



The University of Tehran Press

Town & Country Planning

Online ISSN: 2423-6268

Home Page: <https://jtcp@ut.ac.ir>

Analysis of hydrological drought and flow reduction zoning of Habalehrood watershed

Farzaneh Nasrollahizadeh¹ | Amirreza Keshtkar^{2*} | Ali Afzali³ | Omid Kavooosi⁴

1. International Desert Research Center, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: fnasrollahizadeh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, International Desert Research Center, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: keshtkar@ut.ac.ir
3. Deputy of Research and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: aliafzali@ut.ac.ir
4. International Desert Research Center, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: kavoosi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received June 29, 2024
Revised September 15, 2024
Accepted September 25, 2024
Published online 20 October 2024

Keywords:
Threshold limit,
Shortage volume,
Drought persistence,
Zoning.

ABSTRACT

DuringOver the last few decades, the rising demand for water due to the increase in population and expansion of human activities, has caused this vital resource being used sub optimally and facing double pressures. This problem is more acute especially in the years when we are facing the phenomena of climate change and drought. Furthermore, the amount of running water has reached its minimum leading to environmental consequences such as increasing pollution and decreasing the quality of water resources. Therefore, calculating the minimum flow in the river and knowing its characteristics in various hydrological studies, including water quality management, determining the minimum flow required for electricity generation, designing irrigation systems, and evaluating the effect of long-term drought periods are significantly important for aquatic ecosystems. The present study investigated the hydrological drought and the periods of lack of flow, using the threshold method (Q70, Q80, Q90 and the middle), in the Hablehrood watershed, and the results were used to identify dry periods and zoning this phenomenon.. The results of the surveys showed that the largest amount of deficit and the largest continuation of hydrological drought in the threshold limit in most of the stations follow an upward trend. Finally, based on the final zoning map, it was revealed that the central parts of the basin have experienced more severe drought. The results of this research are of special importance in the water resources management of this watershed, as one of the main sources of water resources of the city and Garmsar Plain.

Cite this article: Nasrollahizadeh, F.; Keshtkar, A.; Afzali, A. & Kavooosi, O. (2024). Analysis of hydrological drought and flow reduction zoning of Habalehrood watershed. *Town and Country Planning*.16 (1), 187-205. Doi: [10.22059/jtcp.2024.378499.670458](https://doi.org/10.22059/jtcp.2024.378499.670458)



© Farzaneh Nasrollahizadeh, Amirreza Keshtkar, Ali Afzali, Omid Kavooosi
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2024.378499.670458>



تجزیه و تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیک و پهنه‌بندی کاهش جریان رودخانه‌ای حوزه آبخیز حبله رود

فرزانه نصرالهی‌زاده^۱ | امیررضا کشتکار^{۲*} | علی افضلی^۳ | امید کاوسی^۴

۱. مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی و کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fnasrollahizadeh@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسؤل، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی و کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: keshtkar@ut.ac.ir

۳. معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliafzali@ut.ac.ir

۴. مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی و کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: kavoosi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

کلیدواژه:

پهنه‌بندی،

تداوم خشک‌سالی،

حجم کمبود،

حدآستانه.

طی چند دهه اخیر افزایش تقاضای آب به دلیل افزایش جمعیت و گسترش فعالیت‌های انسانی سبب شده این منبع حیاتی به نحو مطلوب مورد استفاده قرار نگیرد و با فشار مضاعف روبه‌رو شود. این مسئله به‌خصوص در سال‌هایی که با پدیده‌های تغییر اقلیم و خشک‌سالی مواجه هستیم و میزان آب‌های جاری به حداقل خود رسیده است حادث شده و تبعات محیط زیستی را به دنبال داشته است. از این رو، محاسبه جریان حداقل در رودخانه و دانستن ویژگی‌های آن در مطالعات هیدرولوژیکی مختلف از جمله مدیریت کیفیت آب، تعیین حداقل دبی مورد نیاز جهت تولید برق، طراحی سیستم‌های آبیاری، و ارزیابی تأثیر دوره‌های خشک‌سالی طولانی‌مدت بر اکوسیستم‌های آبی بسیار مهم است. پژوهش حاضر به بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک و دوره‌های کمبود جریان با استفاده از روش حدآستانه (Q₇₀، Q₈₀، Q₉₀، و میانه) در حوزه آبخیز حبله‌رود پرداخته و نتایج به منظور تشخیص دوره‌های خشک و پهنه‌بندی این پدیده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد بیشترین حجم کمبود و بیشترین تداوم خشک‌سالی هیدرولوژیک در حدآستانه در بیشتر ایستگاه‌ها از روند صعودی تبعیت می‌کنند. در نهایت بر اساس نقشه پهنه‌بندی نهایی مشخص شد قسمت‌های مرکزی حوضه خشک‌سالی شدیدتری را تجربه کرده‌اند.

استاد: نصرالهی‌زاده، فرزانه؛ کشتکار، امیررضا؛ افضلی، علی و کاوسی، امید (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیک و پهنه‌بندی کاهش جریان رودخانه‌ای حوزه آبخیز حبله‌رود.

آمایش سرزمین، ۱۶ (۱) ۱۸۷-۲۰۵. DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2024.378499.670458>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© فرزانه نصرالهی‌زاده، امیررضا کشتکار، علی افضلی، امید کاوسی

DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2024.378499.670458>



مقدمه

خشک‌سالی پدیده‌ای است که در هر اقلیمی رخ می‌دهد (Ullah et al., 2022) و به سبب فراوانی و گستردگی و تبعات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی از مهم‌ترین حوادث طبیعی به شمار می‌رود و بر محیط زیست و زندگی انسان تأثیر می‌گذارد (Fernández et al., 2023; Vicente-Serrano et al., 2020). این پدیده به دسته‌های هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی، اجتماعی-اقتصادی، اکولوژیکی، و آب‌های زیرزمینی تقسیم می‌شود (Ding et al., 2021; Heim, 2002). در این میان خشک‌سالی هیدرولوژیک در ادامه خشک‌سالی هواشناسی و با تأخیر زمانی به وقوع می‌پیوندد (Ding et al., 2020; Li et al., 2021; al., 2021). خشک‌سالی هیدرولوژیکی به کاهش آب‌های سطحی، به دلیل کمبود بارش، مانند جریان رودخانه و ذخیره دریاچه، اشاره دارد که ممکن است عواقب جدی ایجاد کند (Ma et al., 2023).

پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیک و تعیین دقیق زمان شروع و تداوم آن اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آبی و برنامه‌ریزی جهت کاهش آثار مخرب خشک‌سالی دارد (Lin et al., 2023; Ho et al., 2021; Shin et al., 2020). خشک‌سالی هیدرولوژیک همانند انواع خشک‌سالی‌ها دارای خصوصیات است؛ مانند مدت زمان، شدت، و فاصله خشک‌سالی (Hisdal et al., 2020; Cavus et al., 2024). انتخاب آستانه به هدف مطالعه، منطقه مورد مطالعه، و آمار و اطلاعات در دسترس بستگی دارد. در خصوص ارزیابی وقوع خشک‌سالی، از صدک‌ها به عنوان آستانه استفاده می‌شود (Ghorbani et al., 2019; Sharma & Panu, 2022). نسبت آستانه‌های مورد استفاده در دامنه ۷۰ تا ۹۰ درصد منحنی‌های تداوم جریان^۱ بوده است (Sung & Chung, 2014; Mukherjee et al., 2018). در رابطه با بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک تحقیقات گوناگونی در سطح ملی و بین‌المللی انجام شده است (Van Loon, 2015; Heudorfer & Stahl, 2017; Zhang & Post, 2018; Ahmadi & Moradkhani, 2019; Shiru et al., 2020; Rivera et al., 2021; Sharma & Panu, 2022; Ma et al., 2023; Amini et al., 2023; Pandya & Gontia, 2023; Yasa, 2024).

برآورد جریان حداقل در مناطق با آمار محدود یا فاقد آمار یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی منابع آب است. جهت نیل به این هدف، شناسایی دوره‌های خشک‌سالی و برآورد شدت آن و نیز شناخت عوامل مؤثر بر جریان‌های حداقل، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، لازم و حیاتی است. از آنجا که حوزه آبخیز حبله‌رود به دلیل قرار گرفتن در محدوده اقلیم خشک و نیمه‌خشک و با توجه به اهمیت تأمین آب بخش شرب و کشاورزی شهر و دشت گرمسار از اهمیت ویژه و کلیدی برخوردار است، پژوهش حاضر با هدف بررسی خصوصیات جریان حداقل در زیرحوزه‌های حوزه آبخیز حبله‌رود به پهنه‌بندی جریان حداقل در این محدوده با استفاده از روش حدآستانه و کریجینگ پرداخته است که می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آب در این منطقه به‌ویژه شهر و دشت گرمسار داشته باشد.

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز حبله‌رود با وسعت ۱۲۶۵۹۷۷ هکتار در موقعیت ۵۲° ۳۹' ۵۱" تا ۴۶° ۸' ۵۳" طول شرقی و ۳۴° ۲۶' ۵۴" تا ۳۵° ۵۷' ۳۱" عرض شمالی قرار گرفته است. محدوده حوزه آبخیز حبله‌رود متأثر از ویژگی‌های زمین‌ساختی و توپوگرافی و به طور کلی ویژگی‌های محیطی و طبیعی به دو ناحیه شمالی و جنوبی تقسیم شده که بر اساس اهداف و نیازهای این تحقیق بخشی از محدوده حوزه آبخیز سراب حبله‌رود به عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شد.

