

Using hydrograph analysis methods for base flow estimation (Case study: Silakhor-Rahimabad Watershed)

Ali Haghizadeh^{1*}, Leili Ghasemi²

¹ Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

² Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad

Extended Abstract

Introduction

Understanding and knowing the hydrological processes of a watershed is one of the fundamental principles in ensuring the appropriate quantitative and qualitative management of surface and groundwater resources in a catchment area. The changes in a watershed due to natural and human factors indicate physical changes and artificial mismanagement of water resources. Understanding baseflow allows for identifying the potential and dynamics of the groundwater system. In principle, the separation of base flow and quick flow is difficult to distinguish from the measured discharge data in a river because the measured discharge in a river is a combination of the two flow components. The separation of riverbed flow is essential for water resources management and can significantly contribute to the calculation of water availability in the dry season (relatively short discharge period). In addition, comparing different watersheds in terms of flow recession characteristics can provide valuable information about storage and recharge properties in the watershed. The main objective of this research is to estimate base flow using several hydrograph analysis techniques, as there has been neither organized research on groundwater resources at the watershed level nor studies on different methods for estimating the base flow contribution in these streams.

Materials and Methods

The current research includes estimating base flow from daily streamflow data using the flow duration curve (FDC) technique, the web-based hydrograph analysis tool (WHAT), and the baseflow index (BFI+) program. Using the FDC technique, the long-term annual average fraction of flow from the base flow is estimated after obtaining the values of Q90 and Q50. The web-based hydrograph analysis tool includes three algorithms: the local minimum algorithm, the one-parameter algorithm, and the two-parameter algorithm. The web-based WHAT system provides an efficient tool for hydrologic model calibration and validation. Baseflow information from the WHAT system can also play an important role in sustainable groundwater and surface water management, including irrigation and industrial uses, and estimating pollutant loads from both baseflow and direct runoff. The baseflow index program also uses the following algorithms: Fix Interval, Sliding Interval, Local Minima, Lynne-Hollick, Chapman, One Parameter Algorithm, Two Parameter Algorithm, Exp. Weighted Moving Average, Eckhardt, BFLOW, IHACRES, and Fure & Gupta. For this purpose, daily streamflow and precipitation data were obtained from the Regional Water Organization of Lorestan Province. The time series of data for streamflow and precipitation was selected from 2009 to 2019. Also, the processing of spatial data used in this research was performed using ArcGIS software.

Results and Discussion

The results of the data analysis indicate that most of the automatic filter techniques used with assumed parameters have overestimated the baseflow above the average compared to the FDC. Also, the FDC analysis showed that the contribution of groundwater storage to streamflow was below average. In this study, the BFI_{max} value was set to 0.80 for alluvial streams and the filter parameter (α) was set to 0.995 for the Rahim Abad stream. The BFI values for the Rahim Abad River are consistent and are estimated to be around 45% for the

entire watershed. The results obtained from BFI+ showed that the calculated baseflow values for the one-parameter and two-parameter algorithms, except for RDF-IHACRES, BF-BFLOW, BF-Chapman, and BF-Furey, were higher than the mean flow. Also, the long-term base-to-flow ratio or BFI is equal to the ratio of Q90/Q50. This ratio indicates the discharge of groundwater or other delayed sources to the stream flow. The Q90/Q50 ratio has an annually varying decreasing and increasing trend for flow, indicating that the contribution of groundwater to streamflow varies from year to year with decreasing and increasing changes. Finally, by employing all methods, the range of groundwater contribution to Rahim Abad streamflow was obtained between 2 and 84 percent, and its average value was also determined to be 63 %.

Conclusion

Considering the average of all BFI values obtained from all methods with values less than the mean, an overall average of 45% was obtained, which provided a better estimate for the entire watershed. In this regard, the modified RDF methods (one-parameter and two-parameter algorithms), IHACRES, BF-BFLOW, BF-Chapman, and BF-Furey were selected as the top algorithms for the entire watershed. Further studies are necessary for future groundwater resource problems in the watershed. The interaction of groundwater and surface water and pollution problems, water quality management of rivers, estimation of groundwater potential using other techniques, and estimation of the contribution of groundwater under climate change are among those that can be mentioned. Therefore, it is recommended that these factors be considered in future research for a more accurate assessment and better management of water resources in the studied area. Also, studies should investigate the role of watershed characteristics, such as soil properties and vegetation cover, as well as their impact on base flow variations. The introduction of suitable methods of separation of daily flow in hydrological modeling, regional analysis of minimum flows, and determination of base flow share can be used. It is hoped that the output of this study will help the planning, development, and management of water resources in the Silakhor watershed.

Keywords: Baseflow separation, Baseflow index, Lorestan Province, Streamflow hydrograph

Article Type: Research Article

Acknowledgment

The support of Lorestan University is acknowledged.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Ali Haghizadeh: Supervision, visualization, conceptualization, methodology, manuscript editing, software; **Leili Ghasemi:** Writing-original draft preparation, formal analysis and investigation, manuscript editing, resources.

*Corresponding Author, E-mail: alihaghi20@gmail.com

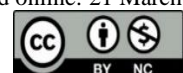
Citation: Haghizadeh, A., & Ghasemi, L. (2025). Using hydrograph analysis methods for base flow estimation (Case study: Silakhor-Rahimabad Watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, 5(1), 89-106.
doi: 10.22098/mmws.2024.14622.1422

Received: 08 February 2024, Received in revised form: 01 April 2024, Accepted: 01 April 2024, Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 89-106

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بهره‌گیری از روش‌های تحلیل آب‌نمود جهت برآورد جریان پایه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه سیلاخور-رحیم‌آباد)

علی حقی‌زاده^{۱*}، لیلا قاسمی^۲

^۱ استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

منبع بخش مهمی از جریان رودخانه‌های دائمی از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. تغییراتی که به‌واسطه عوامل طبیعی و انسانی در حوزه آبخیز ایجاد می‌شود نشان‌دهنده تغییرات فیزیکی و سوء مدیریت مصنوعی منابع آبی است. این موقعیت‌ها سهم آب زیرزمینی در جریان آب رودخانه را تغییر می‌دهد. بنابراین، درک جریان پایه، موجب می‌شود تا بتوان پتانسیل و پویایی سامانه آب زیرزمینی را شناسایی کرد. هدف اصلی این پژوهش برآورد جریان پایه با استفاده از چندین روش تحلیل آب‌نمود است. پژوهش حاضر شامل تخمین جریان پایه از داده‌های جریان روزانه با استفاده از روش منحنی تداوم جریان (FDC)، ابزار تحلیل آب‌نمود مبتنی بر وب (WHAT) و برنامه شاخص (Baseflow (BFI+)) است. به همین منظور داده‌های روزانه دبی جریان و بارش از سازمان آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شد. سری زمانی داده‌ها برای دبی جریان و بارش از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۹ انتخاب شد. نتایج تحلیل نشان داد که اکثر روش‌های فیلتر خودکار مورد استفاده با متغیرهای فرضی، جریان پایه بالاتر از میانگین را در مقایسه با FDC تخمین زده‌اند. علاوه‌براین، تحلیل FDC سهم ذخیره آب زیرزمینی در جریان رودخانه را کمتر از میانگین نشان داد. مقادیر BFI برای رودخانه رحیم‌آباد متناسب است و برای کل حوزه آبخیز، حدود ۴۵ درصد تخمین زده می‌شود. در نهایت، با استفاده از مقایسه میانگین جریان پایه، روش‌های اصلاح شده RDF (یک متغیر و دو متغیر)، JHACRES، BF-BFLOW، BF-Chapman، BF-Furey و BF برای کل حوزه آبخیز به‌عنوان الگوریتم‌های مناسب برای برآورد جریان پایه انتخاب شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان در سال‌های بعد با داشتن آمار روزانه دبی، از روش‌های فوق‌الذکر برای جداسازی آب پایه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آب‌نمود جریان، استان لرستان، جداسازی آب پایه، شاخص آب پایه

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: alihaghi20@gmail.com

استناد: حقی‌زاده، علی، و قاسمی، لیلی (۱۴۰۴). بهره‌گیری از روش‌های تحلیل آب‌نمود جهت برآورد جریان پایه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه سیلاخور-رحیم‌آباد). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۸۹-۱۰۶.
doi:10.22098/mmws.2024.14622.1422

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۸۹ تا ۱۰۶

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

مدیریت و مدل سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و چالش های مربوط به آن ها، یکی از مسائل کلیدی در مناطق مختلف جغرافیایی به شمار می رود (Momeheh, 2022). رودخانه ها یکی از عوامل کلیدی در فرآیندهای ژئومورفولوژیک زمین و نیز چرخه هیدرولوژی است (Bayatvarkshi et al., 2024). جریان پایه یکی از اجزای جریان حاصل از لایه سطحی است که سهم اساسی در تأمین جریان رودخانه دارد (Eckhardt, 2005; Indarto et al., 2017). جریان پایه نقش مهمی در حفظ جریان در رودخانه، از یک رویداد باران تا رویداد باران بعدی دارد (Ratnasari et al., 2015; Smakhtin, 2001). جداسازی جریان پایه و جریان سریع از داده های دبی قابل اندازه گیری در رودخانه به سختی انجام می شود، زیرا دبی قابل اندازه گیری در رودخانه ترکیبی از دو جزء جریان است. جداسازی جریان بستر رودخانه در مدیریت منابع آب ضروری است و می تواند به طور قابل توجهی به محاسبه در دسترس بودن آب در فصل خشک (دوره تخلیه نسبتاً کوتاه) کمک کند (Smakhtin, 2001; Rimmer and Hartmann, 2014). سایر مزایای جداسازی جریان پایه به شدت به حفاظت از محیط های آبی در بوم سازگان های رودخانه ای مربوط می شود، مانند تضمین بقای موجودات زنده و انواع ماهی هایی که در رودخانه ها زندگی می کنند (Smakhtin, 2001; Rimmer and Hartmann, 2014). در بیشتر مناطق کشور ایران، رودخانه ها به دلیل دخالت های انسانی مانند ساخت سد، انتقال آب بین حوضه ای، افزایش برداشت برای مصارف کشاورزی و شهری، تغییرات قابل توجهی را تجربه کرده اند (Naderi et al., 2023).

