

مقایسه اثر روش‌های مختلف فیلتر کردن جریان‌های روزانه برای جداسازی جریان پایه (مطالعه موردی: رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه)

بهزاد حصاری^{۱*}، پریسا یوسفی^۲، مهدی علی‌نیا^۳

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۳. دانش‌آموخته مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۲/۱۲)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، مقایسه روش‌های مختلف جداسازی دبی پایه براساس آمار یازده‌ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۰) جریان روزانه پنج ایستگاه آب‌سنجی واقع در غرب دریاچه ارومیه بود. به این منظور، از روش‌های محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی جابه‌جاشونده، حداقل موضعی، الگوریتم لاین و هالیک با چهار فیلتر عددی و اکهارت با دو فیلتر عددی استفاده شد. پس از آن، مقادیر شاخص جریان پایه به دست آمده با استفاده از معیارهای همبستگی جریان، میانگین مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطا تحلیل شد. نتایج نشان داد میانگین سالیانه شاخص مربوطه برای تمامی ایستگاه‌ها در کل دوره بین ۷۴/۵ و ۸۹/۸ در نوسان است که نشان‌دهنده مشارکت زیاد آب‌های زیرسطحی در تأمین جریان این رودخانه‌هاست. همچنین، نتایج نشان داد در تمامی ایستگاه‌ها الگوریتم لاین و هالیک با فیلتر عددی ۰/۹ و در کنار آن، روش اکهارت با فیلتر ۰/۹ مناسب‌ترین روش برای استخراج جریان پایه بودند. این دو روش منتخب می‌توانند در غیاب روش‌های ردیابی با مواد شیمیایی، برای استخراج جریان پایه در منطقه مطالعه شده مفید باشند. پس از انتخاب بهترین روش، جریان پایه در ایستگاه‌های بند، بابرود و تپیک با استفاده از داده‌های بلندمدت جریان محاسبه شده و تأثیر احداث سد و مصارف کشاورزی بر دبی پایه بحث شد. سپس، روند سالانه جریان پایه ایستگاه بند با استفاده از آزمون من-کندال بررسی شد. نتایج تحلیل روند نشان داد جریان پایه این ایستگاه روند نزولی معناداری دارد.

کلیدواژگان: جداسازی جریان پایه، روش اکهارت، روش لاین و هالیک، روش محدوده زمانی ثابت و جابه‌جاشونده، غرب دریاچه ارومیه.

مقدمه

شناخت و آگاهی از رفتار آبدهی رودخانه‌ها به‌خصوص در مواقع کم‌آبی به منظور مدیریت و بهره‌برداری مناسب از رودخانه‌ها، امری ضروری و لازم است. از سوی دیگر، امروزه با توجه به مشکلات زیست‌محیطی رودخانه‌ها با رویکرد مفهوم توسعه پایدار، جداسازی آبدهی پایه و همچنین تحلیل جریان‌های کم رودخانه‌ها اهمیت زیادی دارد، زیرا کاهش بیش از حد آبدهی رودخانه‌ها به افزایش احتمال ایجاد مسائل زیست‌محیطی برای ذخایر آبیان و گیاهان منجر خواهد شد. شاخص دبی پایه در تحلیل‌های بیلان آب، برآورد سیلاب و کاربرد دارد [۱ و ۲].

براساس تعریف هال [۳] جریان پایه نشان‌دهنده پاسخ رودخانه ناشی از جریان آب زیرزمینی و جریان‌های دیگری است که به آرامی به جریان اصلی رودخانه می‌پیوندند. در بسیاری از حوضه‌های آبریز، جریان پایه به عنوان بخش مهمی از جریان رودخانه بوده و به این منظور نیز مطالعات مختلف و گسترده‌ای در این مورد صورت گرفته است [۳ و ۴].

جداسازی جریان پایه روشی است که بخش پاسخ سریع رواناب سطحی جریان را از بخشی که نتیجه آب زیرزمینی ورودی به رودخانه است، جدا می‌کند [۵]. نیسن و مک‌ماهان [۶] بررسی جامعی از روش‌های جداسازی مشخصه‌های مختلف جریان را ارائه کرده‌اند.

روش‌های جداسازی جریان پایه به سه قسمت تقسیم می‌شود: روش‌های تحلیلی، تجربی و بیلان جرم. روش‌های تحلیلی معمولاً بر اصول حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی و سطحی مبتنی است. به طور مثال، مدل هیدروگراف واحد و معادله بوزینسک از این نوع هستند [۷ و ۸]. ایراد این روش‌ها فرض ایده‌آل بودن جریان است که همیشه نمی‌تواند درست باشد [۹ و ۱۰]. روش‌های تجربی نیز بر کالیبراسیون یک مدل با اندازه‌گیری میدانی مبتنی‌اند و روش‌های بیلان آب بر این فرض هستند که جریان پایه در مقایسه با رواناب سطحی دارای خصوصیات شیمیایی متفاوتی است، زیرا مسیر عبور این دو جریان با هم تفاوت دارد.

روش‌های سنتی جداسازی جریان پایه از کل هیدروگراف محدود به هیدروگراف‌های تعریف‌شده تک‌وجه^۱ و هیدروگراف‌های مجزا^۲ است [۱۱]. این در

حالی است که هیدروگراف‌های ثبت‌شده به صورت پیوسته و شامل چندین پیک هستند. بنابراین، در سال‌های اخیر، فیلترهای دیجیتال بازگشتی^۳ که از نوع روش‌های تجربی هستند، برای جداسازی هیدروگراف استفاده شده‌اند. در فیلترهای دیجیتال بازگشتی، براساس اصل استفاده‌شده در پردازش سیگنال، جریان پایه و رواناب مستقیم به ترتیب به عنوان سیگنال‌های فرکانس پایین و بالا هستند. فیلترهای دیجیتال نوعی روش ساده و کارا و جایگزین مؤثر و مفیدی برای روش‌های گرافیکی هستند.

شناخت مناسب‌ترین روش تفکیک جریان هیدروگراف و برآورد دبی پایه، امکان محاسبه دقیق شاخص دبی پایه^۴ (BFI) را فراهم می‌سازد. شاخص جریان پایه یک نسبت بی‌بعد است که نخستین بار توسط لووویچ [۱۲] در پژوهشکده هیدرولوژی آمریکا به کار گرفته شده است. زیادبودن مقدار این شاخص، بیان‌کننده پایداربودن رژیم جریان در رودخانه‌هاست. در سال‌های اخیر با استفاده از روش‌های مختلفی به جداسازی جریان پایه از هیدروگراف جریان پرداخته شده است.

چپمن [۱۳] اعتمادپذیری الگوریتم‌های فیلتر دیجیتالی تک‌پارامتری (چپمن و مکسول [۱۴])، دوپارامتری (بوتون [۱۵]) و سه‌پارامتری (جیکمن و هورنبرگر [۱۶]) را برای جداسازی هیدروگراف مقایسه کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد الگوریتم‌های تک‌پارامتری محدوده بیشتر از مقدار ۰/۵ برای شاخص BFI دارند، به این معنا که جریان بیشتر متأثر از جریان آب زیرزمینی است. این در حالی است که الگوریتم سه‌پارامتری می‌تواند انعطاف‌پذیری بیشتری به ازای داشتن تعداد بیشتر پارامتر داشته باشد. همچنین، توانایی تولید جریان‌های پایه با پیک‌های تیز را نیز دارد. وی در نهایت الگوریتم دوپارامتری را به عنوان الگوریتم مناسب برای جداسازی جریان پایه انتخاب کرد.

نویتو و وایونینگسی [۱۷] روش‌های محدوده زمانی ثابت و حداقل موضعی و روش‌های تفکیک فیلتری شامل الگوریتم تک‌پارامتره، الگوریتم دوپارامتره باگتون^۵، الگوریتم سه‌پارامتره IHACRES، لاین و هالیک، الگوریتم چاپمن و ایما را در هشت حوضه واقع در جاوای شرقی اندونزی مقایسه کردند و اظهار داشتند که روش‌های لاین

3. Recursive Digital Filters
4. Base Flow Index
5. Boughton two parameter algorithm

1. Single-peaked
2. Isolated hydrographs

کردند و نشان دادند هر سه روش تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

حصاری [۲۴] در مطالعه‌ای برای جداسازی جریان روزانه پایه و جریان روزانه مستقیم از نرم‌افزار HydroOffice استفاده کرد و با انتخاب فیلتر حداقل موضعی با مقادیر پیش فرض پنج روز و ضریب آزمون نقطه بازگشت $f=0.9$ ، ضرایب شاخص جریان پایه برای ایستگاه‌های پای پل و سراب صید علی در حوضه کرخه را تعیین کرد.

