ارزیابی روش‌های تفکیک جریان پایه بر اساس آنالیز منحنی خشکیدگی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گرگان‌رود)

سیدرضا حسینی دوکی[۱*] ، سید مرتضی سیدیان[۲]، حامد روحانی[۳]، معصومه فراستی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس، (*seyedreza.hosseinidoki@gmail.com*)

۲- استادیار گروه آبخیزداری، دانشگاه گنبدکاووس، (*s.m.seyedian@gmail.com*)

۳- استادیار گروه آبخیزداری، دانشگاه گنبدکاووس، (*rouhani.hamed@yahoo.com*)

۴- استادیار گروه آبخیزداری، دانشگاه گنبدکاووس، (*farasati2760@gmail.com*)

چکیده

در این پژوهش، جریان پایه و شاخص آن با استفاده از جریان روزانه هشت ایستگاه هیدرومتری واقع در حوزه آبخیز گرگان‌رود در یک دوره ۳۴ ساله با روش‌های مختلف برآورد گردید. در روش Eckhardt به عنوان مبنا مقایسه، پارامتر α با آنالیز منحنی خشکیدگی، در ایستگاه‌های مورد پژوهش تعیین گردید. این مقدار بین ۰/۷۲ و ۰/۹۰در ایستگاه‌ها در نوسان است که کمترین آن متعلق به ایستگاه جنگلده و بیشترین آن مربوط به ایستگاه نوده بدست آمد. پارامتر BFI_{max} در روش Eckhardt با استفاده از نقشه‌های زمین شناسی حوزه‌ها و بررسی نفوذپذیری سازندها تعیین گردید که کمترین آن مربوط به ایستگاه وطنا با ۰/۳۲ و بیشترین آن مربوط به ایستگاه تمر با میزان ۰/۶۵ بدست آمد. سپس با استفاده از این دو پارامتر جریان پایه به روش اکهارت در منطقه مورد پژوهش تفکیک و شاخص جریان پایه محاسبه گردید. مقایسه شاخص جریان پایه روش‌های مختلف با روش Eckhardt در منطقه مورد مطالعه با معیارهای سنجش MAE، RMSE و ضریب همبستگی r صورت گرفت. نتایج نشان داد روش فیلتر رقومی One-parameter با مقدار MAE، RMSE و r به ترتیب برابر با (۰/۱۱۲، ۰/۱۱۵ و ۰/۹۲۴) و روش فیلتر رقومی Chapman با میزانMAE، RMSE و r به ترتیب برابر با (۰/۱۱۳، ۰/۱۱۶ و ۰/۹۳۱) دارای کمترین میزان میانگین مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب همستگی را از خود نشان داد و همچنین شاخص جریان پایه در هر دو روش دارای کمترین انحراف استاندارد (SD=0.04) است که به عنوان بهترین روش‌های تفکیک جریان در منطقه مورد پژوهش انتخاب گردید.

واژه‌های کلیدی: جریان پایه، منحنی خشکیدگی، گرگان‌رود

*نویسنده مسئول: seyedreza.hosseinidoki@gmail.com

مقدمه

شناخت ظرفیت‌های آبی کشور و تقاضا برای آب از مولفه‌های اصلی تصمیم‌گیری برای مدیریت منابع، آبخیزها و پدیده‌هایی نظیر خشک‌سالی به شمار می‌رود. در فضای مدیریت منابع آب‌های سطحی و ریسک خشک‌سالی کشور، همچنان فقدان یک سامانه که تصمیم گیران را در اتخاذ تصمیمات درست و به موقع پشتیبانی کند، کاملا مشهود است. برای ایجاد چنین سامانه‌ای، لازم است اقدامات اساسی در خصوص شناخت موضوع و ظرفیت‌های داده‌های کشور مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. از این رو برآورد ظرفیت‌های آبی حوزه‌های آبخیز، برآورد و تعیین میزان کمی فرآیندهای تولید روان‌آب و انتقال آن به نقطه خروجی حوضه آبخیزو تعیین جریان پایه حوزه‌های آبخیز از اهمیت خاصی برخوردار است. دبی پایه بخش مهمی از جریان رودخانه‌ها را تشکیل می‌دهد که آن را می‌توان تقریبی از جریان آب‌های زیرزمینی قلمداد نمود (اسماختین، ۲۰۰۱)[۲۴]. علاوه بر این، جریان پایه در تحلیل بیلان آبی و بررسی پاسخ هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز حائز اهمیت است. تعیین دقیق‌تر مقدار جریان پایه در مباحث زیست محیطی، مدیریت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، کنترل و هدایت روان‌آب و تخلیه‌جریان‌های سطحی در اراضی کشاورزی و انتقال آن‌ها به محل مناسب و خارج از منطقه، حائز اهمیت بوده و مدل‌ها و روش‌های متفاوتی جهت تعیین این مقدار به وسیله محققین، سازمان‌های مطالعاتی-تحقیقاتی درکشورهای مختلف جهان ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده تاکنون، جریان پایه را به عنوان منبعی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی قلمداد کرده و از روان‌آب و سازند زمین‌شناسی برای تعیین میزان سیل‌خیزی استفاده کرده است. یک وجه اساسی برای مدیریت بهینه منابع آب یک منطقه نیاز به دانستن مقادیر جریان حداقل است که در هیدرولوژی به آن جریان پایه یا آب پایه گفته می‌شود و برای تعیین مقادیر آن نیاز به تجزیه هیدروگراف است. اولین گام در آنالیز هیدروگراف نیز تجزیه جریان به دو مؤلفه دبی پایه و جریان سطحی است و هرچند جداسازی جریان معمولاً به روش‌های مختلفی قابل انجام است اما روش دقیق‌تر، استفاده از مواد شیمیایی یا ردیاب‌های ایزوتوپ و روش بیلان جرمی است [۲۳]. روش‌های تحلیلی متعددی برای تجزیه جریان پایه از کل رواناب توسعه داده شده است و علیرغم اینکه بیشتر آن‌ها مبنای فیزیکی دارند، انتخاب اجزای آنها اختیاری است [۹]. یکی از ساده‌ترین روش‌ها، تجزیه نظری هیدروگراف جریان است که غیر دقیق و وقت‌گیر است زیرا اغلب نتایج به‌دست آمده از این روش نیز بین محققان مختلف یکسان نیست [۲۵]. در دهه گذشته برنامه‌های رایانه‌ای و روش‌های جدیدی برای تسهیل در این امر فراهم آورده شده است. یک روش فیلتر دیجیتالی توسط چاپمن و ماکسول (۱۹۹۶) و یک مدل مفهومی ساده به نام GROUND نیز توسط کولهاوی و همکارانش (۲۰۰۱) به ترتیب برای جداسازی جریان پایه و رواناب مستقیم پیشنهاد شد [۱۶،۱۸]. اکهارت (۲۰۰۵) نیز در تحقیق خود یک الگوی تجربی برای الگوریتم فیلترینگ با فرض رابطه خطی جریان و ذخیره آبخوان توسعه داد و مفهوم شاخص جریان پایه حداکثر مقادیر پیشنهادی در حوضه‌های مختلف و کاربردهای آن در تجزیه جریان را بیان نمود [۱۳]. روش‌های مختلف آنالیز جریان با استفاده از روش همبستگی، توسط ناتان و مک ماهون (۱۹۹۰) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها روش ساده فیلتر رقومی یک پارامتره با ضریب پارامتر ۰/۹۲۵ را پیشنهاد نمودند و نتایج حاصل از این روش را با روش‌های قدیمی و گرافیکی متناسب دانسته‌اند [۱۹]. روش‌های مبتنی بر فیلترهای رقومی، با استفاده از هدایت جریان الکتریکی توسط اسماختین (۲۰۰۱) مورد پژوهش و ارزیابی قرار گرفت. اسماختین این روش را برای واسنجی روش‌های رقومی مناسب تشخیص داد و به طور خاص کاربرد روش HYSEP را برای تمام حوزه‌ها نادرست دانسته و واسنجی کردن آن را با این روش جدید پیشنهاد داد [۲۴]. برای تعیین جریان پایه در سرشاخه‌های حوضه رودخانه زرد، روش دو پارامتره کالینین به‌وسیله پژوهشگران بررسی و نشان داده شد که جریان پایه نقش بیشتری را نسبت به جریان سطحی در رودخانه ایفا می‌کند و تغییرات نسبتًا کمتری نیز دارد (چن و همکاران، ۲۰۰۸) [۱۲]. هم چنین، آن‌ها به تحلیل حساسیت پارامترهای این روش پرداخته و حساسیت جریان پایه به ثابت خشکیدگی را تأیید نمودند. هفت روش مختلف استخراج جریان پایه با استفاده از تحلیل آماری و روش همبستگی توسط اکهارد (۲۰۰۸) مقایسه و تحلیل شد . در نتایج پژوهش‌های منتشر شده توسط اکهارد، الگوریتم پیشنهادی تحت

