



Research Paper

Efficiency Assessment of Baseflow Separation Methods in Gol-Gol Catchment, Ilam

Forozan Azarinvand¹, Mohsen Tavakoli^{2*} and Haji Karimi³

¹M.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

²Assoc. Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

³Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Article information

Received: July 30, 2021

Revised: October 24, 2021

Accepted: October 30, 2021

Keywords:

Base Flow Index

Eckhart Method

Hydrographic Analysis

Lyne and Hollick Method

*Corresponding author:

m.tavakoli@ilam.ac.ir



Abstract

In this research, the baseflow at the Gol Gol station, as a part of the Ilam dam watershed from 1991 to 2015, was separated from the entire river flow. For this purpose, WETSPRO methods, one-parameter and two-parameter numerical filters for continuous flow with porous and rocky aquifers, and using flow index and WHAT software with different filtration coefficients was used. To compare the methods and to select the most appropriate method, the BFI index was used as an observational baseflow. Based on the results obtained, the baseflow occupies a major part of the total flow. The mean of the total flow rate was 1.945 m³/s and the mean of the baseflow index was 1.445 m³/s, which indicates the permeability of the watershed. RMSE, MAE, and Nash-Sutcliffe criteria were used to evaluate the efficiency of the methods. The results showed that the Lyne and Hollick method based on WHAT software had the best result and then followed by Eckhart for continuous flow with a porous aquifer with a significance level of 0.742, mean 1.250 m³/s, with a confidence level of more than 95%. Therefore, the Eckhart method can be considered suitable for continuous flow with a porous aquifer with a filter coefficient of 0.990 due to the proximity of the mean baseflow in it to the mean of the baseflow index.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

Because of the water crisis in the world, planning for conservation and optimum use of water is one of the most important plans and priorities. In the Middle East and Iran, because of the geographic location, most of the areas have arid and semiarid climates, and nowadays water resources faced several limitations. Because of the importance of

base flow for planning and usage of low flows, base flow separation is one of the most important issues of hydrograph analysis, because of topographical, geological, climatological, and human activity variations. Between different parts of hydrology, hydrograph analysis of base and surface flows is one of the applied and important ones. Since base flow separation using



chemical and radioactive tracers methods is costly and time-consuming, statistical models are common. Ilam dam as a source of fresh water for Ilam city is located at the outlet of the catchment, it has an important role in the drinking water supply. There are several methods for baseflow separation and in this study, some methods have been evaluated for this aim and the best method has been suggested for the Gol-Gol sub-catchment as a part of the Ilam dam catchment and similar catchments.

Materials and method

In the current study, baseflow has been separated at Gol-Gol station, as a part of the Ilam dam watershed over a 25-year period (1991-2015). To this end, WETSPRO methods, Lyne-Hollick based on flow index (LHBFI), Lyne-Hollick based on software (LHWHAT) Eckhart for the

perennial stream with porous aquifer based on flow index (EPBFI), Eckhart for the perennial stream with rocky aquifer based on flow index (ERBFI), Eckhart for the perennial stream with porous aquifer based on software (EPWHAT), Eckhart for the perennial stream with rocky aquifer based on software (ERWHAT) with different filtering coefficients have been used. Due to the lack of observed data of baseflow in the catchment, the BFI index was used as the observed baseflow for comparing the methods, and selecting the most appropriate ones. In the end, the performance of the applied methods was evaluated using graphical and statistical methods and techniques (Root Mean Square Error, Mean Absolute Error and Nash-Sutcliffe efficiency) for baseflow separation.

Table 1 The characteristic criteria of base flow by different methods using different filters

Method	Statistical criteria	Total flow (m ³ /s)	Base flow (m ³ /s)					
			0.995	0.99	0.975	0.95	0.925	0.9
LHBFI	Mean	1.945	1.14	1.21	1.369	1.49	1.546	1.582
	Maximum	152.07	6.06	8.73	16.7	27.8	36.75	43.19
	Minimum	0.013	0.01	0.01	0.01	0.013	0.013	0.013
LHWHAT	Mean	1.945	0.78	0.981	1.228	1.382	1.45	1.5
	Maximum	152.07	4.6	7.74	14.41	25.4	34.04	41.6
	Minimum	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
ERBFI	Mean	1.945	0.46	0.47	0.479	0.481	0.483	0.484
	Maximum	152.07	1.7	2.65	5.17	8.46	10.87	13.11
	Minimum	0.013	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
EPBFI	Mean	1.945	1.219	1.33	1.43	1.48	1.49	1.508
	Maximum	152.07	13.19	21.87	38.58	56.21	66.89	76.08
	Minimum	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.01
ERWHAT	Mean	1.945	0.385	0.43	0.47	0.47	0.48	0.481
	Maximum	152.07	1.684	2.64	5.17	8.46	10.82	13.59
	Minimum	0.013	0.012	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006
EPWHAT	Mean	1.945	1.105	1.25	1.39	1.45	1.48	1.49
	Maximum	152.07	12.07	19.97	36.78	55.15	65.52	74.86
	Minimum	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012

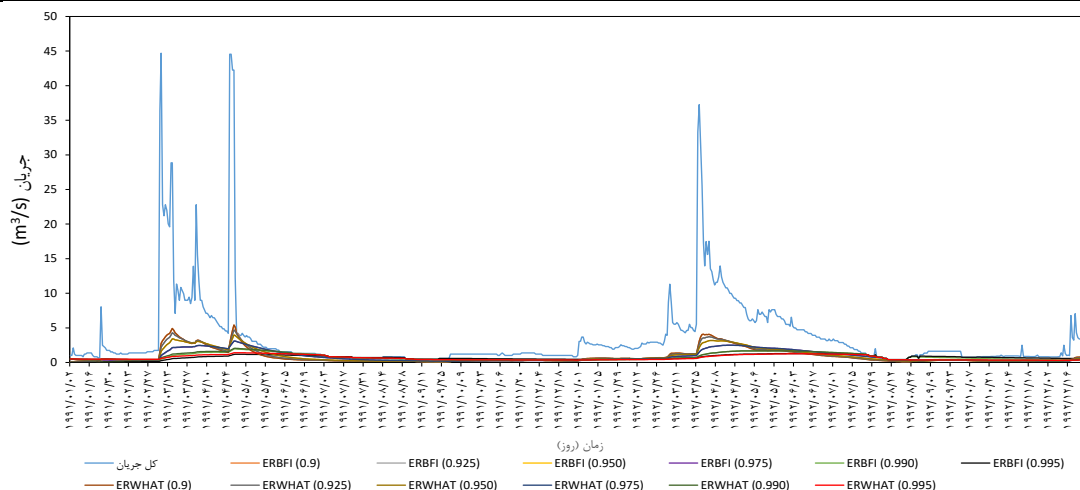


Fig. 1 A sample of base flow separation by Eckhart method using different filters and rocky aquifer

Results

Results indicated that the base flow in this basin comprises a large portion of the total flow. Results also show that in the studied catchment, the mean total flow has been calculated as 1.945 m³/s while, the average baseflow index was calculated as 1.245 m³/s showing a permeable condition in the catchment. In this research RMSE, MAE, and Nash-Sutcliffe criteria have been used for statistical evaluation of the efficiency of the methods. The results revealed that the LHWHAT method with a coefficient of 0.975 and the Eckhart method for porous aquifer (WHAT) with a 0.990 coefficient, with a significance level of 0.742, a mean of 1.250, with a confidence level greater than 0.095 had the best results. Table 1 shows the characteristic criteria of base flow by different methods using different filters. Moreover, Fig. 1 depicts a sample of base flow separation by Eckhart method using different filters and rocky aquifer.

Conclusion

Baseflow as the amount of water which flows all of the times, it is important for environmental engineers and also for water resources managers, and need more attentions. Referring other related studies, methods for baseflow separation are different and every catchment has specific

conditions which need to be investigated to specify suitable method of baseflow separation. As the main result of this research, it can be concluded that the EPWHAT method with a coefficient of 0.990, because of the closeness of mean base flow (1.25 m³/s) to mean base flow index, can be introduced as an appropriate method for baseflow separation in Gol-Gol and other similar catchments. Therefore, base flow separation and calculation of its contribution can be considered in river flow regime and surface water utilization.

Acknowledgment

This research has been done as a part of the Watershed Management Research core of Research deputy at Ilam University and we would like to thank them. The Regional Water Company of Ilam is sincerely thanked for providing the required discharge data.

Data Availability

The data of this research was obtained from the Regional Water Company of Ilam.

