

Application of digital filtering methods for assessing base flow and groundwater recharge in the Kashkan Watershed

Ali Haghizadeh*, Leila Ghasemi, Hafez Mirzapour

Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

*Corresponding author: Haghizadeh.a@lu.ac.ir

(Received: 06 October 2024

Revised: 27 December 2024

Accepted: 17 January 2025)

Extended Abstract

Introduction: Natural resource management is considered the foundation of sustainable development. Therefore, in a country like Iran, located in the water-stressed and tense region of the Middle East, water resource management is of paramount importance. Knowledge of temporal changes in baseflow is crucial for effective water resources management. Identifying the most suitable and optimal method for hydrograph separation and baseflow estimation enables the accurate calculation of the baseflow index.

Materials and methods: In this study, nine recession filter algorithms were used to estimate baseflow. These algorithms include Local Minimum, Sliding Interval, Fixed Interval, Eckhardt, Chapman, Chapman & Maxwell, Lyne & Hollick, Furey & Gupta, and Boughton. Using these algorithms, daily baseflow was calculated for the Kashkan watershed using daily discharge and rainfall data from 1999 to 2020. The Kakareza, Sarab Seid Ali, Cham Anjir, Afrineh, and Pol-e-Dokhtar stations were investigated to separate baseflow in the Kashkan watershed. The performance of the methods for separating baseflow in the hydrograph of the Kashkan watershed was assessed using the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficient and the R^2 coefficient to select the most suitable filtering method.

Results: Among the recession algorithms examined, the Furey & Gupta method estimated the lowest baseflow for all five sub-watersheds. In the Afrineh sub-watershed, the Lyne and Hollick, Fixed Interval, and Sliding Interval methods estimated baseflow as 36.41, 30.11, and 29.7 m^3/s , respectively. These methods attributed 85%, 82%, and 81% of the total flow to groundwater contributions. In the Cham Anjir sub-watershed, the highest annual average baseflow values were obtained using the Lyne & Hollick, and Local Minimum methods, with values of 7.22, and 6.24 m^3/s , respectively. The variation in mean baseflow among different methods in the Cham Anjir sub-watershed ranged from 17% to 94%. For the Kakareza sub-watershed, the highest annual average baseflow values were observed using the Lyne & Hollick, and Sliding Interval methods, with values of 9.70, and 9.72 m^3/s , respectively. The variation in mean baseflow among different methods in the Kakareza sub-watershed ranged from 17% to 95%. Similarly, in the Pol-e-Dokhtar sub-watershed, the highest values were obtained using the Lyne & Hollick, Fixed Interval, and Sliding Interval methods, with values of 36.10, 34.40, and 34.40 m^3/s , respectively, and variations ranging from 17% to 99%. In the Sarab Seid Ali sub-watershed, the Lyne & Hollick, Fixed Interval, and Sliding Interval methods yielded the highest annual average baseflow values of 5.97, 5.95, and 5.94 m^3/s , respectively, with variations ranging from 17% to 92%. Based on the findings and evaluation criteria, the Local Minimum, Lyne & Hollick, Sliding Interval, and Fixed Interval methods were identified as suitable for baseflow separation in the studied sub-watersheds.

Discussion: Baseflow in the Kashkan watershed of Lorestan constitutes a significant portion of the flow. In the majority of the methods examined in this study, it was also shown that baseflow accounts for more than 50% of the streamflow throughout the year. In all studied sub-watersheds, the Lyne and Hollick algorithm showed suitable values for the NSE coefficient and R^2 . Therefore, this algorithm can be considered an appropriate method for estimating baseflow in the Kashkan watershed. Considering the hydrological characteristics of the watershed, this method can better simulate the natural fluctuations of baseflow.

Conclusion: The results of this study can inform baseflow contribution estimates and help in selecting appropriate methods for flow separation in the hydrological modeling of rivers with varying discharge ranges in the Kashkan watershed. The present research focused on differentiating water sources in the Kashkan watershed using digital filtering methods. Future studies are recommended to explore other approaches, such as chemical methods and tracers, for water source differentiation in the Kashkan watershed, and to compare the accuracy of these methods with digital filtering techniques.

Keywords: Baseflow separation, Hydrograph, Kashkan, Recursive Digital Filters, Groundwater Recharge.

Citation: Haghizadeh, A., Ghasemi, L., & Mirzapour, H. (2025). Application of digital filtering methods for assessing base flow and groundwater recharge in the Kashkan Watershed. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 69-86. doi= 10.22034/iwm.2025.2042760.1178

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



کاربرد روش‌های فیلتر دیجیتال در ارزیابی آبپایه و تغذیه آب زیرزمینی در حوضه کشکان

علی حقی زاده*، لیلا قاسمی، حافظ میرزاپور

گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

*نویسنده مسئول: Haghizadeh.a@lu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

چکیده مبسوط

مقدمه: مدیریت منابع طبیعی به‌عنوان پایه و اساس توسعه پایدار در نظر گرفته می‌شود. لذا در کشوری همچون ایران که در منطقه پرتنش و کم آب خاورمیانه قرار دارد، مدیریت منابع آب بسیار حائز اهمیت است. به‌منظور مدیریت موثر منابع آب، درک تغییرات زمانی در آبپایه بسیار مهم است. شناخت مناسب‌ترین و بهینه‌ترین روش جداسازی جریان هیدروگراف و برآورد دبی پایه امکان محاسبه دقیق شاخص دبی پایه را فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش به‌منظور برآورد آبپایه از ۹ الگوریتم فیلتر برگشتی استفاده شد. این الگوریتم‌ها شامل Sliding Interval, Local Minimum, Fixed Interval, Eckhardt, Chapman, Sliding Interval, Lyne & Hollick, Furey & Gupta, Boughton و Broughton می‌باشند. با استفاده از این الگوریتم‌ها مقدار آبپایه به‌صورت روزانه، با استفاده از داده‌های دبی جریان و بارش روزانه و برای دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۹، برای حوزه آبخیز کشکان محاسبه گردید. در مطالعه حاضر به‌منظور تفکیک آبپایه در حوزه آبخیز کشکان، ایستگاه‌های کاکارضا، سراب صیدعلی، چم انجیر، افرینه و پلدختر مورد بررسی قرار گرفتند. ارزیابی عملکرد روش‌های تفکیک آبپایه هیدروگراف حوزه آبخیز کشکان توسط ضریب کارایی NSE و ضریب R^2 انجام شد و مناسب‌ترین روش فیلتری انتخاب گردید.

نتایج: از میان الگوریتم‌های برگشتی مورد بررسی، برای هر ۵ زیرحوضه مورد بررسی، کمترین میزان برآورد آبپایه مربوط به روش Furey & Gupta آبپایه بود. در زیرحوضه افرینه، روش‌های Lyne و Holic و Fixed Interval, Sliding Interval به‌ترتیب آبپایه را ۳۶/۴۱، ۳۰/۱۱ و ۲۹/۷ مترمکعب بر ثانیه برآورد کردند. این روش‌ها ۸۵٪، ۸۲٪ و ۸۱٪ از کل جریان را به مشارکت‌های آب‌های زیرزمینی اختصاص دادند. در زیرحوضه چم انجیر بیشترین مقادیر میانگین سالانه آبپایه به روش‌های Lyne و Holic و Local Minimum است و مقادیر آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۷/۲۲ و ۶/۲۴ مترمکعب بر ثانیه بود. تغییرات در میانگین آبپایه بین روش‌های مختلف در زیرحوضه چم انجیر از ۱۷٪ تا ۹۴٪ متغیر بود. برای زیرحوضه کاکارضا بیشترین مقادیر متوسط سالانه آبپایه با استفاده از روش‌های Lyne و Holic و Sliding Interval مشاهده شد که مقادیر آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۹/۷۰ و ۹/۷۲ مترمکعب بر ثانیه بودند. تغییرات در میانگین آبپایه بین روش‌های مختلف در زیرحوضه کاکارضا از ۱۷ تا ۹۵ درصد متغیر بود. به‌طور مشابه، در زیرحوضه پلدختر بیشترین مقادیر با استفاده از روش‌های Lyne و Holic, Fixed Interval, Sliding Interval به دست آمد که به‌ترتیب برابر با ۳۶/۱۰، ۳۴/۴۰ و ۳۴/۴۰ مترمکعب بر ثانیه بودند و دامنه تغییرات از ۱۷٪ تا ۹۹٪ متغیر بود. در زیرحوضه سراب صیدعلی روش‌های Lyne و Holic, Fixed Interval و Sliding Interval به ترتیب بیشترین مقادیر میانگین سالانه آبپایه را به میزان ۵/۹۷، ۵/۹۵ و ۵/۹۴ مترمکعب بر ثانیه به دست آوردند، و تغییرات آن‌ها از ۱۷٪ تا ۹۲٪ متغیر بود. بر اساس یافته‌ها و معیارهای ارزیابی، روش‌های Local Minimum, Lyne, Holic, Sliding Interval و Fixed Interval به‌عنوان روش‌های مناسب برای جداسازی آبپایه تعیین شدند.

