Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Quantifying the contributions of climate change and human interventions on streamflow alteration in the Hableroud River basin using the hydrological sensitivity analysis approach based on the Budyko hypothesis

Vahedberdi Sheikh[1]*, Mahin Naderi[2], Amir Sadoddin[1], Omid Asadi Nalivan[3], Ali Keramatzadeh[4], Morteza Abedi Tourani[5], Atieh Nazari[6]

[1]Associate Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[2]Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[3]Graduated Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[4]Assistant Professor, Department of Agricultural Economics, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[5]Head of Surface Water Utilization, Regional Water Company of Tehran, Tehran, Iran
[6]Research Staff, Applied Research Group, Regional Water Company of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Climate change and human interventions are the most important factors that in combination influence the hydrological response of a watershed system. In order to increase the level of their social and economic welfare, human beings have made serious and significant interventions in nature and directly caused several changes in its functions and processes, particularly the hydrological cycle. On the other hand, global climate change imposes several impacts on the natural hydrological cycle. Therefore, the separation of the effects of direct human intervention and climate change on the hydrological processes is of great importance for land use planning, water resources management, and socio-economic development policy-making. The hydrological cycle is one of the most important natural processes subjected to human interventions and climate change, whereas its various aspects and components get altered. One of these hydrological components is the river flow discharge, which is jointly affected by climate change and human interventions, and it will have dire consequences on different aspects of human life. Human activities indirectly (through the emission of greenhouse gases) and directly (through activities such as the construction of dams, water diversion structures, water consumption for agricultural activities, and land use change) affect the hydrological cycle and the natural regime of river flows.

Materials and Methods

The area studied in this research includes the upstream part of the Hablehroud watershed draining to the Bonekouh hydrometry station. The whole study area is located within the administrative boundaries of Tehran province. Hablehroud River, which is the main drain of the watershed, has been under pressure in recent years as a result of human activities and climate changes, and its hydrological status has altered significantly during past decades attracting the attention of watershed inhabitants and local authorities mostly blame the climate change as the main cause of the hydrologic alteration. The current research is conducted in order to determine the contribution of climate change and direct human interventions on the discharge decline of the Hableroud watershed. In this research, the hydrological sensitivity analysis approach based on the Budyko hypothesis was used in order to separate the effect of climate change and direct human interventions in reducing the discharge of Habaleroud River at the location of Simindasht and Delichai hydrometric stations. The annual time series of flow discharge during the period 1981 to 2017 was used. Two solution methods by Fu and Zhang have been used to solve the Budyko equation. Prior to the calculation of the contributions, the significant change point along the time series was detected by three tests of the Buishand Range, Standard Normal Homogeneity, and the sequential Mann-Kendall.

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Results and Discussion

Despite an infinitesimal variation, all the change point detection tests showed that a significant change point occurred in the middle of the 1990s for the annual discharge time series of the both hydrometry stations of Delichai and Simindasht. The contribution of climate change on discharge in the Simindasht and Delichai hydrometry stations was, respectively, calculated as less than one and 53 % according to Fu's method and -6 and 93 % according to Zhang's method. According to Fu's method, the contribution of human intervention in the discharge change of Simindasht and Delichai stations has, respectively, been calculated as -81 and -153 %, and according to Zhang's method as -94 and -193 %. The positive percentage values indicate the incremental effect on the flow discharge and the negative values indicate the subtractive or lessening effect. The results indicated that although the absolute and percentage values of the contributions calculated by both solution methods of the Budyko equation vary somehow, the direction (positive and negative effects) and the relative magnitude of contributions of the human interventions and climate change are similar for two solution methods of the Budyko equation. As can be noticed, at both the studied hydrometry stations, the effect of human intervention is much higher than the climate change effect. Another important point is that the effect of climate change on the flow discharge is subtractive only at the Simindasht hydrometry station according to Zhang's method, and is incremental for other cases. In other words, climate change has resulted in increasing inflow discharge across the study area. Furthermore, the results of the study indicate that the effect of direct human interventions on the flow discharge is more intensive across the Delichai sub-watershed.

Conclusions

According to the results of the study, it can be concluded that the main factor in the reduction of discharge in the Habaleroud River is direct human interventions and climate change has a very small contribution to it. Due to the fact that land use change is the main indicator of human interventions done in line with the main policies and strategies, developing proper policies and strategies to prevent inappropriate land use changes is necessary. Therefore, it is suggested that local policymakers and water resources managers develop and enact policies in order to manage the human activities influencing the natural water cycle. Furthermore, the results of this study can be used as a reference for the development, exploitation, and management of water resources in the future.

Keywords: Buishand Range test, Budyko, Change point, Fu's method, Standard Normal Homogeneity test, Zhang's method

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: sheikh@gau.ac.ir

Citation: Sheikh, V., Naderi, M., Sadoddin, A., Asadi Nalivan, O., Keramatzadeh, A., Abedi Tourani, M., & Nazari, A. (2023). Quantifying the contributions of climate change and human interventions on streamflow alteration in the Hableroud River basin using the hydrological sensitivity analysis approach based on the Budyko hypothesis. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 241-259.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12114.1205
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.16.0

Received: 12 January 2023, Received in revised form: 29 January 2023, Accepted: 29 January 2023, Published online: 29 January 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 4, pp. 241-259

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵۴۶-۲۷۸۳

تعیین سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در تغییرات آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود با استفاده از رویکرد تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو

واحدبردی شیخ*[۱]، مهین نادری[۲]، امیر سعدالدین[۱]، امید اسدی نلیوان[۳]، علی کرامت‌زاده[۴]، مرتضی عابدی طورانی[۵]، عطیه نظری[۶]

[۱] دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۲] دانشجوی دکتری، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۳] دانش‌آموختهٔ دکتری، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۴] استادیار، گروه اقتصادکشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، تهران، ایران

[۵] رئیس گروه بهره‌برداری آب‌های سطحی شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران

[۶] کارشناس پژوهشی گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهران، ایران

چکیده

تغییر اقلیم و مداخلات انسانی از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پاسخ هیدرولوژیکی یک حوزهٔ آبخیز هستند. چرخهٔ هیدرولوژیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سامانه‌هایی است که تاکنون مورد مداخلات بشر قرار گرفته و جنبه‌های مختلف رفتار هیدرولوژیکی آن تغییر کرده است. منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش بخش بالادست حوزهٔ آبخیز حبله‌رود تا ایستگاه آبسنجی بنکوه است. در این پژوهش از رویکرد تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو شامل روش‌های فو و ژانگ به‌منظور تفکیک اثر تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری سیمین‌دشت و دلیچای (دورهٔ آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۷) استفاده شد. میزان اثر تغییر اقلیم در دبی جریان ایستگاه‌های سیمین‌دشت و دلیچای، طبق روش فو به‌ترتیب کم‌تر از یک درصد و ۵۳ درصد و طبق روش ژانگ به‌ترتیب ۶- و ۹۳ درصد به‌دست آمد. در حالی‌که سهم مداخلات انسانی در تغییر دبی ایستگاه‌های سیمین‌دشت و دلیچای، طبق روش فو به‌ترتیب ۸۱- و ۱۵۳- درصد و طبق روش ژانگ ۹۴- و ۱۹۳- درصد محاسبه شده است. درصدهای منفی بیان‌گر اثر کاهنده و درصدهای مثبت بیان‌گر اثر افزآینده بر دبی جریان هستند. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود در هر دو ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه، میزان تأثیر مداخلات انسانی بسیار بیش‌تر از تغییر اقلیم است. نکتهٔ مهم دیگر این‌که، اثر تغییر اقلیم بر تغییرات دبی جریان فقط مطابق روش ژانگ در ایستگاه هیدرومتری سیمین‌دشت کاهنده است و در سایر موارد افزآینده است. بنابراین طبق نتایج به‌دست آمده در این پژوهش می‌توان بیان کرد که عامل اصلی کاهش آبدهی رودخانه‌های حوزهٔ آبخیز حبله‌رود مداخلات انسانی است و تغییر اقلیم سهم قابل ملاحظه‌ای در کاهش آبدهی رودخانه‌های حوزهٔ آبخیز حبله‌رود ندارد. هم‌چنین، نتایج به‌دست آمده بیان‌گر این است که در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای، مداخلات انسانی تأثیر شدیدتری بر کاهش آبدهی آن داشته است. بنابراین، لازم است سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب در برای سیاست‌گذاری و مدیریت فعالیت‌های انسانی مؤثر در چرخهٔ طبیعی آب اقدام نمایند. هم‌چنین، از نتایج این مطالعه می‌توان به‌عنوان یک مرجع برای توسعه، بهره‌برداری و مدیریت منابع آب در آینده استفاده نمود.

کلمات کلیدی: آزمون همگنی نرمال استاندارد، آزمون بویژاند، روش فو، روش ژانگ، فرضیهٔ بودیکو، نقطهٔ تغییر

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sheikh@gau.ac.ir

استناد: شیخ، واحدبردی، نادری، مهین، سعدالدین، امیر، اسدی نلیوان، امید، کرامت‌زاده، علی، عابدی تورانی، مرتضی، و نظری، عطیه (۱۴۰۲). تعیین سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در تغییرات آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود با استفاده از رویکرد تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۲۴۱-۲۵۹.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12114.1205

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.16.0

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۴، شماره صفحه ۲۴۱ تا ۲۵۹

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از جمله عوامل تأثیرگذار بر جریان رودخانه هستند. بررسی میزان سهم هر یک از این عوامل در تغییرات جریان رودخانه‌ها باعث بهبود مدیریت منابع آبی می‌شود. به‌طور کلی عوامل تأثیرگذار بر تغییرات رواناب را می‌توان به‌صورت عوامل فیزیکی، اقلیمی و تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی تقسیم‌بندی نمود (Yao et al., 2015). افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی موجب تغییر در چرخهٔ هیدرولوژیک و مقدار رواناب در حوزه‌های آبخیز شده و تعداد رویدادهای حدی اقلیمی را افزایش داده است (Sorokin and Mondello, 2018). اما مشاهدات در بیش‌تر مناطق جهان نشان می‌دهد چرخهٔ هیدرولوژیکی علاوه‌بر تغییر اقلیم، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نیز قرار گرفته است (Huntington, 2006). فعالیت‌های انسانی مثل توسعهٔ کشاورزی، توسعهٔ شهرسازی، سدسازی و بهره‌برداری از مخازن اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر چرخهٔ هیدرولوژیک داشته و در نتیجهٔ آن توزیع زمانی-مکانی منابع آب دچار تغییر شده است (Milly et al., 2005).

