

بر آورد آب پایه به منظور ارزیابی جریان زیست‌محیطی در رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه-خشک (مطالعه موردی: رودخانه شامکان، سبزوار)

مهدی زارعی^{۱*}، مهدی بروغنی^۲، سید حسن علوی‌نیا^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸-۱۲-۱۲ تاریخ چاپ: ۱۳۹۹-۰۲-۲۲

چکیده

جریان پایه درصدی از جریان رودخانه است که با تخلیه آب زیرزمینی ارتباط داشته و معرف میزان مشارکت آبهای زیرزمینی در کل رواناب می‌باشد. بنابراین جریان پایه نقش مهمی در مطالعات هیدرولوژیکی و منابع آب همچون ارزیابی کمیت و کیفیت منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، واسنجی و اعتبارسنجی این مدل‌ها و برآورد حقایق زیست‌محیطی مناطق مختلف دارا می‌باشد. در تحقیق حاضر به منظور برآورد جریان پایه، آمار ۳۰ ساله جریان روزانه رودخانه در رودخانه شامکان واقع در حوزه آبخیز سنگرد انتخاب گردید. مقدار جریان پایه روزانه طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴ با استفاده از روش‌های BFI، لین و هولیک، اکهارت و حداقل محلی محاسبه گردید. با توجه به عدم وجود داده‌های مشاهداتی جریان پایه، روش BFI به عنوان روش مبنا در نظر گرفته شد و نتایج سایر روش‌ها با نتایج روش مذکور مقایسه گردید. نتایج نشان داد که جریان پایه برآوردی توسط روش‌های مختلف به طور متوسط بین ۷۱ تا ۸۱ درصد جریان رودخانه را تشکیل می‌دهد. نتایج حاصل از معیارهای خطا نشان داد روش لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۵ مناسب‌ترین روش جداسازی جریان پایه در منطقه مطالعاتی می‌باشد. در حالی که روش اکهارت با فیلترهای ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ دارای بیشترین مقادیر مجذور میانگن مربعات خطا و میانگین مطلق خطا و همچنین کمترین مقادیر نش-ساتکلیف می‌باشند.

واژه های کلیدی: جریان پایه، اکهارت، شاخص جریان پایه، حداقل محلی، لین و هولیک

^۱ استادیار، مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری

^۲ استادیار، مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری

^۳ استادیار، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

* نویسنده مسئول: m.zarei@hsu.ac.ir، mahdizarei1983@gmail.com

مقدمه

فشار بر منابع آب و سایر منابع طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در حال افزایش بوده و تقاضای آب به سرعت در حال رشد است (نیومن و همکاران، ۲۰۰۶). بررسی هیدروگراف جریان یکی از کاربردی‌ترین مباحث هیدرولوژی مهندسی می‌باشد که امکان ارزیابی و تعیین دبی حداکثر سیلاب، حجم سیلاب و میزان ذخیره حوزه پس از اتمام بارندگی و همچنین سهم آب زیرزمینی در ایجاد رواناب را فراهم می‌نماید (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۷). بخش مهمی از هیدروگراف جریان را آب پایه تشکیل می‌دهد که از طریق ذخایر آب زیرزمینی یا ذخایر دیگر به رودخانه راه یافته (هال، ۱۹۶۸) و به طور کلی منبع تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه بوده و برآورد منطقی از دبی آب زیرزمینی ارائه می‌نماید (لوت و استیوارت، ۲۰۱۶؛ اسماختین، ۲۰۰۱). هیدرولوژیست‌های مختلف این بخش از جریان رودخانه را جریان آب زیرزمینی، جریان حداقل، جریان نفوذ یافته، جریان نشتی و جریان پایدار می‌نامند. از نظر اکوهیدرولوژیست‌ها جریان پایه نقش قابل توجهی در برقراری تعادل جریان رودخانه و تنظیم سطوح آب زیرزمینی در دوره‌های خشک ایفا می‌نماید (لی و همکاران، ۲۰۱۴). جریان پایه مقدار آبی است که در صورت عدم وقوع بارندگی در رودخانه‌ها و مسیل‌ها جریان داشته و آنها را حفظ می‌کند. آب پایه را می‌توان به عنوان ترکیبی از بخش‌های مختلف آب زیرزمینی همچون آب بخش غیراشباع خاک در نظر گرفت (پرایس، ۲۰۱۱؛ هال، ۱۹۶۸). این مؤلفه حیاتی جریان رودخانه در حفظ کمیت و کیفیت آب سطحی طی دوره‌های خشکسالی و ماه‌های خشک سال (میلر و همکاران، ۲۰۱۶؛ سامرز و همکاران، ۲۰۱۶) و همچنین در بهبود کالیبراسیون و ارزیابی مدل‌های ملی و منطقه‌ای حائز اهمیت است (رگان و همکاران، ۲۰۱۸؛ ۲۰۱۹). تعیین مقدار جریان پایه در نقاط مختلف به منظور ارزیابی اثرات بلند مدت اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر کمیت آب و سلامت اکوسیستم رودخانه اهمیت دارد (سانتی و همکاران، ۲۰۰۸؛ تراوس و همکاران، ۲۰۱۸). جداسازی و تعیین میزان جریان پایه در مطالعات مختلف همچون برآورد نقش مؤلفه آب زیرزمینی در بیلان هیدرولوژیکی، برآورد تغذیه آبخوان، مدل‌سازی-های بارش-رواناب، مدیریت خشکسالی، بررسی تأثیر مدیریت‌های مختلف اراضی بر جریان آب زیرزمینی و

تعیین جریان زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد (ماو و وینتر، ۱۹۹۷؛ روتلج و دنیل، ۱۹۹۴؛ ژیلایگی، ۲۰۰۴؛ لی و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به پیچیدگی نحوه مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه، استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو دقیق‌ترین روش برآورد میزان جریان پایه می‌باشد (چاپمن و مکسول، ۱۹۹۶). از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از ایزوتوپ‌ها اشاره نمود. ایزوتوپ‌ها به عنوان ردیاب به بررسی ارتباط متقابل آب زیرزمینی و آب سطحی پرداخته (جیم و اوکستاب، ۲۰۰۲) و جریان پایه را از رواناب سطحی سالانه تفکیک می‌نمایند (ژانگ و شیلینگ، ۲۰۰۶). از آنجا که اجرای این روش‌ها در سطوح وسیع از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و با محدودیت روبرو است، در تحقیقات مختلف از روش‌های گرافیکی و فیلترینگ برای برآورد جریان پایه استفاده شده است. روش تجزیه گرافیکی بر مبنای خط تقاطع ابتدای شاخص صعودی و انتهای شاخه نزولی به وجود آمده و قسمت زیرین این خط آب پایه می‌باشد. اما اساس کار روش‌های فیلترینگ تجزیه کل هیدروگراف جریان می‌باشد (آرنولد و آلن، ۱۹۹۹؛ هوگس و همکاران، ۲۰۰۳). به طور کلی روش‌های گرافیکی ساده‌تر بوده و در دوره‌های زمانی طولانی کارآیی چندانی نداشته و قادر به برآورد اولیه آب پایه می‌باشند. در مقابل روش‌های فیلترینگ علاوه بر سهولت قابلیت تشخیص زیادی در تعیین آب پایه دارند، هر چند دارای نقاط ضعفی همچون نبود مبنای هیدرولوژیکی قانع‌کننده و حساسیت بالای پارامترها می‌باشند (اکهارت، ۲۰۰۵).

