



Quantifying the Impact of Climate Change and Human Activities on Runoff Reduction with Sensitivity Analysis on Time Series Breakpoints

H. Ghasemi¹ and N. Mahjouri^{2*}

Abstract

In this paper, the Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff Reduction (ICHRR) are quantified using three approaches based on regression, climate elasticity and water balance models. These approaches are based on finding the location of the occurring an abrupt statistical change (breakpoint) in runoff time series. In this paper, the effect of locating the breakpoint(s) on the mentioned quantified impacts is studied through sensitivity analysis. The performance of the mentioned three approaches is evaluated by applying them on Zayandehrud river discharge which is subjected to significant human induced changes such as dramatic increase of the area of agricultural lands and inter-basin water transfer projects. The water balance model is calibrated and verified for the period of 1976 to 1984. The sensitivity analysis shows that among several years with potential of the occurring a breakpoint, considering the year of 2006 as the breakpoint, the estimated values of ICHRR are more realistic. These results are in accordance with the observations including the time series of climate variables, agricultural land areas and inter-basin water transfer discharge. Also, if the impact of inter-basin water transfer on increasing runoff is removed from the runoff time series, the impact of climate change on runoff reduction based on all the three approaches is mostly close to zero.

Keywords: Climate Change; Change Point in Time Series; Runoff Reduction; Water Balance Model; Inter-Basin Water Transfer.

Received: January 1, 2021

Accepted: March 15, 2021

تعیین سهم اثرات تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر کاهش رواناب با تحلیل حساسیت نسبت به محل نقاط شکست آماری در سری زمانی

حمید قاسمی^۱ و نجمه مهجوری مجد^{۲*}

چکیده

در این مقاله، تعیین سهم اثر اقلیم و اثر مستقیم عوامل انسانی بر کاهش رواناب بر اساس سه رویکرد رگرسیون خطی، کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو و رویکرد تثبیت-تغییر مبتنی بر شبیه‌سازی ماهانه بیلان آب انجام می‌شود. این رویکردها عمدتاً مبتنی بر تعیین نقطه شکست آماری در سری زمانی جریان هستند. نقطه شکست آماری نشان‌دهنده زمانی است که از آن زمان به بعد، تغییر معنی‌داری در ویژگی‌های آماری دبی جریان رخ می‌دهد. در این مقاله، با تحلیل حساسیت نتایج نسبت به محل نقاط شکست در سری زمانی رواناب، تأثیر شناسایی این نقاط بر تعیین مقادیر سهم‌های یاد شده بررسی می‌شود. کارایی رویکردهای بیان شده در حوضه بالادست سد زاینده‌رود که دستخوش تغییرات انسان‌ساخت قابل توجهی مانند افزایش بی‌رویه سطح زیر کشت و انتقال آب بین حوضه‌ای بوده است، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در رویکرد تثبیت-تغییر، مدل بیلان آب برای دوره زمانی ۱۹۸۴-۱۹۷۶ واسنجی و صحت‌سنجی می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت نسبت به محل نقاط شکست و بررسی سری زمانی تغییرات سطح زیر کشت به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و سری زمانی دبی انتقال آب بین حوضه‌ای نشان می‌دهد که در نظر گرفتن سال ۲۰۰۶ به عنوان سال رخداد نقطه شکست در سری زمانی رواناب، تخمین‌های واقع‌بینانه‌تری از مقادیر سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب (به ترتیب، بیش از ۹۰ درصد و کمتر از ۱۰ درصد) به دست می‌دهد. همچنین، طبق نتایج، 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 رواناب را ناچیز تخمین می‌زنند.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، نقطه شکست در سری زمانی، کاهش رواناب، مدل بیلان آب، انتقال آب بین حوضه‌ای.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۲۵

1- M. Sc., Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: mahjouri@kntu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

با توجه به تغییرات آماری معنی‌دار در سری زمانی متغیرهای آب و هوایی در طی دهه‌های گذشته، ویژگی‌های آماری متغیرهای هیدرولوژیکی و به ویژه دبی رواناب نیز غالباً دچار تغییر و ناپایداری شده‌اند. از طرفی، توسعه بی‌رویه کشاورزی، صنعتی و شهری و به تبع آن، افزایش بهره‌برداری از منابع آب، تأثیرات مستقیم و غیرمستقیمی بر تغییرات دبی رواناب گذاشته است. تعیین سهم هر یک از این عوامل بر کاهش رواناب می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آب حوضه داشته باشد. یکی از رویکردهای برآورد سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر دبی رواناب، استفاده از رگرسیون خطی است. Zhao et al. (2014) به منظور تعیین سهم اثرات هر یک از عوامل تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسان بر کاهش رواناب در یکی از حوضه‌های آبریز چین، از رویکرد رگرسیون خطی و رویکرد مبتنی بر فرضیه بودیکو^۱ استفاده کردند. نتایج به دست آمده این مطالعه نشان داد که تأثیر مستقیم عوامل انسانی نسبت به تأثیر تغییر اقلیم غالب است. در این تحقیق، در رویکرد رگرسیونی، تبخیر- تعرق پتانسیل دخالت داده نشد و رابطه رگرسیونی تنها بین رواناب و بارش در نظر گرفته شد. Wang et al. (2012) بر اساس داده‌های مشاهداتی سالانه رواناب، سهم اثرات تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر تغییرات رواناب در رودخانه زرد^۲ در چین را برآورد کردند. روش‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل ناهنجاری جمعی^۳، رگرسیون خطی و روش نسبت تغییرات شیب مقادیر جمعی (SCRCQ) بوده است. علاوه بر این، در این مقاله بیان شده است که روش جدید SCRCQ می‌تواند در مناطق خشک و نیمه خشک در ارزیابی کمی تغییرات رواناب ناشی از عوامل مختلف استفاده شود. Legesse et al. (2010) به منظور تفکیک اثرات عوامل اقلیمی و انسانی بر رواناب از مدل‌سازی هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه استفاده کردند. در این مقاله، به منظور تفکیک اثرات عوامل اقلیمی و انسانی از سیستم مدل توزیعی بارش- رواناب اصلاح شده^۴ (PRMS) استفاده شد. همچنین، عملکرد مدل با استفاده از نمودارهای هیدروگراف رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مقیاس روزانه و ماهانه و بررسی ضرایب همبستگی ارزیابی شد. نتایج این مقاله نشان داد که حوضه مطالعاتی به افزایش بارش بیشتر از کاهش آن حساس است.

(2013) Van Loon and Van Lanen مدلی را به منظور جداسازی اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر سامانه‌های هیدرولوژیکی پیشنهاد دادند. مبنای مدل آنها شبیه‌سازی حالتی بود که اثر عوامل انسانی در نظر گرفته نشود، که به عنوان شرایط طبیعی شده از آن نام برده شده است. در این مقاله، سری زمانی به دست آمده از متغیرهای حالت طبیعی شده با سری زمانی مشاهداتی مقایسه و سپس، ناهنجاری‌ها بر