بحث: آبپایه در حوزه آبخیز کشکان لرستان بخش زیادی از جریان را تشکیل می‌دهد. در اکثریت روش‌های مورد بررسی در این پژوهش نیز نشان داده شد که شاخص آبپایه بیش از ۵۰ درصد از جریان رود را در طول سال تشکیل می‌دهد. در تمامی زیرحوضه‌های مورد مطالعه، الگوریتم Lyne و Holic دارای مقدار ضریب NSE و مقدار R^2 مناسبی بود؛ بنابراین می‌توان این الگوریتم را به‌عنوان یک روش مناسب برای برآورد مقدار آبپایه در حوضه کشکان دانست. باتوجه به ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه، این روش می‌تواند نوسانات طبیعی آبپایه را بهتر شبیه‌سازی کند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش می‌تواند به برآوردهای مربوط به سهم جریان پایه کمک کند و در انتخاب روش‌های مناسب برای تفکیک جریان در مدل‌سازی هیدرولوژیکی رودخانه‌ها با دامنه‌های مختلف جریان در حوضه کشکان مؤثر باشد. پژوهش حاضر بر تفکیک منابع آبی در حوضه کشکان با استفاده از روش‌های فیلترینگ دیجیتال متمرکز شده است. توصیه می‌شود در مطالعات آتی، سایر رویکردها مانند روش‌های شیمیایی و ردیاب‌ها برای تمایز منابع آبی در حوضه کشکان بررسی شود و دقت این روش‌ها با تکنیک‌های فیلترینگ دیجیتال مقایسه گردد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی آبپایه، هیدروگراف، کشکان، فیلترهای دیجیتال برگشتی، تغذیه آب زیرزمینی

استناد: حقی‌زاده، ع.، قاسمی، ل. و میرزاپور، ح. (۱۴۰۴). کاربرد روش‌های فیلتر دیجیتال در ارزیابی آبپایه و تغذیه آب زیرزمینی در حوضه کشکان. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۳)، ۸۶-۶۹.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

با وجود داشتن پایه فیزیکی اغلب پیچیده هستند و تنها در صورتی دقیق خواهند بود که مقادیر مناسب برای پارامترهای ورودی ارائه شوند (Nejadhashemi *et al.*, 2009). فیلترهای دیجیتالی را می‌توان بر اساس تعداد پارامترهای درگیر (یک، دو یا چندگانه) مرتب کرد (Nathan & McMahon, 1990). سهم آب‌پایه به جریان می‌تواند بر شیوه‌های مدیریت آب‌های سطحی و زیرزمینی تأثیر بگذارد (Shao *et al.*, 2021). با توجه به اهمیت جداسازی آب‌پایه هیدروگراف، مطالعات زیادی در رابطه با آن صورت گرفته است. برای مثال Mehri و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به مقایسه روش‌های ترسیمی و فیلترهای عددی برگشتی در تفکیک آب‌پایه در تعدادی از رودخانه‌های استان اردبیل پرداختند. نتایج نشان داد که روش‌های ترسیمی دارای نتایج قابل قبولی نبودند و روش‌های فیلتری با برطرف کردن محدودیت‌هایی که روش‌های گرافیکی و مبتنی بر تئوری پردازش سیگنال، برای تفکیک کردن جریان به دو مؤلفه جریان سریع و آب‌پایه دارند، صحت و دقت بیشتری دارند. Zare Bidaki و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به مقایسه روش‌های جداسازی آب‌پایه از رواناب مستقیم در حوزه‌ی آبخیز دورود در استان لرستان پرداختند. این پژوهش با استفاده از روش‌های PART، فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره (Lyne-Hollick) و دو پارامتره (Eckhardt) انجام شد. نتایج نشان داد که روش Lyne-Hollick با فیلتر ۰/۹۷۵ به‌عنوان بهترین روش برای جداسازی آب‌پایه می‌باشد. Porhemat و Kazemi (۲۰۲۰) در پژوهشی به واسنجی فیلترهای رقومی برگشتی با هدف جداسازی آب‌پایه در حوضه کرخه پرداختند. نتایج نشان داد که قسمت اعظم جریان رودخانه در منطقه مورد مطالعه، به آب‌پایه مربوط می‌شود و بیانگر مشارکت بیش از ۵۰ درصدی منابع آب‌های زیرسطحی در آب‌های سطحی حوضه‌های مورد مطالعه می‌باشد. Aboelnour و همکاران (۲۰۲۱) مدلی را توسعه دادند که روش حداقل محلی و دو روش فیلتر دیجیتالی را ترکیب کرده و برای تخمین آب‌پایه در حوضه‌های

جداسازی آب‌پایه، به‌عنوان سهم آب زیرزمینی در مقدار کل جریان، یک عمل رایج در هیدرولوژی است (Nathan & McMahon, 1990). کمی‌سازی آب‌پایه و رواناب مستقیم کاربردهای زیادی دارد. با دانستن سری زمانی رواناب سطحی خاص رویداد (واکنش سریع به بارش‌های ناگهانی)، می‌توان مواردی همچون تحلیل سیلاب، استخراج هیدروگراف واحد و واسنجی مدل‌های بارش-رواناب و همچنین مدل‌های هدایت رواناب را انجام داد (Nathan & McMahon, 1990). علاوه بر این، مطالعه دقیق آب‌پایه در جنبه‌های مختلف تحقیقات منابع آب ضروری است (Duan *et al.*, 2024). برای مثال می‌توان به اهمیت آن در تأمین آب صنعتی و کشاورزی، امنیت آب، ارزیابی آلودگی منبع غیرنقطه‌ای، ارزیابی و اکتشاف منابع آب و همچنین در مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک بارندگی-رواناب اشاره کرد (Duan *et al.*, 2024). در نتیجه، فرآیند جداسازی آب‌پایه به‌عنوان یک جنبه حیاتی و چالش‌برانگیز در زمینه هیدرولوژی است که تمرکز و تلاش‌های تحقیقاتی قابل‌توجهی را به خود جلب می‌کند (Duan *et al.*, 2024). بر اساس نظر Furey و Gupta (۲۰۰۱) روش‌های جداسازی آب‌پایه از جریان به چهار گروه شامل ژئوشیمیایی، گرافیکی، تحلیلی و فیلتر کردن تقسیم می‌شوند. بر اساس اندازه‌گیری‌های ژئوشیمیایی می‌توان جداسازی آب‌پایه را با استفاده از ایزوتوپ‌ها (Stadnyk *et al.*, 2015)، بار رسوبی (Zheng, 2015)، یا هدایت الکتریکی (Lott & Stewart, 2013) انجام داد. همچنین روش‌های گرافیکی بیشتر از سایر روش‌ها در معرض ذهنیت و سلیقه شخصی قرار دارند، زیرا به فرضیات ساخته‌شده توسط کاربر که غالباً دلخواه و بدون دلیل و قاعده مشخص هستند، وابسته‌اند (Nejadhashemi *et al.*, 2009). در مقابل، رویکردهای تحلیلی مبتنی بر نظریه‌های بنیادی آب‌های زیرزمینی و جریان سطحی است (Nejadhashemi *et al.*, 2009). روش‌های اخیر

و روش اکهاردت برای محاسبه آب‌پایه و شاخص آب‌پایه استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ABCD در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی کلی در جریان ماهانه در ایستگاه‌های BAZ و SD عملکرد خوبی دارد. Chen و همکاران (۲۰۲۴) در یک مطالعه به بررسی ویژگی‌های تکامل و حالت تأخیری آب‌پایه در حوضه‌های مرطوب جنوب شرقی چین پرداختند. در این تحقیق روشی برای تمایز بین فصل‌های مرطوب و خشک بر اساس میانگین چندساله BFI پیشنهاد شد. نتایج بیانگر این بود که روش BES در شبیه‌سازی آب‌پایه بهتر از سایر روش‌های جداسازی تک عمل می‌کند. Duan و همکاران (۲۰۲۴) در یک مطالعه

روش فیلتر دیجیتال را با مدل هیدرولوژیکی ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT²) ترکیب کرده تا الگوهای زمانی و مکانی آب‌پایه را در حوضه رودخانه گانجیانگ، در کشور چین، بررسی کنند و تأثیر تغییرات کاربری زمین بر آب‌پایه را به‌طور کمی ارزیابی نمایند. نتایج نشان داد که بین آب‌پایه سالانه و جریان رودخانه همبستگی مثبت وجود دارد، درحالی‌که بین شاخص آب‌پایه سالانه و بارش همبستگی منفی دیده شد. Riazi و همکاران (۲۰۲۴) در یک مطالعه از مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان آب در یک حوزه آبخیز در شرق افغانستان با استفاده از داده‌های مبتنی بر ماهواره و داده‌های تجزیه‌وتحلیل مجدد استفاده کرده است. در این مطالعه از هفت روش جداسازی آب‌پایه برای تخمین مقادیر تغذیه آب‌های زیرزمینی بر اساس سری‌های زمانی جریان آب از دوره پایه و سناریوهای اقلیمی مختلف بهره گرفتند. بر اساس نتایج حاصل، نشان داده شد که مدل SWAT در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان خوب عمل می‌کند.

برآورد آب‌پایه باهدف برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و مقابله با مشکلات ناشی از کمبود آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار مهم است. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی و تعیین میزان تغذیه آب

مختلف تگراس استفاده کرد، آن‌ها گزارش کردند که این مدل دارای عملکرد بالا، خطای سیستماتیک پایین و خطاهای نسبی کم برای پیش‌بینی¹ BFI است. He و همکاران (۲۰۲۲) فیلتر دیجیتال برگشتی دوپارامتری را در حوضه رودخانه تیائو جنوبی در کشور چین اعمال کردند، آن‌ها دریافتند که پارامترها در مقیاس‌های زمانی مختلف بر نتیجه آب‌پایه تأثیر می‌گذارند. Biagi و همکاران (۲۰۲۲) آب‌پایه محاسبه‌شده با روش فیلتر دیجیتال برگشتی را برای پیش‌بینی بارهای مغذی در حوضه دریاچه‌های پایین انتاریو در کانادا انجام دادند. Waterman و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تغییرات اجزای جریان رودخانه‌های چندساله در سراسر کانزاس در ایالات متحده و روابط آن با ویژگی‌های حوزه آبخیز پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها، تفاوت‌ها برای همه روش‌های جداسازی ناچیز است. Cheng و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از ۴ روش گرافیکی و ۶ روش فیلتر دیجیتال در حوزه آبخیز آلدرا، کانادا، دریافتند که عملکرد روش‌ها در مقیاس‌های منطقه‌ای متفاوت است. Murray و همکاران (۲۰۲۳) یک تحلیل عمیق از روندهای ماهانه آب‌پایه در حوضه‌های آبریز کانادا با استفاده از روش تعادل آب انجام دادند. هدف این مطالعه بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر آب‌پایه بود و اطلاعات مهمی را در مورد تغییرات در چرخه‌های هیدرولوژیکی در کانادا ارائه کرد. Solgi و همکاران (۲۰۲۴) از الگوریتم‌های مختلف تک‌پارامتری، دوپارامتری، سه‌پارامتری، Lyne و Chapman, Hollick, Furey, Gupta و Eckhardt، Ewma برای جداسازی آب‌پایه روزانه چشمه کارستی کهمان در شهرستان الشتر استفاده کردند. نتایج نشان داد که عملکرد الگوریتم اکهارت بهتر از دیگر الگوریتم‌ها بوده است. Xie و همکاران (۲۰۲۴) آب‌پایه و شاخص آب‌پایه را در حوضه‌های بایژیاو (BZA) و شادوان (SD) در حوضه رودخانه جیاوجیانگ (JRB) در استان ژجیانگ موردبررسی قرار دادند. مدل ABCD

² Soil & Water Assessment Tool

¹ Baseflow Index

گچساران و آبرفت‌های جوان و قدیمی است (Kazemi *et al.*, 2022). بر اساس روش آمبرژه، آبخیز کشکان در اقلیم نیمه‌مرطوب سرد قرار دارد. میانگین بلندمدت بارش برای زیرحوضه‌های افرینه، چم انجیر، کاکارضا، پلدختر و سراب صیدعلی به ترتیب برابر است با ۴۹۸، ۴۷۹/۵، ۵۳۵/۱، ۳۴۰ و ۵۰۸/۱ میلی‌متر می‌باشد (Khorshid Doust *et al.*, 2016). میانگین سالانه بارش در کل حوزه برابر با ۴۶۰ میلی‌متر است (Kaviani *et al.*, 2022). از لحاظ پراکنش کاربری اراضی، حوزه مورد بررسی دارای ۴۵/۷۶ درصد جنگل، ۱۳/۲۴ درصد مرتع، ۳۹/۹۶ درصد کشاورزی و ۱/۰۴ درصد اراضی انسان‌ساخت می‌باشد (Negaresh *et al.*, 2012). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

در این پژوهش تعداد ۵ ایستگاه باران‌سنجی و آب‌سنجی در سطح حوزه انتخاب گردید که شامل افرینه، کاکارضا، سراب صیدعلی، چم انجیر و پلدختر هستند. علاوه بر این در جدول (۱) مشخصات زیرحوضه‌های منتخب از منطقه مورد مطالعه ذکر شده است.

