

بررسی عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب حوضه قزل‌اوزن

حبیبه عباسی^{*۱}

چکیده

در دهه‌های اخیر در برخی مناطق جهان، میزان رواناب به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. فعالیت‌های بشری و تغییرات آب‌وهوایی دو عامل اصلی در تغییر میزان رواناب هستند. براین اساس تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر و کمی کردن تأثیرات آن‌ها بر میزان رواناب دارای اهمیت زیادی است. در تحقیق حاضر، از روش من-کندال برای بررسی روند تغییرات سری زمانی رواناب رودخانه قزل‌اوزن در ایستگاه یساول استفاده شد. با استفاده از روش پتیت زمان وقوع نقطه تغییر در سری زمانی سالانه رواناب مشخص شد. نتایج حاصل نشان داد که سری زمانی رواناب در حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری یساول دارای روند کاهشی بوده و نقطه تغییر سری زمانی رواناب سال ۱۹۹۷ است. براین اساس، سری زمانی رواناب به بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی تقسیم شد. پس از ورود اطلاعات مربوط به حوضه در مدل SWAT، نسبت به اجرای مدل بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۰ اقدام شد. از سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۳ مربوط به قبل از نقطه تغییر است. براین اساس از سال آماری ۱۹۸۷ به‌عنوان Warmup و از ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۱ برای واسنجی و از آمار ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ برای تأیید مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل از الگوریتم SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWATCUP استفاده شد. از آنجایی که تعداد این پارامترها زیاد است، قبل از واسنجی، تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترها بررسی و پارامترهای حساس مشخص شد. بررسی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل در دوره زمانی پایه نشان داد که مدل SWAT عملکرد خوبی در شبیه‌سازی جریان رودخانه در ایستگاه هیدرومتری یساول دارد. همچنین نتایج مطالعه نشان داد نقش تغییرات عوامل اقلیمی (۷۶ درصد) بر تغییرات رواناب رودخانه در دوره ارزیابی، به مراتب بیشتر از نقش فعالیت‌های انسانی (۲۴ درصد) است. به‌طور کلی، تحقیق حاضر ضرورت انجام اقدامات لازم برای انطباق با تغییرات آب‌وهوایی و ایجاد دستورالعمل‌هایی برای فعالیت‌های انسانی برای دسترسی پایدار به منابع آب بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آزمون من-کندال، آزمون پتیت، تغییرات آب‌وهوایی، عوامل انسانی، مدل SWAT.

ارجاع: عباسی ح. ۱۴۰۲. بررسی عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب حوضه قزل‌اوزن. مجله پژوهش آب ایران. ۵۰: ۱-۱۰.
<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14148.2470>

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: h.abbasi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

مقدمه

کمبود منابع آبی همواره به‌عنوان یک عامل محدودکننده فعالیت‌ها در کشور ایران مطرح بوده است. متوسط بارش در جهان در حدود ۸۶۰ میلی‌متر است و این در حالی است که متوسط درازمدت بارش در ایران ۲۵۰ میلی‌متر است (موحدی و همکاران، ۱۳۹۶). در دهه‌های اخیر، به‌دلیل افزایش تقاضای آب و محدودیت این منابع در نقاط مختلف جهان، سرانه منابع آب تجدیدشونده کاهش یافته است. افزایش فعالیت‌های انسانی و صنعتی‌شدن کشورها باعث افزایش تقاضای آب و کاهش سرانه منابع آب تجدیدشونده و از طرفی افزایش گازهای گلخانه‌ای و به‌تبع آن افزایش دمای زمین و تغییر سایر متغیرهای اقلیمی شده است که تغییر اقلیم را شکل می‌دهد. تغییرات عوامل اقلیمی، اثرات بارزی روی چرخه هیدرولوژی و سیستم‌های منابع آب دارد؛ به‌گونه‌ای که می‌تواند به‌عنوان تهدیدی بزرگ بر سیستم‌های منابع آب در سراسر جهان قلمداد شود.

درمورد تأثیرات بالقوه تغییر اقلیم بر منابع آب مانند تأثیر روی کمیّت آب، هیدرولوژی و تقاضای آب مطالعات زیادی انجام شده است. در مطالعه‌ای که گوسین و همکاران (۲۰۰۶) انجام دادند، تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم در ۱۲ حوضه از رودخانه‌های هند بر دبی جریان رودخانه‌ها برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعه آن‌ها کاهش جریان و افزایش شدت سیلاب و خشکسالی را نشان داد. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز تویسرکان همدان با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند. پس از شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه با استفاده از مدل HEC-HMS، ۱۵ مدل گردش عمومی جو و مدل LARS-WG مقدار بارش را تحت دو سناریو A1B و B1 شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل نشان داد که در اثر کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی، حجم رواناب خروجی هریک از زیرحوضه‌ها، تحت هر دو سناریو کاهش خواهد یافت. باتا و همکاران (۲۰۱۹) از مدل SWAT برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در وضعیت هیدرولوژی حوضه رودخانه هیمالیا استفاده کردند. نتایج پیش‌بینی آنان نشان داد که حداکثر و حداقل دمای متوسط سالانه افزایش و بارش کاهش خواهد یافت که در اثر این تغییرات اقلیمی، جریان کل حوضه