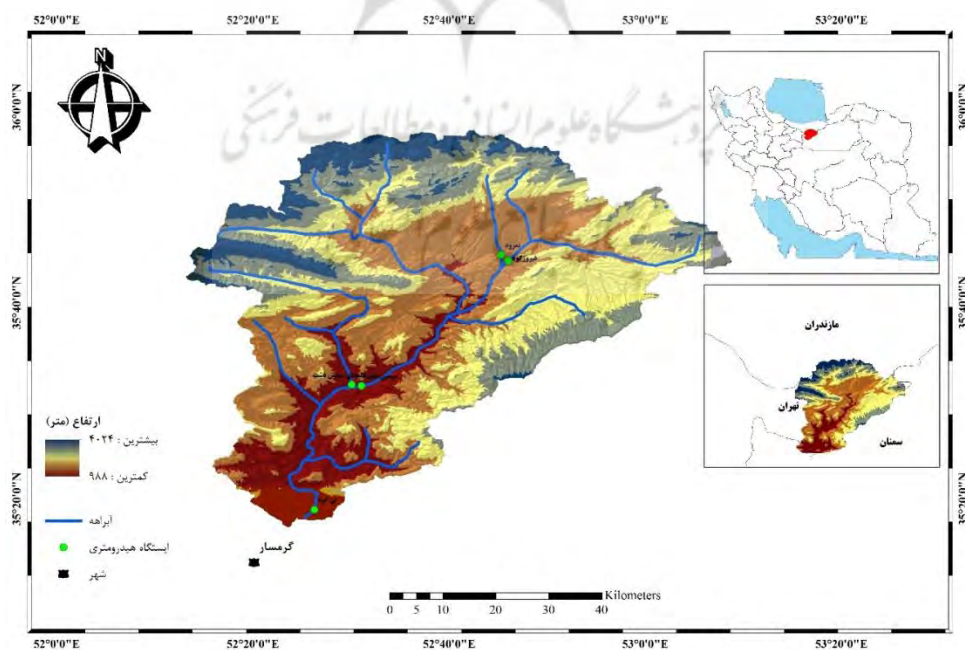
حوزه آبخیز سراب حبله‌رود یا حبله‌رود شمالی با وسعتی برابر ۶۱۰۹۰۹/۳ هکتار در بخش شمالی کشور و در موقعیت جغرافیایی ۵۵°، ۱۳'، ۳۵ درجه تا ۳۱°، ۵۷'، ۳۵ درجه عرض شمالی و ۵۱°، ۳۹'، ۵۱ درجه تا ۴۶°، ۸'، ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده است که از این سطح وسعتی برابر با ۳۲۶۰ کیلومتر مربع شامل محدوده مطالعاتی است. از نظر تقسیمات سیاسی کشور، قلمرو مورد مطالعه بخش‌هایی از استان‌های تهران و سمنان را شامل می‌شود و کانون‌های شهری و جمعیتی از قبیل فیروزکوه و

سربندان در مناطق مختلف آن پراکنش دارند. جاده آسفالتی رودهن- فیروزکوه و خط آهن گرمسار- فیروزکوه مهم‌ترین خطوط ارتباطی قلمرو مطالعاتی را تشکیل می‌دهند (سازمان جنگل‌ها، مراتع، و آبخیزداری، ۱۳۷۸).

پراکنش کوه‌ها و تپه‌ها در بخش پیرامونی و میانی حوزه آبخیز حبله‌رود شمالی سیمای کاملاً کوهستانی و مرتفع و افزایش میزان شیب و پستی و بلندی این محدوده را موجب شده است. مرتفع‌ترین نقطه در قلّه کوه سفیدآب با ارتفاع مطلق ۴۰۵۷ متر از سطح دریا در شمال غربی و حداقل ارتفاع در مرز جنوبی محدوده مطالعاتی در محل ایستگاه هیدرومتری بن‌کوه با ارتفاع ۱۰۰۰ متر از سطح دریاست. شیب عمومی این محدوده نیز ۳۲ درصد برآورد شده است. متوسط بارندگی سالیانه حوضه ۳۱۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۷/۸ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بیشترین روزهای یخبندان سالانه بین ایستگاه‌ها، فیروزکوه با ۱۶۸/۸ روز در سال و ایستگاه سمنان با ۴۹/۶ روز در سال به ترتیب بیشتری و کمترین تعداد روزهای یخبندان را دارا هستند. متوسط تعداد روزهای برفی سالیانه ایستگاه‌های محدوده مورد بررسی بین ۵/۶ روز در ایستگاه یوردشاه و ۶۳/۶ روز در ایستگاه آبعلی متغیر است. اقلیم منطقه مطالعاتی بر اساس طبقه‌بندی دومارتن اصلاح‌شده در هفت ناحیه خشک سرد، نیمه‌خشک، ارتفاعی، مدیترانه‌ای ارتفاعی، نیمه‌مرطوب ارتفاعی، مرطوب ارتفاعی، و خیلی مرطوب ارتفاعی قرار گرفته است.

بر پایه تقسیمات زمین‌ساختی، منطقه مطالعاتی در زون ساختاری البرز- آذربایجان واقع شده و خصوصیات چینه‌شناسی منطقه نیز از قدیم به جدید شامل انواع رخساره‌های سنگی و رسوبی متعلق به ادوار پرکامبرین تا کواترنری است که تحت تأثیر رخدادها و فرایندهای زمین‌شناختی به وقوع پیوسته و با ویژگی‌های معین در جهت عمومی شمال‌شرقی- جنوب‌غربی تا شرقی- غربی در سطح حوضه پراکنده دارند.

سرشاخه اصلی رودخانه حبله‌رود با نام گورسفید از کوه سائو با حداکثر ارتفاع مطلق ۳۳۲۱ متر از سطح دریا سرچشمه می‌گیرد و در امتداد عمومی شرق به غرب جریان می‌یابد. در ادامه جریان، ابتدا سرشاخه ساواشی و سپس رودخانه نمرود به آن ملحق می‌شود. در نهایت پس از گذر از ایستگاه بن‌کوه (خروجی منطقه مطالعاتی) وارد دشت گرمسار می‌شود و پس از قطع جاده گرمسار- سمنان (حوزه آبخیز پایاب حبله‌رود) در انتها در رودخانه گلو تخلیه می‌شود. طول رودخانه حبله‌رود در محدوده مطالعاتی ۱۲۳/۵ کیلومتر و ارتفاع از مبدأ رودخانه اصلی ۳۳۲۱ متر از سطح دریاست. در شکل ۱ موقعیت محدوده حوزه آبخیز حبله‌رود نشان داده شده است.



شکل ۱. محدوده مطالعاتی حوزه آبخیز حبله‌رود

روش پژوهش

بر اساس آمار دریافت‌شده از چهارده ایستگاه هیدرومتری موجود در حوزه آبخیز حبله‌رود از شرکت مدیریت منابع آب ایران (وزارت نیرو)، تعداد پنج ایستگاه با بیشترین طول دوره آماری مشترک (سال آبی ۱۳۵۲ - ۱۳۵۳ تا سال آبی ۱۳۹۰ - ۱۳۹۱) برای انجام این پژوهش انتخاب شدند. در تحقیق حاضر، آمار و اطلاعات دبی متوسط جریان ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوزه آبخیز حبله‌رود در مقیاس زمانی ماهیانه استخراج شد. به جهت استفاده از آمار و اطلاعات، سعی شد ایستگاه‌های منتخب از پراکنش مناسب در سطح حوضه و طول دوره آماری بلندمدت برخوردار باشند. مشخصات ایستگاه‌های منتخب در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود

ارتفاع ایستگاه (متر)	مختصات جغرافیایی		نام ایستگاه	نام رودخانه
	عرض	طول		
۱۹۲۴	۳۵-۴۴-۵۳	۵۲-۴۵-۱۷	فیروزکوه	حبله‌رود
۱۸۱۴	۳۵-۴۳-۱۷	۵۲-۳۹-۴۵	نمرود	نمرود
۱۴۷۲	۳۵-۳۱-۱۷	۵۲-۳۱-۰۱	سیمین‌دشت	حبله‌رود
۱۴۵۸	۳۵-۳۱-۲۰	۵۲-۳۰-۱۳	دلیچای سیمین‌دشت	دلیچای
۱۰۴۰	۳۵-۱۸-۰۰	۵۲-۲۶-۰۰	بن‌کوه حبله‌رود	حبله‌رود

بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک

— بر آورد کمبود جریان به روش حدآستانه

برای برآورد کمبود جریان از روش حدآستانه استفاده شد. در تحقیق حاضر سطوح آستانه مناسب جهت بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از منحنی تداوم جریان، که نشان‌دهنده رابطه بین دبی‌های روزانه و احتمال وقوع آن‌هاست، انتخاب شد. بر این اساس، سطوح آستانه Q_{50} ، Q_{70} ، Q_{80} و Q_{90} مبنای استخراج دوره‌های خشک‌سالی هیدرولوژیک در نظر گرفته و محاسبه شد. از تفاضل میانه و دبی، میزان کمبود دبی در هر ماه تعیین شد. سپس این مقدار با توجه به تعداد روزهای هر ماه به حجم کمبود تبدیل شد.

— تعیین الگوی توزیع مکانی کمبود حجم جریان

درون‌یابی یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که اقلیم‌شناسان در مطالعات پهنه‌بندی از آن استفاده می‌کنند. روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد. در پژوهش حاضر از روش کریجینگ (رابطه ۱) استفاده شد که واریانس تخمین در آن حداقل است. بنابراین:

$$Z(x_i) - Z^*(x_i) \sim 0 \quad (1)$$

$Z(x_i)$: مقدار مشاهده‌شده متغیر در نقطه x_i نام با مختصات معلوم، $Z^*(x_i)$: مقدار تخمینی در نقطه x_i نام، E: امید ریاضی

رابطه ۱ را می‌توان بدین صورت نیز نوشت:

$$E Z(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

λ_i : وزن داده‌های مشاهده‌ای است.

— تحلیل روند سری‌های زمانی با روش من-کندال

به منظور تحلیل روند سری‌های زمانی از آزمون من-کندال استفاده شد. این آزمون، که ابتدا من^۱ (۱۹۴۵) آن را ارائه کرد و سپس کندال^۲ آن را توسعه داد، جزء متداول‌ترین روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند سری‌های زمانی به شمار می‌رود و قابل

1. Mann
2. Kendall

کاربرد برای انواع داده‌های غیر نرمال، ناقص، و فصلی است و بیشترین توانایی ذاتی را در تحلیل داده‌ها دارد (Yanning, 2010). همچنین این آزمون نسبت به دیگر آزمون‌های روند برای تعیین روند سری‌های زمانی هیدرولوژیک مناسب‌تر است (Mc Bean & Mottice, 2006).