عنوان فیلتر رقومی برگشتی اکهارد، مناسب ترین روش شناخته شد [۱۴]. تحقیقی با هدف توسعه‌ی یک راهکار جامع برای تجزیه‌ی هیدروگراف توسط اوبرین و همکاران (۲۰۱۳) برای کمی کردن مسیرهای هیدرولوژیک در حوضه‌ی رودخانه‌های ایرلند انجام شد که تفاوت روش‌های مختلف تجزیه هیدروگراف را نشان داد. نتایج نشان داد با حذف روش‌های فاصله ثابت و متحرک اختلاف بین مقادیر BFI کمتر شد و همچنین الگوریتم‌های بوغتون و اکهارت با وجود سریع و ساده‌تر بودن پاسخ‌های مناسب‌تری هم دادند [۲۰]. ارفع‌نیا و سامانی (۱۳۸۴) با ترسیم منحنی جدایش هیدروگراف رودخانه در حوزه آبخیز کارستی زاینده رود و با به کارگیری سه روش محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی متحرک و حداقل محلی و مقایسه نتایج، تطابق بسیار خوب این روش‌ها را نشان داده به طوری که اختلاف میان نتایج بلند مدت همواره کمتر از ۲/۷ درصد می‌باشد [۱]. قنبرپور و همکاران (۱۳۸۷) با مقایسه روش‌های برآورد جریان پایه بر اساس تفکیک هیدروگراف جریان در حوزه آبخیز کارون، ثابت نمود که روش خودکار فیلتر عدد برگشتی با ضریب α برابر ۰/۹۲۵ به عنوان دقیق‌ترین روش به منظور استخراج مقادیر دبی پایه جریان در آن منطقه بوده و شاخص جریان پایه محاسبه شده به روش انتخابی، بین ۰/۷۹ تا ۰/۸۸ متغیر است [۵]. اسمعیلی و سمیعی (۱۳۹۰) با مقایسه روش‌های مختلف تفکیک هیدروگراف جریان (فیلتر عددی Eckhardt، Chapman، Lyne & Hollick و مدل PART) در رودخانه حنیفقان نتیجه گرفتند که نتایج روش PART و Eckhardt در برآورد جریان پایه به یکدیگر نزدیک می‌باشند. مقایسه نتایج، تطابق بسیار خوب این روش‌ها را نشان داد [۲]. زارع بیدکی و همکاران (۱۳۹۴) به برآورد جریان پایهٔ رودخانهٔ تیرهٔ لرستان به منظور ارزیابی جریان زیست محیطی با استفاده از روش‌های BFI، فیلتر دیجیتال برگشتی و Hysep پرداختند. نتایج نشان داد که بین ۷۴ تا ۷۸ درصد جریان رودخانه را آب پایه تشکیل می‌دهد و نتایج حاصل از مقایسه‌ی روش‌های یاد شده با استفاده از معیارهای خطا نشان داد روش‌های محدودهٔ زمانی جابه‌جا شونده و فیلتر دیجیتال برگشتی لین و هولیک با ضریب فیلتر ۰/۹ روش‌های مناسبی برای جداسازی آب پایه از جریان روزانهٔ این رودخانه هستند [۵]. کاظمی و قرمز چشمه (۱۳۹۵) روش‌های مختلف استخراج جریان پایه با استفاده از شاخص منحنی تداوم جریان را در منطقه ناحیه خزری با استفاده از روش‌های مختلف فیلتر عددی برگشتی مقایسه کردند و نتایج حاصل از آن را با شاخص منحنی تداوم جریان با نسبت هیدرولوژیکی Q90/Q50 تحلیل کردند. در این تحقیق روش فیلتر رقومی تک پارامتره با مقدار ضریب برابر با ۰/۹۲۵ به عنوان بهترین روش در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد [۷].