محققان متعددی در مطالعات خود به تفکیک جریان پایه از رواناب مستقیم با استفاده از روش‌های فیلترینگ پرداخته‌اند (مانند: سانتی و همکاران، ۲۰۰۸؛ اوبرین و همکاران، ۲۰۱۳؛ آکسوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ کواندا و همکاران، ۲۰۱۸؛ استولزل و همکاران، ۲۰۱۹؛ فوکس و همکاران، ۲۰۱۹؛ کاظمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ زارع بیدکی و همکاران، ۱۳۹۸). در این میان قنبرپور و همکاران (۱۳۸۷) به برآورد جریان پایه حوزه آبخیز کارون بر اساس روش‌های تفکیک هیدروگراف پرداختند. بدین صورت که با مقایسه روش‌های حداقل محلی و فیلتر عددی برگشتی با ضرایب ۰/۹ تا ۰/۹۷۵ با روش تحلیل شاخص خشکیدگی جریان به صورت عددی و گرافیکی پرداخته و روش فیلتر عددی برگشتی با ضریب ۰/۹۲۵ را به عنوان دقیق‌ترین

FUKIH به دلیل عدم استفاده از درونبایی خطی ساختار واقعی تری از جریان پایه را نشان می‌دهند. سانتی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از اطلاعات موجود جریان پایه و بر اساس شرایط آب و هوایی، توپولوژی و زمین‌شناسی پژوهشی انجام داده و با به کار بردن روش فیلتر دیجیتال بازگشتی و درونبایی، شاخص جریان پایه را از جریان روزانه ثبت شده بدست آوردند. اوپرین و همکاران (۲۰۱۳) به منظور توسعه روشی جامع برای تجزیه هیدروگراف مطالعه خود را برای کمی نمودن مسیرهای هیدرولوژیک در حوضه رودخانه‌های ایرلند انجام دادند. نتایج روش‌های مختلف استفاده شده در تفکیک هیدروگراف متفاوت بود. اختلاف میان مقادیر BFI با حذف روش‌های فاصله ثابت و متحرک و حداقل محلی کمتر شد. از طرفی الگوریتم‌های بوغتون و اکهارت با وجود سریع و ساده‌تر بودن پاسخ‌های مناسب-تری ارائه دادند. آب پایه بخش مهمی از جریان رودخانه‌ها را تشکیل می‌دهد به طوری که میتوان آن را بخشی از آب زیرزمینی در نظر گرفت. بنابراین برآورد جریان پایه با هدف برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و مقابله با مشکلات ناشی از کمبود آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک حائز اهمیت فراوان می‌باشد. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی و تعیین میزان تغذیه آب زیرزمینی جهت کاربرد در مطالعات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون منطقه مورد مطالعه از جریان پایه استفاده می‌شود. لذا در مطالعه حاضر با هدف برآورد جریان پایه به عنوان نماینده تغذیه آب زیرزمینی حوضه از روش‌های BFI، حداقل محلی و فیلتر دیجیتال بازگشتی (لین-هولیک و اکهارت) در حوضه آبخیز سنگرد پرداخته شد.

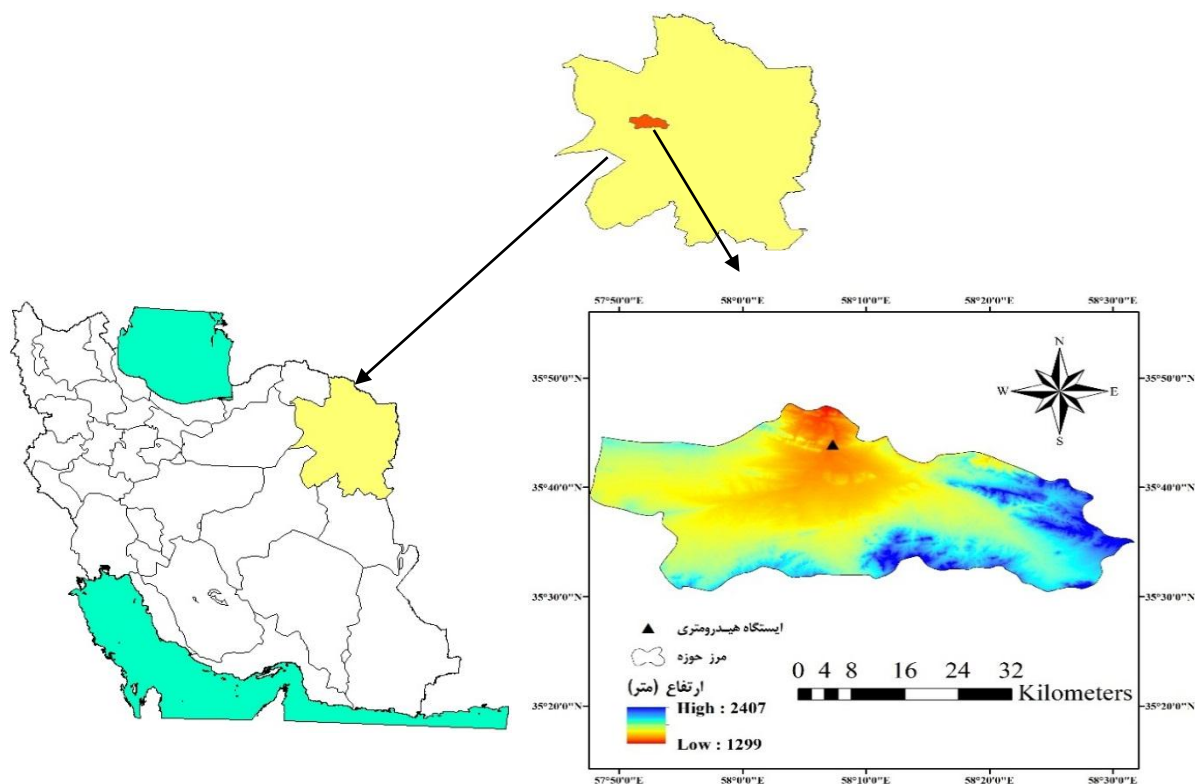
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه بر روی رودخانه شامکان در نزدیکی خروجی حوضه آبخیز سنگرد واقع شده است. حوضه آبخیز سنگرد جزء حوزه‌های خشک و نیمه خشک ایران محسوب شده و با وسعت ۱۲۲۹ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱۸۶۰ متر از سطح دریا در استان خراسان رضوی، در حدفاصل شمال غرب بردسکن و جنوب سبزوار در محدوده طول جغرافیایی شرقی ۴۷° ۵۷' تا ۳۱' ۵۸° و عرض جغرافیایی شمالی ۲۹' ۳۵° و ۴۷' ۳۵° قرار دارد

روش در منطقه معرفی نمودند. تیموری و همکاران (۱۳۹۰) طی مطالعه‌ای به مقایسه روش‌های حداقل محلی، فیلتر عددی یک پارامتره و دو پارامتره در برخی رودخانه‌های آذربایجان غربی طی دوره آماری ۳۱ ساله پرداختند. نتایج آنها حاکی از دقت بالاتر روش فیلتر عددی یک پارامتره با ضریب ۰/۹۲۵ در برآورد جریان پایه بود. حسنی و همکاران (۱۳۹۱) نیز طی تحقیقی به بررسی کارایی روش‌های فیلتر عددی یک و دو پارامتره، روش PART و روش حداقل محلی در تفکیک جریان پایه در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع بر رودخانه حبله رود پرداختند. ایشان نشان داند روش حداقل محلی در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه نمرود، و روش فیلتر عددی یک پارامتری در ایستگاه نمرود با ضریب ۰/۹۷۵ برآورد مناسبی از جریان پایه داشته است. تمسکنی و همکاران (۱۳۹۲) به منظور تفکیک جریان پایه از جریان رودخانه در حوزه بالادست سد بوستان در استان گلستان از روش‌های Hysep1، Hysep2، Hysep3 و BFLOW با ضرایب ۰/۹ تا ۰/۹۹ استفاده نموده و مشخص کردند روش BFLOW با ضریب ۰/۹ مناسب‌ترین روش برآورد جریان پایه در منطقه مورد مطالعه است. زارع بیدکی و همکاران (۱۳۹۴) به منظور ارزیابی جریان زیست‌محیطی در رودخانه تیره لرستان به تفکیک هیدروگراف جریان طی دوره آماری ۳۰ ساله با استفاده از روش‌های BFI، فیلتر دیجیتال برگشتی و Hysep پرداختند. نتایج نشان داد آب پایه حدود ۷۴ تا ۷۸ درصد جریان رودخانه را تشکیل داد است. همچنین نشان دادند که روش‌های محدوده زمانی جابه‌جاشونده و فیلتر برگشتی دیجیتال لین و هولیک با ضریب ۰/۹ روش‌های مناسب تفکیک جریان در منطقه مورد مطالعه هستند. بروسکوا (۲۰۰۸) در پژوهشی از روش BFI برای برآورد جریان پایه به منظور مطالعه و بررسی خشکسالی هیدرولوژیک بهره گرفته و این روش را مناسب ارزیابی نمود. آکسوی و همکاران (۲۰۰۹) طی پژوهشی با استفاده از روش تفکیک جریان پایه با هیدروگراف واحد (UKIH) به همراه روش تفکیک با فیلتر دیجیتال بازگشتی (RDF) روشی با عنوان روش جداسازی جریان پایه با حداقل هموار شده (FUKIH) ارائه نمودند که برای اولین بار در آن روش هیدروگراف واحد برای سری زمانی روزانه به کار گرفته شد. ایشان با بکارگیری این روش در تعدادی از حوضه‌های واقع در غرب دریای سیاه نشان دادند که روش‌های RDF و