Conflicts of Interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی کارایی روش‌های جداسازی جریان پایه در حوضه آبخیز گل‌گل، ایلام

فروزان آذرینوند^۱، محسن توکلی^{۲*} و حاجی کریمی^۳

^۱ دانشجوی کارشناس ارشد، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۵/۰۸]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۸/۰۲]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۸/۰۸]

واژه‌های کلیدی:

تحلیل هیدروگراف

روش اکهارت

روش لین - هولیک

شاخص جریان پایه

* نویسنده مسئول:

m.tavakoli@ilam.ac.ir



چکیده

در این پژوهش آب‌پایه در ایستگاه گل‌گل، به‌عنوان بخشی از حوضه آبخیز سد ایلام از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۵ از جریان کل رودخانه تفکیک شد. بدین منظور روش‌های WETSPRO، فیلتر عددی یک‌پارامتری و دوپارامتری برای جریان دائمی با آبخوان‌های متخلخل و سنگی و با استفاده از شاخص جریان و نرم‌افزار WHAT با ضرایب فیلترینگ مختلف، مورد استفاده قرار گرفتند. برای مقایسه روش‌ها و انتخاب مناسب‌ترین روش از شاخص BFI به‌عنوان آب‌پایه مشاهداتی استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، آب‌پایه بخش عمده‌ای از کل جریان را به خود اختصاص داده است. به‌طوری‌که میانگین کل جریان $1/945 \text{ m}^3/\text{s}$ و میانگین شاخص جریان پایه $1/245 \text{ m}^3/\text{s}$ بدست آمد که نشان از نفوذپذیر بودن آبخیز دارد. برای ارزیابی کارایی روش‌ها از معیارهای MAE، RMSE و Nash-Sutcliffe استفاده شد. نتایج نشان داد که روش Lyne and Hollick بر اساس نرم‌افزار WHAT بهترین نتیجه و سپس Eckhart برای جریان دائمی با آبخوان متخلخل با سطح معناداری $0/742$ ، میانگین $1/250 \text{ m}^3/\text{s}$ ، با سطح اطمینان بیش‌تر از ۹۵٪ بهترین نتیجه را داشتند. بنابراین، می‌توان روش Eckhart را برای جریان دائمی با آبخوان متخلخل با ضریب فیلتر $0/990$ به‌دلیل نزدیک بودن میانگین جریان پایه در آن به میانگین شاخص جریان پایه، مناسب در نظر گرفت.

۱- مقدمه

جریان رودخانه است که از منابع آب زیرزمینی و یا دیگر منابع تأخیری سرچشمه می‌گیرد (Tallaksen et al. 2004). بر این اساس هیدرولوژیست‌ها استفاده از جریان آب زیرزمینی، جریان حداقل و نفوذ نیافته را جریان نشتی آب و جریان پایدار نام‌گذاری کرده‌اند (Zare Bidaki et al. 2019). از طرف دیگر جریان پایه به‌عنوان جریان رودخانه حاصل از آب‌های زیرزمینی و سایر منابع ذخیره‌شده، تعریف

مدیریت منابع طبیعی، پایه و اساس توسعه پایدار بوده و از این دیدگاه، مدیریت منابع آب در کشوری مثل ایران که در منطقه پرتنش و کم‌آب خاورمیانه قرار دارد، اهمیت زیادی دارد. بر اساس آمار، دوسوم از پهنة کشور دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک است و امروزه مدیریت منابع آب کشور به خاطر خشک‌سالی با محدودیت‌هایی روبرو است (Rezaei Tavabea et al. 2007). براساس تعریف، آب‌پایه قسمتی از



محلی و روش فیلتر عددی یک پارامتره و دوپارامتره به منظور برآورد دبی پایه جریان روزانه تعدادی از رودخانه‌های استان آذربایجان غربی در یک دوره ۳۱ yr² استفاده شده است که نتایج نشان داد که روش فیلتر عددی دوپارامتره از لحاظ هیدرولوژیکی انعطاف پذیرتر از دیگر روش‌ها است (Taimori et al. 2012). درحالی‌که در مطالعه‌ای دیگر به بررسی و مقایسه روش‌های جداسازی جریان پایه رودخانه و تغییرات فصلی آن در تعدادی از آبخیزهای استان اردبیل با استفاده از روش‌های ترسیمی شامل محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی جابه‌جاشونده و حداقل محلی، روش‌های فیلتر دیجیتال برگشتی شامل الگوریتم یک پارامتره، دوپارامتره و ... پرداخته شده که نتایج آن‌ها نشان داد که روش‌های ترسیمی و فیلتری با تحلیل فروکش، روش تفکیک فیلتری الگوریتم یک پارامتره با ضریب کارایی ۰/۸۴ مناسب‌ترین روش در این آبخیز است (Mehri et al. 2017). اخیراً نیز در مطالعه‌ای دیگر به مقایسه روش‌های جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم در حوضه آبخیز دورود با استفاده از روش‌های PART، فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره (لین - هولیک^۲) و دوپارامتره (اکهارت^۳) با فیلترهای ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵، و ۰/۹۹ پرداخته شده که نتایج نشان داد که روش لین هولیک با فیلتر ۰/۹۷۵ بهترین روش برای جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم است (Zare Bidaki et al. 2019). همچنین در ۲۲ حوضه آبخیز در هند آب پایه از جریان کل با استفاده از روش فیلتر عددی برگشتی تفکیک شده که نتایج نشان داد که مدل‌ها به صورت منطقی آب پایه را با خطاهای نسبی (RE) در محدوده‌ای از صفر تا ۳۰٪ تخمین می‌زنند، به جز در یک آبخیز که RE آن در طول دوره‌ی اعتبارسنجی ۵۰٪ بود (Ahiablame et al. 2013). در برخی پژوهش‌ها از روش‌های فیزیکی نیز جهت تفکیک جریان پایه استفاده شده است که در این مورد (Mei and Anagnostou 2015) در مطالعه خود جهت تفکیک هیدروگراف، از اطلاعات بارش و رواناب با داده کم پرداختند که نتایج نشان داد تفکیک آب پایه در مدت‌زمان طولانی و تغییرات آن وابسته به تغییرات حوزه آبخیز است. در حوزه‌های آبخیز کشورمان نیز در این زمینه پژوهش‌هایی انجام شده است. در مطالعه‌ای به بررسی روش‌های حداقل محلی، بازه زمانی متحرک، بازه زمانی ثابت، فیلتر عدد برگشتی یک پارامتره و

می‌شود (Bosch et al. 2017). آب پایه در رودخانه از نظر مکانی و زمانی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله زمین-شناسی، توپوگرافی، شرایط آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی، متغیر است (Smakhtin 2001). بنابراین درک تغییرات زمانی در جریان پایه برای مدیریت پایدار منابع آب بسیار مهم است. اگرچه جریان در فصل خشک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و در بعضی از رودخانه‌ها به صفر نزدیک می‌شود، اما این آب برای موجوداتی که به آن وابسته هستند، می‌تواند منبع حیاتی مهمی برای بقا باشد. برآورد میزان مشارکت آب‌های زیرسطحی در آب‌های سطحی در یک حوضه آبخیز برای فعالیت‌های گسترده‌ای از جمله برنامه-ریزی زمان‌های کم‌آبی و خشک‌سالی، بررسی وضعیت بوم-سازگان، برنامه‌ریزی نیازمندی‌های آب شرب، مباحث آلودگی آب رودخانه و چگونگی پخش آلودگی از این طریق مورد نیاز بوده و از ضروریات است (Kazemi et al. 2017).

روش‌های زیادی برای بررسی جریان پایه وجود دارد که می‌توان به دو دسته روش‌های سنتی و میدانی و روش‌های گرافیکی طبقه‌بندی نمود. روش‌های سنتی شامل تجزیه و تحلیل هیدروگراف (جداسازی جریان پایه)، (Mei and Anagnostou 2015)، آنالیز فرکانس (Chimtengo et al. 2014)، نقشه برداری هیدروژئولوژیکی (Bloomfield et al. 2009)، مدل‌سازی و تعادل جرم (Capesius and Arnold 2012) است. به دلیل وقت گیر و هزینه بر بودن روش‌های میدانی، بیش‌تر از روش‌های گرافیکی و خودکار استفاده می‌شود (Arnold and Allen 1999). در بسیاری از پژوهش‌های روش تحلیل هیدروگراف کاربرد بیش‌تری داشته، جریان پایه را از داده‌های جریان رودخانه موجود جدا می‌کنند و تخمین جریان پایه را بدون نیاز به مدل‌سازی پیچیده، با استفاده از ویژگی‌های خاک انجام می‌دهند (Kelly et al. 2019). یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های هیدروژئولوژیکی که در پژوهش‌های مختلف بر آن تأکید شده، شاخص جریان پایه (BFI)^۱ به عنوان نسبت بدون بعدی است که از نسبت دبی پایه به دبی کل جریان سطحی برای هر مقطع زمانی یا کل دوره آماری به دست می‌آید (Nathan and McMahon 1990).

در زمینه تفکیک جریان پایه پژوهش‌های داخلی و خارجی متعددی صورت گرفته است؛ در پژوهشی از روش‌های حداقل

²Lyne-Hollick³Eckhardt¹Base Flow Index (BFI)

جریان پایه را در آبخیز گل‌گل به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های اصلی آبخیز سد ایلام را نشان می‌دهد. با توجه به وجود روش‌های مختلف در تفکیک جریان پایه از جریان کل، هدف از این پژوهش استفاده از چندین روش برای تفکیک جریان پایه رودخانه گل‌گل با ضرایب مختلف فیلترینگ جهت تعیین بهترین روش تفکیک جریان پایه در حوضه آبخیز مورد مطالعه است تا بتوان مناسب‌ترین روش را در منطقه معرفی نمود.