در طی سال‌های اخیر، در زمینهٔ 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، Gharechaei et al. (2015) ترکیب آزمون‌های آماری در تحلیل روند و تعیین نقاط تغییر و سپس روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی که بر اساس بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل بود، به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رژیم هیدرولوژیکی حوزهٔ آبخیز بختگان در استان فارس در دورهٔ آماری ۱۳۹۱-۱۳۵۱ را استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که سهم تغییرپذیری اقلیمی در کاهش رواناب این حوزهٔ آبخیز حدود ۶۲/۴۵ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی حدود ۳۷/۵۵ درصد است. در استان کرمانشاه Sane et al. (2017) اثر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را بر آبدهی رودخانه راوند را با استفاده از مدل ون لون در طی دورهٔ آماری ۱۳۹۱-۱۳۵۱ بررسی کردند و بیان کردند که علت عمدهٔ کاهش دبی فعالیت‌های گستردهٔ انسانی است به‌طوری که در سال‌های پرآبی هم کاهش محسوس دبی جریان مشاهده می‌شود. در پژوهشی، Salmani et al. (2018) به بررسی تغییر کاربری اراضی و تأثیر آن بر رژیم هیدرولوژیکی در حوزهٔ آبخیز قزاقلی استان گلستان با استفاده از مدلSWAT پرداختند و بیان کردند که با تخریب منطقه در جهت قهقرا مقدار رواناب افزایش می‌یابد، لذا حفظ کاربری فعلی حوزهٔ آبخیز و بهبود و اصلاح آن یکی از راهکارهای اساسی برای مدیریت آب‌های سطحی حوزهٔ آبخیز مورد مطالعه است. در پژوهش دیگری، Ahmadi and Delavar (2019) با استفاده از سه رویکرد مرسوم مدل‌سازی شبکهٔ عصبی مصنوعی، میزان تغییر شیب مقدار تجمعی[1] و الاستیسیتهٔ اقلیمی[2]سهم اثرات انسانی و اقلیمی در تغییرات جریان حوزهٔ آبخیز سد کرخه و چهار زیرحوزهٔ آبخیز اصلی آن را طی دورهٔ ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این بود که سهم فعالیت‌های انسانی در کاهش جریان رودخانه با توجه به این سه رویکرد در کل حوزهٔ آبخیز، حدود ۶۰ تا ۸۳ درصد و سهم نوسانات اقلیمی حدود ۱۷ تا ۴۰ درصد در دورهٔ یاد شده است. در مطالعه‌ای، Kanani et al. (2020) اثرات فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی بر رواناب حوزهٔ آبخیز لیقوان از زیرحوزه‌های دریاچهٔ ارومیه را در طی دورهٔ آماری ۱۳۹۳-۱۳۵۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که درصد تأثیر عوامل انسانی و اقلیمی بر کاهش رواناب در تمام مدل‌های مورد استفاده به‌ترتیب بین ۸۴-۶۵ و ۳۵-۱۶ درصد بود در مطالعهٔ دیگری، Askari et al. (2022) به تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش دبی در حوزهٔ آبخیز کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی پرداختند و بیان کردند که تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی منجر به کاهش دبی به‌ترتیب برابر با ۳۶/۲ و ۶۳/۸ درصد در حوزهٔ آبخیز کرخه شده است. در ادامه، Naderi et al. (2022) تغییرات رژیم جریان رودخانهٔ حبله‌رود را با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان آبدهی حوزهٔ آبخیز حبله‌رود در دورهٔ ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ به میزان ۳۵ درصد کاهش یافته و مداخلات انسانی به‌عنوان عامل اصلی بر تغییرات هیدرولوژیکی این حوزهٔ آبخیز تأثیر می‌گذارد.

از دیگر مطالعات می‌توان به پژوهش Sheikh et al. (2022) در بررسی سهم تغییر اقلیم و مداخلات مستقیم انسانی در تغییرات آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود در دورهٔ آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ با استفاده از رویکردهای تجربی اشاره کرد. آن‌ها بیان کردند که مداخلات انسانی عامل اصلی کاهش دبی در این حوزهٔ آبخیز بوده است. هم‌چنین، Bao et al. (2012) با استفاده از آزمون من-کندال و مدل VIC3 تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را بر کاهش جریان حوضهٔ رودخانهٔ Haihe در شمال چین در طول دوره‌های

[1] Slope change ratio of accumulative quantity (SCRAQ)
[2] Climate elasticity index

۱۹۵۱تا ۲۰۰۷ بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تغییرات آب و هوایی عامل اصلی کاهش جریان در حوزهٔ آبخیز Taolinkouو از طرف دیگر فعالیت‌های انسانی عامل اصلی کاهش جریان حوزهٔ آبخیز Zhangjiafen و Guantai بوده است. از سایر پژوهش‌ها، Ye et al. (2013) به بررسی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رواناب حوضهٔ دریاچهٔ پویانگ در چین در دورهٔ ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۷ پرداختند و بیان کردند که تغییر اقلیم موجب افزایش رواناب شده در حالی‌که مداخلات انسانی باعث کاهش رواناب در این حوضه شده است. در پژوهشی، Zhao et al. (2014) به ارزیابی تأثیرات احتمالی تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی بر روی جریان حوضهٔ رودخانهٔ Yellow در چین در طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰ با استفاده از منحنی بودیکو (مدل سادهٔ بیلان آب) و رگرسیون خطی پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تغییرات آب و هوایی تأثیر بیش‌تری در کاهش جریان رودخانه‌های Beiluo و Yan دارد در حالی‌که به‌طورکلی فعالیت‌های انسانی به‌عنوان عوامل حاکم بر کاهش چشم‌گیر جریان سالانه در شش دههٔ گذشته شناخته شده است. در ادامه، Gao et al. (2016) پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز مختلف Loess Plateau را به تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی با استفاده از روش الاستیسیته تعیین کردند و نشان دادند که در ۱۰ حوزهٔ آبخیز از ۱۵ حوزهٔ آبخیز مورد بررسی، سهم فعالیت‌های انسانی بیش از ۶۰ درصد است. در مطالعه‌ای، Chang et al. (2016) تأثیر تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی در جریان حوضهٔ Jinghe واقع در شمال غربی چین در طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ را با استفاده ازروش مبتنی بر الاستیسیته ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که حداکثر ارزش سهم فعالیت‌های انسانی مانند اقدامات حفاظت آب و خاک و برداشت آب برای صنعت و تقاضای آب کشاورزی در طی سال‌های ۱۹۸۱–۱۹۹۰ به‌طور متوسط برابر ۹۹ درصد بود در حالی‌که تغییرات آب و هوایی دارای بیش‌ترین سهم در کاهش جریان در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ بوده است. در مطالعهٔ دیگری، Wu et al. (2017) در حوضهٔ رودخانه Yanghe در چین با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT، رگرسیون خطی، منحنی جرم مضاعف، الاستیسیته‌محور و روش بودیکو در طی دورهٔ آماری ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۱ اثرات تغییر اقلیم و مداخلات انسانی را بر رژیم جریان بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات آب و هوایی نقش اصلی را در کاهش دبی رودخانه را داشته است. در ادامه، Han et al. (2019) از مدل هیدرولوژیکی توزیع شده Crest-Snow همراه با داده‌های سنجش از دور، دبی جریان و چارچوب بودیکو به‌طور مشترک استفاده کردند و تأثیرات تغییرات آب و هوایی و مداخلات انسانی بر رژیم جریان سد Lancang در جنوب غربی چین طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این بود که تغییرات آب و هوایی در فصل خشک (دسامبر–می) نقش مهمی دارد و در میان متغیرهای اقلیمی مهم‌ترین عامل بارش است. در حالی‌که فعالیت‌های انسانی در طول فصل مرطوب (ژوئن–نوامبر) باعث کاهش رواناب می‌شوند هم‌چنین، Hsun Lee and Fu Yeh (2019) تأثیرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تغییرات جریان حوضه‌های رودخانهٔ شمال تایوان در طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ را با استفاده از روش الاستیسیته براساس چارچوب بودیکو بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تغییرات بارش حساس‌ترین عامل در تغییرات جریان بودند. در نهایت، Xu et al. (2022) در کشور چین تغییرات زمانی و منطقه‌ای در هیدرولوژی رودخانهٔ زرد را در ۶۰ سال گذشته بررسی کردند. نتایج این پژوهش بیان‌گر این بود که فعالیت‌های انسانی، ساخت سد و بهره‌برداری از منابع آب همگی تأثیر قابل توجهی بر تغییرات هیدرولوژیکی در این رودخانه داشته‌اند.

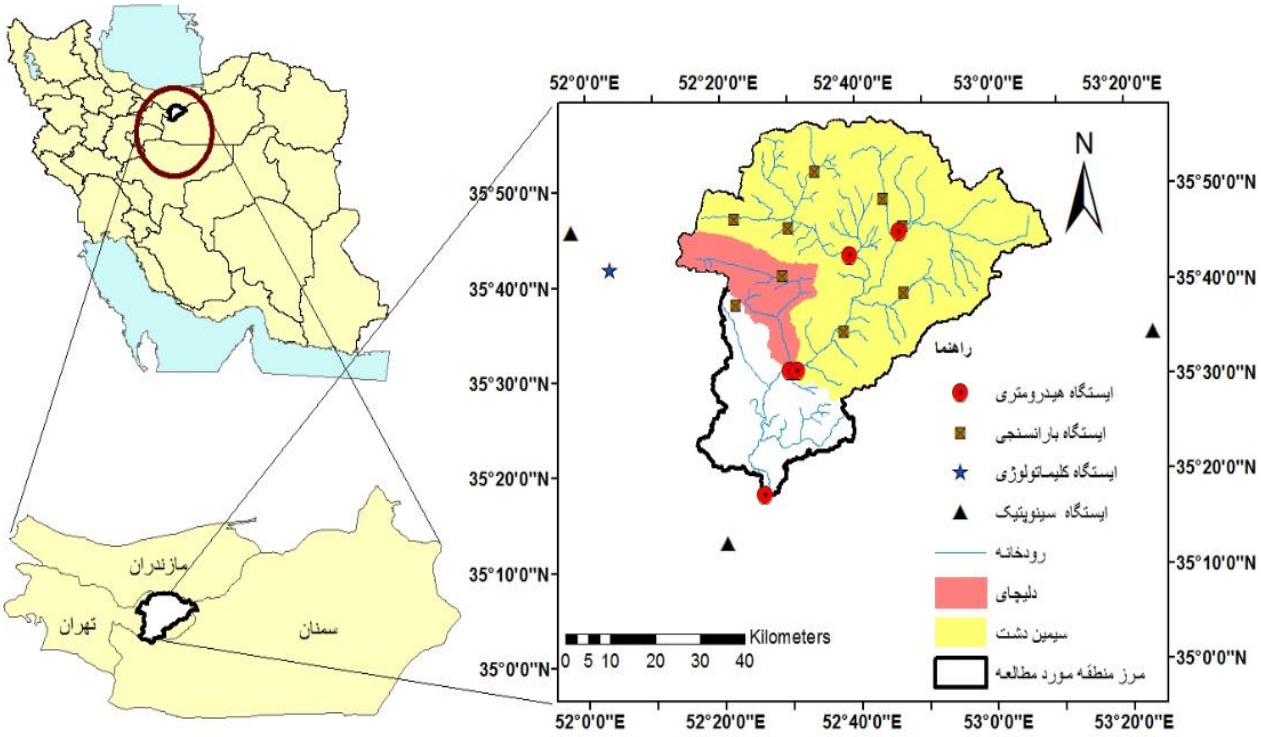
تعیین اثرات عوامل اقلیمی و انسانی بر کاهش جریان آب جهت مدیریت منابع و مصارف و برنامه‌ریزی‌های آتی آب و تأمین حقابه‌ها امری ضروری است. هم‌چنین، افزایش سریع جمعیت به همراه افزایش تقاضای آب برای بخش‌های مختلف، منابع آبی را با چالش‌های جدی روبه‌رو می‌کند. بنابراین، اخیراً تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران به سمت مدیریت پیامدهای تأثیرات هیدرولوژیکی تغییرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی بر مدیریت بهینهٔ منابع آب روی آورده‌اند (Sun et al., 2005). منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش شامل بخش بالادست حوزهٔ آبخیز حبله‌رود تا ایستگاه آبسنجی بنکوه است که در محدودهٔ سیاسی استان تهران واقع شده است. حوزهٔ آبخیز حبله‌رود، تأمین‌کنندهٔ اصلی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت‌های فیروزکوه، گرمسار و سمنان است که دارای فعالیت‌های گستردهٔ کشاورزی و صنعتی است. اما آمارها و شواهد زمینی و اظهارات مسئولین و مدیران منطقه‌ای و محلی حاکی از کاهش قابل ملاحظهٔ آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود و اُفت شدید سطح ایستابی آبخوان‌های منطقه است (Sheikh et al., 2018). بنابراین پژوهش حاضر با هدف تعیین سهم تغییر اقلیم و مداخلات مستقیم انسانی در کاهش دبی رودخانه‌های حوضهٔ حبله‌رود انجام شده است. بررسی ادبیات علمی موضوع پژوهش نشان داد که رویکردها