اساس هر دو سری زمانی به دست آمده شناسایی شد. Jiang et al. (2015) یک چارچوب دو مرحله‌ای بر اساس چهار معادله تک‌پارامتری مبتنی بر فرضیه بودیکو به منظور برآورد اثرات تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب با استفاده از دو روش تجزیه و حساسیت^۵ ارائه کردند. نتایج حاصل از هر دو روش تجزیه و حساسیت در این مقاله، تغییرات اقلیم را به عنوان عامل محرکه اصلی کاهش رواناب در رودخانه مورد مطالعه نشان داد. Gao et al. (2016) ابتدا با استفاده از آزمون پتیت^۶، بازه زمانی ۱۹۷۱-۱۹۹۶ را در سطح معنی‌داری ۵٪ به عنوان دوره دارای نقاط شکست در کل دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۹ تعیین کردند. سپس، با به کارگیری روش کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو سهم اثر تغییر اقلیم و اثرات مستقیم عوامل انسانی را بر رواناب محاسبه نمودند. Yan et al. (2018) سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی را بر رواناب ورودی به مخزن سد میان^۷ در پکن با شبیه‌سازی و بررسی تغییرات جریان ورودی به مخزن توسط مدل SWAT^۸ تعیین کردند. در این تحقیق، بر پایه یک الگوریتم تقسیم‌بندی اکتشافی^۹، دوره مورد مطالعه انتخاب شده (۱۹۶۹ تا ۲۰۱۲) به سه زیردوره شامل دوره مرجع (۱۹۷۹-۱۹۶۹)، دوره تأثیر اول (۱۹۸۰-۱۹۹۸) و دوره تأثیر دوم (۲۰۱۲-۱۹۹۹) تقسیم شد. نتایج نشان داد که سهم اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسان بر کاهش جریان در دوره‌های مختلف، متفاوت است. Farsi and Mahjouri (2019) به منظور برآورد سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر رواناب، دو مدل بیلان آب ماهانه جزیم (Jazim, 2006) - راثو و الوقدانی (Rao and McCabe, 1995) و جزیم- مک کیب و مارکستروم (McCabe and Markstrom, 2007) را با استفاده از سری‌های زمانی دوره‌های مرجع و اخیر آورد سالانه به سد زاینده‌رود واسنجی و صحت‌سنجی کردند. در این مقاله، در محاسبه سهم اثرات عوامل یاد شده بر کاهش رواناب، اثر انتقال آب بین حوضه‌ای و افزایش اراضی کشاورزی به طور جداگانه بررسی نشد (Iran Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture, 2016). هدف این مقاله برآورد سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب بر اساس سه رویکرد رگرسیون خطی، کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو و تثبیت- تغییر مبتنی بر مدل بیلان آب جزیم- راثو و الوقدانی است. در این مقاله، با تحلیل حساسیت مقادیر سهم اثرات عوامل یاد شده نسبت به محل نقاط شکست در سری زمانی رواناب، تأثیر شناسایی این نقاط در برآورد سهم اثرات هر یک از عوامل یاد شده بر کاهش رواناب بررسی می‌شود. همچنین، سهم اثرات مستقیم عوامل انسانی بر کاهش رواناب با در نظر گرفتن افزایش سطوح زیر کشت و انتقال آب بین حوضه‌ای به صورت جداگانه برآورد می‌شود. گام‌های روش پیشنهادی در روندنمای شکل ۱ نشان داده شده است.

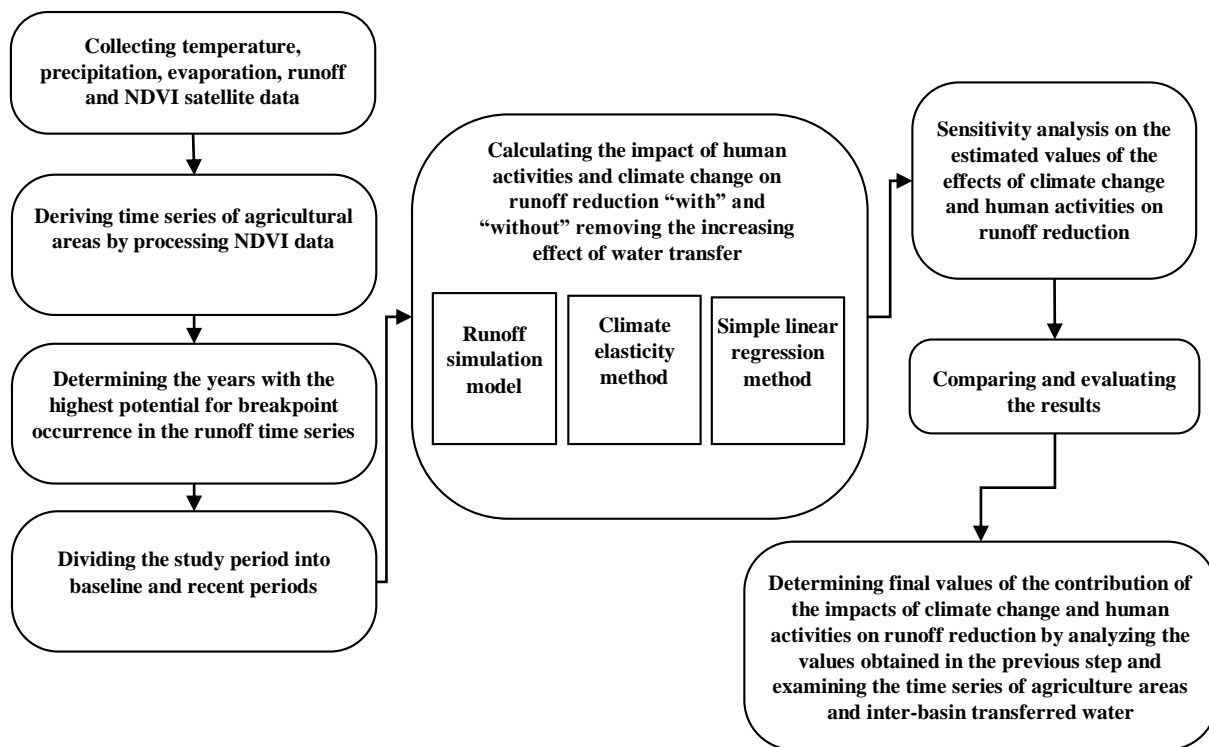


Fig. 1- A flowchart of the proposed methodology

شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی

و جنوب غرب به حوضه آبریز کارون بزرگ محدود می‌شود. این حوضه بین مختصات جغرافیایی ۵۰-۰۲ و ۵۳-۲۲ طول شرقی و ۳۱-۱۲ تا ۴۲-۳۳ عرض شمالی قرار گرفته است.

در این مقاله، به منظور انجام تحلیل‌های مورد نظر از داده‌ها و اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب ایران استفاده شده است. برای انتخاب ایستگاه‌های باران‌سنجی، تبخیرسنجی و هیدرومتری، وجود سابقه آماری مناسب، حداقل خلأ آماری در داده‌ها و موقعیت جغرافیایی ایستگاه ملاک انتخاب قرار گرفته است. سری زمانی رواناب سالانه و بارش سالانه در ایستگاه قلعه‌شاهرخ در بالادست سد زاینده‌رود، با مختصات جغرافیایی ۲۹-۲۷-۵۰ طول شرقی و ۲۹-۳۹-۳۲ عرض شمالی، به منظور بررسی و ارزیابی کارایی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. سری زمانی رواناب سالانه و بارش سالانه در این ایستگاه در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. همچنین، سری زمانی دبی سالانه انتقال آب تونل‌های کوهرنگ ۱ و ۲ به حوضه آبریز مطالعاتی در شکل ۵ ارائه شده است.

۲- محدوده مطالعاتی

به منظور مطالعه و بررسی اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب سطحی در حوضه آبریز بالادست سد زاینده‌رود (چلگرد-قلعه‌شاهرخ) اطلاعات مهم هواشناسی و هیدرولوژیکی در این حوضه جمع‌آوری و در موارد لازم، تکمیل و اصلاح شد. ایستگاه هیدرومتری بالادست سد زاینده‌رود به عنوان یک نقطه کنترل در حوضه آبریز سد زاینده‌رود، در برآورد سهم اثرات مستقیم عوامل انسانی و تغییر اقلیم بر کاهش رواناب انتخاب شده است. این منطقه خود زیرحوضه‌ای از حوضه آبریز تالاب گاوخونی است. موقعیت حوضه آبریز گاوخونی و زیرحوضه (چلگرد-قلعه‌شاهرخ) در شکل ۲ نشان داده شده است. حوضه آبریز تالاب گاوخونی با مساحت ۴۱۴۹۱ کیلومترمربع در تقسیم‌بندی کلی حوضه‌های آبریز ایران جزء حوضه آبریز فلات مرکزی می‌باشد. این حوضه آبریز از شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از شرق به حوضه‌های آبریز دق سرخ و کویر سیاه‌کوه، از جنوب به حوضه‌های آبریز کویر ابرقو- سیرجان و مهارلو- بختگان و از غرب

