

تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب در حوضه کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی

امیر عسکری^۱، حسین فتحیان^{۱*}، علیرضا نیکبخت شهبازی^۱، هوشنگ حسونی زاده^۲ و نرگس ظهراپی^۱

چکیده

تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی، دو عامل اصلی مؤثر بر تغییر رواناب در حوضه‌های آبریز بوده و تفکیک اثرات آن‌ها برای طرح‌ریزی کاربرد اراضی، مدیریت منابع آب و فعالیت‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب در حوضه کرخه، با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی تفکیک شد. روند در مقادیر سالانه بارش، رواناب، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ با آزمون من-کندال تعیین شد. نتایج نشان داد که رواناب روند کاهشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ داشت، درحالی‌که هیچ روند معنی‌داری در مقدار بارش مشاهده نشد. دمای متوسط سالانه هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل روند افزایشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ را نشان داد. نتایج نشان داد که نقطه تغییر در سری رواناب سالانه براساس آزمون پتیت و روش منحنی تجمعی دوگانه بارش-رواناب، در سال ۱۳۷۸ رخ داد؛ بنابراین دوره پیش از تغییر و دوره پس از تغییر، به ترتیب قبل و بعد از سال ۱۳۷۸ است. میانگین رواناب سالانه در دوره پس از تغییر برابر با ۳۴/۴ درصد نسبت به دوره پیش از تغییر کاهش یافت. نتایج روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی نشان داد که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی منجر به کاهش رواناب به ترتیب برابر با ۳۶/۲ و ۶۳/۸ درصد در حوضه کرخه شد. نتایج این مطالعه می‌تواند مرجعی برای توسعه، بهره‌برداری و مدیریت منابع آب و حفاظت از محیط‌زیست باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی، فعالیت‌های انسانی، کاهش رواناب.

ارجاع: عسکری، ا. فتحیان، ح. نیکبخت شهبازی، ع. حسونی‌زاده، ه. و ظهراپی، ن. ۱۴۰۱. تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب در حوضه کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۱۷-۱۰۳: ۴۵. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.13801.2389>

۱- گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲- سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: fathian.h58@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸

مقدمه

بررسی آمار جریان سطحی در ایستگاه‌های آب‌سنجی و ورودی به سدهای مخزنی کشور، حاکی از کاهش چشمگیر جریان سطحی در رودخانه‌های کشور است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این کاهش را تنها نمی‌توان به خشکسالی دوره‌ای نسبت داد. هرچند تفکیک عوامل اثرگذار در این کاهش و سهم هریک از آن‌ها به دلیل نبود داده‌های کاملاً مناسب، به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، اما افزایش مصارف و تغییر اقلیم عوامل مؤثر در بروز این کاهش‌ها معرفی شده‌اند (کومار و همکاران، ۲۰۰۹؛ ولپوری و سنای، ۲۰۱۳؛ شریفی و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات زیادی مشخص کرده‌اند که رواناب رودخانه‌های زیادی در سراسر دنیا به دلیل تغییر اقلیم یا فعالیت‌های انسانی دچار تغییر در مقیاس‌های زمانی مختلف شده‌اند (مک‌کیب و ولوک، ۲۰۰۲؛ کاهیا و کالایسی، ۲۰۰۴؛ بیرسان و همکاران، ۲۰۰۵؛ چیو و مک‌ماهون، ۲۰۰۶؛ خلیق و همکاران، ۲۰۰۹؛ کومار و همکاران، ۲۰۰۹؛ ولپوری و سنای، ۲۰۱۳). این تغییر در رواناب، چالش‌های مبرم برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده‌اند (میلی و همکاران، ۲۰۰۸). در واکنش به این چالش‌ها، یکی از وظایف محققان شناسایی نقش‌های مختلف تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر ناپایداری در رواناب است. هر دو مدل‌های قطعی^۱ بارش-رواناب و روش‌های آماری پیشنهاد کرده‌اند که اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب در نظر گرفته شوند (لیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۳). فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم دو عامل اصلی مؤثر بر تغییر رواناب در حوضه‌های آبریز بوده و تفکیک اثرات آن‌ها از اهمیت زیادی برای طرح‌ریزی کاربرد اراضی، مدیریت منابع آب و فعالیت‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی برخوردار هستند. اهمیت شناسایی و ارزیابی این عوامل و سهم آن‌ها در کاهش جریان سطحی برای توسعه پایدار منابع آب و به‌منظور بازنگری در محاسبات، برنامه‌ریزی‌ها و طراحی‌های گذشته و آینده بر کسی پوشیده نیست؛ زیرا در هر زمینه‌ای مبنای تصمیمات صحیح، آگاهی مبتنی بر داده‌ها و اطلاعات درست و کافی است. برخی از تحقیقات انجام‌شده در خصوص تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب در ادامه آمده‌است.

ما و همکاران (۲۰۰۸) در تحلیل تأثیرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه در شمال چین، به بررسی روند تغییرات جریان سالانه در ۵۰ سال گذشته با استفاده از آزمون من-کندال^۲ پرداختند و تخمین زدند که تغییر اقلیم باعث کاهش متوسط جریان سالانه به میزان ۶۴ درصد و همچنین کاهش بارندگی شده و میزان حساسیت جریان به تغییر در میزان بارندگی بیش از تبخیر است. گیو و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب در حوضه‌های ووشان^۳ و شتسنگ^۴ در چین به روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی^۵ پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سهم تغییر اقلیم در کاهش رواناب ۲۳ الی ۲۹ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی ۷۱ الی ۷۷ درصد است. ژاو و همکاران (۲۰۱۰) روش حساسیت هیدرولوژیکی برای کمی‌سازی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر جریان در حوضه‌های استرالیا، نیوزلند و جنوب آفریقا به‌کار بردند و نتیجه گرفتند که ۱۶ الی ۷۲ درصد کاهش در جریان فقط به دلیل تغییر اقلیم رخ داده‌است. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) با روش حساسیت هیدرولوژیکی سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب در حوضه رودخانه هیبه^۶ تفکیک کردند و به این نتیجه رسیدند که سهم تغییر اقلیم در کاهش رواناب ۳۳ الی ۷۲ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی ۲۸ الی ۶۷ درصد است. جیانگ و همکاران (۲۰۱۵) از چهار معادله نوع بادیکو^۷ تک پارامتری در جهت تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب در دوره زمانی ۱۹۶۰-۲۰۰۹ در رودخانه ویی^۸ در کشور چین استفاده کردند. ابتدا رابطه متغیر W در هر معادله نوع بادیکو با عوامل انسانی و اقلیمی مشخص کردند تا تغییرات زمانی W در هر دوره زمانی متحرک ۱۱ ساله به‌دست آید. سپس با استفاده از دو روش تجزیه و حساسیت، اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب تفکیک کردند. نتایج نشان داد که پارامتر W در هر معادله نوع بادیکو به‌طور قابل‌توجهی مرتبط با هر دو عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است. نتایج هر دو روش تجزیه و حساسیت نشان

2- Mann-Kendall

3- Wushan

4- Shetsng

5- Hydrologic sensitivity analysis

6- Heihe

7- Budyko

8- Weihe

1- Deterministic models

رواناب و دمای هوا روند صعودی با نرخ به‌ترتیب برابر با ۱۵/۷ میلی‌متر، ۶/۱ میلی‌متر، ۰/۳۸ درجه سانتی‌گراد در هر دهه برای دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ داشته‌اند. ارزیابی Lucc نشان دادند که تغییرات در رشد گیاهان شامل جنگل، چمنزار و مناطق درختچه به‌طور تدریجی افزایش یافته‌اند، درحالی‌که مناطق بی‌ثمر کاهش یافته‌است. اثرات یکپارچه Lucc و تغییر اقلیم، مقادیر رواناب و تبخیر به‌ترتیب برابر با ۳/۲ درصد و ۶/۶ درصد کل رواناب و تبخیر افزایش داده‌اند. تأثیر تغییر اقلیم بیشتر از Lucc بوده، به‌طوری‌که افزایش رواناب و تبخیر ۱۰۷/۳ درصد و ۸۱/۲ درصد تغییرات کل است. تأثیر Lucc در مقایسه متوسط بوده و یک تغییر نسبی در کل مقادیر رواناب و تبخیر به‌ترتیب برابر با ۷/۳- درصد و ۱۸/۸ درصد نشان می‌دهد. افزایش رواناب به‌دلیل تغییر اقلیم بیشتر از کاهش جبران‌کننده در نتیجه Lucc است. نتیجه کلی این مطالعه نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی به‌طور قابل‌توجهی نسبت به Lucc بر فرایندهای هیدرولوژیکی در بالادست رودخانه هیبه مؤثر هستند.