تحلیل بخش آب نمود جریان رودخانه از مدت ها قبل به عنوان مطالعات نظری اولیه توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است (Boussinesq, 1904; Hall, 1968; Linsley et al., 1982; Tallaksen, 1995; Gonzales et al., 2009; Yang et al., 2021; Bayou et al., 2021). علاوه بر این، Shao et al. (2020) چندین روش جداسازی خودکار جریان پایه از جمله روش های فیلتر دیجیتال بازگشتی (RDF)^۱ را برای جداسازی جریان پایه از جریان در حوزه آبخیز رودخانه Hailiutu، شمال غربی چین به کار بردند. آن ها دریافتند که روش های فیلتر کردن شامل برنامه جداسازی آب نمود

(HYSEP)^۲ و روش مؤسسه هیدرولوژی بریتانیا (UKIH)^۳ به وضوح جریان پایه را کم تر مد نظر قرار می دهند در حالی که فیلتر دیجیتال بازگشتی با روش فیلتر اکهارت (RDF-E)^۴ برای جداسازی جریان پایه مؤثر بود. در این راستا، Nam et al. (2021) به جداسازی آب نمود و تحلیل مشخصه جریان برای رویدادهای بارندگی مشاهده شده در طول فصل سیل پرداختند. آنان مشاهده کردند که زمانی که رواناب مستقیم به عنوان رویدادهای بارندگی غالب رخ داد مقدار کل و دبی اوج $267/4$ تا $400/8$ و 169 تا $400/8$ میلی متر در کل بارش افزایش یافت. در ادامه، Berhail (2022) در یک پژوهش به ارزیابی عملکرد یک روش خودکار برای جداسازی آب نمود در حوزه آبخیز ملا، شمال شرقی الجزایر پرداخت. در نهایت، نیز برای ارزیابی عملکرد این روش محاسباتی، نتایج مؤلفه جریان پایه با مؤلفه جریان پایه به دست آمده از روش فیلتر دیجیتال بازگشتی مقایسه شد. این مطالعه نشان داده است که نتایج جریان پایه به دست آمده با هر دو روش شباهت زیادی نشان می دهد و مقادیر جریان پایه با $R^2 > 0.77$ همخوانی بیشتری دارند.

پژوهشگران دیگری نظیر Mehri et al. (2018) مقایسه روش های ترسیمی و فیلترهای عددی برگشتی در تفکیک جریان پایه در تعدادی از رودخانه های استان اردبیل پرداختند. در این پژوهش تفکیک جریان پایه روزانه علاوه بر روش های مرسوم، با روش های فیلتر دیجیتال برگشتی نیز انجام گرفته است. نتایج پژوهش بیان گر این بود که روش های ترسیمی دارای نتایج قابل قبولی نبودند و روش های فیلتری با برطرف کردن محدودیت هایی که روش های گرافیکی و مبتنی بر تئوری پردازش سیگنال، برای تفکیک کردن جریان به دو مؤلفه جریان سریع و جریان پایه دارند، از صحت و دقت بیشتری برخوردار می باشند. همچنین، Kazemi (2022) بیان نمودند که به شناسایی حوزه های آبخیز در جریان پایه رودخانه ها و تعیین حوزه های آبخیز کم تر توجه شده و در داخل کشور مغفول مانده است. نتیجه کلی پژوهش آن ها بیان گر مطالعات محدود، نبود روش های جدید و نوآورانه و تمرکز بر استفاده از روش های معمول و تکراری و عدم توجه کافی از طرف مراکز علمی و پژوهشی کشور به این حوزه بود. در نهایت، Zare Bidaki et al.

² Hydrograph separation program

³ UK Institute of hydrology's method

⁴ Recursive digital filtering with eckhardt filter technique

¹ Recursive digital filtering

از انجام پژوهش حاضر جداسازی آب پایه جریان از طریق الگوریتم‌های مختلف انتخاب مناسب‌ترین روش‌ها در حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد است.

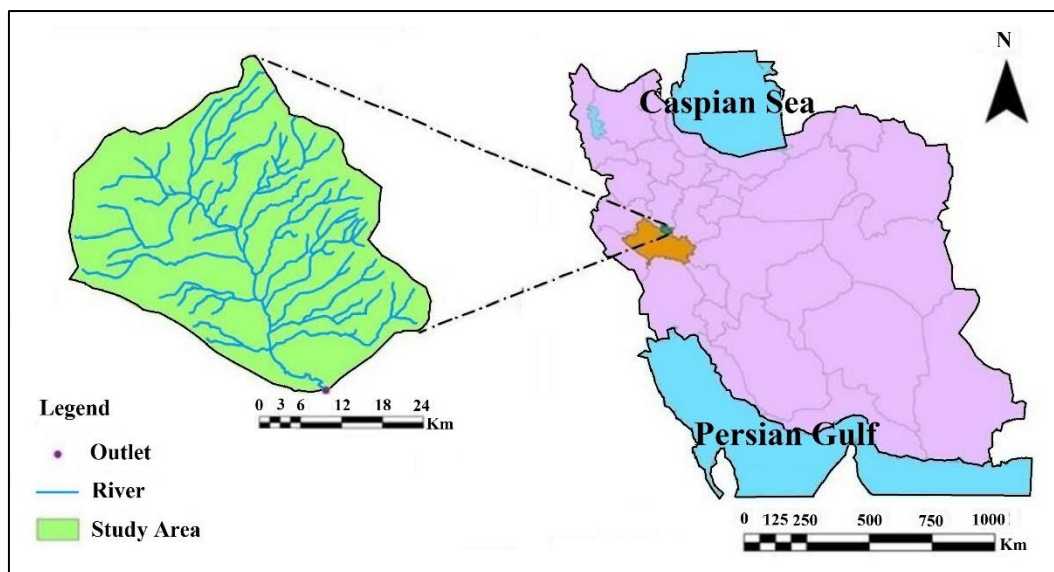
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد از زیرآبخیزهای حوزه سد در شهرستان بروجرد استان لرستان است. مساحت این حوزه آبخیز ۹۹۹/۰۲ کیلومتر مربع، بیشینه و کمینه ارتفاع در منطقه به ترتیب ۳۴۷۴ و ۱۴۷۵ متر و شیب متوسط آن ۳۵ درصد است (Seif et al., 2021). میانگین بارندگی سالانه طی یک دوره آماری ۳۰ ساله، ۳۷۹/۳ میلی‌متر، متوسط دمای سالانه ۱۴/۸۶ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد و کاربری غالب منطقه، اراضی دیم و مرتع است (Seif et al., 2021). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی نشان داده شده است.

(2019) به مقایسه روش‌های جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم در حوزه آبخیز دورود پرداختند. در این پژوهش تفکیک آب پایه در حوزه آبخیز دورود واقع در استان لرستان با شش محدوده مطالعاتی بیاتون، تیره دورود، سیلاخور، آسرده، گلهرود و سراب سفید و با استفاده از روش‌های PART، فیلتر عددی برگشتی یک پارامتر (Lyne-Hollick) و دو پارامتر (Eckhardt) با فیلترهای ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵ و ۰/۹۹ انجام شد. نتایج نشان داد که روش Lyne-Hollick با فیلتر ۰/۹۷۵ به‌عنوان بهترین روش برای جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم در حوزه آبخیز تیره دورود است.

در ادبیات پژوهش با استفاده از مقایسه و تحلیل آماری نتایج روش‌های گوناگون، به معرفی روش مناسب برای تفکیک جریان پرداخته‌اند. روش‌های مختلف، نتایج گوناگونی را ارائه می‌دهند. تاکنون پژوهشی در حوزه آبخیز سیلاخور-رحیم‌آباد صورت نگرفته که تمامی روش‌های مذکور در این پژوهش رو شامل شده باشد یا این که مستندی در این رابطه ارائه نشده است. لذا، هدف



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی (Seif et al., 2021)

Figure 1- Geographical location of the study area (a), precipitation map (b), and evaporation map of the study area (c) (Seif et al., 2021)

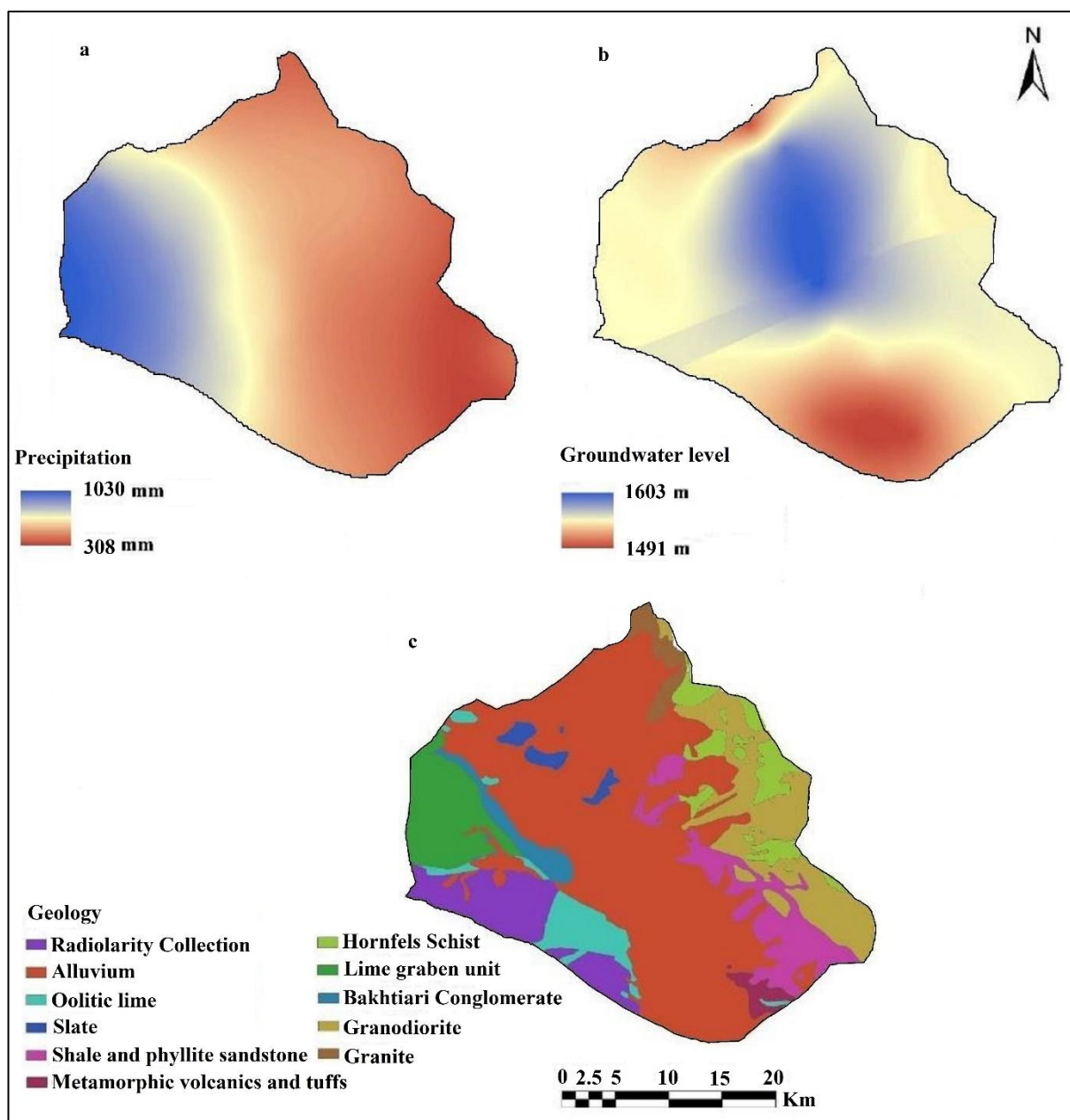
بخش شمال شرقی با آرایش پلکانی بین دو گسل جبهه کوهستانی مرز سنج-سیرجان و گسل دورود محصور شده است (Sharafi et al., 2020). جنس پادگانه‌های قدیمی بیش‌تر از کنگلومرا، ماسه‌های دانه‌درشت، سیلت و رس بوده که با توجه به ویژگی و موقعیت شکل‌های ویژه‌ای را تشکیل داده‌اند. ضخامت