مورد مطالعه ۱۵ درصد کاهش و متوسط دبی سالانه تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب بیش از ۸ درصد و بیش از ۸/۵ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین در سال‌های اخیر مطالعات متعددی برای بررسی تأثیر فعالیت‌های انسانی (تغییرات کاربری اراضی، افزایش مصارف و...) و تأثیر تغییر عوامل اقلیمی بر کاهش جریان رودخانه‌ها انجام شده است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی AWBM میزان تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان ورودی به حوضه دریاچه Poyang چین را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات جریان ورودی به دریاچه به‌ترتیب برابر با ۲۶/۸ درصد و ۷۳/۲ درصد است. عباسی و ملکانی (۱۳۹۸) تحلیل روند و تغییرات کوتاه‌مدت رواناب سالانه حوضه سجاسرود واقع در استان زنجان را در دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۲ بررسی و در ادامه جریان رودخانه را با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. نتایج حاصل نشان داد که سهم عوامل اقلیمی و انسانی در کاهش رواناب حوضه به‌ترتیب ۳۳ درصد و ۶۷ درصد است. گشاو و همکاران (۲۰۱۸) به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی در حوضه Andassa، برای دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۵ و پیش‌بینی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر وضعیت هیدرولوژیکی برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۴۵ از ابزار SWAT استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که روند تغییرات کاربری اراضی باعث افزایش بیشتر جریان سالانه و مرطوب و رواناب سطحی می‌شود. فرجی و همکاران (۱۴۰۰) میزان اثر تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی در میزان رواناب و رسوب رودخانه مردق‌چای را با استفاده از مدل SWAT تعیین کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که تغییرات اقلیمی باعث کاهش رواناب سالانه ۰/۸ مترمکعب بر ثانیه در هر سال شده است که در حدود ۷۰ درصد از کاهش کل جریان است. براین‌اساس ۳۰ درصد از کاهش جریان رودخانه مردق‌چای ناشی از فعالیت‌های انسانی است. در مطالعه‌ای که شانگ و همکاران (۲۰۱۹) در بخش بالایی رودخانه هیبه انجام دادند، مشاهده کردند که رواناب رودخانه برای بیش از یک دهه به‌طور مداوم افزایش یافته که قبلاً در تاریخ اتفاق نیفتاده است. در این مطالعه از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب برای تحلیل کمی پاسخ رواناب با توجه به کاربری اراضی و

برآورد میزان تقاضای آب مرتبط با فعالیت‌های انسانی ضروری است. در این راستا لازم است تحقیقات بیشتری در زمینه بررسی روند تغییرات دبی در رودخانه و کمی‌کردن نقش هریک از عوامل مؤثر بر تغییر آن انجام شود. در این تحقیق، پس از بررسی روند تغییرات رواناب در حوضه مطالعاتی، با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی مفهومی نقش تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب به تفکیک بررسی می‌شود، تا تصمیم‌گیران و مدیران منابع آب را برای مدیریت بهینه منابع آب یاری کند.

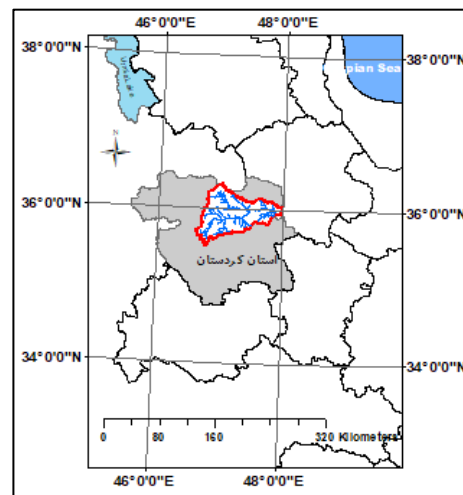
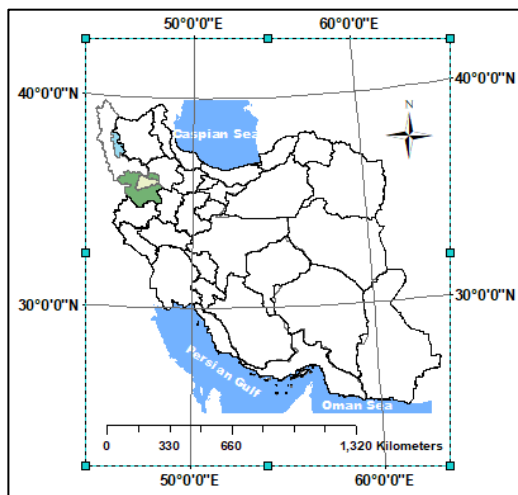
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه قزل‌اوزن یکی از شاخه‌های رودخانه سفیدرود در استان کردستان است. با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS طول تقریبی رودخانه قزل‌اوزن در محل ایستگاه هیدرومتری یساول ۱۷۹/۶۱ کیلومتر به دست آمد. مساحت حوضه آبریز در محل ایستگاه هیدرومتری یساول ۵۳۲۱/۲ کیلومترمربع است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