و روش‌های مختلفی برای کمی‌سازی و تفکیک سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در تغییرات رژیم هیدرولوژیکی وجود دارد. در همین راستا، Sheikh et al. (2022) با استفاده از تعدادی از روش‌های مبتنی بر رویکرد تجربی، سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی را در تغییرات آبدهی این حوضه تعیین و گزارش نموده‌اند. در پژوهش حاضر، از روش‌های مبتنی بر رویکرد مفهومی استفاده می‌شود. در رویکرد مفهومی، بر خلاف رویکرد تجربی که از روابط صرفا آماری استفاده می‌شود از رابطهٔ مفهومی بیلان هیدرولوژیکی طولانی مدت استفاده می‌شود. برای این منظور، بعد از بررسی آماری وضعیت منابع آب و تعیین نقطه شکست در سری زمانی جریان ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری سیمین‌دشت و دلیچای، با استفاده از روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو نسبت به کمّی‌سازی اثرات عوامل مختلف طبیعی و انسان‌ساز در ایجاد تغییرات آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود پرداخته می‌شود تا سهم عوامل تأثیر گذار تعیین شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ موقعیت منطقهٔ مطالعاتی

منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش شامل بخش بالادست حوزهٔ آبخیز حبله‌رود تا ایستگاه آبسنجی بنکوه است که در محدودهٔ سیاسی استان تهران واقع شده و مساحت آن حدود ۳۲۰۰ کیلومترمربع است. از نظر مختصات جغرافیایی در محدودهٔ طول ۱۹″ ۱۱′ ۵۲° تا ۴۰″ ۸′ ۵۳° شرقی و عرض ۵۴′۱۷″ ۳۵° تا ۵۷′۲۹″ ۳۵° شمالی واقع شده است. تراکم جمعیتی و مناطق مسکونی حوزهٔ آبخیز نسبتاً کم است و با توجه به کوهستانی بودن حوزهٔ آبخیز، اراضی زراعی نیز اکثر باغ و کشاورزی آبی است که محدود به بستر دره‌ها و پادگانهٔ رودخانه‌ها در بالادست و دشت‌های کوچک پراکنده در پایین‌دست است. کاربری غالب منطقه مرتع و با پوشش‌گیاهی فقیر تا متوسط است. براساس سیستم طبقه‌بندی آمبرژه، اقلیم حوزهٔ آبخیز حبله‌رود نیمه‌خشک سرد و بر اساس روش دومارتن نیمه‌خشک ارتفاعی است (Tehran Regional Water Company, 2012). متوسط بارندگی سالانهٔ حبله‌رود شمالی (منطقهٔ مورد مطالعه) حدود ۴۰۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانهٔ آن حدود ۱۱ درجهٔ سانتی‌گراد است (Sheikh et al., 2017). در شکل ۱ موقعیت مکانی این حوزهٔ آبخیز نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزهٔ آبخیز حبله‌رود در استان تهران و ایران

Figure 1- The geographical location of the Hableroud watershed in Tehran province and Iran

۲-۲ روش‌کار

در این پژوهش به‌منظور تعیین سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود، ابتدا روند تغییرات آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری سیمین‌دشت و دلیچای مورد بررسی قرار گرفت و بعد از مشخص‌شدن روند تغییرات دبی، نقطهٔ تغییر معنادار در جریان آبدهی با استفاده از روش‌های مختلف تعیین شد. سپس با استفاده از روش‌های تجربی تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو–روش فو و تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو–روش ژانگ اثر تغییراقلیم و کاربری اراضی در کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود در دورهٔ آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲-۱- تحلیل آماری متغیرهای هیدروکلیمایی

با استفاده از آمار روزانهٔ ایستگاه‌های سیمین‌دشت و دلیچای و از طریق محاسبهٔ رگرسیون خطی و نرخ تغییرات با استفاده از شیب خط روند، روند تغییرات دبی متوسط سالانهٔ حبله‌رود مشخص شد (Sheikh et al., 2009). داده‌های روزانهٔ اقلیمی نیز از آمار مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی داخل و اطراف حوزهٔ آبخیز حبله‌رود، به‌دست آمد. در شکل ۱ موقعیت این ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. به‌منظور بررسی تغییرات متغیرهای اقلیمی سالانه نیز رگرسیون خطی و شیب خط روند استفاده شد. به این ترتیب معناداری یا عدم معناداری روند تغییرات و جهت و نرخ روند تغییرات برای هرکدام از متغیرهای مورد بررسی در مقیاس سالانه مشخص شد.

۲-۲-۲- تعیین نقطهٔ تغییر در دبی سالانه

برای شناسایی نقاط تغییر معنادار در سری‌های آبدهی ایستگاه‌های مورد مطالعه از آزمون‌های همگنی نرمال استاندارد[3] بویژاند[4] و آزمون دنبالهٔ من–کندال[5] استفاده شد.

۲-۲-۲-۱- تعیین نقطهٔ شکست با آزمون همگنی نرمال استاندارد

یکی از متداول‌ترین روش‌های بررسی همگنی داده‌ها، روش همگنی نرمال استاندارد است. این آزمون همگنی به شکست‌های ابتدایی و انتهایی بسیار حساس است و امکان شناسایی موقعیت زمانی ناهمگنی و شدت آن را فراهم می‌کند. هم‌چنین، برای مطالعهٔ روند مصنوعی در سری زمانی آب و هوایی مناسب است. فرض صفر این آزمون، همگنی سری را همراه با توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یک در مقابل ناهمگنی سری و وجود حداقل یک نقطه مانند M که داده‌های قبل از آن با میانگین μ_1 و داده‌های بعد از آن با میانگین μ_2 باشند را ارائه می‌کند (Alexandersson, 1986). برای انجام این آزمون، سری داده‌ها به‌صورت سری استاندارد شده Zi که i= 1,2,…,n در می‌آید سپس دنبالهٔ T_k از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود:

$$T_K = K\bar{Z}_K^2 + (n-k)\bar{z}_{n-k}^2 \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا، برای k= 1,2,…n-1، $\bar{Z}_k$ میانگین K داده اول و $\bar{Z}_{n-k}$ میانگین n-k دادهٔ باقی است، رسم می‌شود. راهکارهای دیگری نیز برای بررسی بیش از چند نقطهٔ ناهمگن برای این آزمون در نظر گرفته شده است. آمارهٔ این آزمون در حقیقت بیشینهٔ $T_o=Max\ T_K$ است، که به‌عنوان نقطهٔ تغییر نیز شناخته می‌شود (Alexandersson and Moberg, 1997).

۲-۲-۲-۲- تعیین نقطهٔ شکست با آزمون بویژاند

این آزمون همگنی بر پایهٔ جمع‌های جزئی تعدیل شده و یا انحرافات تجمعی از میانگین بنا نهاده شده و توسط Buishand (1984) برای سری‌های زمانی ارائه شده است (رابطهٔ ۲).

$$S_{K=}^{*} \sum_{i=1}^{K}(Y_i - \bar{Y}) \quad K= 1,2\ ..,\ n\ S_{0=0}^{*} \qquad (۲)$$

در این رابطه، $\bar{Y}$ مقدار متوسط از Y_i و S_0^* است. در ادامه، مقادیر S_k^{**} نیز از تقسیم S_k^* بر انحراف معیار داده‌ها (Dy) به‌دست می‌آید.

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{Dy} \quad K=1,\ 2,\ \ldots,\ n \qquad (۳)$$

در این رابطه مقادیر بیش‌تر Q بیان‌گر تغییرات و ناهمگنی سری‌های زمانی است، در صورتی‌که آمارهٔ محاسبه شدهٔ $Q/\sqrt{n}$ بزرگ‌تر از مقدار بحرانی آمارهٔ آزمون باشد، سری زمانی ناهمگن است (Kazemzadeh et al., 2016).

$$Q=\max \left| S_k^{**} \right| 0 \le k \le n \qquad (۴)$$

در پژوهش حاضر پس از تعیین نقطهٔ شکست در سری زمانی جریان، برای تعیین سهم تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی در تغییرات آبدهی رودخانه‌های حوزهٔ آبخیز حبله‌رود از روش حساسیت هیدرولوژیکی به‌عنوان یک روش مبتنی بر داده‌های مشاهداتی (آمار) استفاده شد.

۲-۲-۲-۳- تعیین نقطهٔ شکست با آزمون دنبالهٔ من–کندال

آزمون دنبالهٔ من–کندال (Sneyres, 1990) برای ارزیابی و شناسایی نقطهٔ تغییر در سری زمانی طولانی مدت Xi به‌کار می‌رود. اساس کار این آزمون به این صورت است که هر دادهٔ Xi

[3] Standard normal homogeneity test
[4] Buishand range test
[5] Sequence Mann-Kendall test

(i = 2, …, n) با دادهٔ Xj (j = 1, …, i-1) در سری زمانی مقایسه می‌شود و تعداد دفعاتی که Xi بزرگ‌تر از Xj است شمرده و به‌عنوان آمارهٔ t_i محسوب می‌شود و دارای توزیع نرمال بوده و میانگین و واریانس آن طبق رابطه‌های (۵) و (۶) به‌دست می‌آید. هم‌چنین، مقادیر دنبالهٔ آمارهٔ U(t) از طریق رابطهٔ (۷) برآورد می‌شود.

$$E(t_i) = \frac{i(i-1)}{4} \quad (۵)$$

$$Var(t_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72} \quad (۶)$$

$$U(t_i) = \frac{t_i - E(t_i)}{\sqrt{Var(t_i)}} \quad (۷)$$

دنبالهٔ U(t) همانند مراحل بالا محاسبه می‌شود با این تفاوت که نقطهٔ شروع داده‌ها آخر سری زمانی Xi است.