۲-۲- زمین‌شناسی و تکتونیک دشت سیلاخور

دشت سیلاخور پهنه چین‌خورده-رانده زاگرس در مسیر گسل دورود به‌عنوان یکی از شاخه‌های گسلی از گسل جوان زاگرس با نرخ فعالیت لرزه‌ای بالا واقع شده است. دشت سیلاخور در بخش جنوب شرقی مرز بین دو گسل دورود و تراست اصلی زاگرس و در

در این دشت، آبرفت‌های رودخانه‌ای فراوان می‌باشند. همچنین، این دشت در بالادست به ارتفاعات منطقه دگرگونه و در پایین‌دست به ارتفاعات زاگرس خرد شده منتهی می‌شود که با توجه به ویژگی‌های این ارتفاعات اشکال ژئومورفولوژیکی متفاوتی دیده می‌شود (Sharafi et al., 2020). در شکل ۲ نقشه بارش، زمین‌شناسی و تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

متوسط آن‌ها حدود ۲۰ متر است، در اثر عملکرد گسل در سطح دشت می‌توان شواهد مورفوتکتونیکي مانند پرتگاه‌های گسلی با ارتفاع متغیر چند سانتی‌متر تا شش متر، تپه‌ماهورها و رشد چین‌ها را مشاهده نمود. آبرفت‌های عهد حاضر در این منطقه، بسته به جایگاه رسوب‌گذاری، ترکیب و اندازه رسوبات و نوع گسترش، متفاوت هستند. رسوبات کفه ماسه‌ای، تا ماسه‌ای سیلتی و آبرفت‌های رودخانه‌ای از انواع این رسوبات هستند که در دشت سیلاخور و بستر رودخانه تشکیل شده‌اند. به دلیل گسترش رودها

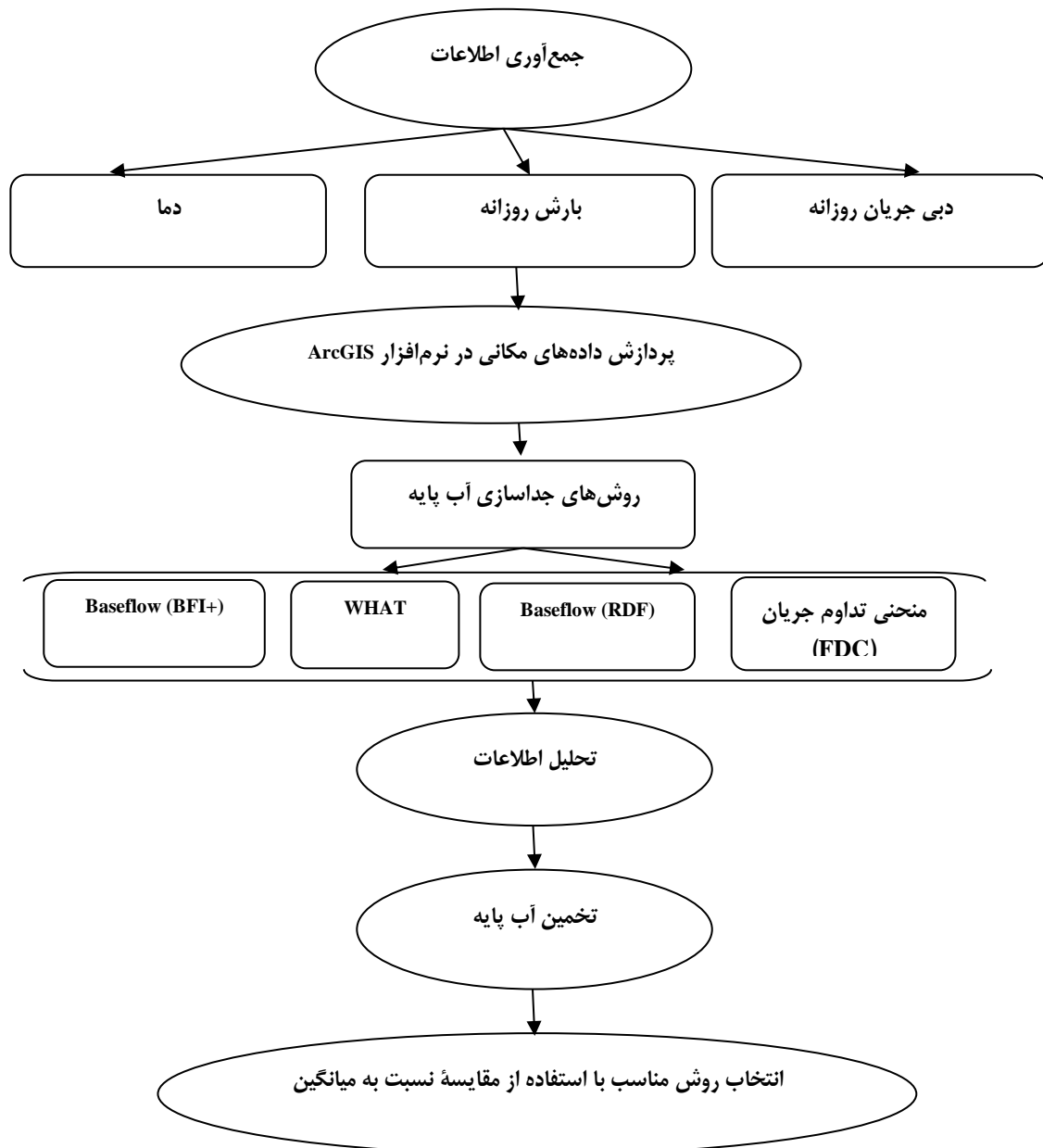


شکل ۲- نقشه بارش (الف)، تراز آب زیرزمینی (ب) و زمین‌شناسی (ج) منطقه مطالعاتی (Seif et al., 2021)
Figure 2- Precipitation map (a), groundwater level (b) Geology (c) of the study area (Seif et al., 2021)

۳-۲- داده‌های مورد نیاز

داده‌های دبی جریان و بارش از شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شد. در این راستا، داده‌های دبی روزانه در ایستگاه آب‌سنجی اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده‌اند. سری زمانی داده‌ها

برای دبی جریان و بارش از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۹ بود. نقشه‌های بارش، زمین‌شناسی، فاصله از گسل و تراز آب زیرزمینی نیز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10 پردازش شد. نمودار جریانی پژوهش حاضر در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار جریانی انجام پژوهش
Figure 3- Flow chart of the research

۴-۲- آب‌نمود و مدل‌های مورد استفاده

منحنی تداوم زمان جریان^۱ (FDC) یک منحنی فراوانی گرافیکی و تحلیلی است که درصد زمانی را که جریان داده شده برابر یا

بیش‌تر از یک مقدار مشخص در طول یک دوره تعریف شده است را نشان می‌دهد. این منحنی اطلاعات هیدرولوژیکی زیادی را در مورد جریان، از جمله تأثیر آب و هوا، فیزیوگرافی و زمین‌شناسی در یک نقشه گرافیکی واحد نمایش می‌دهد. بسیاری از اطلاعات

^۱ Flow duration curve

ضریب β برابر با $\delta/0$ است و t مرحله زمانی است. Chapman (1999) دومین الگوریتم RDF را به صورت رابطه (۳) مورد بحث قرار داد که در آن DR رواناب مستقیم برحسب مترمکعب بر ثانیه است. Q دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه است. α مقادیر پارامتر فیلتر از $0/925$ تا $0/995$ است و t مرحله زمانی است.

$$DR_t = \frac{3\alpha-1}{\alpha-1} DR_{t-1} + \frac{2}{3-\alpha} (Q_t - \alpha Q_{t-1}) \quad (3)$$

رویکرد اکهارت (Eckhardt, 2005) که برای دستیابی به فیلترینگ دیجیتالی پایین گذر آب نمود جریان رودخانه برای پارتیشن جریان پایه توسعه یافته است، می تواند به صورت ریاضی بیان شود:

$$BF_t = \frac{\alpha BF_{t-1} + (1 - BF_{\max}) + (1 - \alpha) BF_{\max} Q_t}{1 - BF_{\max}} \quad (4)$$