داده‌های موردنیاز

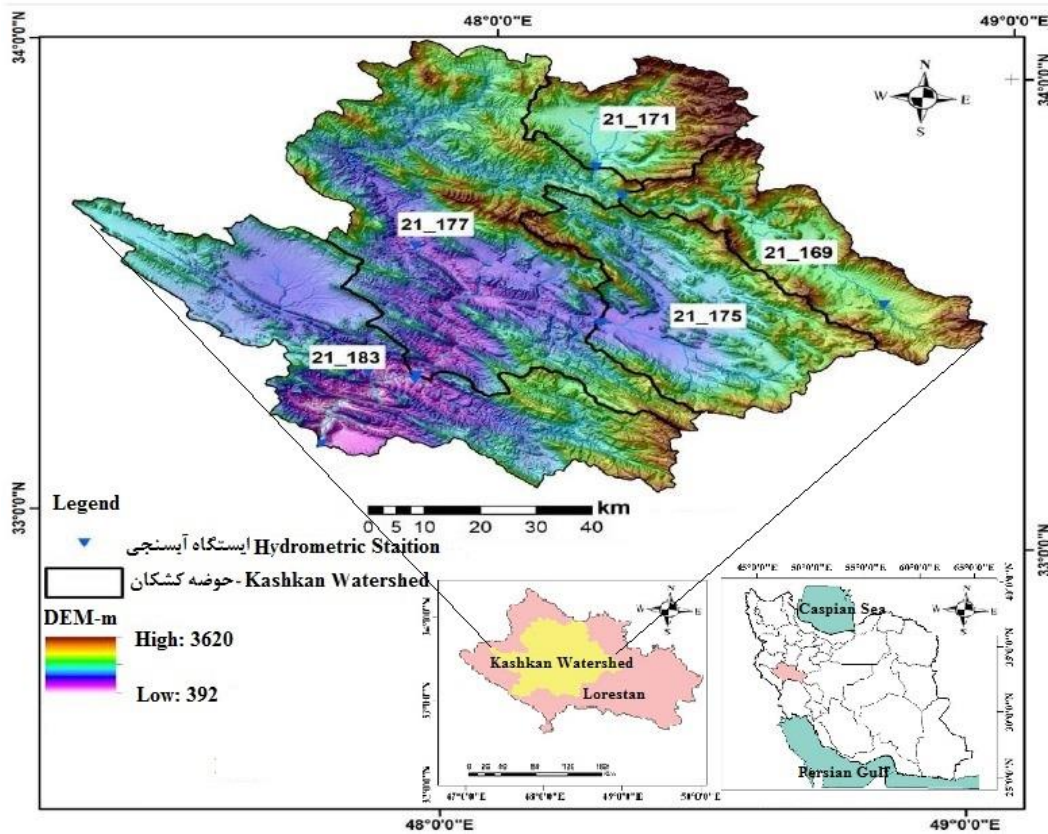
داده‌های موردنیاز برای انجام پژوهش شامل دبی جریان و بارش روزانه می‌باشند. این داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت گردید. دوره آماری داده‌ها برای دبی جریان و بارش از سال ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ می‌باشد. کامل‌ترین داده برای هر ایستگاه در بازه زمانی مذکور موجود بود و به همین علت سری زمانی ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۰ انتخاب شد. در ادامه با استفاده از روش فیلترهای دیجیتال برگشتی، برای هر زیرحوضه، اقدام به جداسازی آب‌پایه هیدروگراف شد. نمودار جریان‌ی روش تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است.

زیرزمینی، به‌منظور کاربرد آن در مطالعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون حوضه کشکان، از آب‌پایه استفاده می‌شود. رودخانه کشکان یکی از سیل‌خیزترین رودخانه‌های حوضه کرخه است (Mehdinasab, 2020). با توجه به تغییرات اقلیمی و همچنین نوساناتی که در جریان این رودخانه دیده می‌شود، ارزیابی تغییرات مقدار آب‌پایه هدر رودخانه کشکان ضروری به نظر می‌رسد و می‌تواند در مدیریت بهینه منابع آب نیز مؤثر باشد؛ بنابراین، هدف اصلی این تحقیق استفاده از فیلترهای دیجیتال برگشتی برای تحلیل هیدروگراف و تعیین شاخص آب‌پایه حوضه کشکان است. پیش‌ازاین در رابطه با جداسازی آب‌پایه در حوضه کرخه مطالعاتی صورت گرفته است که در آن به بررسی حوضه کشکان نیز پرداخته شده و تعداد کمتری از فیلترها موردبررسی قرار گرفته است ولی در تحقیق حاضر ۹ فیلتر دیجیتال برگشتی تحلیل شده است و در نتیجه دقت انجام کار در انتخاب بهترین مدل، بالا می‌رود.

مواد و روش‌ها

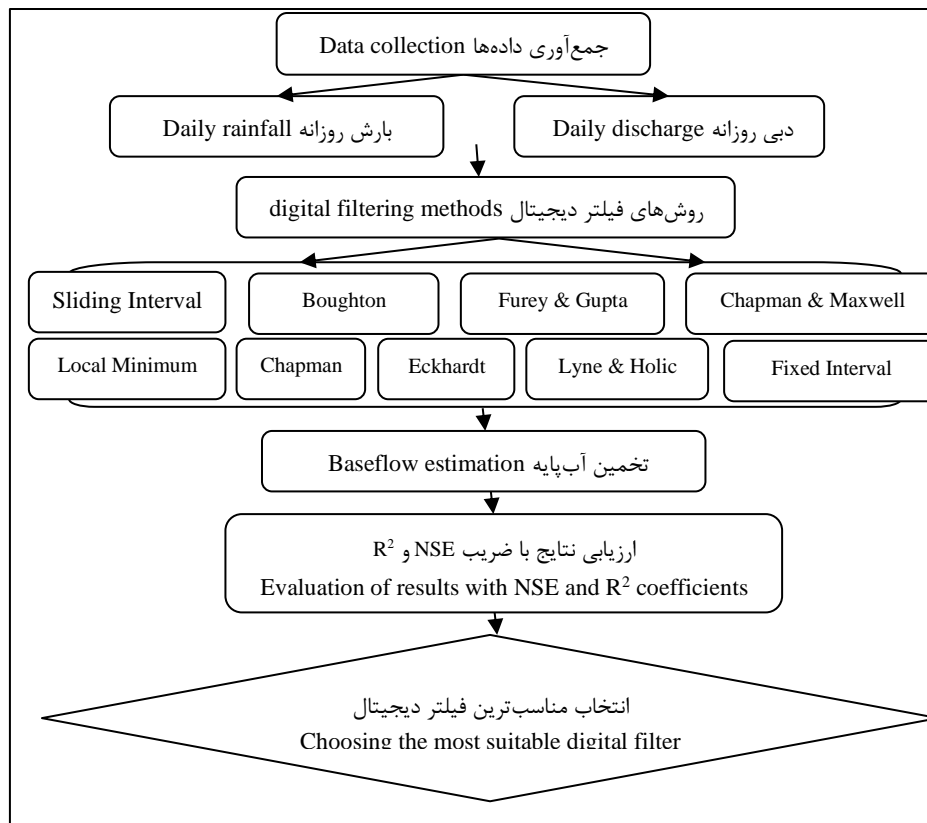
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کشکان با مساحتی برابر با ۲۵۴۶۶ کیلومترمربع در محل خروجی استان لرستان و در ایستگاه آب‌سنجی پلدختر، یکی از سرشاخه‌های اصلی حوزه آبخیز کرخه است. این حوضه در استان لرستان واقع شده است. بیش از ۵۰ درصد از پوشش سطحی این حوضه از سازندهای نفوذپذیر آبرفتی و آهک‌های کارستی تشکیل شده است. سازندهای زمین‌شناسی غالب شامل امیران، کنگلومرای بختیاری، آهک توده‌ای آسماری، کنگلومرای و ماسه‌سنگ کشکان، رادیولاریت، آهک دولومیتی، آهک اوبیتولین‌دار، آهک مارنی، آهک نازک لایه، مارن و کنگلومرای آغاچاری، مارن سازند



شکل ۱- موقعیت حوضه کشکان در استان لرستان و ایران

Figure 1- The location of the Kashkan watershed in Lorestan Province and Iran



شکل ۲- فلوچارت روش تحقیق

Figure 2- Flowchart of research method

جدول ۱- مشخصات زیرحوضه‌های منتخب از منطقه مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of selected sub watershed of the study area

مساحت (km ²)	ارتفاع (m)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	کد	ایستگاه
۱۱۳۰	۲۰۲۷	۴۸° ۱۶'	۳۳° ۴۳'	۲۱-۱۶۹	کاکارضا
۷۸۶	۲۱۰۴	۴۸° ۱۲'	۳۳° ۴۷'	۲۱-۱۷۱	سراب صیدعلی
۱۶۳۰	۱۶۵۰	۴۸° ۱۸'	۳۳° ۳۰'	۲۱-۱۷۵	چم انجیر
۶۸۴۲	۱۷۱۸	۴۷° ۵۴'	۳۳° ۱۹'	۲۱-۱۷۷	افرینه
۹۲۶۷	۱۶۳۲	۴۷° ۴۳'	۳۲° ۰۹'	۲۱-۱۸۳	پلدختر

فیلترهای دیجیتالی برگشتی

یکی از محبوب‌ترین روش‌های جداسازی هیدروگراف، فیلترهای دیجیتالی برگشتی است. اصطلاح «دیجیتالی برگشتی» به سیستم‌هایی اشاره دارد که در آن‌ها داده‌های دیجیتالی به صورت گسسته و با فاصله‌های زمانی مشخص جمع‌آوری و برای تولید خروجی، از اطلاعات زمان‌های قبلی استفاده می‌شود (Eckhardt, 2023). فیلترهای دیجیتالی برگشتی به عنوان ابزاری معمول در تجزیه و تحلیل و پردازش سیگنال در نظر گرفته می‌شود؛ که می‌توان با انتخاب یک آستانه مناسب، سیگنال‌های دارای فرکانس بالا را از سیگنال‌های با فرکانس پایین جدا کرد. همچنین در پردازش سیگنال، عملکرد یک فیلتر فقط به حذف یک قسمت ناخواسته از سیگنال محدود نیست و شامل استخراج قسمت‌های مهم سیگنال نیز است. یک فیلتر دیجیتالی از یک پردازشگر دیجیتالی استفاده می‌نماید و محاسبات عددی را بر روی مقادیر نمونه سیگنال انجام می‌دهد. در فیلتر دیجیتالی، سیگنال به وسیله سری اعداد نمایش داده می‌شود (Dolatabadi et al., 2012).