هدف این پژوهش بدست آوردن جریان پایه و شاخص مربوط به آن با روش های مختلف تفکیک جریان و انتخاب مناسب ترین روش در برآورد جریان پایه در منطقه مورد پژوهش است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه آبخیز گرگانرود با مساحت ۱۱۳۸۰ کیلومترمربع در شمال کشور و در جنوب شرقی دریاچه خزر واقع شده است. این منطقه از شمال به حوضه آبریز اترک سفلی، از جنوب به حوضه‌های آبریز کویر نمک، از غرب به دریای خزر و از جنوب‌غربی به حوضه نکارود محدود شده است. ارتفاعات البرز بخش‌های جنوبی و شرقی حوضه را تشکیل می‌دهند. از نظر موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گرگانرود بین عرض‌های جغرافیای '۳۳ °۳۶ تا '۴۵ °۳۷ شمالی و در طول‌های جغرافیایی '۰۳ °۵۴ تا '۱۳ °۴۵ شرقی قرار دارد. حداکثر ارتفاع این حوضه در حدود ۶۰۰ متر و حداقل آن ۲۶ متر از سطح دریا می‌باشد. در این پژوهش با توجه به کفایت داده‌های مورد نیاز هشت ایستگاه هیدرومتری (تمر، لزوره، جنگلده، نوده، ارازکوسه، سدگرگان، تقی آباد و وطنا) از حوزه آبخیز گرگانرود واقع در استان گلستان با پایه‌ی مشترک آماری ۳۴ ساله (۱۳۶۰ تا ۱۳۹۳) دبی روزانه انتخاب گردیدند. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه

	رودخانه	ایستگاه	کد ایستگاه	مختصات متریک		ارتفاع (m)	متوسط دبی جریان (m3/s)	انحراف استاندارد دبی جریان	نسبت هیدرولوژیکی Q90/Q50
				X	Y				
حوضه آبخیز گرگانرود	گرگانرود	تمر	۱۲-۰۰۵	۳۶۷۵۸۴	۴۱۵۰۵۰۴	۱۳۲	۱/۵۶	۴/۱۸	۰/۲۲
	چهل‌چای	لزوره	۱۲-۰۱۳	۳۵۸۲۵۸	۴۱۲۰۹۶۵	۱۹۰	۲/۵۲	۳/۳۹	۰/۴۲
	نرماب	جنگلده	۱۲-۰۱۵	۳۵۳۵۰۵	۴۱۱۴۶۳۶	۱۸۰	۱/۵۴	۵/۰۶	۰/۲۵
	خرمالو	نوده	۱۲-۰۱۷	۳۴۶۶۱۷	۴۱۰۲۹۵۳	۲۸۰	۲/۱۸	۲/۵۱	۰/۳۴
	گرگانرود	ارازکوسه	۱۲-۰۱۹	۳۳۶۱۳۲	۴۱۲۱۴۱۴	۳۵	۵/۴۸	۹/۳۹	۰/۲۷
	گرگانرود	سدگرگان	۱۲-۰۲۵	۲۹۹۵۱۰	۴۱۱۹۹۵۸	۱۲	۷/۹۴	۱۶/۸۶	۰/۱۶
	جعفرآباد	تقی آباد	۱۲-۰۳۳	۲۸۸۹۸۶	۴۰۸۳۲۳۹	۱۰۰	۰/۳۹	۱/۳۷	۰/۳۰
	گز	وطنا	۱۲-۰۵۳	۷۶۵۰۲۲	۴۰۶۷۵۶۰	۱۰۰	۰/۱۶	۰/۵۹	۰/۲۳

روش کار

در بررسی طیف فراوانی هیدروگراف، جریان پایه دارای طول موج بلندتر و رواناب مستقیم فراوانی بیشتری دارد. جریان پایه در ارتباط با ذخیره آب زیرزمینی بوده و فرض کلی براین اساس است که جریان خروجی از آبخوان در دوره های بدون تغذیه رابطه خطی با ذخیره آن دارد (اکهارت، ۲۰۰۸) [۱۴]. برای این منظور روش‌های زیادی برای برآورد هرچه بهتر و دقیق‌تر تجزیه هیدروگراف وجود دارد. که دقیق ترین آن استفاده از ردیاب‌های شیمیایی می‌باشد که وقت‌گیر و هزینه‌بر است. بدین منظور مناسب ترین روش برای تجزیه هیدروگراف و تخمین دبی پایه می‌توان به روش‌های اتوماتیک فیلترینگ نام برد.

هیدروگراف جریان شامل دو مولفه اصلی می‌باشد. الف) رواناب مستقیم، ب) جریان پایه

(۱)

براساس رابطه ۱ $q_{(i)}$ جریان کل در زمان i ام، $q_{b(i)}$ جریان پایه در زمان i ام و $q_{f(i)}$ رواناب مستقیم در گام زمانی i، می‌باشد.

شاخص جریان پایه (Base Flow Index, BFI)

شاخص دبی پایه (BFI) یک نسبت بدون بعدی است که به‌وسیله انستیتوی هیدرولوژی (۱۹۸۰) تعریف شد. این شاخص از داده‌های روزانه جریان رودخانه‌ای محاسبه می‌شود. برای محاسبهٔ BFI ابتدا دبی پایه از روان‌آب سطحی تفکیک می‌شود. سپس، از تقسیم حجم دبی پایه بر حجم کل روان‌آب برای هر سال و یا برای کل دوره‌ی مشاهدات به‌دست می‌آید. شاخص BFI به‌صورت پارامتری مؤثری در مدل‌سازی بارش روان‌آب به کار می‌رود. همچنین، این شاخص را می‌توان به‌عنوان مشخصه یک حوضه برای مقایسه خصوصیات جریان در حوضه‌های مختلف به کار برد. شاخص BFI به‌طور کلی بیانگر این مطلب است که چه درصدی از دبی پایه در تشکیل روان‌آب مشارکت دارد [۱۹]. مقدار زیاد این شاخص به این معنا است که حوضه رژیم جریان پایداری دارد و در طول دوره خشکی قادر به حفظ جریان رودخانه است. شاخص جریان پایه به عنوان توصیفی رضایت بخش در مطالعه‌ی جریان‌های کم انجام شده است. شاخص جریان پایه عموما وابستگی زیادی به خصوصیات هیدرولوژیکی خاک، زمین‌شناسی و سایر ویژگی‌های مرتبط با ذخیره سازی دارد [۱۵و۱۷].