در رابطه بالا، BF جریان پایه برحسب مترمکعب بر ثانیه، BFmax حداکثر مقدار شاخص جریان پایه، دبی جریان رودخانه برحسب مترمکعب بر ثانیه و α پارامتر فیلتر در هر زمان t تابع $BF \leq Q$ است. دو متغیر برای تکنیک فیلتر کردن اکهارت (Eckhardt, 2005) مورد نیاز است: (۱) ثابت رکود، α (متغیر اکهارت) که بر اساس منحنی رکود تخمین آب نمود جریان تعریف می شود. (۲) BFmax که قابل اندازه گیری نیست اما می تواند بر اساس نتایج روش های دیگر بهبود یابد. اکهارت (Eckhardt, 2005) سه مقدار BFmax معمولی را برای تنظیمات مختلف هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی معرفی کرد که عبارتند از: BFmax= 0.80 برای نهرهای چندساله با سفره های متخلخل، BFmax= 0.50 برای جریان های زودگذر تحت آبخوان های نفوذپذیر و BFmax= 0.25 برای نهرهای چندساله با سفره های سنگ سخت. در این مطالعه، از BFmax با 0.80 به عنوان تخمین اولیه استفاده شد (Eckhardt, 2005). با استفاده از تکنیک FDC، کسر میانگین سالانه درازمدت جریان از جریان پایه پس از به دست آوردن مقادیر Q90 و Q50 و اتصال رابطه (۵) با FDC برآورد می شود (Al-Faraj and Furat, 2014; Mohammed and Scholz, 2018). سپس، با در نظر گرفتن $\alpha=0.925$ به عنوان مقدار اولیه (Arnold and Allen, 1999) و انجام جریان روزانه فیلتر برای مقادیر متغیرهای مختلف α تا زمانی که BFI معادل نسبت Q90/Q50 بود، اعمال α فیلتر شده، چندین مورد رکوردهای سری زمانی baseflow را به دست می آورد. مقادیر متوسط بلندمدت BFI شرایط هیدروژئولوژیکی را نشان می دهد. مقدار BFI بالاتر به معنای آزاد شدن آب بیشتر از سفره های زیرزمینی ذخیره سازی است. ابزار

هیدرولوژیکی پیچیده را به تصمیم گیران منتقل می کند (Bayou et al., 2021). FDC را می توان با پیروی از روش سال تقویمی، روش دوره کل یا روش فاصله کلاسی ساخت. در این پژوهش از روش دوره کل استفاده شد. FDC از داده های جریان روزانه با استفاده از تخمین های بی طرفانه موقعیت رسم Weibull ارائه شده است.

$$P = 100 \frac{m}{(n+1)} \quad (1)$$

در رابطه بالا، P درصد احتمال تراکمی تجربی برابر یا بیش تر از داده مشخص و m شماره ردیف داده مورد نظر. n تعداد کل رکوردهاست.

به طور کلی، Q50 نشان دهنده جریان متوسطی است که تحت تأثیر جریان های بسیار زیاد یا کم قرار ندارد (Mohammed and Scholz, 2018). نسبت Q90/Q50 نشان دهنده درصدی از سهم ذخیره زیرزمینی آبخوان در جریان است (Lott and Stewart, 2016). از BFI می توان برای تخمین ویژگی های جریان پایه حوزه های آبخیز استفاده کرد. حد نظری BFI بین صفر تا یک است. به طور کلی، این شاخص می تواند از $0/15$ تا $0/20$ برای یک حوزه آبخیز نفوذناپذیر و می تواند بیش از $0/95$ برای برخی از حوزه های آبخیز نفوذپذیر متغیر باشد.

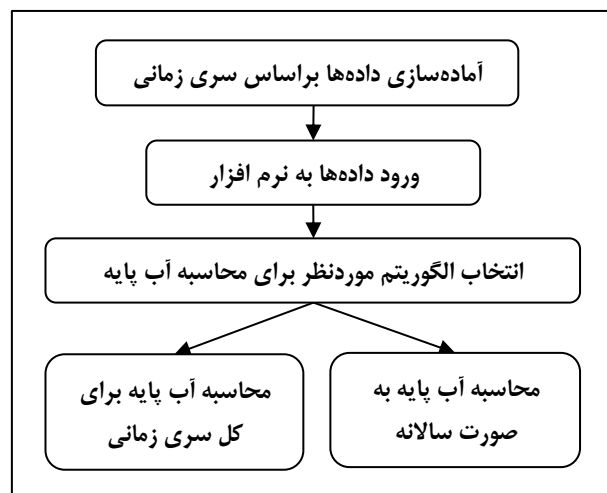
فیلتر دیجیتال بازگشتی (RDF) متداول ترین روش برای جداسازی جریان به جریان پایه و رواناب مستقیم است. دو RDF معروف وجود دارد که شامل Eckhardt و الگوریتم های رایج چاپمن می باشند (Chapman, 1999). شاخص جریان نسبت بلندمدت جریان پایه به جریان است. فیلترهای دیجیتال با استفاده از داده های جریان روزانه مقادیر پارامترهای جریان پایه را محاسبه کرده و واسنجی می کنند. همه فیلترهای دیجیتال با استفاده از سوابق جریان در مقادیر پارامتر روز اول (i)، روز اول (i-1) و ثابت های محاسبه شده با استفاده از داده های جریان روزانه و BFmax تعیین شده جریان پایه را محاسبه نمودند. الگوریتم فیلتر بازگشتی خودکار توسط (Nathan and McMahon, 1990) رواناب مستقیم را به صورت زیر محاسبه می کند:

$$DR_t = \alpha DR_{t-1} + \beta(1 + \alpha)(Q_t - Q_{t-1}) \quad (2)$$

در رابطه بالا، DR رواناب مستقیم برحسب متر مکعب بر ثانیه (m^3/s) است. Q دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه است. α پارامتر فیلتر برابر با $0/925$ به عنوان اولین تخمین است.

سامانه WHAT مبتنی بر وب ابرازی کارآمد برای واسنجی و اعتبار مدل هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد. اطلاعات جریان پایه از سامانه WHAT می‌تواند نقش مهمی در بهره‌برداری پایدار از آب زیرزمینی و آب‌های سطحی از جمله آبیاری و مصارف صنعتی و تخمین بار آلاینده‌ها از هر دو جریان پایه و رواناب مستقیم داشته باشد. بنابراین، اگر جریان اصلی مقدار قابل توجهی از آلاینده‌ها را به جریان منتقل کند می‌توان از بهترین شیوه‌های مدیریتی کاهش و رهگیری شسته شدن آلاینده‌ها استفاده کرد. این سامانه مبتنی بر وب GIS نشان می‌دهد که چه‌طور می‌توان منابع توزیع شده از راه دور را از طریق اینترنت با استفاده از برنامه‌نویسی وب به اشتراک گذاشت.

HydroOffice (BFI+) که در ۲۵ اکتبر ۲۰۱۹ از وب‌سایت (<http://hydrooffice.org>) ایجاد شده توسط Gregor (2010) قابل دسترسی است، این تصور را ایجاد می‌کند که ابزارهای عملی هستند که می‌توانند جریان پایه را از طریق تحلیل آب‌نمود جدا کنند (شکل ۴). ابزار تحلیل آب‌نمود مبتنی بر وب (WHAT) در ۱۵ نوامبر ۲۰۱۹ از وب‌سایت (<http://engineering.purdue.edu/~what>) که توسط Lim and et al. (2005) توسعه یافته بود و برنامه WHAT شامل سه روش، حداقل محلی، یک متغیر و فیلترهای دو متغیری است. جداسازی دستی جریان پایه از آب‌نمود می‌تواند منجر به ایجاد ناهماهنگی در نتایج شود. برنامه WHAT نتایج پایدار را در کم‌تر از یک دقیقه ارائه می‌دهد.



شکل ۴- نمودار جریانی برنامه BFI+ 3.0
Figure 4- Flow chart of BFI+ 3.0 program

جدول ۱- روش‌های فیلتر دیجیتال بازگشتی در برنامه BFI+ 3.0 (Bayou et al., 2021)

Table 1- Recursive digital filter methods in BFI+ 3.0 program (Bayou et al., 2021)

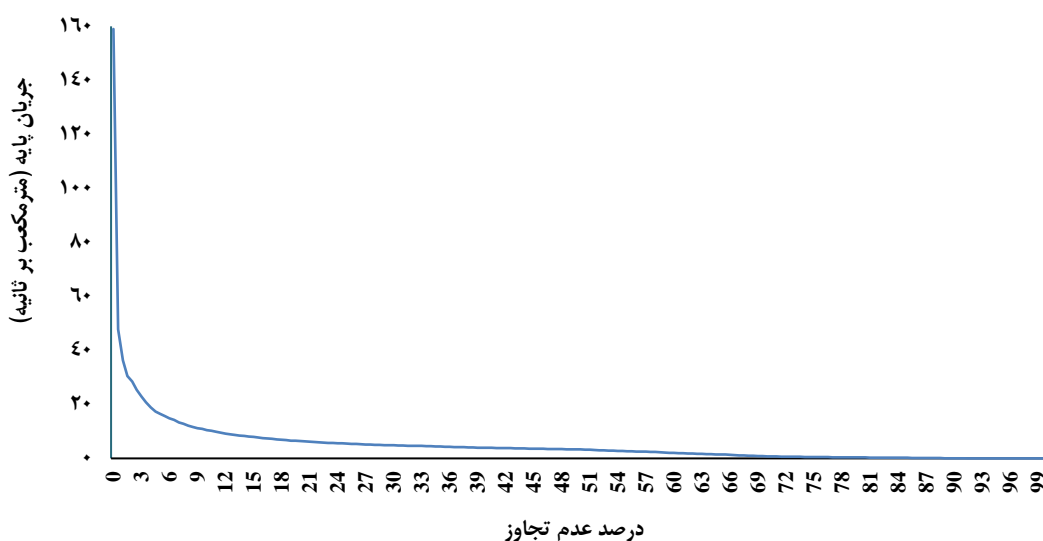
| منبع | پارامترهای فیلتر | نام فیلتر |
|--|--|---------------------------------|
| Chapman and Maxwell (1999) | $BF_t = \frac{k}{2-k}BF_{t-1} + \frac{1-k}{2-k}Q_t$ | الگوریتم یک پارامتره |
| Boughton (1993) | $BF_t = \frac{k}{1+C}BF_{t-1} + \frac{C}{1+C}Q_t$ | الگوریتم دو پارامتره |
| Jakeman and Hornberger (1993) | $BF_t = \frac{k}{1+C}BF_{t-1} + \frac{C}{1+C}(Q_t + \alpha Q_{t-1})$ | الگوریتم سه پارامتره IHACRES |
| Lyne and Hollick (1979); Nathan and McMahon (1990) | $DR_t = \alpha DR_{t-1} + \frac{1+\alpha}{2}(Q_t - Q_{t-1})$ | الگوریتم لین و هولیک (BFLOW) |
| Chapman (1991); Mau and Winter (1997) | $DR_t = \frac{3\alpha-1}{\alpha-1}DR_{t-1} + \frac{2}{3-\alpha}(Q_t - \alpha Q_{t-1})$ | الگوریتم چاپمن |
| Furey and Gupta (2003) | $BF_t = (1-\gamma)BF_{t-1} + \gamma \frac{C_3}{C_1}(Q_{t-d-1} - BF_{t-d-1})$ | فیلتر فوریه و گوپتا |
| Tularam and Ilahee (2008) | $BF_t = \alpha Q_t + (1-\alpha)BF_{t-1}$ | فیلتر EWMA |
| Eckhardt (2005) | $BF_t = \frac{\alpha BF_{t-1} + (1-BFI_{max}) + (1-\alpha)BFI_{max}Q_t}{1-BFI_{max}}$ | الگوریتم اکهاردت |