این آزمون برای بررسی تصادفی بودن و تعیین روند در سری‌ها استفاده می‌شود. ابتدا این تست برای مشخص کردن غیر پارامتریک بودن سری‌ها به کار می‌رود. بدین ترتیب که سری‌های آماری به ترتیب صعودی مرتب و رتبه‌بندی می‌شوند. در این آزمون تصادفی بودن داده‌ها با فقدان روند مشخص می‌شود. در صورت وجود روند، داده‌ها غیر تصادفی هستند و برای تعیین تصادفی بودن داده‌ها از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Mitchell et al., 1996).

$$T = \frac{4P}{n(n-1)} \quad (2)$$

T: آماره کندال، P: مجموع تعداد رتبه‌های بزرگ‌تر از ردیف ni که بعد از آن قرار می‌گیرند که از رابطه $p = \sum_{i=1}^n ni$ به دست می‌آید، n: تعداد کل سال‌های آماری مورد استفاده یا $\sum xi$ است. به منظور سنجش معنادار بودن آماره T از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$T > t \quad \text{tg} \sqrt{\frac{4n-10}{9n(n-1)}} \quad (3)$$

tg: مقدار بحرانی نمره نرمال یا استاندارد (z) با سطح احتمال آزمون که با سطح احتمال ۹۵ درصد به دست می‌آید. با توجه به مقادیر به دست آمده برای T_t حالات مختلفی مشاهده می‌شود. در همین زمینه چنانچه $T_t > T$ باشد هیچ‌گونه روند مهمی در سری‌ها مشاهده نمی‌شود و سری‌ها تصادفی هستند. همچنین اگر $T_t < T$ باشد نشان‌دهنده منفی در سری‌ها و در صورتی که $T_t > T$ باشد روند مثبت در سری‌ها غالب خواهد بود (Sueyers, 1990).

نتایج و بحث

حدآستانه و تعیین دوره‌های خشک بر اساس مقادیر میانه (Q50)

نتایج مربوط به حدآستانه در ایستگاه‌های منتخب نشان داد بیشترین و کمترین تداوم مربوط به ایستگاه‌های سیمین‌دشت و دلیچای سیمین‌دشت و به ترتیب برابر ۷/۱۲۵ و ۴/۸۵ ماه در هر دوره کمبود جریان است. تغییرات کمبود جریان در ایستگاه‌های مختلف محدوده مطالعاتی از ۲۲۷ ماه در ایستگاه نمرود تا ۲۲۸ ماه در سایر ایستگاه‌ها متغیر بوده است. بنابراین به طور متوسط در کل حوزه آبخیز ۲۲۷/۸ ماه کمبود جریان رخ داده است. همچنین تعداد وقایع کمبود جریان اتفاق افتاده در حوزه آبخیز به طور متوسط ۳۹ رخداد بود که بیشترین تعداد مربوط به ایستگاه دلیچای سیمین‌دشت با ۴۷ رخداد و کمترین آن مربوط به ایستگاه سیمین‌دشت با ۳۲ رخداد بود. نتایج محاسبات متوسط کمبود جریان برای ایستگاه‌های منتخب در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مجموع و میانگین ویژگی‌های کمبود جریان بر اساس مقادیر میانه (Q50) در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود

نام ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد رخداد	مجموع تداوم (ماه)	متوسط تداوم (ماه)
فیروزکوه	۰۰۵-۴۷	۳۷	۲۲۷	۶/۱۳۰
نمرود	۰۰۷-۴۷	۴۰	۲۲۸	۵/۷۰۰
سیمین‌دشت	۰۱۱-۴۷	۳۲	۲۲۸	۷/۱۲۵
دلیچای سیمین‌دشت	۰۱۳-۴۷	۴۷	۲۲۸	۴/۸۵۰
بن‌کوه	۰۱۵-۴۷	۳۹	۲۲۸	۵/۸۴۶

اعمال حدآستانه و تعیین دوره‌های خشک بر اساس Q70

نتایج این بخش نیز نشان داد بیشترین و کمترین تداوم مربوط به ایستگاه‌های فیروزکوه و سیمین‌دشت و به ترتیب برابر ۲۹/۱۳ و ۳۱/۷ ماه در هر دوره کمبود است. تغییرات کمبود جریان در ایستگاه‌های منطقه از ۳۴۰ ماه در ایستگاه بن‌کوه حبله‌رود تا ۳۳۷ ماه در ایستگاه فیروزکوه دیده شد. به طور متوسط نیز در کل حوزه آبخیز ۳۸۲/۶ ماه کمبود جریان اتفاق افتاده بود. تعداد وقایع

کمبود جریان اتفاق افتاده در حوزه آبخیز نیز به طور متوسط ۳۴/۸ رخداد بوده است که بیشترین تعداد مربوط به ایستگاه سیمین‌دشت با ۴۷ رخداد و کمترین آن مربوط به ایستگاه فیروزکوه با ۱۵ رخداد بود. نتایج حدآستانه دبی ۷۰ درصد برای ایستگاه‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های کمبود جریان بر اساس مقادیر Q۷۰ در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود

نام ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد رخداد	مجموع تداوم (ماه)	متوسط تداوم (ماه)
فیروزکوه	۰۰۵-۴۷	۱۵	۴۳۷	۲۹/۱۳
نمرود	۰۰۷-۴۷	۳۸	۳۶۸	۹/۶۸
سیمین‌دشت	۰۱۱-۴۷	۴۷	۳۴۴	۷/۳۱
دلیچای سیمین‌دشت	۰۱۳-۴۷	۲۸	۴۲۴	۱۵/۱۴
بن‌کوه حبله‌رود	۰۱۵-۴۷	۴۶	۳۴۰	۷/۳۹

اعمال حدآستانه و تعیین دوره‌های خشک بر اساس Q۸۰

طبق نتایج، بیشترین و کمترین تداوم مربوط به ایستگاه‌های فیروزکوه و سیمین‌دشت و به ترتیب برابر ۶۴ و ۱۲/۴ ماه در هر دوره کمبود جریان بود. همچنین تغییرات کمبود جریان در ایستگاه‌های مختلف منطقه از ۳۸۹ ماه در ایستگاه بن‌کوه حبله‌رود تا ۴۴۸ ماه در ایستگاه فیروزکوه متغیر بوده است که به طور متوسط در کل حوزه آبخیز ۴۱۶/۸ ماه کمبود جریان اتفاق افتاده بود. طبق برآوردها، تعداد وقایع کمبود جریان اتفاق افتاده در حوزه آبخیز به طور متوسط ۲۳/۲ رخداد بوده است که بیشترین تعداد مربوط به ایستگاه سیمین‌دشت با ۳۲ رخداد و کمترین آن مربوط به ایستگاه فیروزکوه با ۷ رخداد بود. متوسط کمبود جریان بر اساس دبی ۸۰ درصد در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مجموع و میانگین ویژگی‌های کمبود جریان بر اساس مقادیر Q۸۰ در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود

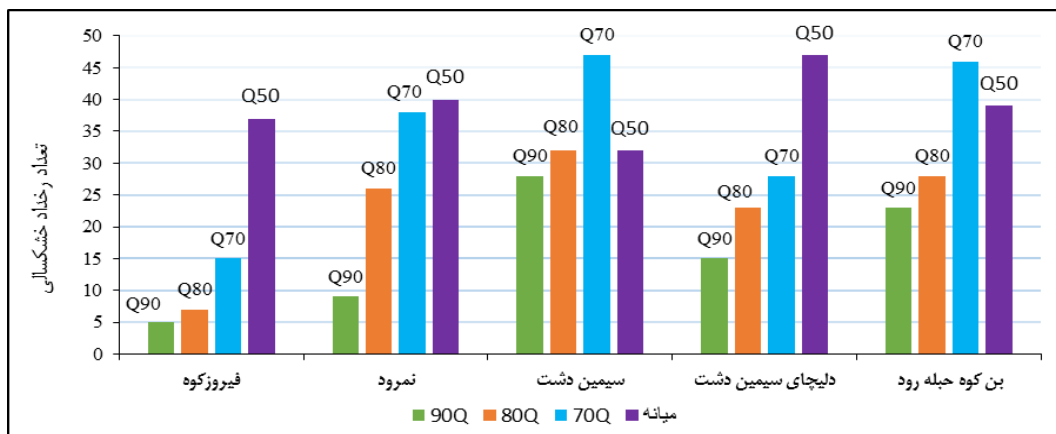
نام ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد رخداد	مجموع تداوم (ماه)	متوسط تداوم (ماه)
فیروزکوه	۰۰۵-۴۷	۷	۴۴۸	۶۴
نمرود	۰۰۷-۴۷	۲۶	۴۱۱	۱۵/۸
سیمین‌دشت	۰۱۱-۴۷	۳۲	۳۹۷	۱۲/۴
دلیچای سیمین‌دشت	۰۱۳-۴۷	۲۳	۴۳۹	۱۹/۰۸
بن‌کوه حبله‌رود	۰۱۵-۴۷	۲۸	۳۸۹	۱۳/۸۹

اعمال حدآستانه و تعیین دوره‌های خشک بر اساس Q۹۰

نتایج نشان داد بین ایستگاه‌های منتخب تحقیق بیشترین و کمترین تداوم مربوط به ایستگاه‌های فیروزکوه و سیمین‌دشت و به ترتیب برابر ۹۰/۸ و ۱۵/۳۵ ماه در هر دوره کمبود جریان بوده است. بر این اساس، تغییرات کمبود جریان در ایستگاه‌های مختلف منطقه از ۴۳۰ ماه در ایستگاه بن‌کوه حبله‌رود و سیمین‌دشت تا ۴۵۴ ماه در ایستگاه فیروزکوه متغیر بوده است و به طور متوسط در کل حوزه آبخیز ۴۴۱ ماه کمبود جریان رخ داده است. گفتمنی است تعداد وقایع کمبود جریان رخ داده در حوزه آبخیز به طور متوسط شانزده رخداد بوده است که بیشترین تعداد مربوط به ایستگاه سیمین‌دشت با ۲۸ رخداد و کمترین آن مربوط به ایستگاه فیروزکوه با ۵ رخداد بود. نتایج آستانه ۹۰ درصد در جدول ۵ ارائه شده است. تعداد وقایع خشک‌سالی اتفاق افتاده در حدآستانه‌های Q۵۰، Q۷۰، Q۸۰ و Q۹۰ در شکل ۲ نشان داده شده است.