(باقریان کلات و همکاران، ۱۳۹۷). شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را ایران و استان خراسان رضوی نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان خراسان رضوی

شاخص جریان پایه (BFI)^۱

به نسبت جریان پایه به کل جریان رودخانه، شاخص جریان پایه اطلاق می‌گردد. این نسبت به عنوانی شاخصی برای نشان دادن توانایی حوضه در ذخیره و آزادسازی آب طی دوره‌های خشک بکار می‌رود. مقادیر بالای شاخص مذکور حاکی از پایداری رژیم جریان حوضه بوده و توانایی حوضه در حفظ جریان رودخانه طی دوره خشکی را نشان می‌دهد. شاخص جریان پایه در مطالعات اکوهیدرولوژی و برآورد جریانات زیست محیطی نیز کاربرد دارد. به طور کلی، شاخص جریان پایه به خصوصیات مانند شرایط هیدرولوژیک خاک، خصوصیات زمین‌شناسی و سایر ویژگی‌های مرتبط با قدرت ذخیره‌سازی خاک وابستگی زیادی دارد (گرگور، ۲۰۱۰). این شاخص بر اساس رابطه زیر و از تقسیم مجموع مقادیر جریان پایه روزانه به مجموع

روش تحقیق

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی جریان پایه از داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری بیروت در خروجی حوزه آبخیز سنگرد طی دوره آماری ۳۰ ساله از سال آبی ۶۶-۱۳۶۵ الی ۹۵-۱۳۹۴ استفاده گردید. شکل ۲ سری زمانی دبی روزانه در سال آبی ۷۷-۱۳۷۶ را نشان می‌دهد. بدین صورت که جهت بررسی نرمال بودن داده‌ها از کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. سپس با بکارگیری مدل‌های مختلف فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره (لین وهولیک)، فیلتر عددی برگشتی دو پارامتره (فیلتر دیجیتال برگشتی اکهارت)، BFI و حداقل محلی به تفکیک هیدروگراف جریان و جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم پرداخته شد. در نهایت نتایج روش‌های مورد مطالعه با نتایج روش BFI بعنوان جریان پایه مشاهداتی مقایسه و از معیارهای خطای موجود جهت ارزیابی استفاده گردید.

¹Base Flow Index

۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ استفاده گردید.

روش فیلتر عددی برگشتی دو پارامتره (فیلتر دیجیتالی بازگشتی^۲)

این روش برای اولین بار توسط اکهارت در سال ۲۰۰۵ ارائه گردید که دو پارامتر ثابت بازگشت (α) و ماکزیمم شاخص جریان پایه (BFI_{max}) در آن بایستی تعیین گردد. جریان پایه در این روش با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌گردد (با شرط اینکه $b_k \leq y_k$):

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot \alpha \cdot b_{k-1} + (1 - \alpha) BFI_{max} \cdot y_k}{1 - \alpha \cdot BFI_{max}} \quad (3)$$

در این رابطه BFI_{max} بیشترین مقدار شاخص جریان پایه می‌باشد که مقدار آن توسط اکهارت در حوضه‌های آبخیز دارای رودخانه دائمی با آبخوان متخلخل (دارای تشکیلات زمین‌شناسی نفوذپذیر) برابر ۰/۸، در حوضه‌های دارای رودخانه‌های غیردائمی با آبخوان متخلخل ۰/۵ و در حوضه‌های آبخیز دارای رودخانه دائمی با آبخوان سنگی و سخت ۰/۲۵ پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی نرمال بودن داده‌های مورد استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شده است.

۳ HYSEP

این برنامه رایانه‌ای در سال ۱۹۹۶ توسط سلوتو و کروس مورد آزمایش قرار گرفت. مبنای کار این برنامه بر پایه روش‌های ترسیمی است که در سال ۱۹۷۹ توسط پتینجان و هنینگ ارائه گردیده است. در آن از محدوده زمانی برابر $2N^*$ برای ترسیم منحنی جدایش هیدروگراف استفاده می‌گردد. برای بدست آوردن این پارامتر با استفاده از فرمول تجربی $N = 0.827 A^{0.7}$ زمان پایه (N) و سپس دو برابر زمان پایه ($2N^*$) در نظر گرفته می‌شود، و در مرحله بعدی نزدیک‌ترین عدد صحیح بعنوان مقدار $2N^*$ در نظر گرفته می‌شود. این روش تاکنون به صورت گسترده در حوضه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل خود شامل روش‌های محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی جابه‌جاشونده و روش حداقل محلی می‌باشد، که در مطالعه حاضر از روش حداقل محلی استفاده شده است.

مقادیر دبی روزانه در طول دوره آماری مورد نظر بدست می‌آید.

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

در رابطه فوق b_i مقدار جریان پایه روزانه در روز i ام و d_i مقدار جریان روزانه در روز i ام می‌باشد (بروسکوا، ۲۰۰۸).

روش‌های فیلتر عددی برگشتی

لی و همکاران (۲۰۱۳) معتقدند روش‌های فیلتر دیجیتالی برگشتی به دلیل کاربرد نسبتاً ساده و مؤثری که دارند بیشتر از دیگر روش‌های تفکیک آب پایه به کار گرفته می‌شوند.

روش فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره^۱

این روش توسط لین و هولیک در سال ۱۹۷۹ برای اولین بار ارائه گردیده که تنها به تعیین پارامتر ثابت بازگشت (α) نیاز دارد. جریان پایه در این روش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

در رابطه فوق: b_k : جریان پایه فیلتر شده در زمان k (متر مکعب بر ثانیه)، b_{k-1} : جریان پایه فیلتر شده در زمان $k-1$ (متر مکعب بر ثانیه)، α : پارامتر فیلتر مرتبط با حوضه آبخیز، y_k : جریان کل رودخانه در زمان k (مترمکعب بر ثانیه)، y_{k-1} : جریان کل رودخانه در زمان $k-1$ (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشند

ناتان و مک ماهان (۱۹۹۰) طی تحقیقی نشان دادند که در روش فیلتر برگشتی یک پارامتری زمانی بیشترین نتایج قابل قبول حاصل می‌شود که پارامتر فیلتر (α) در دامنه ۰/۹ تا ۰/۹۵ متغیر باشد، همچنین مقدار بهینه آن را ۰/۹۲۵ دانستند. اسماختین و واتکینز (۱۹۹۷) نیز طی تحقیقی نتیجه گرفتند مقادیر بهینه پارامتر فیلتر (α) به طور نرمال بین ۰/۹۸۵ تا ۰/۹۹۵ در نوسان بوده و توصیه نمودند که مقدار ۰/۹۹۵ برای تفکیک جریان پایه روزانه در نظر گرفته شود. در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی روش فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره از مقادیر فیلتر