لو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر مشخصات جریان آبراهه در حوضه تپه‌ای لئوس پلاتو^{۱۱} پرداختند. آن‌ها از آزمون ناپارامتری من-کندال و آزمون t متحرک استفاده کردند تا روند نقاط تغییر در سری زمانی رواناب، بارش و تبخیر و تعلق در حوضه ارزیابی شود. همچنین معادله زانگ^{۱۲} بکار بردند تا اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر متوسط رواناب سالانه ارزیابی شود. نتایج نشان داد که یک روند نزولی قابل‌توجه و نقاط تغییر در رواناب سالانه (با یک تغییر ناگهانی شناسایی شده در سال ۲۰۰۱) در تمام حوضه به‌وجود آمده‌است. همچنین اعداد جریان به یک دوره زمانی پایه و یک دوره تغییر تقسیم شدند. کاهش در متوسط رواناب سالانه بین دوره پایه و دوره تغییر نشان داد که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌ترتیب ۳۳/۱ و ۶۶/۹ درصد در کاهش رواناب مؤثر بوده‌اند. این مطالعه نشان داد که فعالیت‌های انسانی به‌طور قابل‌توجهی بر منابع آب در منطقه لئوس پلاتو تأثیر خواهند گذاشت و اقدامات مدیریتی علمی در آینده باید انجام شود. یان و همکاران (۲۰۱۸) سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های

داد که تغییر اقلیم فاکتور اصلی درجهت کاهش رواناب در رودخانه ویی است، درحالی‌که فعالیت‌های انسانی فاکتور مهم دیگری است. به‌طورکلی تغییر اقلیم نه‌تنها بر متغیرهای هیدرولوژیکی (بارش و تبخیر و پتانسیل) تأثیر می‌گذارد، بلکه بر تغییر مشخصات حوضه تأثیر می‌گذارد. در حالی‌که اثرات فعالیت‌های انسانی بر رواناب اصولاً از طریق تغییر در مشخصات حوضه اعمال می‌شود. گو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از آزمون پتیت^۱، بازه زمانی از سال ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۶ را در سطح معنی‌داری ۵ درصد به‌عنوان دوره دارای نقاط شکست در کل دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹ مشخص کردند. سپس، با به‌کارگیری روش کشسانی اقلیمی^۲ مبتنی بر فرضیه بادیکو، سهم اثر تغییر اقلیم و اثرات مستقیم عوامل انسانی را بر رواناب محاسبه کردند. وو و همکاران (۲۰۱۷) تغییر رواناب و عوامل مؤثر بر آن در حوضه کارستی بین‌جیانگ^۳ در جنوب غربی چین در دوره زمانی ۱۹۸۴ الی ۲۰۱۵ بررسی کردند. آن‌ها روش‌های آنومالی تجمعی^۴، تحلیل موجک پیوسته^۵، روند همبستگی رتبه‌ای من-کندال^۶ و توان هارست^۷ را به‌کار بردند تا اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب را تحلیل کنند. سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب به‌صورت کمی با استفاده از روش مقایسه‌ای نسبت تغییر شیب کمیت تجمعی (SCRCQ^۸) ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که سهم بارش در تغییر رواناب ۵۰-۶۰ درصد بوده که قابل‌توجه است. سهم تبخیر در تغییر رواناب ۱۰-۹۰ درصد است و سهم فعالیت‌های انسانی در تغییر رواناب ۲۰-۶۰ درصد بود و اثرات منفی و مثبت کمتری اعمال کرد. یانگ و همکاران (۲۰۱۷) یک روش جدید به‌کارگیری مراحل تفکیک آماری با استفاده از سیستم مدل‌سازی مبنای فیزیکی (مدل SWAT^۹) درجهت شناسایی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری/پوشش اراضی (Lucc^{۱۰}) بر فرایندهای هیدرولوژیکی شامل رواناب و تبخیر و تعلق پیشنهاد کردند. ارزیابی امکان تغییر اقلیم نشان داد که بارش،

- 1- Pettitt's test
- 2- climate elasticity
- 3- Yinjiang
- 4- cumulative anomaly
- 5- continuous wavelet analysis
- 6- Mann-Kendall rank correlation trend
- 7- Hurst exponent
- 8- Slope changing ratio of cumulative quantity
- 9- Soil and Water Assessment Tool
- 10- land use/cover change

11- Loess Plateau

12- Zhang

رواناب را ناچیز تخمین می‌زنند. شریفی و همکاران (۲۰۲۱) ۹ روش مختلف برای تعیین اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب در دو حوضه مربوط به فلات مرکزی ایران شامل حوضه قلعه شاهرخ و حوضه جوانمردی به‌کار بردند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی نقش اصلی در کاهش رواناب در حوضه قلعه شاهرخ ایفا می‌کند؛ به‌طوری‌که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌ترتیب موجب کاهش ۶۰/۲ و ۳۹/۸ درصد در کاهش رواناب شده‌اند. در حوضه جوانمردی تغییرات انسانی نقش اصلی در کاهش رواناب داشته، به‌طوری‌که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌ترتیب موجب کاهش ۲۲/۹ و ۷۷/۱ درصد در کاهش رواناب شده‌اند.

با بررسی‌های انجام‌شده، تاکنون تحقیقات بسیار اندکی در داخل کشور برای ارزیابی و تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب در حوضه‌های آبریز انجام شده‌است؛ بنابراین هدف از این تحقیق، تفکیک سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش آورد جریان در حوضه کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی است. همچنین نقطه تغییر رواناب با دو روش آزمون پتیت و منحنی تجمعی دوگانه بارش-رواناب تعیین می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه به لحاظ تقسیم‌بندی هیدرولوژی ایران جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس به شمار می‌رود. این حوضه از شمال به حوضه رودخانه‌های سیروان، سفیدرود و قره‌چای، از مغرب به حوضه رودخانه دز، و از جنوب به قسمتی از مرز غربی کشور محدود می‌شود. این حوضه آبریز از نظر مختصات جغرافیایی بین ۰۶' - ۴۶' تا ۱۰' - ۴۹° درجه طول شرقی و بین ۵۸' - ۳۰° تا ۰۴' - ۳۵° عرض شمالی قرار گرفته‌است. مساحت این حوضه تا ایستگاه هیدرومتری جلوگیر ماژین تقریباً ۴۰۰۰۰ کیلومترمربع است که حدود ۵۵/۵ درصد از آن در مناطق کوهستانی و حدود ۴۴/۵ درصد آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهند. مناطق کوهستانی این حوضه غالباً در بخش‌های شرقی و میانی متمرکزند و دشت‌ها که عموماً