۲- مواد و روش کار

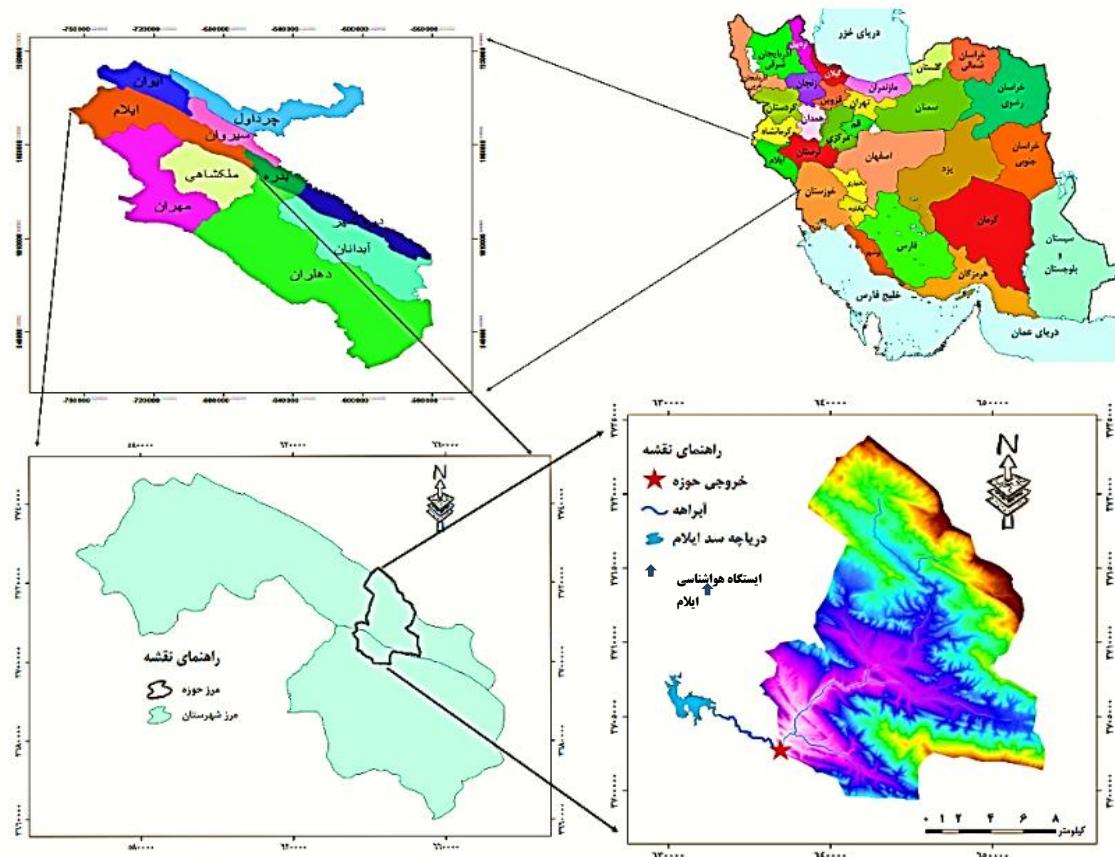
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گل‌گل یکی از زیرحوضه‌های اصلی سد ایلام با مساحت حدود ۲۴۹۵۰ ha است که در شهرستان‌های ایلام و ملکشاهی و در موقعیت جغرافیایی بین ۲۶° ۴۶' تا ۳۹° ۴۶' طول شرقی و ۲۴° ۳۳' تا ۴۴° ۳۳' عرض شمالی واقع شده است. از نظر هیدرولوژیکی این زیرحوضه یکی از سرشاخه‌های تأمین‌کننده آب سد ایلام بوده که شکل (۱) موقعیت حوضه آبخیز را در ایران و ایلام نشان می‌دهد. حداکثر ارتفاع حوضه ۲۶۰۵ m و حداقل ارتفاع آن ۱۰۵۲ m از سطح دریا می‌باشد. متوسط بارش در حوضه آبخیز مورد مطالعه براساس ایستگاه‌های موجود در منطقه، حدود ۴۵۶ mm است و جدول (۱) خصوصیات بارش ایستگاه‌های محدوده را نشان می‌دهد. متوسط ارتفاع ۱۸۲۸ m و شیب متوسط حوضه ۲۰٪ است و جریان موجود در رودخانه به‌صورت دائمی بوده و دبی متوسط سالانه حوضه حدود ۱/۹ m³/s است که عمده آن در فصول پرآبی از حوضه خارج می‌شود. همچنین براساس مطالعات انجام شده، آبخیز مورد مطالعه پتانسیل وقوع جریان‌های حداقل و حداکثر را دارد (Tavakoli et al. 2018). وضعیت زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که حوضه آبخیز مورد مطالعه در زاگرس چین‌خورده در بخش غربی کشور، از شرق به زون سنندج-سیرجان و زاگرس مرتفع، از شمال به زون سنندج-سیرجان و از جنوب به زون مکران محدود می‌گردد. لیتولوژی غالب منطقه شامل آهک دولومیتی و مارنی، آهک رسی-مارن، آهک رسی و شیل-مارن، گچ، آهک رسی و انیدریت و رسوبات آبرفتی کواترنر می‌باشد. عناصر تکتونیکی موجود در حوضه آبخیز شامل چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌ها می‌باشند که امتدادهای متفاوتی داشته و منطقه را فعال نموده‌اند. در این

دوپارامتره جهت جداسازی دبی پایه چهار ایستگاه هیدرومتری حوضه رودخانه کرج پرداخته شده است (Soltani and Soltani 2018). همچنین (Kazemi and Fourod 2017) در پژوهشی با استفاده از داده‌های جریان روزانه، شاخص و مقدار جریان پایه ۱۹ ایستگاه آب‌سنجی استان کرمان را با استفاده از روش فیلتر رقومی برگشتی دوشاخه استخراج کردند. آن‌ها پس از محاسبه عوامل اقلیمی و توپوگرافی، با استفاده از روش آزمون تحلیل عاملی از بین ۱۱ پارامتر مؤثر در شاخص جریان پایه، شش عامل مؤثر را انتخاب نمودند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، از بین عوامل مورد بررسی، روش رگرسیون‌های چندمتغیره به‌عنوان بهترین برآورد کننده شاخص جریان پایه رودخانه‌ها تشخیص داده شدند. در زیرحوضه‌های کرخه، شاخص جریان پایه با استفاده از جریان روزانه و ماهیانه به روش‌های حداقل محلی، فواصل ثابت، فواصل متحرک، فیلتر رقومی برگشتی یک-پارامتره، فیلتر رقومی برگشتی دوپارامتره و فیلتر رقومی برگشتی لین‌هولیک استخراج و نتایج را نیز با استفاده از معیارهای مختلف آماری تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که حداقل خطای نسبی داده ماهانه نسبت به روزانه، به روش فیلتر رقومی برگشتی دوپارامتره و بیشینه آن به روش لین-هولیک تعلق دارد. درنهایت، روش فیلتر رقومی دوپارامتره به دلیل خطای نسبی کم، کمینه میانگین مطلق خطا و ریشه میانگین مربعات خطا به‌عنوان روش‌های مناسب برای استخراج جریان پایه با استفاده از داده‌های ماهانه در غیاب داده‌های مناسب روزانه، شناخته شد (Kazemi et al. 2017). در پژوهشی دیگر، آمار ۱۱ ایستگاه آب‌سنجی حوضه کرخه انتخاب و روند تغییرات جریان در طی ماه‌های سال را ترسیم و خشک‌ترین ماه سال تعیین شد. در مرحله بعد واسنجی شش الگوریتم رقومی برگشتی را با استفاده از داده‌های درازمدت خشک‌ترین ماه سال انجام و پس از به‌دست آوردن پارامترهای بهینه مدل‌ها، تفکیک جریان پایه برای کل دوره انجام دادند. نتایج نشان داد که قسمت اعظم جریان رودخانه در این منطقه، مربوط به جریان پایه است که بیش از ۶۳٪ منابع آب‌های زیرسطحی را به خود اختصاص داده است. بر اساس نتایج، کمترین خطا مربوط به روش لین-هولیک و بیشترین خطا، مربوط به فیلتر رقومی یک-پارامتره می‌باشد (Kazemi and Porhemat 2020).

وجود سد ایلام، به‌عنوان منبع تأمین آب شرب شهر ایلام در پایین‌دست آبخیز مورد مطالعه، ضرورت مطالعه و بررسی

پژوهش، از داده‌های جریان اندازه‌گیری شده ایستگاه گل‌گل توسط شرکت آب منطقه‌ای استان ایلام استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گل‌گل در کشور و استان ایلام

Fig. 1 Geographic location of Gol-Gol watershed in Iran and Ilam Province

جدول ۱- میانگین و درصد بارندگی فصلی ایستگاه‌های منطقه

Table 1 The mean and percentage of seasonal precipitation of local stations

Station	Precipitation	Season				Annual
		Autumn	Winter	Spring	Summer	
Ilam	Mean	122.2	213.4	19	0.3	100
	Percent	29.5	51.3	93.3	3.7	480.2
Gol-Gol	Mean	147.7	235.5	19.4	0.7	100
	Percent	30.7	49	93.1	4.1	472.1
Mishkhas	Mean	152.4	222.5	19.7	0.8	100
	Percent	32.2	47.1	101.4	0	573
Malekshahi	Mean	172.4	299.2	17.7	0	100
	Percent	30.1	52.2	19	0.3	100

۲-۲-۱- شاخص جریان پایه

شاخص جریان پایه (BFI)^۱ یک روش بدون بعد است که از تقسیم جریان پایه به حجم کل رواناب طی یک دوره آماری مشترک برای نشان دادن توانایی حوضه آبخیز جهت ذخیره و آزادسازی آب در طول دوره‌های خشک استفاده می‌شود که مقدار زیاد شاخص نشان‌دهنده پایداری رژیم جریان حوضه و حفظ جریان پایه رودخانه طی دوره خشک است (Zare

۲-۲-۲ روش پژوهش

تاکنون چندین روش برای جداسازی دبی پایه از جریان کل توسط محققین مختلف ارائه شده است. در پژوهش حاضر به‌طور کلی از چهار روش زیر به‌منظور جداسازی آب پایه به‌دلیل عمومیت بیش‌تر و سازگاری با منطقه مورد مطالعه، استفاده شد.