منحنی خشکیدگی (Recession Curve, RC)

یکی از روش‌هایی که به عنوان مبنا برای بررسی دقت روش‌های مختلف تعیین دبی پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد روش منحنی خشکیدگی است. این روش بر اساس تحلیل سری زمانی جریان رودخانه و تعیین مولفه‌های آن استوار است. این روش نتیجه قابل

قبولی می‌دهد اما از مشکلات آن، سختی کار، صرف وقت زیاد، مشکلات اجرایی و تعداد بسیار زیاد سیلاب‌های رخداده در سال است (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۷) [۵]. همچنین روش‌هایی به منظور میانگین‌گیری یا ترکیب شاخه‌های خشکیدگی مجزا به منظور یافتن افت جریان پایه مبنا در یک حوضه وجود دارد که می‌توان به روش منحنی افت اصلی (Master Recession Curve, MRC) اشاره کرد (تیموری، ۱۳۹۳) [۳]. برای تعیین ضریب خشکیدگی مرتبط با حوزه می‌توان به صورت رابطه‌های ۲ و ۳ عمل کرد.

$$Q_t = Q_0 e^{-at} \quad (۲)$$

$$K = \exp(-a) \quad (۳)$$

که Q_t دبی در زمان t، Q_0 دبی اولیه، a ثابت خشکیدگی و K ضریب خشکیدگی مرتبط با حوزه است.

HYSEP

اساس کار این برنامه رایانه‌ای که توسط سلوتو و کروس (۱۹۹۶) آزمایش و توسط پتیجان و هنینگ ارائه شد [۲۳و۲۱]. مبنا کار این برنامه بر پایه‌ی روش‌های ترسیمی است که در آن از محدوده زمانی 2N* برای ترسیم منحنی جدایش هیدروگراف استفاده می‌شود. برای بدست آوردن این پارامتر با استفاده از فرمول تجربی رابطه (۲) زمان پایه N و سپس دو برابر زمان پایه 2N در نظر گرفته می‌شود و در مرحله بعد نزدیک ترین عدد صحیح به عنوان مقدار 2N* در نظر گرفته می‌شود. همچنین در رابطه ۴، A مساحت بالادست ایستگاه آب‌سنجی بر حسب کیلومتر مربع است. این روش خود شامل سه روش محدوده زمانی ثابت، روش محدوده زمانی جابه‌جاشونده و روش حداقل محلی می‌باشد. تا کنون از این روش‌ها به طور گسترده در حوضه‌های مختلف استفاده شده است [۴].

(٤)

روش محدوده زمانی ثابت (Fixed Interval)

این روش حداقل مقادیر دبی در هر گام زمانی را به تمام روزهای آن گام نسبت می دهد و از پیوستگی مقادیر نسبت داده شده، هیدروگراف جریان پایه به دست می‌آید [۱].

روش محدوده زمانی جابه‌جاشونده (Sliding Interval)

برای تعیین جریان پایه یک روز مشخص در این روش، حداقل دبی در محدوده زمانی [0.50(2N*-1)] روز قبل و بعد از آن روز مشخص می‌شود. با اتصال نقاط بدست آمده بدین صورت، منحنی جدایش هیدروگراف به دست می‌آید [۱].

روش حداقل محلی (Local Minimum)

این روش به عنوان یکی از ساده ترین روش های تفکیک هیدروگراف بوده و عملکرد آن به طبیعت جریان بستگی ندارد و حداقل مقادیر دبی در دوره‌های پنج روزه را مشخص و با اتصال نقاط بدست آمده منحنی جدایش هیدروگراف بدست می‌آید [۲۳].

فیلتر رقومی برگشتی لینیه و هالیک (B-Flow)

الگوریتم معرفی شده با رابطه ۵ به وسیله لینه و هالیک (۱۹۷۹) معرفی شده که قابلیت عبور سه باره از داده‌های جریان را دارد و چند بار عبور از داده‌های جریان باعث پایین آوردن جریان پایه می‌شود و به استفاده کننده قابلیت انعطاف پذیری در جدایش دقیق‌تر دبی پایه را می‌دهد [۱۷]. ناتان و مک ماهان در تحقیقی که انجام دادند بیشترین نتایج قابل قبول در این روش را زمانی دانستند که پارامتر فیلتر در دامنه ۰/۹۰- ۰/۹۵ تغییر کند که مقدار متوسط آن ۰/۹۲۵ است [۱۹]. اسماختین و واتکینز دریافتند که

مقادیر پارامتر فیلتر بهینه به طور نرمال بین ۰/۹۸۵ تا ۰/۹۹۵ در نوسان است و توصیه کردند که مقدار ۰/۹۹۵ برای جداسازی جریان پایه‌ی روزانه مناسب است [۲۵].

(۵)

که در آن، $q_{f(i)} \geq 0$، $q_{f(i)}$ رواناب مستقیم فیلتر شده در مرحله زمانی i، $q_{f(i-1)}$ رواناب مستقیم فیلتر شده در مرحله زمانی i-1، α پارامتر فیلتر مرتبط با حوزه، $q_{(i)}$ جریان کل در مرحله زمانی i، $q_{(i-1)}$ جریان کل در مرحله زمانی i-1، $q_b = q - q_f$ جریان پایه می‌باشد. پارامتر فیلتر بهینه مورد استفاده در این روش برابر ۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵ می‌باشد.

فیلتر رقومی برگشتی Chapman

چاپمن در سال (1991) با بررسی فیلتر رقومی لین و هالیک تعیین کرد که این روش با تئوری فرود متداول ناسازگار است؛ به این دلیل که در مواقعی که جریان سطحی وجود نداشته باشد جریان پایه‌ی پیش‌بینی شده ثابت است. بنابراین روش لین و هالیک را با یک فیلتر واقعی‌تر در رابطه ۶ از لحاظ فیزیکی اصلاح کرد. که بر اساس مدل مخزن خطی تفسیر شده است [۱۰].

(۶)

که در آن $q_b = q - q_f$ جریان پایه، $q_{f(i)}$ رواناب مستقیم فیلتر شده در مرحله زمانی i، $q_{(i)}$ جریان کل در مرحله زمانی i، $q_{f(i-1)}$ رواناب مستقیم فیلتر شده در مرحله زمانی i-1، $q_{(i-1)}$ جریان کل در مرحله زمانی i-1 و α پارامتر فیلتر مرتبط با حوزه که در این پژوهش برابر با ۰/۹۲۵ تشخیص داده شد.

فیلتر رقومی برگشتی تک پارامتره (One-parameter)

این روش نخستین بار توسط چاپمن و ماکسول در سال (1996) با بررسی فیلتر رقومی لین و هالیک و فیلتر رقومی چاپمن یک فرمول جدیدی با رابطه ۷ را پیشنهاد دادند. روش فیلتر رقومی برگشتی تک پارامتره برای تحلیل، پردازش و فیلتر کردن رواناب سطحی (سیگنال‌های با فراوانی بالا) از جریان پایه (سیگنال‌های با فراوانی پایین) معرفی شده است، [۱۱].

