

# Separation of the effects of climate change and human activities on the changes in river flow using the hydrological sensitivity analysis approach based on Budyko's hypothesis, case study: Qazvin Plain Salt Marsh

Sara Heshmati<sup>1</sup>, Bijan Nazari<sup>2\*</sup> and Mohammadreza Nikoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Department of Water science and engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Water science and engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Civil and Architectural Engineering, Faculty of Engineering, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman

Received: 10 June 2024

Accepted: 17 August 2024

## Extended abstract

### Introduction

Climatic changes and human activities are among the key factors influencing river flow. Determining the contributions of climate change and human activities is essential for the sustainable management of water resources. Climate change is associated with variations in temperature and precipitation, leading to changes in the spatial and temporal distribution patterns of rainfall. Human activities, both directly and indirectly, affect water resources. The rational use of water resources, including runoff, is therefore critical. This study aims to quantify the contributions of climate change and human activities to runoff variations in the Qazvin Plain salt marsh.

### Materials and methods

The Qazvin Plain, covering approximately 450,000 hectares, is located between longitudes 49°25' to 50°35' E and latitudes 35°25' to 36°25' N in Iran. In this research, the Mann-Kendall test was applied to analyze the trends in annual precipitation, runoff, air temperature, and potential evapotranspiration during the period 1990–2020. The Pettitt test and the double mass curve method for precipitation-runoff analysis were used to identify the change point in runoff values. Finally, hydrological sensitivity analysis based on the Budyko-Zhang hypothesis was employed to determine the respective contributions of human activities and climate change to runoff variations.

### Results and discussion

The results of the Mann-Kendall test revealed a significant decreasing trend in runoff at a 0.01 significance level. Conversely, the average annual temperature and potential evapotranspiration exhibited significant increasing trends at the same significance level. Despite a reduction in average annual precipitation at the basin level, no statistically significant trend was observed for rainfall. The results of the Pettitt test and the cumulative precipitation-runoff curve identified 1996 (1375 in the Persian calendar) as the change point in the annual runoff series. Using hydrological sensitivity analysis based on the Budyko-Zhang hypothesis, the contributions of climate change and human activities to runoff variations were quantified as -0.21 mm (-161.2%) and 0.08 mm (61.2%), respectively.

### Conclusions

Trend analysis in the study area demonstrated a decreasing trend in runoff and an increasing trend in average annual temperature and potential evapotranspiration. Runoff values in Shorezar identified 1996 as the change point in the time series. According to the Budyko-Zhang method, climate change has contributed to a decrease in runoff, while human activities have increased the water level in the salt marsh.

\* Corresponding author: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir

**Keywords:** Boudico-Zhang hypothesis, Evaporation and transpiration potential, Point of change, River flow, Time series

Cite this article: Heshmati, S., Nazari, B., Nikoo, M., 2025. Separation of the effects of climate change and human activities on the changes in river flow using the hydrological sensitivity analysis approach based on Budyko's hypothesis, case study: Qazvin Plain Salt Marsh. *Watershed Engineering and Management* 16(4), 469-481.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## تفکیک سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییرات دبی رودخانه با استفاده از رویکرد تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو مطالعه موردی: شوره‌زار دشت قزوین

سارا حشمتی<sup>۱</sup>، بیژن نظری<sup>۲\*</sup> و محمدرضا نیکو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده مهندسی، دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از جمله عوامل تأثیرگذار بر جریان رودخانه هستند. مشخص کردن سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی می‌تواند به مدیریت پایدار منابع آبی کمک کند. تغییرات اقلیمی با تغییرات دما و بارش همراه است که منجر به تغییرات توزیع مکانی و زمانی و الگو بارش می‌شود. فعالیت‌های انسانی نیز به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر منابع آب تأثیر می‌گذارد. استفاده معقول از منابع آب از جمله رواناب‌ها امری ضروری است. هدف از این پژوهش، تعیین سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب واقع در شوره‌زار دشت قزوین است.

### مواد و روش‌ها

دشت قزوین با مساحتی حدود ۴۵۰۰۰۰ هکتار در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی، قرار دارد. در این پژوهش ارزیابی روند در مقادیر سالانه بارش، رواناب، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره زمانی ۹۸-۱۳۶۹ به وسیله آزمون من-کندال (Mann-kendall) انجام شد. در ادامه، به منظور تعیین نقطه تغییر مقدار رواناب از آزمون پتیت و روش منحنی تجمعی دوگانه بارش-رواناب استفاده شد. در نهایت، با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو-ژانگ سهم اثرات فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم بر تغییرات رواناب مشخص شد.

### نتایج و بحث

نتایج تحلیل آزمون من-کندال نشان داد که رواناب در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ روند کاهشی دارد؛ درحالی‌که دمای متوسط سالانه و تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ روند افزایشی را نشان می‌دهد. با وجود کاهش بارش متوسط سالانه در سطح حوضه، روند آماری معنی‌دار بارش مشاهده نشد. همچنین، نتایج براساس آزمون پتیت و منحنی تجمعی دوگانه بارش-رواناب نشان داد که نقطه تغییر در سری رواناب سالانه، سال ۱۳۷۵ است. درنهایت، با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک مبتنی بر فرضیه بودیکو-ژانگ مشخص شد که درصد تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به ترتیب برابر ۰/۲۱- میلی‌متر معادل ۱۶۱/۲- درصد و ۰/۰۸ میلی‌متر معادل ۶۱/۲ درصد است.