در این پژوهش ۹ فیلتر دیجیتالی برگشتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همه محاسبات مربوط به تفکیک آب‌پایه با استفاده از ابزار SEPHYDRO انجام شده است. SEPHYDRO یک ابزار مبتنی بر وب با دسترسی باز و قابل تنظیم است که از ۱۱ الگوریتم برای جداسازی و تجزیه و تحلیل هیدروگراف‌های جریان استفاده می‌کند. SEPHYDRO از طریق یک تلاش مشترک

تحقیقاتی بین محیط زیست و تغییرات اقلیمی کانادا، کشاورزی و کشاورزی و غذای کانادا، موسسه رودخانه‌های کانادا (CRI) و دانشگاه نیوبرانزویک (فردریکتون، نیوبرانزویک، کانادا) توسعه یافته است (Danielescu et al., 2018). در ادامه به شرح الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می‌شود.

روش Lyne و Hollick

روش Lyne و Hollick برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ ارائه شد. روش مذکور به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل پاسخ‌های جریان وابسته به زمان و پاسخ‌های آهسته یا پاسخ‌های با تأخیر به بارش طراحی شده است. این روش به ویژه برای شرایطی که جریان‌ها به طور فوری و سریع به بارش واکنش نمی‌دهند، مناسب است و می‌تواند الگوهای پیچیده‌تری از پاسخ‌های جوی را تحلیل کند. معادله فیلتر آب‌پایه از کل جریان به صورت معادله (۱) ارائه شده است.

$$q_t = \alpha \times q_{t-1} + \frac{(1 + \alpha)}{2} \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

در این معادله، q رواناب سطحی یا سریع [m³/s]، Q جریان رودخانه [m³/s]، t برابر است با زمانی (مثلاً روز) که رواناب سطحی برای آن محاسبه می‌شود و α ثابت منحنی خشکیدگی حوزه [مقادیر بین ۰ و ۱] می‌باشد (Lyne & Hollick, 1979).

روش Chapman

روش Chapman شکل توسعه‌یافته الگوریتم Lyne و Hollick می‌باشد.

$$\begin{aligned} b_t &= \frac{(3 \times \alpha - 1)}{(3 - \alpha)} \times b_{t-1} \\ &+ \frac{1 - \alpha}{(3 - \alpha)} \times (Q_t + Q_{t-1}) b_t \\ &= \frac{(3 \times \alpha - 1)}{(3 - \alpha)} \times b_{t-1} \\ &+ \frac{1 - \alpha}{(3 - \alpha)} \times (Q_t + Q_{t-1}) \end{aligned} \quad (۲)$$

در این معادله، b آب‌پایه [m^3/s], Q جریان رودخانه [m^3/s], t برابر است با زمانی (مثلاً روز) که آب‌پایه برای آن محاسبه می‌شود و α ثابت فیلتر هیدرولوژیکی [مقادیر بین ۰ و ۱] می‌باشد (Chapman, 1991).

روش Eckhardt

در سال ۲۰۰۴، Eckhardt یک الگوریتم دوپارامتری جدید برای جداسازی هیدروگراف ارائه کرد که از فیلترهای یک پارامتری قبلی الهام گرفته شده بود.

$$BF_t = \frac{\alpha BF_{t-1} + (1 - BFI_{max}) + (1 - \alpha) BFI_{max} Q_t}{1 - BFI_{max}} \quad (۳)$$

که در آن BF آب‌پایه [m^3/s], Q جریان رودخانه [m^3/s], t برابر است با زمانی (مثلاً روز) که جریان برای آن محاسبه می‌شود. α ثابت فیلتر آب زیرزمینی [مقادیر بین ۰ و ۱]، BFI_{max} نسبت بلندمدت آب‌پایه به جریان کل [مقادیر بین ۰ و ۱] (Eckhardt, 2005).

روش HYSEP

در سال ۱۹۷۹ توسط پتیجان و هنینگ توسعه یافت. در این روش به منظور تعیین هیدروگراف آب‌پایه، خطوط اتصال بین نقاط پایین هیدروگراف جریان رودخانه، به طور سیستماتیک ترسیم می‌شوند. نقاط پایین هیدروگراف جریان رودخانه با استفاده از یک پنجره ثابت با عرض مشخص (برابر با تعداد مجموعه‌ای از قرائت جریان رودخانه در مجموعه داده منبع) تعیین می‌شود. همه مقادیر آب‌پایه در یک بازه یا پنجره معین روی حداقل مقدار جریان در آن بازه مربوطه تنظیم می‌شوند. عرض پنجره نزدیک‌ترین عدد صحیح بین ۳

و ۱۱ می‌باشد که برابر با $2N$ است، لازم به ذکر است که N به صورت تجربی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$N = A^{0.2} \quad (۴)$$

که در آن N تعداد روزهایی که پس از آن رواناب متوقف می‌شود؛ A منطقه زهکشی [km^2] است (Pettyjohn & Henning, 1979).

این روش شامل سه روش Sliding Fixed Interval و Interval Local Minimum است که در این پژوهش از هر سه روش استفاده شده است.

روش Boughton

والتر بوتون در سال ۱۹۹۳، روش Boughton را همراه با مدل گسترده بارش-رواناب AWBM توسعه داد. در این روش از سطوح آب زیرزمینی برای جداسازی هیدروگراف استفاده می‌گردد و اساساً به‌عنوان یک فیلتر یک‌عبوره عمل می‌کند. در واقع این نوع فیلترها به طوری عمل می‌کنند که اطلاعات را در یک عبور از داده‌ها، بدون نیاز به بازنگری یا مرور مجدد در مراحل مختلف پردازش می‌کنند.

$$\begin{aligned} b_t &= \frac{k}{1+C} \times b_{t-1} + \frac{C}{1+C} \times Q_t b_t \\ &= \frac{k}{1+C} \times b_{t-1} \\ &+ \frac{C}{1+C} \times Q_t \end{aligned} \quad (۵)$$

که در آن b_t برابر با آب‌پایه [m^3/s], Q جریان رودخانه [m^3/s] می‌باشد، نیز t برابر است با زمانی (مثلاً روز) که آب‌پایه برای آن محاسبه می‌شود. همچنین k ثابت رکود آب زیرزمینی [مقادیر بین ۰ و ۱] و C ثابت شکل [مقادیر مثبت] است (Boughton, 1993).

روش Chapman & Maxwell

روش چاپمن و ماکسول، در سال ۱۹۹۶ ارائه شد و می‌تواند به‌عنوان یک نسخه ساده‌شده از فیلتر بوتون در سال ۱۹۹۳ در نظر گرفته شود.

$$\begin{aligned} b_t &= \frac{1}{2-k} \times b_{t-1} + \frac{1-k}{2-k} \times Q_t b_t \\ &= \frac{1}{2-k} \times b_{t-1} \\ &+ \frac{1-k}{2-k} \times Q_t \end{aligned} \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} \text{Nash - Sutcliffe} \\ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \text{Nash} \\ - \text{Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$R^2 - 2$: در ضریب تعیین فرض بر این است که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می‌کند. مقدار هر چه به یک نزدیک‌تر باشد دقت برآورد بیشتر است (Mohammadi & Kashefipour, 2011).

$$\begin{aligned} R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q})^2} R^2 \\ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q})^2} \end{aligned} \quad (9)$$

که در روابط مذکور n : تعداد کل مقادیر محاسبه‌شده و مشاهداتی برای هر حوزه آبخیز. Q_o و Q_s : دبی مشاهداتی و محاسبه شده (mm). \bar{Q} : میانگین داده‌های مشاهداتی (mm). اندازه‌گیری مقادیر آب‌پایه و تغذیه آب زیرزمینی در طبیعت به سهولت قابل انجام نیست. نسبت آب‌پایه به کل جریان رودخانه به‌عنوان شاخصی برای نشان دادن آب‌پایه تعریف شده است. لذا بهترین راه استفاده از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهادشده توسط سایر پژوهشگران می‌باشد. یکی از راه‌هایی که به‌منظور انتخاب روش مناسب می‌توان از آن استفاده نمود، انتخاب روش BFI به‌عنوان مبنای مقایسه‌ها می‌باشد (Zarei et al., 2020). در روش BFI با ورود داده‌های دبی روزانه ایستگاه مورد مطالعه به برنامه BFI، مقدار آب‌پایه روزانه محاسبه شد. در این تحقیق نتایج حاصل از روش BFI به‌عنوان مقادیر مشاهداتی و نتایج سایر روش‌ها به‌عنوان مقادیر برآوردی در نظر گرفته شد.

نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل داده‌های آب‌پایه در زیرحوضه‌های مختلف نشان می‌دهد که روش‌های مختلف تحلیل آب‌پایه تأثیر قابل توجهی بر تخمین دقت این مقادیر دارند. با توجه به شکل (۳)، در این پژوهش، در اکثر زیرحوضه‌ها دو روش Lyne و Holick

که در آن b برابر با آب‌پایه $[m^3/s]$ ، Q جریان رودخانه $[m^3/s]$ ، t زمانی (به‌عنوان مثال روز) که آب‌پایه برای آن محاسبه می‌شود و k ثابت رکود [مقادیر بین ۰ و ۱] می‌باشد (Chapman & Maxwell, 1996).