۳- نتایج و بحث

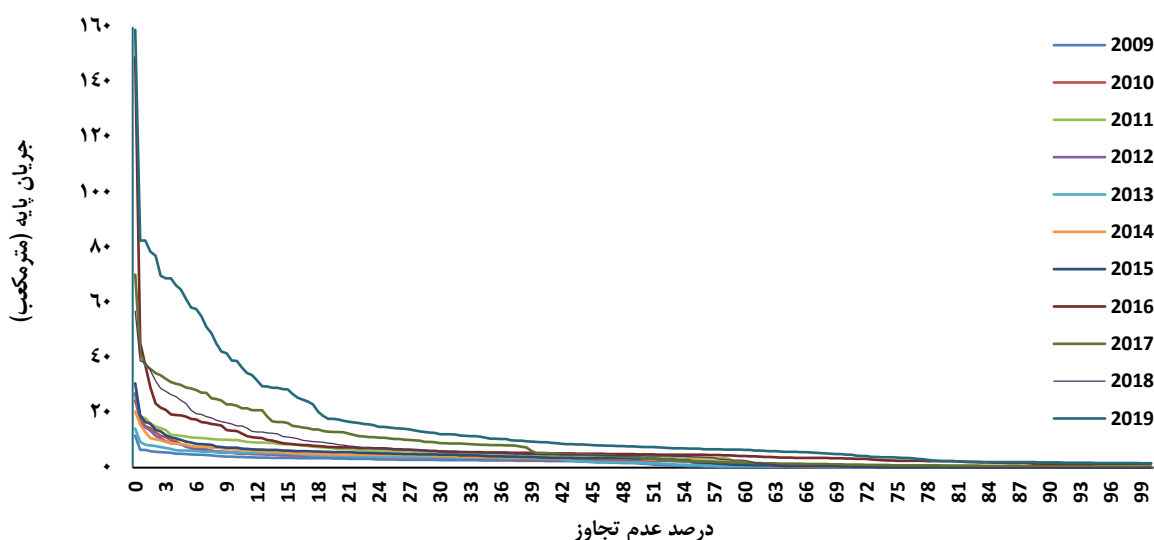
۳-۱- منحنی مدت زمان جریان (FDC)

بر اساس تحلیل FDC، نسبت Q90/Q50 برابر با ۰/۰۲ برای جریان حوزه آبخیز رحیم آباد به دست آمد. این نسبت نشان داد که آب زیرزمینی دو درصد از جریان را تشکیل می دهد (شکل ۵). نسبت بلندمدت جریان پایه به جریان یا BFI برابر با نسبت Q90/Q50 است این نسبت نشان دهنده خروج آب زیرزمینی یا سایر منابع تأخیری به جریان است. سازه های هیدرولیکی ساخته شده در بالادست ایستگاه های اندازه گیری هیدرولوژیکی می توانند

بر شرایط جریان اثر بگذارند. این مقادیر BFI مربوط به زمین شناسی و هیدروژئولوژی حوزه آبخیز است. در این پژوهش نسبت Q90/Q50 دارای یک روند متغیر کاهشی و افزایشی سالانه برای جریان بود که نشان دهنده تغییرات کاهشی و افزایشی سهم آب زیرزمینی سال به سال است. براساس نتایج پژوهش Kazemi (2022)، متغیرهای شاخص منحنی تداوم جریان در تمامی مناطق اقلیمی، به عنوان متغیر قابل اعتماد و پیش بینی کننده شاخص جریان پایه هستند.

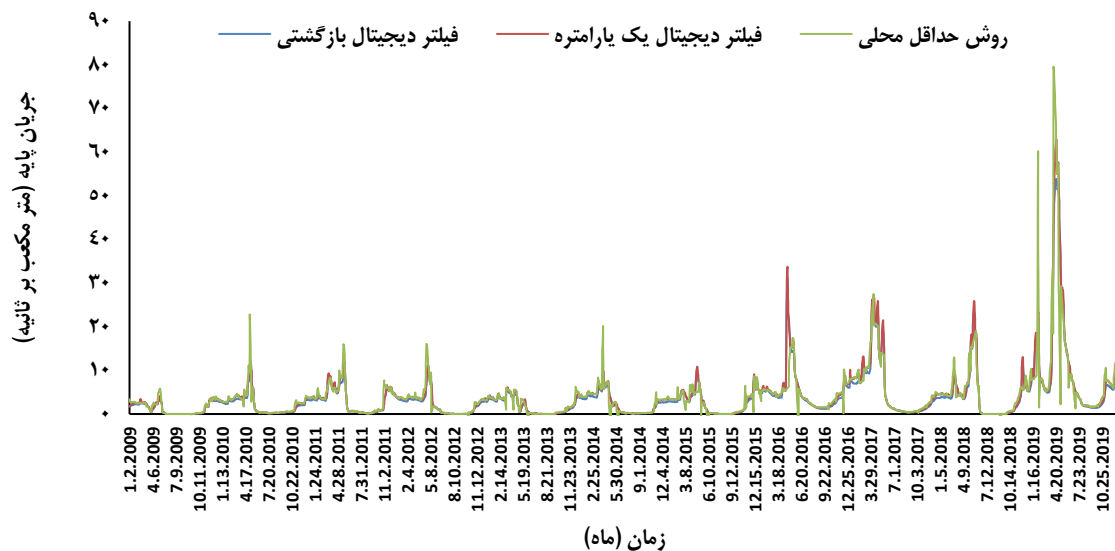


شکل ۵- FDC داده های اندازه گیری شده حوزه آبخیز رحیم آباد برای سری زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۹
Figure 5- FDC of the measured data of Rahimabad watershed for the time series of 2009-2019



شکل ۶- FDC داده های اندازه گیری شده حوزه آبخیز رحیم آباد برای سال های مختلف
Figure 6- FDC measured data of Rahimabad watershed for different years

برای جریان رحیم‌آباد استفاده شد. در شکل ۷ مقایسه گرافیکی عملکرد هر سه روش ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود و براساس شاخص آب‌پایه به‌دست آمده از هر سه روش، جریان پایه اختلاف کمی جریان کل دارد و بیش‌تر حجم آن به جریان پایه تبدیل شده است. در این بین بیش‌ترین میزان جریان پایه تخمینی مربوط به فیلتر دیجیتال یک پارامتره با شاخص آب پایه $0/77$ بود. لیکن مقدار شاخص آب پایه برآوردی از هر سه روش به هم نزدیک بود.



شکل ۷- جداسازی آب پایه با استفاده از ابزار فیلتر دیجیتال خودکار WHAT
Figure 7- Aquifer separation using the WHAT automated digital filter tool

در الگوریتم Furey و Gupta و $0/13$ و $0/05$ ، و $0/8$ برابر با BFI_{max} است (شکل ۸ و جدول ۲). در روش local minimum برنامه HydroOffice (BFI+) پارامتر نقطه عطف پیش‌فرض f برابر $0/9$ است و تعیین می‌کند که آیا حداقل به‌عنوان local minimum و مقدار جداکننده یا حداقل جریان رودخانه در دوره‌های متوالی N برابر با پنج روز است یا خیر. مقادیر پیش‌فرض f برابر $0/9$ و N برابر با پنج مورد استفاده قرار گرفت. میلوس گرگور (Gregor 2010) بیان کرد که آب‌نمود جریان پایه نسبت به تغییرات پارامتر N نسبت به تغییرات متغیر نقطه عطف f حساس‌تر است. به‌کارگیری تمام روش‌ها، دامنه مقادیر سهم آب زیرزمینی به جریان رحیم‌آباد بین دو تا ۸۴ درصد به‌دست آمد و میانگین مقدار آن نیز برابر با ۶۳ درصد تعیین شد (جدول ۲).