۳-۲-۲- تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو-روش فو

بودیکو (۱۹۷۴) یک رابطهٔ نیمه‌تجربی را برای تعادل آب و انرژی ارائه و بیان کرد که نسبت میانگین تبخیر سالانه به میانگین بارش سالانه (E/P) با نسبت میانگین تبخیر بالقوه به میانگین بارش سالانه (EP/P) و یک عامل محدود کننده (پارامتر رابطه) کنترل می‌شود. برای حوزه‌های آبخیز با EP/P کم‌تر از یک، منبع انرژی عامل محدودکنندهٔ تبخیر است، در حالی‌که برای حوزه‌های آبخیز با EP/P بزرگ‌تر از یک، تأمین منابع آب عامل محدودکننده است. در پژوهشی، Wang and Hejazi (2011) براساس فرضیهٔ بودیکو برای کمّی‌سازی سهم نسبی تغییر آب و هوا و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب متوسط سالانه از رابطهٔ کلی بیلان هیدرولوژیکی در طولانی‌مدت در مقیاس حوزهٔ آبخیز استفاده کردند.

$$P = AE + Q \quad (۸)$$

در آن P، AE، Q به‌ترتیب متوسط بارندگی طولانی‌مدت، تبخیر و تعرق واقعی و جریان رودخانه است. مؤلفهٔ جریان رودخانه شامل جریان سطحی (هورتونی یا دونین)، جریان پایه و جریان زیرقشری است. مشکل اصلی در رابطهٔ بیلان آب، یافتن تبخیر-تعرق واقعی است که با تغییر در تبخیر-تعرق پتانسیل، شرایط جوی و تغییر در فرآیندهای سطح زمین کنترل می‌شود. بودیکو (۱۹۷۴) نسبت میانگین تبخیر-تعرق واقعی سالانه به میانگین بارش سالانه (AE/P) را به‌عنوان تابعی از نسبت میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه به میانگین بارش سالانه (PE/P) و سایر خواص آبخیز فرض کرد. نسبت PE/P بیان‌گر شاخص خشکی است.

$$\frac{AE}{P} = f\left(\frac{PE}{P}, \text{Watershed properties}\right) \quad (۹)$$

فو (۱۹۸۱) رابطهٔ فوق را به‌صورت تابع ریاضی زیر بیان کرد که برای حوزه‌های آبخیز با ویژگی‌های مختلف صدق می‌کند.

$$\frac{AE}{P} = 1 + \frac{PE}{P} - \left[1 + \left(\frac{PE}{P}\right)^w\right]^{1/w} \quad (۱۰)$$

در آن w، بیان‌گر فعل و انفعال متقابل بین نوع پوشش‌گیاهی، خصوصیات خاک و توپوگرافی می‌باشد (Ma et al., 2008). مقادیر بالاتر w ویژگی‌هایی از حوزهٔ آبخیز را که به نفع تبخیر-تعرق (برای حوضه‌های دارای پوشش‌گیاهی متراکم) هستند نشان می‌دهند و مقادیر کم‌تر w، ویژگی‌هایی را نشان می‌دهند که به نفع تبخیر-تعرق نیستند (Zhang et al., 2004). کاربرد فرضیهٔ بودیکو در این زمینه می‌تواند با نسبت بین مقادیر AE و PE طولانی‌مدت به مقدار Pتبیین شود. فعالیت‌های انسانی مانند تغییر در کاربری اراضی و شهرنشینی بر AE تأثیر می‌گذارد در حالی‌که تغییر در خصوصیات خاک و شرایط آب و هوایی فقط توسط PE و P کنترل می‌شود (Dooge et al., 1992). این فرضیه برای تدوین دستورالعمل‌هایی برای تفکیک میزان تأثیرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در جریان آبدهی استفاده شده است. یکی از روش‌های ساده برای کاربرد این فرضیه، روش کشسانی تغییرات اقلیمی است که توسط Schaake (1989) به‌صورت رابطهٔ (۱۱) پیشنهاد شده است:

$$\Delta Q_c = \left(\varepsilon_P \frac{\Delta P}{P} + \varepsilon_{PE} \frac{\Delta PE}{P}\right) Q \quad (۱۱)$$

در آن ε_P و ε_{PE} ضرایب کشسانی جریان آبدهی مربوط به تبخیر-تعرق پتانسیل و بارندگی هستند و مجموع آن‌ها یک است و ΔQc تغییرات دبی جریان در نتیجهٔ تغییرات اقلیمی است.

بر اساس رابطهٔ بیلان آب طولانی‌مدت (P = AE + Q)، رابطهٔ (۱۲) برای استنباط رابطهٔ شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه (Q) به‌کار گرفته می‌شود (Lv et al., 2018):

$$Q = [P^w + PE^w]^{1/w} - PE \quad (۱۲)$$

بنابراین با گرفتن مشتق جزئی از رابطهٔ بالا میزان حساسیت دبی جریان (Q) به بارش (P)، تبخیر-تعرق پتانسیل (PE) و ویژگی‌های حوزهٔ آبخیز (w) به‌شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \left[1 + \left(\frac{PE}{P}\right)^w\right]^{1/w-1} \quad (۱۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial PE} = \left[1 + \left(\frac{P}{PE}\right)^w\right]^{1/w-1} - 1 \quad (۱۴)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial w} = [P^w + PE^w]^{1/w} \cdot \left[-\frac{1}{w^2} \cdot \ln(P^w + PE^w) + \frac{1}{w} \cdot \frac{1}{P^w + PE^v} + \ln PE \cdot PE^w)\right] \quad (۱۵)$$

مقدار w از روش حداقل مربعات قابل محاسبه است. بنابراین، با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری، میانگین متغیرهای بارش، تبخیر–تعرق پتانسیل و دبی متوسط برای هر یک از زیرحوزه‌ها برای کل دورهٔ آماری، دورهٔ قبل از تغییر و دورهٔ بعد از تغییر محاسبه می‌شود و سپس مقدار w از روش حداقل مربعات برای دوره‌های قبل و بعد از تغییرات محاسبه می‌شود و سهم اثر تغییر اقلیم و تغییر ویژگی‌های آبخیز (تغییرات انسانی) از رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\Delta Q_{climate} = \partial Q/\partial P \,.\, \Delta P + \partial Q/\partial PE \,.\, \Delta PE \qquad (۱۶)$$

$$\Delta Q_{watershed} = \partial Q/\partial w \,.\, \Delta w \qquad (۱۷)$$

برای استفاده از این روش، ابتدا میزان حساسیت دبی جریان (Q) به بارش (P)، تبخیر–تعرق پتانسیل (PE) و ویژگی‌های حوزهٔ آبخیز (w) با استفاده از سری داده‌های مشاهداتی سالانهٔ ۱۹۸۱ الی ۲۰۱۷ محاسبه شد. سپس، میانگین سری داده‌های مشاهداتی رواناب، بارش و تبخیر–تعرق پتانسیل حوزهٔ آبخیز حبله‌رود در ایستگاه‌های دلیچای و سیمین‌دشت برای دورهٔ قبل از تغییر و بعد از تغییر محاسبه شد و با استفاده از رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲)، مقدار پارامتر ویژگی‌های حوزهٔ آبخیز (w) برای دوره‌های قبل و بعد از تغییر واسنجی شد.

۴-۲-۲- تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو –روش ژانگ

Zhang (2001) فرضیهٔ بودیکو را به‌صورت یک تابع دو پارامتری که شامل میانگین تبخیر–تعرق سالانهٔ واقعی (AE)، بارندگی (P)، تبخیر–تعرق احتمالی (PE) و ویژگی‌های حوزهٔ آبخیز (w) که خود تابعی از نوع پوشش‌گیاهی، خصوصیات خاک و ویژگی‌های توپوگرافیکی است به شرح زیر معرفی کردند:

$$\frac{AE}{P} = \frac{1 + W\frac{PE}{P}}{1 + W\frac{PE}{P} + \left(\frac{PE}{P}\right)^{-1}} \qquad (۱۸)$$

از آن‌جائی‌که بارش و تبخیر–تعرق پتانسیل فاکتورهای اصلی مؤثر بر متوسط بیلان آب سالانه هستند، تغییرات در دبی جریان رودخانه در اثر تغییرات اقلیمی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$\Delta Q^{C} = \frac{\partial Q}{\partial P}\Delta P + \frac{\partial Q}{\partial PET}\Delta PET = \beta\Delta P + \gamma\Delta PET \qquad (۱۹)$$

در رابطهٔ بالا، ΔQ^{c}، ΔP و ΔPET به‌ترتیب تغییر در دبی جریان، بارش و تبخیر–تعرق پتانسیل است؛ β حساسیت دبی جریان به بارش و γ حساسیت دبی جریان به تبخیر–تعرق پتانسیل است. در ادامه، Zhang et al. (2001) رابطه‌های (۲۰) و (۲۱) را برای محاسبهٔ مقادیر پارامترهای β و γ با استفاده از شاخص خشکی Φ که نسبت بین تبخیر–تعرق پتانسیل به بارش است معرفی کردند.

$$\beta = \frac{1 + 2\emptyset + 3w\emptyset}{(1 + \emptyset + w\emptyset^{2})^{2}} \qquad (۲۰)$$

$$\gamma = \frac{1 + 2w\emptyset}{(1 + \emptyset + w\emptyset^{2})^{2}} \qquad (۲۱)$$

مقدار w در این روش با استفاده از سری داده‌های مشاهداتی سالانهٔ بارش، تبخیر–تعرق پتانسیل و دبی جریان در دورهٔ آماری ۱۹۸۱ الی ۲۰۱۷ با استفاده از رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) و روش حداقل مربعات برای هر کدام از ایستگاه‌های دلیچای و سیمین‌دشت به‌ترتیب ۱/۷۳و ۱/۶۰ به‌دست آمد.

اصل محوری این روش، مدل بیلان هیدرولوژیکی است. در این‌جا فرض بر این است که تغییرات ذخیرهٔ رطوبت خاک می‌تواند برای مدت طولانی (حداقل ۱۰ سال) نادیده گرفته شود (Chen et al., 2013). بنابراین تغییرات متوسط جریان سالانه (ΔQ^{total}) را می‌توان به‌صورت رابطهٔ (۲۲) محاسبه کرد:

$$\Delta Q^{Total} = \bar{Q}2 - \bar{Q}1 = \Delta Q^{c} + \Delta Q^{H} \qquad (۲۲)$$

در آن $\bar{Q}1$ و $\bar{Q}2$ به‌ترتیب به میانگین جریان سالانه پس و قبل از نقطهٔ تغییر دلالت دارد. فرض اصلی در این روش شبیه به مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که قبل از نقطهٔ تغییر، تغییر در جریان فقط به‌دلیل تغییرات آب و هوا و پس از نقطهٔ تغییر، هم تغییر آب و هوا و هم فعالیت‌های انسانی مسئول تغییرات جریان هستند. علاوه‌بر این، این روش می‌تواند برای تحلیل تأثیرات تغییرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی تنها در مقیاس‌های سالانه و با استفاده از مجموعه داده‌های بلندمدت 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 به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