تغییرات آب‌وهوایی استفاده شد. دوره مطالعاتی به دوره قبل از سال ۲۰۰۴ (دوره مرجع) و پس از سال ۲۰۰۴ به‌عنوان (دوره تداخل) طبقه‌بندی شد. براساس تجزیه و تحلیل، در مقایسه با دوره مرجع، نرخ سهم تغییر اقلیم ۸۷/۱۵ درصد بود، در حالی که نرخ سهم تغییر کاربری زمین تنها ۱۲/۸۵ درصد بود. داروینی و ممولا (۲۰۲۰) در پنج حوضه آبریز در سواحل آدریاتیک، یک تجزیه و تحلیل دقیق برای بررسی سیستم پیچیده از دریاچه‌های مصنوعی، انحراف اجباری و ایستگاه‌های برق‌آبی که رژیم رودخانه را تغییر داده است، انجام دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که این مسئله همراه با کاهش بارش سالانه در مرکز ایتالیا، تعیین کمیّت سهم نسبی فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب‌وهوایی در جریان رودخانه را به یک کار چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند.

با افزایش سریع جمعیت جهان و به‌دنبال آن افزایش تقاضای آب، فشار زیادی به منابع آب وارد می‌شود؛ بنابراین مدیران و تصمیم‌گیران برای مدیریت بهینه منابع آب، نیازمند مدیریت تأثیرات تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر فرایندهای هیدرولوژیکی هستند. براین اساس تفکیک نقش هریک از عوامل مذکور برای انجام اقدامات مدیریتی برای تطبیق با شرایط تغییر اقلیم در آینده و



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز رودخانه قزل‌اوزن در بالادست ایستگاه هیدرومتری یساول

شیمیایی-کشاورزی را پیش‌بینی کند. مدل SWAT مدل هیدرولوژیکی و با پایه فیزیکی است؛ این مدل از روابط رگرسیونی برای ایجاد روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل استفاده نمی‌کند؛ بنابراین به اطلاعات مربوط به آب‌وهوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و

معرفی مدل SWAT

SWAT (ابزار ارزیابی آب و خاک) مدلی در مقیاس حوضه آبخیز است که توسط آرنولد و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است. این مدل قادر است تأثیر روش‌های مختلف مدیریت زمین‌ها بر مقادیر آب، رسوب و مواد

کاربری اراضی، ۷ طبقه کاربری اراضی در منطقه شناسایی شد.

اطلاعات مورد نیاز مربوط به هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش، روزانه دما، روزانه رطوبت نسبی، روزانه سرعت باد و روزانه میزان تشعشع خورشیدی است که از اداره هواشناسی استان کردستان تهیه و در مراحل شبیه‌سازی حوضه به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل استفاده شد و همچنین داده‌های ماهانه دبی ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه، از سازمان آب منطقه‌ای استان کردستان تهیه شده است که در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده می‌شود.

بررسی وجود روند در آمار ایستگاه هیدرومتری با

روش من-کندال (Mann-Kendall)

یکی از روش‌های آزمون داده‌های دارای روند بوده و مبتنی بر فرایند رتبه‌ای است. از محاسن این روش به تأثیرپذیری کم آن از مقادیر حدی و نیز مناسب بودن برای داده‌های دارای چولگی می‌توان اشاره کرد. همچنین می‌توان از آن در سری داده‌هایی استفاده کرد که دارای توزیع آماری خاص نبوده و حاوی مقادیر باقیمانده یا روندهای غیرخطی باشند (حیدری، ۱۳۹۵). آماره آزمون من-کندال (S) برای سری داده‌ها که مجموع علامت‌های تفاضلات متوالی مشاهدات است، به‌صورت معادله (۴) تعریف می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i), \quad \forall 1 \leq i < j \leq n \quad (4)$$

که X_j مقدار داده j ام؛ n تعداد داده‌ها؛ و $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت است که مطابق با معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

وقتی $n \geq 10$ باشد، آماره S تقریباً به‌طور نرمال توزیع شده، دارای میانگین صفر و انحراف معیار زیر است:

$$\text{Var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18} \quad (6)$$

که t_i تعداد داده‌های یکسان در دسته i ام است. آماره آزمون من-کندال (Z-MK) که دارای توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس ۱ است، مطابق با معادله (۴) تعریف می‌شود (پاندا و همکاران، ۲۰۰۷).

روش‌های مدیریت و کاربری زمین‌ها در سطح حوضه نیاز دارد. مدل SWAT به‌صورت یک الحاق به سامانه اطلاعات جغرافیایی ArcGIS اضافه شده و از قابلیت‌های آن استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی، مدل SWAT حوضه آبریز را به زیرحوضه‌هایی تقسیم می‌کند. زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچک‌تر به نام HRU (واحدهای واکنش هیدرولوژیک) که دارای ترکیبات یکسانی از خاک، پستی و بلندی و کاربری اراضی هستند، تقسیم می‌شوند. واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT با استفاده از بسته نرم‌افزاری SWATCUP انجام می‌شود. در این برنامه از الگوریتم‌های SUFI2^1 ، Parasol^2 ، PSO^3 ، GLUE^4 و MCMC^5 براساس انتخاب کاربر استفاده می‌شود (عباسپور، ۲۰۱۲).

برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی نتایج از سه معیار نشان‌ساز کلیم (NSE)، نسبت باقیمانده میانگین مربعات خطا به انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) و درصد اریبی (PBIAS) استفاده خواهد شد.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \right) \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (2)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{abs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2}} \quad (3)$$

که در آن O_{avg} میانگین مقادیر مشاهداتی، S_i مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل، O_i مقدار داده مشاهداتی و n تعداد داده‌های مشاهداتی است. حدود متناظر معیارهای ارزیابی مدل SWAT در جدول ۱ نشان داده شده است (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

داده‌های مورد نیاز

از نقشه‌های پایه مورد نیاز مدل می‌توان به نقشه مدل رقومی ارتفاع یا DEM، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک اشاره کرد که در قالب لایه‌های رستری به مدل معرفی می‌شوند (شکل ۲). براساس نقشه خاک فائو، کل حوضه به ۶ کلاس بافت خاک قابل تفکیک است. براساس نقشه

1- Sequential Uncertainty Fitting

2- Parameter Solution

3- Particle Swarm Optimization

4- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

5- Markov Chain Monte Carlo

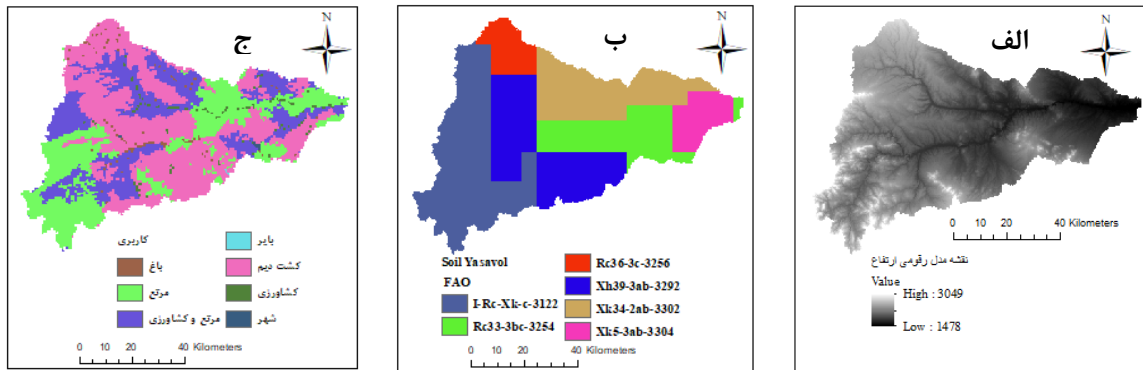
است. اگر $|Z| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ فرضیه صفر (نبود روند) در سطح معنی داری α می‌تواند رد شود. در این معادله مقدار $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ از جدول توزیع نرمال تجمعی استاندارد به دست می‌آید (ونگ و همکاران، ۲۰۱۶).

$$z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

حضور یک روند آماری معنی دار با استفاده از مقدار Z ارزیابی شده است. مقدار مثبت (منفی) Z نشان‌دهنده روند روبه بالا (پایین) است. آماره Z دارای توزیع نرمال

جدول ۱- معیارهای ارزیابی مدل و حدود تشخیص آن‌ها (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷)

ضرایب ارزیابی	NS	PBIAS	RSR	ارزیابی
	$0.75 < NS \leq 1$	$PBIAS \leq \pm 10$	$0 < RSR \leq 0.5$	خیلی خوب
	$0.65 < NS \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$0.5 < RSR \leq 0.6$	خوب
	$0.5 < NS \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$0.6 < RSR \leq 0.7$	قابل قبول
	$NS < 0.5$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.7$	عدم قبول



شکل ۲- نقشه رقومی ارتفاعی (الف)، نقشه خاک (ب) و نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز بالادست ایستگاه هیدرومتری یساؤل (ج)

زمانی اهمیت دارد که هیچ فرضیه‌ای درباره زمان تغییر موجود نباشد. آماره آزمون پتیت به شرح زیر است.

$$U_{zn} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad \text{if } z = 2 \dots n \quad (8)$$

t ، طول دوره آماری؛ و n ، تعداد رخداد در سری آماری است. تابع $\text{sgn}(\cdot)$ نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

مقدار K با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \max |U_{zn}| \quad (10)$$

در مرحله بعد مقدار K در معادله (۷) جایگزین و آماره p با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$p = \exp \left[\frac{-6(k_n)^2}{n^3 + n^2} \right] \quad (11)$$

تحلیل تغییرات سریع سری‌های زمانی با استفاده از آزمون پتیت

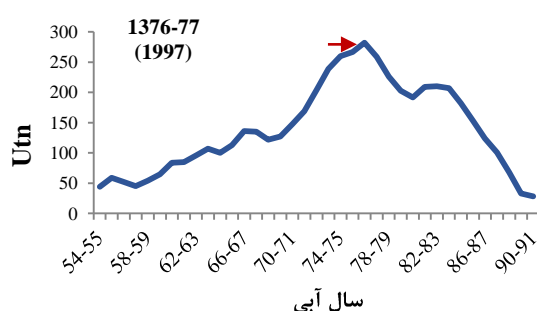
تغییرات سریع در سری‌های زمانی به مفهوم کاهش یا افزایش ناگهانی در خصوصیات آماری یک سری زمانی طی یک گام زمانی کوتاه است. برای بررسی وقوع روند سریع در سری‌های زمانی روش‌هایی پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به آزمون پتیت اشاره کرد که جزو روش‌های ناپارامتری بوده و در سال ۱۹۷۹ توسط پتیت توسعه داده شد. این آزمون در مطالعه روند متغیرهای هیدروکلیماتولوژی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی این روش‌ها، قابلیت آن‌ها در تعیین زمان وقوع این تغییرات در سری زمانی مورد بررسی است. این روش برای پیدا کردن نقاط تغییر در یک سری زمانی به کار برده می‌شود. تست پتیت آزمونی برای تشخیص تغییرات معنی‌دار در میانگین سری زمانی است و این موضوع