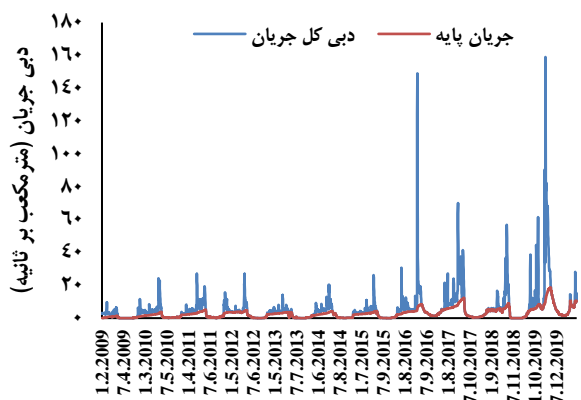
۳-۲- جداسازی جریان پایه با استفاده از WHAT

ابزار فیلتر دیجیتال خودکار WHAT به جداسازی جریان پایه کمک کرد. این ابزار یک‌بار کل داده‌ها را می‌پذیرد و داده‌ها را با استفاده از هر سه روش تحلیل می‌کند. ابزار فیلتر دیجیتال خودکار WHAT به‌طور گسترده‌ای برای جداسازی جریان پایه به‌صورت طولانی‌مدت با استفاده از فیلتر دیجیتال دو پارامتری (α) و BFI_{max} مورد استفاده قرار گرفت. مقدار BFI_{max} برابر با $0/80$ برای جریان‌های آبرفتی و متغیر فیلتر (α) برابر با $0/995$

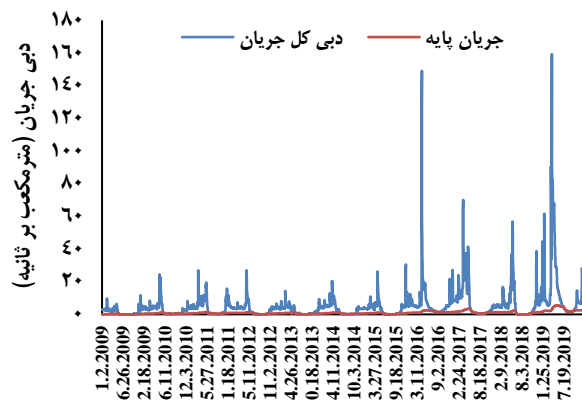
۳-۳- جداسازی جریان پایه با استفاده از RDF

RDF توسعه یافته توسط میلوس گرگور داده‌های یکسان را با استفاده از تمام یازده روش تحلیل می‌کند. در این پژوهش با استفاده از یازده روش ابزار RDF، به جداسازی جریان پایه از جریان رودخانه پرداخته شد. به همین منظور، با ثابت کردن متغیرهای فیلتر برای هر روش، مدل اجرا شد و نتایج به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده از BFI+، نشان داد که مقادیر جریان پایه محاسباتی برای الگوریتم‌های یک پارامتره و دو پارامتره، به‌جز BFI-، RDF-IHACRES، BF-BFLOW، BF-Chapman و BF- Furey بالاتر از میانگین جریان بود.

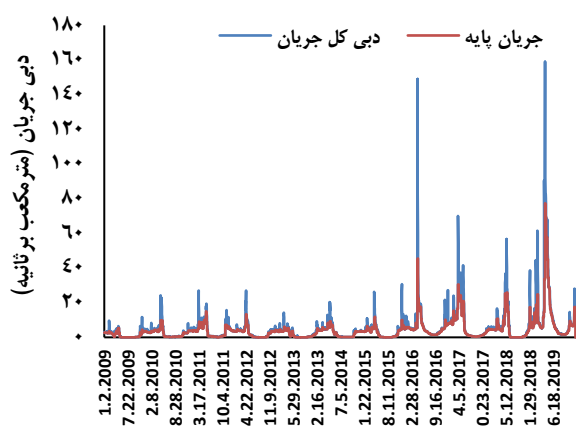
برای روش fixed interval و sliding interval N برابر ۳۰ روز است. در RDF، ثابت خشکیدگی، k برابر $0/4$ ، متغیر فیلتر یا همان α برابر $0/955$ ، مقدار C برابر با $0/955$ و $C1$ و $C2$



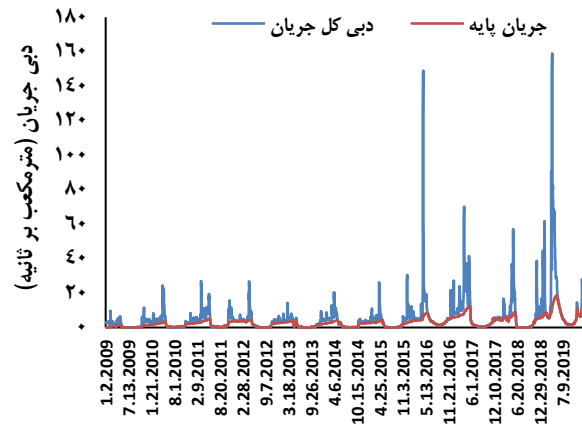
زمان (روز)
1) BF-Bflow



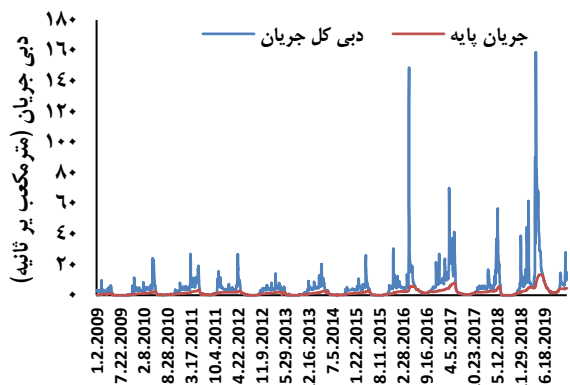
زمان (روز)
2) BF-Eckhardt



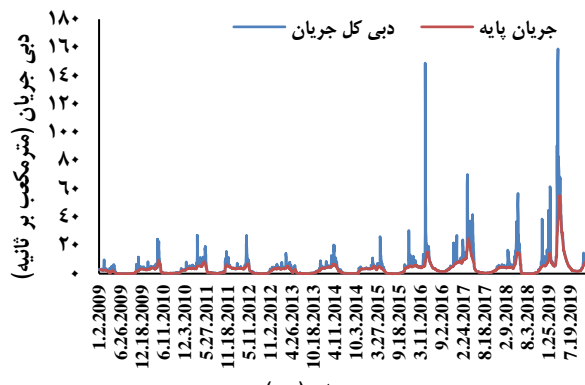
زمان (روز)
3) BFI Fixed interval method



زمان (روز)
4) BF-EWMA

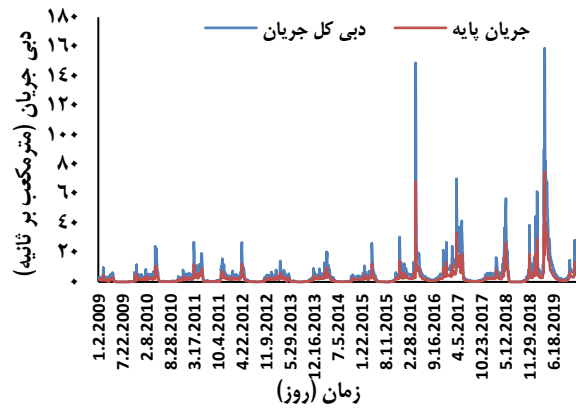


زمان (روز)
5) RDF- Champman Algorithm

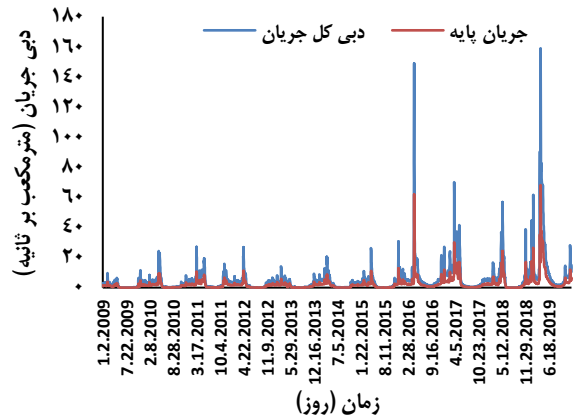


زمان (روز)
6) BFI local min

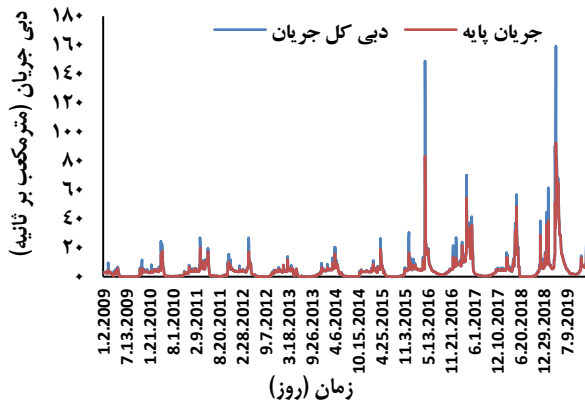
شکل ۸- جداسازی جریان پایه (سری زمانی) با استفاده از تمامی روش‌های RDF خودکار
Figure 8- Separation of the base stream (time series) using all automated RDF methods



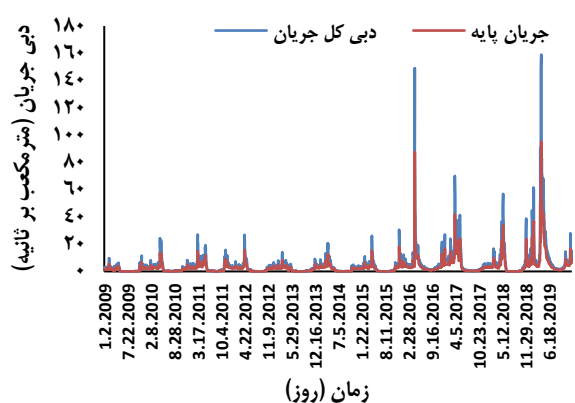
7) RDF- One-Parameter Algorithm



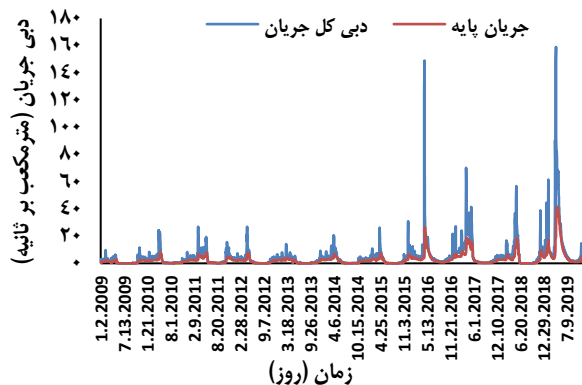
8) RDF-IHACRES



9) Sliding Interval Method



10) RDF-Two-Parameter Algorithm



11) BF-Furey Method

ادامه شکل ۸- جداسازی جریان پایه (سری زمانی) با استفاده از تمامی روش‌های RDF خودکار
Continued Figure 8- Separation of the base stream (time series) using all automated RDF methods

Furey برای کل حوزه آبخیز به‌عنوان الگوریتم‌های برتر انتخاب شدند (جدول ۳). در شکل ۹ نتایج تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده برای جداسازی آب پایه نمایش داده شده است.