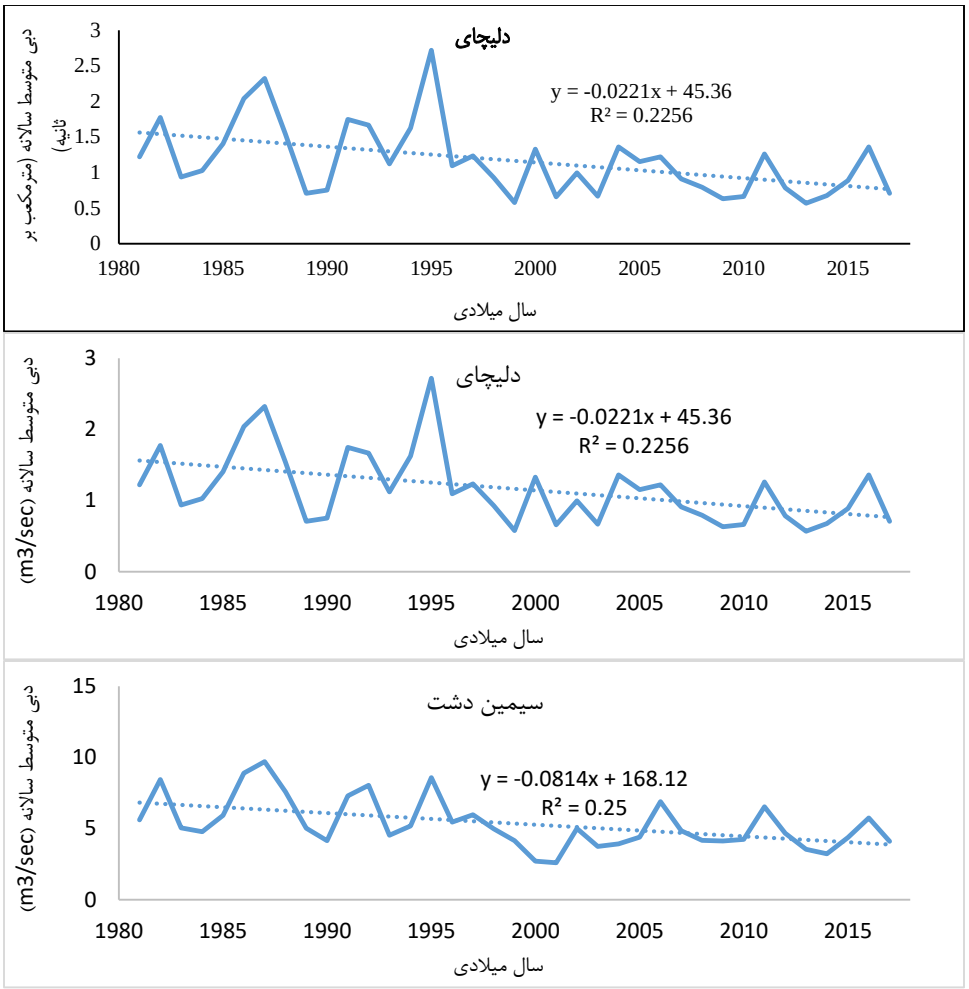
$$\%Q_{C} = \frac{\Delta Q^{c}}{\Delta Q_{Total}} \times 100 \qquad (۲۳)$$

$$\%Q_{H} = \frac{\Delta Q^{H}}{\Delta Q_{Total}} \times 100 \qquad (۲۴)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی روند و نقطه تغییر در جریان آبدهی

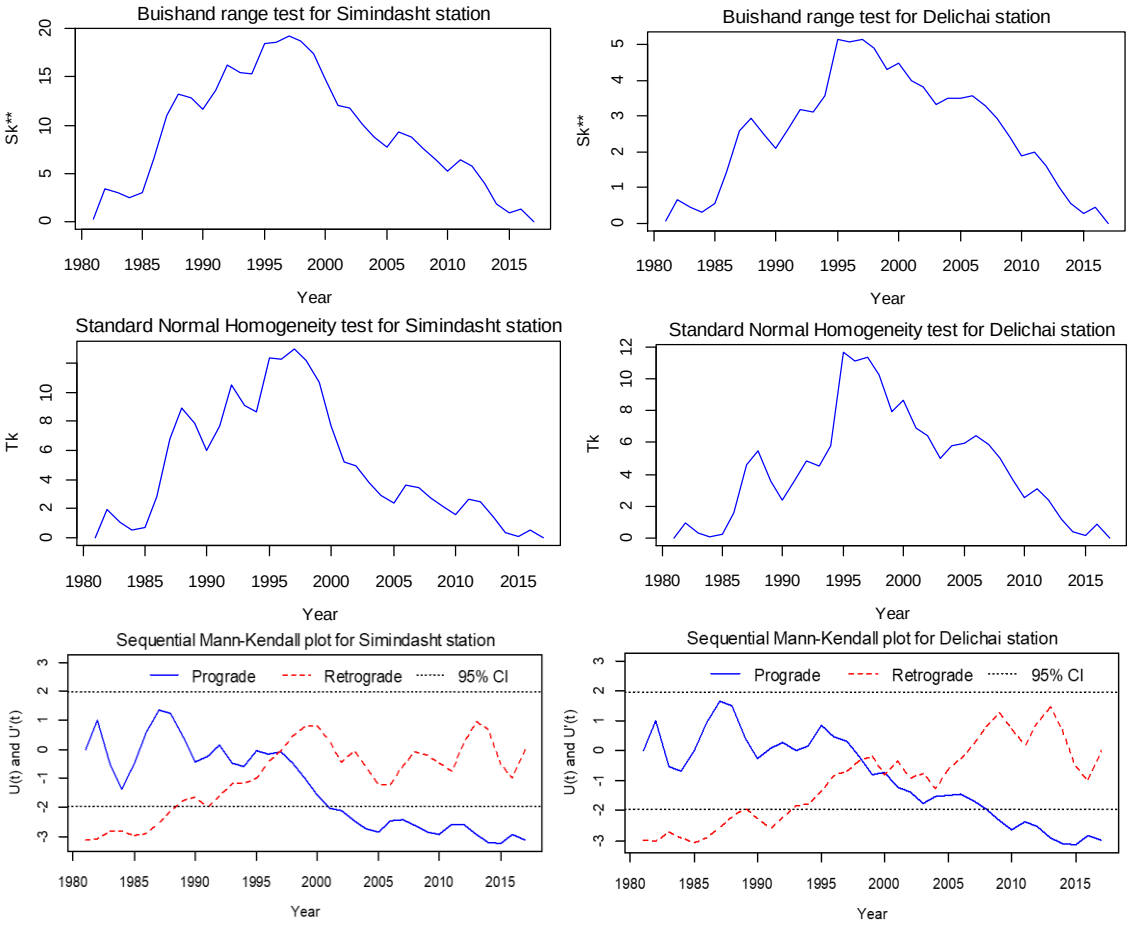
نتایج مربوط به بررسی روند تغییرات دبی متوسط سالانهٔ حوزهٔ آبخیز حبله‌رود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری دلیچای و سیمین‌دشت در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متوسط دبی سالانه در حوزهٔ آبخیز مورد مطالعه دارای روند نزولی معناداری طی دورهٔ آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۷ است.



شکل ۲- روند کاهش آبدهی سالانه ایستگاه‌های هیدرومتری دلیچای و سیمین دشت در دورهٔ آماری ۱۹۸۱ الی ۲۰۱۷

Figure 2- Decreasing trend of annual discharge at the Delichai and Simindasht hydrometry station during 1981-2017

بعد از مشخص کردن روند دبی سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه، بر اساس سری‌های آبدهی متوسط سالانهٔ ایستگاه‌های منتخب، سال شروع تغییر معنادار (نقطهٔ تغییر) با استفاده از آزمون‌های آماری بویژاند (Buishand)، همگنی نرمال استاندارد (Standard Normal Homogeneity) و من–کندال دنباله‌ای (Sequential Mann-Kendall) شناسایی شد. نتایج استفاده از این آزمون‌ها در ایستگاه‌های سیمین‌دشت و دلیچای در شکل ۳ نشان داده شده است. در روش‌های بویژاند و همگنی نرمال استاندارد، محل نقطهٔ تغییر جایی است که مقدار آمارهٔ مورد نظر به حداکثر می‌رسد. در روش من–کندال دنباله‌ای، محل نقطهٔ تغییر معنادار جایی است که منحنی پس‌رونده (Retrograde) منحنی پیش‌رونده (Prograde) را از پائین به بالا قطع می‌کند. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج روش‌های مختلف مورد استفاده در تعیین نقطهٔ تغییر معنادار در سری‌های زمانی آبدهی سالانهٔ ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده وجود دارد. همان‌طورکه در جدول ۱ ملاحظه می‌شود سال نقطهٔ تغییر به‌دست آمده برای هر ایستگاه با استفاده از روش‌های مختلف اندکی متفاوت است. بنابراین، میانگین سال‌های به‌دست آمده از روش‌های مختلف به‌عنوان سال انتهای دورهٔ جریان طبیعی و شروع دورهٔ تغییرات انتخاب شد. در این راستا، Sheikh et al. (2022) نیز در همین حوزهٔ آبخیز با استفاده دو آزمون پتیت و لانزانته نقطهٔ تغییر معنادار را سال ۱۹۹۷ گزارش کرده‌اند. بنابراین، نتایج شناسایی نقطهٔ تغییر معنادار در سری آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه از استواری بالایی برخوردار است.



شکل ۳- نتایج آزمون‌های تعیین نقطهٔ تغییر برای سری آبدهی متوسط سالانه در ایستگاه‌های هیدرومتری دلیچای و سیمین‌دشت

Figure 3- The results of different change point detection tests for the annual time series of discharge at the Delichai and Simindasht hydrometry stations

جدول ۱- زمان وقوع تغییر معنادار در سری زمانی دبی سالانهٔ ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده

Table 1- Time of significant change point in the annual time series of discharge at the studied hydrometry stations

زیرحوزه	آزمون نقطهٔ تغییر			میانگین
	Buishand range	Standard normal homogeneity	Sequential Mann-Kendall	
دلیچای	1997	1995	1998	1997
سیمین‌دشت	1997	1997	1997	1997

۲-۳- تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو-روش فو

نتایج کاربرد روش تفکیک سهم اثرات تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر رواناب زیرآبخیزهای حبله‌رود شمالی با استفاده از روش بودیکو - فو در جدول ۲ خلاصه شده است.

همان‌طورکه دیده می‌شود در این جدول مقادیر متغیرهای دبی، بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل و پارامتر حوزهٔ آبخیز و تغییرات آن‌ها در دو دورهٔ آماری قبل و بعد از نقطهٔ تغییر، میزان و سهم تأثیر تغییرات اقلیمی (به همراه سهم متغیرهای بارش و تبخیر-تعرق) و تغییرات مشخصات حوزهٔ آبخیز ناشی از فعالیت‌های انسانی و میزان خطای این روش ارائه شده است. ارائه میزان خطا از مزیت‌های اصلی این روش است. مطابق این روش بیش‌ترین کاهش آبدهی مطلق (۵۲/۰۳ میلی‌متر) در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای اتفاق افتاده است. این در حالی است که در این زیرحوزهٔ آبخیز به‌خاطر افزایش مقدار بارش متوسط زیرحوزهٔ آبخیز در دورهٔ بعد از تغییر، تغییر اقلیم باعث افزایش آبدهی مطلق به مقدار ۳۱/۴۴ میلی‌متر و افزایش نسبی آبدهی به مقدار ۶۰/۴۳ درصد شده است. سهم مطلق (۳/۶۴- میلی‌متر) و نسبی (۷- درصد) تبخیر-تعرق در تغییرات

آبدهی این زیرحوزهٔ آبخیز، در مقایسه با سهم بارش خیلی کم است و بر خلاف بارش، در جهت کاهش آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز اثر گذاشته است. سهم تغییر اقلیم در تغییرات آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت خیلی کم‌تر از زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای است. اگرچه جهت تأثیر آن مشابه زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای است. کاهش سهم تأثیر تغییر اقلیم در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت در مقایسه با زیرحوزهٔ آبخی دلیچای، مربوط به اثر تغییر بارش است که در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت (۶/۶۱+ میلی‌متر) بسیار کم‌تر از زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای (۷۷/۷۷+ میلی‌متر) است. میزان تغییرات ناشی از مداخلات انسانی که در روش فو با تغییرات مقدار پارامتر w نشان داده می‌شود که در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای (۰/۵۵) بیش‌تر از زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت (۰/۱۹) است. سهم مطلق (۷۹/۵۷- میلی‌متر) و نسبی (۱۵۲/۹۲- درصد) مداخلات انسانی در تغیرات آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای بسیار بیش‌تر از سهم مطلق (۲۳/۸۱- میلی‌متر) و نسبی (۸۱/۰۷- درصد) آن در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت است. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که شدیدترین مداخلات انسانی در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای اتفاق اُفتاده و علیرغم روند صعودی بارندگی در آن، باعث کاهش شدید آبدهی آن شده است. در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت سهم مؤلفه‌های بارش و تبخیر- تعرق در تغییرات آبدهی از نظر مقدار مطلق و نسبی خیلی به‌هم نزدیک بوده، ولی جهت تأثیر آن‌ها برعکس است؛ به‌طوری که تغییرات بارش باعث افزایش آبدهی و تغییرات تبخیر-تعرق باعث کاهش آبدهی شده است. هم‌چنین، درصد خطای روش فو در تفکیک سهم تغییر اقلیم و مداخلات مستقیم انسانی در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای (۰/۵۱ درصد) کم‌تر از زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت (۱۹/۱۱ درصد) بوده است.