^۱Base Flow Index

توان سیگنال‌های دارای فرکانس بالا را از سیگنال‌های دارای فرکانس پایین جدا نمود. در پردازش سیگنال، عملکرد یک فیلتر فقط محدود به حذف یک قسمت ناخواسته از سیگنال نمی‌باشد بلکه شامل استخراج قسمت‌های مهم سیگنال نیز می‌باشد (Mosavipor and Saied Tabtabaei 2011). به‌طور کلی این روش به دو صورت یک‌پارامتره و دوپارامتره انجام می‌شود.

۲-۳-۱- فیلتر عددی برگشتی یک‌پارامتره

این روش ابتدا توسط (Lyne and Hollick 1979) ارائه شده و نیازمند پارامتر ثابت بازگشت (a) است. رابطه (۲) فیلتر عددی یک‌پارامتره را نشان می‌دهد.

$$b_k = ab_{k-1} + \frac{(1-a)}{2}(y_k + y_{k-1}) \quad (2)$$

که، b_k جریان پایه فیلتر شده در مرحله زمانی k ، k ، b_{k-1} ، a ، $k-1$ ، y_k پارامتر فیلتر شده در مرحله زمانی $k-1$ ، y_{k-1} جریان کل در مرحله زمانی k ، y_{k-1} جریان کل در مرحله زمانی $k-1$ است. پارامتر فیلتر (a) در پژوهش حاضر به ترتیب برابر با ۰/۹۳۵، ۰/۹۵۰، ۰/۹۷۵ و ۰/۹۹۵ استفاده شده است.

برای محاسبه میزان جریان پایه براساس فیلتر عددی برگشتی یک‌پارامتری از محاسبه براساس رابطه (۱) که در این پژوهش به صورت ^۳LHBFی نشان داده شده و همچنین برای این روش نرم‌افزار تحت وب WHAT نیز استفاده شده است که در این پژوهش به صورت ^۴LHWHAT نشان داده شده است. روش WHAT یک برنامه آنلاین تحلیل هیدروگراف تحت وب است که براساس الگوریتم‌های خاص خود محاسبات را انجام می‌دهد. آخرین نسخه این برنامه با سه روش، آب‌پایه را از کل جریان جدا می‌کند که شامل، حداقل محلی، روش فاکتور فیلتر عددی و روش فیلتر عدد برگشتی است. در این سیستم روش حداقل محلی، WHAT ^۵LMM خوانده می‌شود که هیدروگراف را برای یافتن حداقل جریان رودخانه در طی یک مدت جستجو می‌کند (Lim et al. 2005). این روش به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های تفکیک هیدروگراف بوده و عملکرد آن به طبیعت جریان بستگی ندارد و از حداقل مقادیر دبی در دوره‌های پنج روزه بدون همپوشانی استفاده می‌کند. ابتدا حداقل مقادیر

(Bidaki et al. 2019) این شاخص توسط Lodouche (2001) در سال ۱۹۷۲ ارائه و در سال ۱۹۸۰ توسعه پیدا کرده است (Taimori et al. 2012). شاخص جریان پایه، نمونه‌ای برای اندازه‌گیری و مقایسه متغیرهاست، که بر مبنای آن می‌توان تغییرات ایجاد شده در متغیرهای معینی در طول یک دوره را بررسی نمود (Santhi et al. 2008). برای محاسبه شاخص جریان پایه، دبی روزانه به فواصل زمانی پنج‌روزه بدون همپوشانی تقسیم می‌شود و برای هر دوره پنج‌روزه کم‌ترین مقدار جریان انتخاب و سپس ۹۰٪ آن محاسبه می‌شود. چنانچه هر یک از حداقل‌های پنج‌روزه از مقادیر قبل و بعد آن کوچک‌تر باشد، به‌عنوان مقدار آب‌پایه در نظر گرفته می‌شود و سپس با گرفتن میانگین از این مقادیر، دبی پایه جریان به دست می‌آید (رابطه ۱).

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (1)$$

که، b_i مقدار جریان پایه در روز i ام و d_i مقدار جریان روز i ام است (Zare Bidaki et al. 2019).

۲-۲-۲ نرم‌افزار WETSPRO

نرم‌افزار WETSPRO^۱ تحت نرم‌افزار اکسل اجرا می‌گردد که شامل صفحات استاندارد برای وارد کردن، نمایش نتایج و نمودارهای استاندارد برای نمایش نتایج با الگوریتم‌هایی در زبان برنامه‌نویسی Visual Basic است. ورودی‌های این نرم‌افزار شامل سری‌های زمانی پیوسته و متغیرهای هیدرولوژی (دبی جریان، سطح آب، شدت بارش، غلظت آلودگی و موارد مشابه) می‌باشند که متغیر هیدرولوژیکی در این پژوهش دبی جریان است. این نرم‌افزار قادر است هیدروگراف جریان رودخانه را به اجزای آن (جریان سطحی از جریان زیرسطحی) تجزیه کند. همچنین می‌تواند دبی‌های حداقل و حداکثر را براساس شاخص‌های مرتبط انتخاب و تفکیک کند. از دیگر قابلیت‌های این نرم‌افزار جدا کردن هیدروگراف‌های جریان سریع و کند داده‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌های جریان حدی می‌باشد (Willems 2009).

۲-۲-۳ فیلتر عددی برگشتی

فیلترهای عددی برگشتی^۲ روشی برای تجزیه و تحلیل و پردازش سیگنال است که با انتخاب یک آستانه مناسب می‌-

^۳Lyne and Hollic Base Flow Index

^۴Lyne and Hollic WHAT

^۵Local Minimum Method

^۱Water Engineering Time Series PROcessing tool

^۲Recursive digital filter

۲-۳-۲-۲ فیلتر عددی برگشتی دوپارامتره این روش نیز توسط Eckhart در سال ۲۰۰۵ ارائه شد. این روش بر اساس دو پارامتر بازگشت (a) و ماکزیمم شاخص جریان پایه (BFI_{max}) تعیین می‌شود. معادله این فیلتر به صورت رابطه (۳) است.

$$b_t = \frac{1(1 - BFI_{\max})ab_{k-1} + (1-a)BFI_{\max} - y_k}{1 - a.BFI_{\max}} \quad (3)$$

در تمامی روش‌های فوق بر اساس شرایط هیدرولوژیکی منطقه و همچنین سوابق پژوهش‌های مشابه از فیلترهای عددی مشابهی استفاده شده است که در قسمت نتایج به آن‌ها اشاره شده است.

۲-۲-۴ ارزیابی عملکرد مدل‌ها

ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیازمند مقایسه جریان پایه مشاهداتی با مقادیر برآوردی بر اساس مدل‌های مورد استفاده است. به دلیل نبود داده‌های جریان پایه واقعی، در این پژوهش نتایج شاخص BFI به عنوان آب‌پایه مشاهداتی در نظر گرفته شده است (Zare Bidaki 2019). این روش مقدار جریان در روزهایی که دارای جریان حداقل با بیش‌ترین تکرار در طول سال است را به عنوان مقادیر آب‌پایه در نظر می‌گیرند. آب‌پایه حاصل از روش‌های LHWHAT، LHBFI، WETSPRO، EPWHAT، ERWHAT، EPBFI، ERBFI مقادیر برآوردی در نظر گرفته شده است. جهت مقایسه مقادیر شاخص BFI با روش‌های ذکر شده از خطاهای مجذور میانگین مربعات (RMSE)، معیار میانگین مطلق خطا (MAE) و تعیین ضریب کارایی Nash-Sutcliffe استفاده شد (روابط ۴ و ۵).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')}{n} \quad (5)$$

که، y_i مقدار مشاهده شده آب‌پایه، y_i' مقدار برآورد شده آب‌پایه و n تعداد داده‌ها است. ضریب کارایی Nash-Sutcliffe مقداری است با دامنه خطای بین ۱ تا منهای بی‌نهایت که هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است. رابطه (۶) نشان‌دهنده رابطه این معیار است.

دبی در طول مقاطع زمانی پنج‌روزه تعیین می‌شود، سپس در بین این مقادیر جریان‌هایی که ۱/۱۱ برابر کم‌تر یا مساوی مقادیر قبل و بعد باشد را انتخاب می‌کند. مقادیر انتخابی به عنوان نقاط مبنا در نظر گرفته می‌شوند (Stewart et al. 2007).