³ Hydrograph Separation

¹ One-Parameter Filter

² Two Parameter Recursive Digital Filter

ارزیابی کارایی روش‌های مورد استفاده

اندازه‌گیری مقادیر جریان پایه و تغذیه آب زیرزمینی در طبیعت به سهولت قابل انجام نیست. نسبت جریان پایه به کل جریان رودخانه به عنوان شاخصی برای نشان دادن جریان پایه تعریف شده است. لذا بهترین راه استفاده از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهاد شده توسط سایر پژوهشگران می‌باشد. یکی از راه‌هایی که به منظور انتخاب روش مناسب می‌توان از آن استفاده نمود، انتخاب روش BFI به عنوان مبنای مقایسه‌ها می‌باشد (زارع بیدکی و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۳۹۸). مقایسه مقادیر انحراف استاندارد داده‌های آب پایه محاسبه شده روش دیگر برای انتخاب بهترین روش تفکیک هیدروگراف می‌باشد. به این صورت که روشی که کمترین میزان انحراف استاندارد را داشته باشد به عنوان بهترین روش تشخیص داده می‌شود (سمیعی و ملکیان، ۱۳۸۹). در پژوهش حاضر نیز نتایج حاصل از روش BFI به عنوان مقادیر آب پایه مشاهداتی و نتایج سایر روش‌ها به عنوان مقادیر آب پایه برآوردی در نظر گرفته شد. سپس نتایج حاصل از روش‌های مختلف تفکیک جریان پایه اعم از روش‌های فیلترینگ لین و هولیک، اکهارت و حداقل محلی با نتایج حاصل از روش BFI به عنوان مبنای مقایسه مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی نتایج روش‌های مذکور در برآورد آب پایه بر اساس مقایسه میزان خطای جریان پایه برآورد شده به روش‌های مختلف با مقادیر جریان پایه روش مبنا (BFI) با استفاده از آزمون‌های معتبر آماری، صورت پذیرفت. بدین صورت که جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات از معیارهایی نظیر: مجور میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱، میانگین مطلق خطا (MAE)^۲، نش-ساتکلیف (NSE)^۳ و انحراف معیار استفاده گردید (ویلکوکس^۴ و همکاران، ۱۹۹۰). نحوه محاسبه این معیارها به صورت روابط زیر می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum |X_o - X_s|}{N} \quad (۵)$$

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum (X_o - X_s)^2}{\sum (X_o - \bar{X}_o)^2} \right] \quad (۶)$$

در روابط فوق: X_o : داده‌های مشاهداتی، X_s : داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o : میانگین داده‌های مشاهداتی و N تعداد داده‌ها می‌باشند. هر چه مقادیر نش-ساتکلیف یکی از روش‌های مورد استفاده به عدد یک و مقادیر معیارهای مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای آن به صفر نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده مناسب بودن روش مورد نظر جهت جداسازی جریان پایه از رواناب مستقیم می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج روش BFI

در این روش مقدار آب پایه روزانه با ورود داده‌های دبی روزانه ایستگاه مورد مطالعه به برنامه BFI طی دوره (۶۶-۱۳۶۵ تا ۹۵-۱۳۹۴) محاسبه گردید. خصوصیات آماری نتایج روش مذکور در جدول (۱) قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج تفکیک هیدروگراف جریان با استفاده از روش BFI (جدول ۱) به طور متوسط ۸۱ درصد از جریان کل رودخانه طی دوره آماری مورد مطالعه را آب پایه و ۱۹ درصد باقی‌مانده را رواناب مستقیم تشکیل داده‌اند.

جدول (۱): خصوصیات آماری آب پایه و رواناب مستقیم

| کل دوره (بر حسب m^3/s) با استفاده از روش BFI | | | |
|---|----------------------|------------------------|---------------------------|
| مشخصات جریان | جریان کل (m^3/s) | جریان پایه (m^3/s) | رواناب مستقیم (m^3/s) |
| حداکثر | ۳/۵۴ | ۰/۸۵ | ۳/۴۷ |
| حداقل | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰ |
| میانگین | ۰/۱۱ | ۰/۰۹ | ۰/۰۲ |

نتایج روش فیلتر عددی یک پارامتره (لین و هولیک)

با احتساب مقادیر ۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ برای پارامتر فیلتر در روش یک پارامتره لین و هولیک جریان پایه روزانه در حوضه آبخیز مورد مطالعه به ترتیب بر مبنای پارامترهای فوق تفکیک گردید. خصوصیات آماری آب پایه و رواناب مستقیم محاسبه شده به روش لین و هولیک در منطقه مورد مطالعه به شرح جدول (۲) می‌باشد. شکل (۳) مقایسه مقادیر جریان پایه و رواناب مستقیم برآورد شده توسط روش لین و هولیک با

^۵ Nash-Sutcliffe Efficiency

^۶ Wilcox

^۳ Root Mean Square Error

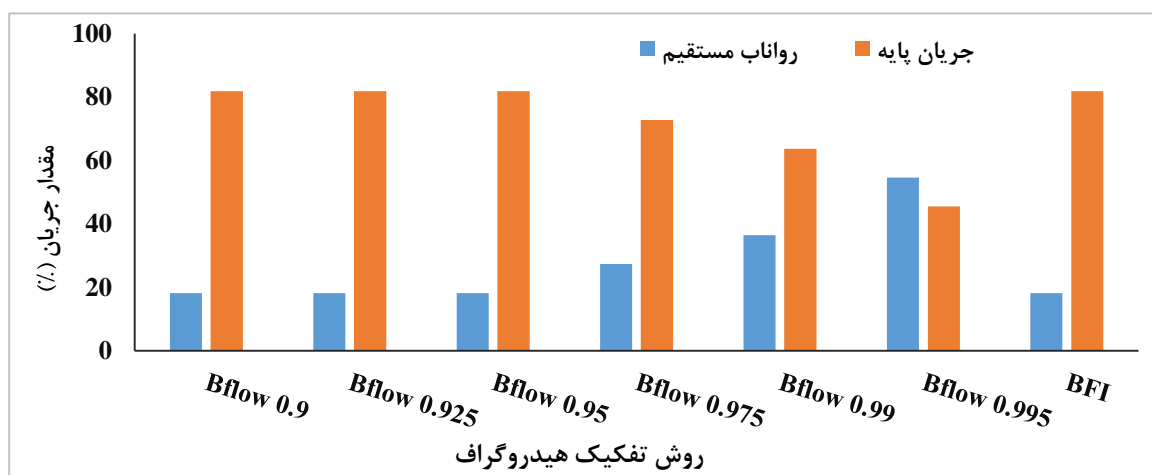
^۴ Mean Absolute Error

ترتیب ۷۱ و ۲۹ درصد از جریان کل رودخانه را تشکیل می‌دهند. شکل (۴) جریان کل رودخانه و جریان پایه تفکیک شده به روش لین و هولیک (Bflow) در مقایسه با جریان پایه روش BFI را در سال آبی ۱۳۷۵-۷۶ به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

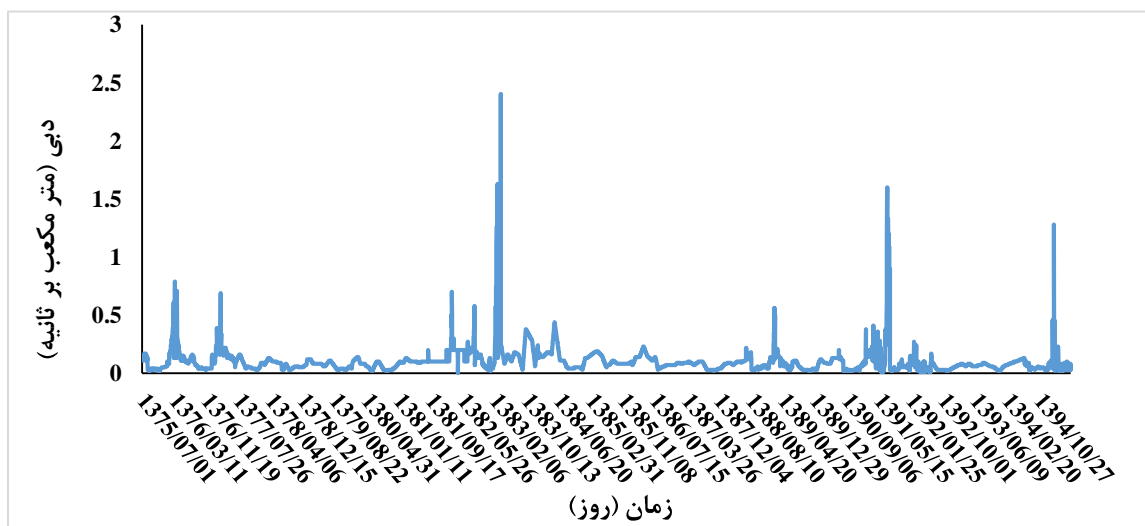
پارامترهای مختلف و روش BFI را به صورت درصدی از کل جریان نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تفکیک هیدروگراف جریان در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش لین و هولیک نشان داد که طی دوره آماری مورد مطالعه، مقدار آب پایه و رواناب مستقیم به طور متوسط به