با در نظر گرفتن میانگین تمام مقادیر BFI حاصل از تمامی روش‌ها که مقدار آن‌ها کم‌تر از میانگین است، میانگین کلی ۴۵ درصد به‌دست آمد که تخمین بهتری برای کل حوزه آبخیز بود. در این راستا، روش‌های اصلاح شده RDF (یک متغیر و دو متغیر)، IHACRES، BF-BFLOW، BF-Chapman و BF-

جدول ۲- خلاصه متغیرهای مورد استفاده و مقادیر BFI حاصل از تمامی روش های جداسازی آب پایه

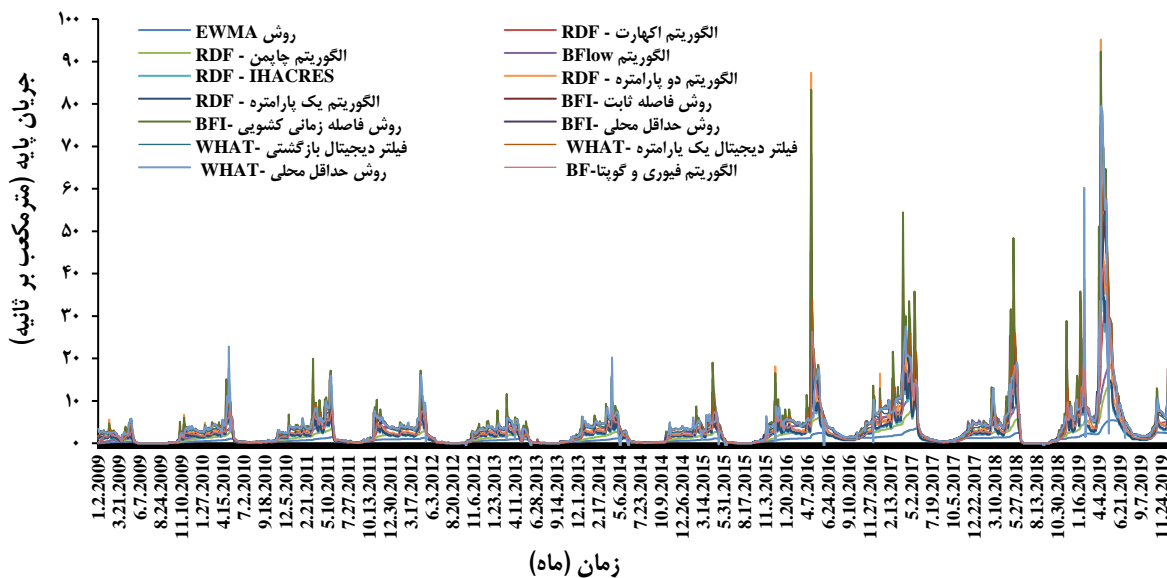
Table 2- Summary of the used variables and BFI values obtained from all groundwater separation methods

| مقدار BFI | متغیرهای مورد استفاده | روش جداسازی آب نمود | شماره |
|-----------|---|---------------------|--------------------|
| 0.20 | Q90/Q50 | FDC | 1 |
| 0.76 | f = 0.9, N = 5 | WH-Locmin | 2 |
| 0.77 | $\alpha = 0.995$ | WH-One para | |
| 0.71 | BFImax = 0.8, C = 0.995 | WH-Two para | 3 |
| 0.84 | f = 0.9, N = 5 | BF-Locmin | |
| 0.80 | N = 30 | BF-fixed | HydroOffice (BFI+) |
| 0.84 | N = 30 | BF-Sliding | |
| 0.48 | k = 0.4 | BF-One para | 3 |
| 0.60 | k = 0.4, C = 0.995 | BF-Two para | |
| 0.44 | $\alpha q = 0.01, C = 0.5, k = 0.4$ | BF-IHACRES | 3 |
| 0.44 | $\alpha = 0.995$ | BF-BFLOW | |
| 0.42 | $\alpha = 0.995$ | BF-Chapman | 3 |
| 0.81 | $\alpha = 0.995, BFmax = 0.8$ | BF-Eckhardt | |
| 0.78 | $\alpha = 0.005$ | BF-EWMA | 3 |
| 0.61 | C1 = 0.1, C2 = 0.13, g = 0.05, d = 2 days | BF-Furey | |
| 0.20 | | min | |
| 0.84 | | max | |
| 0.62 | | avg | |

جدول ۳- متغیرهای مورد استفاده و مقادیر BFI حاصل از روش های انتخابی جداسازی آب پایه

Table 3- Used variables and BFI values obtained from selected methods of groundwater separation

| مقدار BFI | متغیرهای مورد استفاده | روش جداسازی آب نمود | شماره |
|-----------|---|---------------------|-------|
| 0.20 | Q90/Q50 | FDC | 1 |
| 0.48 | k = 0.4 | BF-One para | 2 |
| 0.60 | k = 0.4, C = 0.995 | BF-Two para | |
| 0.44 | $\alpha q = 0.01, C = 0.5, k = 0.4$ | BF-IHACRES | 2 |
| 0.44 | $\alpha = 0.995$ | BF-BFLOW | |
| 0.42 | $\alpha = 0.995$ | BF-Chapman | 2 |
| 0.61 | C1 = 0.1, C2 = 0.13, g = 0.05, d = 2 days | BF-Furey | |
| 0.20 | | min | |
| 0.61 | | max | |
| 0.45 | | avg | |



شکل ۹- جداسازی آب پایه با استفاده از الگوریتم های مورد استفاده در پژوهش

Figure 9- Base water separation using the algorithms employed in the research

آب نمود، منحنی تداوم جریان (FDC)، نمودار زمانی، ابزار تحلیل آب نمود مبتنی بر وب (WHAT)، جعبه ابزار سازمان زمین شناسی ایالات متحده (USGS GW Toolbox) و برنامه

در پژوهشی (Bayou et al. (2021) به تخمین سهم آب زیرزمینی در دو رودخانه Sor و Gebba پرداختند. آن ها در پژوهش خود به منظور جداسازی آب از تکنیک تحلیل دستی

درصد به‌دست آمد که تخمین بهتری برای کل حوزه آبخیز است. در این راستا، روش‌های اصلاح شده RDF (یک متغیر و دو متغیر)، IHACRES، BF-BFLOW، BF-Chapman و BF-Furey برای کل حوزه آبخیز به‌عنوان الگوریتم‌های برتر انتخاب شدند. مطالعات متعددی برای مشکلات منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز در آینده ضروری است. تعامل آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی و مشکلات آلودگی، مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها، تخمین پتانسیل آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های دیگر و برآورد سهم آب‌های زیرزمینی تحت تغییرات آب و هوایی از جمله مواردی است که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد. لذا پیشنهاد می‌شود به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر و مدیریت بهتر منابع آب در منطقه مورد بررسی، در پژوهش‌های آتی این موارد در نظر گرفته شود. علاوه‌براین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات نقش خصوصیات حوزه آبخیز همچون خاک شناسی، پوشش گیاهی و نیز در تغییرات آب پایه بررسی شود. امید است که خروجی این مطالعه به برنامه‌ریزی، توسعه و مدیریت منابع آب حوزه آبخیز سیلاب‌خور نیز کمک کند.

سپاسگزاری

از حمایت‌های دانشگاه لرستان قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمامی اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

علی حقی‌زاده: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج، مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های نرم افزاری/آماري، مفهوم‌سازی؛ **لیلی قاسمی:** مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله، ویرایش و بازبینی مقاله، تحلیل‌های آماری.

شاخص (BFI+) Baseflow استفاده کردند و به‌منظور انتخاب روش‌هایی که بهترین برآورد را دارند، از مقایسه شاخص آب پایه با میانگین شاخص‌های به‌دست آمده بهره گرفتند.

در پژوهش حاضر نیز مانند مطالعه (Bayou et al. (2021) از چند روش که شامل منحنی تداوم جریان (FDC)، ابزار تحلیل آب‌نمود مبتنی بر وب (WHAT) و برنامه شاخص Baseflow (BFI+) استفاده شد. همچنین، به‌منظور انتخاب بهترین تکنیک‌هایی که مناسب‌ترین برآورد را دارند از مقایسه شاخص آب پایه با میانگین شاخص‌های به‌دست آمده استفاده شد. در این راستا، روش‌های اصلاح شده RDF (یک متغیر و دو متغیر)، IHACRES، BF-BFLOW، BF-Chapman و BF-Furey برای کل حوزه آبخیز به‌عنوان الگوریتم‌های برتر انتخاب شدند. این نتیجه با نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مطابقت داشت، چرا که در پژوهش آن‌ها نیز روش‌های RDF (یک متغیر و دو متغیر)، IHACRES و BFI اصلاح شده برای کل حوزه آبخیز تخمین بهتری ارائه دادند. همچنین، Zare Bidaki et al. (2015) نیز جهت انتخاب بهترین روش برای برآورد جریان پایه از بررسی آماری مقایسه میانگین جریان پایه استفاده کردند. برخلاف پژوهش حاضر، در پژوهش آن‌ها روش لین و هولیک به‌عنوان بهترین روش انتخاب شد.