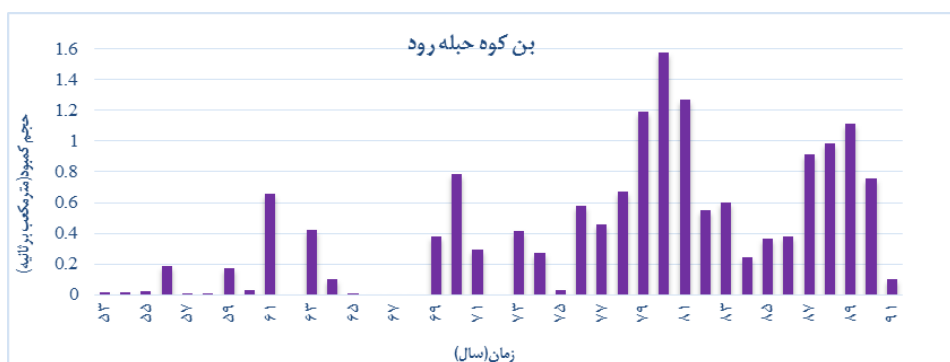
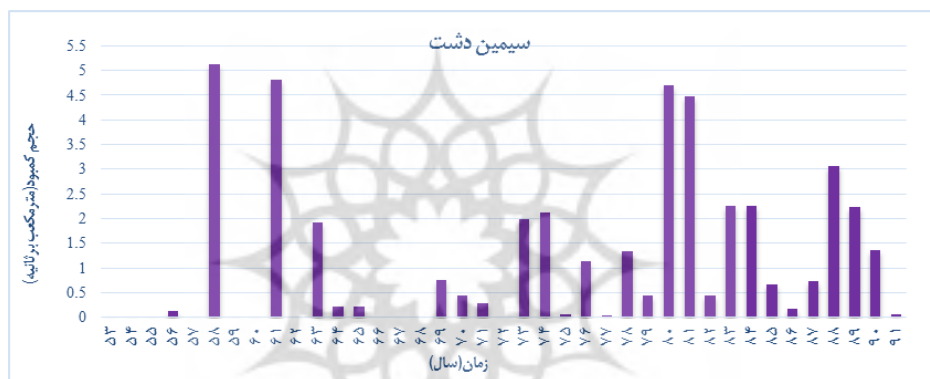
جدول ۵. مجموع و میانگین ویژگی‌های کمبود جریان بر اساس مقادیر Q۹۰ در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود

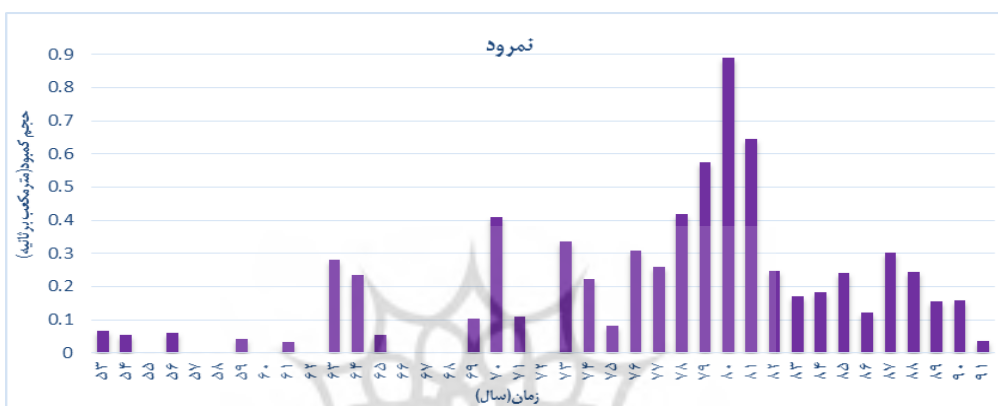
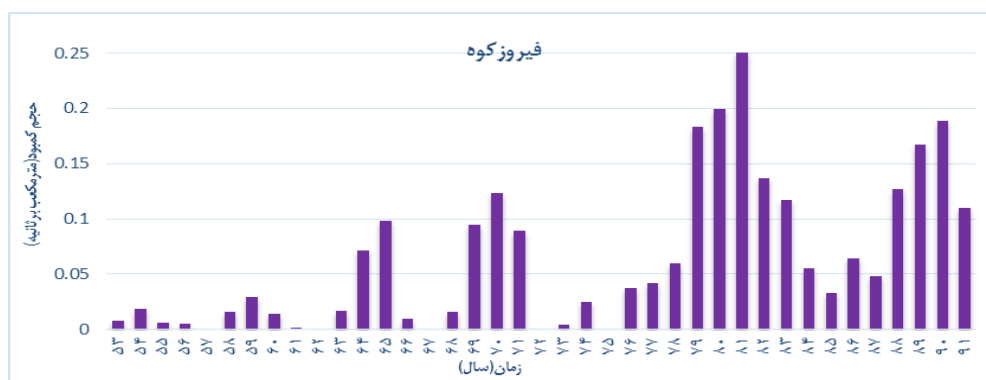
نام ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد رخداد	مجموع تداوم (ماه)	متوسط تداوم (ماه)
فیروزکوه	۰۰۵-۴۷	۵	۴۵۴	۹۰/۸
نمرود	۰۰۷-۴۷	۹	۴۴۳	۴۹/۲۲
سیمین‌دشت	۰۱۱-۴۷	۲۸	۴۳۰	۱۵/۳۵
دلیچای سیمین‌دشت	۰۱۳-۴۷	۱۵	۴۴۸	۲۹/۸۶
بن‌کوه حبله‌رود	۰۱۵-۴۷	۲۳	۴۳۰	۱۸/۶۹



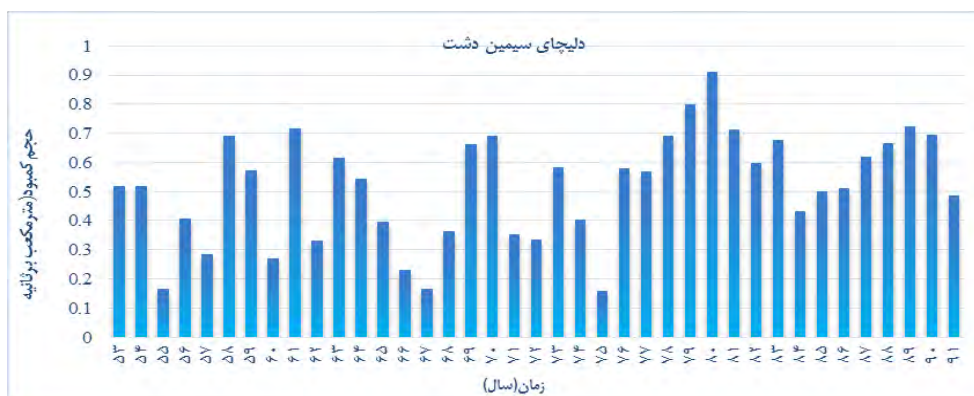
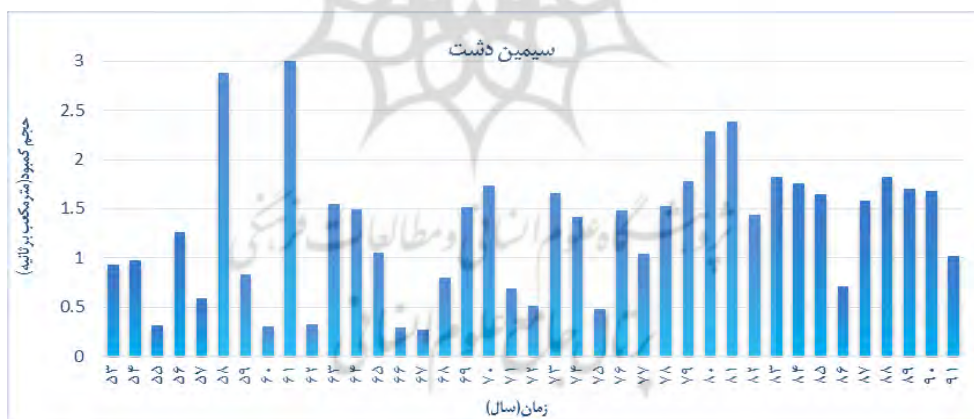
شکل ۲. تعداد رخداد های خشکسالی در ایستگاه‌ها برای مقادیر حدآستانه Q90، Q80، Q70 و میانگین

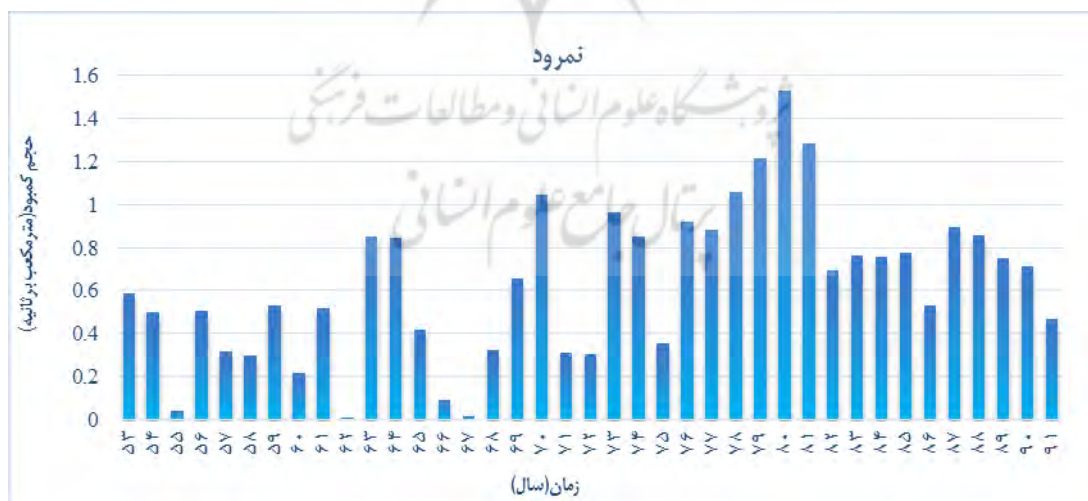
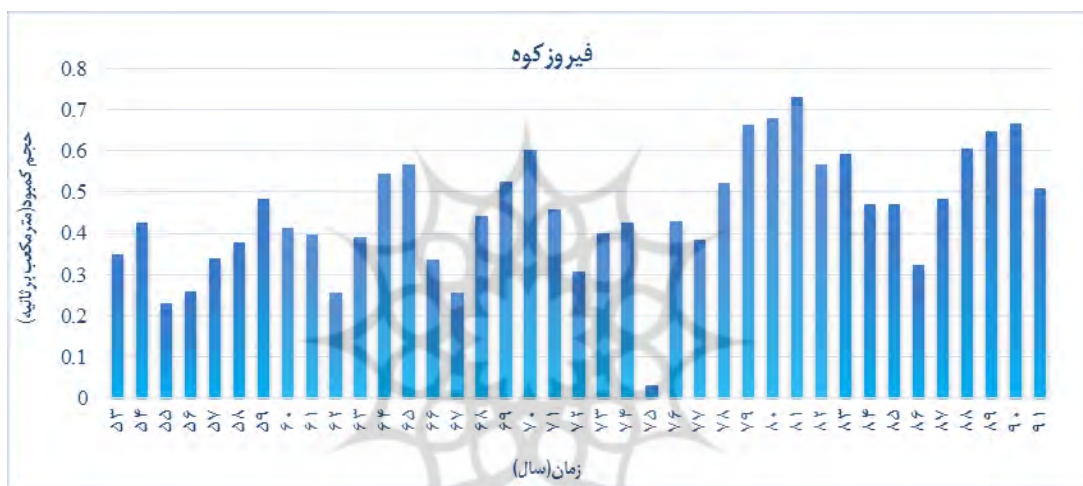
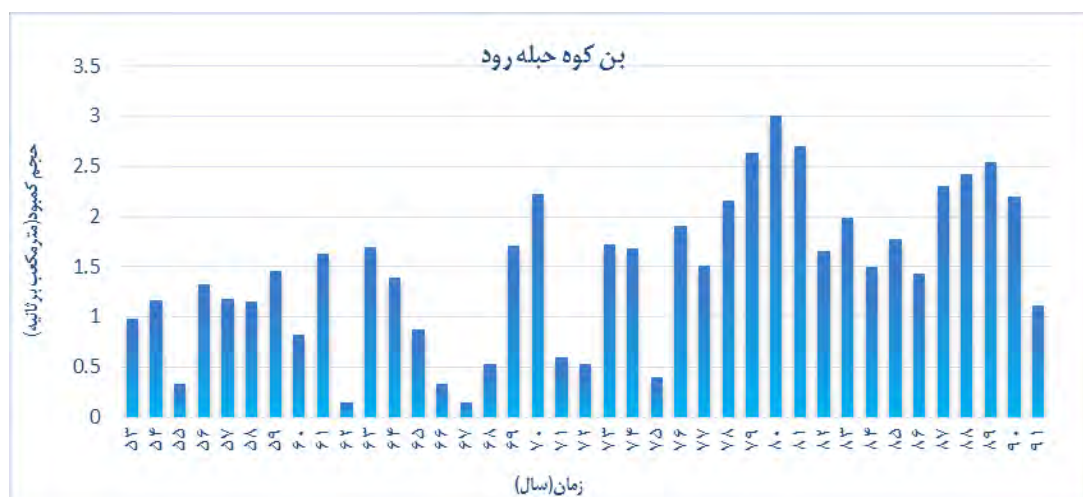
به منظور بررسی وجود یا نبود خشکسالی هیدرولوژیک در سال‌های آماری هر پنج ایستگاه نمودار حجم در برابر زمان برای همه ایستگاه‌ها و در حدآستانه‌های مختلف در شکل‌های ۳ تا ۶ ترسیم شده است.