- ✓ محاسبه میزان کل تغییرات در میانگین سالانه رواناب (ΔQ_{Total}) با استفاده از معادله (۹)؛
- ✓ واسنجی و صحت‌سنجی مدل در بازه زمانی پایه؛
- ✓ شبیه‌سازی بازه زمانی ارزیابی توسط مدل SWAT آماده‌شده در مرحله قبل؛
- ✓ محاسبه تفاضل بین جریان شبیه‌سازی‌شده در بازه زمانی پایه و بازه زمانی ارزیابی به‌عنوان تغییرات مربوط به شرایط اقلیمی (ΔQ_c)؛
- ✓ استفاده از معادله (۹) برای محاسبه تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی (ΔQ_h)

نتایج و بحث

بررسی وجود روند و تغییرات سریع رواناب ایستگاه هیدرومتری یساول

ایستگاه هیدرومتری یساول بر رودخانه قزل‌اوزن واقع شده است. آماربرداری از این ایستگاه از سال ۱۳۵۳-۱۳۵۴ شروع شده است. برای بررسی وجود روند در دبی سالانه ایستگاه یساول، از روش من-کندال استفاده شده است که وجود روند در ایستگاه یساول را نشان می‌دهد. مقدار p -value کمتر از ۰/۰۰۰۱ که به مراتب کمتر از سطح معنی‌داری ۵ درصد بوده و نشان‌دهنده معنی‌داری روند رواناب ایستگاه یساول است. نتیجه آزمون پتیت (شکل ۳) نشان می‌دهد که دبی رودخانه از سال آبی ۱۳۷۶-۱۳۷۷ کاهش یافته است.



شکل ۳- تغییرات مقدار آماره آزمون پتیت (U_{zn}) دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری یساول

شکل ۴ میانگین دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری یساول را قبل و بعد از سال آبی ۱۳۷۶-۱۳۷۷ (۱۹۷۷) به ترتیب ۱۹/۰۵ و ۸/۴۵ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد. میانگین دبی سالانه در بازه زمانی ارزیابی به اندازه ۵۶ درصد نسبت به بازه زمانی پایه کاهش یافته است.

هرچه آماره p به صفر نزدیک‌تر باشد، اختلاف میانگین سری قبل از پرش و بعد از پرش معنادارتر می‌شود و معمولاً اگر $p < 0.05$ معنادار تلقی می‌شود (عباسی و ملکانی، ۱۳۹۸). همچنین فرض صفر در این آزمون زمانی است که نقطه تحول معنی‌داری در سری زمانی وجود نداشته باشد (قدوسی و همکاران، ۱۳۹۳).

محاسبه میزان تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر میزان رواناب

پس از تأیید وجود روند در سری زمانی و تعیین نقطه تغییر با استفاده از روش پتیت، سری زمانی دبی‌های مشاهداتی به بازه زمانی پایه^۱ و بازه زمانی ارزیابی^۲ تقسیم می‌شود. میزان کل تغییرات در میانگین سالانه رواناب با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود (عباسی و ملکانی، ۱۳۹۸):

$$\Delta Q_{Total} = Q_{Obs-baseline} - Q_{Obs-evaluation} \quad (12)$$

که در آن ΔQ_{Total} ، میزان کل تغییرات میانگین سالانه رواناب در بازه زمانی ارزیابی نسبت به بازه زمانی پایه در سری زمانی مشاهداتی رواناب؛ $Q_{Obs-baseline}$ ، میانگین سالانه رواناب در بازه زمانی پایه؛ $Q_{Obs-evaluation}$ ، میانگین سالانه رواناب در بازه زمانی ارزیابی در سری زمانی مشاهداتی رواناب است.

با توجه به اینکه میزان کل تغییرات میانگین سالانه رواناب ناشی از تغییر در شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است، چنین نتیجه می‌شود که:

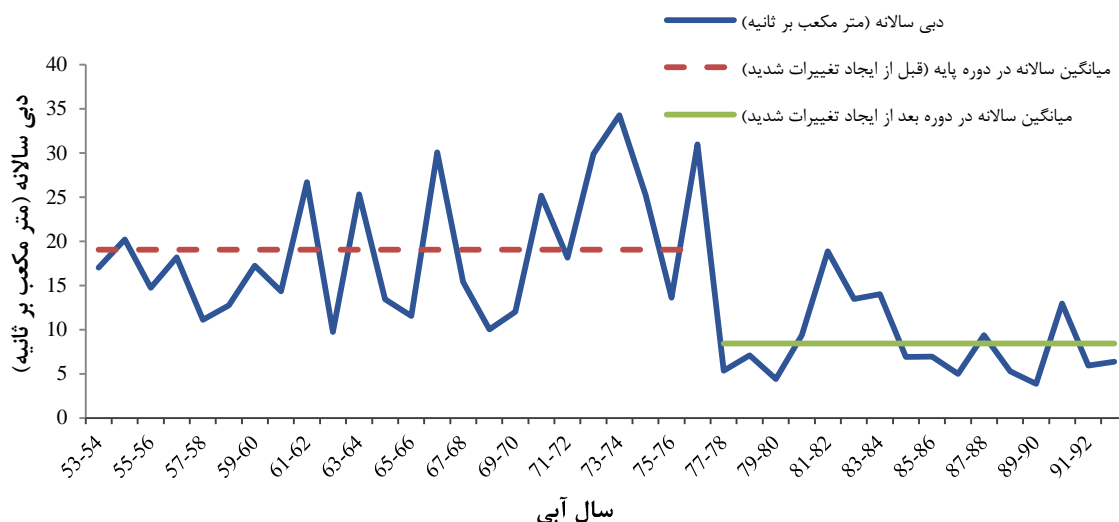
$$\Delta Q_{Total} = \Delta Q_h + \Delta Q_c \quad (9)$$

$$\Delta Q_c = Q_{Sim-baseline} - Q_{Sim-evaluation} \quad (10)$$

که در آن: ΔQ_c ، تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از تغییر در شرایط اقلیمی؛ ΔQ_h ، تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی؛ $Q_{Sim-baseline}$ ، میانگین سالانه رواناب در بازه زمانی پایه در سری زمانی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT؛ و $Q_{Sim-evaluation}$ ، میانگین سالانه رواناب در بازه زمانی ارزیابی در سری زمانی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT است.

محاسبه تغییرات صورت‌گرفته در میزان رواناب سالانه شامل مراحل زیر است:

1- Baseline
2- Evaluation



شکل ۴- تغییرات دبی سالانه و میانگین دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری یساول در بازه زمانی پایه و ارزیابی

پارامترهای حساس مشخص شد. جدول ۲ فهرستی از مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل SWAT را نشان می‌دهد. شماره منحنی رواناب (CN2) و زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز) (GW_DELAY) از حساس‌ترین پارامترهای مؤثر بر رواناب هستند. پس از تعیین پارامترهای حساس، از الگوریتم SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWATCUP برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل در جدول ۳ آورده شده است. بررسی نتایج جدول نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی دارای عملکرد خیلی خوب و در مرحله صحت‌سنجی عملکرد خوبی داشته است.

تعیین میزان اثر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری یساول

پس از واسنجی و صحت‌سنجی برای دوره زمانی قبل از تغییرات (۱۹۹۳-۱۹۸۷)، نتایج شبیه‌سازی رواناب حوضه در دوره ارزیابی (۲۰۱۰-۱۹۹۸) استخراج شد. شکل ۵ سری زمانی پیش‌بینی رواناب توسط مدل SWAT را در بازه زمانی ارزیابی نشان می‌دهد؛ همان‌طور که از شکل مشخص است، بین دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده اختلاف زیادی وجود دارد و این اختلاف در طی سال‌ها افزایش می‌یابد به طوری که در سال‌های انتهایی به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در دوره زمانی پایه

در این تحقیق، پس از تعیین نقطه تغییر، لازم است تا مدل هیدرولوژیکی SWAT برای دوره قبل از ایجاد تغییر واسنجی و صحت‌سنجی شود. با توجه به اینکه نقطه تغییر در ایستگاه هیدرومتری یساول در سال ۱۹۹۷ قرار دارد، لازم است مدل‌سازی مربوط به قبل از سال ۱۹۹۷ باشد. با توجه به آمار مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی، باران‌سنجی و تبخیرسنجی موجود در منطقه، مدل‌سازی از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۰ انجام گرفت. به دلیل نیاز به داده‌های قبل از سال ۱۹۹۷، امکان استفاده از بیشتر ایستگاه‌ها وجود نداشت. در بین ایستگاه‌های منتخب که دارای داده ثبت‌شده قبل از سال ۱۹۹۷ بودند نیز بعضی ایستگاه‌ها دارای کسر آمار در سال‌های اخیر بودند؛ براین‌اساس طول دوره آماری تا سال ۲۰۱۰ انتخاب شد تا امکان شبیه‌سازی وجود داشته باشد.

پس از ورود اطلاعات مربوط به حوضه در مدل SWAT نسبت به اجرای مدل بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۰ اقدام شد. از سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۳ مربوط به قبل از نقطه تغییر است. براین‌اساس از سال آماری ۱۹۸۷ به‌عنوان Warmup و از ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۱ برای واسنجی و از آمار ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ برای تأیید مدل استفاده شد (شکل ۵).