جدول (۲): خصوصیات آماری آب پایه و رواناب مستقیم کل دوره (بر حسب m^3/s) با روش لین و هولیک با فیلترهای مختلف

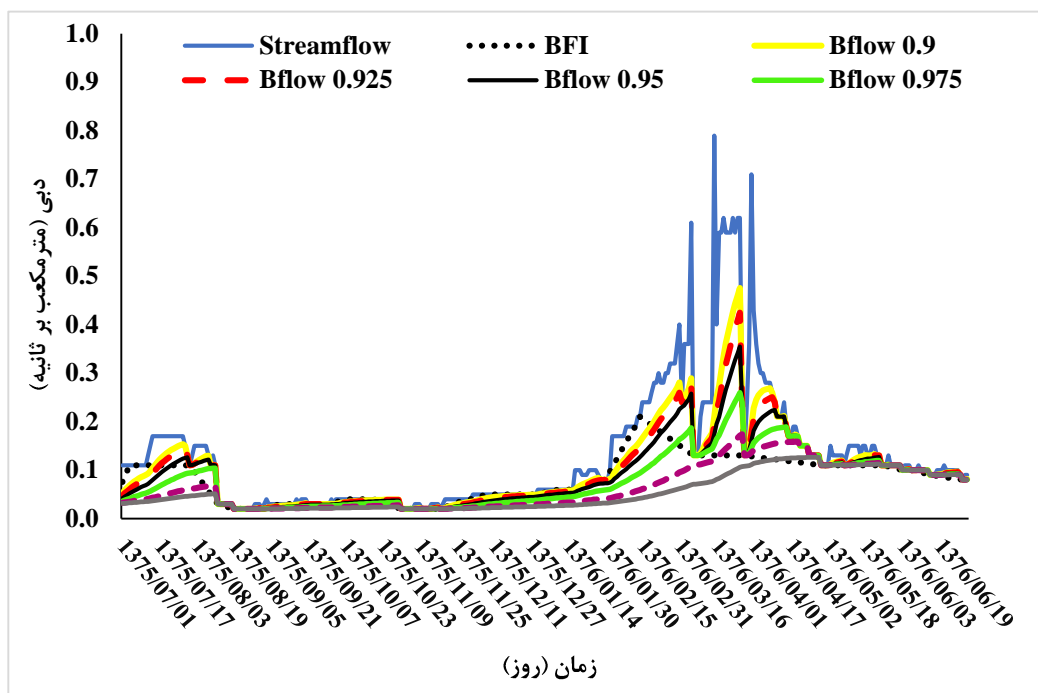
| | | روش لین و هولیک | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------|--|
| | | فیلتر ۰/۹ | | فیلتر ۰/۹۲۵ | | فیلتر ۰/۹۵ | | فیلتر ۰/۹۷۵ | | فیلتر ۰/۹۹ | | فیلتر ۰/۹۹۵ | | جریان کل | |
| مشخصات | جریان (بر ثانیه) | آب رواناب | پایه مستقیم | آب رواناب | پایه مستقیم | آب رواناب | پایه مستقیم | آب رواناب | پایه مستقیم | آب رواناب | پایه مستقیم | آب رواناب | پایه مستقیم | مترمکعب | |
| حداکثر | ۳/۵۴ | ۱/۰۶ | ۳/۲۵ | ۰/۹۸ | ۳/۳۲ | ۰/۸۳ | ۳/۴۱ | ۰/۵۹ | ۳/۴۷ | ۰/۳ | ۳/۴۹ | ۰/۱۸ | ۳/۵۴ | | |
| حداقل | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | | |
| میانگین | ۰/۱۱ | ۰/۰۹ | ۰/۰۲ | ۰/۰۹ | ۰/۰۲ | ۰/۰۹ | ۰/۰۳ | ۰/۰۸ | ۰/۰۴ | ۰/۰۷ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۱۱ | | |
| ضریب تغییرات | ۳/۹۴ | ۰/۸۲ | ۳/۶۱ | ۰/۷۹ | ۳/۲ | ۰/۷۵ | ۲/۶۴ | ۰/۶۹ | ۲/۱ | ۰/۶۱ | ۱/۸ | ۰/۵۶ | ۳/۹۴ | | |



شکل (۳): مقایسه جریان پایه و رواناب مستقیم برآوردی به صورت درصدی از جریان کل توسط روش لین و هولیک و BFI



شکل (۳): سری زمانی داده‌های دبی روزانه مورد استفاده در سال آبی ۱۳۷۵-۷۶



شکل (۴): مقایسه جریان کل رودخانه با جریان پایه تفکیک شده توسط روش‌های لین و هولیک (Bflow) و BFI در سال آبی ۷۶-۱۳۷۵

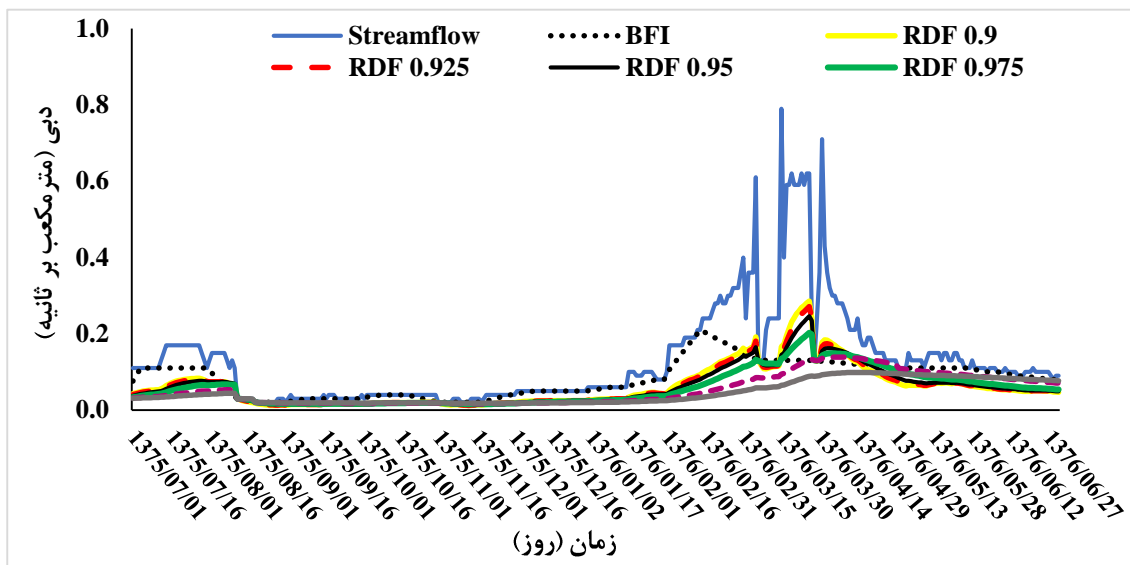
BIF در سال آبی ۷۶-۱۳۷۵ در شکل (۵) نشان داده شده است. بر اساس نتایج روش مذکور جریان پایه به طور متوسط ۴۳ درصد از جریان کل رودخانه و رواناب مستقیم ۵۷ درصد آنرا را در منطقه مورد مطالعه به خود اختصاص می‌دهند. انحراف معیار محاسبه شده برای آب پایه و رواناب مستقیم برآوردی در روش لین و هولیک و روش اکهارت (جدول ۲ و ۳) نشان داد که نتایج روش لین و هولیک با مقادیر فیلتر ۰/۹۹۵ و ۰/۹۹ به ترتیب با نتایج روش اکهارت با فیلتر ۰/۹۹۵ و ۰/۹۷۵ مطابقت دارند.