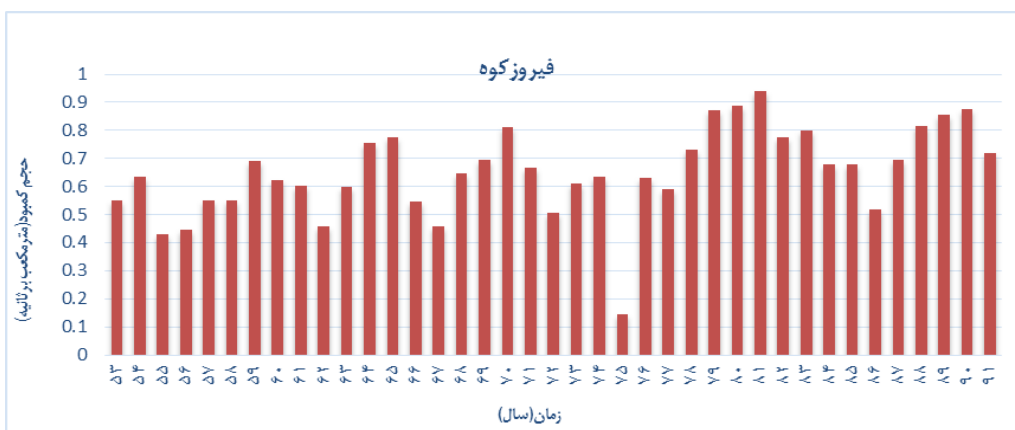
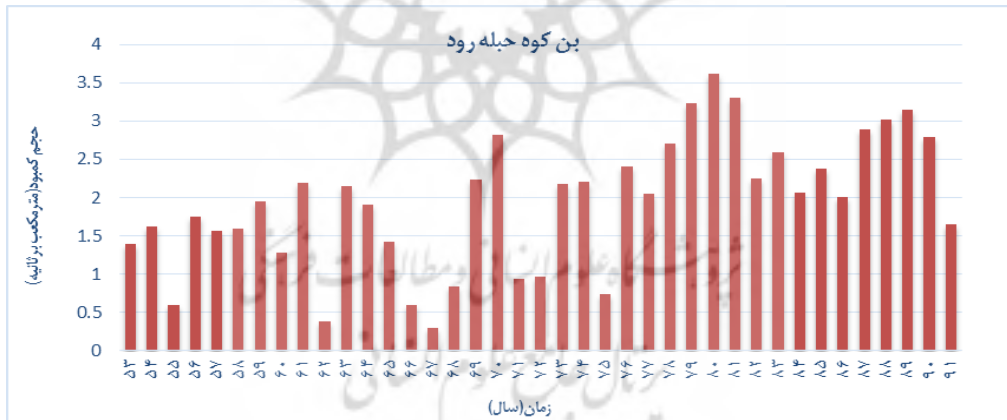
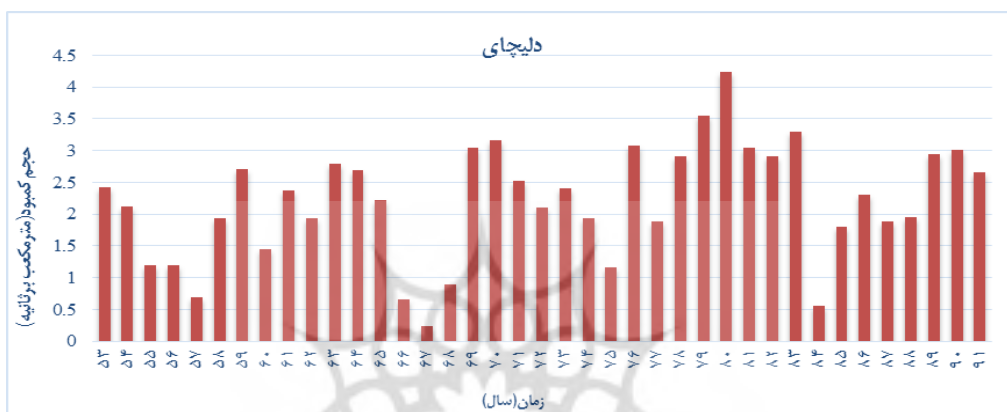
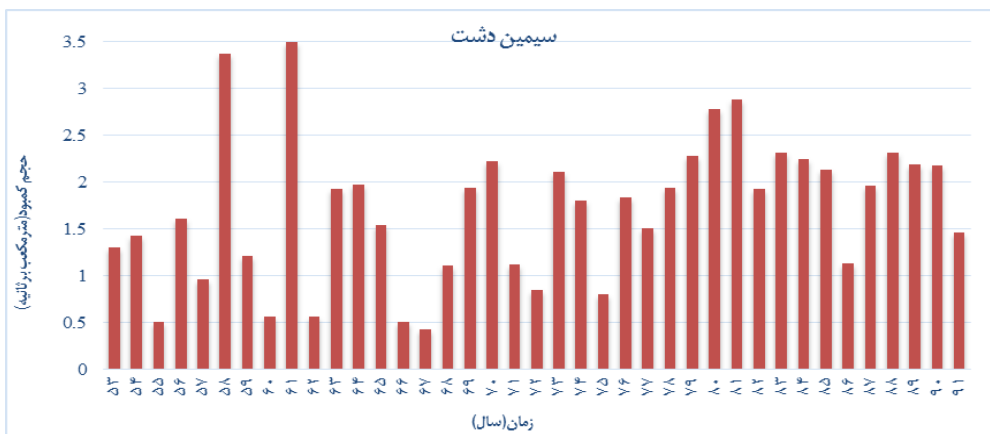


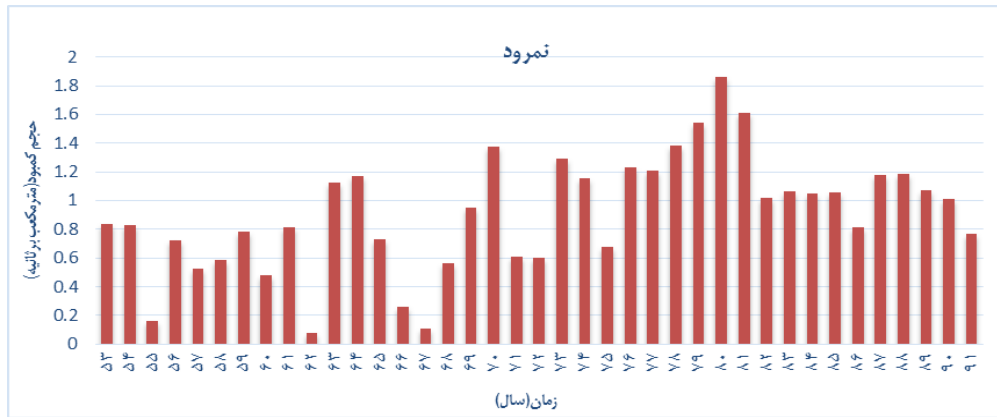
شکل ۳. حجم کمبود برای کل ایستگاه‌ها در حداثه Q50