برای واسنجی مدل، لازم است تا مقادیر پارامترهای مربوط به حوضه با استفاده از الگوریتم SUFI-2 تعیین شود. از آنجایی که تعداد این پارامترها زیاد است، قبل از واسنجی، تحلیل حساسیت مدل نسبت پارامترها بررسی و

جدول ۲- پارامترهای مؤثر در تولید رواناب براساس آزمون حساسیت

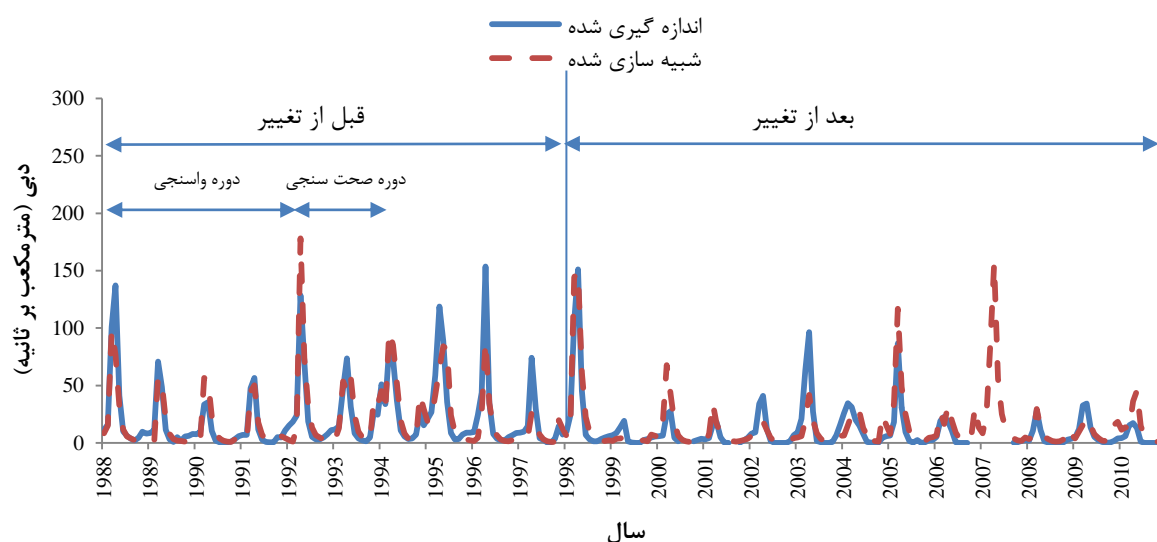
توضیحات پارامترها	دامنه پارامترها		پارامتر
	بیشینه	کمینه	
شماره منحنی	۰/۰۶	-۰/۲۵	r_CN2.mgt
زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی (روز)	۵۰۰	۱	v_GW_DELAY.gw
نرخ تغییرت بارش با ارتفاع در هر زیرحوضه	۵۰۰	-۵۰۰	v_PLAPS.sub
دمای ذوب توده برف	۵	-۵	v_SMTMP.bsn
نرخ تغییرت دما با ارتفاع در هر زیرحوضه	۱۰	-۱۰	v_TLAPS.sub
ضریب تخلیه آب زیرزمینی	۰/۹۹	۰/۰۴	v_ALPHA_BF.gw

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری یساول

صحت‌سنجی			واسنجی			ایستگاه هیدرومتری
RSR	PBIAS	NS	RSR	PBIAS	NS	
۰/۵۱	-۱۱/۷	۰/۷۴	۰/۴	۸/۸	۰/۸	یساول

جدول ۴- تعیین تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روی کاهش دبی رودخانه در ایستگاه یساول

فعالیت‌های انسانی	تغییرات اقلیمی	کل تغییرات	متوسط رواناب سالانه		بازه زمانی پایه
			مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	
-	-	-	۱۸/۸۱	۱۸/۸۷	بازه زمانی پایه
24%	$\frac{18.87 - 12.73}{8.09} = 76\%$	$18.87 - 10.78 = 8.09$	۱۲/۷۳	۱۰/۷۸	بازه زمانی ارزیابی



شکل ۵- دبی ماهانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رودخانه قزل‌اوزن در ایستگاه یساول

اندازه‌گیری شده است درحالی‌که مقدار متناظر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT ۱۲/۷۳ مترمکعب بر ثانیه است. همچنین مقدار کل تغییرات متوسط رواناب سالانه (ΔQ_{Total}) ۸/۰۹ مترمکعب بر ثانیه است. مقدار تغییرات مربوط به شرایط اقلیمی (ΔQ_c) ۶/۱۴ مترمکعب

جدول ۴ متوسط رواناب سالانه اندازه‌گیری شده (مشاهداتی) و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT را در دو بازه زمانی پایه (قبل از تغییرات) و ارزیابی (بعد از تغییرات) نشان می‌دهد. براساس جدول ۴ مقدار متوسط رواناب سالانه مشاهداتی در دوره ارزیابی ۱۰/۷۸ مترمکعب بر ثانیه

لازم برای انطباق با تغییرات آب‌وهوایی و ایجاد دستورالعمل‌هایی برای فعالیتهای انسانی به منظور دسترسی پایدار به منابع آب را بیان می‌کند.