مالی و محمدی [۲۵] از روش‌های RDF و با استفاده از نرم‌افزار HydroOffice به استخراج شاخص جریان پایه چشمه‌های کارستی استان چهارمحال و بختیاری پرداختند و شاخص جریان پایه دو چشمه دیمه و پیرغار را ارزیابی کردند. زارع بیدکی و همکارانش [۲۶] در تحقیقی برای برآورد جریان پایه در رودخانه تیره واقع در استان لرستان از آمار ۳۰ ساله (۱۳۶۱-۱۳۹۰) جریان روزانه استفاده کردند و مقدار جریان پایه آنها را با استفاده از روش‌های BFI فیلتر دیجیتال برگشتی به دست آوردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بین ۷۴ تا ۷۸ درصد جریان این رودخانه را جریان پایه تشکیل می‌دهد. نتایج به دست آمده از مقایسه روش‌های یادشده با استفاده از معیار خطا نشان داد روش‌های محدوده زمانی جابه‌جاشونده و فیلتر دیجیتال برگشتی لاین و هالیک با ضریب 0.9 روش مناسبی برای جداسازی جریان پایه از جریان روزانه این رودخانه است.

مهری و همکارانش [۲۷] نتایج روش‌های محدوده زمانی ثابت، جابه‌جاشونده و حداقل موضعی و روش‌های تفکیک فیلتری (الگوریتم یک پارامتره، الگوریتم دو پارامتره باگتون^۳، الگوریتم سه پارامتره JHACRES، لاین و هالیک، الگوریتم چاپمن و ایما) در پنج ایستگاه آب‌سنجی استان اردبیل را مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها با ضریب کارایی نش-ساتکلیف با منحنی خشکیدگی مقایسه شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش الگوریتم دو پارامتره باگتون با ضریب کارایی 0.86 مناسب‌ترین روش برای برآورد جریان پایه در منطقه مطالعه شده است.

کازمی و اسلامی [۲۸] با استفاده از روش فیلتر دیجیتال برگشتی، شاخص جریان پایه را در ۲۵ ایستگاه آب‌سنجی حوضه خزری به ازای داده‌های روزانه جریان، به

و هالیک، ایما و حداقل موضعی کارایی بهتری نسبت به باقی روش‌ها دارند.

استیوارت [۱۸] روش جدیدی به نام فرود و فراز^۱ (BRM) را برای جداسازی جریان پایه ارائه داد و آن را با روش‌های موجود مانند اکهارت مقایسه کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد روش پیشنهادشده نسبت به روش‌های دیگر، نتایج دقیق‌تری را در جداسازی جریان پایه و شاخص جریان پایه ارائه می‌دهد.

آرنولد و آلن [۱۹] در سال ۲۰۰۳ به منظور برآورد جریان پایه و تغذیه آب‌های زیرزمینی و برای مدل‌سازی و کمی کردن فرایند طبیعی تغذیه آب زیرزمینی در شش سایت واقع در غرب و شرق ایالات متحده که در آن بیلان آب قبلی مشاهده شده بود، از نوعی تکنیک اتوماتیک به نام الگوریتم تغذیه استفاده کردند.

ژانگ و همکارانش [۲۰] در تحقیقی به منظور استخراج جریان پایه، روش فیلترهای دیجیتال بازگشتی را با روش بیلان جرم هدایت^۲ کالیبره کردند. سپس، آنها از RDF کالیبره شده برای برآورد میزان جریان پایه ماهانه، فصلی، سالانه و شاخص جریان پایه استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد دقت نتایج RDF پس از کالیبراسیون افزایش درخور توجهی می‌یابد.

روحانی و ملکیان [۲۱] از دو روش فیلتر بازگشتی (RDF) و فیلتر بازگشتی دیجیتال تعمیم‌یافته (GRDF) برای برآورد جریان پایه به ازای داده‌های آینده روزانه (۱۹۹۱-۲۰۰۲) در رودخانه حبله رود استان سمنان استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مقادیر شاخص جریان پایه به ازای روش GRDF بیشتر از روش RDF برآورد شده است.

مینا [۲۲] در تحقیق خود شش روش حداقل موضعی، فیلتر Talaksen، فیلتر Chapman، فیلتر دیجیتال بازگشتی، روش WHAT و فیلتر Ekhardt را برای جداسازی جریان پایه در سه حوضه واقع در رومانی ارزیابی کرد و دو روش Chapman و Ekhardt را به عنوان روش‌های مناسب برای منطقه مطالعاتی برگزید.

ارفع‌نیا و همکارانش [۲۳] از روش‌های محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی جابه‌جاشونده و حداقل موضعی برای جداسازی جریان پایه در حوضه کارستی زاینده رود استفاده

3. Boughton two parameter algorithm

1. Bump and Rise Method
2. Conductivity mass balance method

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و بارزترین اکوسیستم‌های آبی ایران است که حجم آن در دوران پرآبی، معادل ۳۲ میلیارد مترمکعب بود. این دریاچه در شمال غرب ایران بین استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی قرار گرفته است. حوضه دریاچه ارومیه نمونه‌ای از یک حوضه آبریز بسته است که در آن کلیه آب‌های سطحی و زیرزمینی به درون یک دریاچه مرکزی تخلیه می‌شود و اکوسیستم فعال آن شامل دریاچه و حوضه آبریز آن است.

در این مطالعه پنج ایستگاه آب‌سنجی شامل ایستگاه‌های بند (رودخانه شهرچای)، چهریق علیا (زولاچای)، تپیک (نازلوچای)، بابارود (باراندوزچای) و پی‌قلعه (گدارچای) برای ارزیابی روش‌های مختلف جداسازی جریان پایه انتخاب شده‌اند. از میان ایستگاه‌های یادشده، ایستگاه بند در پایین دست یک سد مخزنی در حال بهره‌برداری به نام سد شهرچای، ایستگاه بابارود در خروجی حوضه و پایین دست مصارف کشاورزی و ایستگاه تپیک واقع در ورودی دشت ارومیه و قبل از مصارف کشاورزی قرار گرفته است. درخور یادآوری است که براساس داده‌های موجود، ایستگاه‌های آب‌سنجی چهریق علیا، تپیک، پی‌قلعه، بند و بابارود به ترتیب حدود کمتر از ۱۵ درصد، ۱۰ درصد، یک درصد، ۱۰ درصد و ۳۵ درصد از سال خشک هستند. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی و رودخانه‌های منتخب واقع در غرب دریاچه ارومیه نشان داده شده است. همچنین، مشخصات ایستگاه‌های یادشده در جدول ۱ ارائه شده است.

روش‌ها

تفکیک هیدروگراف جریان

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، تفکیک هیدروگراف جریان شامل جداسازی رواناب مستقیم از جریان پایه است. تا کنون روش‌های متعددی مانند روش بیلان آب، روش فیلترهای بازگشتی، سه روش محدوده زمانی ثابت^۱ و جابه‌جاشونده^۲، روش حداقل موضعی^۳ و روش‌های دیگر برای تفکیک هیدروگراف جریان در مطالعات مختلف

دست آوردند و عوامل مختلف هیدرولوژیکی مؤثر بر شاخص جریان پایه را ارزیابی کردند.

کازمی و قرمزچشمه [۲۹] جریان پایه و شاخص آن را به ازای داده‌های جریان روزانه ۲۰ ایستگاه آب‌سنجی در شمال کشور با استفاده از روش‌های حداقل موضعی، محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی متحرک، RDF یک‌پارامتره و دوپارامتره و چپمن مطالعه کردند. آنها در نهایت، روش فیلتر دیجیتالی برگشتی یک‌پارامتره را به عنوان روشی مناسب معرفی کردند.

در مناطق نیمه‌خشک از جمله حوضه آبریز دریاچه ارومیه، اختلاف معناداری بین ماه‌های خشک و بارانی وجود دارد. در فصول خشک، بیشتر رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه توسط جریان پایه رودخانه تأمین می‌شوند. به طوری که در این فصول، سهم جریان پایه رودخانه از میزان تقاضای جریان کمتر است. بنابراین در این حوضه، کمبود آب در فصول مختلف سال به‌ویژه در فصول خشک، به عنوان مسئله مهمی مطرح است.

هدف از تحقیق حاضر، مقایسه روش‌های مختلف جداسازی جریان پایه رودخانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی چهریق علیا (زولاچای)، تپیک (نازلوچای)، بند (شهرچای)، بابارود (باراندوزچای) و پی‌قلعه (گدارچای) واقع در حوضه دریاچه ارومیه بود. به این منظور، از روش‌های مختلف جداسازی جریان پایه استفاده شد. سپس، عملکرد روش‌های به‌کاررفته با استفاده از معیارهای ضریب همبستگی، مجذور مربعات خطا و میانگین مطلق خطا سنجیده شد. در ضمن، برای هر رودخانه شاخص جریان پایه نیز محاسبه شد. در مطالعات پیشین، جریان پایه رودخانه‌های غرب حوضه دریاچه ارومیه در ایستگاه‌های مطالعه‌شده با روش‌های به کار برده‌شده در تحقیق حاضر، بررسی نشده است. همچنین، در مطالعه حاضر، جریان پایه رودخانه‌ها از منظرهای مختلفی همچون تأثیر سدها و مصارف کشاورزی تحلیل شده است. پس از انتخاب روش برتر، با استفاده از داده‌های بلندمدت ایستگاه‌های بند ارومیه، بابارود و تپیک به استخراج جریان پایه با استفاده از الگوریتم جداسازی منتخب اقدام شد و سپس روند جریان پایه ایستگاه بند با استفاده از آزمون من-کندال ارزیابی شد.