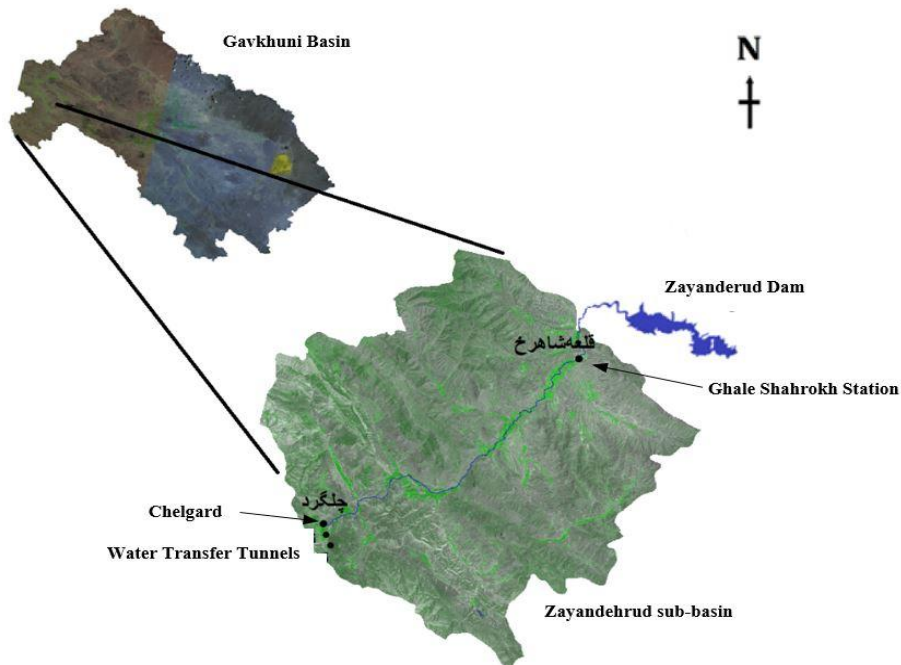


Fig. 2- A schematic of Gavkhuni Basin and Zayandehrud Sub-basin
 شکل ۲- موقعیت محدوده مطالعاتی حوضه‌های آبریز گاوخونی و زیرحوضه سد زاینده‌رود

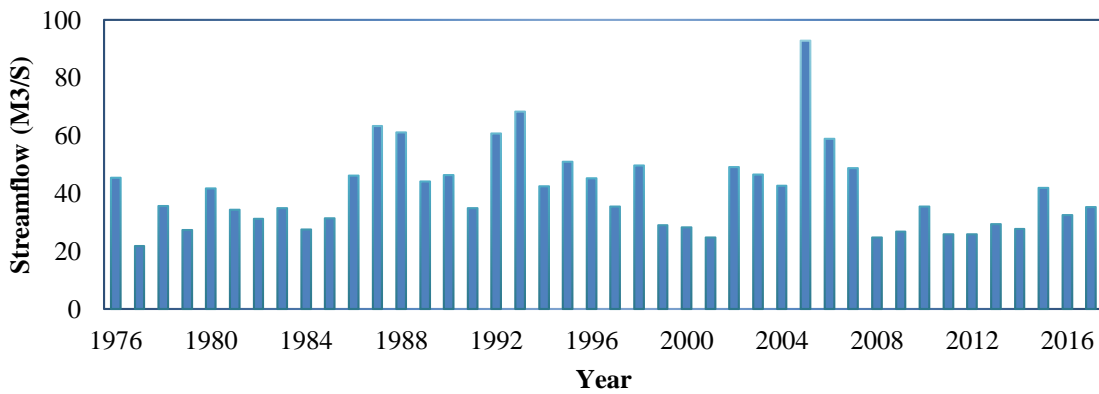


Fig. 3- Time series of annual runoff in Ghale Shahrokh station (1976-2017)
 شکل ۳- سری زمانی رواناب سالانه ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ (۱۳۵۵-۱۳۹۶)

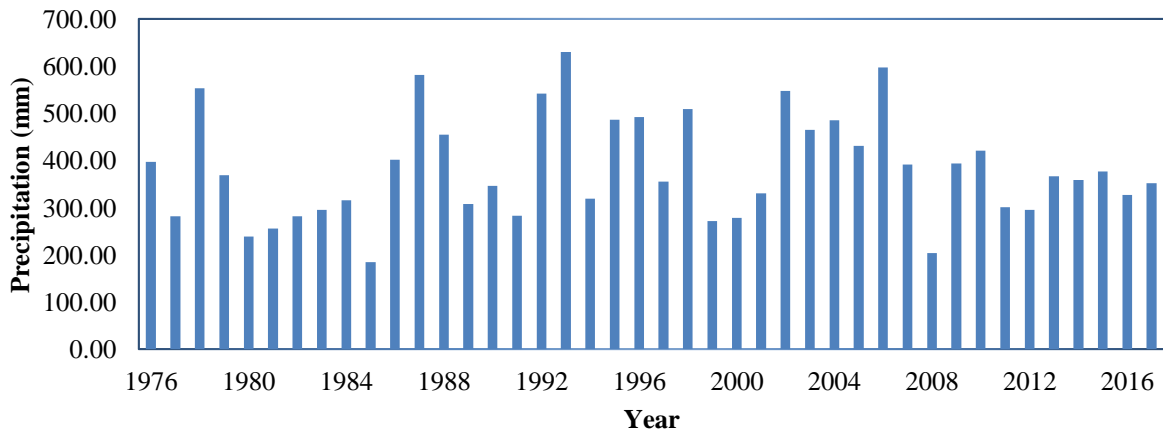


Fig. 4- Time series of annual precipitation in Ghale Shahrokh station (1976-2017)
 شکل ۴- سری زمانی بارش سالانه ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ (۱۳۵۵-۱۳۹۶)

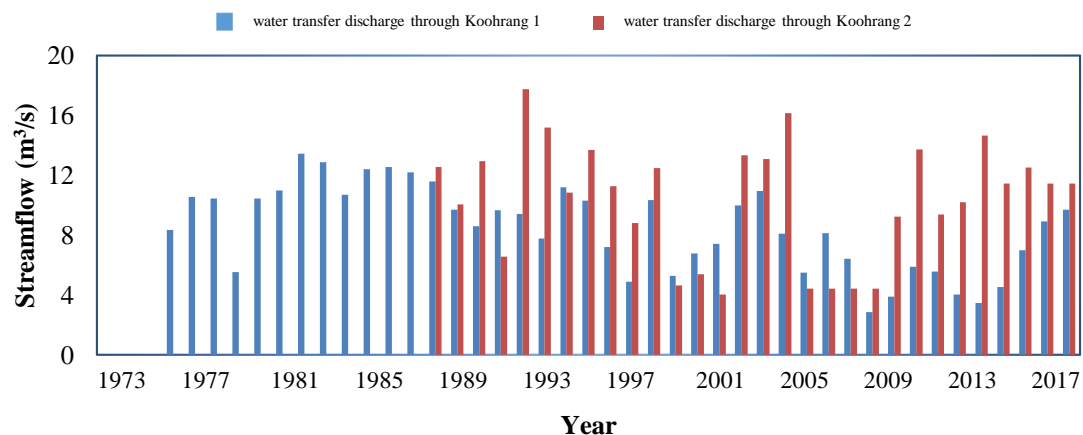


Fig. 5 Time series of water transfer discharge using the Koohrang 1 and 2 tunnels (1976-2017)
 شکل ۵- سری زمانی انتقال آب تونل اول و دوم کوهرنگ (۱۳۹۶-۱۳۵۵)

شناسایی شده باشد. از آنجا که یکی از اهداف این مقاله بررسی تأثیر تغییر محل رخداد شکست در سری آماری رواناب بر سهم هر یک از عوامل یاد شده در کاهش رواناب است، تحلیل‌ها به ازای تک‌تک نقاط شکست پتانسیل شناسایی شده در گام قبل انجام می‌شوند.