### نتیجه‌گیری

ارزیابی روند در منطقه مورد مطالعه نشان داد که مقادیر رواناب روند کاهشی و دمای متوسط سالانه و تبخیر تعرق پتانسیل روند افزایشی دارند. با بررسی مقادیر آبدهی در سطح شوره‌زار سال ۱۳۷۵، به‌عنوان نقطه تغییر سری زمانی آبدهی متوسط سالانه به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده با استفاده از روش بودیکو-ژانگ، اثر تغییر اقلیم بر تغییرات رواناب به‌صورت کاهنده است. همچنین فعالیت‌های انسانی موجب افزایش آبدهی در سطح شوره‌زار شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر و تعرق پتانسیل، جریان رودخانه، روش بودیکو-ژانگ، سری زمانی، نقطه تغییر

### مقدمه

آب، ماده‌ای است که تمامی موجودات زنده زمین برای بقا خود به آن وابسته هستند و عملکرد طبیعت و توسعه جامعه انسانی از آن جدا نیستند (Shahid et al., 2018). حدود ۷۵ درصد از سطح زمین به‌وسیله آب پوشانده شده است، درحالی‌که منابع آب شیرین تنها ۲/۵ درصد از آب زمین را تشکیل می‌دهند (Hu et al., 2020). با این حال، مشکلات گسترش جمعیت، کمبود منابع و تخریب محیط‌زیست در جهان، کمبود منابع آب را بیشتر و جدی‌تر می‌کنند. استفاده درست و معقول از منابع آب از جمله رواناب‌ها امری ضروری است.

تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از جمله عوامل تأثیرگذار بر جریان رودخانه هستند. ارزیابی هر یک از این عوامل در تغییرات آبدهی رودخانه‌ها به مدیریت پایدار منابع آب کمک می‌کند. همچنین، بدون توجه به تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در زمینه استفاده از منابع آب نمی‌توان مدیریت درستی در راستای پایداری منابع آب داشت (Wang et al., 2020).

پژوهش‌های متعددی در جهان انجام شده است که بیانگر این است که چرخه هیدرولوژیکی علاوه بر تغییر اقلیم، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نیز قرار دارد. فعالیت‌های انسانی اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر چرخه هیدرولوژیک داشته که در نتیجه آن، توزیع

زمانی-مکانی منابع آب دچار تغییر شده است (Sheikh et al., 2023).

در طی سال‌های اخیر، در زمینه ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب مطالعات متعددی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته که در ادامه به این مطالعات اشاره می‌شود. در این راستا، (Xu et al., 2022) در کشور چین تغییرات زمانی و منطقه‌ای در هیدرولوژی رودخانه‌ی زرد را بررسی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر این بود که فعالیت‌های انسانی، ساخت سد و بهره‌برداری از منابع آب تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش جریان رودخانه داشته‌اند.

(Han et al., 2019) از مدل هیدرولوژیکی Crest-Snow همراه با داده‌های سنجش از دور، دبی جریان و روش بودیکو به‌طور مشترک استفاده کردند و اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رژیم جریان سد لانسانگ در جنوب غربی چین طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ را بررسی کردند. نتایج پژوهش حاکی از این بود که تغییر اقلیم در فصل خشک نقش مهمی در کاهش رواناب دارد و در میان متغیرهای اقلیمی مهم‌ترین عامل بارش است.

در حالی‌که فعالیت‌های انسانی در طول فصل مرطوب باعث کاهش رواناب می‌شوند. (Hsun Lee and Fu Yeh, 2019) تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تغییرات جریان حوضه‌های رودخانه شمال

به کاهش دبی به‌ترتیب برابر با  $36/2$  و  $63/8$  درصد در حوزه آبخیز کرخه شده است.

در ادامه، پژوهش‌ها نشان داد که تغییرات رژیم جریان رودخانه حبله‌رود با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی، میزان آبدهی حوزه آبخیز حبله‌رود در دوره  $1980-2017$  را به میزان  $35$  درصد کاهش داده است و فعالیت‌های انسانی به‌عنوان عامل اصلی بر تغییرات هیدرولوژیکی این حوزه آبخیز تأثیر می‌گذارد (Naderi et al., 2022).

هدف از این پژوهش ارزیابی تغییرات رواناب در سطح شوره‌زار دشت قزوین و تعیین نقطه شکست در سری زمانی جریان ثبت شده در منطقه مورد بررسی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو نسبت به تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی در ایجاد تغییرات آبدهی رودخانه پرداخته شده است تا سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب مشخص شود.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور تعیین سهم تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب در شوره‌زار دشت قزوین، ابتدا روند تغییرات آبدهی رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری پل شاه‌عباسی و روند تغییرات بارش، دما و تبخیر تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه (با استفاده از روش میانگین‌گیری حسابی) مورد بررسی قرار گرفت.

بعد از مشخص شدن روند تغییرات بارش، دما، تبخیر تعرق پتانسیل و رواناب، نقطه تغییر رواناب با استفاده از روش‌های پتیت و منحنی تجمعی دوگانه تعیین شد. سپس، با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو روش ژانگ اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب در دوره آماری  $1369$  تا  $1398$  مورد بررسی قرار گرفت. روندنمای پژوهش در شکل ۱، نشان داده شده است.

تایوان در طی سال‌های  $1980-2017$  را با استفاده از روش الاستیسیته براساس چارچوب بودیکو بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تغییرات بارش حساس‌ترین عامل در کاهش جریان رودخانه بودند.