جدول ۲- جزئیات نتایج استفاده از تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو – روش فو

Table 2- The detailed results of applying the Fu method of the Budyko hypothesis for hydrological sensitivity analysis

متغیر	واحد	علامت	دلیچای	سیمین‌دشت
متوسط دبی دورهٔ قبل از تغییر	میلی‌متر	Q1	136.36	91.29
متوسط دبی دورهٔ بعد از تغییر	میلی‌متر	Q2	84.33	61.92
میزان تغییرات دبی	میلی‌متر	ΔQ^{total}	-52.03	-29.37
متوسط بارش دورهٔ قبل از تغییر	میلی‌متر	P1	372.95	314.88
متوسط بارش دورهٔ بعد از تغییر	میلی‌متر	P2	450.73	321.50
میزان تغییرات بارش	میلی‌متر	ΔP	77.77	6.61
متوسط تبخیر-تعرق پتانسیل دورهٔ قبل از تغییر	میلی‌متر	PET1	1072.09	1060.22
متوسط تبخیر-تعرق پتانسیل دورهٔ بعد از تغییر	میلی‌متر	PET2	1124.63	1111.62
میزان تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل	میلی‌متر	ΔPET	52.54	51.40
مقدار پارامتر حوزهٔ آبخیز در دورهٔ قبل از تغییر	-	w1	1.56	1.66
مقدار پارامتر حوزهٔ آبخیز در دورهٔ بعد از تغییر	-	w2	2.11	1.85
میزان تغییرات پارامتر حوزهٔ آبخیز		Δw	0.55	0.19
سهم تغییرات اقلیمی در تغییرات دبی	میلی‌متر	ΔQ^{c}	27.80	0.05
✓ سهم تبخیر-تعرق			-3.64	-2.41
✓ سهم بارش			31.44	2.47
سهم تغییرات اقلیمی در تغییرات دبی	درصد	$\%Q_c$	53.43	0.18
✓ سهم تبخیر و تعرق			-7.00	-8.22
✓ سهم بارش			60.43	8.40
سهم تغییرات انسانی در تغییرات دبی	میلی‌متر	ΔQ^{H}	-79.57	-23.81
سهم تغییرات انسانی در تغییرات دبی	درصد	$\%Q_H$	-152.92	-81.07
میزان خطا	میلی‌متر	ε	-0.27	-5.61
درصد خطا	درصد	%ε	0.51	19.11

۳-۳- تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو-روش ژانگ

نتایج کاربرد روش تفکیک سهم اثرات تغییر اقلیم و مداخلات انسانی بر رواناب زیرآبخیزهای حبله‌رود شمالی با استفاده از روش ژانگ در جدول ۳ خلاصه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود الگوی کلی نتایج محاسبه سهم تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی در تغییرات آبدهی در این روش همانند روش فو است. اگرچه مقادیر مطلق و نسبی سهم عوامل متفاوت است. به‌طوری‌که سهم

تغییرات اقلیمی در آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای به‌صورت افزآینده به مقدار خیلی زیاد است و در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت اندکی به‌صورت کاهنده است. مطابق روش ژانگ، در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای، تغییر اقلیم باعث افزایش مطلق آبدهی به مقدار ۴۸/۳۸ میلی‌متر و افزایش نسبی آبدهی به مقدار ۹۲/۹۸ درصد شده است. سهم مطلق (۸/۸۲- میلی‌متر) و نسبی (۱۶/۹۴- درصد) تبخیر-تعرق در تغییرات آبدهی این زیر-حوزهٔ آبخیز، در مقایسه با سهم بارش خیلی کم است و بر خلاف بارش، در جهت کاهش آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز اثر گذاشته است. در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت سهم و جهت تأثیر تغییر اقلیم در تغییرات آبدهی متفاوت از زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای است. به‌طوری که در این زیرحوزهٔ آبخیز، تغییر اقلیم باعث کاهش مطلق آبدهی به مقدار ۱/۸۵میلی‌متر و کاهش نسبی آبدهی به مقدار ۶/۲۹ درصد شده است. دلیل کم بودن سهم تغییر اقلیم در تغییرات آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت، تغییرات کم مقدار بارندگی در این زیرحوزهٔ آبخیز است. سهم مطلق و نسبی تبخیر-تعرق در کاهش آبدهی در روش ژانگ بیش‌تر از روش فو است. سهم مطلق (۱۰۰/۴۱- میلی‌متر) و نسبی (۱۹۲/۹۸- درصد) مداخلات انسانی در تغییرات آبدهی زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای بسیار بیش‌تر از سهم مطلق (۲۷/۵۲- میلی‌متر) و نسبی (۹۳/۷۱- درصد) آن در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت است. همانند روش قبلی، این روش هم اثر مداخلات انسانی بر کاهش آبدهی زیرآبخیزهای حبله‌رود را بسیار بیش‌تر از اثر تغییر اقلیم محاسبه کرده است. به‌طور کلی، مقادیر مطلق و نسبی سهم عوامل مؤثر در تغییرات آبدهی هر دو زیرحوزهٔ آبخیز مورد مطالعه در روش ژانگ، بیش‌تر از روش فو محاسبه شده است. یکی از دلایل این بیش برآوردی، عدم محاسبهٔ سهم خطای احتمالی در این روش است. در حالی‌که در روش فو، سهم ناشی از خطای احتمالی محاسبات نیز جداگانه محاسبه می‌شود.

جدول ۳- جزئیات نتایج استفاده از تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو – روش ژانگ

Table 3- The detailed results of applying the Zhang method of the Budyko hypothesis for hydrological sensitivity analysis

متغیر	واحد	علامت	دلیچای	سیمین‌دشت
متوسط دبی دورهٔ قبل از تغییر	میلی‌متر	Q1	136.36	91.29
متوسط دبی دورهٔ بعد از تغییر	میلی‌متر	Q2	84.33	61.92
میزان تغییرات دبی	میلی‌متر	ΔQ^{total}	-52.03	-29.37
متوسط بارش دورهٔ قبل از تغییر	میلی‌متر	P1	372.95	314.88
متوسط بارش دورهٔ بعد از تغییر	میلی‌متر	P2	450.73	321.50
میزان تغییرات بارش	میلی‌متر	ΔP	77.77	6.61
متوسط تبخیر-تعرق پتانسیل دورهٔ قبل از تغییر	میلی‌متر	PET1	1072.09	1060.22
متوسط تبخیر-تعرق پتانسیل دورهٔ بعد از تغییر	میلی‌متر	PET2	1124.63	1111.62
میزان تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل	میلی‌متر	ΔPET	52.54	51.40
سهم تغییرات اقلیمی در تغییرات دبی	میلی‌متر	ΔQ^{c}	48.38	-1.85
✓ سهم تبخیر-تعرق			-8.82	-6.29
✓ سهم بارش			57.20	4.44
سهم تغییرات اقلیمی در تغییرات دبی	درصد	$\%Q_c$	92.98	-6.29
✓ سهم تبخیر-تعرق			-16.94	-21.40
✓ سهم بارش			109.93	15.11
سهم تغییرات انسانی در تغییرات دبی	میلی‌متر	ΔQ^{H}	-100.41	-27.52
سهم تغییرات انسانی در تغییرات دبی	درصد	$\%Q_H$	-192.98	-93.71

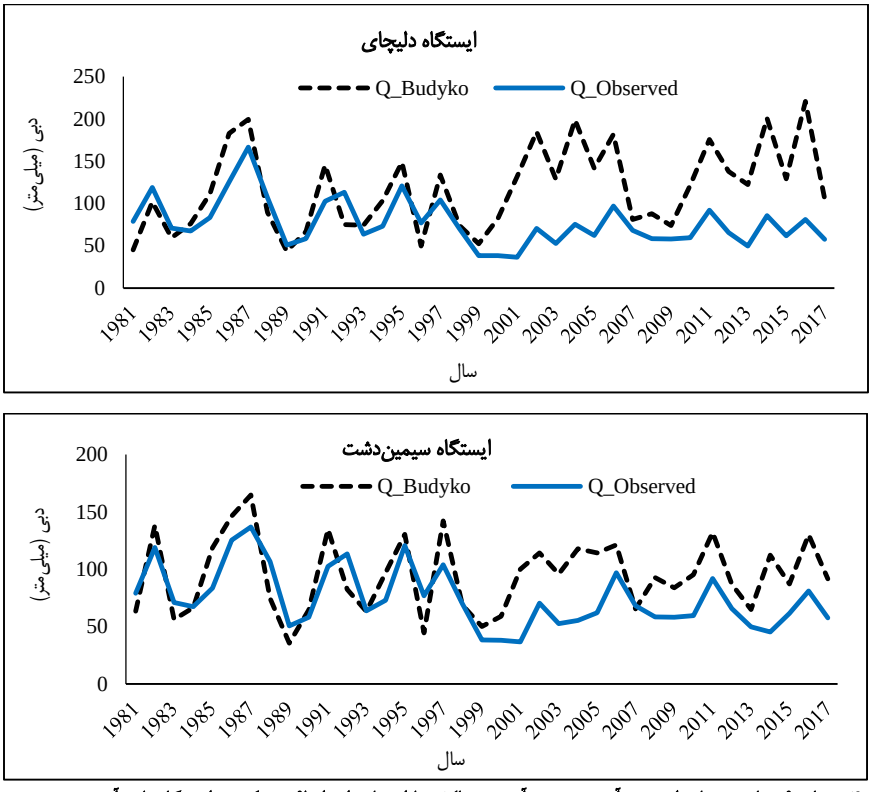
به‌منظور مقایسهٔ نتایج روش‌های مبتنی بر رویکرد مفهومی با نتایج روش‌های مبتنی بر رویکرد تجربی تعیین سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در تغییرات جریان آبدهی حوزهٔ آبخیز حبله‌رود، در جدول ۴ خلاصه نتایج مطالعه Sheikh et al. (2022) در همین حوزهٔ آبخیز ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اگرچه مقادیر عددی نتایج روش‌های مورد استفاده در دو رویکرد تجربی و مفهومی تفاوت هایی دارند، اما به‌طور کلی تغییر اقلیم نه تنها باعث کاهش آبدهی رودخانه‌های حوزهٔ آبخیز حبله‌رود نشده است، بلکه تأثیر افزآینده بر دبی جریان رودخانه‌ها داشته است. از طرف دیگر تمام روش‌های هر دو رویکرد تجربی و مفهومی نشان می‌دهند که عامل اصلی کاهش آبدهی رودخانه‌های حوزهٔ آبخیز حبله‌رود مداخلات انسانی بوده است. نکته مهم دیگر این‌که تمام روش‌های هر دو رویکرد تجربی و مفهومی نشان می‌دهند در زیرحوزهٔ آبخیز دلیچای سهم مداخلات انسانی در کاهش آبدهی بسیار بیش‌تر از

زیرحوضه سیمین‌دشت است. با توجه به روش‌های رویکرد مفهومی، مبتنی بر فرآیندهای درونی و روابط منطقی هستند نسبت به روش‌های رویکرد تجربی که فقط مبتنی بر داده‌های مشاهداتی و روابط آماری هستند ترجیح داده می‌شوند. علاوه‌بر ارائه نتایج سهم مطلق و نسبی عوامل به‌صورت آمار و ارقام در جداول بالا، نتایج حاصل از مقایسهٔ مقادیر مشاهداتی و برآوردی عمق آبدهی سالانه با استفاده از رابطهٔ بودیکو در ایستگاه‌های آبسنجی مورد مطالعه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از سال نقطهٔ تغییر (۱۹۹۷) تفاوت فاحشی بین دبی مشاهداتی و دبی برآورد شده وجود دارد که نشان‌دهندهٔ، اثر مداخلات مستقیم انسانی بر کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود است.