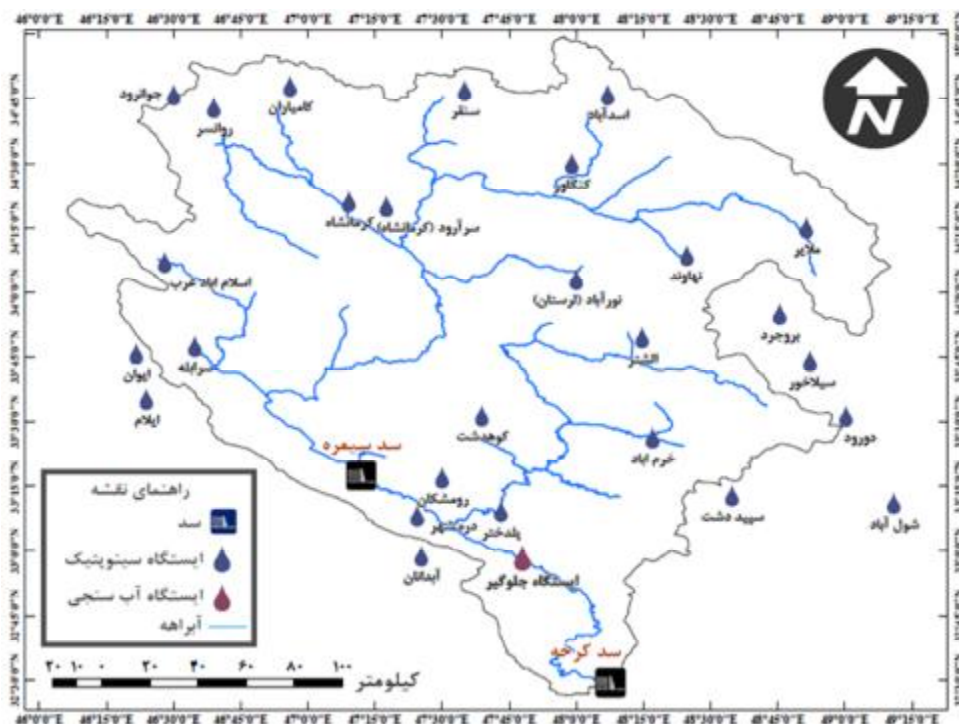
انسانی را بر رواناب ورودی به مخزن سد میان^۱ در پکن با شبیه‌سازی و بررسی تغییرات جریان ورودی به مخزن توسط مدل SWAT تعیین کردند. آن‌ها بر پایه یک الگوریتم تقسیم‌بندی اکتشافی^۲، دوره مورد مطالعه از سال ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۲ را به سه زبردوره شامل دوره مرجع از سال ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹، دوره تأثیر اول از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۸ و دوره تأثیر دوم از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۲ تقسیم کردند. نتایج نشان داد که سهم اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسان بر کاهش جریان در دوره‌های مختلف، متفاوت است. ترابی حقیقی و همکاران (۲۰۲۰) با ارتباط مصرف آب به منابع آب تجدیدپذیر، سه مرحله از منابع آب پایدار به ناپایدار را تعریف کردند و با استفاده از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی سه مرحله را در استان فارس در دوره زمانی ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۶ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم با کاهش در جریان رودخانه‌ها و کاهش قابل‌توجه سطح آب زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی اصلی، منجر به استفاده ناپایدار از منابع آبی، کاهش قابل‌توجه در سطوح آبیاری و ناپایداری در تولید کشاورزی در دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ شده‌است. قاسمی و مهجوری مجد (۱۳۹۹) سهم اثر تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر کاهش رواناب در حوضه بالادست سد زاینده‌رود براساس سه رویکرد رگرسیون خطی، کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو و رویکرد تثبیت-تغییر مبتنی بر شبیه‌سازی ماهانه بیلان آب ارزیابی کردند. تغییرات انسان ساخت شامل افزایش بی‌رویه سطح زیر کشت و انتقال آب بین حوضه‌ای بوده‌است. نتایج تحلیل حساسیت نسبت به محل نقاط شکست و بررسی سری زمانی تغییرات سطح زیرکشت به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و سری زمانی دبی انتقال آب بین حوضه‌ای نشان می‌دهد که در نظر گرفتن سال ۲۰۰۶ به‌عنوان سال رخداد نقطه شکست در سری زمانی رواناب، تخمین‌های واقع‌بینانه‌تری از سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب (به‌ترتیب بیش از ۹۰ درصد و کمتر از ۱۰ درصد) به‌دست می‌دهد. همچنین در صورتی که تأثیر افزایش رواناب در نتیجه انتقال آب بین حوضه‌ای از سری زمانی رواناب حذف شود، هر سه رویکرد سهم اثرات عوامل اقلیمی بر کاهش

1- Miyun

2- Heuristic Segmentation Algorithm

برای برآورد متوسط مقادیر بارش در سطح حوضه، از روش چندضلعی‌های تیسن استفاده شد. همچنین برای برآورد متوسط دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح حوضه، از روش میانگین حسابی استفاده شد. برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های سینوپتیک، از روش هارگریوز استفاده شد که در ادامه معرفی شده‌است.

در بخش‌های شمالی و جنوبی قرار دارند حدود ۴۷ درصد از وسعت کل حوضه را می‌پوشانند. شکل ۱ شبکه آبراهه‌ها و اسامی ایستگاه‌های مختلف در حوضه آبریز کرخه را نشان می‌دهد. طول دوره زمانی مشترک بین متغیرهای مورد مطالعه شامل داده‌های روزانه دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و دمای هوا و بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ در نظر گرفته شد.



شکل ۱- نقشه موقعیت ایستگاه‌های مختلف در حوضه کرخه

مناطق آبیاری یا کانال‌ها است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۸). طبیعی‌سازی جریان با تصحیح برداشت‌های آب کشاورزی و جریان‌های بازگشتی مرتبط و تأثیر مخازن در حال بهره‌برداری در بالادست ایستگاه هیدرومتری جلوگیر انجام می‌شود. جریان‌های طبیعی شده با اضافه کردن اختلاف بین برداشت‌های اندازه‌گیری شده و جریان‌های بازگشتی به جریان مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری به دست می‌آید (نایک و جی، ۲۰۰۵؛ ورز، ۲۰۰۶).

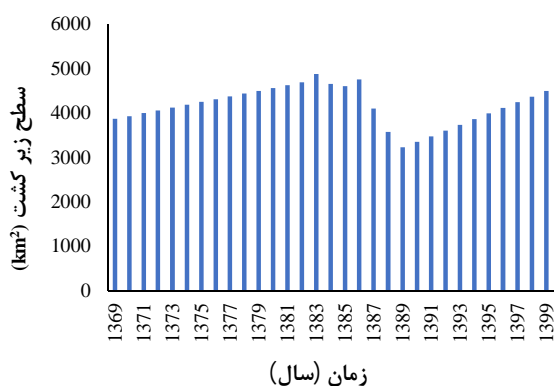
نیازهای خالص آب آبیاری محصولات کشاورزی مختلف در طول سال‌های مختلف از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهیه شد (سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ۱۳۷۶). داده‌های مربوط به سطح زیر

طبیعی‌سازی جریان آبراهه^۱

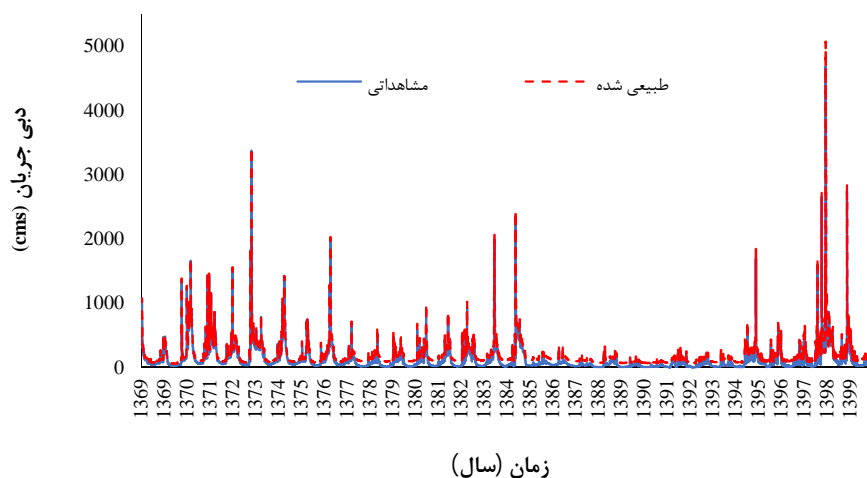
به دلیل تغییرات انسانی در طول سال‌های گذشته، جریان مشاهداتی رودخانه در ایستگاه‌های هیدرومتری منعکس‌کننده پاسخ هیدرولوژیک طبیعی حوضه نیست؛ بنابراین عدم قطعیت‌های قابل‌ملاحظه‌ای مرتبط با داده‌های جریان مشاهداتی وجود دارند که به سادگی از طریق روابط آماری قابل‌بیان نیست (بیون، ۲۰۱۶) و می‌تواند به عنوان منبع پتانسیل اطلاعات نادرست باشد (بیون و وستربگ، ۲۰۱۱). طبیعی‌سازی جریان به صورت حذف اثرات تنظیمات بالادست جریان، برداشت آب و جریان‌های بازگشتی است (ورز، ۲۰۰۶). تقریباً تمام برداشت آب در این بخش از حوضه از طریق پمپاژ آب و انحراف آب به