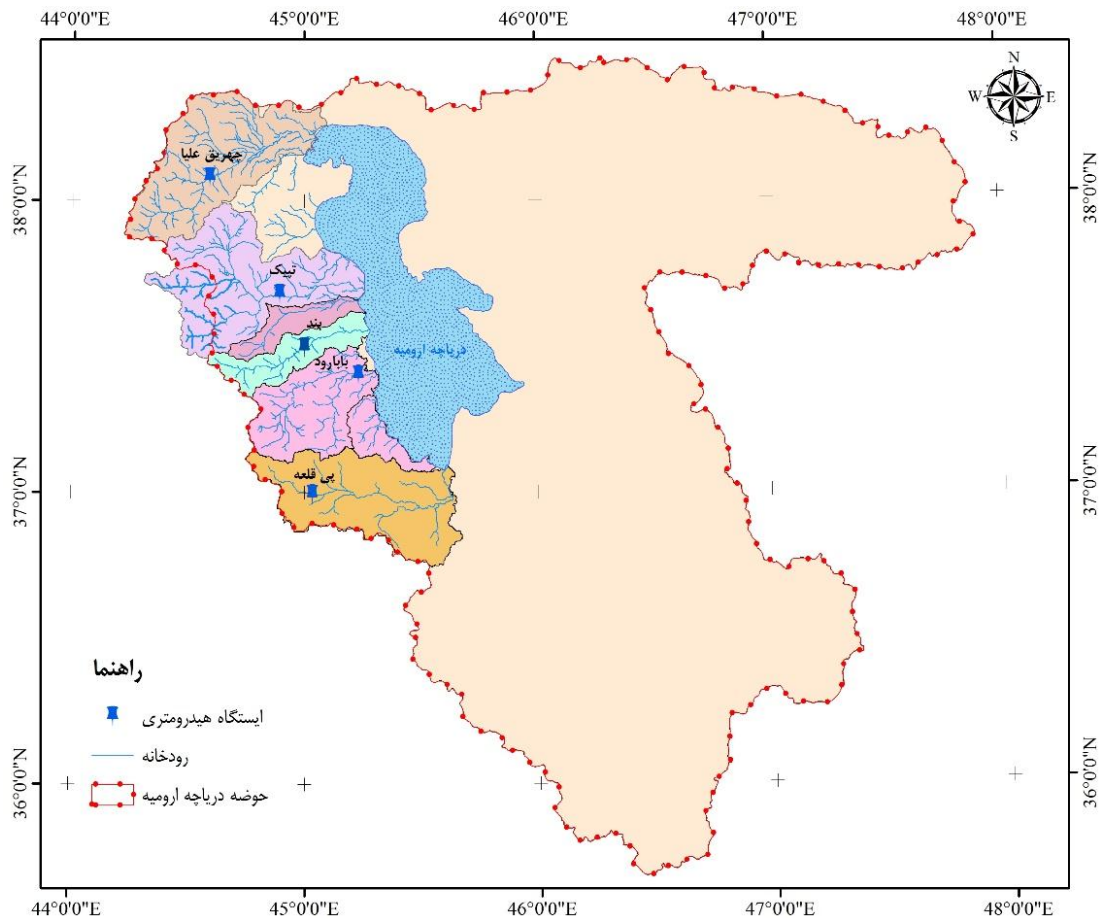
1. Fixed Interval Method
2. Local minimum method
3. Sliding Interval Method

اختصاص می‌دهد. به این صورت که پنجره‌های 2N روزه تا زمانی که هیدروگراف را قطع کند، به سمت بالا حرکت داده می‌شود و جریان نقطه قطع شده روی هیدروگراف به تمام روزهای آن بازه تعلق می‌یابد. پس از آن، پنجره به اندازه 2N روز به صورت افقی حرکت می‌کند و این روند تکرار می‌شود. سپس، از وصل کردن مقادیر مشخص شده، هیدروگراف جریان پایه به دست می‌آید.

توسعه داده شده و استفاده شده است. در مطالعه حاضر، به منظور جداسازی جریان پایه و رواناب مستقیم از روش‌های زیر با استفاده از نرم‌افزار BFI از زیرمجموعه نرم‌افزار HydroOffice استفاده شده است.

روش محدوده زمانی ثابت

این روش کمترین جریان در هر بازه زمانی را به هر روز آن بازه (که از نخستین روز دوره ثبت شروع می‌شود)



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب در حوضه غرب دریاچه ارومیه

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعه شده

نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	مساحت
بند	شهرچای	۴۵° ۰۱'	۳۷° ۳۰'	۱۳۹۰	۴۰۸
چهریق علیا	زولاچای	۴۴° ۳۶'	۳۸° ۰۵'	۱۶۰۰	۸۴۶
تپیک	نازلوچای	۴۴° ۵۴'	۳۷° ۴۰'	۱۴۵۰	۱۷۱۲
باراندوزچای	بابارود	۴۵° ۱۴'	۳۷° ۲۴'	۱۲۸۵	۱۱۶۰
پی‌قلعه	گادارچای	۴۵° ۰۲'	۳۷° ۰۰'	۱۵۰۰	۲۷۷

اکهارت نیز فیلتر رقومی برگشتی را به صورت رابطه ۲ ارائه کرد.

$$q_{f(i)} = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha q_{f(i-1)} + (1 - \alpha)BFI_{max}q_{(i)}}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (2)$$

$q_{f(i)} \leq q_i$ که در آن BFI_{max} بیشترین مقدار نسبت جریان پایه به کل جریان طی دوره آماری است. همچنین، ایشان این شاخص را برای رودخانه‌های دائمی با آبخوان‌های متخلخل ۰/۸، برای رودخانه‌های فصلی با آبخوان‌های متخلخل ۰/۵ و برای رودخانه‌های دائمی با آبخوان‌های با بستر سنگی معادل ۰/۲۵ پیشنهاد کرد [۳۴]. در مطالعه حاضر پارامتر α برابر ۰/۹ و ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است.

درخور یادآوری است که برای تجزیه هیدروگراف و استخراج جریان پایه به روش‌های یادشده از نرم‌افزار HydroOffice استفاده شد. درباره ضرایب فیلترهای استفاده‌شده، محدوده مورد نیاز هر روش، بهترین پاسخ داده‌شده به تغییرات ضرایب، قابلیت نمایش گرافیکی نرم‌افزار HydroOffice و نیز میزان مقبولیت ضرایب در سایر مطالعات مشابه توجه شده است.

همچنین، برای مقایسه روش‌های استفاده‌شده در مطالعه حاضر از آزمون‌های ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده شد (روابط ۳-۵)

$$r = \frac{n(\sum q_{(i)} q'_{(i)}) - (\sum q_{(i)})(\sum q'_{(i)})}{\sqrt{[n \sum q_{(i)}^2 - (\sum q_{(i)})^2][n \sum q'_{(i)}^2 - (\sum q'_{(i)})^2]}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [q_{(i)} - q'_{(i)}]^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n [q_{(i)} - q'_{(i)}]}{n} \quad (5)$$

که در آنها $q_{(i)}$ جریان پایه برآوردشده با یک روش و $q'_{(i)}$ جریان پایه برآوردشده از روش دیگر است.

شاخص جریان پایه

این شاخص یک نسبت بدون بعد است که بیان‌کننده توانایی حوضه برای ذخیره و آزادسازی آب طی دوره‌های خشک است و مقادیر زیاد آن نشان‌دهنده پایداری رژیم

روش محدوده زمانی جابه‌جاشونده

این روش براساس وجود کمترین مقدار جریان در یک روز معین نسبت به روز قبل یا بعد آن است. در این روش، حداقل جریان در محدوده زمانی $(0.5*(2n-1))$ روز قبل و بعد آن روز مشخص می‌شود. به این صورت که پنجره‌ای $2N$ روزه تا زمانی که هیدروگراف را قطع کند، به سمت بالا حرکت داده می‌شود. میزان جریان در نقطه قطع‌شده به وسط بازه اختصاص می‌یابد. سپس، پنجره به روز بعد حرکت می‌کند و این فرایند تکرار می‌شود.