جدول ۴- مقایسهٔ نتایج روش‌های رویکرد مفهومی تفکیک سهم تغییر اقلیم و مداخلات انسانی با نتایج روش‌های رویکرد تجربی گزارش شده در مطالعهٔ Sheikh et al. (2022)

Table 4- Comparing the results of climate change and human intervention separation methods based on the conceptual approach and empirical approach reported by Sheikh et al. (2022)

رویکرد	روش	سهم تغییر اقلیم (درصد)		سهم مداخلات انسانی (درصد)	
		دلیچای	سیمین‌دشت	دلیچای	سیمین‌دشت
تجربی	نسبت تغییر شیب مقدار تجمعی	39.7	-0.55	-139.7	-99.45
	جرم مضاعف دبی- بارش	92.9	29.8	-192.9	-129.8
	جرم مضاعف دبی– بارش و دما	90.59	29.44	-190.59	-129.44
	جرم مضاعف دبی– بارش و تبخیر-تعرق	92.31	29.48	-192.31	-129.48
مفهومی	فرضیه بودیکو – روش فو	53.43	0.18	-152.92	-81.07
	فرضیه بودیکو – روش ژانگ	92.98	-6.29	-192.98	-93.71



شکل ۴- مقایسهٔ مقادیر مشاهداتی و برآوردی عمق آبدهی سالانه با استفاده از رابطهٔ بودیکو در ایستگاه‌های آبسنجی مورد مطالعه

Figure 4- Comparing the observed and predicted annual discharge depth by the Budyko equation for the studied hydrometry stations

همان‌طور که مشاهده شد، هردو روش، سهم تغییر اقلیم در کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود را نه تنها کم برآورد کرده‌اند، بلکه اثر تغییر اقلیم را به‌صورت افزایش آبدهی (مقادیر منفی) رودخانه پیش‌بینی کرده‌اند. بنابراین، به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود به‌خاطر مداخلات انسانی اتفاق اُفتاده است. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های Sane et al. (2017) در رودخانهٔ راوند استان کرمانشاه، Ahmadi and Delavar (2019) در حوزهٔ آبخیز سد کرخه و چهار زیرحوزهٔ آبخیز اصلی آن، Kanani et al. (2020) در حوزهٔ آبخیز لیقوان (از زیرحوزه‌های دریاچهٔ ارومیه)، Naderi et al. (2022) و Sheikh et al. (2022) در حوزهٔ آبخیز حبله‌رود که علت عمدهٔ کاهش دبی را فعالیت‌های گستردهٔ انسانی می‌دانند هم‌سو است. هم‌چنین، نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌هایی که در خارج از کشور از جمله Bao et al. (2012) در حوضهٔ رودخانه Haihe در شمال چین، Ye et al. (2013) در کشور چین، Zhao et al (2014) در حوضهٔ رودخانه زرد چین و Xu et al. (2022) در کشور چین که نشان دادند فعالیت‌های انسانی عامل اصلی کاهش آبدهی حوزه‌های آبخیز است هم‌سو است. هم‌چنین، با نتایج مطالعات Gharechaei et al. (2015) در حوزهٔ آبخیز بختگان که سهم تغییر اقلیم در کاهش آبدهی این حوزهٔ آبخیز را بیش‌تر از سهم فعالیت‌های انسانی دانستند، Rezaei et al. (2022) که بیان کردند در حوزهٔ آبخیز کیار در استان چهار محال و بختیاری تأثیر تغییرات بارش بر میزان دبی بیش از تغییرات کاربری اراضی بوده است، Chang et al. (2016) تأثیر تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی در جریان حوضهٔ Jinghe واقع در شمال غربی چین را ارزیابی کردند و نشان دادند که تغییرات آب و هوایی نقش اصلی در کاهش دبی رودخانه را داشته است و Hsun Lee and Fu Yeh (2019) که تأثیرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را بر تغییرات جریان حوضه‌های رودخانه شمال تایوان را بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات بارش حساس‌ترین عامل در تغییرات جریان است، مغایرت دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پس از پردازش اولیهٔ آمار طولانی مدت ایستگاه‌های هیدرومتری سیمین‌دشت و دلیچای، با استفاده از آزمون همگنی نرمال استاندارد و آزمون بویژاند، نقطهٔ تغییر معنادار در سری زمانی دبی سالانهٔ آن‌ها شناسایی شد. طبق هر دو روش مورد استفاده، اواسط دههٔ ۱۹۹۰ میلادی به‌عنوان نقطهٔ شکست سری زمانی آبدهی متوسط سالانه و شروع تغییرات نزولی دبی در این دو ایستگاه به‌دست آمد. به‌منظور تعیین سهم اثر تغییر اقلیم و مداخلات انسانی در کاهش آبدهی حوزهٔ آبخیز مورد مطالعه از دو روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی مبتنی بر فرضیهٔ بودیکو استفاده شد. در این روش‌ها بعد از محاسبهٔ سهم متغیرهای اقلیمی بر تغییرات آبدهی، باقیماندهٔ تغییرات آبدهی به مداخلات انسانی منتسب می‌شود. مطابق روش فو بیش‌ترین کاهش آبدهی مطلق در ایستگاه دلیچای اتفاق اُفتاده است. با توجه به این‌که مقدار بارش متوسط در زیرحوزهٔ ابخیز دلیچای در دورهٔ بعد از تغییر، روند افزایشی داشته است. بنابراین، اثر تغییر اقلیم بر دبی جریان در این زیرحوزهٔ آبخیز نه تنها کاهنده نیست، بلکه افزآینده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص شد که در این زیرحوزهٔ آبخیز مداخلات انسانی به‌عنوان عامل اصلی کاهش آبدهی شناسایی شده است. در زیرحوزهٔ آبخیز سیمین‌دشت نیز سهم تغییر اقلیم در تغییرات آبدهی ناچیز بوده و افزآینده (افزایش آبدهی) است و مداخلات انسانی به‌عنوان عامل اصلی کاهش آبدهی در محل ایستگاه سیمین‌دشت برآورد شده است. روش ژانگ نیز اثر مداخلات انسانی بر کاهش آبدهی زیرآبخیزهای حبله‌رود را بسیار بیش‌تر از اثر تغییر اقلیم محاسبه کرده است. مطابق نتایج پژوهش‌های پیشین در حوزهٔ آبخیز حبله‌رود (Naderi et al., 2022; Ziaee et al., 2017) متغیر بارش که عامل اصلی تأثیرگذار بر رژیم هیدرولوژیکی آبخیزهاست در طول دهه‌های گذشته کاهش معناداری را نشان نمی‌دهد و حتی در تعدادی از ایستگاه‌های پایش اقلیمی، مقدار بارندگی سالانه هم افزایش یافته است و تغییرات دما نیز دارای روند افزایشی معنادار بوده است. با این وجود، دو عامل اقلیمی اثر هم را بر تغییرات دبی خنثی خواهند کرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اقلیمی تأثیر زیادی در رژیم جریان رودخانهٔ حبله‌رود نداشته است و عامل اصلی کاهش آبدهی آن مداخلات انسانی است. با توجه به نتایج این پژوهش که نقش مداخلات انسانی را در کاهش آبدهی رودخانهٔ حبله‌رود مهم‌تر و دارای تأثیر بیش‌تر برآورد نموده است و با توجه به این امر که تغییر کاربری اراضی به‌عنوان شاخص اصلی مداخلات انسانی بوده و نتیجه سیاست‌های اجرایی در حوزهٔ آبخیز است؛ بنابراین، اصلاح مدیریت و اعمال سیاست‌های مناسب در جلوگیری از تغییرات نامناسب کاربری اراضی می‌تواند به شکل چشم‌گیری در میزان آبدهی رودخانه حبله‌رود مؤثر باشد. هم‌چنین، می‌توان پیشنهاد نمود که سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب

بایستی در جهت برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مرتبط با فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار در چرخهٔ طبیعی آب اقدام نمایند و به‌جای مقصر دانستن تغییر اقلیم بر تجدد نظر در رفتارهای بشر با طبیعت متمرکز شوند که به این صورت می‌توان با شرایط تغییر اقلیم نیز سازگار شد و از عواقب ناگوار کمبود آب برای نسل آتی در امان ماند. هم‌چنین، از نتایج این مطالعه می‌توان به‌عنوان یک مرجع جهت توسعه، بهره‌برداری و مدیریت منابع آب استفاده نمود.

سپاسگزاری

مطالب این مقاله برگرفته از نتایج طرح پژوهش "تعیین سهم مداخلات انسانی و تغییر اقلیم در کاهش آبدهی رودخانه‌های حبله‌رود" به سفارش شرکت آب منطقه‌ای استان تهران است. بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی و معنوی شرکت آب منطقه‌ای استان تهران و معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

احمدی، حامد، و دلاور، مجید (۱۳۹۸). مقایسه رویکردهای مختلف تفکیک آثار انسانی و اقلیمی بر تغییرات جریان حوضه‌های آبخیز. *اکوهیدرولوژی*، ۶(۴)، ۹۴۳-۹۵۵. doi:10.22059/ije.2019.283700.1139

رضایی، مجتبی، امیدی‌پور، رضا، رضایی، اشکان و نداف، محبت. (۱۴۰۱). مقایسه تاثیر تغییرات روند کاربری اراضی و بارش بر دبی سالانه (مطالعه موردی حوزه آبخیز کیار). *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۲(۲)، ۶۲-۷۴. doi:10.22034/iwm.2022.556854.1038

سلمانی، حسن، شیخ، واحدبردی، ماهینی، عبدالرسول، اونق، مجید، فتح آبادی، ابوالحسن (۱۳۹۷). ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل آباد استان گلستان در طی دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی پیش‌بینی شده. *اکوهیدرولوژی*، ۵(۲)، ۳۹۹-۴۱۸. doi:10.22059/ije.2018.232306.577

شیخ، واحدبردی، بابایی، اکبر، و موشاخیان، یوسف (۱۳۸۸). بررسی روند تغییرات رژیم بارش حوضه آبریز گرگانرود. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۳(۸)، ۲۹-۳۸. dor:20.1001.1.20089554.1388.3.8.4.4

شیخ، واحدبردی، زارع گاریزی، آرش، الوندی، احسان، اسدی نلیوان، امید، خسروی، غلامرضا، سعدالدین، امیر، و اونق، مجید (۱۳۹۸). مکان‌یابی مشارکتی راهکارهای پیشنهاد شده برای مدیریت کردن آبخیز حبله‌رود. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۲(۴)، ۲-۱۸. doi:10.22092/wmej.2019.125497.1194

شیخ، واحدبردی، سعدالدین، امیر، اونق، مجید، نجفی‌نژاد، علی، زارع، آرش، سلمان ماهینی، عبدالرسول، عبداللهیان، ح.، بارانی، حسن، کامکار، بهنام، بایرام کمکی، چوقی بایرام، محمدیان بهبهانی، علی، عابدی سروستانی، احمد، اسلامی، ا، کرامت‌زاده، علی، کامیاب، حمیدرضا، خسروی، غلامرضا، اسدی نلیوان، امید، الوندی، احسان، رحمانی، م.، صادقی، ف.، منتظری، م.، و حقدادی، م. (۱۳۹۶). تدوین برنامه مدیریت جامع حوزه آبخیز حبله رود. گزارش نهایی طرح پژوهشی، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۲۵۹ صفحه.