که، b_k جریان پایه فیلتر شده در مرحله زمانی k (m^3/s)، a ، جریان پایه فیلتر شده در مرحله زمانی $k-1$ (m^3/s)، پارامتر فیلتر مرتبط با حوضه آبخیز، y_k جریان کل در مرحله زمانی k ، BFI_{\max} ماکزیمم شاخص جریان پایه است. پارامترهای ضروری در این فیلتر a و BFI_{\max} هستند که مقادیر BFI_{\max} به صورت جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر BFI_{\max} برای حوضه‌های آبخیز با خصوصیات

متفاوت (Hasani et al. 2012)

Table 2 The amounts of BFI_{\max} for different watersheds with different characteristics

BFI _{max}	characteristics Stream and watershed
0.8	Perennial streams with porous aquifers
0.5	Ephemeral streams with porous aquifers
0.25	Perennial stream with hard rock aquifers

Eckhart برای بررسی و محاسبه مقدار جریان پایه، آبخوان‌ها را به دو دسته جریان دائمی در آبخوان سنگی و جریان دائمی در آبخوان متخلخل تقسیم نمود. در این پژوهش علاوه بر استفاده از رابطه (۳) و محاسبه جریان از طریق شاخص معرفی شده، از روش و نرم‌افزار تحت وب WHAT نیز استفاده شد است.

بنابراین در این مطالعه نتایج چهار روش شامل فیلتر عددی برگشتی دو پارامتری (Eckhart) بر اساس شاخص برای جریان دائمی آبخوان سنگی، ERBFI^۱، بر اساس شاخص برای جریان دائمی آبخوان متخلخل، EPBFI^۲، بر اساس روش WHAT برای جریان دائمی آبخوان سنگی، ERWHAT^۳ و بر اساس روش WHAT برای جریان دائمی آبخوان متخلخل، EPWHAT^۴ محاسبه و باهم مقایسه شدند.

¹Eckhart Rocky Base Flow Index

²Eckhart Porus Base Flow Index

³Eckhart Rocky WHAT

⁴Eckhart Porous WHAT

دارد. جدول (۳) نتایج ویژگی‌های آماری این روش و سایر روش‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. با مشاهده نمودار شکل (۲) و نتایج جدول (۳) مشخص می‌شود که دبی پایه در روزهای ۳ و ۵ سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ دارای بیشترین مقدار خود بوده و از طرف دیگر نتایج گرافیکی این روش نشان می‌دهد که آب پایه درصد بالایی از کل جریان را به خود اختصاص نمی‌دهد.

جدول ۳- مقادیر آماری آب پایه با روش WETSPRO
Table 3 The statistical values of base flow by WETSPRO method

Statistical criteria	Total flow (m ³ /s)	Base flow (m ³ /s)
Mean	1.945	0.587
Maximum	152.07	4.291
Minimum	0.013	0.038

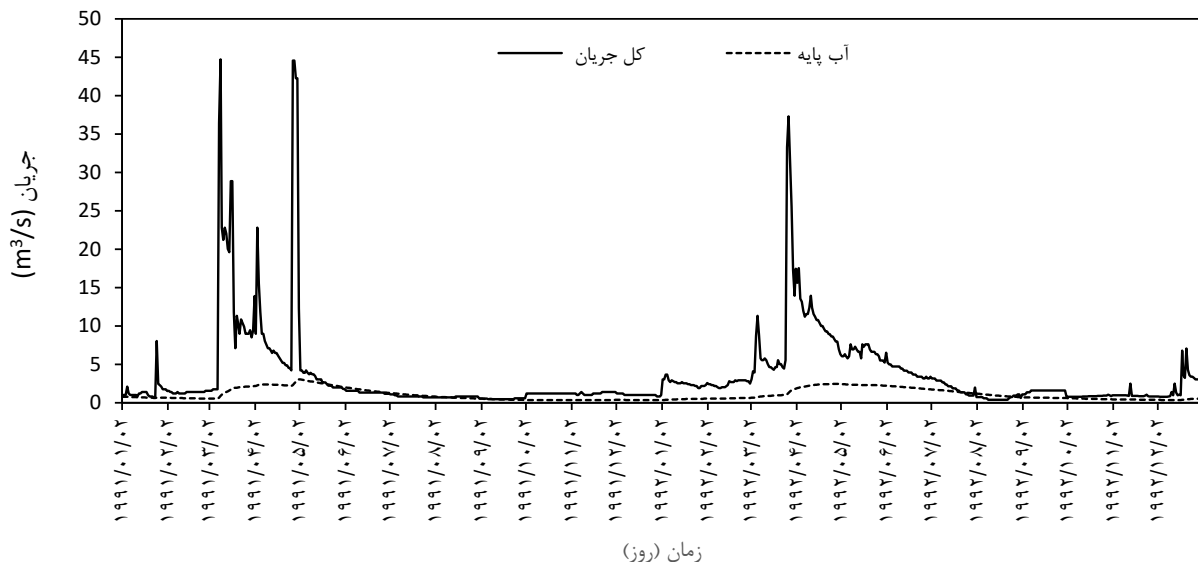
$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_o - y_e)^2}{\sum_{i=1}^n (y_o - \bar{y_o})^2} \quad (6)$$

که، y_o آب پایه مشاهده شده، y_e مقدار برآورد شده آب پایه و $\bar{y_o}$ میانگین داده‌های برآورد شده است. برای این معیار مقدار ۱ نشان‌دهنده تطبیق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- نتایج روش WETSPRO

نتایج این روش نشان داد که با جدا کردن جریانات زیرسطحی از جریان کلی، روند جریان پایه از منطق مناسبی برخوردار بوده است، گرچه در مورد مقادیر آن تفاوت معنی‌داری وجود



شکل ۲- نمونه‌ای از تفکیک آب پایه به روش WETSPRO

Fig. 2 A sample of base flow separation by WETSPRO method

جدول (۴) نشان‌دهنده این است که با افزایش ضریب فیلتر، میانگین و حداکثر جریان برآوردی نیز کاهش می‌یابد. چند بار عبور فیلتر از داده‌های جریان به‌طور سامانمند فرکانس داده‌های هیدروگراف را کاهش داده و در هر عبور مقداری از جریان رواناب سطحی حذف شده و در نهایت جریان پایه باقی می‌ماند.

نتایج استفاده از روش LHWHAT با فیلترهای ۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ در حوزه آبخیز مورد مطالعه نشان از کاهش دبی پایه در اثر افزایش ضریب فیلتر دارد. بدین‌صورت که ضریب فیلتر ۰/۹ دارای بیشترین

۳-۲- روش فیلتر عددی برگشتی

۳-۲-۱- فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره

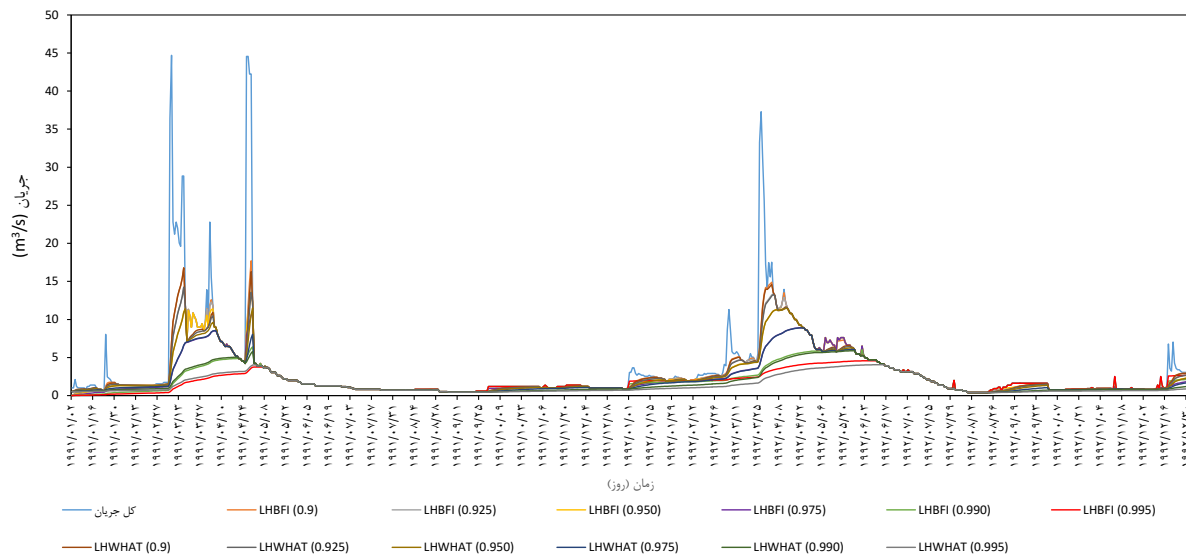
نتایج شاخص Lyne and Hollick برای دوره ۲۵ ساله آمار ایستگاه موجود در خروجی آبخیز به‌عنوان شاخصی برای تعیین ظرفیت حوضه آبخیز نشان داده شده است. با افزایش ضریب فیلتر، جریان پایه کاهش می‌یابد، بدین معنی که ضریب فیلتر ۰/۹ دارای بیشترین جریان پایه و فیلتر ۰/۹۹۵ کم‌ترین جریان پایه را دارد. در شکل (۳) تغییرات ضریب فیلتر و تأثیر آن بر کاهش دبی نشان داده شده است. نتایج میانگین کل جریان با آب پایه‌ی برآوردی با این روش در

جریان پایه و فیلتر ۰/۹۹۵ کم‌ترین جریان پایه را دارد. نتایج آماری کل جریان با میانگین آب‌پایه برآوردی در این روش در جدول (۴) و شکل (۳) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فیلتر میانگین و حداکثر جریان برآوردی کاهش می‌یابد.