Sharifi et al., (2021) نه روش مختلف برای تعیین

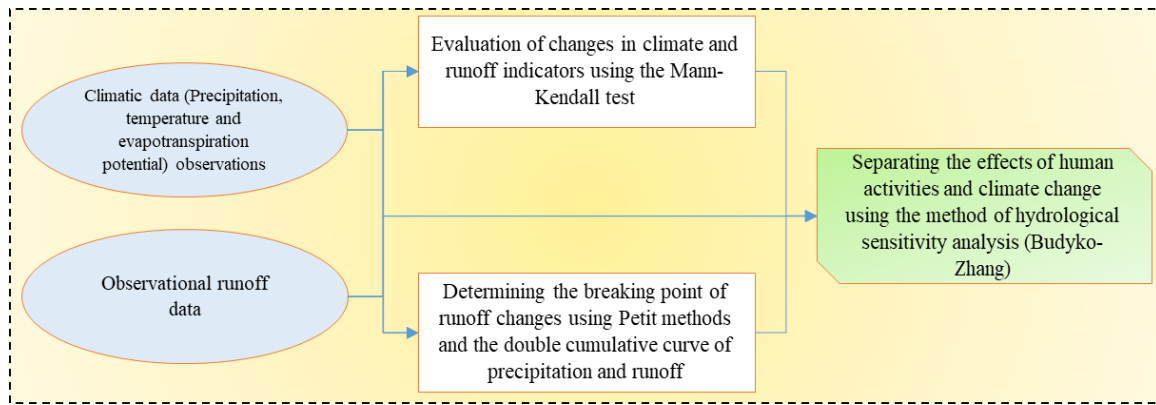
اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تغییر رواناب در دو حوضه مربوط به فلات مرکزی ایران شامل حوضه قلعه شاهرخ و حوضه جوانمردی را به‌کار بردند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی نقش اصلی در کاهش رواناب در حوضه قلعه شاهرخ ایفا می‌کند، به‌طوری‌که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به‌ترتیب موجب کاهش  $60/2$  و  $39/8$  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  $22/9$  و  $77/1$  درصد در کاهش رواناب شده‌اند.

Ghasemi and Mahjuri Majd, (2020) سهم اثر

تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر کاهش رواناب در حوضه بالادست سد زاینده‌رود را بر اساس سه رویکرد رگرسیون خطی، کشسانی اقلیمی مبتنی بر فرضیه بودیکو و رویکرد تثبیت-تغییر مبتنی بر شبیه‌سازی ماهانه بیلان آب ارزیابی کردند. تغییرات انسان‌ساخت، شامل افزایش بی‌رویه سطح زیر کشت و انتقال آب بین حوضه‌ای بوده است. نتایج تحلیل حساسیت نسبت به محل نقاط شکست و بررسی سری زمانی تغییرات سطح زیر کشت به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای و سری زمانی دبی انتقال آب بین حوضه‌ای نشان داد که در نظر گرفتن سال  $2006$  به‌عنوان سال رخداد نقطه شکست در سری زمانی رواناب، تخمین‌های واقع‌بینانه‌تری از سهم اثرات عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب (به‌ترتیب بیش از  $90$  درصد و کمتر از  $10$  درصد) به‌دست می‌دهد.

Askari et al., (2022) به تفکیک اثرات تغییر اقلیم

و فعالیت‌های انسانی بر کاهش دبی در حوزه آبخیز کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی پرداختند و بیان کردند که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی منجر



شکل ۱- روندنمای تحقیق

Fig. 1. A flowchart of the research

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

که در آن، n تعداد مشاهدات سری، و  $x_k$  و  $x_j$  به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند. تابع علامت (sgn) نیز برابر است با:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

سپس آزمون من-کندال (Z) با استفاده از رابطه (۳) مشخص شد.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه فوق واریانس S برابر است با:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (4)$$

که در آن، m معرف تعداد سری‌هایی است که در آنها دست‌کم یک داده تکراری وجود دارد و t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است. آماره آزمون من-کندال تقریباً از توزیع نرمال استاندارد تبعیت می‌کند، لذا در یک آزمون دو دامنه برای بررسی روند یک سری زمانی در سطح معنی‌داری  $\alpha$ ، فرض صفر (عدم وجود روند) در صورتی پذیرفته می‌شود که  $|Z| < Z_{\frac{\alpha}{2}}$  برقرار باشد.

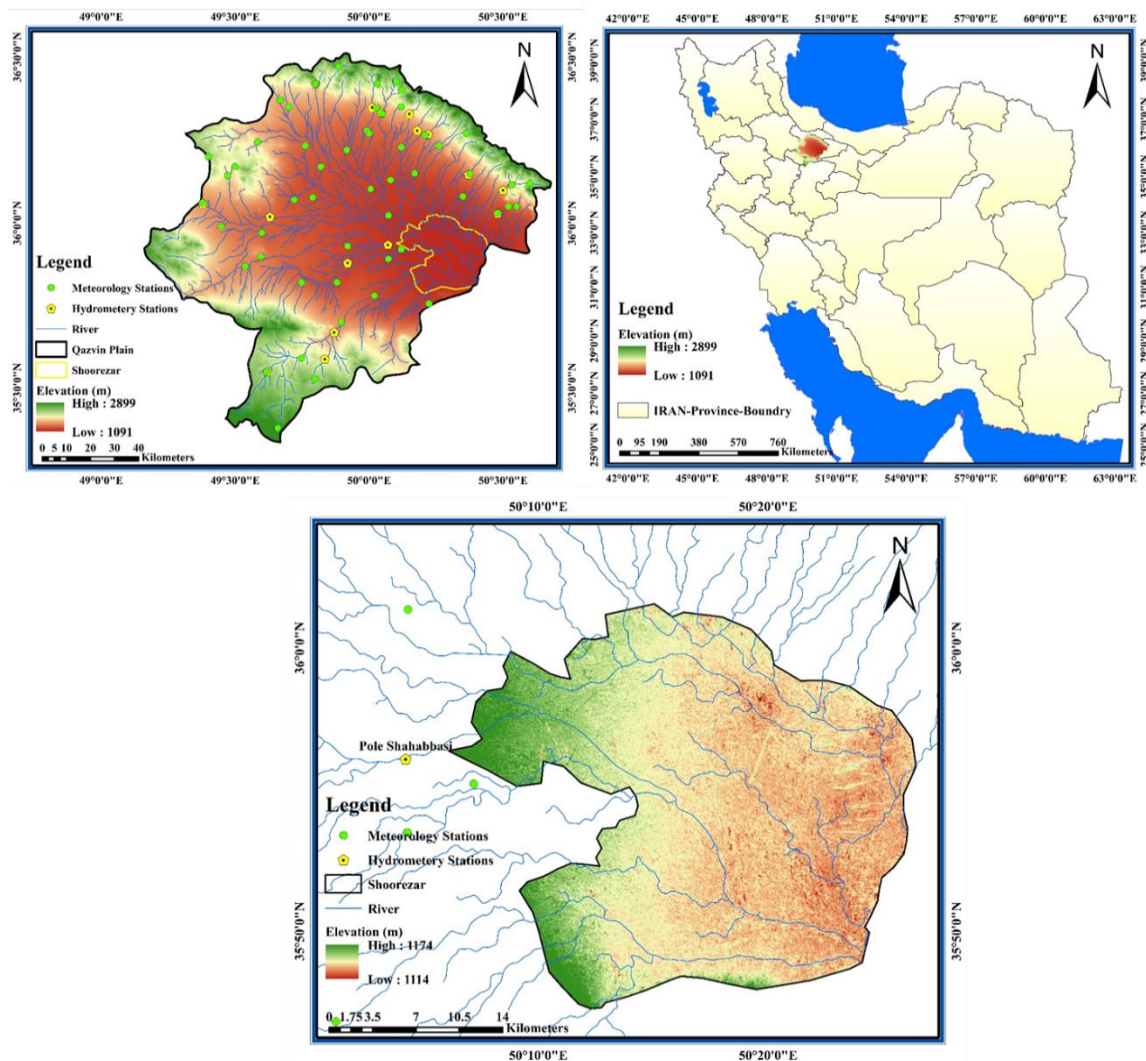
آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری  $\alpha$  است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد، روند داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی است. در پژوهش حاضر نیز به‌منظور تعیین روند موجود در منطقه برای شاخص‌های بارش، دما، تبخیر تعرق پتانسیل و رواناب از آزمون من-کندال استفاده شده است.