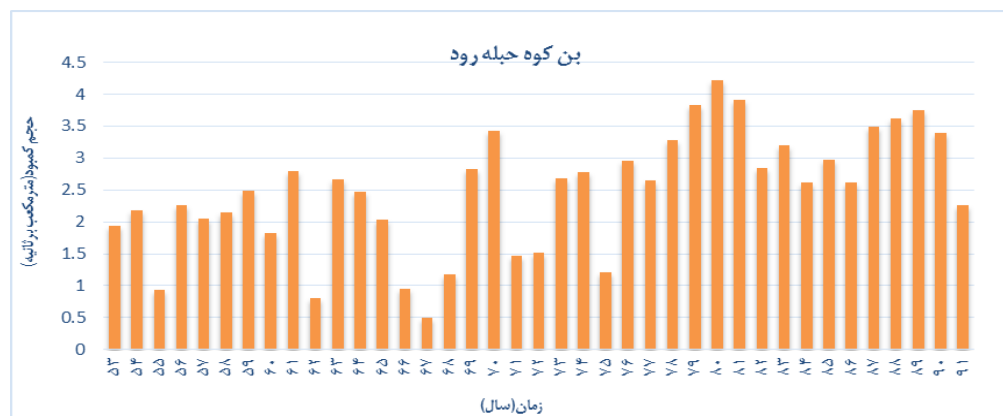
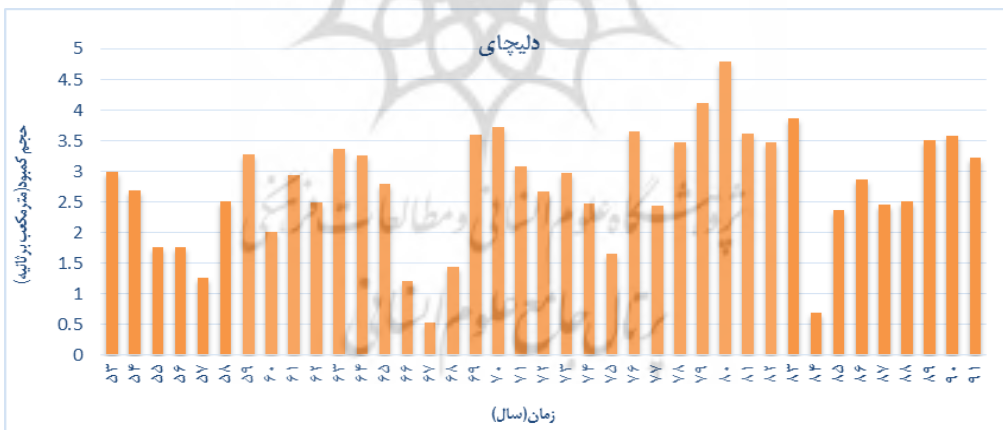
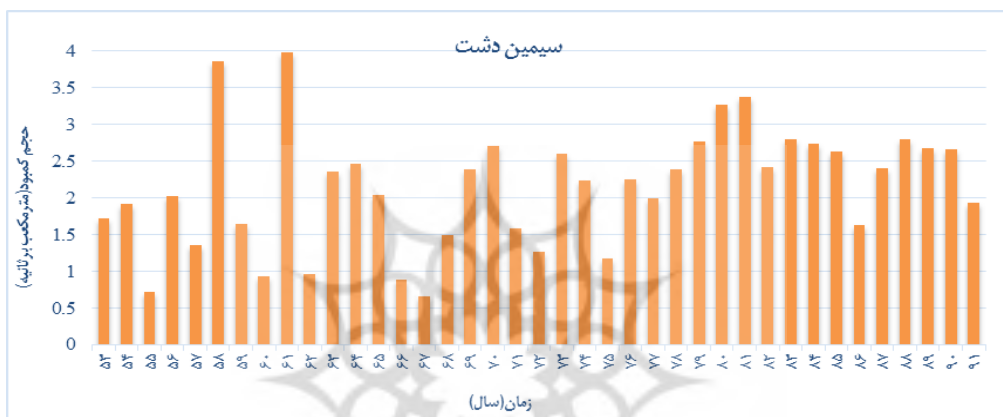


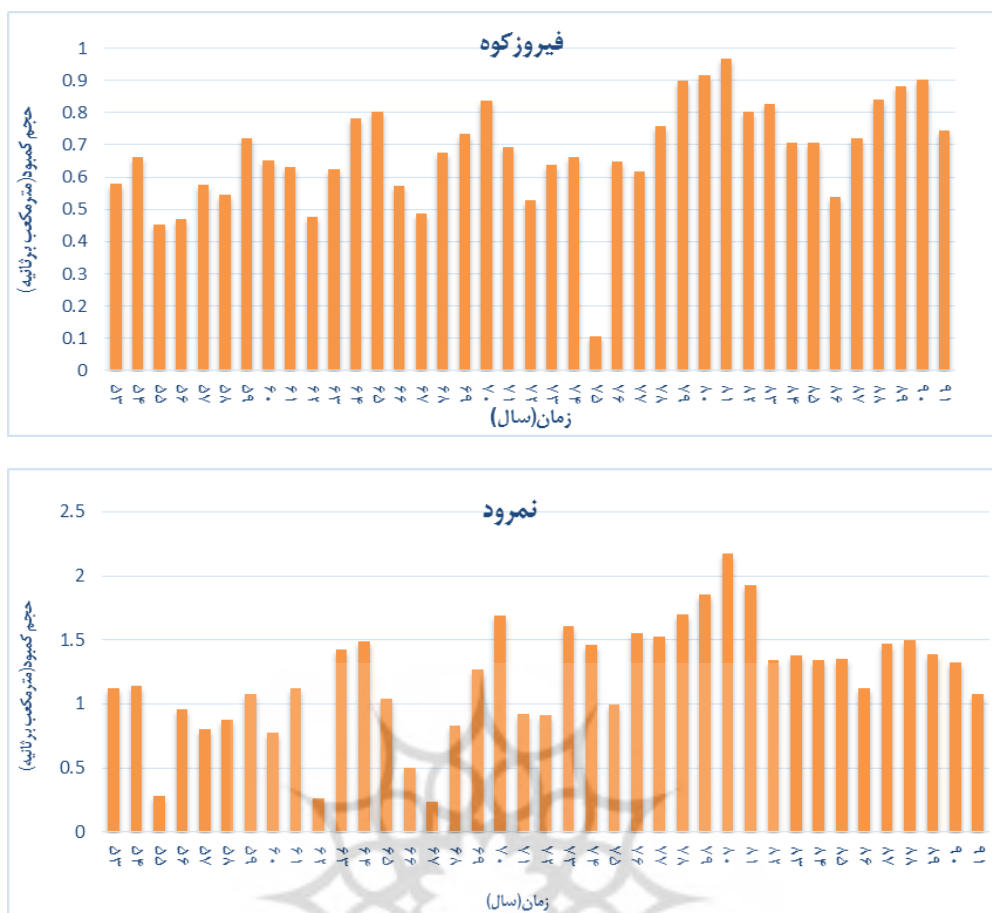
شکل ۴. حجم کمبود برای کل ایستگاهها در حدستانه Q۷۰





شکل ۵. حجم کمبود برای کل ایستگاهها در حدآستانه Q۸۰





شکل ۶. حجم کمبود برای کل ایستگاه‌ها در حدآستانه Q90

نتایج نشان داد خشک سالی هیدرولوژیک در حد آستانه میانه در دوره آماری ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۱ در سال‌های متفاوت در ایستگاه‌های منتخب رخ داده است. در همین زمینه، عدم وقوع این پدیده طی سال‌های ۱۳۵۳ - ۱۳۵۵ و ۱۳۵۹ - ۱۳۶۰ در ایستگاه سیمین دشت در سال ۱۳۵۷ به طور مشترک در چهار ایستگاه فیروزکوه، نمرود، دلپچای، سیمین دشت طی سال‌های ۱۳۶۶ - ۱۳۶۸ در ایستگاه‌های نمرود، سیمین دشت، بن کوه و در سال ۱۳۶۷ در همه ایستگاه‌ها این پدیده مشاهده شده است. همچنین در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۸ - ۱۳۹۱ خشک سالی در همه ایستگاه‌ها رخ داده است (شکل ۳).

نتایج نشان داد بر اساس حدآستانه میانه (Q50) در چهار ایستگاه فیروزکوه، نمرود، دلپچای، بن کوه شدیدترین کمبود جریان رخ داده در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ بوده است؛ درحالی که در ایستگاه سیمین دشت شدیدترین کمبود جریان در سال ۱۳۵۸ رخ داده است. بر اساس نتایج حدآستانه Q70، Q80، Q90 نیز شدیدترین کمبود جریان رخ داده در ایستگاه‌های فیروزکوه، نمرود، دلپچای، بن کوه در سال ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ بوده است؛ درحالی که در ایستگاه سیمین دشت در سال ۱۳۶۱ مشاهده شده است. بر اساس حدآستانه میانه، بیشترین میزان کمبود در ایستگاه سیمین دشت و برابر با ۵/۱۲ متر مکعب بوده است؛ درحالی که بر اساس حدآستانه Q70 ایستگاه‌های بن کوه و سیمین دشت به میزان ۳ متر مکعب بیشترین مقدار کمبود جریان را به خود اختصاص داده‌اند و بر اساس حدآستانه Q80 و Q90 ایستگاه دلپچای و سیمین دشت به ترتیب با میزان ۴/۲۳ و ۴/۸ متر مکعب بیشترین میزان کمبود را داشته‌اند. با توجه به حدآستانه میانه، تعداد ماه‌هایی که در آن‌ها خشک سالی هیدرولوژیک روی داده است در چهار ایستگاه نمرود، دلپچای، بن کوه، سیمین دشت برابر با ۲۲۸ ماه و در ایستگاه فیروزکوه برابر با ۲۲۷ ماه بوده است. با توجه به حدآستانه Q70، Q80، Q90 نیز ایستگاه فیروزکوه به ترتیب با تعداد ۴۳۷، ۴۴۸، ۴۵۴ ماه بیشترین ماه‌های کمبود جریان را به خود اختصاص داده است (جدول ۶).

جدول ۶. شدت کمبود جریان (متر مکعب بر ثانیه) بر اساس حدآستانه Q۵۰، Q۷۰، Q۸۰، Q۹۰

ایستگاه	حدآستانه			
	Q۹۰	Q۸۰	Q۷۰	Q۵۰
	متوسط	شدیدترین / سال وقوع	متوسط	شدیدترین / سال وقوع
فیروزکوه	۰/۶۷	۰/۹۶ (۱۳۸۱)	۰/۶۵	۰/۷۳ (۱۳۸۱)
نمرود	۱/۲۰	۲/۱۷ (۱۳۸۰)	۰/۹۱	۱/۵۳ (۱۳۸۰)
سیمین دشت	۲/۱۴	۳/۹۸ (۱۳۶۱)	۱/۷۱	۳/۰ (۱۳۶۱)
دلیچای سیمین دشت	۲/۷۴	۴/۸۰ (۱۳۸۰)	۲/۲۰	۰/۷ (۱۳۸۰)
نمرود	۲/۴۸	۳/۲۱ (۱۳۸۰)	۱/۹۴	۳/۰ (۱۳۸۰)

نتایج نشان داد در ایستگاه نمرود میانگین بلندمدت بارش بیشترین مقدار و برابر با ۳۳۳ میلی‌متر و رژیم بارش نیز در این ایستگاه برفی- بارانی بوده است. نیز به دلیل قرار گرفتن در ارتفاعات حوضه دارای رژیم غالب برفی است. پس از ایستگاه نمرود، ایستگاه فیروزکوه که در ارتفاعات غربی حوضه واقع شده است میانگین بلندمدت بارش به میزان ۲۸۴ میلی‌متر را به خود اختصاص داده است. در این ایستگاه نیز رژیم بارش برفی- بارانی و بیشتر برف گیر است. ایستگاه‌های سیمین دشت و دلیچای سیمین دشت که در محدوده مرکزی حوضه واقع شده‌اند با میانگین بلندمدت بارش ۲۵۷ میلی‌متر دارای رژیم بارشی باران‌اند. ایستگاه بن کوه نیز با قرار گرفتن در ناحیه جنوبی و خروجی حوضه با میانگین بلندمدت بارش معادل ۱۳۳ میلی‌متر کمترین مقدار بارش را داشته است (جدول ۷).