جدول ۴- خصوصیات آماری آب‌پایه به روش‌های متفاوت و فیلترهای مختلف

Table 4 The characteristic criteria of base flow by different methods using different filters

Method	Statistical criteria	Total flow (m ³ /s)	Base flow (m ³ /s)					
			0.995	0.99	0.975	0.95	0.925	0.9
LHBF1	Mean	1.945	1.14	1.21	1.369	1.49	1.546	1.582
	Maximum	152.07	6.06	8.73	16.7	27.8	36.75	43.19
	Minimum	0.013	0.01	0.01	0.01	0.013	0.013	0.013
LHWHAT	Mean	1.945	0.78	0.981	1.228	1.382	1.45	1.5
	Maximum	152.07	4.6	7.74	14.41	25.4	34.04	41.6
	Minimum	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
ERBFI	Mean	1.945	0.46	0.47	0.479	0.481	0.483	0.484
	Maximum	152.07	1.7	2.65	5.17	8.46	10.87	13.11
	Minimum	0.013	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
EPBFI	Mean	1.945	1.219	1.33	1.43	1.48	1.49	1.508
	Maximum	152.07	13.19	21.87	38.58	56.21	66.89	76.08
	Minimum	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.01
ERWHAT	Mean	1.945	0.385	0.43	0.47	0.47	0.48	0.481
	Maximum	152.07	1.684	2.64	5.17	8.46	10.82	13.59
	Minimum	0.013	0.012	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006
EPWHAT	Mean	1.945	1.105	1.25	1.39	1.45	1.48	1.49
	Maximum	152.07	12.07	19.97	36.78	55.15	65.52	74.86
	Minimum	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012



شکل ۳- نمونه‌ای از جداسازی جریان پایه به روش فیلتر عددی برگشتی یک‌پارامتری با روش‌ها و فیلترهای متفاوت
Fig. 3 A sample of base flow separation by Lyne and Hollick using different methods and filters

تفکیک آب‌پایه ایستگاه مورد مطالعه در جدول (۴) و شکل (۴) نشان داده شده است.

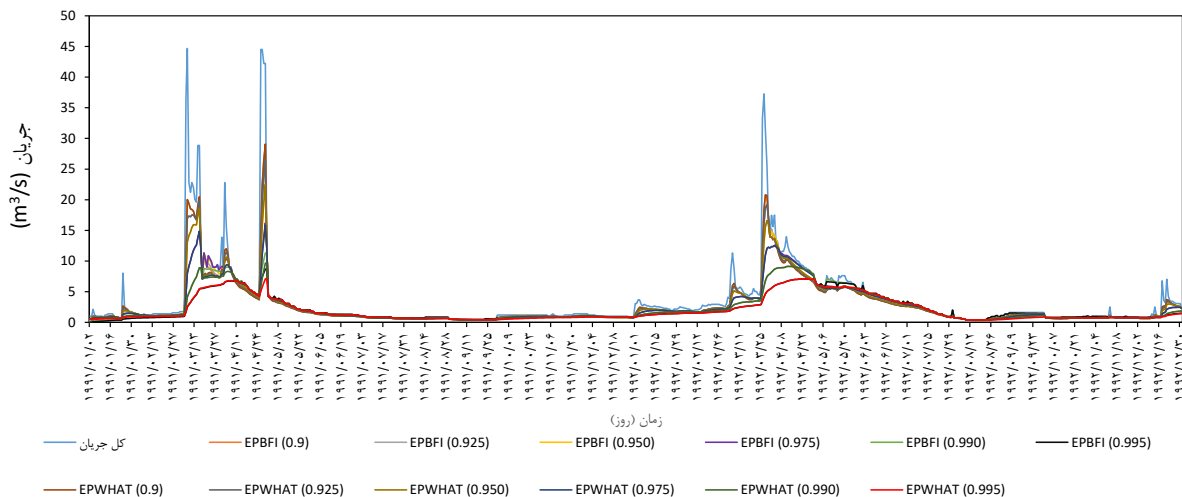
از طرف دیگر نتایج میانگین کل جریان با میانگین آب‌پایه برآوردی در روش EPWHAT در جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فیلتر، میانگین و حداکثر جریان برآوردی کاهش می‌یابد. این نیز دلیل بر کاهش دبی پایه با افزایش ضریب فیلتر است. شکل (۴) نمودار تغییرات و

۳-۲-۲- فیلتر عددی برگشتی دوپارامتره

۳-۲-۱- آبخوان متخلخل

نتایج روش فیلتر دوپارامتره عددی برگشتی در محیط آبخوان متخلخل و با استفاده از شاخص جریان نشان داد که مقدار میانگین، حداکثر شاخص جریان پایه با ضرایب فیلتر ۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ برابر با ۰/۸ جهت تفکیک آب‌پایه حوضه آبخیز است. همچنین نتایج

جداسازی جریان پایه از جریان کل را بر اساس روش فوق را نشان می‌دهد.

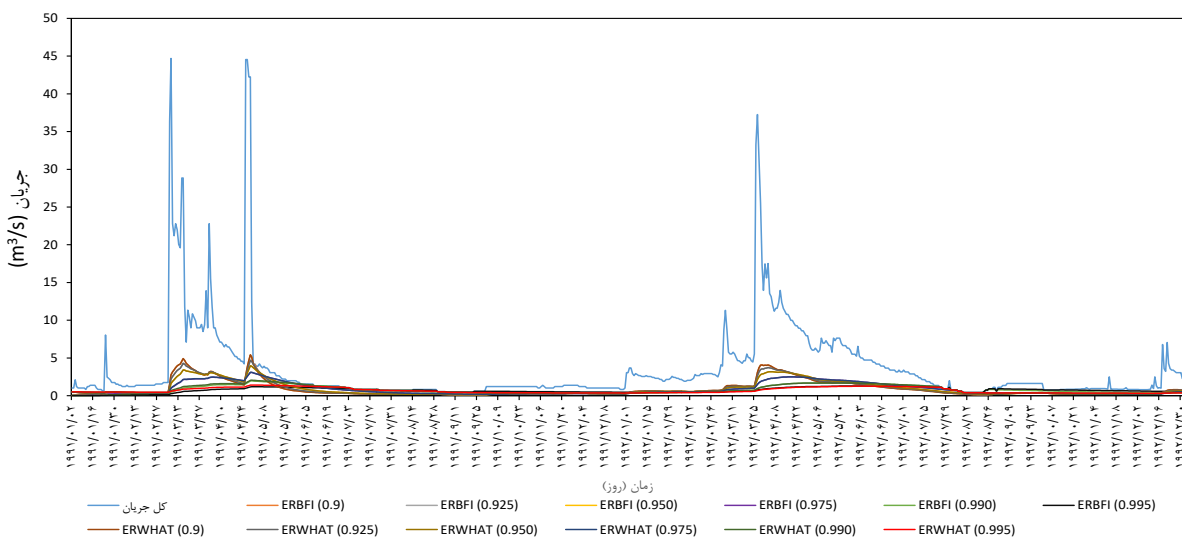


شکل ۴- نمونه‌ای از جداسازی آب‌پایه به روش فیلتر عددی برگشتی دوپارامتری با فیلترهای مختلف برای آبخوان متخلخل
Fig. 4 A sample of base flow separation by Eckhart method using different filters and porous aquifer

از طرف دیگر جدول (۴) میانگین کل جریان با میانگین آب‌پایه برآوردی با روش ERWHAT را نشان می‌دهد. نتایج این روش نیز نشان می‌دهد که با افزایش ضریب فیلتر میانگین و حداکثر جریان برآوردی کاهش می‌یابد. شکل (۵) نیز نشان می‌دهد که مقدار جریان پایه برای ضرایب مختلف به فرض سخت و سنگی بودن آبخوان و نفوذپذیری کم در مقایسه با آبخوان متخلخل به شدت کاهش یافته است. نتایج همچنین کاهش جریان پایه با افزایش ضریب فیلتر را نشان می‌دهد، بدین معنی که ضریب فیلتر ۰/۹ دارای بیشترین جریان پایه و فیلتر ۰/۹۹۵ کم‌ترین جریان پایه را دارد.