(۷)

به شرط $q_{b(i)} \leq q_{(i)}$، که در آن، K پارامتر فیلتر که در این پژوهش برابر با ۰/۹۲۵ انتخاب گردید. $q_{b(i-1)}$ جریان پایه فیلتر شده برای زمان قبل از i ، $q_{(i)}$ جریان اصلی رودخانه برای زمان i و $q_{b(i)}$ جریان پایه فیلتر شده، برای زمان iام است.

فیلتر رقومی برگشتی دوپارامتره Eckhardt

این روش اولین بار توسط اکهارت (۲۰۰۵) ارائه گردید [۱۳]. بر اساس رابطه ۸ برای تجزیه هیدروگراف به جریان پایه نیاز به تعیین ضریب فروکش (a) و ماکزیمم شاخص جریان پایه (BFImax) است.

(۸)

به شرط $q_{b(i)} \leq q_{(i)}$، که در آن، α پارامتر فیلتر مرتبط با حوزه آبخیز، قابل تعیین توسط ثابت افت منحنی هیدروگراف، $q_{b(i-1)}$ جریان پایه فیلتر شده برای زمان قبل از i، $q_{(i)}$ جریان اصلی رودخانه برای زمان i و $q_{b(i)}$ جریان پایه فیلتر شده، برای زمان iام و BFI_{max} ماکزیمم شاخص جریان پایه، است.

در این روش نیاز است تا دو پارامتر BFI_{max} و a تعیین گردد. بر اساس مطالعات اکهارت (۲۰۰۵) مقادیر BFI_{max} برای رودخانه‌های دائمی با حوزه آبخیز نفوذپذیر برابر ۰/۸ و برای رودخانه‌های فصلی با حوزه آبخیز نفوذپذیر برابر ۰/۵ و برای رودخانه‌های دائمی با حوزه آبخیز سخت و سنگی برابر ۰/۲۵ را ارائه نمود [۱۳]. با تهیه نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ حوزه‌های مورد مطالعه در محیط GIS و تعیین نوع سازند و سنگ‌های تشکیل دهنده سازندها و تعیین نفوذپذیری هر یک از سازندها و سنگ‌های تشکیل دهنده و کلاس بندی کردن براساس هرم شماتیک نفوذپذیری سنگ‌ها با اقتباس از فیض‌نیا (۱۳۸۰) میزان نفوذپذیری هر یک از سازندها برآورد شد [۸]. سپس BFI_{max} به صورت رابطه ۹ برای حوزه تعیین گردید. در فیلتر رقومی اکهارت مقدار BFI بالاتر از ۰/۸ نمی‌تواند محاسبه شود، چرا که در این روش ماگزیمم BFI برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شد.

(۹)

در این رابطه A_i مساحت سازند به صورت درصدی از مساحت کل برای سازند i، C_i ضریب نفوذپذیری مربوط به سازند i و BFI_{max} پارامتر مربوط به روش فیلتر رقومی اکهارت می‌باشد.

بعد از تعیین جریان پایه با روش فیلتر رقومی اکهارت به عنوان بهترین روش در حوزه مورد مطالعه و انتخاب به عنوان مبنا مقایسه با روش‌های دیگر استفاده شد. برای انتخاب روش مناسب از شاخص دبی پایه روش‌ها استفاده گردید و سپس برای تعیین روش مناسب و بررسی آن، سه معیار میانگین مطلق خطا (MAE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همستگی (r) انتخاب شد.

(۱۰)

(۱۱)

r

(۱۲)

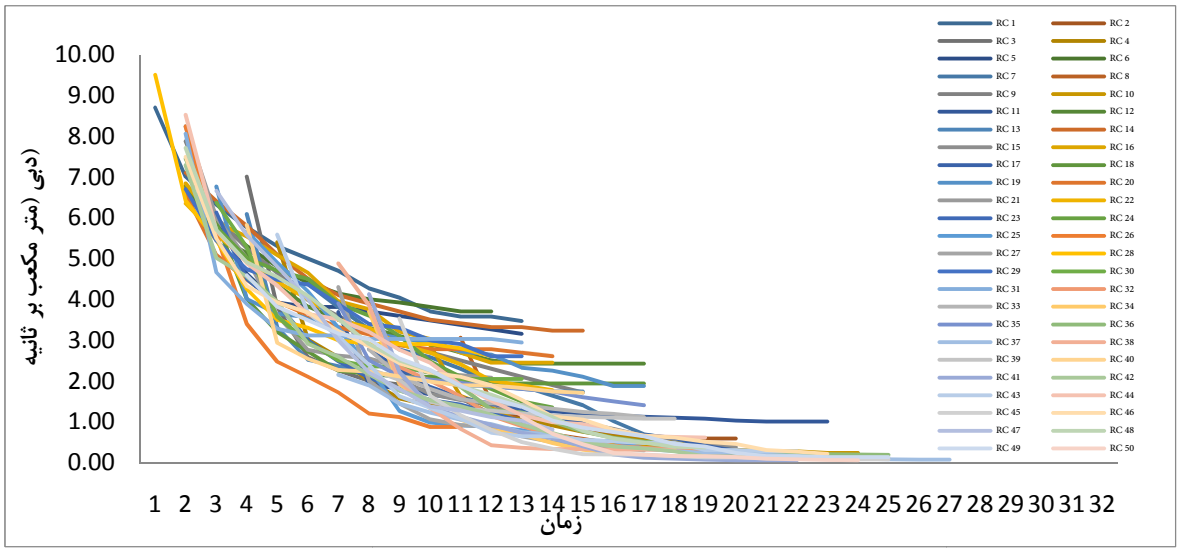
که در آن $Q_0{}^t$ دبی مشاهداتی (واقعی) در زمان t، $Q_m{}^t$ دبی برآوردی توسط مدل در زمان t، $\overline{Q_0}$ میانگین دبی مشاهداتی (واقعی)، $\overline{Q_m}$ میانگین دبی برآوردی توسط مدل و n تعداد مشاهدات است. بر طبق این معیارها، روشی مناسب است که میانگین مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطا کمتری داشته باشد و اما میزان ضریب همبستگی که عددی بین صفر و یک است که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد پیش‌بینی مدل مناسب‌تر است.

نتایج و بحث

در این پژوهش برای تفکیک دبی جریان به رواناب مستقیم و جریان پایه از هشت روش فیلترینگ برآورد گردید. به این منظور از

آورد روزانه هشت ایستگاه در یک دوره ۳۴ ساله از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۳ استفاده گردید. در بررسی نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف تفکیک جریان ابتدا به بررسی چگونگی برآورد جریان پایه به روش Eckhardt و بررسی نتایج آن پرداخته و سپس سایر روش‌ها مورد ارزیابی و بحث قرار داده شد.