نتایج روش فیلتر دیجیتال برگشتی (اکهارت)

در روش اکهارت با در نظر گرفتن پارامترهای ۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵، ۰/۹۷۵، ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ برای پارامتر فیلتر و مقدار ۰/۵ برای شاخص جریان پایه حداکثر (BFI_{max}) آب پایه ایستگاه مورد بررسی تفکیک گردید. نتایج خصوصیات آماری جریان پایه و رواناب مستقیم حاصل از روش مذکور در جدول (۳) و مقایسه جریان کل رودخانه با جریان پایه حاصل از روش‌های اکهارت (RDF) و روش

جدول (۳): خصوصیات آماری آب پایه و رواناب مستقیم کل دوره (بر حسب m^3/s) با روش اکهارت با فیلترهای مختلف

| روش اکهارت | | فیلتر ۰/۹۹۵ | | فیلتر ۰/۹۷۵ | | فیلتر ۰/۹۵ | | فیلتر ۰/۹۲۵ | | فیلتر ۰/۹ | | مشخصات جریان (مترمکعب بر ثانیه) |
|------------|------|-------------|------|-------------|------|------------|------|-------------|------|-----------|------|---------------------------------|
| رواناب | آب | رواناب | آب | رواناب | آب | رواناب | آب | رواناب | آب | رواناب | آب | |
| ۳/۵۴ | ۰/۱۵ | ۳/۴۸ | ۰/۲۵ | ۳/۴۵ | ۰/۴۱ | ۳/۳۸ | ۰/۵۲ | ۳/۲۸ | ۰/۶ | ۳/۲ | ۰/۶۵ | حداکثر |
| ۰/۰۱ | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | حداقل |
| ۰/۱۱ | ۰/۰۴ | ۰/۰۷ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | میانگین |
| ۰/۵۴ | ۱/۵ | ۰/۶۱ | ۱/۵۲ | ۰/۷۱ | ۱/۴۷ | ۰/۷۹ | ۱/۳۹ | ۰/۸۴ | ۱/۳۴ | ۰/۸۶ | ۱/۳ | ضریب تغییرات |



شکل(۵): مقایسه جریان کل رودخانه با جریان پایه تفکیک شده توسط روش‌های اکهارت (RDF) و BFI در سال آبی ۷۶-۱۳۷۵

BFI و جریان کل رودخانه در سال آبی ۷۶-۱۳۷۵ در شکل (۷) نشان داده شده است.

جدول (۴): خصوصیات آماری آب پایه و رواناب مستقیم کل دوره (بر حسب m^3/s) با استفاده از روش حداقل

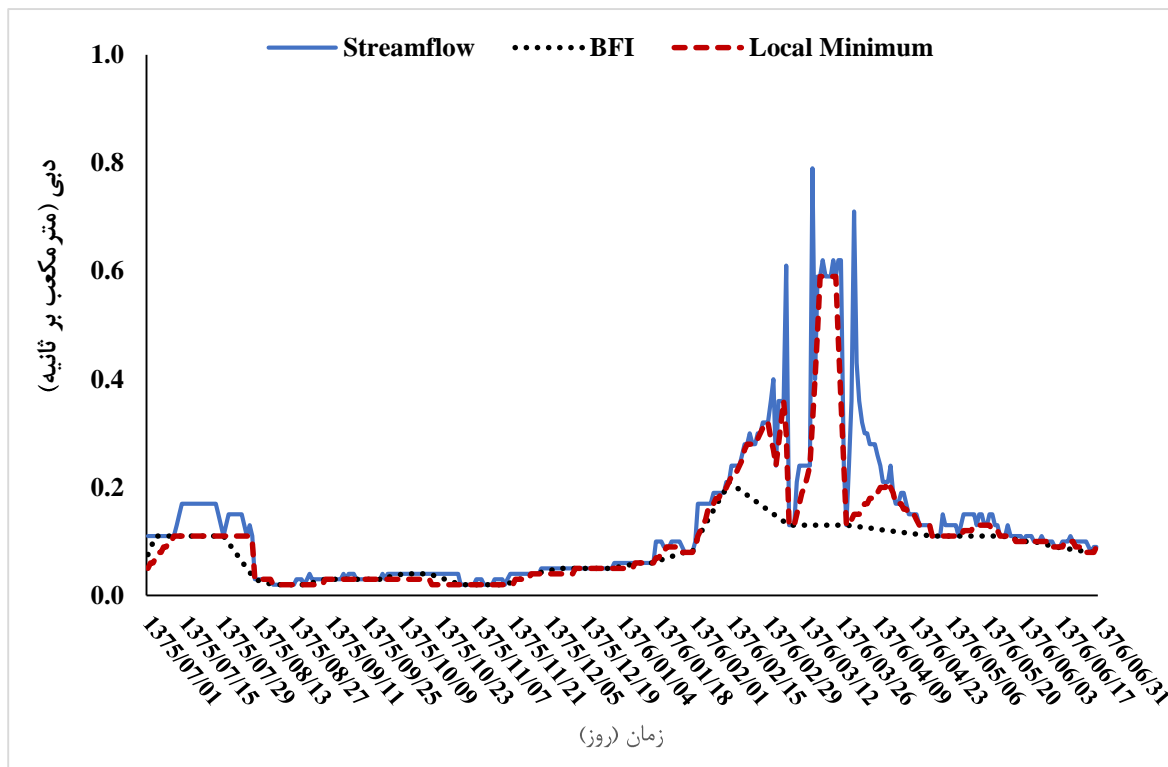
| محلی | | | مشخصات جریان |
|---------------------------|------------------------|----------------------|--------------|
| رواناب مستقیم (m^3/s) | جریان پایه (m^3/s) | جریان کل (m^3/s) | |
| ۳/۴۲ | ۱/۲۶ | ۳/۵۴ | حداکثر |
| ۰۰۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | حداقل |
| ۰/۰۲ | ۰/۰۹ | ۰/۱۱ | میانگین |
| ۱/۳ | ۰/۸۵ | | ضریب تغییرات |

نتایج روش حداقل محلی^۱

خصوصیات آماری آب پایه و رواناب مستقیم کل دوره آماری با استفاده از روش حداقل محلی در جدول (۴) آورده شده است. شکل (۵) نیز مقادیر جریان پایه و رواناب مستقیم برآورد شده به صورت درصدی از جریان کل، توسط روش‌های حداقل محلی و روش اکهارت (RDF) با پارامترهای مختلف در مقایسه روش BFI را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از روش حداقل محلی طی دوره آماری مورد بررسی به طور متوسط ۸۱ درصد جریان کل رودخانه را جریان پایه و مابقی را رواناب مستقیم به خود اختصاص می‌دهند که از این حیث نتایج روش حداقل محلی با نتایج روش BFI مطابقت داشته است. مقایسه جریان پایه تفکیک شده به روش مذکور در مقایسه با روش



شکل(۶): مقایسه جریان پایه و رواناب مستقیم برآوردی به صورت درصدی از جریان کل توسط روش‌های اکهارت، حداقل محلی و BFI



شکل (۷): مقایسه جریان کل رودخانه با جریان پایه تفکیک شده توسط روش‌های حداقل محلی و BFI در سال آبی ۷۶-۱۳۷۵

بحث و نتیجه‌گیری

روش تشخیص داده می‌شود (سمعی و ملکیان، ۱۳۸۹). با توجه به نتایج جدول (۵) روش فیلتر یک پارامتره لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۵ در مقایسه با سایر روش‌ها کمترین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا و همچنین دارای نزدیک‌ترین مقدار شاخص نش-ساتکلیف به عدد یک می‌باشد. لذا بر مبنای معیارهای خطای مذکور روش لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۵ بهترین روش تفکیک هیدروگراف در ایستگاه مورد مطالعه می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از ضریب تعیین (R^2) نیز روش‌های لین و هولیک با ضرایب ۰/۹۲۵ و ۰/۹۵ نتایج یکسانی نشان داده و دارای بیشترین میزان ضریب تعیین هستند. همچنین روش‌های اکهارت با فیلتر ۰/۹۹ و ۰/۹۹۵ به ترتیب بیشترین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا و همچنین کمترین مقادیر شاخص نش-ساتکلیف و ضریب تعیین نسبت به سایر روش‌ها را دارا می‌باشند. با اینحال نتایج حاصل از شاخص انحراف معیار در روش‌های مختلف نشان داد که روش اکهارت با فیلتر ۰/۹۹۵ نسبت به سایر روش‌ها دارای کمترین مقدار انحراف معیار (۰/۰۲) بوده است.