روش Furey and Gupta

روش Furey و Gupta در سال ۲۰۰۱ ارائه شد. این روش بر اساس یک تئوری فیزیکی-آماري جریان‌های کم جریان که توسط Furey و Gupta ایجاد شده است، شکل گرفت.

$$\begin{aligned} b_t = (1 - \gamma) \times b_{t-1} \\ + \gamma \times \frac{C_3}{C_1} \times (Q_{t-d-1} \\ - b_{t-d-1}) b_t \\ = (1 - \gamma) \times b_{t-1} \\ + \gamma \times \frac{C_3}{C_1} \times (Q_{t-d-1} \\ - b_{t-d-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن b_t برابر است آب‌پایه $[m^3/s]$ ؛ Q جریان رودخانه $[m^3/s]$ و t نیز زمانی (مثلاً روز) که آب‌پایه برای آن محاسبه می‌شود. همچنین γ برابر با ثابت رکود [مقادیر بین ۰ و ۱]، c_1 نسبت جریان زمینی به بارندگی، c_3 نسبت تغذیه آب زیرزمینی به بارندگی و d تأخیر زمانی بین بارندگی و تغذیه آب زیرزمینی [d] می‌باشد (Gupta & Furey, 2001).

معیارهای ارزیابی الگوریتم‌ها

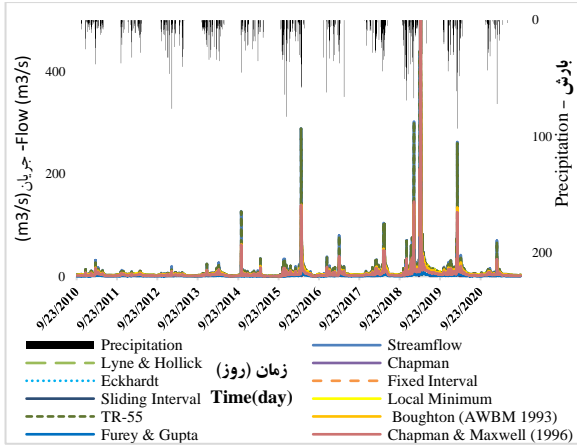
بعد از اجرای مدل‌ها، جهت ارزیابی کمی و مقایسه عملکرد و همچنین تجزیه و تحلیل آن‌ها از معیارهای زیر استفاده شد.

۱- معیار نش-ساتکلیف (NSE^1): هرچه مقدار ضریب NSE نزدیک به ۱ باشد، مدل دارای عملکرد بهتری است. به عبارتی اگر میزان NSE از ۰/۷۵ بزرگ‌تر باشد، نتایج ارزیابی خوب توصیف می‌شود، ولی در صورتی که مقدار NSE بین ۰/۳۶-۰/۷۵ باشد، نتایج حاصل از مدل رضایت‌بخش می‌باشد (Motovilov & et al., 1999). این معیار را می‌توان به صورت رابطه (۸) نوشت.

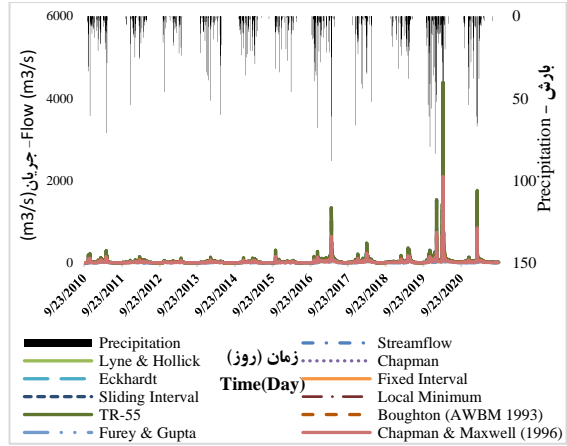
¹ Nash-Sutcliffe efficiency

Gupta کمترین مقادیر متوسط سالانه آب‌پایه را نشان داده است. این ضعف در ارزیابی آب‌پایه می‌تواند ناشی از ساختار خاص این روش باشد که ممکن است نتواند به صورت بهینه تغییرات جریان آب را در پاسخ به متغیرهای محیطی و هیدرولوژیکی دنبال کند.

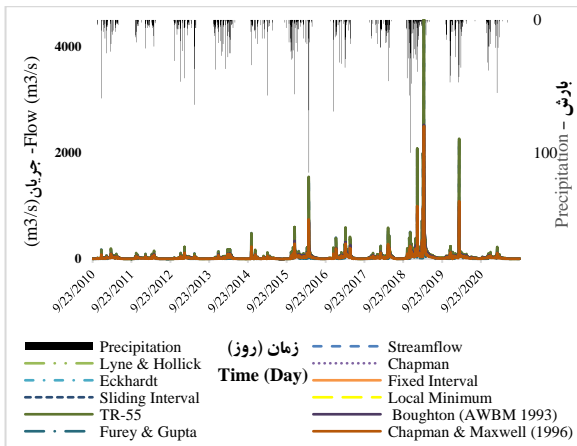
و Fixed Interval در اکثر زیرحوضه‌ها، بالاترین مقادیر متوسط سالانه آب‌پایه را ارائه داده‌اند. این نشان‌دهنده توانایی این روش‌ها در شبیه‌سازی صحیح رفتار هیدرولوژیکی در شرایط مختلف اقلیمی و جغرافیایی است. همچنین در تمام زیرحوضه‌ها، روش Furey و



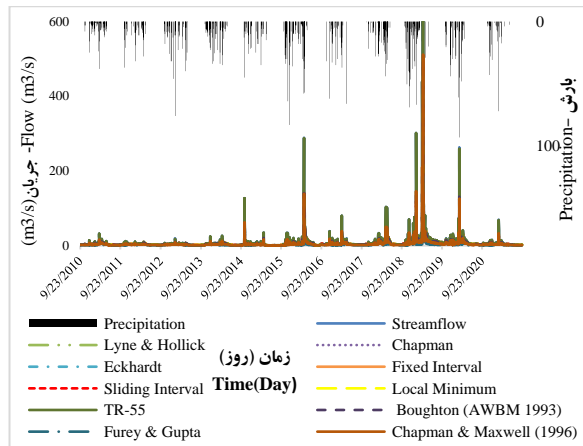
زیر حوضه چم انجیر



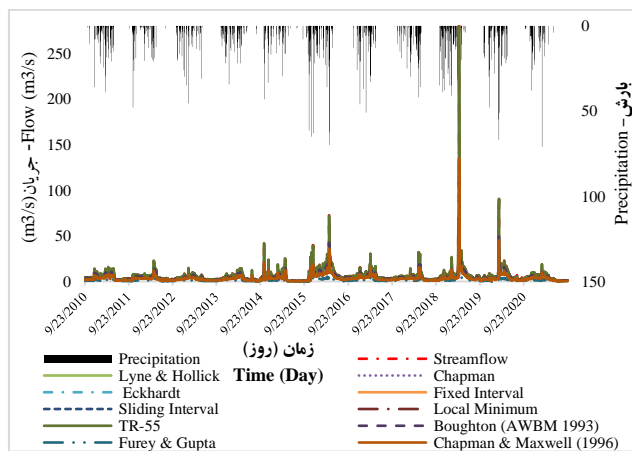
زیر حوضه آفرینه



زیر حوضه پلدختر



زیر حوضه کاکارضا



زیر حوضه سراب صیدعلی

شکل ۳- جداسازی آب‌پایه با استفاده از تمامی روش‌های فیلتر برگشتی در زیرحوضه‌های موردنظر

Figure 3- Separation of base flow using all return filter methods in the desired sub-watersheds

توجه عواملی نظیر شیب، نوع خاک، پوشش زمین و تغییرات اقلیمی بر روی رسوب و جریان‌های سطحی است. شناسایی این عوامل و درک نحوه تأثیرگذاری آنها بر روی منابع آب، می‌تواند در مدیریت بهینه و پایدار منابع آب راهگشا باشد.

در جدول (۲) پارامترهای مورداستفاده در روش‌های مختلف و نیز نسبت آب‌پایه به کل جریان رودخانه، ارائه شده است. با توجه به جدول (۲) دامنه تغییرات میانگین آب‌پایه در زیرحوضه‌های مختلف، از ۱۷ تا ۹۹ درصد متغیر است. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر قابل

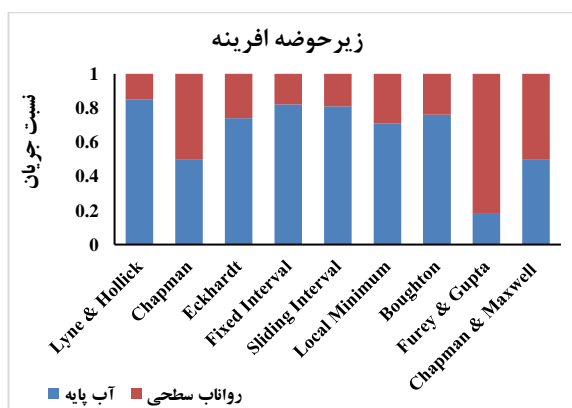
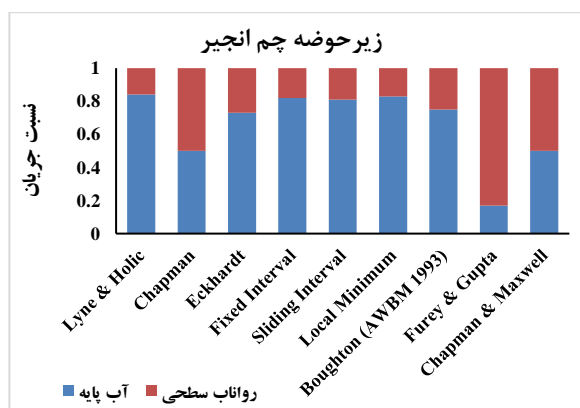
جدول ۲- پارامترهای مورداستفاده و مقادیر BFI حاصل از تمامی روش‌ها در زیرحوضه‌های موردنظر