1- Streamflow Naturalization

فرض شد. با توجه به اینکه سد مخزنی سیمره بزرگ‌ترین سد در حال بهره‌برداری در بالادست از سال ۱۳۹۴ است، اختلاف جریان ورودی به سد سیمره و میزان رهاسازی از آن به مقدار دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری جلوگیر اضافه شده تا تأثیر مخزن بالادست بر جریان طبیعی به‌دست آید. شکل ۳ هیدروگراف‌های جریان طبیعی شده و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری جلوگیر از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد. ارتفاع رواناب طبیعی شده در حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۲- سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در سال‌های مختلف



شکل ۳- هیدروگراف جریان‌های طبیعی شده و مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

کشت محصولات کشاورزی در سال‌های مختلف نیز از آمارنامه‌های سازمان جهاد کشاورزی استخراج شده‌است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۰). شکل ۲ سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در سال‌های مختلف را نشان می‌دهد. کل برداشت آب سطحی با استفاده از معادله زیر برآورد می‌شود:

$$W_s = 10 \times \frac{\sum I_{\text{net}_n} \cdot A_n}{e} \quad (1)$$

که در آن W_s مقدار برداشت آب سطحی بر حسب مترمکعب در روز، I_{net_n} نیاز آب آبیاری برای گیاه n بر حسب میلی‌متر در روز، A_n سطح کشت‌شده گیاه n بر حسب هکتار و e راندمان آبیاری است. جریان رودخانه طبیعی شده برای هر ایستگاه با استفاده از معادله زیر برآورد می‌شود:

$$F_N = F_0 + W_s - \alpha \times W_s \quad (2)$$

که در آن F_N جریان طبیعی شده برای هر ایستگاه بر حسب مترمکعب در ثانیه، F_0 جریان مشاهداتی بر حسب مترمکعب در ثانیه و α ضریب جریان سطحی بازگشتی است. متوسط راندمان آبیاری آب سطحی در حوضه کرخه تقریباً ۳۰ درصد است (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). جریان بازگشتی آبیاری تقریباً بین ۲۰ تا ۳۰ درصد و رواناب دو برابر حجم نفوذ است (پیرمردیان و همکاران، ۱۳۸۳)؛ بنابراین مقدار $0/25$ برای ضریب جریان سطحی بازگشتی

سری داده‌ها است. در این روش ابتدا آماره S به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (۴)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند. تابع علامت sgn به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

در مرحله بعد، محاسبه واریانس S توسط یکی از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \begin{cases} \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^n t(t-1)(2t+5)}{18} & n > 10 \\ \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} & n \leq 0 \end{cases} \quad (۶)$$

که m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله است. در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از معادلات زیر استخراج می‌شود:

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & s < 0 \end{cases} \quad (۷)$$

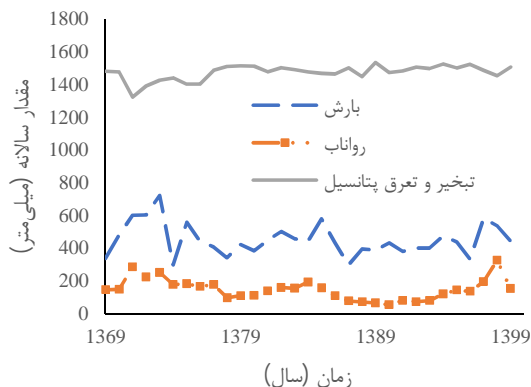
فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که $|Z| < Z_{\alpha/2}$. که a سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری a است که با توجه به دودامنه بودن آزمون، $a/2$ استفاده شده است. در این تحقیق، این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۰ درصد، ۹۵ درصد و ۹۹ درصد به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود.

روش تحلیل نقطه تغییر رواناب

آزمون پتیت

آزمون پتیت یک روش ناپارامتری برای تعیین وقوع نقطه تغییر است. نقطه تغییر آماری بیانگر زمانی است که از آن زمان به بعد، تغییر معنی‌داری در ویژگی‌های آماری متغیر موردنظر رخ می‌دهد. این روش معمولاً برای تعیین تغییرات در سری‌های هیدرولوژیکی و همچنین تغییرات اقلیمی استفاده شده است (ورستران و همکاران، ۲۰۰۶).

این روش سری زمانی را به دو نمونه به صورت‌های x_1, x_2, \dots, x_t و $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$ در نظر می‌گیرد. شاخص



شکل ۴- تغییرات مقادیر متوسط سالانه بارش، ارتفاع رواناب طبیعی شده و تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه کرخه

برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل به روش هارگریوز

در این تحقیق برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در هر سال از روش هارگریوز استفاده شد (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۲). از این روش می‌توان برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق مرجع استفاده کرد که به صورت معادله زیر است:

$$ET_0 = 0.0023R_a(T + 17.8)\sqrt{TR} \quad (۳)$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر در روز، R_a تابش برون‌زمینی بر حسب تبخیر معادل بر حسب میلی‌متر در روز، T متوسط درجه حرارت روزانه هوا در ماه مورد نظر بر حسب درجه سانتی‌گراد، TR تفاوت حداقل و حداکثر دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد است. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل برآوردشده با روش هارگریوز در حوضه کرخه در شکل ۴ نشان داده شده است.

آزمون روند من-کندال

به منظور آشکارسازی روند تغییرات در سری‌های سالانه بارش، دمای هوا، دبی جریان و تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره آماری موجود، روش ناپارامتری من-کندال مورد استفاده قرار گرفت. آزمون من-کندال ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) تکمیل و توسعه داده شد (سرانو، ۱۹۹۹). این روش که از جمله روش‌های متداول ناپارامتریک در جهت بررسی روند سری زمانی است، از داده‌های حدی نیز تأثیرپذیری کمی دارد (پارتال و کاهیا، ۲۰۰۶). فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و نبود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) به معنی وجود روند در

در آن P ، Q و AE به ترتیب بارش، رواناب و تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوضه هستند. در اینجا فرض بر این است که تغییرات در ترم ذخیره می‌تواند برای دوره زمانی طولانی مدت (حداقل ۱۰ سال) صرف نظر شود (چن و همکاران، ۲۰۱۳). تغییرات در متوسط جریان سالانه می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$\Delta Q_{\text{total}} = \overline{Q}_2 - \overline{Q}_1 = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (10)$$

که \overline{Q}_1 و \overline{Q}_2 به ترتیب اشاره به جریان متوسط سالانه قبل و بعد از نقطه تغییر دارد. ΔQ_C و ΔQ_H به ترتیب عبارتند از میزان تغییر در رواناب به دلیل تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی. فرض اساسی در این روش آن است که قبل از نقطه تغییر، تغییر در جریان به علت فقط تغییر اقلیم است و بعد از نقطه تغییر، هر دو تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی مسئول تغییرات جریان هستند؛ علاوه بر این، آن‌ها می‌تواند برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی فقط در مقیاس‌های سالانه در صورت وجود مجموعه داده بلندمدت مورد استفاده قرار گیرند (لی و همکاران، ۲۰۱۲). ژانگ و همکاران (۲۰۰۱) یک مدل دو پارامتری توسعه دادند که تبخیر و تعرق واقعی متوسط سالانه (AE) به بارش (P)، تبخیر و تعرق پتانسیل (PE) و ظرفیت آب در دسترس گیاه (w) به صورت زیر مرتبط می‌سازد:

$$\frac{AE}{P} = \frac{1 + w \frac{PE}{P}}{1 + w \frac{PE}{P} + \left(\frac{PE}{P}\right)^{-1}} \quad (11)$$