پس از تعیین نقطه‌ی شکست آماری در سری زمانی رواناب، دوره مورد مطالعه به دوره‌های مرجع و اخیر تقسیم می‌شود. با در نظر گرفتن هر یک از محل‌های پتانسیل رخداد شکست آماری در سری زمانی رواناب، قبل از نقطه شکست به عنوان دوره مرجع و بعد از آن به عنوان دوره اخیر در نظر گرفته می‌شود. سپس، تفاوت میانگین رواناب سالانه بین سری‌های زمانی دوره‌های مرجع و اخیر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta \bar{Q}_T = \bar{Q}_{\text{variation}} - \bar{Q}_{\text{baseline}}$$

دوره مرجع Baseline: (۱)
 دوره اخیر Variation:

در این رابطه، $\Delta \bar{Q}_T$ ، تغییرات در میانگین رواناب سالانه، $\bar{Q}_{\text{baseline}}$ میانگین رواناب سالانه در دوره مرجع و $\bar{Q}_{\text{variation}}$ میانگین رواناب سالانه در دوره اخیر می‌باشد. در یک حوضه آبریز، تغییرات در میانگین رواناب سالانه را در اثر عوامل اقلیمی و عوامل انسانی می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Delta \bar{Q}_T = \Delta \bar{Q}_{\text{climate}} + \Delta \bar{Q}_{\text{human}} \quad (۲)$$

$$\mu_{\text{climate}} = \frac{\Delta \bar{Q}_{\text{climate}}}{\Delta \bar{Q}_{\text{total}}} * 100\% \quad (۳)$$

$$\mu_{\text{human}} = \frac{\Delta \bar{Q}_{\text{human}}}{\Delta \bar{Q}_{\text{total}}} * 100\% \quad (۴)$$

در این روابط، $\Delta \bar{Q}_{\text{climate}}$ تغییر در میانگین رواناب سالانه بر اثر تغییر اقلیم و $\Delta \bar{Q}_{\text{human}}$ تغییر در میانگین رواناب سالانه بر اثر عوامل انسانی می‌باشد. μ_{climate} و μ_{human} به ترتیب، درصد سهم اثرات عوامل

۳- شناسایی نقاط شکست پتانسیل در سری زمانی رواناب

پس از جمع‌آوری اطلاعات و در صورت نیاز، بازسازی داده‌های مفقوده، لازم است نقاط شکست پتانسیل در سری زمانی رواناب انتخاب شوند. از نظر آماری، نقطه شکست در یک سری زمانی از یک متغیر تصادفی، مانند دبی رواناب، نقطه‌ای (زمانی) است که از آن نقطه (زمان) به بعد، تغییر قابل توجه در ویژگی‌های آماری یا پارامترهای توزیع آن سری زمانی رخ داده است. در این مقاله، نقاط شکست پتانسیل در سری زمانی رواناب با استفاده از تحلیل‌های آماری و بررسی سری زمانی مشاهداتی آورد سالانه برآورد می‌شوند. همچنین، به منظور صحت‌سنجی و بررسی دقیق‌تر نقاط شکست تعیین شده در سری زمانی رواناب، سری زمانی سطوح زیر کشت با کمک تصاویر ماهواره‌ای استخراج و بررسی می‌شود.

۴- محاسبه سهم اثرات تغییر اقلیم و تغییرات انسان‌ساخت بر کاهش رواناب با در نظر گرفتن نقاط شکست پتانسیل

از آنجا که بخش زیادی از منطقه مطالعاتی کوهستانی است، اندرکنش قابل توجهی بین منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه وجود ندارد. بنابراین، در تحلیل‌ها تنها تغییرات رواناب سطحی مد نظر قرار گرفته است. پس از شناسایی نقاط شکست پتانسیل، مقدار سهم اثرات تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر کاهش رواناب با استفاده از سه رویکرد رگرسیون خطی، کشتانی اقلیمی و تثبیت- تغییر برآورد می‌شود. در محاسبات سهم اثرات عوامل یاد شده بر کاهش رواناب با استفاده از سه رویکرد مورد نظر لازم است نقطه شکست در سری زمانی رواناب

$$\bar{Q} = \bar{P} + \bar{E}_a \quad (9)$$

\bar{Q} ، \bar{P} و \bar{E}_a در رابطه‌ی بالا، نشان‌دهنده میانگین بلندمدت رواناب، بارش و تبخیر- تعرق واقعی است. طبق فرضیه بودیکو، نسبت تبخیر- تعرق واقعی (E_a) به بارش تابعی از درجه خشکی ϕ است (Zheng et al., 2009):

$$E_a = P * F(\phi) \quad (10)$$

درجه یا شاخص خشکی یک مقیاس عددی برای تعیین میزان خشکی یک منطقه است. این شاخص به صورت نسبت تبخیر- تعرق پتانسیل به بارش (مطابق رابطه زیر) شناخته می‌شود (Budyko, 1963):

$$\phi = \frac{E}{P} \quad (11)$$

بدیهی است هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، منطقه از لحاظ اقلیمی، خشک‌تر تلقی می‌شود. برای $F(\phi)$ می‌توان از تابع مبتنی بر فرضیه بودیکو که توسط بودیکو ارائه شده است، استفاده کرد:

$$F(\phi) = [\phi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\phi}\right) (1 - e^{-\phi})]^{1/2} \quad (12)$$

اکنون با استفاده از روابط زیر، مقادیر کشسانی بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_p = 1 + \frac{\phi F(\phi)}{1 - F(\phi)} \quad (13)$$

$$\varepsilon_p + \varepsilon_E = 1 \quad (14)$$

به این ترتیب، با انتخاب نوع تابع $F(\phi)$ و داشتن مقدار شاخص خشکی، می‌توان مقادیر کشسانی اقلیمی (کشسانی بارش و کشسانی تبخیر- تعرق پتانسیل) را به دست آورد و با داشتن ضرایب کشسانی متغیرهای اقلیمی، مقادیر ΔQ_v و ΔQ_c را محاسبه کرد.

۳-۴- رویکرد تثبیت- تغییر مبتنی بر شبیه‌سازی جریان

در این مقاله، به منظور محاسبه سهم اثرات عوامل انسانی بر کاهش دبی جریان، در دوره زمانی پس از نقطه شکست در سری زمانی رواناب، مدل بیلان جزیم- راثو و الوقدانی واسنجی و صحت‌سنجی می‌شود. در این مدل، به منظور بهبود عملکرد مدل بیلان جزیم (Jazim, 2006) در مناطق خشک و نیمه خشک، مازول برف مدل بیلان آب راثو و الوقدانی (Rao & AlWagdany, 1994) با مدل بیلان آب جزیم تلفیق و شبیه‌سازی رواناب قبل و پس از نقطه شکست انجام شده است (Farsi and Mahjouri, 2019). طبق رابطه زیر در روش تثبیت- تغییر، سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسان بر کاهش رواناب محاسبه می‌شود:

$$CR_{(climate\ change)} = \frac{\bar{Q}(C_2, P_1) - \bar{Q}(C_1, P_1)}{\bar{Q}(C_2, P_2) - \bar{Q}(C_1, P_1)} * 100 \quad (15)$$

انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب می‌باشند. هدف این است که سهم اثرات تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر تغییرات آماری معنی‌دار در سری زمانی رواناب در دوره اخیر نسبت به دوره قبل از رخداد شکست (دوره مرجع) تعیین شود. در این مقاله، برای محاسبه $\Delta \bar{Q}_{human}$ و $\Delta \bar{Q}_{climate}$ ، سه رویکرد رگرسیون خطی، کشسانی اقلیمی، و تثبیت- تغییر (با کاربرد مدل بیلان) به کار می‌رود که جزییات آن‌ها در ادامه تشریح شده است.