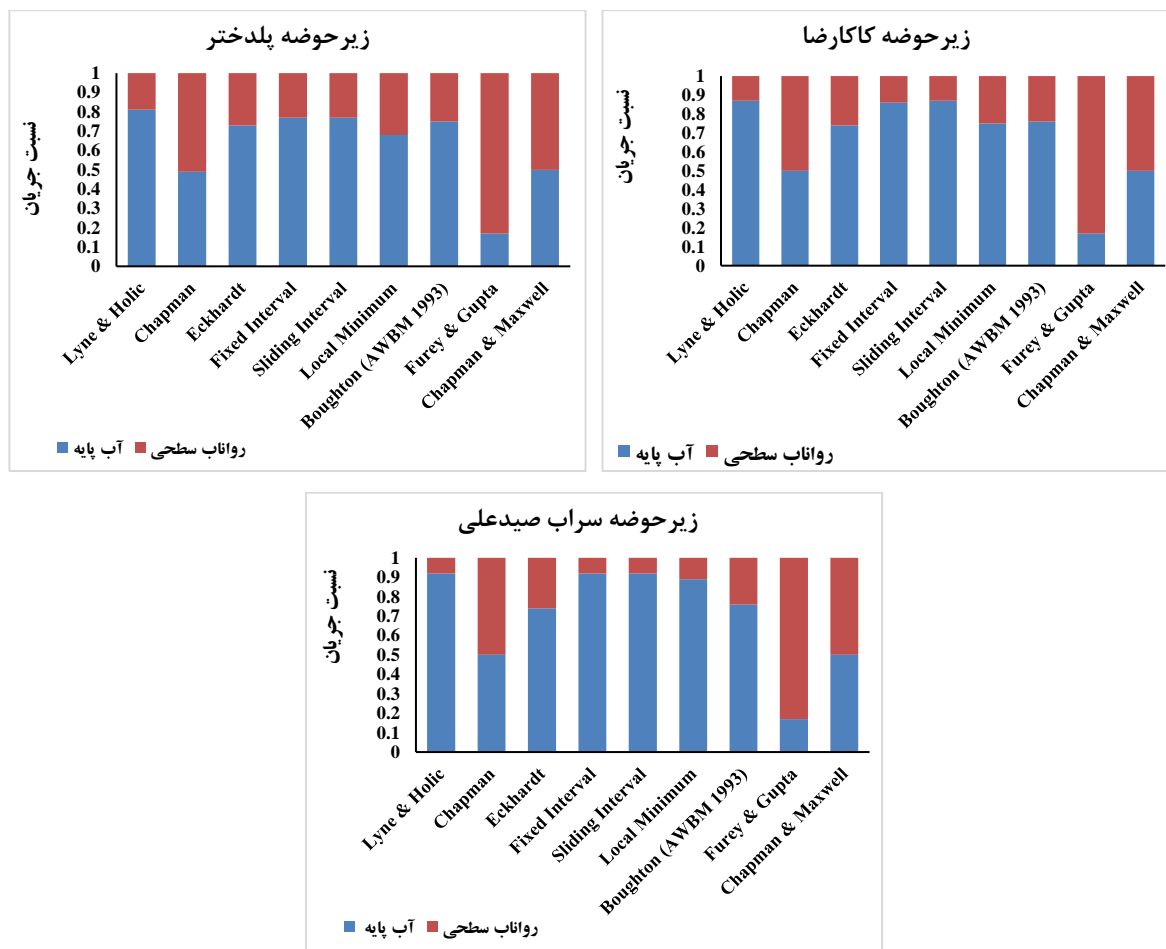
Table 1- Parameters used and BFI values obtained from all methods in the desired sub-watersheds

سرآب صیدعلی		پلدختر		کاکارضا		چم انجیر		افرینه		پارامترها	روش
BFI	BF (m ³ /s)	BFI	BF (m ³ /s)	BFI	BF (m ³ /s)	BFI	BF (m ³ /s)	BFI	BF (m ³ /s)		
0.89	5.73	0.68	30.26	0.75	8.40	0.73	6.24	0.70	25.95	Interval Width = 3	Local Minimum
0.92	5.94	0.77	34.40	0.87	9.72	0.81	6.98	0.81	29.7	Interval Width = 3	Sliding Interval
0.92	5.95	0.77	34.30	0.86	9.60	0.82	7.04	0.82	30.11	Interval Width = 3	Fixed Interval
0.74	4.81	0.73	32.52	0.74	8.32	0.73	6.29	0.83	27.39	$\alpha = 0.830$, BFmax = 0.750	Eckhardt
0.50	3.21	0.49	22.16	0.50	7.57	0.50	4.26	0.50	18.30	$\alpha = 0.500$	Chapman
0.50	3.22	0.50	22.19	0.50	5.58	0.50	4.27	0.50	18.32	k = 0.1	Chapman & Maxwell
0.92	5.97	0.81	36.10	0.87	9.70	0.84	7.22	0.85	30.96	$\alpha = 0.750$	Lyne & Holick
0.17	1.13	0.17	7.76	0.17	1.95	0.17	1.50	0.17	6.41	C1 = 3.5, C3 = 3.5, g = 0.05, d = 0 days	Furey & Gupta
0.76	4.94	0.75	33.53	0.76	8.55	0.75	6.47	0.75	27.82	k = 0.82, C = 0.6	Boughton

آب‌پایه داشته باشند. لازم به ذکر است که در بین الگوریتم‌های موردبررسی در بیشتر زیرحوضه‌ها (افرینه، چم انجیر، کاکارضا و پلدختر) روش‌های Chapman، Eckhardt و Maxwell و همچنین Furey و Gupta کمترین میزان آب‌پایه و بیشترین میزان جریان سطحی را تعیین کردند. می‌توان علت این امر را در پیچیده‌تر بودن این روش‌ها و پارامترهای بیشتری که در آن‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد دانست.

بر اساس شکل (۴) در بیشتر زیرحوضه‌ها روش‌های HYSEP بیشترین میزان آب‌پایه را نشان می‌دهد. به‌طور کلی علت بیشتر بودن آب‌پایه نسبت به رواناب سطحی را می‌توان در خصوصیات حوضه جستجو کرد. عواملی همچون زمین‌شناسی منطقه، تأثیرات انسانی، پوشش گیاهی و خاک در میزان جریان حوضه دخیل هستند. روش Local Minimum به ویژگی‌های خاص حوضه، مانند نوع خاک، پوشش گیاهی و بارش‌های قبلی توجه می‌کند. این عوامل می‌توانند تأثیر زیادی بر



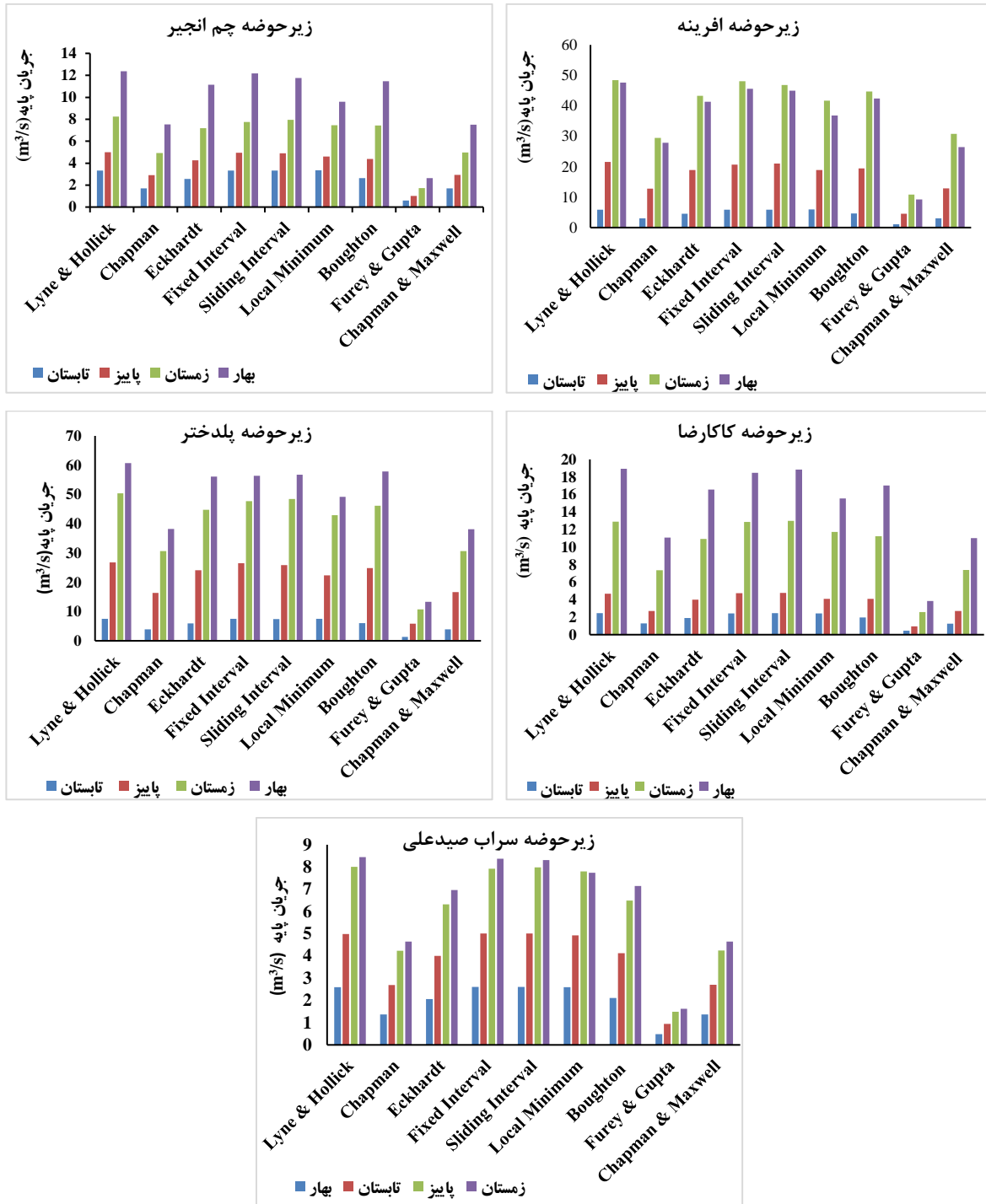


شکل ۴- مقایسه‌ی آب‌پایه حاصل از تمام روش‌ها در زیرحوضه‌های موردنظر

Figure 4- Comparison of base flow results from all methods in the desired sub-watersheds

اختلاف زیادی وجود دارد. کمترین مقدار آن در تمامی روش‌ها مربوط به فصل پاییز و بیشترین مقدار آن نیز به فصل بهار اختصاص دارد. در زیرحوضه پلدختر در تمامی روش‌ها مقدار آب‌پایه تخمینی در فصل بهار بیشتر از فصل زمستان است. در اینجا نیز فصل تابستان (خشک) کمترین مقدار آب‌پایه مربوط به روش Furey و Gupta می‌باشد. در زیرحوضه سراب صیدعلی، در فصل بهار و زمستان مقدار آب‌پایه تخمینی در تمامی روش‌ها با اختلاف ناچیزی همراه است و مقادیر آن‌ها بسیار نزدیک به هم است. علاوه بر این مقدار آب‌پایه برای ۳ روش Sliding Interval، Lyne و Holick و Fixed Interval مشابه تخمین زده شده است.

