، سپیده، (۱۳۹۸). ارزیابی چند مدل تجربی در برآورد رواناب سالیانه؛ مطالعه موردی: حوضه حصارک در شمال غرب تهران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۰ (۲)، صص ۵۵-۷۱.
- تیموریان، میلاد، فرزادیان، علی، بهشتی راد، مسعود، (۱۳۹۳). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد رواناب در حوضه آبخیز بوشگیان، اولین همایش ملی بهداشت محیط، سلامت و محیط‌زیست پایدار، همدان: دانشکده شهید مفتح جندقی، نادر، محمدی، مجتبی، (۱۳۸۸). مقایسه مقادیر رواناب خروجی از روش تجربی خوسلا با داده‌های واقعی در حوضه‌های آبخیز غرب استان گلستان، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی)، گرگان: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- روشنی، حمیده، دادده، فاطمه، علیزاده، رقیه، مصطفی‌زاده، رئوف، (۱۳۹۴). ارزیابی روش‌های برآورد آبدی جریان و عوامل مؤثر بر آن در حوضه آبریز گرگانرود، دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، اردبیل: دانشگاه محقق اردبیلی.
- شهریاری، مهرداد، محسن‌زاده، هرمز، محسن‌زاده، اشکان، (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تجربی برآورد رواناب سالانه در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری؛ مطالعه موردی: حوضه رودخانه سراب، پنجمین کنفرانس توسعه ملی پایدار در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی، معماری و شهرسازی، تهران: مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.
- عبادی‌فر، مجید، نادری دیزگاه، محمدفاتح، (۱۳۹۶). ارزیابی روش‌های تجربی جهت برآورد رواناب سالانه؛ مطالعه موردی: حوضه آبریز حویق در استان گیلان، دومین کنفرانس هیدرولوژی ایران، شهرکرد: انجمن هیدرولوژی ایران.
- عزیزنیا کشتلی، علی‌اصغر، بیات ورکشی، مریم، (۱۳۹۷). ارزیابی معادلات تجربی برآورد رواناب در حوضه باپلرود، هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، یزد.
- علیزاده، امین، (۱۳۸۷). اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ ۳۴، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا.

قاسمی، محسن، سلطانی، سمیه، (۱۳۹۳). ارزیابی روش‌های تجربی برآورد عمق رواناب در یکی از زیرحوضه‌های رودخانه کارون، دومین همایش ملی کاربرد علوم و فناوری‌های نوین در کشاورزی، منابع طبیعی و محیط‌زیست، میبد.

مهدوی، محمد، (۱۳۹۰). هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، چاپ ۲۸، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

Dalavi, P., Bhakar, S.R., Bhange, H.N., Gavit, B.K., (2018). **Assessment of Empirical Methods for Runoff Estimation in Chaskaman Catchment of Western Maharashtra, India**, Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci, 7 (5), 1511-1515.

Golshan, M., Ebrahimi, P., (2014). **Estimation of the runoff by empirical equations in dry and mid-dry mountainous area without stations (case study: madan watershed, Qazvin Province-Iran)**, Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 3 (3), 97-106.

Gupta, B.L., Gupta, A., (1992). **Engineering hydrology**, Standard Publishers, New Delhi.

Hawkins, R.H., Ward, T.J., Woodward, D.E., Van Mullem, J.A., (2009), **Curve Number Hydrology: State Of The Practice**, American Society of Civil Engineers.

Hong, Y., Adler, R.F., Hossain, F., Curtis, S., Huffman, G.J., (2007). **A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation**, Water Resources Research, 43 (8), 1-8.

Horvat, B., Rubinic, J., (2006). **Annual runoff estimation - an example of karstic aquifers in the transboundary region of Croatia and Slovenia**, Hydrological sciences journal, 51 (2), 314-324.

Inglis, C.C., De'Souza, A.J., (1930). **A critical study of runoff and floods of catchments of Bombay Presidency with a short note on losses from lake by evaporation**, Technical Paper, No 30.

Jaafar, H.H., Ahmad, F.A., El Beyrouthy, N., (2019). **GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design**, Scientific data. Springer US 6 (1), 145 p.

Khopade, D.K., Oak, R.A., (2014). **Estimation of Runoff Yield for Nira Deoghar Catchment Using Different Empirical Equations**, The International Journal of Engineering and Science, 3 (6), 75-81.

Khosla, A.N., (1949) **Appraisal of water resources analysis and utilization of data**, Proceedings of United Nations Scientific Conference on Conservation and Utilization of Resources.

Khosravi, K., Mirzai, H., Saleh, I., (2013). **Assessment of empirical methods of runoff estimation by statistical test (Case study: BandakSadat Watershed, Yazd Province)**, International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 1 (3), 285-301.

Langbein, W.B., (1949). **Annual runoff in the United States**, US Geol. Survey Circular 52, Washington DC, USA.

Lewis, D., Singer, M.J., Tate, K.W., (2000). **Applicability of SCS curve number method for a California oak woodlands watershed**, Journal of Soil and Water Conservation, 55 (2), 226-230.

Meresa, H., (2019). **Modelling of river flow in ungauged catchment using remote sensing data: application of the empirical (SCS-CN), Artificial Neural Network (ANN) and Hydrological Model (HEC-HMS)**. Modeling Earth Systems and Environment, 5 (1), 257-273.

Plummer, A., Woodward, D.E., (1998). **Origin and derivation of Ia/S in the runoff curve number system**, International water resources engineering conference, ASCE, Reston, USA, 1260-1265.

Raghunath, H.M., (2006). **Hydrology, principles, analysis, design**, New Delhi: New Age International Pub.

Rawat, K.S., Singh, S.K., Szilard, S., (2020). **Comparative evaluation of models to estimate direct runoff volume from an agricultural watershed**, Geology, Ecology, and Landscapes, 1-15.

SCS (1985). **National engineering handbook, section 4: hydrology**, US Soil Conservation Service: USDA, Washington, DC.

Shi, Z.H., Chen, L.D., Fang, N.F., Qin, D.F. Cai, C.F., (2009). **Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China**, Catena, 77 (1), 1-7.

Sobhani, G., (1976). **A review of selected small watershed design methods for possible adoption to Iranian conditions**, Master of science degree, Utah State University.

Turc, L., (1955). **L III eee III :: eeltri ttt ee lss cccittt tt iss**, l'évaporation et l'écoulement, Journées de l'hydraulique, 3 (1), 36-44.

Varshney, R.S., (1979). **Engineering Hydrology: New Chand and Bros.**