۱-۴- رویکرد رگرسیون خطی

در این روش، ابتدا به رواناب و متغیر اقلیمی بارش در دوره مرجع یک تابع رگرسیون خطی برازش می‌شود. این معادله در واقع نشان‌دهنده اثر تغییرات متغیرهای اقلیمی بر رواناب در دوره مرجع است (Wu et al., 2017). با تعمیم این معادله رگرسیونی به دوره دوم (دوره اخیر)، مقدار رواناب تحت تأثیر تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره دوم محاسبه می‌شود:

$$Q_{baseline} = a * P_{baseline} + b \quad (5)$$

$$Q_{reconstruct} = a * P_{variation} + b \quad (6)$$

در این روابط، $Q_{baseline}$ ، $P_{baseline}$ ، $Q_{reconstruct}$ و $P_{variation}$ به ترتیب رواناب مربوط به دوره مرجع، بارش مربوط به دوره مرجع، رواناب بازسازی شده در دوره اخیر با استفاده از رابطه رگرسیونی به دست آمده در دوره مرجع و بارش مربوط به دوره اخیر می‌باشند. همچنین، a و b مقادیر ثابت معادله هستند. با کم کردن مقادیر رواناب به دست آمده در دوره دوم (اخیر) به وسیله معادله رگرسیون از مقادیر مشاهداتی رواناب در این دوره، سهم اثرات عوامل انسانی بر کاهش رواناب به دست می‌آید:

$$\Delta \bar{Q}_{human} = \bar{Q}_{variation} - \bar{Q}_{reconstruct} \quad (7)$$

$$\Delta \bar{Q}_{climate} = \Delta \bar{Q}_{total} - \Delta \bar{Q}_{human} \quad (8)$$

در این روابط، $\Delta \bar{Q}_{total}$ ، تغییر در میانگین رواناب سالانه و قابل محاسبه از رابطه (۱) است، $\bar{Q}_{reconstruct}$ میانگین رواناب سالانه بازسازی شده در دوره اخیر، $\bar{Q}_{variation}$ میانگین رواناب سالانه در دوره اخیر، $\Delta \bar{Q}_{climate}$ تغییر در میانگین رواناب سالانه بر اثر تغییر اقلیم و $\Delta \bar{Q}_{human}$ تغییر در میانگین رواناب سالانه بر اثر عوامل انسانی می‌باشد. در نهایت، به منظور محاسبه سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب از روابط (۳) و (۴) استفاده می‌شود.

۲-۴- رویکرد کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو

فرضیه بودیکو، بیلان آب را به صورت تابعی از مقدار آب و انرژی موجود بیان می‌کند. با فرض این که تغییرات بلند مدت در ذخیره آب حوضه ناچیز است، معادله بیلان آب به صورت زیر نوشته می‌شود:

می‌توان محدوده‌ای را شناسایی کرد که برای یک گیاه مورد نظر از حداکثر یا حداقل انعکاس برخوردار است. به منظور بررسی شاخص‌های گیاهی از ترکیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده می‌شود. در این مقاله، شاخص گیاهی $NDVI^{12}$ به منظور استخراج سری زمانی سطوح زیر کشت در محدوده مطالعاتی استفاده شده است. نمودار سری زمانی سطوح زیر کشت استخراج شده در شکل ۶ ارائه شده است. در این نمودار، روند افزایشی سطح زیر کشت در محدوده مطالعاتی به وضوح دیده می‌شود.

یکی از اهداف اصلی این مقاله، کمی‌سازی اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب در حوضه‌ای است که همزمان دستخوش تغییرات انسانی افزایشده و کاهنده رواناب می‌باشد. رخداد همزمان عوامل مختلف انسانی تأثیرگذار بر رواناب، تعیین سهم واقعی اثرات عوامل انسانی و تغییر اقلیم بر کاهش رواناب را با چالش رو به رو می‌کند. به گونه‌ای که در حوضه مورد نظر، یکی از عوامل انسانی کاهش جریان، افزایش بی‌رویه سطح زیر کشت می‌باشد، که منجر به افزایش تقاضای آب و کاهش رواناب می‌شود، و عامل انسانی دیگر، انتقال آب از حوضه‌ای دیگر به حوضه مورد نظر می‌باشد که مستقیماً باعث افزایش رواناب در حوضه مبدأ می‌شود. در عین حال، همین انتقال آب بین حوضه‌ای، منجر به تشویق کشاورزان برای افزایش سطوح زیر کشت و برداشت بیشتر آب و در نتیجه کاهش دبی رواناب شده است. این امر در نمودار تغییرات سطح زیر کشت و تغییرات دبی انتقال آب بین حوضه‌ای دیده می‌شود. به طوری که با انتقال آب توسط تونل کوهرنگ ۲، و همچنین، افزایش دبی انتقال آب از طریق این تونل، سطح زیر کشت افزایش می‌یابد.

به منظور تحلیل حساسیت سهم اثر عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب نسبت به محل نقاط شکست در سری زمانی رواناب، این

در استفاده از رابطه رویکرد تثبیت- تغییر به منظور تعیین اثر تغییر اقلیم بر کاهش رواناب در دوره اخیر نسبت به دوره مرجع، دبی رواناب در سه حالت شبیه‌سازی می‌شود. در حالت اول، دبی رودخانه با استفاده از شرایط اقلیمی و پارامترهای دوره مرجع (C_1, P_1) شبیه‌سازی می‌شود. در حالت دوم، دبی رودخانه بر اساس شرایط اقلیمی و پارامترهای دوره اخیر (C_2, P_2) شبیه‌سازی می‌شود و در حالت سوم، دبی بر اساس شرایط اقلیمی دوره اخیر و پارامترهای دوره مرجع (C_2, P_1) شبیه‌سازی می‌شود. درصد سهم اثرات مستقیم عوامل انسانی نیز با کم کردن درصد سهم اثر تغییر اقلیم بر کاهش رواناب از ۱۰۰ به دست می‌آید.

۵- نتایج

در این مقاله، بر اساس نتایج آزمون‌های آماری، سال ۲۰۰۶-۲۰۰۵ به عنوان سال دارای بیشترین پتانسیل رخداد نقطه شکست در سری زمانی رواناب ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری منتخب (ایستگاه قلعه‌شاهرخ) شناسایی شده است. با توجه به نتایج بررسی تغییرات پارامترهای تابع توزیع رواناب در ایستگاه مطالعاتی با میانگین بلندمدت ۴۵ ساله، در سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ تغییرات معنی‌داری در این پارامترها مشاهده شده است (Osmani, 2020). پس از انجام تحلیل‌های معنی‌داری بر تغییرات پارامترهای مختلف آماری، علاوه بر سال‌هایی که به آنها اشاره شد، سال‌های ۱۹۹۴ و ۲۰۰۲ نیز به عنوان سال‌هایی دارای پتانسیل رخداد تغییرات معنی‌دار در سری زمانی رواناب در ایستگاه قلعه‌شاهرخ در نظر گرفته شدند.

در این مقاله، با پردازش تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده، سری زمانی مساحت زمین‌های زیر کشت در منطقه مطالعاتی استخراج شده است (Farsi et al., 2020). در پردازش این تصاویر، با توجه به این که هر شیء طول موج انعکاسی خاصی دارد، با بررسی این طول موج‌ها

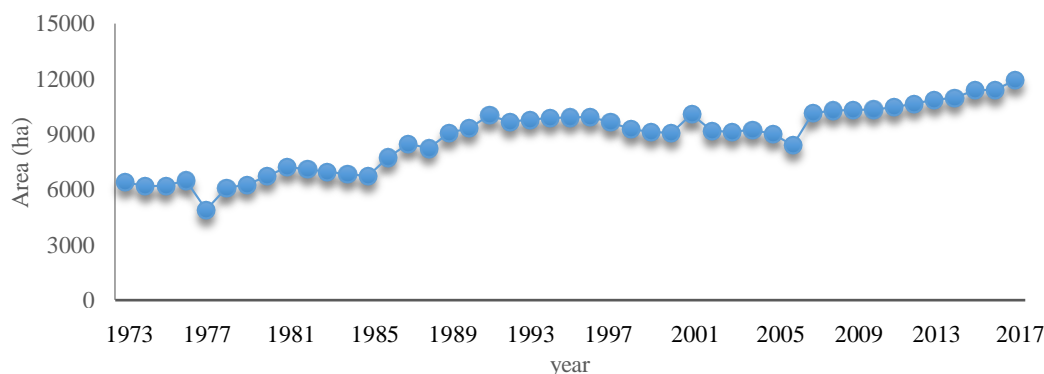


Fig. 6- Time series of the area of agricultural regions obtained from satellite images