**منطقه مطالعاتی:** دشت قزوین با مساحتی حدود ۴۵۰۰۰۰ هکتار در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد. بیشینه ارتفاع این منطقه برابر ۲۸۹۹ متر و کمینه آن ۱۰۹۱ متر از سطح دریا است. شوره‌زار قزوین بین ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۶ درجه ۰۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است و وسعت آن حدود ۶۵۰۰۰ هکتار است.

از نظر آب و هوایی منطقه مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه در اقلیم سرد و نیمه خشک قرار دارد که متوسط بارش سالیانه در منطقه تقریباً ۳۲۰ میلی‌متر است. شوره‌زار مرکزی دشت قزوین در جنوب شرقی دشت قزوین و در پایانه زیرحوضه‌های حاجی‌عرب، خررود، ابهررود و آجی‌چای قرار دارد. شوره‌زار مرکزی منطقه‌ای با شیب و عارضه ناچیزی است. دو تالاب الله‌آباد که در حریم استان قزوین و تالاب صالحیه که جزء استان البرز است، در محدوده مورد مطالعه قرار دارند.

### تحلیل شیب روند دما و بارش با استفاده از آزمون

**من-کندال:** آزمون من-کندال (Mann 1945, Kendall 1975, Gilbert 1987) پرکاربردترین آزمون تعیین روند در متغیرهای هیدرواقليمی به‌شمار می‌رود. برای محاسبه آماره این آزمون از آمار ایستگاه‌های پل شاه‌عباسی، نیروگاه شهید رجایی، آبیگ، عبدال‌آباد، خاکعلی، زیاران و بهجت‌آباد استفاده شد که ابتدا پارامتر S با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.



شکل ۲- نمایی از موقعیت جغرافیایی دشت قزوین و شورزار دشت قزوین، شبکه‌های آبراه‌ها و پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

Fig. 2. A view of the geographical location of Qazvin plain and Qazvin plain salt marshes, waterways networks and the distribution of meteorological and hydrometric stations

است. ابتدا سری زمانی  $U_{t,n}$  برای متغیرهای  $x_j$  و  $x_i$  به صورت رابطه (۵) به دست می‌آیند.

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

که شمار داده‌ها  $n$  و عدد ترتیبی داده‌های سری زمانی تا نقطه تغییر و بعد از آن  $t$  است. تابع علامت  $\text{sgn}(\dots)$  نیز به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود. بیشینه قدر مطلق  $U_{t,n}$  موقعیت مکانی مربوط به نقطه تغییر  $1 \leq t \leq n$  را (در صورت وجود) به دست می‌دهد. به عبارت دیگر، آماره این آزمون طبق رابطه (۷) به دست آمده و سپس در رابطه (۸) قرار می‌گیرد و مقدار  $p$  به دست می‌آید.

روش تحلیل نقطه تغییر رواناب-آزمون پتیت: از مهم‌ترین مراحل در تعیین اثرات فعالیت‌های انسانی و تغییرپذیری اقلیمی بر جریان حوضه، شناسایی نقاط تغییر روند است. آزمون پتیت برای شناسایی نقاط تغییر در یک سری زمانی توسعه داده شده است (Petit, 1979). این آزمون یک آزمون ناپارامتری بوده که بدون توجه به توزیع آماری، برای شناسایی تغییرات معنی‌دار در گرایش مرکزی سری زمانی است. به عبارتی نشانگر تغییر در رفتار یک سری آماری است و اگر فرضیه‌ای در مورد زمان تغییر در سری موجود نباشد، این موضوع اهمیت بالایی دارد. آماره این آزمون به صورت رابطه (۵)

$$\gamma = \frac{1+2w\theta}{(1+\theta+w\theta)^2} \quad (12)$$

در روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو-ژانگ سه پارامتر  $w$  و  $\beta$  و  $\gamma$  (ضریب حساسیت رواناب نسبت به ویژگی‌های حوزه آبخیز و بارش و تبخیر تعرق پتانسیل) است، تعیین می‌شوند. مبنای فرضیه بودیکو-ژانگ، مدل بیلان هیدرولوژیکی است؛ با این فرض که تغییرات ذخیره رطوبت خاک می‌تواند برای مدت طولانی دست‌کم ۱۰ سال نادیده گرفته شود (Chen et al., 2013). بنابراین، تغییرات متوسط جریان سالانه  $\Delta Q_{total}$  را می‌توان به صورت رابطه (۱۳) به دست آورد.