۳-۲-۲- آبخوان سنگی

نتایج نمودار و جداول به‌دست‌آمده از فیلتر دوپارامتره در محیط آبخوان سنگی براساس شاخص جریان نشان داد که افزایش ضریب فیلتر باعث کاهش جریان پایه در نتایج ایستگاه می‌شود، طوری که ضرب فیلتر ۰/۹، جریان پایه بیش‌تری نسبت به فیلتر ۰/۹۹۵ دارد. با افزایش ضریب فیلتر، میانگین و حداکثر جریان برآوردی کاهش می‌یابد که این مقدار در مقایسه با آبخوان متخلخل اختلاف زیادی داشته و خود نشان‌دهنده متخلخل بودن حوضه آبخیز مورد مطالعه با توجه به میانگین شاخص جریان پایه به مقدار $1/245 \text{ m}^3/\text{s}$ دارد. جدول (۴) و شکل (۵) مقدار تغییرات دبی پایه را نسبت به تغییر فیلتر نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمونه‌ای از جداسازی آب‌پایه به روش فیلتر عددی برگشتی دوپارامتری با فیلترهای مختلف برای آبخوان سنگی
Fig. 5 A sample of base flow separation by Eckhart method using different filters and rocky aquifer

مقایسه نتایج عددی و گرافیکی میانگین دبی جریان پایه و جریان اصلی در تمامی روش‌های بکار گرفته شده نشان می‌دهد که درصد بالایی از جریان اصلی رودخانه به آب‌پایه اختصاص دارد. دلیل این امر را می‌توان در کمیت و کیفیت بارش منطقه، زمین‌شناسی و عوامل تکتونیک منطقه و تغییرات ارتفاع حوضه جستجو کرد، به‌طوری‌که میانگین بارش سالانه در حوضه مورد مطالعه در ایستگاه گل‌گل به مقدار ۴۵۶ mm و سنگ‌شناسی غالب حوضه تشکیلات آهکی بوده که قابلیت نفوذ بالایی داشته و ارتفاع حوضه نیز دامنه وسیعی را به خود اختصاص داده است. از طرف دیگر تناسب نسبتاً مناسبی از کاربری اراضی در حوضه برقرار بوده و پوشش گیاهی جنگلی و مرتعی و همچنین باغات متعدد و اراضی دیم از جمله مهم‌ترین کاربری‌های غالب منطقه است که باعث نفوذ جریان و تقویت آب‌های زیرزمینی شده و بخش عمده‌ای از جریان‌های سطحی را به جریان آب‌پایه تبدیل می‌کنند.

۳-۴- ارزیابی کارایی روش‌های تفکیک جریان پایه

نتایج تفکیک دبی پایه با روش‌های مختلف نشان داد که روش‌های تفکیک جریان پایه در ایستگاه گل‌گل، نتایج با دقت‌های متفاوتی را نشان می‌دهد. مقدار ضریب کارایی (NS) با سه مقدار ۰/۸۸۷، ۰/۸۷۲ و ۰/۸۷۲ به ترتیب برای روش‌های LHWAT، EWHAT و EPBFI نتایج مناسبی را نشان دادند. روش‌های تعیین‌شده با مقادیر خطا نیز بررسی شدند که روش‌های LHWAT و EPWHAT به ترتیب با ضرایب ۰/۹۷۵، ۰/۹ و ۰/۹۹۵ دارای کمترین خطا هستند. از نظر معیار RMSE نیز روش LHWAT با ضریب ۰/۹۷۵، EPWHAT با ضریب ۰/۹۹۵ و EPBFI با ضریب ۰/۹۹۵، به ترتیب، ۰/۶۰، ۰/۶۳ و ۰/۸۷ خطا را نشان دادند. به‌طورکلی با مقایسه مقادیر خطاها، روش LHWAT با ضریب ۰/۹۷۵، مناسب‌ترین روش برای جداسازی جریان پایه در حوضه آبخیز گل‌گل است. نتایج آزمون خطا در جدول (۵) نشان داده شده است.

در این راستا، نتایج پژوهش (Combalicer et al. (2008) نشان داد که روش‌های WHAT و BFI از مناسب‌ترین روش‌ها برای تفکیک جریان پایه می‌باشند، همچنین Taimori et al. (2012) روش‌های حداقل محلی و روش فیلتر عددی یک‌پارامتره و دوپارامتره به‌منظور برآورد دبی پایه جریان روزانه را بررسی و کاهش آب‌پایه‌ی برآوردی را با

۳-۳- مقایسه جریان پایه با روش‌های مختلف

۳-۳-۱- مقایسه شاخص BFI با روش WETSPRO

نتایج آزمون مقایسه نتایج جریان پایه بین شاخص BFI و روش WETSPRO نشان داد که میانگین معیار براساس این روش برابر با ۰/۵۸۶ بوده و در سطح خطای کم‌تر از ۰/۰۵ معنادار است، یعنی تفاوت بین معیار WETSPRO و شاخص BFI معنادار است که نشان‌دهنده نامناسب بودن این روش برای تفکیک جریان پایه در این حوضه و حوضه‌های مشابه است.

۳-۳-۲- مقایسه شاخص BFI و روش‌های فیلتر عددی برگشتی یک‌پارامتره

مقایسه نتایج شاخص جریان پایه با روش LHBFI، با ضرایب مختلف نشان داده است که میانگین جریان پایه اختلاف زیادی با میانگین شاخص جریان پایه دارد. از طرف دیگر مقایسه نتایج نشان داد که میانگین جریان پایه در روش LHWAT با ضریب فیلتر ۰/۹۷۵ دارای میانگین ۱/۲۲ بوده و دارای اختلاف معنادار نبوده است. نتایج شاخص BFI در سطح ۹۵ درصد در ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه با روش LHWAT با ضریب ۰/۹۷۵ دارای ارتباط معناداری است.

۳-۳-۳- مقایسه شاخص BFI و روش‌های عددی برگشتی دوپارامتره

الف- آبخوان متخلخل

نتایج مقایسه نشان داد که مقدار شاخص جریان پایه با نتایج روش EPWHAT و ضریب فیلتر ۰/۹۹۰ دارای ارتباطی معنادار بوده و با سایر روش‌ها اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از شاخص BFI در سطح اطمینان ۰/۹۵ در ایستگاه گل‌گل با نتایج روش EPBFI با ضریب فیلتر ۰/۹۹ و میانگین ۱/۲۱ برای جریان دائمی با آبخوان متخلخل، اختلاف معناداری نداشته و در بقیه موارد دارای اختلاف می‌باشند.

ب- آبخوان سنگی

با توجه به ماهیت و شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه، نتایج استفاده از روش‌های تجزیه جریان پایه نشان داد که فرض سنگی بودن آبخوان با شرایط موجود همخوانی نداشته و نتایج به‌دست‌آمده با واقعیت‌های موجود اختلاف زیادی را نشان می‌دهد.

آماري انتخاب کردند که تطابق کمتری با نتایج مطالعه حاضر دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به شرایط لیتولوژی و توپوگرافی و حتی موقعیت جغرافیایی حوضه‌ها، روش‌های متفاوتی می‌توانند برای حوضه‌های مورد مطالعه مناسب باشند.

افزایش ضریب فیلترینگ مشاهده کردند که با نتایج پژوهش حاضر تطابق نسبی دارند. در حالی که (Zare Bidaki et al. 2019) در ایستگاه آبرده رودخانه تیره لرستان، روش لین هولیک (BFI) با فیلتر ۰/۹۷۵ را با توجه به معیار RMSE و NS مناسب‌ترین روش جهت تفکیک آب پایه در طول ۳۰ yr

جدول ۵- مقایسه نتایج ارزیابی کارایی روش‌های مختلف برآورد دبی پایه با استفاده از معیارهای آماری

Table 5 Comparison the results of different methods for base flow separation using statistical criteria

No.	Method	Nash-Sutcliffe	RMSE	MAE	No.	Method	Nash-Sutcliffe	RMSE	MAE
1	WETSPRO	0.55	1.27	1.62	20	ERBFI (0.9)	0.54	1.27	1.63
2	LHBFI (0.9)	0.53	1.30	1.70	21	ERBFI (0.925)	0.55	1.26	1.60
3	LHBFI (0.925)	0.63	1.14	1.13	22	ERBFI (0.950)	0.55	1.26	1.60
4	LHBFI (0.950)	0.75	0.95	0.90	23	ERBFI (0.975)	0.52	1.30	1.70
5	LHBFI (0.975)	0.86	0.71	0.50	24	ERBFI (0.990)	0.44	1.41	2.00
6	LHBFI (0.990)	0.86	0.69	0.48	25	ERBFI (0.995)	0.38	1.49	2.22
7	LHBFI (0.995)	0.82	0.80	0.64	26	EPWHAT (0.9)	-0.07	1.97	3.91
8	LHWHAT (0.9)	0.61	1.18	0.40	27	EPWHAT (0.925)	0.11	1.78	3.19
9	LHWHAT (0.925)	0.72	0.99	0.99	28	EPWHAT (0.950)	0.35	1.52	2.33
10	LHWHAT (0.950)	0.82	0.78	0.62	29	EPWHAT (0.975)	0.65	1.11	1.23
11	LHWHAT (0.975)	0.90	0.60	0.36	30	EPWHAT (0.990)	0.86	0.69	0.48
12	LHWHAT (0.990)	0.84	0.75	0.57	31	EPWHAT (0.995)	0.88	0.63	0.40
13	LHWHAT (0.995)	0.7	1.03	1.07	32	ERWHAT (0.9)	0.54	1.27	1.63
14	EPBFI (0.9)	-0.12	2.01	4.07	33	ERWHAT (0.925)	0.55	1.26	1.60
15	EPBFI (0.925)	0.74	1.83	3.35	34	ERWHAT (0.950)	0.55	1.26	1.60
16	EPBFI (0.950)	0.31	1.57	2.49	35	ERWHAT (0.975)	0.50	1.33	1.78
17	EPBFI (0.975)	0.60	1.19	1.43	36	ERWHAT (0.990)	0.42	1.43	2.06
18	EPBFI (0.990)	0.82	0.80	0.64	37	ERWHAT (0.995)	0.35	1.53	2.34
19	EPBFI (0.995)	0.87	0.67	1.95					

دارد. از نظر انحراف میانگین جریان پایه نسبت به شاخص جریان پایه نیز پس از روش LHWHAT، روش‌های EPWHAT با ضریب ۰/۹۹۵ و سپس EPBFI با ضریب ۰/۹۹۵ به دلیل بیشترین تکرار در بین سایر روش‌ها، مناسب‌ترین می‌باشند.