شکل ۶- سری زمانی سطح زیر کشت در محدوده مطالعاتی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای

با توجه به جدول ۱، تنها در حالی که سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶ به عنوان سال شکست پتانسیل در نظر گرفته شود، تغییر اقلیم هم به عنوان عامل کاهش رواناب برآورد شده است که سهم تأثیر آن در حالت حذف اثر افزایشی دبی انتقال آب بین حوضه‌ای برابر با ۹ درصد و در حالتی که اثر دبی افزوده شده توسط انتقال آب بین حوضه‌ای نادیده گرفته شود، برابر با ۱۸ درصد برآورد می‌شود. بررسی سری‌های زمانی بارش و تبخیر مشاهداتی، نشان دهنده تأثیر مثبت ولی بسیار کم تغییر اقلیم در کاهش رواناب است. با توجه به مقادیر سهم اثرات عوامل اقلیمی و انسانی که با در نظر گرفتن نقاط شکست پتانسیل مختلف در سری آماری رواناب برآورد شده است، در کنار بررسی سری‌های زمانی مشاهداتی بارش و تبخیر و همچنین، سری زمانی سطح زیر کشت به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای، می‌توان نتیجه گرفت انتخاب سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶ به عنوان سال رخداد نقطه شکست در سری زمانی رواناب واقع‌بینانه‌تر است.

در این مقاله، در رویکرد کشسانی اقلیمی، از تابع $F(\phi)$ بر اساس فرضیه بودیکو استفاده شده است. گام اول، تعیین شاخص سالانه خشکی (ϕ) است. با داشتن این شاخص و با استفاده از رابطه ارائه شده در بخش دوم می‌توان مقادیر کشسانی بارش و کشسانی تبخیر- تعرق را محاسبه کرد. نتایج مربوط به مقدار تابع شاخص خشکی و کشسانی بارش و تبخیر- تعرق در جدول ۲ ارائه شده است.

سهم‌ها به ازای پنج سال شناسایی شده به عنوان نقاط شکست پتانسیل و با استفاده از سه رویکرد یاد شده برآورد می‌شوند. در این مقاله، به منظور حذف اثر افزایشی دبی انتقال آب بین حوضه‌ای، مقادیر دبی در سری‌های زمانی دبی انتقال آب تونل کوهرنگ ۱ و ۲ از مقادیر دبی سری زمانی رواناب در ایستگاه قلعه شاهرخ کم می‌شوند و در سری به دست آمده، سهم اثر عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب توسط سه رویکرد بیان شده، محاسبه می‌شود. نتایج کاربرد روش رگرسیون تک‌متغیره در برآورد سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب در حالت‌های دبی رواناب "بدون" و "با" حذف اثر افزایشی انتقال آب بین حوضه‌ای و با توجه به سال‌های مختلف به عنوان نقاط دارای پتانسیل رخداد شکست در سری زمانی رواناب در جدول ۱ ارائه شده است. در صورتی که سهم عاملی در کاهش رواناب بیش از ۱۰۰ درصد برآورد شده باشد، معنی آن این است که بر خلاف عامل یادشده، عامل دیگر باعث افزایش رواناب شده است. به عنوان نمونه، در صورتی که سهم اثر عوامل انسانی بر کاهش رواناب برابر با ۱۱۰ درصد محاسبه شود (که در این صورت، سهم تغییر اقلیم در کاهش رواناب منفی ۱۰ درصد است)، به ازای هر واحد کاهش رواناب، ۱/۱ واحد کاهش رواناب در اثر عوامل انسانی و ۰/۱ واحد افزایش رواناب در اثر تغییر اقلیم ایجاد شده است. به عبارتی، مقادیر مثبت سهم اثر یک عامل نشان‌دهنده تأثیر آن عامل در کاهش رواناب و مقادیر منفی نشان‌دهنده تأثیر افزایشی عامل یاد شده بر رواناب می‌باشند.

Table 1- Results of linear regression method given the potential breakpoints

جدول ۱- نتایج روش رگرسیون خطی تک‌متغیره با در نظر گرفتن پنج نقطه شکست پتانسیل در سری زمانی رواناب

	Years with potential of occurring a breakpoint									
	1994-1995		1996-1997		2000-2001		2002-2003		2005-2006	
	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT
Contribution of climate change to runoff reduction	-26%	-43%	-5%	-13%	-20%	-34%	-10%	-18%	18%	9%
Contribution of human activities to runoff reduction	126%	143%	105%	113%	120%	134%	110%	118%	82%	91%

RWT: with removing the increasing effect of inter-basin water transfer

WT: without removing the increasing effect of inter-basin water transfer

اکنون، با داشتن مقادیر محاسبه شده شاخص کشسانی بارش و تبخیر- تعرق برای تابع بودیکو، می‌توان درصد سهم اثرات تغییر اقلیم و اثرات مستقیم عوامل انسانی بر کاهش رواناب را محاسبه کرد. نتیجه این محاسبات در زیرحوضه‌ی مورد مطالعه با در نظر گرفتن سال‌های شکست پتانسیل در جدول ۳ ارائه شده است.

در این مقاله، در رویکرد تثبیت- تغییر، از مدل بیلان آب جزیم- راثو و الوقدانی به منظور شبیه‌سازی رواناب استفاده می‌شود. اطلاعات مورد

Table 2- Values of the function of aridity ratio and elasticity of precipitation and evapotranspiration

جدول ۲- مقدار کشسانی بارش و تبخیر- تعرق

$F(\phi)$	ϵ_p	ϵ_E
0.98	0.995	0.005

ϵ_p : Elasticity of precipitation

ϵ_E : Elasticity of evaporation

$F(\phi)$: A function of the aridity ratio

Table 3- Results of the climate elasticity method based on the Budyko hypothesis

جدول ۳- نتایج رویکرد کنسسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو

	Years with potential of occurring a breakpoint									
	1994-1995		1996-1997		2000-2001		2002-2003		2005-2006	
	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT
Contribution of climate change to runoff reduction	-1%	-10%	2%	-5%	0%	-7%	5%	-4%	8%	3%
Contribution of human activities to runoff reduction	101%	110%	98%	105%	100%	107%	95%	104%	92%	97%

RWT: with removing the increasing effect of inter-basin water transfer
WT: without removing the increasing effect of inter-basin water transfer

دست آوردن مقادیر نهایی پارامترها به ازای سری زمانی دوره مرجع، سری زمانی دبی رواناب به ازای داده‌های مشاهداتی دوره اخیر شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت، طبق رابطه (۱۵)، سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسان بر کاهش رواناب محاسبه می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی رواناب توسط مدل ترکیب شده جزیم-رائو و الوقدانی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۷ ارائه شده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی رواناب در دوره اخیر با در نظر گرفتن سال‌های شکست مختلف در سری زمانی رواناب، در شکل ۸ ارائه شده است.