ضرایب حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta = \frac{1 + 2 \frac{PE}{P} + 3w \frac{PE}{P}}{\left(1 + \frac{PE}{P} + w \left(\frac{PE}{P}\right)^2\right)^2} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{1 + 2w \frac{PE}{P}}{\left(1 + \frac{PE}{P} + w \left(\frac{PE}{P}\right)^2\right)^2} \quad (13)$$

بنابراین سهم تغییر اقلیم (Q_C) و فعالیت‌های انسانی (Q_H) بر تغییرات جریان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_C = \frac{\Delta Q_C}{\Delta Q_{\text{total}}} \quad (14)$$

$$Q_H = \frac{\Delta Q_H}{\Delta Q_{\text{total}}} \quad (15)$$

نتایج و بحث

تحلیل روند سری‌های سالانه متغیرهای آب‌وهواشناسی

روند متغیرهای اقلیمی می‌تواند به درک اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب کمک کند. برای تعیین تغییرات بلندمدت

پتیت از طریق فرمول زیر می‌تواند محاسبه شود (پتیت، ۱۹۷۹):

$$U_{t,n} = \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (t = 1, \dots, n) \quad (8)$$

که حداکثر $U_{t,n}$ متناظر با سال نقطه تغییر است.

روش منحنی تجمعی دوگانه

روش منحنی تجمعی دوگانه عبارت است از ترسیم مقادیر تجمعی یک متغیر نسبت به مقادیر تجمعی متغیر مرتبط دیگر برای یک دوره همزمان (سرسی و هاردیسون، ۱۹۶۰). منحنی تجمعی دوگانه بین بارش و رواناب اخیراً به ابزاری مؤثر برای تشخیص تغییرات رژیم هیدرولوژیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی تبدیل شده است (هو و همکاران، ۲۰۰۸). معمولاً منحنی تجمعی دوگانه بین بارش و رواناب یک خط مستقیم است و تغییر در شیب منحنی ممکن است بیانگر آن باشد که رابطه اصلی بین متغیرها شکسته شده باشد. در این مطالعه، منحنی تجمعی دوگانه برای شناسایی نقطه تغییر سری‌های رواناب برای تأیید نقاط تغییر مشخص شده با آزمون پتیت مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از تحلیل روند و نقطه تغییر، سری‌های رواناب می‌تواند به دو دوره پیش از تغییر و پس از تغییر تقسیم شود؛ بنابراین با مشخص شدن دوره پیش از تغییر و پس از تغییر رواناب، می‌توان اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی تفکیک کرد.

روش حساسیت هیدرولوژیکی

روش حساسیت هیدرولوژیکی به تغییرات در متوسط جریان با توجه به تغییرات در متغیرهای اقلیمی (بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل) اشاره می‌کند و اغلب به صورت درصد بیان می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۱۴). میلی و دون (۲۰۰۲) نشان دادند که تغییر در رواناب متوسط سالانه به علت تغییر اقلیم می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Delta Q_C = \beta \Delta P + \gamma \Delta PE \quad (9)$$

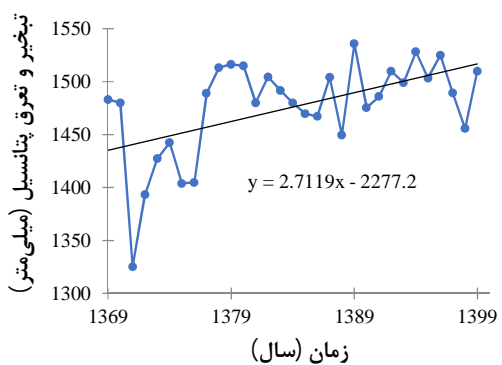
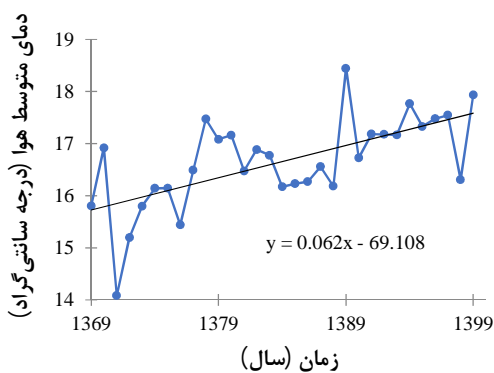
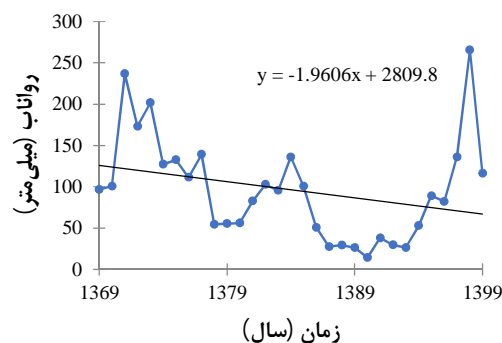
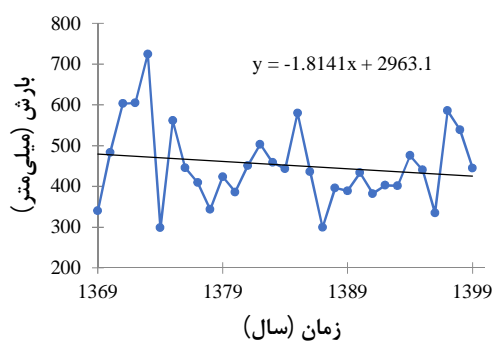
که ΔQ_C ، ΔP و ΔPE به ترتیب تغییرات در جریان، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند. β حساسیت جریان به بارش و γ حساسیت جریان به تبخیر و تعرق پتانسیل است. اصل در این روش آن است که مدل بیلان هیدرولوژیکی آب به صورت معادله $P - Q = AE$ است که

حوضه، هیچ روند آماری معنی‌دار بارش نداشت. شکل ۵ روند خطی سری‌های زمانی بارش، رواناب، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل را نشان داد. با توجه به شکل ۵، رواناب سالانه در حوضه کرخه، روند منفی به میزان ۱/۹۶ میلی‌متر در هر سال در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان داد؛ علاوه‌براین روند افزایش قابل‌توجهی برای تبخیر و تعرق پتانسیل با نرخ ۲/۷۱ میلی‌متر در هر سال در سطح اطمینان ۹۹ درصد نشان داد. همچنین روند افزایش دمای هوا با نرخ ۰/۰۶۲ درجه سانتی‌گراد در هر سال در سطح اطمینان ۹۹ درصد بود.

رواناب نسبت‌به تغییر اقلیم در حوضه کرخه، روش من-کندال ناپارامتری برای ارزیابی روند مقادیر سالانه رواناب، بارش، دمای متوسط و تبخیر و تعرق پتانسیل از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ به‌کار برده شد. جدول ۱ نتایج آماری تحلیل روند به روش من-کندال برای متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده‌است، رواناب روند کاهشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ را نشان داد؛ درحالی‌که دمای متوسط سالانه هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل روند افزایشی در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ داشت. علی‌رغم کاهش بارش متوسط سالانه در سطح

جدول ۱- نتایج تحلیل روند به روش من-کندال برای متغیرهای مختلف

متغیر	p-value	Z test	سطح معنی‌داری	روند
رواناب (میلی‌متر)	۰/۰۰۸	۲/۶۴۶-	۰/۰۱	کاهشی
بارش (میلی‌متر)	۰/۵۴۴	-	۰/۱	عدم روند
دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)	۰/۰۰۰۱<	۱۱/۲۱۸	۰/۰۱	افزایشی
تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	۰/۰	۳/۷۸۳	۰/۰۱	افزایشی