شیخ، واحدبردی، نادری، مهین، بهره‌مند، عبدالرضا، سعدالدین، امیر، عابدی طورانی، مرتضی، کمکی، چوقی، و قائمی، آلاله (۱۴۰۱). تعیین سهم تغییر اقلیم و مداخلات مستقیم انسانی در تغییرات آبدهی رودخانه حبله‌رود با استفاده از رویکردهای تجربی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. doi:10.22098/mmws.2022.11852.1178

صانع، ایمان، ثقفیان، بهرام، و ناصری، محسن (۱۳۹۶). اثر تغییرات اقلیمی و انسانی بر آبدهی رودخانه راوند با استفاده از مدل ون لون. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳(۱)، ۱۷۸-۱۹۰.

عسکری، امیر، فتحیان، حسین، نیکبخت شهبازی، علیرضا، حسونی‌زاده، هوشنگ، ظهرابی، نرگس (۱۴۰۱). تفکیک اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر کاهش رواناب در حوضه کرخه با روش تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی. *پژوهش آب ایران*، ۲(۱۶)، doi:10.22034/iwrj.2022.13801.2389

قره‌چایی، حمیدرضا، مقدم‌نیا، علیرضا، ملکیان، آرش، و احمدی، آزاده (۱۳۹۴). پاسخ رواناب به تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی درحوضه رودخانه کشکان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۳(۷)، ۲۵۵-۲۶۴. doi:10.22092/ijwmse.2015.101632

کاظم‌زاده، مجید (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه، مطالعه موردی: حوضه آبخیز آجی‌چای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

کنعانی، رضا، فاخری فرد، احمد، قربانی، محمدعلی، و دین‌پژوه، یعقوب (۱۳۹۹). تحلیل روند تغییرات جریان در ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه لیقوان. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۱(۲۲)، ۱۱-۱۸. doi:10.52547/jwmr.11.22.11

شرکت آب منطقه‌ای تهران، (۱۳۹۲). مطالعات بهبود بهره‌برداری از آب‌های سطحی رودخانه حبله‌رود و سرشاخه‌های آن در استان تهران. گزارش نهایی طرح پژوهشی، ۲۲۶ صفحه.

نادری، مهین، شیخ، واحدبردی، بهره‌مند، عبدالرضا، کمکی، چوقی، و قانقرمه، عبدالعظیم (۱۴۰۱). تحلیل تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله‌رود). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. doi:10.22098/mmws.2022.11430.1129

References

Ahmadi, H., & Delavar, M. (2019). Comparison of different approaches to seprating human and climatic impacts on run-off changes in basins. *Iranian journal of Ecohydrology*, *6*(4), 943-955. doi:10.22059/ije.2019.283700.1139 [In Persian]

Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6), 661-675. doi:10.1002/joc.3370060607

Alexandersson, H., & Moberg, A. (1997). Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, *17*(1), 25-34. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<25::AID-JOC103>3.0.CO;2-J

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. *Iranian Water Researches Journal*, 16(2), doi:10.22034/iwrj.2022.13801.2389. [In Persian]

Bao, Z., Zhang, J., Wang, G., Fu, G., He, R., Yan, X., Jin, J., Liu, Y., & Zhang, A. (2012). Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: climate variability or human activities? *Journal of Hydrology*, 460, 117-129. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.054

Budyko, M. I., & Miller, D. H. (1974). *Climate and Life*. Academic Press, New York.

Buishand, T. A. (1984). Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of hydrology*, *73*(1-2), 51-69. doi:10.1016/0022-1694(84)90032-5

Chang, J., Zhang, H., Wang, Y., & Zhu, Y. (2016). Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation. *Hydrology and Earth System Sciences*, *20*(4), 1547-1560. doi:10.5194/hess-20-1547-2016

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. *Theoretical and applied climatology*, *111*(3), 537-545. doi:10.1007/s00704-012-0680-4

Dooge, J.C. (1992). Sensitivity of runoff to climate change: a hortonian approach. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *73*(12), 2013-2024. doi:10.1175/1520-0477(1992)073<2013:SORTCC>2.0.CO;2

Fu, L.L. (1981). Observations and models of inertial waves in the deep ocean. *Reviews of Geophysics*, 19(1), 141-170. doi:10.1029/RG019i001p00141

Gao, G., Fu, B., Wang, S., Liang, W., & Jiang, X. (2016). Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. *Science of the Total Environment*, *557*, 331-342. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.03.019

Gharechaei, H., Moghaddamnia, A., Malekian, A., & Ahmadi, A. (2015). Responseofstreamflow to climate variability and human activity in Kashkan River basin. *Watershed Engineering and Management*, *7*(3), 255-264. [In Persian]

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. *Journal of Hydrology*, *570*, 96-105. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.12.048

Hsun Lee, C., & Fu Yeh, H. (2019). Impact of climate change and human activities on streamflow variations based on the bodyko framework. *Journal Water*, *11*, 1-22. doi:10.3390/w11102001

Huntington, T.G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, *319*(1-4), 83-95. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.003

Kanani, R., Fakheri Fard, A., Ghorbani, M.A., & Dinpashoh, Y. (2020). Trend analysis of the streamflow in the Lighvan River Hydrometric Stations (upstream and downstream). *Journal of Watershed Management Research*, *11*(22), 11-19. doi:10.52547/jwmr.11.22.11 [In Persian]

Kazemzadeh, M. (2015). Evaluation of climate change impacts on the hydrological characteristics of watershed, case study: Aji chai Watershed. M.Sc Thesis, University of Tehran, 177 pages. [In Persian]

Li, H., Zhang, Y., Vaze, J., & Wang, B. (2012). Separating effects of vegetation change and climate variability using hydrological modelling and sensitivity-based approaches. *Journal of Hydrology*, *420*, 403-418. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.033

Lv, X., Zuo, Z., Xiao, P., Ni, Y., & Sun, J. (2018). Effects of climate change and human activity on runoff in a typical Loess Gullied-Hilly Region Watershed. *Polish Journal of Environmental Studies*, *27*(2), 779-785. doi:10.15244/pjoes/76117

Milly, P.C., Dunne, K.A., & Vecchia, A.V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water

availability in a changing climate. *Nature*, *438*(7066), 347-350. doi: 10.1038/nature04312

Naderi, M., Sheikh, V., Bahrehmand, A., Komaki, C.B., & Ghangermeh, A. (2022). Analysis of river flow regime changes using the indicators of hydrologic alteration (Case study: Hableroud watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, doi:10.22098/mmws.2022.11430.1129. [In Persian]

Rezaei, M., Omidipour, R., Rezaei, A., & Nadaf, M. (2022). Comparison of the effects of land use change and precipitation on annual discharge (case study: Kiar watershed). *Integrated Watershed Management*, *2*(2), 62-74. doi: 10.22034/iwm.2022.556854.1038.

Salmani, H., Sheikh, V.B., Salman Mahiny, A., Ownegh, M., & Fathabadi, A. (2018). Evaluation of hydrological response in tilabad watershed of golestan for future periods as affected by the predicted land use change. *Iranian journal of Ecohydrology, 5*(2), 399-418. doi:10.22059/ije.2018.232306.577 [In Persian]

Sane, I., Saghafian, B., & Nasseri, M. (2017). Contribution of climate variability and human intervention on watershed regime based on van loon model. *Iran-Water Resources Research*, *13*(1), 178-190. [In Persian]

Schaake, J.C. (1989). Climate Change and U.S. Water Resources. Pp. 177-218, In: Waggoner, P.E. (ed.), *Climate to Flow*, Wiley, New York.

Sneyres, R. (1990). Technical note no. 143 on the statistical analysis of time series of observation. World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.

Sheikh, V., Babaei, A., & Mooshakhian, Y. (2009). Trend analysis of precipitation regime in the Gorganroud basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, *3*(8), 29-38. dor:20.1001.1.20089554.1388.3.8.4.4 [In Persian]

Sheikh, V., Naderi, M., Bahrehmand, 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. *Water and Soil Management and Modelling*, doi:10.22098/mmws.2022.11852.1178 [In Persian]

Sheikh, V., Sadoddin, A., Ong, M., Najafinejad, A., Zare, A., Salman Mahini, A., Abdullahian, H., Barani, H., Kamkar, B., Bairam Komaki, CH., Mohammadian Behbahani, A., Abedi Sarostani, A., Eslami, A., Karamatzadeh, A., Kamyab, H., Khosravi, G., Asadi Nelivan, A., Alvandi, A., Rahmani, M., Sadeghi, F., Montazeri, M., & Haqdadi, M. (2017). Developing integrated watershed managemen plan for Hableroud river basin. Final report of research project, Iranian Forest, Rangeland, and Watershed Management Organization, 259 pages. [In Persian]

Sheikh, V., Zare Garizi, A., Alvandi, E., Asadi Nelivan, O., Khosravi, G., Saaduddin, A., & Ong, M. (2018). Collaborative site selection for the proposed solutions to manage the Hablehroud watershed. *Watershed Research*. *32*(4), 2-18. doi:10.22092/wmej.2019.125497.1194 [In Persian]

Sorokin, L.V., & Mondello, G. (2018). Entering the new+ 2 c global warming age and a threat of world ocean expansion for sustainable economic development. Pp. 183-201, In: *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction*, Springer, Cham.

Sun, G., McNulty, S.G., Lu, J., Amatya, D.M., Liang, Y., & Kolka, R.K. (2005). Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology*, *308*(1-4), 258-268. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.11.021

Tehran Regional Water Company, (2012). Improving the exploitation of the surface water of the Hableroud River and its tributaries in Tehran province. Final report of research project, 226 pages. [In Persian]

Wang, D., & Hejazi, M. (2011). Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. *Water Resources Research*, *47*(10). doi:10.1029/2010WR010283

Wu, J., Miao, C., Zhang, X., Yang, T., & Duan, Q. (2017). Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, *586*, 328-337. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.010

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. *Journal of Hydrology*, *609*, 127750. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127750

Yao, H., Shi, C., Shao, W., Bai, J., & Yang, H. (2015). Impacts of climate change and human activities on runoff and sediment load of the Xiliugou basin in the Upper Yellow river. *Advances in Meteorology*, 1-12, 481713. doi:10.1155/2015/481713

Ye, X., Zhang, Q., Liu, J., Li, X., & Xu, C.Y. (2013). Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment,

China. *Journal of Hydrology*, *494*, 83-95. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.04.036

Zhang, L., Dawes, W.R., & Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*, *37*(3), 701-708. doi:10.1029/2000WR900325

Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W.R., Chiew, F.H., Western, A.W., & Briggs, P.R. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, *40*(2). doi:10.1029/2003WR002710

Zhao, G., Tian, P., Mu, X., Jiao, J., Wang, F., & 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. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.07.014