$$\Delta Q_{Total} = \bar{Q}_2 - \bar{Q}_1 = \Delta Q_c + \Delta Q_H \quad (13)$$

که در آن،  $\bar{Q}_1$  و  $\bar{Q}_2$  به ترتیب میانگین جریان سالانه پس و قبل از نقطه تغییر است. فرض اصلی در این روش شبیه به مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که قبل از نقطه تغییر، تغییر در جریان فقط به دلیل تغییرات آب و هوا و پس از نقطه تغییر، هم تغییر آب و هوا و هم فعالیت‌های انسانی مسئول تغییرات جریان هستند. علاوه بر این، این روش می‌تواند برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی تنها در مقیاس‌های سالانه و با استفاده از مجموعه داده‌های بلند مدت مورد استفاده قرار گیرد (Li et al., 2012). بنابراین، سهم تغییرات آب و هوا  $Q_C$  و فعالیت‌های انسانی  $Q_H$  در تغییرات دبی جریان به صورت رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\%Q_C = \Delta Q_c / \Delta Q_{Total} \times 100 \quad (14)$$

$$\%Q_H = \Delta Q_H / \Delta Q_{Total} \times 100 \quad (15)$$

### نتایج و بحث

**تحلیل روند سری‌های سالانه متغیرهای آب و هواشناسی:** جدول ۱، نتایج آماری تحلیل روند به روش من-کندال برای متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، بر این اساس، میزان رواناب ورودی به شوره‌زار دشت قزوین به‌طور معنی‌داری (در سطح ۰/۰۱) روندی کاهشی داشته است. در مقابل، دو متغیر دمای متوسط سالانه و تبخیر و تعرق پتانسیل به‌طور معنی‌داری (در سطح ۰/۰۱) روندی افزایشی داشته‌اند. با وجود کاهش بارش متوسط سالانه در سطح حوضه، روند آماری معنی‌داری مشاهده نشد. شکل ۳، روند خطی سری‌های

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$K = \max[Ut, n] \quad (7)$$

$$P = \frac{-6k^2}{en^3 + n^2} \quad (8)$$

**روش منحنی تجمعی دوگانه:** روش منحنی تجمعی دوگانه حاصل ترسیم مقادیر تجمعی یک متغیر در مقابل مقادیر تجمعی یک متغیر دیگر در یک دوره یا شرایط همزمان است (Searcy and Hardison, 1960). عموماً منحنی‌های تجمع دوگانه بین بارش و رواناب به صورت یک خط مستقیم است که تغییر در شیب آن می‌تواند بیانگر نقطه شکست باشد.

در این پژوهش، از روش پتیت به منظور تعیین نقطه شکست و از روش منحنی تجمعی دوگانه به منظور اطمینان از نقطه شکست برآورد شده از روش پتیت استفاده شده است.

**تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو روش - ژانگ:** Zhang et al., (2001) فرضیه بودیکو را به صورت یک تابع دو پارامتری که شامل میانگین تبخیر تعرق سالانه واقعی (AE)، بارندگی (P)، تبخیر تعرق احتمالی (PE)، و ویژگی‌های حوزه آبخیز (w) که خود تابعی از نوع پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و ویژگی‌های توپوگرافیکی است به شرح رابطه (۹) معرفی کردند.

$$\frac{AE}{P} = 1 + \frac{WPEP}{I} + WPEP + (PEP) - I \quad (9)$$

از آنجایی که بارش و تبخیر تعرق پتانسیل عوامل اصلی مؤثر بر متوسط بیلان آب سالانه هستند، تغییرات در دبی جریان رودخانه در اثر تغییرات اقلیمی می‌تواند به صورت رابطه (۱۰) بیان شود.

$$\Delta Q^c = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial PET} \Delta PET = \beta \Delta P + \gamma \Delta PET \quad (10)$$

که در آن،  $\Delta Q_C$ ،  $\Delta P$  و  $\Delta PET$  به ترتیب تغییر در دبی جریان، بارش و تبخیر تعرق پتانسیل است.  $\beta$  حساسیت دبی جریان به بارش و  $\gamma$  حساسیت دبی جریان به تبخیر عرق پتانسیل است. در ادامه، (Zhang et al., 2001) رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) را برای محاسبه مقادیر پارامترهای  $\beta$  و  $\gamma$  با استفاده از شاخص خشکی  $\Phi$  که نسبت بین تبخیر تعرق پتانسیل به بارش است معرفی کردند.