روش حداقل موضعی

این روش به عنوان یکی از روش‌های ساده تفکیک هیدروگراف است و عملکرد آن به طبیعت جریان بستگی ندارد و از حداقل مقادیر جریان در دوره‌های پنج‌روزه بدون همپوشانی استفاده می‌کند [۳۰]. این روش برای هر روز تعیین می‌کند که آیا جریان آن روز کمترین جریان در $(0.5*(2n-1))$ روز قبل و بعد آن روز بوده است یا خیر. اگر این‌گونه باشد، حداقل موضعی شناخته می‌شود و با خط مستقیمی به سایر حداقل‌های موضعی وصل شده و جریان پایه تعیین می‌شود.

روش فیلترهای بازگشتی

روش فیلترهای بازگشتی ابزاری برای تحلیل و پردازش سیگنال است که با انتخاب یک آستانه مناسب، برای حذف سیگنال جریان سریع با فرکانس بالا و رسیدن به سیگنال جریان کم با فرکانس پایین استفاده می‌شوند [۳۱]. در واقع، در روش‌های جداسازی جریان پایه با فیلتر دیجیتال بازگشتی، با هیدروگراف مانند یک سیگنال برخورد می‌شود. لاین و هالیک [۳۲] نخستین بار روش فیلتر عددی بازگشتی را به ازای تنها پارامتر ثابت بازگشت (α) پیشنهاد کردند که جریان پایه را از رابطه ۱ محاسبه می‌کند.

$$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_i - q_{i-1}) \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (1)$$

که در آن، $q_{f(i)}$ جریان پایه فیلترشده در گام زمانی i ، $q_{f(i-1)}$ جریان پایه فیلترشده در گام زمانی $i-1$ ، پارامتر فیلتر، $q_{(i)}$ جریان کل در گام زمانی i ، $q_{(i-1)}$ جریان کل در گام زمانی $i-1$ است. در مطالعه حاضر از پارامتر ثابت برگشت ۰/۹، ۰/۹۲۵، ۰/۹۵ و ۰/۹۷۵ استفاده شده است [۲۶، ۳۳ و ۶]

قدر مطلق این آماره در سطح معناداری مد نظر با مقدار بحرانی آن مقایسه می‌شود و در صورتی که بزرگ‌تر از آن باشد، نتیجه گرفته می‌شود که داده‌ها روند نزولی دارند. برای حذف اثر خودهمبستگی روی تحلیل روند باید داده‌ها پیش‌سفید شوند. به این صورت که ابتدا شیب خط روند با روش تایل-سن [۳۷ و ۳۸] با رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$b = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_k}{j-1}\right) \quad (11)$$

در صورتی که این شیب در محدوده اطمینان خود قرار نگیرد، مراحل زیر انجام می‌شود. در غیر این صورت، نیازی به پیش‌سفید کردن داده‌ها نیست. شیب خط روند با استفاده از رابطه ۱۲ از تک‌تک مشاهدات کسر می‌شود و مقدار خودهمبستگی مرتبه نخست سری جدید محاسبه می‌شود.

$$x'_t = x_t - b_t \quad (12)$$

با حذف همبستگی مرتبه نخست داده‌ها، یک سری مستقل ایجاد می‌شود (رابطه ۱۳).

$$y'_t = x'_t - r x'_{t-1} \quad (13)$$

این سری مستقل با استفاده از رابطه ۱۴ به داده‌های پیش‌سفید شده تبدیل می‌شود.

$$y_t = y'_t + b t \quad (14)$$

سپس، آزمون من-کندال روی این داده‌ها اعمال می‌شود.

نتایج و بحث

بدیهی است که جداسازی مؤلفه جریان پایه از کل جریان رودخانه برای درک بودجه آبی یک حوضه بسیار ضروری است [۳۹]. در تحقیق حاضر جریان پایه رودخانه‌های منتخب واقع در غرب حوضه دریاچه ارومیه با روش‌های مختلف جداسازی جریان پایه استخراج شد و عملکرد این روش‌ها مورد سنجش قرار گرفت. همچنین، برای هر رودخانه شاخص جریان پایه نیز محاسبه شد. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه ارائه می‌شود. شکل ۲ تغییرات دبی پایه روزانه را به ازای روش‌های مختلف جداسازی به طور نمونه برای ایستگاه چهریق علیا نشان می‌دهد.

جریان حوضه در دوره‌های خشک است. مقدار این شاخص با رابطه ۶ یعنی از تقسیم مجموع مقادیر جریان پایه روزانه (b_i) به مجموع مقادیر جریان روزانه (d_i) طی دوره مد نظر به دست می‌آید.

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (6)$$

آزمون من-کندال

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، روند جریان پایه رودخانه شهرچای در محل ایستگاه بند با استفاده از آزمون من-کندال بررسی شد. آزمون من-کندال [۳۵ و ۳۶] روشی ناپارامتریک است که برای تشخیص روند یکنواخت به کار می‌رود و در آن نرمال بودن توزیع داده‌ها الزامی نیست. آماره S من-کندال برای سری داده‌های X_1, X_2, \dots, X_n از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad , \quad (7)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

که در آن، n تعداد مشاهدات سری داده‌ها و X_k و X_j به ترتیب داده‌های زام و کام سری هستند. واریانس با استفاده از رابطه ۸ یا ۹ به دست می‌آید که در آنها m تعداد گروه‌های جفت‌شده و t تعداد داده‌ها در گروه جفت‌شده pام است. اگر گروه‌های جفت‌شده وجود داشته باشند، رابطه ۸ به کار می‌رود، در غیر این صورت از رابطه ۹ استفاده می‌شود.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t+1)(2t+5)}{18} \quad (8)$$

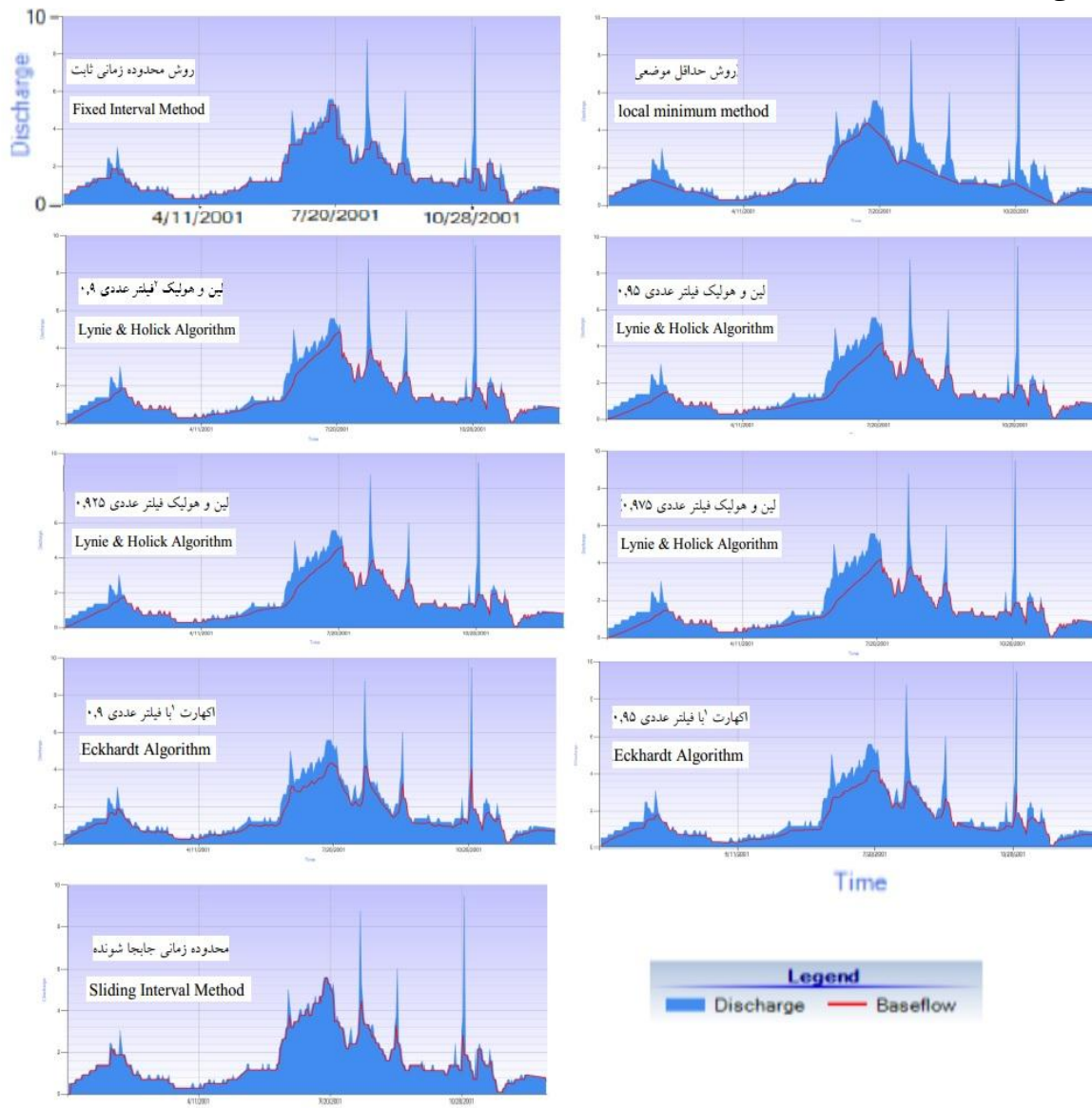
$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (9)$$

و در نهایت، آماره Z آزمون من-کندال از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

در ادامه، مشخصات آماری مقادیر شاخص جریان پایه در پنج ایستگاه مطالعه شده برای هر یک از روش‌های استفاده شده ارائه می‌شود (جدول ۳).