جدول ۷. میانگین بارش سالیانه ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی در بازه زمانی تحقیق

ایستگاه	کد ایستگاه	ارتفاع (متر)	متوسط بارش (میلی‌متر)
فیروزکوه	۰۰۵-۴۷	۱۹۲۴	۲۸۴
نمرود	۰۰۷-۴۷	۱۸۱۴	۳۳۳
سیمین دشت	۰۱۱-۴۷	۱۴۷۲	۲۵۷
دلیچای سیمین دشت	۰۱۳-۴۷	۱۴۵۸	۲۵۷
بن کوه	۰۱۵-۴۷	۱۰۴۰	۱۳۳

با توجه به رژیم بارش و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها در حوزه آبخیز، می‌توان گفت در قسمت شمالی حوضه، به دلیل وجود رژیم برف‌گیر، تغذیه آب‌های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است و میزان دبی ایستگاه‌های هیدرومتری شمالی و سراب حوضه منظم و صرفاً وابسته به برداشت و مصرف منابع آب سطحی نبوده است. همچنین در این نواحی کشاورزی نسبت به زیرحوضه‌های پایین‌دستی ۴۰ درصد بیشتر بوده است. یکی از دلایل احتمالی کمبود میزان جریان در محدوده ایستگاه‌های سیمین دشت و دلیچای سیمین دشت (مرکز حوضه) رژیم بارانی و کیفیت مطلوب (میزان هدایت الکتریکی، طبق آمار دریافت‌شده از شرکت مدیریت منابع آب ایران، معادل ۵۰۲ میکروموس بر سانتی‌متر بوده) مصرف آب برای مصارف کشاورزی و باغداری بوده است.

بر اساس نتایج، سال‌های وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیک در ایستگاه‌های واقع در زیرحوضه‌های مختلف یکسان نبوده است که با نتایج اسلامیان و همکارانش (۱۳۹۰) در حوزه آبخیز کرخه و جهان‌بخش و همکارانش (۱۳۹۵) و عباس‌علی و محرابی (۱۳۹۸) مطابقت دارد. همچنین مقادیر حداکثر شدت کمبود جریان ماهیانه در ماه‌های مختلف در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده و بر اساس تعریف حدآستانه خشک‌سالی ولو برای دوره‌ای کوتاه اتفاق افتاده که با نتایج حاصل از تحقیقات مساعدی و همکارانش (۱۳۸۸)، بایزیدی و همکارانش (۱۳۹۲)، قربانی و همکارانش (۱۳۹۸)، و علیشاهی‌چگنی و همکارانش (۱۴۰۲) مطابقت دارد.

پهنه‌بندی کمبود جریان

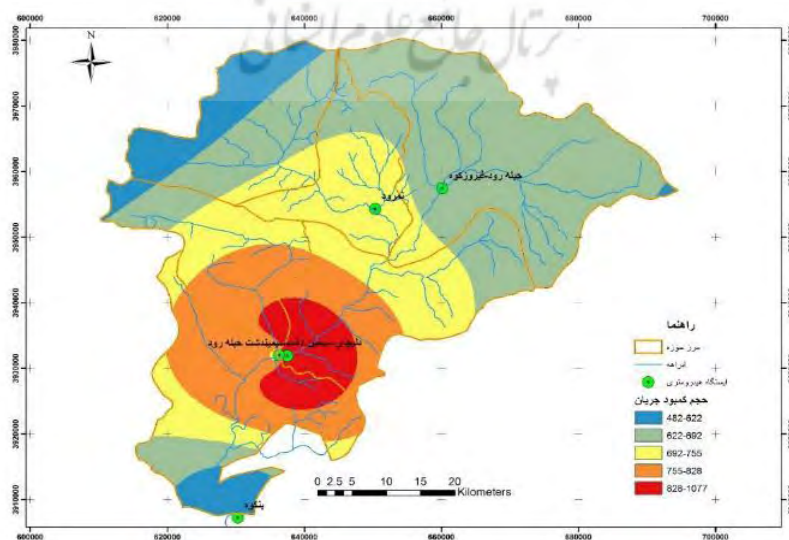
به دلیل عدم رخداد هم‌زمان کمبود جریان در ایستگاه‌های مطالعاتی، لازم بود در هر ایستگاه سال‌های با وقوع کمبود جریان مشخص شود. پس از ترسیم نمودارهای تغییرات دبی ماهیانه به منظور تعیین زمان‌های رخداد کمبود جریان با فراوانی بیشتر مشخص شد در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۹ - ۱۳۸۱ در بیشتر ایستگاه‌ها کمبود جریان رخ داده است. بنابراین سال آبی ۱۳۸۰ - ۱۳۸۱ به عنوان سال منتخب پهنه‌بندی انتخاب شد (شکل ۷).

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل زمین آماری نشان داد در سال آبی ۱۳۸۰ - ۱۳۸۱ تغییر نمای مناسب برازش داده شده به ساختار مکانی داده‌های حجم کمبود جریان مدل خطی بوده و دامنه مؤثر تا فاصله حدود ۳۴۴۸۷ متر بوده است. مقادیر $c/c+c0$ (نسبت قطعه به سقف) نیز حکایت از وجود ساختار مکانی ضعیف بین این مقادیر داشته است (جدول ۹). نسبت قطعه به سقف که به صورت درصد بیان می‌شود می‌تواند یک معیار برای طبقه‌بندی وابستگی مکانی پارامترهای کیفی منابع آبی در نظر گرفته شود. اگر این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد بدین معناست که متغیر وابستگی مکانی قوی دارد. اگر این نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد وابستگی مکانی متوسط و اگر بیشتر از ۷۵ درصد باشد وابستگی بسیار ضعیف را نشان می‌دهد.

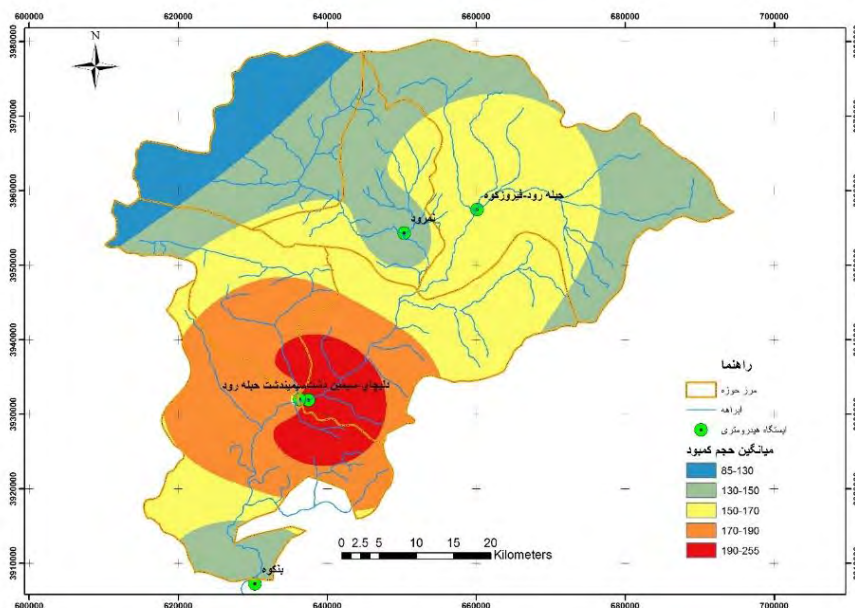
جدول ۹. پارامترهای تغییر نمای حجم کمبود جریان در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود

سال آبی	مدل	$c/c+c0$	کلاس همبستگی	فاصله مؤثر (متر)	R^2	RSS
۹۱-۱۳۵۳	خطی	۰/۱	۰/۱۹۴	۳۴۴۸۷	۰/۰۳۸	۴۱۱۷۹
میانگین دوره ۳۹ ساله	خطی	۰/۱	۰/۲۹۳	۳۴۴۸۷	۰/۰۸۶	۴۶/۶

با توجه به نقشه الگوی توزیع مکانی حجم کمبود جریان در بازه زمانی منتخب، بیشترین و کمترین حجم کمبود به ترتیب در ایستگاه دلیچای سیمین‌دشت و ایستگاه‌های نم‌رود و بن‌کوه مشاهده شد (شکل ۸). نقشه پهنه‌بندی میانگین ۳۹ ساله حجم کمبود جریان نشان داد از مرکز حوزه آبخیز به سمت کناره‌های حوضه حجم کمبود جریان کاهش یافته است. به طور کلی طی دوره مورد بررسی کمبود جریان در همه حوزه‌های آبخیز رخ داده است و در بیشتر سال‌های آبی حداقل یک دوره کمبود جریان اتفاق افتاده است. این بخش از نتایج با یافته‌های مساعدی و همکارانش (۱۳۸۸) در این خصوص که هیچ منطقه‌ای از حوضه از بروز خشک‌سالی در امان نبوده است مطابقت داشته است. از عوامل مهم و کلیدی در خصوص ایجاد کم‌آبی به ترتیب می‌توان به متوسط بارندگی سالیانه، مساحت، و ارتفاع حداقل اشاره کرد (بایزیدی و تقفیان، ۱۳۹۰). همچنین نتایج حاصل با یافته‌های اسلامیان و همکارانش (۱۳۹۰) مبنی بر اینکه بیشترین مقدار شاخص‌های جریان حداقل در نواحی مرکزی و پایاب و خروجی حوضه مشاهده می‌شود و از مقدار این شاخص‌ها با حرکت به سمت سراب حوضه کاسته می‌شود مطابقت دارد.