با توجه به شکل (۵) در زیرحوضه افرینه در تمامی روش‌ها برای فصل مرطوب، بیشترین آب‌پایه تخمین زده‌شده مربوط به فصل زمستان می‌باشد. در کلیه روش‌ها مقدار آب‌پایه در فصل زمستان و بهار نسبت به فصل پاییز بیشتر است. برای فصل تابستان (خشک) نیز آب‌پایه برقرار است. در زیرحوضه چمن‌انجیر بیشترین مقدار آب‌پایه برای فصل مرطوب، در تمامی روش‌ها مربوط به فصل بهار است. به طوری که اختلاف زیادی بین فصل بهار و فصل پاییز مشاهده می‌شود. برای فصل تابستان (خشک) در روش‌های Sliding Interval، Fixed Interval و Lyne و Holick، Local Minimum مقدار آب‌پایه بیشترین مقدار را نشان می‌دهد و اختلاف کمی بین مقدار تخمینی آن‌ها وجود دارد. در زیرحوضه کاکارضا بین مقدار آب‌پایه در هر ۳ فصل مرطوب



شکل ۵- مقایسه آب‌پایه فصول مرطوب و خشک در زیرحوضه‌های موردنظر

Figure 5- Comparison of water base in wet and dry seasons in the desired sub-watersheds

به چم انجیر و سراب صیدعلی است. علت بالا بودن جریان در پلدختر و افرینه این است که این است که در پایین دست حوضه کشکان قرار دارند و آب ایستگاه‌های دیگر به به سوی آنها جاری می‌شود.

بحث

در جدول (۳) BFI مربوط به هر زیرحوضه ارائه شده است. با توجه به جدول (۳) بیشترین مقدار جریان مربوط به پلدختر و افرینه و کمترین مقدار آن مربوط

جدول ۳- میانگین شاخص آب‌پایه مشاهداتی

Table 3- Average observed baseflow index

سرآب صیدعلی		پلدختر		کاکارضا		چم انجیر		افرینه		حوضه
جریان کل	آب‌پایه	جریان کل	آب‌پایه	جریان کل	آب‌پایه	جریان کل	آب‌پایه	جریان کل	آب‌پایه	
0.767		0.683		0.697		0.698		0.775		شاخص آب‌پایه
35.18	282	997.70	5237	249.97	810	193.19	1060	797.7	4385	حداکثر جریان
0.465	0.465	0	0	0.20	0.20	0.24	0.27	0.461	0.461	حداقل جریان
4.94	6.45	30.33	44.38	7.77	11.15	5.96	8.54	27.67	36.64	میانگین جریان

بنابراین می‌توان این الگوریتم را به‌عنوان یک روش مناسب برای برآورد مقدار آب‌پایه در زیرحوضه‌های موردبررسی در حوضه کشکان دانست. این الگوریتم به دلیل رویکردهای خاص خود در تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی، می‌تواند آب‌پایه را به‌طور تقریبی نزدیک به واقعیت تخمین بزند. در واقع این روش بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های جریان و بارش عمل می‌کند و از یک الگوریتم خاص برای تفکیک آب‌پایه از رواناب استفاده می‌کند. باتوجه به ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه، این روش می‌تواند نوسانات طبیعی آب‌پایه را بهتر شبیه‌سازی کند.

ارزیابی کارایی مدل در هنگام ارائه نتایج پژوهش بسیار حائز اهمیت است (Schaeffli & Gupta, 2007). در این پژوهش مطابق با پژوهش Zare و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش BFI مقادیر مشاهداتی آب‌پایه تعیین شدند و برای مقایسه با مقادیر حاصل از الگوریتم مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۴)، دقت روش‌های تفکیک جریان در حوضه‌ی مورد مطالعه متفاوت بوده و در مواردی نیز پایین است. بر اساس این جدول، در تمامی زیرحوضه‌های مورد بررسی، الگوریتم Lyne و Holick دارای مقدار ضریب NSE و مقدار R^2 مناسبی است؛

جدول ۴- نتایج مقایسه روش‌های فیلتری تفکیک آب‌پایه با استفاده از معیار NSE و R^2

Table 4- Results of comparing baseflow separation filter methods using NSE and R^2

سرآب صیدعلی		پلدختر		کاکارضا		چم انجیر		افرینه		حوضه
NSE	R^2	NSE	R^2	NSE	R^2	NSE	R^2	NSE	R^2	روش
0.86	0.91	0.75	0.77	0.80	0.80	0.78	0.80	0.74	0.78	Local Minimum
0.82	0.93	0.13	0.74	0.32	0.79	0.66	0.85	0.88	0.83	Sliding Interval
0.80	0.92	0.80	0.84	0.63	0.85	0.39	0.78	0.70	0.83	Fixed Interval
0.80	0.83	0.35	0.80	0.59	0.86	0.33	0.83	0.36	0.73	Eckhardt
0.57	0.78	0.60	0.72	0.77	0.81	0.64	0.76	0.54	0.66	Chapman
0.38	0.59	0.22	0.55	0.65	0.72	0.28	0.60	0.18	0.47	Chapman & Maxwell
0.83	0.95	0.71	0.90	0.64	0.92	0.61	0.91	0.73	0.89	Lyne & Holic
-0.57	0.57	0.28	0.53	0.31	0.71	0.27	0.57	0.32	0.45	Furey & Gupta
0.75	0.81	0.20	0.77	0.50	0.85	0.18	0.81	0.23	0.71	Boughton

موارد برجسته در جدول نشان‌دهنده ضرایب مناسب به‌دست‌آمده، برای روش‌های مورد بررسی در زیرحوضه‌ها هستند. به‌عبارتی هرچه مقدار ضریب NSE و R^2 نزدیک به ۱ باشد (مثلاً بیشتر از ۰/۷۵)، مدل دارای عملکرد بهتری است. مقادیری که در جدول بولد شده‌اند الگوریتم‌هایی هستند که هم مقدار NSE و هم R^2 برای آنها مقدار مناسبی است.

نشان داده شد که شاخص آب‌پایه بیش از ۵۰ درصد از جریان رود را در طول سال تشکیل می‌دهد. در این پژوهش، نتایج ارزیابی ۹ روش رقومی نشان داد که در بیشتر روش‌ها، همبستگی مناسبی بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی وجود دارد و بنابراین روش‌هایی مانند Fixed و Sliding Interval، Holick و Lyne

رودخانه‌ی کشکان از رودخانه‌های پر آب استان لرستان است که در تمام طول سال آب در آن جریان دارد. آب‌پایه در حوزه آبخیز کشکان لرستان بخش زیادی از جریان را تشکیل می‌دهد (Negareh *et al.*, 2012). در اکثریت روش‌های مورد بررسی در این پژوهش نیز

سیلاب شدید روبرو بوده است. در نتیجه نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب برای مقابله با این نوسانات می‌باشد. به منظور مدیریت منابع آب بایستی، ۱- جمع‌آوری و تحلیل داده‌های آب‌وهوا برای پیش‌بینی نوسانات انجام گیرد؛ ۲- ساخت سدها و سیستم‌های آبیاری کارآمد برای مدیریت بهتر منابع آب توسعه داده شوند؛ ۳- جوامع محلی در خصوص استفاده بهینه از آب و حفظ منابع طبیعی آموزش داده شوند؛ و سیاست‌های مؤثر برای حفاظت از منابع آب و مقابله با تغییرات اقلیمی ایجاد و اجرا شوند.

لازم به ذکر است که تخمین‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که آب‌های زیرزمینی سهم قابل توجهی از کل جریان در حوضه کشکان را تشکیل می‌دهند. در این رابطه با ارتباط بین آب‌پایه و تغذیه‌ی آب زیرزمینی می‌توان گفت که در طول جریان رودخانه بخشی از آب‌پایه رودخانه که با بستر رودخانه در تماس است، به دلیل وجود تخلخل در بستر و کناره‌های رودخانه، به تدریج به درون زمین نفوذ می‌کند. همچنین نوسانات سطح آب رودخانه بر میزان تغذیه آبخوان‌ها تأثیرگذار است. در دوره‌های پربابی، میزان تغذیه افزایش یافته و در دوره‌های کم‌آبی، این میزان کاهش می‌یابد. این نکته اهمیت مدیریت منابع آب زیرزمینی را در راستای تأمین آب و حفظ محیط‌زیست نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش و معیارهای ارزیابی، در زیرحوضه‌های موردبررسی، روش‌های Local Minimum، Lyne و Holick، Sliding Interval و Fixed Interval به عنوان روش‌های مناسب برای جداسازی آب‌پایه تعیین شدند؛ بنابراین در حوزه آبخیز کشکان می‌توان با اطمینان بیشتری نسبت به صحت نتایج، از این روش‌ها برای جداسازی آب‌پایه استفاده نمود. آب‌پایه به پایداری منابع آب در دوره‌های خشکسالی کمک می‌کنند و از افت سطح آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کنند. اطلاع از آب‌پایه در

Interval پس از ارزیابی نتایج از اعتماد کافی برای جداسازی آب‌پایه برخوردار هستند. Azarinvand و همکاران (۲۰۲۲)، به ارزیابی روش‌های جداسازی آب‌پایه در حوزه آبخیز گل‌گل، ایلام پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها به ترتیب روش‌های Lyne و Holick و Eckhart، به عنوان مناسب‌ترین روش برای تعیین آب‌پایه انتخاب شدند. این نتیجه با پژوهش حاضر نیز مطابقت دارد، در پژوهش حاضر روش Lyne و Holick در هر ۵ زیرحوضه، به علت دارا بودن ضرایب ارزیابی مناسب به عنوان یک روش مناسب برای جداسازی آب‌پایه تعیین شد. در پژوهش دیگری که Latuamury و همکاران (۲۰۲۲) الگوریتم‌های یک پارامتره، دو پارامتره، Lyne و Holick، Chapman و Eckhart برای جداسازی آب‌پایه در حوزه آبخیز Wae Batu Gajah استفاده کردند. برخلاف این پژوهش فیلتر Eckhart به عنوان مناسب‌ترین روش برای برآورد آب‌پایه انتخاب شد.