$$\beta = \frac{1+2\theta+3w\theta}{(1+\theta+w\theta)^2} \quad (11)$$



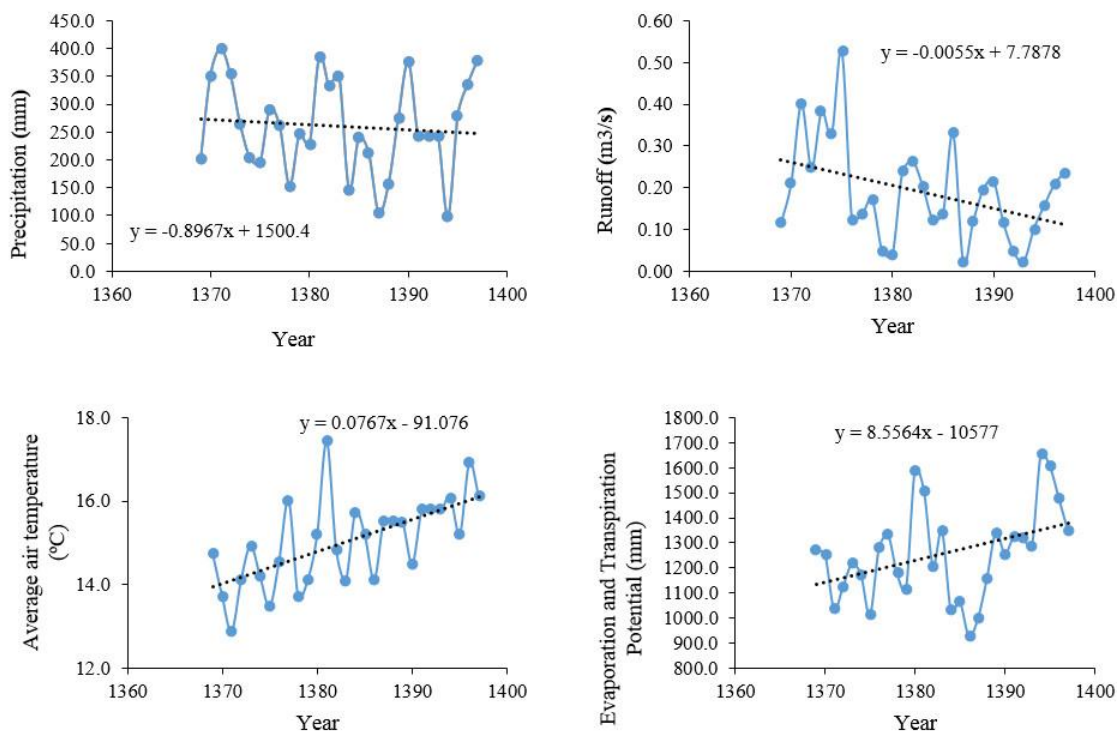
اطمینان ۹۹ دارای روند افزایشی است. همچنین دما نیز با نرخ ۰/۰۷ درجه سلسیوس در سطح اطمینان ۹۹ افزایش یافته است. همچنین در مطالعه ( Askari et al., 2022) روند مشاهده شده برای شاخص‌های اقلیمی مشابه این مطالعه است.

زمانی بارش، رواناب، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ رواناب سالانه در شوره‌زار دشت قزوین، دارای روند کاهشی با نرخ ۰/۰۰۵ در محدوده اطمینان ۹۹ درصد است، در صورتی که تبخیر و تعرق پتانسیل با نرخ ۸/۵۶ در محدوده

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

Table 1. The results of trend analysis by the Mann-Kendall method for different variables

Variable	p-value	Z test	Significance Level	Trend
Runoff	0.0747	-1.78	0.01	Decreasing Trend
Precipitation	0.7639	-0.3	0.01	No Trend
Temperature	0.0001	3.79	0.01	Increasing Trend
Evaporation and Transpiration Potential	0.0447	2.01	0.01	Increasing Trend



شکل ۳- روند خطی سری‌های زمانی بارش، رواناب، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل

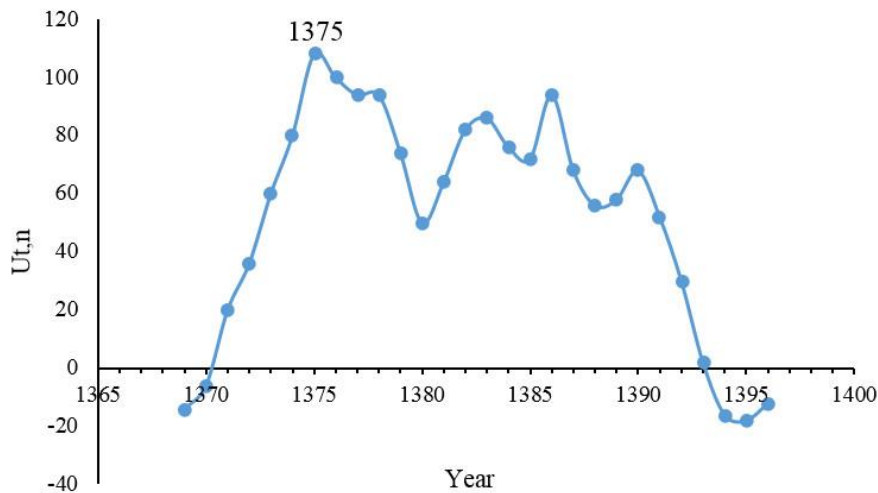
Fig. 3. Linear trend of time series of rainfall, runoff, air temperature and potential evaporation and transpiration

تجمعی سالانه در شوره‌زار دشت قزوین را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که رابطه بین بارش تجمعی سالانه و رواناب تجمعی سالانه می‌تواند به صورت دو خط مستقیم با شیب‌های مختلف قبل و بعد از سال ۱۳۷۵ بیان شود. به عبارتی مشخصات بارش یا رواناب بعد از سال ۱۳۷۵ تغییر یافته است.