در تفکیک جریان پایه به روش Eckhardt نیاز به دو پارامتر α (پارامتر فیلتر مرتبط با حوزه آبخیز) و BFI_{max} (ماکزیمم شاخص جریان پایه) است. برای تعیین پارامتر فیلتر مرتبط با حوزه ابتدا منحنی خشکیدگی اصلی مربوط به هر یک از حوزه‌ها تعیین گردید. شکل ۱ نمونه‌ای از منحنی خشکیدگی اصلی مربوط به ایستگاه ارازکوسه نشان می‌دهد و با توجه به رابطه ۲ و شیب منحنی پوش، مقدار α (ثابت خشکیدگی) تعیین گردید و با جایگزاری ضریب α در رابطه ۳ مقدار پارامتر k (ضریب خشکیدگی مرتبط با حوزه که همان پارامتر α در روش Eckhardt می‌باشد) تعیین گردید. جدول ۲ پارامتر k مربوط به هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد که کمترین مقدار k مربوط به ایستگاه جنگلده با ۰/۷۲ و بیشترین مقدار پارامتر مزکور مربوط به ایستگاه نوده با ۰/۹ است.



شکل ۱- منحنی خشکیدگی اصلی(MRC) مربوط به ایستگاه ارازکوسه

جدول ۲- پارامترهای مربوط به منحنی خشکیدگی اصلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

	تمر	لزوره	جنگلده	نوده	ارازکوسه	سدگرگان	تقی آباد	وطنا
پارامترK	۰.۸۸	۰.۸۶	۰.۷۲	۰.۹۰	۰.۸۷	۰.۸۵	۰.۷۵	۰.۷۶
پارامترa	۰.۱۳	۰.۱۵	۰.۳۳	۰.۱۶	۰.۱۴	۰.۱۶	۰.۲۹	۰.۲۷

برای تعیین ماکزیمم شاخص جریان پایه (BFI_{max}) مربوط به روش Eckhardt نیاز به میزان نفوذپذیری ایستگاه‌های مربوط به هرحوضه می‌باشد. (Eckhardt, 2005) ماکزیمم شاخص جریان پایه را برای رودخانه‌های دائمی با حوزه آبخیز غیر قابل نفوذ و نفوذ پذیر ۰/۲۵ و ۰/۸ تعیین نمود. برای تعیین میزان نفوذپذیری حوزه‌ها، نقشه زمین شناسی حوزه‌های مربوط به هریک از ایستگاه‌ها تعیین گردید. بدین ترتیب براساس راهنمای تراوایی سازندها و هرم شماتیک نفوذپذیری واحدهای سنگ شناسی دردوران‌ها و دوره‌های مختلف زمین شناسی (فیض نیا، ۱۳۸۰) و با توجه به نقشه زمین شناسی حوضه، تراوایی واحدهای سنگ شناسی در پنج کلاس طبقه بندی گردید [۸]. با توجه به دائمی بودن رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه و همچنین تعیین ضریب نفوذپذیری هر یک از سازندها و مساحت تشکیل دهنده هر سازند بر اساس رابطه ۱۰ مقدار BFI_{max} در روش Eckhardt برای حوضه‌های مربوط به هر

ایستگاه تعیین گردید که شکل ۲ ماکزیمم شاخص جریان پایه هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. که بیشترین مقدار BFI_{max} مربوط به ایستگاه تمر با ۰/۶۵ که نشان دهنده تخلخل بالا سنگ‌های تشکیل دهنده حوضه و سهم بالای آب‌های زیر سطحی در جریان رودخانه می باشد و کمترین مقدار BFI_{max} مربوط به ایستگاه وطنا با ۰/۳۲ که نشان دهنده مشارکت کم آب‌های زیر زمینی در سطح جریان به دلیل سخت و سنگی بودن سنگ‌های تشکیل دهنده سازندهای حوضه می‌باشد.

شکل ۲- ماکزیمم شاخص دبی پایه روش Eckhardt در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تعیین دقیق جریان پایه و شاخص مربوط به آن امری غیر محتمل می‌باشد. دقیق ترین روش برای تعیین جریان پایه استفاده از ردیاب‌ها شیمیایی و بیلان جرمی است که وقت‌گیر و هزینه بر است در غیاب ردیاب‌ها استفاده از روش‌های فیلترینگ مناسب بوده و سریع به نتیجه می‌رسد. در این پژوهش از روش Eckhardt به عنوان بهترین روش و مبنا مقایسه با سایر روش‌ها انتخاب گردید. در پژوهشی که توسط Eckhardt در سال 2008 در آمریکای شمالی بر روی ۶۵ حوضه صورت گرفت به منظور انتخاب روش مناسب تفکیک جریان پایه بین هفت روش، بهترین روش را فیلتر برگشتی Eckhardt (در صورت تعیین پارامترهای α و BFI_{max} مناسب و مرتبط با حوضه) معرفی نمود (Eckhardt, 2008).

در این پژوهش نتایج تفکیک جریان پایه در هشت ایستگاه حوزه آبخیز گرگان‌رود را با ده روش با معیارهای سنجش آماری مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. ولی با توجه به هدف پژوهش تفکیک جریان پایه با روش‌های مختلف و انتخاب روش مناسب، نتایج بدست آمده مورد بحث قرار گرفت. جدول ۳ خلاصه ای از نتایج تحلیل آماری روش‌های مختلف تفکیک جریان را در حوزه آبخیز گرگان‌رود را نشان می‌دهد. همان طور که در جدول قابل دریافت است، قسمت اعظم جریان رودخانه در حوزه آبخیز گرگان‌رود مربوط به جریان پایه است. میانگین سالیانه شاخص جریان پایه بین ۰/۴۶ تا ۰/۷۴ در نوسان است، که کمترین آن متعلق به روش‌های فیلتر رقومی One-parameter و فیلتر رقومی Chapman برابر با ۰/۴۶ و بیشترین آن مربوط به روش محدوده زمانی متحرک (Sliding Interval) و روش B-Flow با ضریب فیلتر ۰/۹۰ برابر با ۰/۷۴ است. که نشان دهنده مشارکت بالای آب‌های زیرزمینی در تامین آب‌های سطحی جریان رودخانه در منطقه مورد مطالعه است. در واقع شاخص جریان پایه میزان نفوذپذیر بودن سازندهای زمین شناسی تشکیل دهنده منطقه را نشان می‌دهد. در مقایسه بین میانگین، ماکزیمم و مینیمم شاخص سالیانه جریان پایه در روش‌های مختلف همانطور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، روش‌های فیلتر رقومی One-parameter و فیلتر رقومی Chapman بیشترین تطابق و نزدیکی را با روش Eckhardt به عنوان مبنا مقایسه دارد. این بدین معنا است که استفاده از این دو

روش بهترین عملکرد را در تفکیک جریان پایه در منطقه مورد پژوهش دارد و صرف نظر از برآورد کم تر یا بیش تر از حد تا حدود زیادی می تواند نماینده جریان واقعی باشد و می‌تواند انتظارات موردنظر مطالعات منابع آب را برآورده کند.