در جدول ۲ مشخصات روش‌های استفاده شده به منظور تحلیل شاخص جریان پایه آمده است. از این پس، نام روش‌ها با علائم اختصاری موجود در این جدول نشان داده می‌شود.



شکل ۲. تغییرات دبی پایه روزانه به ازای روش‌های مختلف جداسازی برای ایستگاه چهاریق علیا

جدول ۲. مشخصات روش‌های استفاده شده به منظور تحلیل شاخص جریان پایه

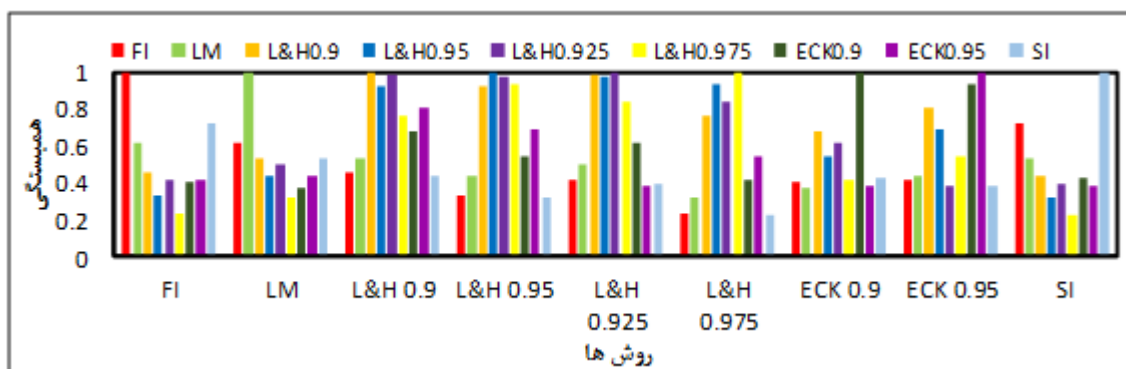
روش	محدوده زمانی ثابت (FI)	محدوده زمانی جابجا شونده (SI)	حداقل موضعی (LM)	لین-هالیک (L&H)	اکهارت (Eck)
شرح فیلتر	روز	روز	فیلتر عددی	فیلتر عددی	فیلتر عددی
رقم فیلتر	۵	۵	۰/۹	۰/۹۲۵ ۰/۹۵ ۰/۹۷۵	۰/۹ ۰/۹۵

جدول ۳. مشخصات آماری مقادیر شاخص جریان پایه به ازای روش‌های بررسی شده برای ایستگاه‌های مطالعه شده

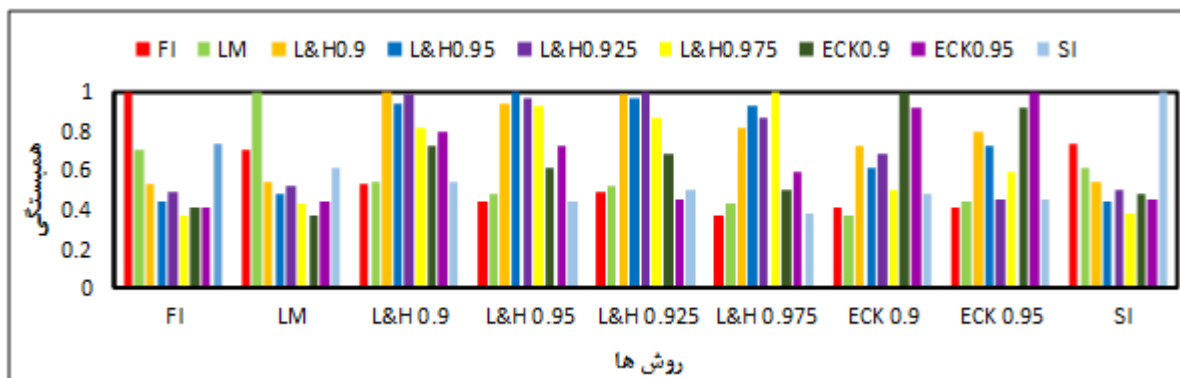
ایستگاه	روش جداسازی	FI	SI	LM	L&H (۰/۹)	L&H (۰/۹۲۵)	L&H (۰/۹۵)	L&H (۰/۹۷۵)	Eck (۰/۹)	Eck (۰/۹۵)
چهریق علیا	انحراف معیار	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۳
	میانگین	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۷۹	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۸۲
	حداقل	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۹	۰/۱۷
	خطای استاندارد	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۱
تپیک	انحراف معیار	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۱۳
	میانگین	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۸۲
	حداقل	۰	۰	۰	-۱/۶۹	-۲/۰۵	-۱/۸۰	-۳/۵۰	۰	۰
	خطای استاندارد	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۱
پی قلعه	انحراف معیار	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۱۳
	میانگین	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۸۲
	حداقل	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۹	۰/۱۷
	خطای استاندارد	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۸
بند	انحراف معیار	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۲۳	۰/۱۲	۰/۱۵
	میانگین	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۷۷	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۸۲
	حداقل	۰	۰	۰	-۲/۳۷	-۲/۴۹	-۲/۰۷	-۲/۵۱	۰/۲۹	۰/۱۷
	خطای استاندارد	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۴
بابارود	انحراف معیار	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۲۵	۰/۵۴	۱/۰۵	۰/۶۷	۲/۱۴	۰/۱۷	۰/۲۰
	میانگین	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۳۸	۰/۵۴	-۰/۱۸	۰/۸۰	۰/۸۰
	حداقل	۰	۰	۰	-۴/۶۲	-۱/۰۸	-۶/۸۱	-۱۶/۷۳	۰	۰/۱۷
	خطای استاندارد	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۰۶	۰/۰۳۳۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۳۱

شکل‌های ۳-۷ به ترتیب برای ایستگاه‌های چهریق علیا، تپیک، پی قلعه، بند و بابارود مشاهده می‌شود.

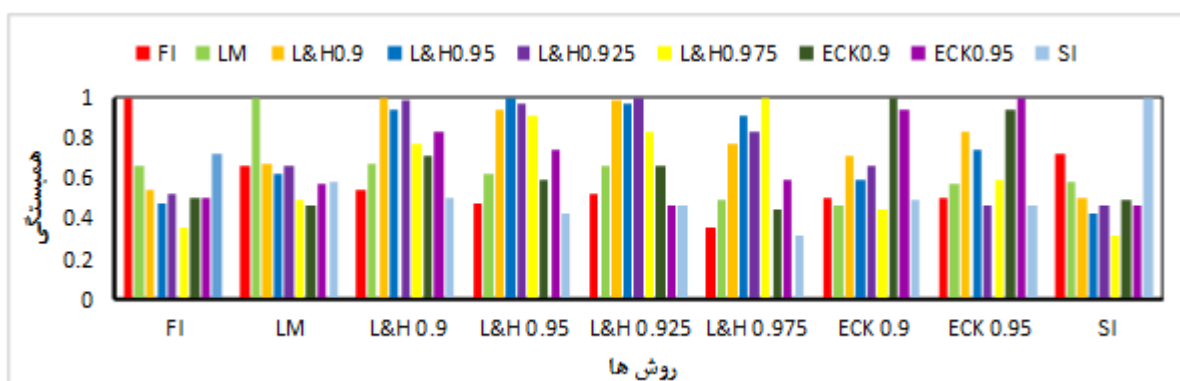
به منظور مقایسه روش‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، همبستگی بین آنها محاسبه شد که نتایج آن در



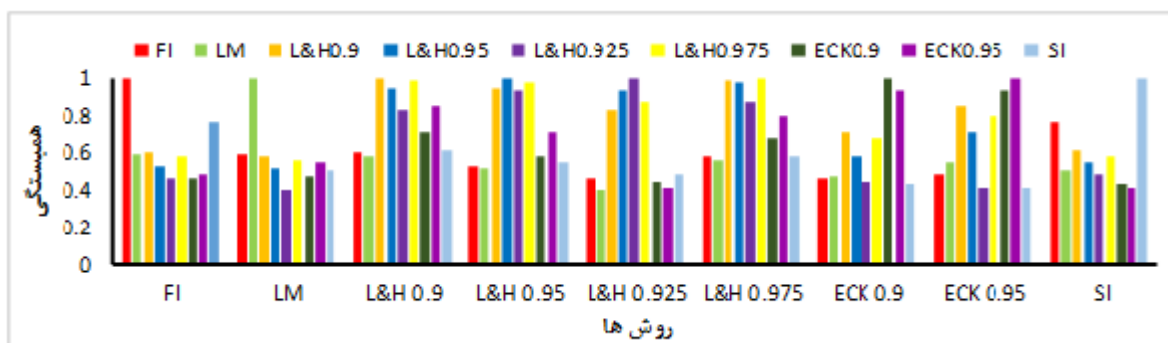
شکل ۳. همبستگی روش‌های بررسی شده برای تعیین مقادیر شاخص جریان برای ایستگاه آب‌سنجی چهریق علیا