با توجه به عدم وجود مقادیر مشاهداتی آب پایه، انتخاب مناسب‌ترین روش تفکیک هیدروگراف و جداسازی جریان پایه از رواناب مستقیم بسیار مشکل می‌باشد (اکهارت، ۲۰۰۸). لذا در تحقیق حاضر از روش‌های مقایسه‌ای پیشنهاد شده توسط سایر پژوهشگران استفاده گردید. یکی از راه‌هایی که به منظور انتخاب روش مناسب می‌توان از آن استفاده نمود، انتخاب روش BFI به عنوان مبنای مقایسه‌ها می‌باشد (زارع بیدکی و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۳۹۸). لذا در این پژوهش نتایج حاصل از سایر روش‌ها با نتایج روش مذکور به عنوان مقادیر جریان پایه مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت به منظور مقایسه نتایج از معیارهای نش-ساتکلیف، مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا و ضریب تعیین استفاده گردید. مقایسه مقادیر انحراف استاندارد داده‌های آب پایه محاسبه شده روش دیگر برای انتخاب بهترین روش تفکیک هیدروگراف می‌باشد. به این صورت که روشی که کمترین میزان انحراف استاندارد را داشته باشد به عنوان بهترین

جدول (۵): معیارهای خطا و ضریب تعیین روش‌های مختلف برآورد آب پایه در مقایسه با روش مبنا (BFI)

| روش تفکیک هیدروگراف | انحراف معیار | مجذور میانگین مربعات خطا | میانگین مطلق خطا | نش-ساتکلیف | ضریب تعیین |
|----------------------------|--------------|--------------------------|------------------|------------|------------|
| لین و هولیک با فیلتر ۰/۹ | ۰/۰۸ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۱ | ۰/۵۹ | ۰/۷۶ |
| لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۲۵ | ۰/۰۷ | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۱ | ۰/۶۷ | ۰/۷۷ |
| لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۵ | ۰/۰۷ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱ | ۰/۷۳ | ۰/۷۷ |
| لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۷۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۱۴ | ۰/۷۱ | ۰/۷۴ |
| لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴۳ | ۰/۰۲۳ | ۰/۴۵ | ۰/۶۱ |
| لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۹۵ | ۰/۰۳ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۳۱ | ۰/۱۴ | ۰/۴۶ |
| اکهارت با فیلتر ۰/۹ | ۰/۰۵ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۳۴ | ۰/۳۵ | ۰/۶۹ |
| اکهارت با فیلتر ۰/۹۲۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۳۴ | ۰/۳۵ | ۰/۷ |
| اکهارت با فیلتر ۰/۹۵ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۳۴ | ۰/۳۳ | ۰/۷۱ |
| اکهارت با فیلتر ۰/۹۷۵ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳۵ | ۰/۲۵ | ۰/۶۹ |
| اکهارت با فیلتر ۰/۹۹ | ۰/۰۳ | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۳ | ۰/۵۷ |
| اکهارت با فیلتر ۰/۹۹۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۴۱ | -۰/۱۸ | ۰/۴۴ |
| روش حداقل محلی | ۰/۰۸ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۱۳ | ۰/۲۵ | ۰/۵۸ |

برگشتی با پارامتر فیلتر بیش از ۰/۹ را مناسب دانسته‌اند که نتایج حاصل از بررسی مقادیر آماره انحراف استاندارد در تحقیق حاضر را تأیید می‌نماید. بروسکوا (۲۰۰۸) روش BFI را روشی مناسب برای برآورد مقدار دبی پایه تشخیص داده و تأکید کرده است که می‌توان در مناطقی که داده‌های دبی جریان موجود است از این روش استفاده نموده و نتایج قابل اعتمادی برای مطالعات هیدرولوژیکی بدست آورد. برخی محققین همچون قنبرپور و همکاران (۱۳۸۷)، دولت آبادی و همکاران (۱۳۹۱) و همچنین اوبرین و همکارانش (۲۰۱۳) نیز در مطالعات خود روش اکهارت را روشی مناسب و سریع جهت جداسازی جریان پایه دانسته‌اند که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی ندارد. مقایسه میانگین آب پایه برآوردی توسط روش‌های مختلف با روش مبنا طی دوره سی ساله مورد مطالعه (شکل‌های ۲ و ۳) نشان می‌دهد روش‌های لین و هولیک با مقادیر فیلتر مختلف و روش حداقل محلی با روش مبنا اختلاف معنی‌داری نداشته و حتی در بعضی موارد نتایج مقایسه میانگین با روش BFI مطابقت دارد. سمیعی و ملکیان (۱۳۸۹) در مقایسه روش‌های برآوردی دبی پایه در رودخانه دهکده سفید اختلاف معنی‌داری مشاهده نکردند. حسنی و همکاران (۱۳۹۱) نیز نشان دادند نتایج حاصل از روش‌های مختلف در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارد. همچنین زارعی بیدکی و

آب پایه یکی از شاخص‌های هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز محسوب شده و تحت تأثیر عوامل مختلف قرار دارد. لذا مناطق جغرافیایی مختلف با شرایط اقلیمی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و توپوگرافی متفاوت نسبت به روش‌های تفکیک هیدروگراف موجود پاسخ‌های مختلفی ارائه می‌دهند. حسنی و همکارانش (۱۳۹۱) با استفاده از مقادیر انحراف استاندارد روش فیلتر عددی برگشتی یک پارامتره (لین و هولیک) با فیلتر ۰/۹۵ را روشی مناسب برای تفکیک جریان پایه در ایستگاه سیمین دشت رودخانه حبله رود تشخیص دادند که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد، در حالی که ایشان در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی روش حداقل محلی را بهترین روش معرفی نمودند. زارعی بیدکی و همکارانش (۱۳۹۴) طی تحقیق بر اساس مقادیر حاصل از معیارهایی همچون مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا روش HYSEP2 را مناسب‌ترین روش برای تفکیک آب پایه ایستگاه درود لریستان تشخیص دادند. از طرفی ایشان روش لین و هولیک با فیلتر ۰/۹ را نیز به دلیل انحراف استاندارد کمتر نسبت به سایر روش‌ها، روشی مناسب برای تفکیک آب پایه دانستند. تیموری و همکاران (۱۳۹۰) نیز در مطالعه خود روش فیلتر برگشتی یک پارامتره با فیلتر ۰/۹۲۵ را دارای کارایی مناسبی دانستند که با نتایج بخشی از تحقیق حاضر همخوانی دارد. اسماختین و واتکینز (۱۹۹۷) نیز روش فیلتر عددی

مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲(۴۴): ۱-۱۰.

۷) زارع بیدکی، ر.، مهدیان فرد، م.، هنریخش، ا.، و زینی-وند، ح. ۱۳۹۴. برآورد جریان پایه رودخانه تیره لتان به منظور ارزیابی جریان زیست‌محیطی. اکوهیدرولوژی، ۲(۳): ۲۷۵-۲۸۷.

۸) باقریان کلات، ع.، لشکری‌پور، غ.، غفوری، م.، و عباسی، ا. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر نوع لیتولوژی بر فرسایش و رسوبدهی خاک در حوزه آبخیز سنگرد. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰(۴): ۶۸۵-۶۷۱.

۹) کاظمی، ر.، و شریفی، ف. ۱۳۹۶. بررسی و ارائه روابط منطقه‌ای شاخص جریان پایه در حوضه‌های همگن استان کرمان. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۹(۱): ۹۷-۱۰۷.

۱۰) زارع بیدکی، ر.، قرهی، ن.، و مهدیان فرد، م. ۱۳۹۸. مقایسه روش‌های جداسازی آب پایه از رواناب مستقیم در حوزه آبخیز دورود. مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۵(۳): ۲۱۲-۲۰۰.

11) Aksoy, H., Kurt, I., and Eris, E. 2009. Filtered Smoothed Minima base flow separation method. *Journal of Hydrology*. 372: 94-101.