با توجه به نتایج تحلیل آماری (جدول ۳) کمترین میزان میانگین مطلق خطا (MEA) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) مربوط به روش فیلتر رقومی One-parameter که به ترتیب برابر با ۰/۱۱۲ و ۰/۱۱۵ و فیلتر رقومی Chapman با اختلاف ناچیز برابر با ۰/۱۱۳ و ۰/۱۱۶ است. که بیانگر مناسب بودن این دو روش در تفکیک جریان در منطقه مورد پژوهش می‌باشد. همچنین بیشترین میانگین مطلق خطا (MEA) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) مربوط به روش محدوده زمانی متحرک (Sliding Interval) به میزان ۰/۲۲۴ و ۰/۲۳۶ است که این مقدار زیاد نشان دهده ضعف و مناسب نبودن این روش در تفکیک جریان است.

ضریب همبستگی r بین شاخص سالیانه جریان پایه حاصل از تمام روش‌ها با روش Eckhardt در منطقه مورد پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مندرج در جدول فوق مشخص است، بالاترین ضریب همبستگی بین روش‌های مختلف با روش Eckhardt مربوط به روش فیلتر رقومی Chapman به میزان ۰/۹۳۱ و روش فیلتر رقومی One-parameter با مقدار ۰/۹۲۴ است. کمترین میزان همبستگی را هم روش حداقل محلی (Local Minimum) به میزان ۰/۶۲۰ از خود نشان می‌دهد.

در بررسی انحراف استاندارد (Standard deviation) بدست آمده حاصل از تمام روش‌ها که مقدار کم آن نشان دهنده برآورد بهتر روش در تفکیک جریان است؛ روش Eckhardt، روش فیلتر رقومی One-parameter و روش فیلتر رقومی Chapman انحراف استاندارد کمتری نسبت به روش‌های دیگر از خود نشان داده است (SD≤0.04). بیشترین انحراف استارد هم مربوط به روش حداقل محلی می‌باشد.

جدول ۷- خلاصه ای از نتایج تحلیل آماری شاخص جریان پایه روش‌های مختلف تفکیک جریان در حوزه آبخیز گرگانرود

	Standard deviation	Avreg	Max	Min	MEA	RMSE	r
حداقل محلی (Local Minimum)	۰/۱۳	۰/۵۲	۰/۷۶	۰/۲۵	۰/۱۲۶	۰/۱۵۲	۰/۶۲۰
محدوده زمانی ثابت (Fixed Interval)	۰/۱۱	۰/۶۶	۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۱۵۶	۰/۱۷۴	۰/۷۵۴
محدوده زمانی متحرک (Sliding Interval)	۰/۱۰	۰/۷۴	۰/۸۹	۰/۵۲	۰/۲۲۴	۰/۲۳۶	۰/۷۹۱
B-Flow 0.90	۰/۰۸	۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۵۵	۰/۲۱۸	۰/۲۲۸	۰/۸۶۴
B-Flow 0.925	۰/۰۸	۰/۷۲	۰/۸۷	۰/۵۳	۰/۱۹۹	۰/۲۱۰	۰/۸۵۳
B-Flow 0.95	۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۸۵	۰/۴۹	۰/۱۷۴	۰/۱۸۶	۰/۸۲۴
B-Flow 0.975	۰/۱۰	۰/۶۴	۰/۸۳	۰/۴۳	۰/۱۳۷	۰/۱۵۴	۰/۷۳۰
فیلتر رقومی تک پارامتره (One-parameter)	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۱۱۲	۰/۱۱۵	۰/۹۲۴
فیلتر رقومی Chapman	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۳۷	۰/۱۱۳	۰/۱۱۶	۰/۹۳۱
Eckhardt	۰/۰۳	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۴۶	-	-	-

نتیجه گیری

در این پژوش به منظور تفکیک جریان پایه به روش Eckhardt ابتدا نیاز تعیین دو پارامتر (α و BFI_{max}) بوده است. که پارامتر α با آنالیز منحنی خشکیدگی اصلی (MRC) مربوط به هر منطقه تعیین گردید. پارامتر BFI_{max} مربوط به هر منطقه با تهیه نقشه زمین شناسی و تعیین ضریب نفوذ مربوط به هر سازند بدست آمد. که کمترین آن مربوط به ایستگاه‌های نوده و تقی آباد می باشد که نشان دهنده سهم کم آب‌های زیر زمینی در سطح جریان های این منطقه است که دلیل آن نوع سازندهای تشکیل دهنده این مناطق است که عموما سخت و سنگی و غیر قابل نفوذ می‌باشد. و بیشترین BFI_{max} هم مربوط به ایستگاه‌های تمر، جنگلده و سد گرگان است که حکایت از نفوذپذیر بودن سنگ‌های تشکیل دهنده در این مناطق دارد که عموما از سنگ‌های آبرفتی با تراوایی بالا و سنگ آهک با تراوایی خوب و ماسه سنگ و شیل و دولومیت با تراوایی متوسط تشکیل گردیده است. پس ار تعیین این دو پارامتر جریان پایه به روش Eckhardt تعیین گردید و شاخص دجریان پایه این روش در ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه گردید و به عنوان بهترین روش و مبنا، با شاخص جریان پایه در سایر روش‌ها با سه معیار میانگین مطلق خطا، مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از مناسب بودن روش فیلتر رقومی One-parameter و روش فیلتر رقومی Chapman به دلیل داشتن کمترین میزان میانگین مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطا و همچنین دارا بودن بیشترین همبستگی با روش Eckhardt و کمترین انحراف استاندارد در منطقه مورد مطالعه است و می تواند به عنوان بهترین روش در منطقه در غیاب روش‌های مبتنی بر ردیاب‌ها و بیلان جرمی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد و انتظارات یک هیدرولوژیست را در منابع‌آب برآورده کند. که با نتایج کاظمی و قرمز چشمه (۱۳۹۵) مطابقت دارد.