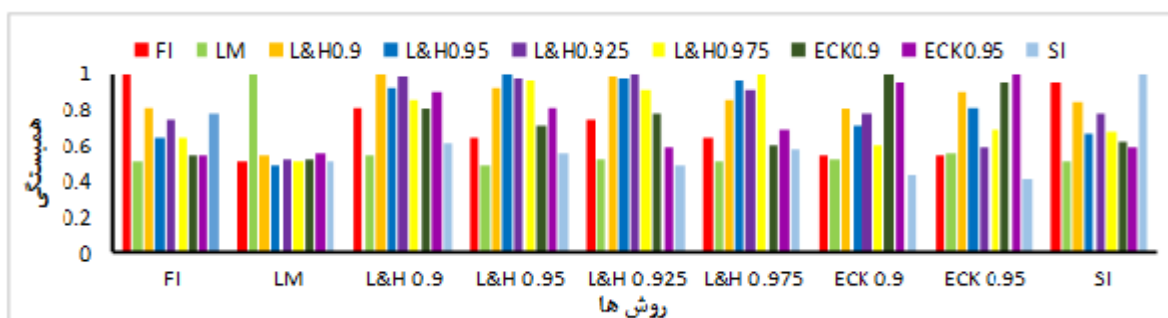
شکل ۴. همبستگی روش‌های بررسی شده برای تعیین مقادیر شاخص جریان برای ایستگاه آب‌سنجی تپیک



شکل ۵. همبستگی روش‌های بررسی شده برای تعیین مقادیر شاخص جریان برای ایستگاه آب‌سنجی پی‌قلعه



شکل ۶. همبستگی روش‌های بررسی شده برای تعیین مقادیر شاخص جریان برای ایستگاه آب‌سنجی بند



شکل ۷. همبستگی روش‌های بررسی شده برای تعیین مقادیر شاخص جریان برای ایستگاه آب‌سنجی بابارود

همبستگی می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که این روش‌ها می‌توانند در مواقع لزوم به جای یکدیگر استفاده شوند. جدول‌های ۴-۸ نیز مقادیر میانگین مطلق خطا و جدول‌های ۹-۱۳ مقادیر جذر میانگین مربعات خطا را برای هر پنج ایستگاه نشان می‌دهند.

بررسی همبستگی بین روش‌های بررسی شده برای تعیین جریان پایه کلیه ایستگاه‌های یادشده نشان می‌دهد همبستگی بین نتایج به دست آمده از کلیه فیلترهای روش لاین و هالیک در حد بالایی است. این نتیجه برای دو فیلتر استفاده شده در روش اکهارت نیز صادق است. مقدار زیاد

جدول ۴. نتایج معیار میانگین مطلق خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی چهریق علیا

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۰۹	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	-۰/۰۴	-۰/۱۳	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۰۹	-۰/۱۱	۰/۰۲	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۰۹	-۰/۱۲	۰/۰۱	۰	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۰۹	-۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰	-۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۸	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۷	۰	۰	-
SI	-۰/۰۴	-۰/۱۳	۰	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۳	-۰/۱۱	-۰/۱۱	۰

جدول ۵. نتایج معیار میانگین مطلق خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی تپیک

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۰۵	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	-۰/۰۲	-۰/۰۷	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۰۵	-۰/۰۴	۰/۰۳	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۰۵	-۰/۰۶	۰/۰۱	-۰/۰۲	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۰۵	۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۰۵	-۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۴	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۳	-۰/۰۱	۰	-
SI	-۰/۰۴	-۰/۰۹	-۰/۰۲	-۰/۰۵	-۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۱۲	-۰/۱۲	۰

جدول ۶. نتایج معیار میانگین مطلق خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی پی‌قلعه

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۰۵	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	-۰/۰۲	-۰/۰۸	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۰۵	-۰/۰۴	۰/۰۳	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۰۵	-۰/۰۶	۰/۰۱	-۰/۰۲	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۰۵	-۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۵	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۵	-۰/۰۱	۰	-
SI	-۰/۰۳	-۰/۰۹	-۰/۰۱	-۰/۰۴	-۰/۰۲	۰/۰۲	-۰/۱۳	-۰/۱۲	۰

جدول ۷. نتایج معیار میانگین مطلق خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی بند

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۰۸	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	-۰/۰۵	-۰/۱۳	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۰۸	-۰/۱۱	۰/۰۳	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۰۸	-۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۳	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۰۸	-۰/۱۲	۰/۰۱	-۰/۰۲	-۰/۰۵	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	-۰/۰۴	-۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۸	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۰۲	-۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۷	۰	-	-
SI	-۰/۰۵	-۰/۱۳	۰	-۰/۰۳	-۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۰۹	-۰/۰۸	۰

جدول ۸. نتایج معیار میانگین مطلق خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی بابارود

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۰۴	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	۰	-۰/۰۴	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۲۱	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۶	-۰/۱۶	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۰۴	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۵۶	-۰/۷۲	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۷۷	-۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۲۱	-۰/۰۵	-۰/۷۷	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۰۲	-۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۲۰	-۰/۰۵	-۰/۷۶	۰	-	-
SI	-۰/۰۴	-۰/۰۸	-۰/۰۴	-۰/۲۵	-۰/۱۰	۰/۱۰	-۰/۰۵	-۰/۰۵	۰

جدول ۹. نتایج معیار جذر میانگین مربعات خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی چهریق‌علیا

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۲	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	۰/۱۸	۰/۲۳	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۰۷	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۱۱	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۱۹	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۰۵	۰	-
SI	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۱۸	۰

جدول ۱۰. نتایج معیار جذر میانگین مربعات خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی تپیک

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۱۶	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	۰/۱۶	۰/۲	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۰۸	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۱۵	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۲۳	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۰۶	۰	-
SI	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۱۸	۰

جدول ۱۱. نتایج معیار جذر میانگین مربعات خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی پی‌قلعه

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۱۶	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	۰/۱۳	۰/۱۷	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۰۷	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۰۵	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۱۳	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۲۰	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۰۵	۰	-
SI	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱۷	۰

جدول ۱۲. نتایج معیار جذر میانگین مربعات خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی بند

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۲۲	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	۰/۲۱	۰/۲۵	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۰۸	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۱۱	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۵	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۷	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۰۶	۰	-
SI	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۱۹	۰

جدول ۱۳. نتایج معیار جذر میانگین مربعات خطا برای روش‌های بررسی شده در ایستگاه آب‌سنجی بابرود

روش جداسازی	FI	LM	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۷۵	ECK ۰/۹	ECK ۰/۹۵	SI
FI	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
LM	۰/۲۳	۰	-	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹	۰/۳۱	۰/۳۳	۰	-	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۵	۰/۳۱	۰/۸۷	۰/۶۳	۰	-	-	-	-	-
L&H ۰/۹۲۵	۰/۸۷	۰/۴۷	۰/۱۸	۰/۴۵	۰	-	-	-	-
L&H ۰/۹۷۵	۰/۴۶	۲/۰۵	۱/۸۷	۱/۳۰	۱/۷۱	۰	-	-	-
ECK ۰/۹	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۸۵	۱/۷۱	۲/۰۵	۰	-	-
ECK ۰/۹۵	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۸۵	۰/۴۳	۲/۰۴	۰/۰۶	۰	-
SI	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۸۶	۰/۴۵	۲/۰۵	۰/۱۵	۰/۱۷	۰

جدول ۱۴. روش‌های مناسب منتخب برای ایستگاه‌های مطالعه‌شده از نظر معیارهای MAE و RMSE

ایستگاه	معیار		ایستگاه	معیار	
	RMSE	MAE		RMSE	MAE
چهریق علیا	L&H ۰/۹		بند	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹
	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۲۵		L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۲۵
	ECK ۰/۹			ECK ۰/۹	ECK ۰/۹
تپیک	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹	بابرود	L&H ۰/۹	L&H ۰/۹
		L&H ۰/۹۲۵		L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۲۵
		ECK ۰/۹		ECK ۰/۹	ECK ۰/۹
پی‌قلعه				L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۲۵