نیاز در شبیه‌سازی رواناب عبارتند از داده‌های ماهانه بارش، رواناب، تبخیر از تشتک و دما که از شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده‌اند. مدل بیلان آب برای دوره ۱۹۸۴-۱۹۷۶ (دوره مرجع) واسنجی می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، در این دوره، اثرات عوامل انسانی برای حوضه نسبت به دوره‌های دیگر ناچیز بوده است. به منظور واسنجی مدل شبیه‌سازی، از ۷۵ درصد داده‌ها استفاده می‌شود. ۲۵ درصد داده‌ها نیز برای مرحله اعتبارسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، به منظور به دست آوردن پارامترهای بهینه مدل بیلان آب، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. مقادیر پارامترهای مدل بیلان در جدول ۴ ارائه شده است. پس از اعتبارسنجی مدل و به

Table 4- Optimal values of the parameters of the water balance model in the calibration period (1976-1982)

جدول ۴- مقادیر بهینه پارامترهای مدل بیلان در دوره واسنجی (۱۳۶۳-۱۳۵۵)

k_{sn}	α	C	K_4	K_3	K_2	K_1	LSMX	USMX	TH	TL
0.053	0.289	0.987	0.936	0.998	0.039	0.164	173	118	10.05	-10.78

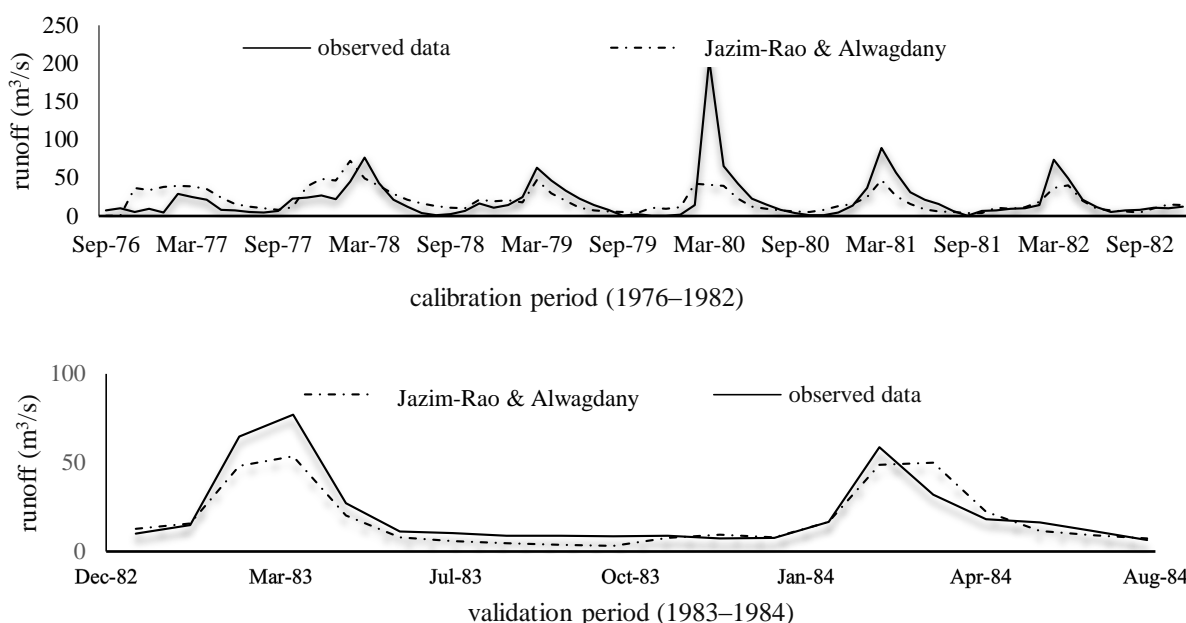


Fig. 7- Observed and simulated runoff time series in the calibration and validation periods

شکل ۷- سری‌های زمانی رواناب مشاهداتی و محاسباتی شبیه‌سازی شده توسط مدل بیلان در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

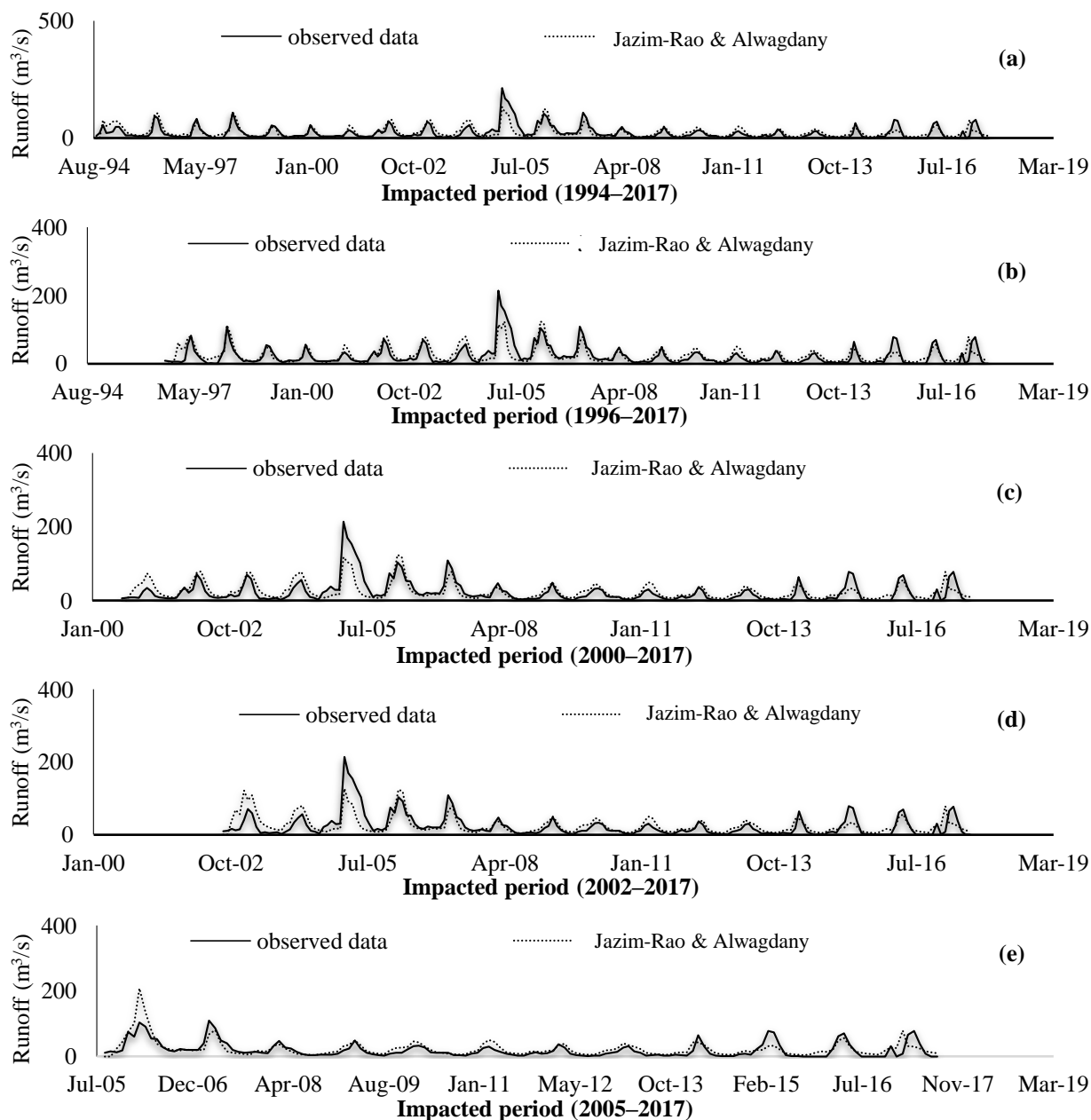


Fig. 8- Observed and simulated runoff time series considering a) 1994, b) 1996, c) 2000, d) 2002 and e) 2005 as years of breakpoint occurrence

شکل ۸- سری‌های زمانی رواناب مشاهداتی و رواناب شبیه‌سازی شده در دوره اخیر (با در نظر گرفتن سال‌های دارای پتانسیل رخداد شکست در سری زمانی رواناب)

رواناب بیش از ۱۰۰ درصد تخمین زده می‌شود و تغییرات متغیرهای اقلیمی عامل افزایش رواناب تا بیش از بیست درصد تخمین زده می‌شوند. این در حالی است که بررسی سری‌های زمانی بارش و تبخیر مشاهداتی، نشان‌دهنده تأثیر مثبت ولی بسیار کم تغییر اقلیم در کاهش رواناب است. با در نظر گرفتن سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶، سهم اثرات عوامل انسانی بر کاهش رواناب برابر با ۹۰ درصد به دست می‌آید.