نزدیک بودن تغییرات شاخص سالیانه جریان پایه بدست آمده از روش‌های فیلتر رقومی One-parameter و فیلتر رقومی Chapman با تغییرات شاخص سالیانه جریان پایه بدست آمده در روش Eckhardt نشان از برآورد خوب این سه روش در تفکیک جریان در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. شاخص جریان پایه را می‌تواند یک ویژگی ژئوهیدرولوژیکی حوزه آبخیز باشد. تعیین دقیق این شاخص ضرورت و اهمیت مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی به عنوان منابع مرتبط به هم را نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

از استاد گرامیم جناب آقای دکتر سید مرتضی سیدیان بسیار سپاسگذارم چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تامین این مطالب در راستای پایان نامه برایم میسر نبود، از خداوند منان برای ایشان آرزوی موفقیت و سلامتی را دارم.

فهرست منابع

[۱] ارفع نیا، ر.، سامانی، ن. ۱۳۸۴. ترسیم منحنی جدایش هیدروگراف رودخانه در حوضه آبریز کارستی زاینده رود. نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، ۶:۵، ص ۶۰۰-۵۸۵.

[۲] اسمعلی، الف.، سمیعی، م. ۱۳۹۰. مقایسه روش‌های مختلف تفکیک هیدروگراف جریان در ایستگاه حنیفقان، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، اردیبهشت ۱۳۹۰.

[۳] تیموری، م. ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های تفکیک دبی پایه بر اساس آنالیز شاخه خشکیدگی. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. سال ۲۹، شماره۴، ص۶۶-۵۷

[۴] حسنی، م.، م. رحیمی، م. سمیعی و م. ر. خاموشی. ۱۳۹۱. بررسی کارایی برخی از روش‌های جداسازی جریان پایه در رودخانه‌های مناطق خشک و نمیه خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله رود). دو فصلنامه علمی - پژوهشی خشک بوم، جلد ۲، شماره ۲، ص ۱۰ تا ۲۲.

[۵] زارع بیدکی، ر.، مهدیان فرد، م.، هنر بخش، الف. و زینی وند، ح. ۱۳۹۴. برآورد جریان پایه رودخانهٔ تیرهٔ لرستان به منظور ارزیابی جریان زیست محیطی. اکوهیدرولوژی، ۳:۲، ص ۲۸۷-۲۷۵.

[۶] قنبرپور، م، ر،. تیموری، م،. غلامی، ش. ۱۳۸۷. مقایسه روش‌های برآورد دبی پایه براساس تفکیک هیدروگراف جریان (مطالعه موردی حوزه آبخیز کارون). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۴۴:۱۵، ص۱۱-۱.

[۷] کاظمی، ر،. قرمز چشمه، ب. ۱۳۹۵. بررسی روش های مختلف استخراج جریان پایه با استفاده از شاخص منحنی تداوم جریان (مطالعه در موردی ناحیه خزری)، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲:۲۳، ص۱۴۶-۱۳۱.

[۸] نادر صفت، م.ح و ف. سعیدیان. ۱۳۸۹. مطالعه روند سیل‌خیزی در حوزه‌های آبخیز از طریق بررسی تراوایی و پتانسیل ایجاد رواناب در سازندهای زمین‌شناسی، مطالعه موردی در حوزه آبخیز کارده- استان خراسان رضوی. فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا. ص ۱۶۳ تا ۱۹۸.

[9] Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah R., and Bernhardt, G., 1995. Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. Ground Water, 33(6): 1010-1018.

[10] Chapman, T.G. 1991. Comment on evolution of automated techniques for base flow and recession analyses. J. Water Resour. Res. 26: 1783-1784.

[11] Chapman, T.G. and Maxwell, A.I. 1996. Base flow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Hydrological and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, Hobart, Pp: 539-545.

[12] Chen, L., H. Zheng, Y.D. Chen and C. liu. 2008. Baseflow separation in the source region of the yellow river. J.Hydrol. Eng. 13: 541-548.

[13] Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrol. Proc. 19(2): 507–515.

[14] Eckhardt, K. 2008. A comparison of base flow indices, which were calculated with seven different base flow separation methods. J. Hydrol. 352: 168-173.

[15] Gregor M. (2010). User Manual " BFI+ 3.0".

[16] Kulhavy, Z., Dolezal, F., and Soukup, M., 2001. Separation of drainage runoff components and its use for classification of existing drainage system (in Czech). Vedecke Pracce VMOP Praha, 12:29-52.

[17] Lyne, V. and Hollick, M. 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling, Inst. of Eng. Aust. Natl. Conf. Publ. 79(10): 89–93.

[18] Mul, M.L., Mutiibwa, R.K., Uhlenbrook, S., and Savenije, H.H.G. 2008. Hydrograph separation using hydrochemical tracers in the Makanya catchment, Tanzania. Physics and Chemistry of the Earth, 33: 151–156.

[19] Nathan, R. J. and McMahon, T. A. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resource Res. 26(7): 1465-1473.

[20] Obrien, R.J., Misstear, B.D., Gill, L.W., Deakin, J.L., and Flynn, R., 2013. Developing an integrated hydrograph separation and lumped modeling approach to quantifying hydrological pathways in Irish river catchments,Journal of Hydrology, 486: 259-270.

[21] Pettyjohn, W. A., & Henning, R. 1979. Preliminary estimate of ground-water recharge rate, related stream flow and water quality in Ohio: Ohio state University water resources center project completion report number 552, 323.

[22] Risser, D.W., R.W. Conger, J.E. Ulrich and M.P. Asmussen. 2005. Estimates of Ground-Water Recharge Based on Stream flow- Hydrograph Methods: Pennsylvania, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Open-File Report 2005-1333.

[23] Sloto, R.A., and Crouse, M.Y. 1996. HYSEP: A computer program for stream flow hydrograph separation and analysis. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations, Pennsylvania. Report 96-4040, 46p.

[24] Smakhtin, V.U. 2001. Estimating continuous monthly base flow time series and their possible applications in the context of the ecological reserve. Water SA. 27(2): 213-217.

[25] Smakhtin, V.U. and D.A. Watkins 1997. Low flow estimation in South Africa. WRC Report no 494/1/97.

[26] White, K.A., and Sloto. R.A., 1990. Base flow frequency characteristics of selected Pennsylvania Streams, U. S. Geological Survey Water Resources Investigation. 66: 90-416.