جدول ۱۵. مقادیر متوسط معیار میانگین مطلق خطای کل ایستگاه‌ها

SI	ECK ۰/۹۵	ECK ۰/۹	L&H ۰/۹۷۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹	LM	FI	روش جداسازی
-	-	-	-	-	-	-	-	۰	FI
-	-	-	-	-	-	-	۰	۰/۰۶۲	LM
-	-	-	-	-	-	۰	-۰/۰۸۹	-۰/۰۲۷	L&H ۰/۹
-	-	-	-	-	۰	۰/۰۶۵	-۰/۰۲۴	۰/۰۶۱	L&H ۰/۹۵
-	-	-	-	۰	-۰/۰۳۵	۰/۰۲۹	-۰/۰۵۹	۰/۰۶۱	L&H ۰/۹۲۵
-	-	-	۰	۰/۱۶۲	۰/۱۲۷	۰/۱۹۲	-۰/۱۰۳	۰/۰۶۱	L&H ۰/۹۷۵
-	۰	۰	-۰/۰۱۰۶	۰/۰۵۶	۰/۲۱	۰/۰۸۶	-۰/۰۰۳	۰/۱۶۵	ECK ۰/۹
۰	-۰/۰۰۴	-۰/۰۱۱۰	۰/۰۵۳	۰/۰۱۷	۰/۰۸۲	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	۰/۱۸	ECK ۰/۹۵
۰	-۰/۰۹۶	-۰/۱۰۰	۰/۰۴۲	-۰/۰۴۳	-۰/۰۷۸	-۰/۰۱۴	-۰/۰۱۰۲	-۰/۰۴۱	SI

جدول ۱۶. مقادیر متوسط معیار جذر میانگین مربعات خطای کل ایستگاه‌ها

SI	ECK ۰/۹۵	ECK ۰/۹	L&H ۰/۹۷۵	L&H ۰/۹۲۵	L&H ۰/۹۵	L&H ۰/۹	LM	FI	روش جداسازی
-	-	-	-	-	-	-	-	۰	FI
-	-	-	-	-	-	-	۰	۰/۱۹۵	LM
-	-	-	-	-	-	۰	۰/۲۳۵	۰/۱۹۷	L&H ۰/۹
-	-	-	-	-	۰	۰/۱۸۷	۰/۳۵۰	۰/۱۹۷	L&H ۰/۹۵
-	-	-	-	-	۰/۱۴۱	۰/۰۸۹	۰/۲۷۱	۰/۳۳۲	L&H ۰/۹۲۵
-	-	-	۰	۰/۴۵۲	۰/۳۲۷	۰/۴۷۲	۰/۶۰۵	۰/۲۴۷	L&H ۰/۹۷۵
-	۰	۰	۰/۵۶۶	۰/۴۵۲	۰/۳۰۹	۰/۱۷۸	۰/۲۰۳	۰/۵۹۴	ECK ۰/۹
۰	۰/۰۵۵	۰/۵۵۲	۰/۲۱۰	۰/۲۹۲	۰/۱۶۲	۰/۱۹۸	۰/۱۸۱	۰/۱۸۱	ECK ۰/۹۵
۰	۰/۱۷۷	۰/۱۶۶	۰/۵۸۸	۰/۲۳۵	۰/۳۲۳	۰/۱۷۹	۰/۲۱۷	۰/۱۳۱	SI

پس از انتخاب روش بهتر از میان روش‌های بررسی‌شده، جریان پایه سالانه و شاخص آن در ایستگاه‌های بند ارومیه، تپیک و بابرود با طول دوره آماری ۶۲ ساله ۱۳۳۰ تا ۱۳۹۱ محاسبه شد. شکل ۸ شاخص جریان پایه در این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که شاخص BFI در ایستگاه تپیک واقع در ورودی دشت ارومیه و قبل از مصارف کشاورزی دشت طی این دوره تغییرات زیادی نداشته است. اما در ایستگاه بابرود که در خروجی حوضه و بعد از مصارف کشاورزی واقع است، شاخص BFI در دوره آماری یادشده به شدت کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از مصرف بیش از حد آب رودخانه در بخش کشاورزی باشد. شاخص BFI در ایستگاه بند نیز که در پایین دست سد شهرچای قرار گرفته است، در دوره آماری ۱۳۳۰ تا ۱۳۹۱ نزولی است. سد یادشده در سال ۱۳۸۴ احداث شده است. از شکل ۹ که تغییرات حجم جریان پایه را طی دوره ۱۳۲۹ تا ۱۳۹۱ نشان می‌دهد، نیز مشخص است که جریان پایه در ایستگاه بند در سال‌های پایانی مطالعه شده به شدت کاهش یافته است.

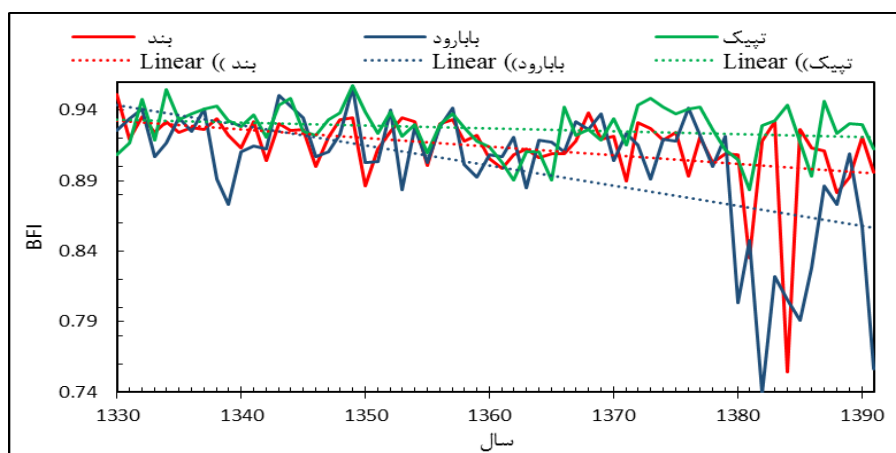
روش‌های مناسب منتخب برای هر ایستگاه از نظر دو معیار میانگین مطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا در جدول ۱۴ آمده است.

برای انتخاب روشی که بتواند در کل ایستگاه‌ها نتایج قابل قبولی را ارائه دهد، اقدام به متوسط‌گیری از مقادیر معیار میانگین مطلق خطا و مقادیر معیار جذر میانگین مربعات خطای کل ایستگاه‌ها شد. جدول‌های ۱۵ و ۱۶ مقادیر یادشده را نشان می‌دهند.

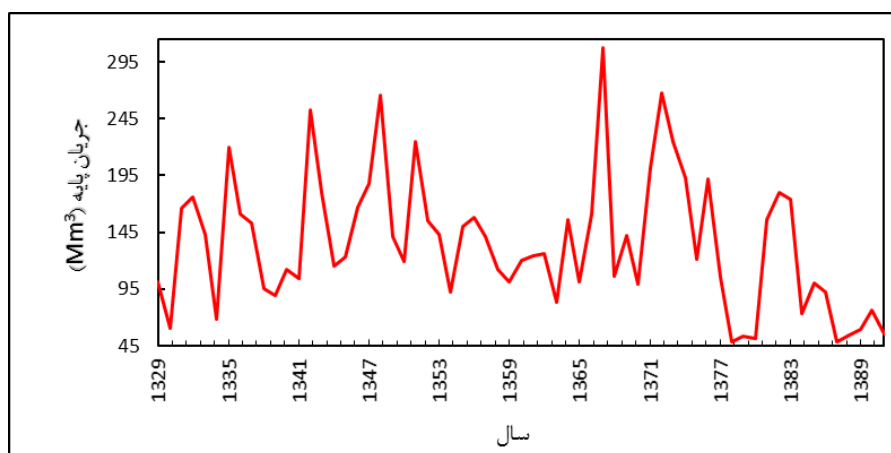
در غیاب روش‌های میدانی و شیمیایی که زمان‌بر و هزینه‌بر هستند، با توجه به جدول یادشده الگوریتم لاین و هالیک با فیلتر عددی ۰/۹ به عنوان روش مناسب جداسازی جریان پایه برای پنج ایستگاه آب‌سنجی مطالعه شده تعیین می‌شود. درخور یادآوری است که میانگین سالیانه شاخص مربوطه برای تمام ایستگاه‌ها در کل دوره بین ۷۴/۵ و ۸۹/۸ در نوسان است، بنابراین این مقدار نشان‌دهنده مشارکت زیاد آب‌های زیرسطحی در تأمین جریان رودخانه در منطقه مطالعه شده است.

بنابراین نیازی به پیش‌سفید کردن داده‌ها نیست. آماره Z آزمون من-کندال برابر $۲/۰۱$ - به دست آمد که نشان‌دهنده روند نزولی معنادار جریان پایه محاسبه‌شده رودخانه شهرچای در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. این موضوع می‌تواند ناشی از افت سطح آب زیرزمینی در این محدوده باشد.