بر اساس نتایج پژوهش Gharechaei و همکاران (۲۰۱۵)، به طور کلی در طی ۴۰ سال گذشته رواناب حوزه آبخیز کشکان به طور معنی‌داری کاهش یافته است. نقطه شروع تغییر در رواناب را می‌توان بازتاب‌کننده شروع اثرات توامان اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب دانست (Gharechaei et al., 2015). با توجه به تغییرات شدید اقلیمی و خشکسالی‌های دوره‌ای ایران و منطقه موردپژوهش، ارزش‌دهی به آب‌پایه به عنوان آب موردنیاز فعالیت‌های محیط‌زیستی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بایستی مدنظر تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد. چراکه آب‌پایه نقش حیاتی در حفظ اکوسیستم‌های آبی و خشکی دارند. علاوه بر این بر اساس داده‌های دوره‌ی آماری موردبررسی، تا اواسط طول دوره‌ی آماری حوضه کشکان با پدیده‌ی خشک‌سالی و پایین بودن میزان دبی جریان در رودخانه مواجه است و این نشان‌دهنده کمبود بارش است؛ ولی پس از آن میزان بارش روند افزایشی و کاهشی یافته است و دچار نوساناتی شده است، به طوری که یک سال با خشک‌سالی و یک سال با

مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش به تفکیک آب‌پایه در حوزه‌ی آبخیز کشکان با استفاده از روش‌های دیجیتال برگشتی پرداخته شد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از روش‌های دیگری همچون روش‌های شیمیایی و ردیاب نیز برای تفکیک آب‌پایه در حوزه‌ی آبخیز کشکان استفاده شود و نتایج و دقت این روش‌ها با روش‌های دیجیتال برگشتی مورد مقایسه قرار گیرد.

References

- Aboelnour, M. A., Engel, B. A., Frisbee, M. D., Gitau, M. W., & Flanagan, D. C. (2021). Impacts of watershed physical properties and land use on baseflow at regional scales. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 35, 100810. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100810>
- Azarinvand, F., Tavakoli, M., & Karimi, H. (2022). Efficiency assessment of baseflow separation methods in Gol-Gol Catchment, Ilam. *Environment and Water Engineering*. 8(2), 379-394. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.297503.1602> (In Persian)
- Biagi, K. M., Ross, C. A., Oswald, C. J., Sorichetti, R. J., Thomas, J. L., & Wellen, C. C. (2022). Novel predictors related to hysteresis and baseflow improve predictions of watershed nutrient loads: an example from ontario's lower great lakes basin. *Sci. Total Environ.* 826, 154023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154023>
- Boughton, W. C. (1993). *A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments*. Institute of Engineers Australia National Conference. Publ. 93/14, pp. 317-324.
- Chapman, T. (1991) - Comment on evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, by RJ Nathan and TA McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), pp. 1783-1784. <https://doi.org/10.1029/91WR01007>
- Chapman, T. G., & Maxwell, A. I. (1996) - Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments, in *Hydrol. and Water Resour. Symp., Institution of Engineers Australia, Hobart*. pp. 539-545.
- Chen, H., Huang, S., Xu, Y. P., Teegavarapu, R. S., Guo, Y., Nie, H., & Xie, H. (2024). Using baseflow ensembles for hydrologic hysteresis characterization in humid basins of Southeastern China. *Water Resources Research*, 60(4), e2023WR036195. <https://doi.org/10.1029/2023wr036195>
- Cheng, S.Y., Tong, X., & Illman, W.A. (2022). Evaluation of baseflow separation methods with real and synthetic streamflow data from a watershed. *J. Hydrol.* 613, 128279. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128279>
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55, United States Department of Agriculture.
- Danielescu, S., MacQuarrie, K. T. B., & Popa, A. (2018). SEPHYDRO: A customizable online tool for hydrograph separation. *Groundwater*, 56, 589-593. <https://doi.org/10.1111/gwat.12792>
- Dolatabadi, N., Faridhosseini, A., Davari, K., & Mosaedi, A. (2012). *Baseflow estimation using recursive digital filter methods and BFI_0.3 software (Case Study of Part of Maharlu-Bakhtegan Basin)*, The Third National Conference on Comprehensive Water Resources Management.
- Duan, H., Li, L., Kong, Z., & Ye, X. (2024). Combining the digital filtering method with the SWAT model to simulate spatiotemporal variations of baseflow in a mountainous river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 101972. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101972>
- Eckhardt, K. (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process*, 19, 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- Eckhardt, K. (2023). How physically based is hydrograph separation by recursive digital filtering? *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(2), 495-499. <https://doi.org/10.5194/hess-27-495-2023>
- Furey, P. R., & Gupta, V. K. (2001). A physically based filter for separating base

- flow from streamflow time series. *Water Resource Research*, 37 (11), 2709–2722. <https://doi.org/10.1029/2001WR00024>
- Gharechaei, H., Moghaddamnia, A., Malekian, A., & Ahmadi, A. (2015). Response of streamflow to climate variability and human activity in Kashkan river basin. *Watershed Engineering and Management*, 7(3), 255-264. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.101632>
- He, S.J., Yu, K., Tang, Z.X., Yan, Y., & Zhang, F. F. (2022). Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two-parameter recursive digital filter. *Hydrol. Process*, 36 (3), e14512. <https://doi.org/10.1002/hyp.14512>
- Kazemi, R., Porhemmat, J., & Ghermezcheshmeh, B. (2022). Investigation of the hydrological response to meteorological drought in kashkan sub-catchments. *Environment and Water Engineering*, 8(3), 682-697. <https://doi.org/10.22034/jewe.2022.317026.1683>
- Kazemi, R., & Porhemmat, J. (2020). Calibration of recursive digital filters to separate the base flow, case study: Karkheh Basin. *Watershed Engineering and Management*, 12(1), 30-43. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.122117.1490> (In Persian)
- Kaviani, M., Hematifard, H & kardan moghaddam, H. (2022). The impact of conflict of interests of activists on the emergence of hydro-political challenges (case study: influencers and stakeholders of Gaushmar dam in Lorestan province). *Political Spatial Plannin*, 4 (4), 303-320. (In Persian)
- Khourshid Doust, A. M., Rezaei Banafsheh, M., Mir Hashemi, H., & Kakolvand, Y. (2016). studying the trend of changes in precipitation - discharge the karkhe rive sub-basin using non-parametric methods, case study: kashkan basin. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 177-188. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.11804>
- Latuamury, B., Osok, R. M., Puturu, F., & Imlabla, W. N. (2022). Baseflow separation using graphic method of recursive digital filter on wae batu gajah watershed, ambon city, maluku. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 989, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/989/1/012028>
- Lott, D. A., & Stewart, M. T. (2013). A power function method for estimating base flow. *Ground Water*, 51 (3), 442–451. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00980>
- Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. hydrology and water resources symposium. *Institution of Engineers, Australia, Perth*, pp. 89–92.
- Mehdinasab, M. (2020). Survey of 1 april flood in kashkan catchment in lorestan province and presenting solutions. *Environment and Interdisciplinary Development*, 67, 17-30. <https://doi.org/10.22034/envj.2020.181143>
- 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), pp.95-113. <https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.10737.2514> (In Persian)
- Mohammadi, S., & Kashefipour, M. (2011). Numerical modeling of flow using an improved dynamic roughness coefficient (Case study: Karun River). *Irrigation and Water Engineering*, 2(1), 99-110. (In Persian)
- Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K., & Rohde, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 98-99, 257-277. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1)
- Murray, J., Ayers, J., & Brookfield, A. (2023). The impact of climate change on monthly baseflow trends across Canada. *Journal of Hydrology*, 618, 129254. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129254>
- Nathan, R. J & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour. Res.* 26 (7), 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Negararesh, H., tavousi, T., & mehdi nasab, M. (2012). Modeling production runoff in the of basin river kashkan by statistical models. *Journal of Urban Ecology Researches*, 3(6), 81-92.

- <https://doi.org/20.1001.1.25383930.1391.3.6.6.4> (In Persian)
- Nejadhashemi, A. P., Shirmohammadi, A., Sheridan, J. M., Montas, H.J., & Mankin, K. R. (2009). Case study: evaluation of streamflow partitioning methods. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 135 (6), 791–801. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000093)
- Pettyjohn W.A., & Henning R. (1979). *Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio*: Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report Number, 552, p. 323.
- Riazi, M., Khosravi, Kh., Riahi Samani, M., Han, Sh., Eslamian, S., (2024). Assessing groundwater drought vulnerability through baseflow separation and index-based analysis under climate change projections. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101179. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101179>
- Schaepli, B., & Gupta, H. V. (2007). Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, 21(15), 2075-2080. <https://doi.org/10.1002/hyp.6825>
- Shao, G., Zhang, D., Guan, Y., Sadat, M. A., & Huang, F. (2021). Application of different separation methods to investigate the baseflow characteristics of a semi-arid sandy area, Northwestern China. *Water*, 12(2), 2, 434. <https://doi.org/10.3390/w12020434>
- Solgi A, Zarei H, & Marofi S. (2024). Using different methods baseflow separation of karst springs based on isotope content (case study: Kahman Karst Spring). *jgs*; 24(72), 15 <https://doi.org/10.52547/jgs.24.72.269> (In Persian)
- Stadnyk, T. A., Gibson, J. J., & Longstaffe, F.J. (2015). Basin-scale assessment of operational base flow separation methods. *J. Hydrol. Eng.*, 20 (5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001089](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001089)
- Stewart, M., Cimino, J., & Ross, M. (2007). Calibration of base flow separation methods with streamflow conductivity. *Ground Water*, 45 (1), 17–27. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00263.x>
- Szilagyi, J. (2004). Heuristic continuous base flow separation. *J. Hydrol. Eng*, 9 (4), 311–318. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9:4\(311\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:4(311))
- Waterman, B. R., Alcantar, G., Thomas, S. G., & Kirk, M. F. (2022). Spatiotemporal variation in runoff and baseflow in watersheds located across a regional precipitation gradient. *J. Hydrol.: Reg. Stud*, 41, 101071. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101071>
- Xie, H., Hu, H., Xie, D., Xu, B., Chen, Y., Zhou, Z., Zhang, F., & Nie, H. (2024). Spatial and temporal assessment of baseflow based on monthly water balance modeling and baseflow separation. *Water*, 16(10), 1437. <https://doi.org/10.3390/w16101437>
- 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), pp.200-212. <https://doi.org/10.22034/jewe.2019.187507.1321> (In Persian)
- Zarei, M., Boroughani, M., & Alavinia, S. H. (2020). Estimating base-flow to assess environmental flow in the rivers of arid and semi-arid regions (Case study: Shamkan river, Sabzevar). *Water Resources Engineering*, 13(44), 37-51. <https://doi.org/20.1001.1.20086377.1399.13.44.4.5> (In Persian)
- Zheng, M. (2015). Estimation of baseflow using flow-sediment relationships in the chinese loess plateau. *Catena* 125, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.02>