۳- روش EPWHAT با ضریب فیلتر ۰/۹۹۰ به دلیل نزدیک بودن میانگین جریان پایه آن $1/25 \text{ m}^3/\text{s}$ به میانگین شاخص جریان پایه $1/24 \text{ m}^3/\text{s}$ را روش مناسبی در نظر گرفت. بنابراین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش WHAT روش مناسبی برای تخمین آب پایه در این حوضه و حوضه‌های مشابه می‌باشد.

۴- روش‌های تأیید و معرفی شده فوق برای حوزه آبخیز گل-گل و حوضه‌های نزدیک مشابه از کارایی مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات شدید اقلیمی و خشک‌سالی‌های دوره‌ای ایران و منطقه مورد پژوهش، ارزش-دهی به آب‌های جریان پایه به‌عنوان آب مورد نیاز فعالیت‌های

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سه روش متفاوت و مرسوم WETSPRO، فیلتر عددی برگشتی یک پارامتری و فیلتر عددی برگشتی دو پارامتری برای حالات مختلف و ضرایب فیلتر متفاوت با استفاده از روش‌های شاخص جریان پایه و نرم‌افزار تحت وب WHAT، جریان پایه ایستگاه هیدرومتری گل‌گل در استان ایلام برای یک دوره ۲۵ yr آماری از جریان اصلی رودخانه تفکیک و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفتند. براساس محاسبات و تحلیل‌های انجام شده، موارد زیر حاصل شده است:

۱- آب پایه در این ایستگاه بخش عمده‌ای از جریان اصلی را به خود اختصاص داده است، طوری که میانگین کل جریان $1/945 \text{ m}^3/\text{s}$ و میانگین شاخص جریان پایه $1/245 \text{ m}^3/\text{s}$ است.

۲- روش LHWHAT از بین سایر روش‌های بکار برده شده دارای کمترین انحراف و خطا را نسبت به سایر روش‌ها را

دسترسی به داده‌ها

داده‌های مورد استفاده این پژوهش مربوط به شرکت آب منطقه‌ای ایلام است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

محیط‌زیستی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بایستی مدنظر تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مقاله در راستای اهداف هسته پژوهشی مدیریت حوزه آبخیز معاونت پژوهشی دانشگاه ایلام تهیه شده که از ایشان قدردانی بعمل می‌آید. داده‌های این تحقیق از شرکت آب منطقه‌ای ایلام تهیه شده است که همکاری ایشان شایسته تقدیر است.

References

- Ahiablame L., Chaubey I., Engel B., Cherkauer K. and Merwade V. (2013). Estimation of annual base flow at ungauged sites in Indiana USA. *J. Hydrol.*, 476, 13-27.
- Arnold J. G. and Allen P. M. (1999). Validation of automated methods for estimating base flow and groundwater recharge from stream flow records. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 35(2), 411- 424.
- Bloomfield J., Allen D. and Griffiths K. (2009). Examining geological controls on base flow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. *J. Hydrol.*, 373, 164–176.
- Bosch D. D., Arnold J. G., Allen P. G., Lim K. J. and Park Y. S. (2017). Temporal variations in baseflow for the Little River experimental watershed in South Georgia, USA. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 10, 110–121.
- Capesius, J. P. and Arnold L. R. (2012). Comparison of Two Methods for Estimating Base Flow in Selected Reaches of the South Platte River, Colorado, US. *Geological Survey: Reston, VA, USA.*
- Chimtengo M., Ngongondo C., Tumbare M. and Monjerezi M. (2014). Analysing changes in water availability to assess environmental water requirements in the Rivirivi River basin, Southern Malawi. *Phys. Chem. Earth A/B/C*, 67, 202–213.
- Combalicer E. A., Lee S. H., Ahan S., Kim D. Y. and Im S. (2008). Comparing ground water recharge and Base flow in The Bukmoongol Small-Forested Watershed, Korea. *J. Earth Syst. Sci.*, 117(5), 553-566.
- Hasani M., Rahimi M., Samee M. and Khamoushi M. R. (2012). Study of efficiency of various base flow separation methods in arid and semi-arid rivers (Case study: Hablehroud basin). *Arid. Biom. Scie. Res. J.*, 2(2), 10-22 [In Persian].
- Kazemi R. and Fourod Sh. (2017). Regional investigation and estimation of base flow index in homogeneous basins of Kerman Providence. *J. Watershed Manag. Eng.*, 9(1), 97-107 [In Persian].
- Kazemi R., Safari A., Karam A., Porhemat J. (2017). Investigation on impact of stream flow data temporal resolution on base flow separation in Karkhe Basin. *J. Watershed Manag. Eng.*, 8(4), 400-413 [In Persian].
- Kazemi R. and Porhemmat J. (2020). Calibration of recursive digital filters to separate the base flow, case study: Karkheh Basin. *J. Watershed Manag. Eng.*, 12(1), 30-43 [In Persian].
- Kelly L., Kalin R. M., Bertram D., Kanjaye M., Nkhata M. and Sibande H. (2019). Quantification of Temporal Variations in Base Flow Index Using Sporadic River Data: Application to the Bua Catchment, Malawi. *Water*, 11, 9.
- Lim K. J., Engel B. A., Tang Z., Choi J., Kim K. S., Muthukrishnan S. and Tripathy D. (2005). Automated web GIS based hydrograph analysis tool, WHAT. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 41(6), 1407–1416. Available online at: <https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT>
- Lodouche A., Probst D., Viville S., Baque M., Loubet J., Probst L. and Bariac T. (2001). Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *J. Hydrol.*, 242, 255-274.



- Lyne V. D. and Hollick M. (1979). Stochastic time-variable rainfall runoff modeling. Hydrology and Water Resources Symposium, Institute of Engineers Australia National Conference, 89–92.
- Mehri S., Mostafazadeh R., Esmali Ouri A. and Ghorbani A. (2017). Comparison of base flow separation techniques and its seasonal variations in some watersheds of Ardabil Province. *J. Conserv. Utiliz. Nat. Resour.*, 6(2), 123-137 [In Persian].
- Mei Y. and Anagnostou E. N. (2015). A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *J. Hydrol.*, 523, 636–649.
- Mosavipor F. and Saied Tabtabaei S. (2011). Optimal removal of industrial audio noise by single channel method. M.Sc. Thesis, Shahed University, (Iran) [In Persian].
- Nathan R. J, and McMahon T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *J. Water Resour. Res.*, 26(7), 1465-1473.
- Rezaei Tavabea K., Taheri Azad L., Mahmodi M., Yazdanpanah A. (2007). An approach to the barriers and limitations of water resources management and provide management solutions in sustainable development. The 9th national seminar on irrigation and evaporation reduction, Kerman, Iran [In Persian].
- Santhi C., Allen M. P., Muttian R. S., Arnold J. G. and Tuppad P. (2008). Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions. *J. Hydrol.*, 351, 139– 153
- Smakhtin V. U. (2001). Low flow hydrology: A review. *J. Hydrol.*, 240, 147-186.
- Soltani A. and Soltani M. (2018). Assessment of base flow separation methods in Karaj dam watershed. *J. Environ. Water Eng.*, 4(3), 216 – 228 [In Persian].
- Stewart M., Cimino J. and Ross M. (2007). Calibration of base flow separation methods with stream flow conductivity. *Ground water*, 45(1), 17-27.
- Taimori M., Ghanbarpor M., Bashirgonbad M., Zolfaghari M., Kazemikia S. (2012). Comparing of base flow index of different methods of hydrograph analysis in some rivers of West Azerbaijan. *J. Water Soil Sci.*, 15(57), 2019-228 [In Persian].
- Tallaksen L. M. and Van Lanen H. A. (2004). Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Stream flow and Groundwater, Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 579 pp.
- Tavakoli M., Karimi H. and Norollahi H. (2018). Investigation the effects of climate change on water resources of Ilam Dam Watershed. *Watershed Eng. Manag.*, 10 (2), 157-170 [In Persian].
- Willems P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall–runoff models. *Environ. Model. Softw.*, 24(3), 311–321.
- Zare Bidaki R., Gharahi N. and Mahdianfard M. (2019). Comparison of separation methods for baseflow from direct runoff in Doroud Basin, Lorestan, Iran. *J. Environ. Water Eng.*, 5(3), 200–212 [In Persian].

How to cite this paper:

Azarinvand, F., Tavakoli, M. and Karimi, H. (2022). Efficiency Assessment of Baseflow Separation Methods in Gol-Gol Catchment, Ilam. *Environ. Water Eng.*, 8(2), 379-394. DOI: 10.22034/JEWE.2021.297503.1602