۴- نتیجه‌گیری

مطابق با هدف پژوهش حاضر، آب‌پایه حوزه آبخیز سیلاب‌خور-رحیم‌آباد در دوره آماری ۱۰ ساله ۲۰۱۹-۲۰۰۹ با استفاده از داده‌های جریان روزانه و از طریق منحنی تداوم جریان (FDC)، ابزار تحلیل آب‌نمود مبتنی بر وب (WHAT) و برنامه شاخص Baseflow (BFI+) تفکیک شد.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که اکثر تکنیک‌های فیلتر خودکار مورد استفاده با متغیرهای فرضی، در مقایسه با FDC، جریان پایه را بالاتر از میانگین تخمین زده‌اند. علاوه‌براین، تحلیل FDC سهم ذخیره زیرزمینی در جریان رودخانه را کم‌تر از میانگین نشان داد. در پژوهش حاضر به‌منظور انتخاب بهترین روش‌هایی که دارای مناسب‌ترین برآورد هستند از مقایسه شاخص آب پایه با میانگین شاخص‌های به‌دست آمده استفاده شد. با در نظر گرفتن میانگین تمام مقادیر BFI حاصل از تمامی روش‌ها که مقدار آن‌ها کم‌تر از میانگین است، میانگین کلی ۴۵

منابع

- لرستان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳۸(۳)، ۱۱۵-۱۳۱.
doi:20.1001.1.22519424.1398.8.3.7.2
- کاظمی، رحیم (۱۳۹۹). بررسی تحقیقات جریان پایه در ایران و جهان. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۴(۱۳)، ۶۷۱-۶۵۰.
doi:10.22092/ijwmse.2021.341719.1767.
- مومنه، صادق (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی با مدل IHACRES در مدل‌سازی جریان روزانه. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۳)، ۱-۱۶.
doi:10.22098/MMWS.2022.9972.1076
- مهری، سونیا، مصطفی‌زاده، رئوف، اسمعیل عوری، ابادر، و قربانی، اردوان (۱۳۹۸). مقایسه روش‌های ترسیمی و فیلترهای عددی برگشتی در تفکیک جریان پایه در تعدادی از رودخانه‌های استان اردبیل. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۴(۲۶)، ۹۵-۱۱۳.
doi:10.22069/JWSC.2019.10737.2514.113
- نادری، مهین، شیخ، واحدبردی، بهره‌مند، عبدالرضا، کمکی، چوقی بایرام، و قانقرمه، عبدالعظیم (۱۴۰۲). تحلیل تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله‌رود). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۱-۱۹.
doi:10.22098/mmws.2022.11430.1129
- بیات‌ورکشی، مریم، طاهری‌نیا، بهناز، حسینیان، کاظم، فصیحی، روژین (۱۴۰۳). پیش‌بینی جریان رودخانه با کاربست مدل‌های هوشمند عصبی و LARS-WG (مطالعه موردی: حوضه آبریز کشکان). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۳)، ۲۲۵-۲۳۸.
doi:10.22098/mmws.2023.12827.1281
- زارع بیدکی، رفعت، قرهی، ن نسرین، و مهدیان‌فرد، مریم (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم در حوزه‌ی آبخیز دورود. محیط زیست و مهندسی آب، ۳(۵)، ۲۰۰-۲۱۲.
doi:10.22034/jewe.2019.187507.1321
- زارع بیدکی، رفعت، مهدیان‌فرد، مریم، هنربخش، افشین، و زینی‌وند، حسین (۱۳۹۴). برآورد جریان پایه رودخانه تیره لرستان به منظور ارزیابی جریان زیست محیطی. اکوهیدرولوژی، ۲(۳)، ۲۸۷-۲۷۵.
doi:10.22059/ije.2015.57297
- سیف، علی، قاسمیه، هدی، زینی‌وند، حسین، و زند، مهران (۱۳۹۹). شبیه‌سازی نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۶ با استفاده از مدل CLUE-s در حوزه آبخیز رحیم‌آباد. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۴)، ۱۱۰۲-۱۱۲۱.
doi:10.22092/ijwmse.2019.126961.1685
- شرفی، سیامک، آرین تبار، حبیب، و کمالی، زهرا (۱۳۹۸). بررسی تغییرات مکانی- زمانی مورفولوژی رودخانه سیلاخور در استان Baro-Akobo river Basin, southwestern Ethiopia. *Water*, 13(15), 2006. doi:10.3390/w13152006
- Berhail, S. (2022). Performance evaluation of an automated method for hydrograph separation in Mellah catchment, Northeastern Algeria. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 14(3), 251-267. doi:10.1504/IJHST.2022.10050153
- Boughton, W.C. (1993). A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments. In *Hydrology and Water Resources Symposium*, Newcastle, IEAust, Pub. 93/14, 317-324
- Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10, 5-78. http://eudml.org/doc/235283
- Chapman, T. (1999). A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13(5), 701-714. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<701::AID-HYP774>3.0.CO;2-2
- Chapman, T.G. (1991). Comment on evaluation of automated techniques for base flow and

References

- recession analyses, by RJ Nathan and TA McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), 1783-1784
- Chapman, T.G., & Maxwell, A.I. (1996). Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Pub. 96/05, 539-545
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(2), 507-515. doi:10.1002/hyp.5675
- Furey, P.R., & Gupta, V.K. (2003). Tests of two physically based filters for base flow separation. *Water Resources Research*, 39(10), 1-11. doi:10.1029/2002WR001621, 2003
- Gonzales, A.L., Nonner, J., & Heijkers, J. (2009). Uhlenbrook, S. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 13, 34. doi:10.5194/hess-13-2055-2009
- Gregor, M. (2010). User's Manual: BFI+ 3.0. HydrOffice Software Package, Water Science. Available online: <https://hydrooffice.org/Tool/BFI> (accessed on 10 May 2021).
- Hall, F.R. (1968). Base-flow recessions-A review. *Water Resources Research*, 4(5), 973-983.
- Indarto, I., Ratnaningsih, A., & Wahyuningsih, S. (2017). Calibration of six recursive digital filters for baseflow separation in east java. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(12), 3772-3778. <http://repository.unej.ac.id/xmlui/handle/123456789/106089>
- Jakeman, A.J., & Hornberger, G.M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 29(8), 2637-2649. doi:10.1029/93WR00877
- Kazemi, R. (2022). Investigation of base flow researches in Iran and the world. *Watershed Engineering and Management*, 13(4), 650-671. doi:10.22092/ijwmse.2021.341719.1767. [In Persian]
- Lim, K.J., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K. S., Muthukrishnan, S., & Tripathy, D. (2005). Automated web GIS based hydrograph analysis tool, WHAT 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), 1407-1416. doi:10.1111/j.1752-1688.2005.tb03808.x
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., & Paulhus, J.L.H. (1982). Hydrology for engineers. 3rd ed. New York, McGraw-Hill.
- Lott, D.A., & Stewart, M.T. (2016). Base flow separation: A comparison of analytical and mass balance methods. *Journal of Hydrology*, 535, 525-533. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.063
- Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In Institute of Engineers Australia National Conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. 89-93. doi: 10.1007/s12665-013-2358-3
- Mau, D.P., & Winter, T.C. (1997) Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Groundwater*, 35(2), 291-304. doi: 10.1111/j.1745-6584.1997.tb00086.x
- Mehri, S., Mostafazadeh, R., Esmali-Ouri, A., & Ghorbani, A. (2019). Graphical and recursive digital filter techniques in the separation of base flow, A comparison in Ardabil Province rivers. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 95-113. doi:10.22069/JWSC.2019.10737.2514. [In Persian].
- Mohammed, R., & Scholz, M. (2018). Flow-duration curve integration into digital filtering algorithms for simulating climate variability based on river baseflow. *Hydrological Sciences Journal*, 63(10), 1558-1573. doi:10.1080/02626667.2018.1519318.
- Momeheh, S. (2022). Performance comparison of artificial intelligence models with IHACRES model in daily streamflow modeling. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 1-16. doi:10.22098/MMWS.2022.9972.1076. [In Persian].
- Naderi, M., Sheikh, V., Bahrehmand, A., Komaki, CH., & Ghangermeh, A. (2023). Analysis of river flow regime changes using the indicators of hydrologic alteration (Case study: Hableroud watershed). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 1-19. doi:10.22098/mmws.2022.11430.1129. [In Persian].
- Nam, S., Chun, K.W., Lee, J.U., Kang, W.S., & Jang, S.J. (2021). Hydrograph separation and flow characteristic analysis for observed rainfall events during flood season in a forested headwater stream. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 54(1), 49-60. doi:10.11614/KSL.2021.54.1.049

- Nathan, R.J., & McMahon, T.A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465-1473. doi:10.1029/WR026i007p01465
- Ratnasari, D., Indarto, S.W., Ratnasari, D., & Wahyuningsih, S. (2015). Studi baseflow menggunakan perbandingan 6 metode RDF (Recursive Digital Filter). *Berkala Ilmiah Teknologi Pertanian*, 1(1), 1-7. <http://repository.unej.ac.id/handle/123456789/69075>
- Rimmer, A., & Hartmann, A. (2014). Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 514, 249-257. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.04.03
- Seif, A., Ghasemieh, H., Zeinivand, H., & Zand, M. (2021). Simulation of land use map in 2026 using CLUE-s model in Rahim-Abad Basin. *Watershed Engineering and Management*, 12(4), 1102-1121. doi:10.22092/ijwmse.2019.126961.1685. [In Persian]
- Shao, G., Zhang, D., Guan, Y., Sadat, M.A., & Huang, F. (2020). Application of different separation methods to investigate the baseflow characteristics of a semi-arid sandy area, Northwestern China. *Water*, 12(2), 434. doi:10.3390/w12020434
- Sharafi, S., Sakvand, H., & Kamali, Z. (2020). Investigation of spatial and temporal variation of Silakhor River morphology in Lorestan province. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(3), 115-131. dor:20.1001.1.22519424.1398.8.3.7.2 [In Persian]
- Smakhtin, V.U. (2001). Low flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 240, 147-186. doi:10.1016/S0022-1694(00)00340-1
- Tallaksen, L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165(1-4), 349-370. doi:10.1016/0022-1694(94)02540-R
- Tularam, G. A. & Ilahee, M. (2008). Exponential smoothing method of base flow separation and its impact on continuous loss estimates. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(2), 136-144. doi:10.3844/ajessp.2008.136.144
- Yang, W., Xiao, C., Zhang, Z., & Liang, X. (2021). Can the two-parameter recursive digital filter baseflow separation method really be calibrated by the conductivity mass balance method?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 1747-1760. doi:10.5194/hess-25-1747-2021
- Zare Bidaki, R., Gharahi, N., & Mahdianfard, M. (2019). Comparison of separation methods for baseflow from direct runoff in Doroud Basin, Lorestan, Iran. *Environment and Water Engineering*, 5(3), 200-212. doi:10.22034/jewe.2019.187507.1321. [In Persian]
- Zare Bidaki, R., Mahdianfard, M., Honarbakhs, A., & Zeinivand, H. (2015). base flow estimation in Tireh Dorood River in order to environmental flow assessmen. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2(3), 275-287. doi:10.22059/ije.2015.57297. [In Persian]