منابع

۱. پورمحمدی س. دستورانی م. ت. مساح بوانی ع. گودرزی م. جعفری ه. و رحیمیان م. ۱۳۹۶. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن (مطالعه موردی: حوزه آبریز تویسرکان همدان). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۱(۳۷): ۱-۱۲.
۲. حیدری ح. ۱۳۹۵. تحلیل روند تغییرات بارش برف و باران در ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان غربی. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۷(۲۶): ۹۲-۱۱۰.
۳. فرجی م. ۱۴۰۰. بررسی میزان اثر تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی در میزان رواناب و رسوب حوضه مردق‌چای با استفاده از مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز.
۴. قدوسی م. مرید س. و دلاور م. ۱۳۹۳. مقایسه روش‌های روندزدایی در سری‌های زمانی دما و بارش. هواشناسی کشاورزی. ۱۱(۲): ۳۲-۴۵.
۵. عباسی ح. ملکانی ل. ۱۳۹۸. مدل‌سازی رواناب و برآورد میزان تغییرات رواناب در اثر عوامل اقلیمی و انسانی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۲): ۴۷۵-۴۸۵.
۶. موحدی ر. ایزدی ن. وحدت ادب ر. ۱۳۹۶. بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری آبیاری تحت فشار بین کشاورزان شهرستان اسدآباد. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱(۲): ۲۸۷-۳۰۰.
7. Arnold J. G. R. Srinivasan R. S. Muttiah and Williams J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part 1: model development. J Am Water Resour Assoc (JAWRA). 34: 73-89.
8. Abbaspour K. C. 2012. SWAT-CUP-2012. SWAT Calibration and Uncertainty program -A User Manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf.
9. Bhatta B. Shrestha S. Shrestha P.K. Talchabhadel R. 2019. Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of

بر ثانیه محاسبه شده است. کاهش متوسط رواناب سالانه در دوره آریزایی، ۱/۹۵ مترمکعب بر ثانیه است که ناشی از تأثیر عوامل انسانی است. بنابراین همانطور که در جدول مذکور محاسبه شده است تغییرات اقلیمی باعث کاهش متوسط رواناب سالانه ۸/۰۹ مترمکعب بر ثانیه در هر سال شده است که در حدود ۷۶ درصد از کاهش کل جریان است. براین اساس ۲۴ درصد از کاهش جریان رودخانه قزل‌اوزن در ایستگاه یساول ناشی از فعالیتهای انسانی است. می‌توان نتیجه گرفت که در حوضه بالادست ایستگاه یساول تغییرات اقلیمی نسبت به فعالیتهای بشری سهم بیشتری در کاهش جریان رودخانه در بازه زمانی آریزایی داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر در بیشتر مناطق جهان، میزان رواناب به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. فعالیتهای بشری و تغییرات آب‌وهوایی دو عامل اصلی در تغییر میزان رواناب هستند. براین اساس، تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر و کمی‌کردن تأثیرات آن‌ها بر میزان رواناب دارای اهمیت زیادی است. در تحقیق حاضر، از روش من-کندال برای بررسی روند تغییرات سری زمانی رواناب رودخانه قزل‌اوزن در ایستگاه یساول استفاده شد. با استفاده از روش پتیت زمان وقوع نقطه تغییر (سال ۱۹۹۷) در سری زمانی سالانه رواناب مشخص شد. براین اساس طول دوره آماری به دو بازه زمانی پایه و بازه زمانی آریزایی تقسیم شد. شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT انجام شد. مدل هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از داده‌های مورد نیاز مدل برای بازه زمانی پایه واسنجی و صحت‌سنجی شد. بررسی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل در دوره زمانی پایه نشان داد که مدل SWAT عملکرد قابل‌قبولی در شبیه‌سازی جریان در حوضه رودخانه قزل‌اوزن در ایستگاه یساول دارد. همچنین نتایج مطالعه نشان داد تغییرات رواناب در کل دوره آریزایی، عمدتاً (۷۶ درصد) به تغییرات آب‌وهوایی نسبت داده می‌شود. براین اساس ۲۴ درصد از کاهش جریان رودخانه قزل‌اوزن در ایستگاه یساول ناشی از فعالیتهای انسانی است. می‌توان نتیجه گرفت در این حوضه تغییرات اقلیمی نسبت به فعالیتهای بشری سهم بیشتری در کاهش جریان رودخانه در بازه زمانی آریزایی داشته‌اند. به‌طور کلی، تحقیق حاضر ضرورت اتخاذ تدابیر

- the Himalayan River Basin. *Catena*. 181: Article 104082.
10. Darvini G. Memmola F. 2020. Assessment of the impact of climate variability and human activities on the runoff in five catchments of the Adriatic Coast of south-central Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31.
 11. Gashaw T. Tulu T. Argaw M. Worqlul A.W. 2018. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*. 619: 1394-408.
 12. Gosain A. K. Rao S. and Basuray D. 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science*. 90(3): 346-353.
 13. Moriasi D.N. Arnold J.G. Van Liew M.W. Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *T. ASAE*. 50: 885-900.
 14. Panda D. K. Mishra A. Jena S. James B. Kumar A. 2007. The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa, India, *Journal of hydrology*. 343: 140-153.
 15. 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.
 16. Shang X. Xiaohui J. Ruining J. and Chen W. 2019. Land Use and Climate Change Effects on Surface Runoff Variations in the Upper Heihe River Basin. *Water*. 11(2): 344.
 17. Wang H. and Chen L. Yu X. 2016. Distinguishing human and climate influences on streamflow changes in Luan River basin in China. *Catena*. 136: 182-188.
 18. Zhang Q. Liu J. Singh V. P. Gu X. and Chen X. 2016. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China. *Hydrological Processes*. 30(14): 2562-2576.