پس از آن، روند جریان پایه رودخانه شهرچای در ایستگاه بند با استفاده از آزمون من-کندال بررسی شد. شیب روند تایل-سن برای جریان پایه برابر $۱۹/۶۲$ - و حداقل و حداکثر این شیب در سطح اطمینان ۹۵ درصد به ترتیب $۳۰/۰۲$ - و $۸/۱۳$ - به دست آمد. از آنجا که شیب تایل-سن در حدود اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفته است،



شکل ۸. شاخص BFI برای ایستگاه‌های بند، بابارود و تپیک از ۱۳۳۰ تا ۱۳۹۰



شکل ۹. تغییرات جریان پایه در ایستگاه بند رودخانه شهرچای حاصل از الگوریتم لاین و هالیک (فیلتر عددی ۰/۹)

محدوده زمانی ثابت، محدوده زمانی جابه‌جاشونده، حداقل موضعی، الگوریتم لاین و هالیک با فیلترهای $۰/۹$ ، $۰/۹۵$ ، $۰/۹۲۵$ و $۰/۹۷۵$ و الگوریتم اکهارت با فیلتر $۰/۹$ و $۰/۹۵$ استفاده شد. درخور یادآوری است که فیلترهای استفاده‌شده در پژوهش حاضر از روی مطالعات مختلفی که نتایج خوبی به دست آورده بودند، انتخاب شد. سپس، عملکرد روش‌های یادشده با استفاده از معیارهای ضریب همبستگی، مجذور مربعات خطا و میانگین مطلق خطا سنجیده شد و همچنین

نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، جریان پایه بخشی از جریان رودخانه‌هاست که از جریان زیرسطحی ناشی می‌شود و در اکولوژی یک حوضه کارکرد بسزایی دارد. در تحقیق حاضر به منظور جداسازی جریان پایه رودخانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی چهاربوق علیا (زولاچای)، تپیک (نازلوچای)، بند (شهرچای)، بابارود (باراندوزچای) و پی‌قلعه (گادارچای) واقع در حوضه دریاچه ارومیه، از پنج روش مختلف به نام‌های

- [8]. Boussinesq J. Essai sur la théorie des eaux courantes. Impr. nationale; 1877.
- [9]. Halford KJ, Mayer GC. Problems associated with estimating ground water discharge and recharge from stream-discharge records. *Groundwater*. 2000 May;38(3):331-42.
- [10]. Rutledge AT. The appropriate use of the Rorabaugh model to estimate ground water recharge. *Ground Water*. 2005 May 1;43(3):292-4.
- [11]. Te CV, Maidment DR, Mays LW. Applied hydrology. *Water Resources Handbook*. 1988.
- [12]. Lvovich, M. I. *World Water Resources and Their Future*, 415 pp., AGU, Washington, D. C. 1979.
- [13]. Chapman T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*. 1999 Apr 15;13(5):701-14.
- [14]. Chapman TG, Maxwell AI. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. In *Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers 1996* (p. 539). Institution of Engineers, Australia.
- [15]. Boughton WC. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. In *Hydrology and Water Resources Symposium, Newcastle, IEAust, 1993* 1993.
- [16]. Jakeman, A. J., & Hornberger, G. M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water resources research*, 29(8), 2637-2649.
- [17]. Novita E, Wahyuningsih S. Preliminary study on baseflow separation at watersheds in East Java regions. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016 Jan 1:538-50.
- [18]. Stewart MK. Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu Catchment, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015 Jun 2;19(6):2587-603.
- [19]. Arnold JG, Allen PM. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 1999 Apr;35(2):411-24.
- [20]. Zhang R, Li Q, Chow TL, Li S, Danielescu S. Baseflow separation in a small watershed in New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method. *Hydrological processes*. 2013 Aug 30;27(18):2659-65.

برای هر رودخانه شاخص جریان پایه نیز محاسبه شد. الگوریتم لاین-هالیک با فیلتر عددی ۰/۹ به عنوان روش مناسبتر انتخاب شد. شایان یادآوری است که در مطالعه زارع بیدکی و همکارانش [۲۶] و ایندرتو و همکارانش [۱۷] نیز این روش به عنوان روش مناسب گزارش شده است. پس از انتخاب روش برتر، با استفاده از داده‌های بلندمدت ایستگاه‌های بند ارومیه، بابرود و تپیک اقدام به استخراج جریان پایه آنها با استفاده از الگوریتم جداسازی منتخب شد. همچنین، مشخص شد که مصارف زیاد کشاورزی در بالادست ایستگاه بابرود و احداث سد شهرچای در بالادست ایستگاه بند موجب کاهش معنادار در شاخص جریان پایه آنها شده است. سپس، روند جریان پایه ایستگاه بند با استفاده از آزمون من-کندال ارزیابی شد و نتیجه آزمون روند نشان داد از سال ۱۳۲۹ تا ۱۳۹۱ جریان پایه رودخانه شهرچای روند نزولی معناداری داشته است.

منابع

- [1]. Fröhlich K, Fröhlich W, Wittenberg H. Determination of groundwater recharge by baseflow separation: regional analysis in northeast China. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*. 1994. 221:69-76.
- [2]. Bezak N, Horvat A, Šraj M. Analysis of flood events in Slovenian streams. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2015 Jun 1;63(2):134-44.
- [3]. Hall FR. Base-flow recessions—A review. *Water Resources Research*. 1968 Oct 1;4(5):973-83.
- [4]. Tallaksen LM. A review of baseflow recession analysis. *Journal of hydrology*. 1995 Feb 1;165(1-4):349-70.
- [5]. Bauer JP. December 2008, "Update to Regional Groundwater Flow Model simulation of Sonoma Valley Including a New Model for Recharge and Three Future Scenarios" (Doctoral dissertation, Stanford University).
- [6]. Nathan RJ, McMahon TA. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water resources research*. 1990 Jul;26(7):1465-73.
- [7]. Su N. The unit hydrograph model for hydrograph separation. *Environment International*. 1995 Jan 1;21(5):509-15.

- [21]. Rouhani H, Malekian A. Automated methods for estimating baseflow from streamflow records in a semi arid watershed. *Desert*. 2012 Dec 1;17(2):203-9.
- [22]. Minea I. Streamflow-base flow ratio in a lowland area of North-Eastern Romania. *Water Resources*. 2017 Jul 1;44(4):579-85.
- [23]. Arfania R, Samani N. Construction of stream flow hydrograph separation curve in zayandehroud karstics watershed. *Science (Kharazmi University)*. 2006;5(34):585-600. [Persian]
- [24]. Hessari B. 2012, "investigation of upstream/downstream hydrological effects of supplemental irrigation developing in rainfed areas in Karkheh basin". (Doctoral dissertation, Shahid Chamran University). [Persian]
- [25]. Maali S, Mohammadi Z. Evaluation of baseflow estimation methods in karstic springs, case study Pirghar and Deime springs. *Advanced Applied Geology*. 2015 Apr 21;4(14):22-37. [Persian]
- [26]. Zarebidaki R, Mahdianfard M, Zeinivand H. Base flow estimation in Tireh Dorood river in order to environmental flow assessmen. *EcoHydrology*. 2015 .Sep 23;2(3):275-87. [Persian]
- [27]. Mehri S, Mostafazadeh Ouri A, Ghorbani A. Evaluating the methods of baseflow separation of daily flow hydrograph (case study several hydrometric stations in Ardebil province). *Earth & Space Physics*. 2016. 43(3): 623-34 [Persian]
- [28]. Kazemi R, Eslami A. Investigation and estimation of flow duration curve indices, based on lithological and hydro climatological factors, case study: Khazar region. *Iranian Water Research*. 2016. 4(7):57-68. [Persian]
- [29]. Kazemi R, Ghermez Cheshmeh B. Investigation of different base flow separation methods using flow duration indices (Case study: Khazar region). *water and soil conservation*. 2016. 23(2): 131-146. [Persian]
- [30]. Sloto RA, Crouse MY. HYSEP, a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. 1996
- [31]. Gregor M., User manual for BFI+ 3.0. <http://www.hydrooffice.org/Downloads/List.aspx?section=Manuals> 2010.
- [32]. Lyne V, Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. In *Institute of Engineers Australia National Conference 1979 Sep (Vol. 1979, pp. 89-93)*. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia.
- [33]. Institute for Water Research (South Africa), Smakhtin VY, Watkins DA. *Low Flow Estimation in South Africa: Final Report to the Water Research Commission on the Project: "Classification and Hydrological Modelling of Low Flows in Southern Africa"*. Water Research Commission; 1990.
- [34]. Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes: An International Journal*. 2005 Feb 15;19(2):507-15.
- [35]. Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 1945 Jul 1:245-59.
- [36]. Kendall, M. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London. 1975.
- [37]. Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*. 1968 Dec 1;63(324):1379-89.
- [38]. Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. In *Henri Theil's contributions to economics and econometrics 1992 (pp. 345-381)*. Springer, Dordrecht.
- [39]. Stewart M, Cimino J, Ross M. Calibration of base flow separation methods with streamflow conductivity. *Groundwater*. 2007 Jan;45(1):17-27.