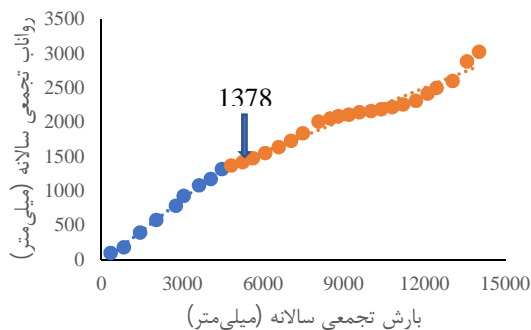


شکل ۵- روند خطی سری‌های زمانی بارش، رواناب، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل

سالانه به‌کار برده شد. نتایج آزمون پتیت در شکل ۶ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که سال ۱۳۷۸ نقطه تغییر قابل‌توجه رواناب بود. شکل ۷ بارش و

تحلیل نقطه تغییر رواناب

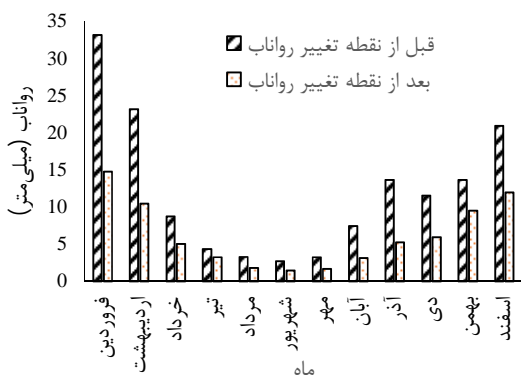
در این مطالعه، آزمون پتیت و روش منحنی تجمعی دوگانه بارش و رواناب برای شناسایی نقطه تغییر رواناب



شکل ۷- بارش و رواناب تجمعی سالانه در حوضه کرخه برای تعیین نقطه تغییر در رواناب

جدول ۲- مقایسه شاخص آماری میانگین و انحراف استاندارد سری زمانی رواناب قبل و بعد از نقطه تغییر

دوره زمانی	میانگین (میلی‌متر)	انحراف استاندارد (میلی‌متر)	تغییر در میانگین (%)
قبل از نقطه تغییر	۱۹۶/۸	۴۷/۸	--
بعد از نقطه تغییر	۱۲۹/۱	۶۰/۲	-۳۴/۴



شکل ۸- متوسط رواناب ماهانه برای دوره قبل از تغییر و دوره بعد از تغییر رواناب

کالیبراسیون و صحت‌سنجی روش تحلیل حساسیت

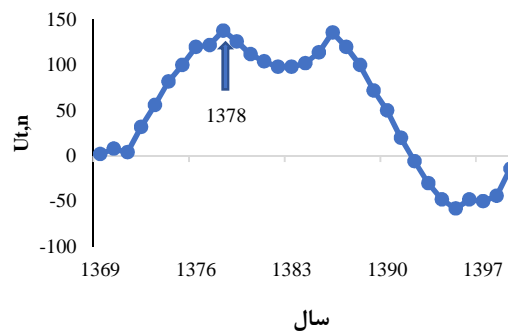
هیدرولوژیکی

در روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی، سه پارامتر کالیبراسیون شامل w ، β (ضریب حساسیت رواناب نسبت به بارش) و γ (ضریب حساسیت رواناب نسبت به تبخیر و تعرق پتانسیل) وجود داشته که بایستی با توجه به مقادیر بارش، رواناب، تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل تعیین شوند. مقدار پارامتر w برای هر دوره زمانی میانگین متحرک برابر با ۱۱ سال با روش سعی و خطا طوری در نظر گرفته شده تا مقادیر دو طرف معادلی (۱۱) یکسان

رواناب تجمعی سالانه در حوضه کرخه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که رابطه بین بارش تجمعی سالانه و رواناب تجمعی سالانه می‌تواند به صورت دو خط نسبتاً مستقیم با شیب‌های مختلف قبل و بعد از سال ۱۳۷۸ بیان شود. به عبارتی مشخصات بارش یا رواناب بعد از سال ۱۳۷۸ تغییر یافت؛ بنابراین دوره آماری مورد مطالعه برای حوضه کرخه، می‌تواند به دو دوره قبل از تغییر و دوره بعد از تغییر بر مبنای نقطه تغییر تقسیم شود. به منظور درک بهتر مشخصات تغییر در رواناب، اختلاف بین میانگین رواناب سالانه در طول دوره‌های قبل از تغییر و بعد از تغییر تحلیل شدند. جدول ۲ مقایسه شاخص آماری میانگین و انحراف استاندارد سری زمانی رواناب قبل و بعد از نقطه تغییر را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، میانگین رواناب برای سری زمانی قبل و بعد از نقطه تغییر به ترتیب برابر با ۱۹۶/۸ و ۱۲۹/۱ میلی‌متر بوده که در حدود ۳۴/۴ درصد کاهش در مقدار میانگین رواناب نشان داد. همچنین انحراف استاندارد برای سری زمانی قبل و بعد از نقطه تغییر به ترتیب برابر با ۴۷/۸ و ۶۰/۲ میلی‌متر است.

علاوه بر این رواناب ماهانه برای دو دوره با یکدیگر مقایسه شدند تا اثرات تغییر اقلیم و عوامل دیگر بر رواناب در طول دو دوره بیشتر درک شود. شکل ۸ متوسط رواناب ماهانه برای دوره قبل از تغییر و دوره بعد از تغییر رواناب را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۸، کاهش چشمگیر در متوسط رواناب ماهانه در طول دوره پس از تغییر (۱۳۷۸-۱۳۹۹) مشاهده می‌شود. همچنین بیشترین کاهش رواناب در فصول سیلابی (ماه‌های آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت) نشان داده شد.



شکل ۶- تعیین نقطه تغییر در سری زمانی رواناب با آزمون پتیت

فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب حدوداً ۱/۸ برابر با تأثیر تغییر اقلیم است. ژاو و همکاران (۲۰۱۰) با به‌کارگیری روش حساسیت هیدرولوژیکی برای کمی‌سازی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر جریان در حوضه‌های استرالیا، نیوزلند و جنوب آفریقا، دریافتند که ۱۶ تا ۷۲ درصد کاهش در جریان فقط به‌علت تغییر اقلیم است. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) با روش حساسیت هیدرولوژیکی به این نتیجه رسیدند که سهم تغییر اقلیم در کاهش رواناب در حوضه رودخانه هیبه ۳۳ تا ۷۲ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی ۲۸ تا ۶۷ درصد است. گیو و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب در حوضه‌های ووشان و شتسنگ در چین به روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی، دریافتند که سهم تغییر اقلیم در کاهش رواناب ۲۳ تا ۲۹ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی ۷۱ تا ۷۷ درصد است. لو و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر مشخصات جریان آبراهه در حوضه تپه‌ای لئوس پلاتو، دریافتند که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌ترتیب ۳۳/۱ درصد و ۶۶/۹ درصد در کاهش رواناب مؤثر بوده‌اند. قاسمی و مهجوری مجد (۲۰۲۱) دریافتند که با در نظر گرفتن سال ۲۰۰۶ به‌عنوان سال رخداد نقطه شکست در سری زمانی رواناب در حوضه زاینده‌رود، سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب به‌ترتیب بیش از ۹۰ درصد و کمتر از ۱۰ درصد است.

فعالیت‌های انسانی در سطح حوضه کرخه شامل حفر چاه برای برداشت آب زیرزمینی، افزایش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، افزایش تعداد و توسعه حوضچه‌های پرورش ماهی و... به‌دلیل افزایش جمعیت در شهرهای واقع در داخل و اطراف این حوضه و اشتغال‌زایی بر مبنای آب موجود در این حوضه است. در صورت ادامه‌داشتن روند افزایش بهره‌برداری از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت‌تأثیر فعالیت‌های انسانی شاهد کاهش چشمگیر رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری به‌ویژه مناطق پایین‌دست و ورودی به سطح کرخه خواهیم بود. هرچند در سال‌های اخیر با توجه به خشکسالی هواشناسی و کمبود بارش و برداشت بی‌رویه منابع آب سطحی و زیرزمینی، حجم قابل‌توجهی از مخزن سد کرخه خالی بوده و حجم آب در مخزن نتوانسته نیازهای مختلف پایین‌دست را تأمین کند؛ بنابراین به‌منظور مدیریت منابع

به‌دست آید. مقادیر پارامترهای β و γ به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ به‌دست آمد؛ بنابراین با کالیبراسیون روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی، مقادیر نهایی پارامترهای w ، β و γ به‌ترتیب برابر با ۰/۳۳۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۵۳- برآورد شد. با توجه به اینکه قدرمطلق مقدار ضریب β بزرگ‌تر از مقدار ضریب γ است، می‌توان دریافت که تغییر در رواناب حساسیت بیشتری به تغییرات بارش نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل دارد.

تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب

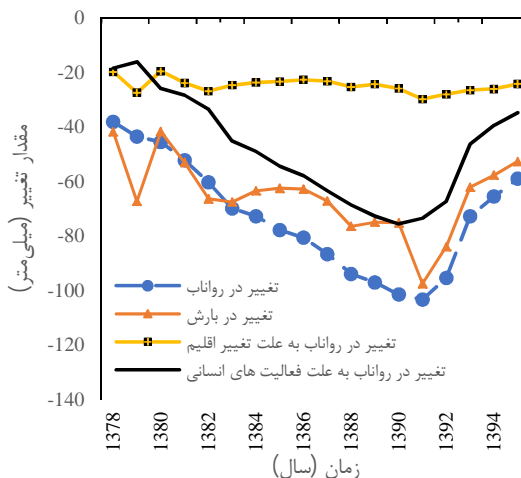
با توجه به نتایج شبیه‌سازی روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی، اثرات ارزیابی‌شده تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب نسبت به قبل از نقطه تغییر رواناب (سال ۱۳۷۸) در دوره‌های زمانی با میانگین متحرک ۱۱ ساله در شکل ۹، نشان داده شده‌است. همچنین مقدار تغییر در رواناب کل و مقدار تغییر در بارش در هر دوره زمانی با میانگین متحرک ۱۱ ساله نسبت به رواناب و بارش قبل از نقطه تغییر رواناب در شکل ۹، نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۹، تغییرات مقدار بارش در هر دوره زمانی با میانگین متحرک ۱۱ ساله نسبت به دوره قبل از نقطه تغییر (سال ۱۳۷۸)، به‌صورت نامنظم کاهش یافت. در صورتی که تغییرات رواناب از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۱، به‌صورت قابل‌توجه و مداوم کاهش یافت؛ علاوه‌براین، تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب بیشتر از تأثیر تغییر اقلیم بر تغییر رواناب است؛ به‌طوری‌که تأثیر تغییر اقلیم بر کاهش رواناب در طول دوره زمانی با شیب نسبتاً ملایمی افزایش یافته‌است. در صورتی که تأثیر فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب با شیب نسبتاً قابل‌توجهی افزایش یافت. درصد تغییر در رواناب تحت‌تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در دوره‌های زمانی با میانگین متحرک ۱۱ ساله مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۱۰، تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب بسیار بیشتر از تأثیر تغییر اقلیم است. همچنین فعالیت‌های انسانی روند افزایشی در تغییر رواناب در طول دوره زمانی داشته‌است. در صورتی که تغییرات میانگین رواناب بعد از نقطه تغییر رواناب نسبت به قبل از نقطه تغییر رواناب با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود، درصد تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب به‌ترتیب برابر با ۳۶/۲ و ۶۳/۸ درصد است. به‌عبارتی تأثیر

کره زمین به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاهش یافته‌است؛ از این رو بررسی عواملی که بر تغییرات رواناب تأثیرگذار هستند، مفید است. در این مطالعه، از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی برای برآورد کمی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب در حوضه آبریز کرخه در بالادست ایستگاه هیدرومتری جلوگیر ماژین استفاده شد. نتایج اصلی به شرح زیر است: رواناب با روند قابل توجهی در سطح اطمینان ۹۹ درصد در حوضه کرخه کاهش یافته‌است؛ در حالی که هیچ روند قابل توجهی در مقدار بارش مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین این‌طور می‌توان استنباط کرد که تغییرات رواناب در حوضه کرخه ممکن است غیر از تغییر اقلیم تحت‌تأثیر عوامل دیگر عمدتاً فعالیت‌های انسانی قرار گرفته باشد. معمولاً فعالیت‌های انسانی شامل برداشت آب برای آبیاری در زمین‌های کشاورزی، توسعه صنعتی، ساخت سد و همچنین اقدامات حفاظت آب و خاک منجر به کاهش شدید رواناب می‌شود.

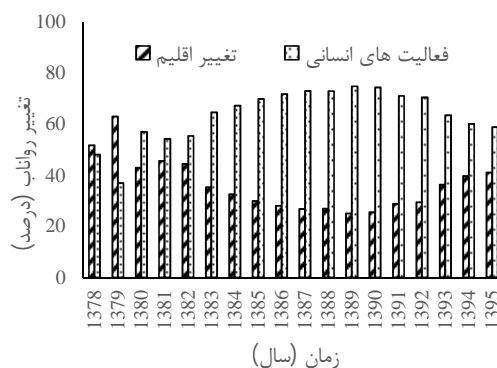
نتایج نشان می‌دهد که نقطه تغییر در سری رواناب سالانه براساس آزمون پتیت و روش منحنی تجمعی دوگانه، در سال ۱۳۷۸ رخ داده‌است. بنابراین دوره پیش از تغییر و دوره پس از تغییر، به ترتیب قبل و بعد از سال ۱۳۷۸ است. دوره پیش از تغییر نشان می‌دهد که میانگین رواناب سالانه در دو دوره پس از تغییر و مقایسه میانگین رواناب سالانه در دو دوره پیش از تغییر نشان می‌دهد که میانگین رواناب سالانه در دوره پس از تغییر به میزان ۳۴/۴ درصد نسبت به دوره پیش از تغییر کاهش یافته‌است؛ علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی منجر به کاهش رواناب به ترتیب برابر با ۳۶/۲ و ۶۳/۸ درصد در حوضه کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی شده‌است؛ بنابراین تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب حدوداً ۱/۸ برابر با تأثیر تغییر اقلیم است.

نتایج تحقیق حاضر می‌تواند مرجعی برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب منطقه‌ای باشد. حفاظت آب و خاک تنها هدف و ابزار توسعه نیست. در عین حال می‌توان راهکارهایی به صورت عملی امکان‌پذیر در زمینه افزایش رواناب تولیدی برای مدیران پیشنهاد کرد تا به‌طور منطقی اقدامات محلی را با در نظر گرفتن توسعه پایدار در منابع آب منطقه‌ای و محیط‌زیست برنامه‌ریزی کنند.

آب و حل بحران آب برای مصرف‌کنندگان آب در این حوضه بایستی سیاست‌های سازگاری با کم‌آبی نهادینه شود و طرح‌های توسعه منابع آب در سطح حوضه براساس شرایط خشکسالی و تغییر اقلیم در آینده بازنگری شوند. همچنین از کشت محصولات آبربر در فصول خشک ممانعت ورزیده شود. دولت بایستی با اشتغال‌زایی بر مبنای توسعه صنایع کوچک و بزرگ در مناطق مختلف در سطح حوضه سعی کند تا تنش بر مصرف منابع آب سطحی و زیرزمینی کاهش یابد.