مقدار محاسبه شده شاخص نش-ساتکلیف^{۱۳} به منظور ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۷۱٪ و ۶۳٪ است. نتایج به دست آمده از رویکرد تثبیت-تغییر (مبتنی بر مدل‌سازی بیلان آب) به منظور تفکیک و برآورد سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسان بر کاهش رواناب در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، با در نظر گرفتن سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۵، ۱۹۹۴-۱۹۹۷ و ۲۰۰۰-۲۰۰۱ و ۲۰۰۲-۲۰۰۳ سهم اثرات عوامل انسانی بر کاهش

Table 5- Results of fixing-changing method using the validated water balance model

جدول ۵- نتایج رویکرد تثبیت- تغییر با استفاده از مدل بیلان آب اعتبارسنجی شده

	Years with potential of occurring a breakpoint									
	1994-1995		1996-1997		2000-2001		2002-2003		2005-2006	
	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT	WT	RWT
Contribution of climate change to runoff reduction	-33%	-45%	-11%	-23%	-18%	-37%	-1%	-10%	20%	10%
Contribution of human activities to runoff reduction	133%	145%	111%	123%	118%	137%	101%	110%	80%	90%

RWT: with removing the increasing effect of inter-basin water transfer
WT: without removing the increasing effect of inter-basin water transfer

۶- جمع بندی

بر اساس نتایج، با در نظر گرفتن سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۵، ۱۹۹۶-۱۹۹۷ و ۲۰۰۰-۲۰۰۱ و ۲۰۰۲-۲۰۰۳ سهم تأثیر عوامل انسانی بر کاهش رواناب بیش از ۱۰۰ درصد تخمین زده شد و تغییرات متغیرهای اقلیمی در بیشتر مواقع، عامل افزایش رواناب حتی تا نزدیک به ۳۰ درصد تخمین زده شدند. این در حالی است که بررسی سری‌های زمانی بارش و تبخیر مشاهداتی، نشان‌دهنده تأثیر مثبت، ولی بسیار کم تغییر اقلیم در کاهش رواناب بوده است. بر اساس نتایج، با در نظر گرفتن سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶ به عنوان سال رخداد شکست در سری آماری رواناب، در هر سه رویکرد تثبیت- تغییر، رویکرد رگرسیونی و رویکرد کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو، سهم اثرات مستقیم فعالیت‌های انسان ساخت بر کاهش رواناب بیش از ۹۰ درصد و در نتیجه، سهم اثر تغییر اقلیم بر کاهش رواناب کمتر از ۱۰ درصد تخمین زده شد. با بررسی مقادیر سهم اثرات عوامل اقلیمی و انسانی که با در نظر گرفتن نقاط شکست پتانسیل مختلف در سری آماری رواناب برآورد شد، در کنار بررسی سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی و سری زمانی سطح زیر کشت به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای، سال ۲۰۰۵-۲۰۰۶ به عنوان سال رخداد شکست در سری زمانی رواناب تعیین شد.

در این مقاله، سهم اثر تغییر اقلیم و تغییرات انسان ساخت مستقیم بر کاهش رواناب در زیرحوضه قلعه‌شاهرخ- چلگرد در بالادست سد زاینده‌رود با استفاده از رویکردهای مختلف برآورد شد و مقادیر به دست آمده با توجه به محل نقاط شکست آماری در سری زمانی رواناب تحلیل حساسیت شدند. سری زمانی تغییرات سطح زیر کشت با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای استخراج شد و نقاط شکست پتانسیل در سال‌های آبی ۱۹۹۴-۱۹۹۵، ۱۹۹۶-۱۹۹۷، ۲۰۰۰-۲۰۰۱، ۲۰۰۲-۲۰۰۳ و ۲۰۰۵-۲۰۰۶ در سری رواناب در ایستگاه قلعه‌شاهرخ شناسایی شدند. با توجه به اثر افزایش انتقال آب بین حوضه‌ای، سهم اثرات عوامل انسانی (غیر از انتقال آب) بر کاهش رواناب کمتر برآورد می‌شود. این در حالی است که انتقال آب به حوضه مورد مطالعه علاوه بر افزایش مستقیم دبی رواناب، همزمان خود به عنوان یک عامل انسانی به صورت غیر مستقیم منجر به کاهش رواناب می‌شود. همچنان که با انتقال آب، برداشت آب در بالادست ایستگاه مورد مطالعه به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در واقع، عامل انسانی انتقال آب بین حوضه‌ای، در دوره‌هایی در جهت افزایش رواناب و در دوره‌هایی در جهت کاهش آن عمل کرده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Budyko Hypothesis
- 2- The Yellow River
- 3- Cumulative Anomaly
- 4- Modified Precipitation Runoff Modeling System
- 5- Decomposition and Sensitivity Methods
- 6- Pettitt
- 7- Miyun Reservoir
- 8- The Soil and Water Assessment Tool
- 9- Heuristic Segmentation Algorithm
- 10- Aridity Ratio
- 11- Fixing-Changing Approach
- 12- The Normalized Difference Vegetation Index
- 13- Nash Sutcliffe Efficiency

در این مقاله، مدل بیلان آب برای دوره ۱۹۷۶-۱۹۸۴ که در آن، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، اثر عوامل انسانی بر کاهش رواناب نسبت به دوره‌های دیگر کمتر بوده است، واسنجی شده، شبیه‌سازی رواناب در بازه‌های سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۱۷، ۱۹۹۶-۲۰۱۷، ۲۰۰۰-۲۰۱۷، ۲۰۰۲-۲۰۱۷ و ۲۰۰۵-۲۰۱۷ انجام شد. همچنین، از رویکردهای کشسانی اقلیمی، رگرسیونی و تثبیت- تغییر مبتنی بر مدل بیلان جزیم- راثو و الوقدانی به منظور کمی‌سازی سهم اثرات عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب استفاده شد. نتایج مؤید نقش بسیار بیشتر عوامل انسانی در کاهش رواناب بود.

- Sciences Discussions, European Geosciences Union 14(11):2277–2287
- McCabe GJ and Markstrom SL (2007) A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. U.S. Geological Survey, Open-File report 2007-1088, 6
- Rao RA and AlWagdany A (1995) Effects of climate change in WABASH River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(2):207–215
- Van Loon AF and Van Lanen HAJ (2013) Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research* 49(3):1438-1502
- Wang S, Yan Y, Yan M, and Zhao X (2012) Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River Basin. *Journal of Geographical Sciences* 22(5):906–918
- Wu J, Miao C, Zhang X, Yang T and Duan Q (2017) Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment* 586:328-337
- 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
- Zhao G, Tian P, Mu X, Jiao J, Wang F, and Gao P (2014) Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology* 519:387–398
- Zheng H, Zhang L, Zhu R, Liu C, Sato Y, and Fukushima Y (2009) Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. *Water Resources Research* 45(7):1–9
- Iran Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture (2016) Estimating the contribution of direct and indirect effects of human activities on surface runoff. Technical Report (In Persian)
- Osmani M (2020) Modeling nonstationarities and detecting change points in multivariate hydrological series. M. Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology (In Persian)
- Budyko MI (1963) Evaporation under natural conditions. Israel Program for Scientific Translations
- Farsi N and Mahjouri N (2019) Evaluating the contribution of the climate change and human activities to runoff change under uncertainty. *Journal of Hydrology* 574:872–891
- N Farsi N, Mahjouri N, and Ghasemi H (2020) Breakpoint detection in non-stationary runoff time series under uncertainty. *Journal of Hydrology* 590:125458
- 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* 557–558:331–342
- Jazim AA (2006) A monthly six-parameter water balance model and its application at arid and semiarid low yielding catchments. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 19(1):65–81
- Jiang C, Xiong L, Wang D, Liu P, Guo S, and Xu C (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
- Legesse D, Abiye TA, and Abate H (2010) Streamflow sensitivity to climate and land cover changes: Meki River, Ethiopia. *Hydrology and Earth System*