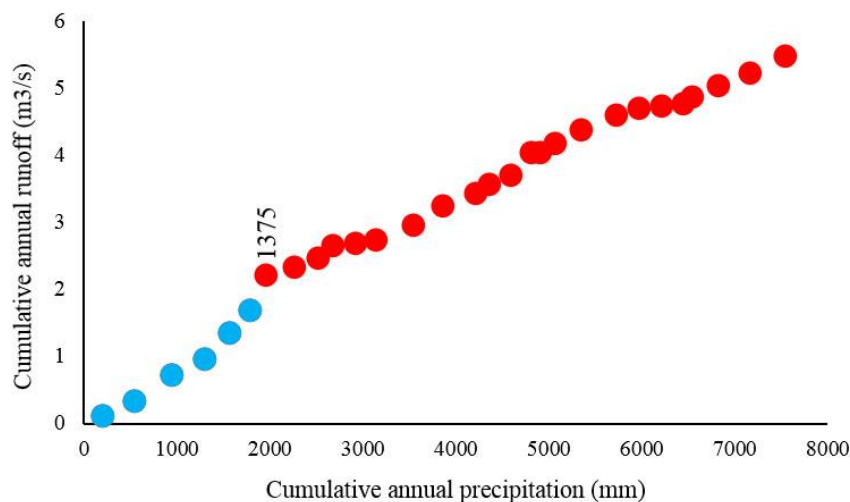
**تحلیل نقطه تغییر رواناب:** در این پژوهش، آزمون پتیت و روش منحنی تجمعی دوگانه بارش و رواناب برای شناسایی نقطه تغییر رواناب سالانه به کار برده شد. نتایج آزمون پتیت در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که سال ۱۳۷۵ نقطه تغییر قابل توجه رواناب است. شکل ۵ بارش و رواناب

را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، میانگین رواناب برای سری زمانی قبل و بعد از نقطه تغییر به ترتیب برابر ۰/۲۸ و ۰/۱۵ مترمکعب بر ثانیه بوده است که در حدود ۰/۱۳ مترمکعب بر ثانیه کاهش در مقدار میانگین رواناب نشان داد. همچنین انحراف استاندارد برای سری زمانی قبل و بعد از نقطه تغییر به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۰۸ متر مکعب بر ثانیه است. همچنین تغییرات میانگین رواناب و بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل قبل و بعد از نقطه تغییر به ترتیب ۴/۴- و ۱/۱۴- و ۰/۰۹ درصد است.

با توجه به روند افزایشی دما و تبخیر تعرق پتانسیل، از سال ۱۳۷۵ روند کاهشی رواناب آغاز شده است. بنابراین، دوره آماری مورد مطالعه برای شوره‌زار دشت قزوین، 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 (۱۳۷۵-۱۳۶۹) و بعد از تغییر (۱۳۶۹-۱۳۷۵) تحلیل شدند. جدول ۲ مقایسه شاخص آماری میانگین و انحراف استاندارد سری زمانی رواناب قبل و بعد از نقطه تغییر



شکل ۴- تعیین نقطه تغییر در سری زمانی رواناب با آزمون پتیت  
 Fig. 4. Determining the change point in the runoff time series with Petit's test



شکل ۵- بارش و رواناب تجمعی سالانه در شوره‌زار دشت قزوین برای تعیین نقطه تغییر در رواناب  
 Fig. 5. Annual cumulative rainfall and runoff in Qazvin plain salt marsh to determine the point of change in runoff

۰/۰۰۲ برآورد شد. با توجه به این که مقدار  $\beta$  بزرگ‌تر از  $\gamma$  است تغییرات رواناب حساسیت بیشتری به تغییرات بارش نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل دارد. بر

تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو-ژانگ: با کالیبراسیون این روش مقادیر پارامترهای  $w$  و  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۰۳ و

معادل ۶۱/۲) درصد است. در مطالعه‌ای که (Ghasemi and Mahjuri Majd, 2020) در حوزه‌های آبخیز گاوخونی و زیرحوضه سد زاینده‌رود انجام دادند نشان دادند که تغییر اقلیم در کاهش رواناب و عوامل انسانی در افزایش رواناب تاثیر می‌گذارند که مطابق با نتایج به‌دست آمده از این مطالعه است.

اساس نتایج روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیک مبتنی بر فرضیه بودیکو- ژانگ اثرات ارزیابی شده فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم بر تغییرات رواناب در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۳ درصد تاثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی به ترتیب برابر ( ۰/۲۱ - میلی‌متر کاهش معادل ۱۶۱/۲ - درصد و ۰/۰۸ میلی‌متر کاهش

**جدول ۲-** مقایسه شاخص آماری میانگین و انحراف استاندارد سری زمانی رواناب، بارندگی و تبخیر تعرق پتانسیل قبل و بعد از نقطه تغییر  
**Table 2.** Comparison of the average statistical index and standard deviation of the time series of runoff, precipitation and potential evapotranspiration before and after the change point

Variable	Period	Mean (m3/s)	Standard Deviation (m3/s)	Change in Mean (%)
Runoff	Before the change point	0.28	0.1	---
	After the change point	0.15	0.08	---
	$\Delta Q$	-0.13	---	-46.4
Precipitation	Before the change point	295.4	77.7	---
	After the change point	253.7	83.5	---
	$\Delta P$	-41.7	---	-14.1
potential evapotranspiration	Before the change point	1180.1	0.028	---
	After the change point	1288.7	0.014	---
	$\Delta PET$	108.6	---	0.09

**جدول ۳-** جزئیات نتایج استفاده از تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیه بودیکو روش ژانگ

**Table 3.** The details of the results of using the hydrological sensitivity analysis based on the Boudico hypothesis and Zhang's method

Unit	The amount of runoff changes method based on Bodyko hypothesis
mm	-0.21
%	-161.2
mm	0.08
%	61.2

### نتیجه‌گیری

کاهش و دمای متوسط سالانه و تبخیر تعرق پتانسیل روند افزایشی دارند.