12) Bruszkova, V. 2008. Assessment of the Base Flow in the Upper Part of Torysa River Catchment, Slovak. *Journal of Civil Engineering*, 2: 8-14.

13) Eckhardt, K. 2005. How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrology Process*, 19(2): 507-515.

14) Eckhardt, K. 2008. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*. 352: 168-173.

15) Li, Q., Xing, Z., Danielescu, S., Li, S., Jiang, Y., and Meng, F. 2014. Data requirements for using combined conductivity mass balance and recursive digital filter method to estimate groundwater recharge in a small watershed, New Brunswick, Canada. *Journal of Hydrology*, 511: 658-664.

16) Nathan, R.J., and McMahon, T.A. 1990. Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analysis. *Water Resources Research*, 26(7):1465-1473.

17) Brien, 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.

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

19) Smakhtin, V.U. 2001. Estimating continuous monthly base flow time series and their possible

همکاران (۱۳۹۴) با بررسی آماری مقایسه میانگین دبی پایه بیان کردند اختلاف معنی داری در روش‌های منتخب مشاهده نشده است. در مجموع بر اساس معیارهای خطای بررسی می‌توان روش لین و هولیک با فیلتر ۰/۹۵ را بعنوان مناسب‌ترین روش جهت برآورد جریان پایه به منظور استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی و برآورد حبابه زیست-محیطی حوزه آبخیز مورد مطالعه پیشنهاد نمود. نتایج این روش نشان می‌دهد جریان پایه حدود ۸۱ درصد از جریان رودخانه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

منابع

۱) تمسکنی، ا.، ذاکری‌نیا، م.، هزارجریبی، ا.، و دهقانی، ا. ۱۳۹۲. مقایسه روش‌های جداسازی دبی پایه از هیدروگراف روزانه جریان (مطالعه موردی حوضه بالادست سد بوستان در استان گلستان). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰(۶): ۱۴۵-۱۲۷.

۲) تیموری، م.، قنبرپور، م.ر.، گنبد، م.ب.، ذوالفقاری، م.، و کاظمی‌نیا، س. ۱۳۹۰. مقایسه شاخص جریان پایه در روش‌های مختلف تجزیه هیدروگراف جریان در تعدادی از رودخانه‌های استان آذربایجان غربی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۵۷): ۲۲۸-۲۱۹.

۳) حسنی، م.، ملکیان، ا.، رحیمی، م.، سمیعی، م.، و خاموشی، م. ۱۳۹۱. بررسی کارایی برخی از روش‌های جداسازی جریان پایه در رودخانه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز حبله رود). دوفصلنامه علمی-پژوهشی خشک بوم، ۲(۲): ۲۲-۱۰.

۴) دولت‌آبادی، ن.خ.، حسینی، ع.ر.، داوری، ک.، و مساعدی، ا. ۱۳۹۱. برآورد جریان پایه با استفاده از روش-های فیلتر دیجیتال بازگشتی و نرم‌افزار BFI_3.0 (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز مهارلو-بختگان). سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، ساری.

۵) سمیعی، م.، و ملکیان، ا. ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های جداسازی جریان پایه با استفاده از فیلتر عدد برگشتی و مدل PART. مجموعه مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، دانشگاه تربیت مدرس.

۶) قنبرپور، م.ر.، تیموری، م.، و غلامی، ش.ع. ۱۳۸۷. مقایسه روش‌های برآورد دبی پایه بر اساس تفکیک هیدروگراف جریان (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کارون).

- 34) Somers, K.A., Bernhardt, E.S., McGlynn, B.L., and Urban, D.L. 2016. Downstream Dissipation of Storm Flow Heat Pulses: A Case Study and its Landscape-Level Implications. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 52, 281–297.
- 35) Regan, R.S., Markstrom, S.L., Hay, L.E., Viger, R.J., Norton, P.A., Driscoll, J.M., and LaFontaine, J.H. 2018. Description of the National Hydrologic Model for Use with the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS); U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-B9; USGS: Reston, VA, USA, 2018; p. 38.
- 36) Regan, R.S., Juracek, K.E., Hay, L.E., Markstrom, S.L., Viger, R.J., Driscoll, J.M., LaFontaine, J.H., and Norton, P.A. 2019. The US Geological Survey National Hydrologic Model infrastructure: Rationale, description, and application of a watershed-scale model for the conterminous United States. *Environ. Model. Softw.* 111, 192–203.
- 37) Santhi, C., Allen, P.M., Muttiah, R.S., Arnold, J.G., Tuppad, P. 2008. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions. *J. Hydrol.* 351, 139–153.
- 38) Trauth, N., Musol, A., Knöller, K., Kaden, U.S., Keller, T., Werban, U., and Fleckenstein, J.H. 2018. River water infiltration enhances denitrification efficiency in riparian groundwater. *Water Res.* 130, 185–199.
- 39) Kouanda, B., Coulibaly, P., Niang, D., Fowe, T., Karambiri, H., Emmanuel Paturel, J. 2018. Analysis of the Performance of Base Flow Separation Methods Using Chemistry and Statistics in Sudano-Sahelian Watershed, Burkina Faso. *Hydrol Current Res* 9: 300. doi: 10.4172/2157-7587.1000300
- 40) Foks, S.S., Raensperger, J.P., Penn, C.A., and Driscoll, J.M. 2019. Estimation of Base Flow by Optimal Hydrograph Separation for the Conterminous United States and Implications for National-Extent Hydrologic Models. *Water*. 11, 1629. doi:10.3390/w11081629
- 41) Stoelzle, M., Schuets, T., Weiler, M., Stahl, K., and Tallaksen, L.M. 2019. Beyond binary baseflow separation: delayed flow index as a fresh perspective on streamflow contributions. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-236>
- applications in the context of the ecological reserve, ISSN 0378-4738., *Water SA*, 27(2): April 2001.
- 20) Hughes, D. A., Pauline, H., and Watkins, D. 2003. Continuous base flow separation from time series of daily and monthly stream flow data. *Water SA*, 29(1): 43-48.
- 21) Lyne, V.D., and Hollick, M. 1979. Stochastic time-variable rainfall runoff modeling. *Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineering, Australia, Perth*, pp: 89–92.
- 22) Arnold, J.G. and Allen, P. M. 1999. Automated methods for estimating base flow and ground water recharge from stream flow records. *Journal of American Water Resources Association*, 35(2): 411-424.
- 23) Rutledge, A.T. and Daniel, C.C. 1994. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from stream flow records. *Groundwater*. 32(2): 180-189.
- 24) Newman, B. D., Wilcox, B. P., Archer, S.R., Breshears, D. D., Dahm, C. N., and Duffy, C. J. 2006. Eco-hydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research*, 42, W0 6302. doi:10.1029/2005WR004141.
- 25) Chapman, T. G, and Maxwell, A. I. 1996. Base flow separation—comparison of numerical methods with tracer experiments. *Institute Engineers Australia National Conference. Publ. 96/05*, 539-545.
- 26) Zhang, Y.K., and Schilling, K.E. 2006. Increasing streamflow and base flow in Mississippi River since the 1940s: Effect of land use change. *Journal of Hydrology*. 324(1–4): 412–422.
- 27) Hall, F. 1968. Base flow recessions – a review. *Water Resources Research*, 4(5): 973-983.
- 28) Jaime, P. A. and Oxtobee, K.N. 2002. A field investigation of groundwater/surface water interaction in a fractured bedrock environment. *Journal of Hydrology*. 269(3–4): 169–193.
- 29) Szilagyi, J. 2004. Heuristic continuous baseflow separation. *J. Hydrol. Eng. ASCE*. 9(4): 311-318.
- 30) Mau, D.P. and Winter, T.C. 1997. Estimating ground-water recharge from stream flow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Groundwater*. 35(2): 291-304.
- 31) Lott, D.A. and Stewart, M.T. 2016. Base flow separation: A comparison of analytical and mass balance methods. *Journal of Hydrology* 535: 525-533.
- 32) Price, K. 2011. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 35, 465–492.
- 33) Miller, M.P., Buto, S.G., Susong, D.D., Rumsey, C.A. 2016. The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin. *Water Resources Research*. 52, 3547–3562.