شکل ۹- نمودار تغییرات تغییر در رواناب، بارش و سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب در هر دوره زمانی با میانگین متحرک ۱۱ ساله نسبت به دوره قبل از نقطه تغییر رواناب



شکل ۱۰- درصد تغییر در رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در دوره‌های زمانی با میانگین متحرک ۱۱ ساله

نتیجه‌گیری

با تغییرات اقلیمی جهانی یا منطقه‌ای و افزایش فعالیت‌های انسانی، جریان رودخانه‌ها در مناطق بسیاری از

- Switzerland. Journal of hydrology. 314(1-4): 312-329.
10. Chen Z. Chen Y. and Li B. 2013. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China. Theoretical and applied climatology. 111(3): 537-545.
 11. Chiew F. H. S. and McMahon T. A. 2006. Detection of trend or change in annual flow of Australian rivers. International Journal of Climatology. 13(6):643-653.
 12. Gao G. Fu B. Wang S. Liang W. and Jiang X. 2016. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. Science of the Total Environment. 557:331-342.
 13. Guo Y. Li Z. Amo-Boateng M. Deng P. and Huang P. 2014. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes for the upper reaches of Weihe River. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 28(2):333-346.
 14. Hargreaves G. H. and Samani Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Journal of the irrigation and Drainage Division. 108(3): 225-230.
 15. Huo Z. Feng S. Kang S. Li W. and Chen S. 2008. Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China. Hydrological Processes: An International Journal. 22(16): 3155-3167.
 16. Jiang C. Xiong L. Wang D. Liu P. Guo S. and Xu C.Y. 2015. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. Journal of Hydrology. 522:326-338.
 17. Kahya E. and Kalaycı S. 2004. Trend analysis of streamflow in Turkey. Journal of Hydrology. 289(1-4): 128-144.
 18. Kendall M. G. 1975. Multivariate analysis (Vol. 2). London: Griffin.
 19. Khaliq M.N. Ouarda T.B. and Gachon P. 2009. Identification of temporal trends in annual and seasonal low flows occurring in Canadian rivers: The effect of short-and long-term persistence. Journal of Hydrology. 369(1-2): 183-197.
 20. Kumar S. Merwade V. Kam J. and Thurner K. 2009. Streamflow trends in Indiana: effects of long-term persistence, precipitation and subsurface drains. Journal of Hydrology. 374(1-2): 171-183.
 21. Li H. Zhang Y. Vaze J. and Wang B. 2012. Separating effects of vegetation change and climate variability using hydrological

سیاسگزاری

نویسندگان از سازمان آب و برق خوزستان و مدیریت دفتر پژوهش‌های کاربردی برای حمایت مالی برای انجام این پژوهش تشکر می‌کند. همچنین از سازمان هواشناسی کل کشور و معاونت مطالعات پایه سازمان آب و برق خوزستان به علت دراختیارگذاشتن آمار و اطلاعات موردنیاز قدردانی می‌شود.

منابع

۱. پیرمردیان ن. کامگار حقیقی ع. ع. و سپاسخواه ع. ر. ۱۳۸۳. نشت جانبی، نفوذ عمقی، رواناب و بازده‌های کاربرد و استفاده از آب برای برنج در منطقه کوشک استان فارس. تحقیقات کشاورزی ایران، ۲۳-۲۴(۲): ۱-۸.
۲. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. ۱۳۷۶. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. الگوی مصرف آب در کشاورزی (سند ملی).
۳. شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۸۸. بررسی جامع آب‌های سطحی حوضه رودخانه کرخه (مطالعه دوم). تهران، ایران.
۴. قاسمی ح. مهجوری مجد ن. ۱۳۹۹. تعیین سهم اثرات تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر کاهش رواناب با تحلیل حساسیت نسبت به محل نقاط شکست آماری در سری زمانی. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۶(۴): ۲۸۴-۲۹۵.
۵. وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۹۰. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصاد. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، محصولات زراعی.
۶. وزارت نیرو. ۱۳۹۱. مطالعه جامع آب حوضه آب رودخانه کرخه - مطالعه دوم. تهران، ایران.
7. Beven K. 2016. Facets of uncertainty: Epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. Hydrological Sciences Journal. 61(9): 1652-1665.
8. Beven K. and Westerberg I. 2011. On red herrings and real herrings: disinformation and information in hydrological inference. Hydrological Processes. 25(10): 1676-1680.
9. Birsan M. V. Molnar P. Burlando P. and Pfaundler M. 2005. Streamflow trends in

- and Kløve B. 2020. Unsustainability syndrome—from meteorological to agricultural drought in arid and semi-arid regions. *Water*. 12(3):838.
35. Velpuri N. M. and Senay G. B. 2013. Analysis of long-term trends (1950–2009) in precipitation, runoff and runoff coefficient in major urban watersheds in the United States. *Environmental Research Letters*. 8(2): 024020.
 36. Verstraeten G. Poesen J. Demarée G. and Salles C. 2006. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22).
 37. Wang W. Shao Q. Yang T. Peng S. Xing W. Sun F. and Luo Y. 2013. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China. *Hydrological Processes*. 27(8): 1158-1174.
 38. Wu L. Wang S. Bai X. Luo W. Tian Y. Zeng C. Luo G. and He S. 2017. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*. 601:1449-1465.
 39. Wurbs R. A. 2006. Methods for developing naturalized monthly flows at gaged and ungaged sites. *Journal of Hydrologic Engineering*. 11(1): 55-64.
 40. Yan T. Bai J. Lee Zhi Yi A. and Shen Z. 2018. SWAT-simulated streamflow responses to climate variability and human activities in the Miyun Reservoir Basin by considering streamflow components. *Sustainability*. 10(4): 941.
 41. Yang L. Feng Q. Yin Z. Wen X. Si J. Li C. and Deo R.C. 2017. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China. *Hydrological Processes*. 31(5):1100-1112.
 42. Zhang L. Dawes W. R. and Walker G. R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*. 37(3): 701-708.
 43. Zhao F. Zhang L. Xu Z. and Scott D.F. 2010. Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow. *Water Resources Research*. 46(3).
 44. Ma Z. Kang S. Zhang L. Tong L. and Su X. 2008. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow modelling and sensitivity-based approaches. *Journal of Hydrology*. 420: 403-418.
 22. Liu Z. Xu Z. Fu G. and Yao Z. 2013. Assessing the hydrological impacts of climate change in the headwater catchment of the Tarim River basin, China. *Hydrology Research*. 44(5): 834-849.
 23. Lv X. Zuo Z. Xiao P. Ni Y. and Sun J. 2018. Effects of climate change and human activity on runoff in a typical Loess Gullied-Hilly Region Watershed. *Polish Journal of Environmental Studies*. 27(2): 779-785.
 24. Mann H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*. 245-259.
 25. McCabe G. J. and Wolock D. M. 2002. A step increase in streamflow in the conterminous United States. *Geophysical Research Letters*. 29(24): 38-1.
 26. Milly P. C. Betancourt J. Falkenmark M. Hirsch R. M. Kundzewicz Z. W. Lettenmaier D. P. and Stouffer R. J. 2008. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*. 319(5863):573-574.
 27. Milly P. C. D. and Dunne K. A. 2002. Macroscale water fluxes 2. Water and energy supply control of their interannual variability. *Water Resources Research*. 38(10): 24-1.
 28. Naik P.K. and Jay D.A. 2005. Estimation of Columbia River virgin flow: 1879 to 1928. *Hydrological Processes: An International Journal*. 19(9):1807-1824.
 29. Partal T. and Kahya E. 2006. Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal*. 20(9): 2011-2026.
 30. Pettitt A. N. 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 28(2): 126-135.
 31. Searcy J. K. and Hardison C. H. 1960. Double-mass curves. *US Geology Survey Water Supply Pap 1541-B:27-66*.
 32. Serrano A. Mateos V. L. and Garcia J. A. 1999. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921–1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*. 24(1-2): 85-90.
 33. Sharifi A. Mirabbasi R. Nasr-Esfahani M. A. Haghghi A. T. and Nafchi R. F. 2021. Quantifying the impacts of anthropogenic changes and climate variability on runoff changes in central plateau of Iran using nine methods. *Journal of Hydrology*. 603: 127045.
 34. Torabi Haghghi A. Abou Zaki N. Rossi P. M. Noori R. Hekmatzadeh A.A. Saremi H.

- for a river basin in arid region of northwest China. *Journal of hydrology*, 352(3-4):239-249.
45. Zhou F. Xu Y. Chen Y. Xu C.Y. Gao Y. and Du J. 2013. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 485:113-125.
46. Zuo D. Xu Z. Wu W. Zhao J. and Zhao F. 2014. Identification of streamflow response to climate change and human activities in the Wei River Basin, China. *Water Resources Management*, 28(3):833-851.