با استفاده از آزمون پتیت و منحنی تجمعی دوگانه بارش-رواناب، نقطه تغییر معنی‌دار در سری زمانی دبی سالانه شناسایی شد. بر اساس هر دو روش مورد استفاده، سال ۱۳۷۵ به‌عنوان نقطه شکست سری زمانی آینده متوسط سالانه و شروع تغییرات نزولی دبی به‌دست آمد. در ادامه برای تعیین سهم اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در کاهش آبدی محدود مورد مطالعه از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی

هدف اصلی در این پژوهش، تفکیک سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب شوره‌زار دشت قزوین است. بدین منظور داده‌های بارش، تبخیر و دبی و دما در محدوده شوره‌زار دشت قزوین با دوره آماری ۱۳۶۹-۹۸ به‌کار گرفته شد. در این پژوهش، پس از پردازش اولیه آمار طولانی مدت (۹۸-۱۳۶۹) ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در شوره‌زار دشت قزوین، با استفاده از آزمون من-کندال روند پارامترهای مد نظر ارزیابی شد و مشخص شد که مقادیر رواناب روند

نتیجه سازگاری با شرایط تغییر اقلیم می‌تواند به شکل چشمگیری در افزایش بیشتر تأثیر فعالیت‌های انسانی و در نهایت در افزایش میزان آبدهی شوره‌زار مؤثر باشد.

### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش کمک کرده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

بر فرضیه بودیکو-ژانگ استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، با وجود عدم تغییر معنی‌دار بارش، افزایش دمای متوسط سالانه و تبخیر تعرق پتانسیل در سطح شوره‌زار دشت قزوین به حدی بوده است که منجر به اثر کاهنده تغییر اقلیم بر تغییرات رواناب شده است. در حالی که فعالیت‌های انسانی اثر افزایش دما دارد. بر همین اساس اثرات کاهنده تغییرات اقلیم بیشتر بر اثرات افزایش فعالیت‌های انسانی بوده، مقادیر رواناب در شوره‌زار کاهش یافته است. به‌منظور بهبود وضعیت آبدهی در سطح شوره‌زار اعمال سیاست‌های مناسب‌تر در جلوگیری از تغییرات نامناسب کاربری اراضی و در

### منابع مورد استفاده

- Abolfathi, K., Alikhah-Asl, M., Rezvani, M., 2015. Range classification and evaluation using Geographic Information System (GIS) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), case study: Hablehroud Subwatershed of Shahrabad Basin. *Hum. Environ.* 13, 45-55 (in Persian).
- Alavi, E.S., Dinpashoh, Y., Asadi, E., 2019. Analysis of hourly storms for the purpose of extracting design hyetographs using the Huff method. *Geogr. Environ. Plann.* 30, 41-58 (in Persian).
- Alavinia, M., Nasiri Saleh, F., Asadi, H., 2019. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion. *Int. J. Sediment Res.* 34, 270-278.
- Askari, A., Fathian, H., Nikbakht Shahbazi, A., Hasonizade, H., Zohrabi, N., 2022. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff reduction in Karkheh Basin by hydrologic sensitivity analysis method. *IWRR*, 16(2), 103-117 (in Persian).
- Chen, Z., Chen, Y., Li, B., 2013. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China. *JAMC*. 111(3), 537-545.
- Ghasemi, H., Mahjourimajd, N., 2021. Quantifying the impact of climate change and human activities on runoff reduction with sensitivity analysis on time series breakpoints. *JWREM*. 16(4), 284-295 (in Persian).
- Gilbert, R.O., 1987. *statistical methods for environmental pollution monitoring*. Wiley, NY.
- Han, Z., Long, D., Fang, Y., Hou, A., Hong, Y., 2019. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China. *Hydrogeol. J.* 570, 96-105.
- Hsun, Lee, C., Fu, Yeh, H., 2019. Impact of climate change and human activities on streamflow variations based on the bodyko framework. *JARWW*. 11, 1-22.
- Hu, J., Ma, J., Nie, C., Xue, L., Zhang, Y., Ni, F., Deng, Y., Liu, J., Zhou, D., Li, L., 2020. Attribution analysis of runoff change in Min-tuo River Basin based on SWAt model simulations, china. *Sci. Rep.* 10, 1-16.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank correlation methods*. 4th edition, Charles Griffin, London.
- Li, H., Zhang, Y., Vaze, J., Wang, B., 2012. Separating effects of vegetation change and climate variability using hydrological modelling and sensitivity-based approaches. *J. Hydrol. Eng.* 420, 403-418.
- Mann, H.B., 1945. Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13, 163-171.
- Naderi, M., Sheikh, V., Bahremand, A., Komaki, C.B., Ghangermeh, A., 2022. Analysis of river flow regime changes using the indicators of hydrologic alteration, case study: Hableroud Watershed. *WSMM*. 3(3), 1-19 (in Persian).
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *J. R. Stat. Soc.* 28(2), 126-135.
- Searcy, J.K., Hardison, C.H., 1960. Double-mass curves. *US. Geology Survey Water Supply Pap.* 1541-B, 27-66.
- Shahid, M., Cong, Z., Zhang, D., 2018. Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: A case study of the Soan River basin, Pakistan. *Theor. Appl. Climatol.* 134, 205-219.
- Sharifi, A., Mirabbasi, R., Nasr-Esfahani, M.A., Haghighi, A.T., Nafchi, R.F., 2021. Quantifying the impacts of anthropogenic changes and climate variability on runoff-changes in central plateau of Iran using nine methods. *J. Hydrol.* 603, 127045, 34 (in Persian).

- Sheikh, V., Naderi, M., Bahremand, A., Sadoddin, A., Abedi Tourani, M., Komaki, C.B., Ghaemi, A., 2022. Quantifying the contributions of climate change and direct human interventions to streamflow alteration in the Hableroud River using empirical approaches. *WSMM*. 3(4), 241-259 (in Persian).
- Wang, J., Hu, L., Li, D., Ren, M., 2020. Potential impacts of projected climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Wabash River Basin. *Advances in Meteorology*, 9698423
- Xu, M., Wang, G., Wang, Z., Hu, H., Singh, D.K., Tian, S., 2022. Temporal and spatial hydrological variations of the Yellow River in the past 60 years. *J. Hydrol*, 609, 127750.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *IWRR*. 37(3), 701-708.