شکل ۷. نقشه الگوی توزیع مکانی حجم کمبود جریان (متر مکعب) در پهنه‌بندی خشک‌سالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز حبله‌رود (سال آبی ۱۳۸۰ - ۱۳۸۱)



شکل ۸. نقشه الگوی توزیع مکانی متوسط حجم کمبود جریان (متر مکعب) طی دوره ۳۹ ساله

نتیجه

پژوهش حاضر با هدف تحلیل شدت و حجم و تداوم جریان حداقل رودخانه‌ای در حوزه آبخیز حبله رود با استفاده از آمار و اطلاعات دبی ماهیانه پنج ایستگاه هیدرومتری (فیروزکوه، نمرود، سیمین دشت، دلچای، بن کوه) انجام شد. در همین زمینه، از شاخص‌های حدآستانه Q_{50} ، Q_{70} ، Q_{80} و Q_{90} به منظور تشخیص دوره‌های دارای کمبود جریان استفاده شد. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد نواحی مرکزی حوضه خشک سالی شدیدتری را نسبت به سایر نواحی حوضه تجربه کرده‌اند که در نتیجه در معرض خسارات اقتصادی-اجتماعی خشک سالی هیدرولوژیک قرار داشته‌اند. همچنین بررسی روند شدت و تداوم و حجم جریان حداقل در همه ایستگاه‌ها نشان داد روند کمبود جریان به صورت صعودی بوده است. نتایج پهنه بندی حجم جریان حداقل (اشکال ۹ و ۱۰) نیز در حوزه آبخیز حبله رود بیانگر آن بود که از مرکز به سمت مرز حوضه حجم کمبود جریان کاهش یافته است. با توجه به نتایج مشخص شد (جدول‌های ۲ تا ۴) طی بازه زمانی تحقیق بیشتر ایستگاه‌ها و نواحی حوزه آبخیز حبله رود با کمبود جریان و خشک سالی روبه‌رو بوده است و این موضوع بیانگر آن است که محدوده مطالعاتی در معرض خشک سالی‌های متعدد ولی با شدت‌های متفاوت بوده است و این موضوع مهم و حیاتی باید در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و میان‌مدت و کوتاه‌مدت لحاظ شود. توسعه پایدار کشاورزی و صنعتی و مناطق مسکونی شهر گرمسار و برنامه‌ریزی‌های عرضه و تقاضای آب نیازمند توجه دقیق به این موضوع است. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر بیانگر اهمیت و نقش کلیدی و حیاتی تجزیه و تحلیل جریان حداقل به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک از جمله حوزه آبخیز حبله رود به منظور برنامه‌ریزی طولانی مدت و مدیریت پایدار منابع آبی در این مناطق بوده است.

منابع

- اسلامیان، سعید؛ قاسمی، محسن. و سلطانی گردفرامری، سمیه (۱۳۹۱). محاسبه و ناحیه‌بندی شاخص‌های جریان کم و تعیین دوره‌های خشک‌سالی هیدرولوژیک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کرخه). *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، ۵۹، ۱-۱۳.
- بایزیدی، م. و ثقفیان، ب. (۱۳۹۰). تجزیه و تحلیل منطقه‌ای خشک‌سالی جریان رودخانه در مناطق جنوب غرب کشور. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۴، ۳۷-۵۲.
- بایزیدی، مطلب؛ ثقفیان، بهرام؛ صدقی، حسین و کاوه، فریدون (۱۳۸۸). تحلیل خشک‌سالی هیدرولوژیک حوضه کارون بر اساس داده‌های روزانه. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۸۶، ۵۲-۶۳.
- جهان‌بخش، سعید؛ ساری‌صراف، بهروز؛ غفوری روزبهانی، عبدالمحمد و رحیمی بندرآبادی، سیما (۱۳۹۵). تجزیه و تحلیل زمانی و مکانی جریان حداقل در حوضه آبخیز کرخه. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۸(۱)، ۵۵-۶۷.
- علیشاهی چگنی، منیر؛ پایمزد، شهلا و رحیمی، مهدی (۱۴۰۲). تحلیل دینامیکی خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از روش حد‌آستانه ثابت و نرم‌افزار Vensim. *محیط زیست و مهندسی آب*، ۹(۴)، ۴۶۷-۴۸۴.
- قربانی، مریم؛ مزین، ملیحه و زارعی، حیدر (۱۳۹۸). بررسی خشک‌سالی هیدرولوژیک رودخانه ارمند با استفاده از تجزیه و تحلیل جریان‌های کم‌آبی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۷۲-۶۳.
- ولی، عباس‌علی و محرابی، مهوش (۱۳۹۸). تحلیل فراوانی خشک‌سالی هیدرولوژیک حوضه سد درودزن بر اساس شاخص جریان رودخانه‌ای. *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۹(۱)، ۱۲۵-۱۴۳.
- Ahmadi, B. & Moradkhani, H. (2019). Revisiting hydrological drought propagation and recovery considering water quantity and quality. *Hydrological Processes*, 33(10), 1492-1505.
- Alishahi Chegeni, M., Paimozd, S., & Rahimi, M. (2023). Dynamic Analysis of Hydrological Drought using Constant Threshold Method and Vensim Software. *Environment and Water Engineering*, 9(4), 467-484. doi: 10.22034/ewe.2023.376058.1832. (in Persian)
- Amini, H., EsmaliOuri, A., Mostafazadeh, R., Sharari, M., & Zabihi, M. (2023). Determining Hydrological Drought Characteristics Using Severity-Duration-Frequency Curves and Flow Thresholds Levels in Ardabil Province Rivers. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 13(1), 53-67.
- Bayazidi, M., Saghafian, B., Sedghi, H., & Kaveh, F. (2010). Analysis of hydrological drought in Karoon river basin by daily discharge data. *Watershed Management Research Journal*, 86(2), 52-63. (in Persian)
- Byzedi, M. & Saghafian, B. (2011). Regional analysis of stream flow drought in southwestern of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 5(14), 37-52. (in Persian)
- Cavus, Y. & Aksoy, H. (2020). Critical drought severity/intensity-duration-frequency curves based on precipitation deficit. *Journal of hydrology*, 584, 124312.
- Ding, Y. B., Xu, J. T., Wang, X. W., Cai, H. J., Zhou, Z. Q., Sun, Y. N., & Shi, H. Y. (2021). Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China. *Journal of Environmental Management*, 283, 111980. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111980>
- Eslamian, S. S., Ghasemi, M., & Gerdefaramarzi, S. S. (2012). Computation and regionalization of low flow indices and determination of hydrological drought durations in Karkhe Watershed, *JWSS-Isfahan University of Technology*, 16(59), 1-14 (in Persian)
- Fernández, F. J., Vázquez-Lavín, F., Ponce, R. D., Garreaud, R., Hernández, F., Link, O. & Hanemann, M. (2023). The economics impacts of long-run droughts: Challenges, gaps, and way forward. *Journal of Environmental Management*, 344, 118726.
- Ghorbani, M., Mozayyan, M., & Zarei, H. (2019). Hydrological drought investigation of Armand River using low flows analysis. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 247-263.
- Ghorbani, M., Mozayyan, M., & Zarei, H. (2019). Hydrological Drought Investigation of Armand River Using Low Flows Analysis, *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(3), 247-263. doi: 10.22069/jwsc.2019.15189.3037 (in Persian)
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166.
- Heudorfer, B. & Stahl, K. (2017). Comparison of different threshold level methods for drought propagation analysis in Germany. *Hydrology Research*, 48(5), 1311-1326.
- Hisdal, H., Tallaksen, L. M., Gauster, T., Bloomfield, J. P., Parry, S., Prudhomme, C., & Wanders, N. (2024). Hydrological drought characteristics. In *Hydrological Drought* (pp. 157-231). Elsevier.
- Ho, S., Tian, L., Disse, M., & Tuo, Y. (2021). A new approach to quantify propagation time from meteorological to hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 603, 127056.

- Jahanbakhsh, S., Sari Sarraf, B., Ghafouri Roozbahani, A., & Rahimi Bandarabadi, S. (2016). The spatio-temporal analysis of low flow in Karkheh drainage basin, *Watershed Engineering and Management*, 8(1), 55-67. doi: 10.22092/ijwmse.2016.105974 (in Persian)
- Li, Q., He, P., He, Y., Han, X., Zeng, T., Lu, G., & Wang, H. (2020). Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis. *Atmospheric Research*, 234, 104743.
- Lin, Q., Wu, Z., Zhang, Y., Peng, T., Chang, W., & Guo, J. (2023). Propagation from meteorological to hydrological drought and its application to drought prediction in the Xijiang River basin, South China. *Journal of Hydrology*, 617, 128889.
- Ma, M., Zang, H., Wang, W., Cui, H., Sun, Y., & Cheng, Y. (2023). Copula-Based Severity–Duration–Frequency (SDF) Analysis of Streamflow Drought in the Source Area of the Yellow River, China. *Water*, 15(15), 2741.
- Mukherjee, S., Mishra, A., & Trenberth, K. E. (2018). Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Current climate change reports*, 4, 145-163.
- Pandya, P. & Gontia, N. K. (2023). Development of drought severity–duration–frequency curves for identifying drought proneness in semi-arid regions. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 824-842.
- Pandya, P. & Gontia, N. K. (2023). Development of drought severity–duration–frequency curves for identifying drought proneness in semi-arid regions. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 824-842.
- Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water*, 3, 640544.
- Sharma, T. C. & Panu, U. S. (2022). A Procedure for Estimating Drought Duration and Magnitude at the Uniform Cutoff Level of Streamflow: A Case of the Weekly Flows of Canadian Rivers. *Hydrology*, 9(6), 109.
- Shin, J. Y., Kwon, H. H., Lee, J. H., & Kim, T. W. (2020). Probabilistic long-term hydrological drought forecast using Bayesian networks and drought propagation. *Meteorological Applications*, 27(1), e1827.
- Shiru, M. S., Shahid, S., Dewan, A., Chung, E. S., Alias, N., Ahmed, K., & Hassan, Q. K. (2020). Projection of meteorological droughts in Nigeria during growing seasons under climate change scenarios. *Scientific reports*, 10(1), 10107.
- Sung, J. H. & Chung, E. S. (2014). Development of streamflow drought severity–duration–frequency curves using the threshold level method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3341-3351.
- Ullah, S., You, Q., Sachindra, D. A., Nowosad, M., Ullah, W., Bhatti, A. S., ... & Ali, A. (2022). Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: An assessment based on the CRU data. *Atmospheric Research*, 268, 105998.
- Vali, A. & Mehrabi, M. (2019). The Frequency Analysis of the Hydrological Drought in Doroodzan Dam Basin Based on Stream Flow Drought Index, *Hydrogeomorphology*, 6(19), 125-143 (in Persian)
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359-392.
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., & Domínguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews*, 201, 102953.
- Yasa, I. W. (2024). Hydrological Drought Index Based on Streamflow Regime. *Integrated Drought Management*, 14, 371-396.
- Zhang, Y. & Post, D. (2018). How good are hydrological models for gap-filling streamflow data? *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4593-4604.