



Investigating the relationship between river flow changes caused by drought and the quality of surface water resources in the Tirah River Basin

Taher Farhadinejad^{1*}, Iraj Vayskarami² and Mehran Zand³

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran

² Instructor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorramabad, Iran

³ Associate Professor, soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 28 December 2022

Accepted: 18 April 2023

Extended abstract

Introduction

Drought can have serious negative effects on the quality of water needed for irrigated agriculture. The geological formations of the region increase the concentration of minor and rare toxic elements in the waters, and on the other hand, human activities lead to water pollution in the nearby areas. In this research, the effect of drought on the quality of surface water, the effect of various factors such as geological formations and the decrease or increase of rainfall and air temperature on the quality of water resources, how the quality of water changes, determining the limits of water consumption in the drinking sector and agriculture should be paid.

Materials and methods

The Tirah River Basin with an area of 3243.6 square kilometers is considered as one of the sub-basins of the Dez River and a subset of the Karun Basin. The Standardized Precipitation Index (SPI), Standard StreamFlow Index (SSI) and Decimal Index (DI) were used to calculate standard drought indices. Elements and compounds of electrical conductivity (Ec), Total dissolved solids (TDS), pH and Anions of chlorine (Cl⁻), Sulfate (SO₄²⁻), Bicarbonate (HCO₃⁻), Sodium (Na), Calcium (Ca) and Magnesium cations (Mg) were investigated. To draw the pattern of droughts, 3 hydrometric stations of Teng Mohammad Haji (upstream), Rahimabad Silakhor (middle) and Tir-Droud (outlet) stations were tested.

Results and discussion

The most severe hydrological droughts with a duration of 2 years and a minimum SSI value of -1.23 in the Teng Mohammad Haji Station in the water years of 2009 and 2010 and the Tir-Droud Station with a duration of 4 years (-1.19) and the Rahimabad Silakhor Station with a duration of 3 years (-1.16) occurred for the water years 2012, 2013, 2014 and 2015. The analysis of discharge and precipitation data of Teir sub-basins showed that between the discharge and precipitation (SPI and SSI) of Tang Mohammadhaji and Rahimabad Stations, there was an average positive correlation at a significant level of 0.05 ($R^2=0.526$). Examining the relationship between annual discharge and water quality parameters showed that there was a negative correlation for most parameters such as TDS, EC, chlorine, the total of anions and cations, so that the maximum concentration of quality parameters occurred in droughts. In Tang Mohammadhaji Station, the highest percentage of changes was related to sodium and chlorine, respectively, with 62.55 and 39.70% in dry years compared to the long-

* Corresponding author: farhadinejad@gmail.com

term average. The results of this research showed that the percentage of changes in calcium, magnesium, sodium, carbonate and chloride increased in dry years compared to the long-term average in the studied stations in the Tirah River Basin. All the stations in the Tirah Basin have passed the period of relatively dry hydrological drought (-0.84 to -1.28) and none of them have suffered severe hydrological drought.

Conclusion

The analysis of discharge and precipitation data of dark sub-basins shows that between discharge and precipitation (SPI and SSI) of Tang Mohammad Haji Station, which is an upstream sub-basin of dark, there is an average positive correlation at a significant level of 0.05 and in Rahim Abad Station, which is in the middle of the basin It is located in Tire, and according to Pearson, it has a correlation at a significant level of 0.05 at the exit station of Tire basin, no significant correlation is observed between discharge and precipitation variables, which can be caused by snowfall and the persistence of snow in the heights from the previous water year, the construction of Meruk Dam. In the upper part of the basin, as well as the water intake of Bishehdalan Silakhor Wetland in droughts and abundant water harvesting from the Tirah River for agriculture. The upstream basin of Tang Mohammadhaji Station is completely calcareous, which has caused changes in parameters of calcium, TDS, EC, etc. In Rahimabad Silakhor Station and Tire outlet, half of the area of the basin is dedicated to intrusive rocks such as granite and granodiorite, which increases potassium and calcium. In the studied stations in Tirah River Basin, the percentage of changes related to calcium, magnesium and sodium, and carbonate and chlorine anions have increased in dry years compared to the long-term average. In general, it can be concluded that drought can have negative effects on water quality parameters in Tirah River Basin.

Keywords: Correlation test, DI, Karun river basin, SPI, SSI

Cite this article: Farhadinejad, T., Vayskarami, I., Zand, M., 2024. Investigating the relationship between river flow changes caused by drought and the quality of surface water resources in the Tirah River Basin. *Watershed Engineering and Management* 16(1), 64-81.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بررسی رابطه بین تغییرات دبی ناشی از خشکسالی و کیفیت منابع آب سطحی حوضه رودخانه تیره

طاهر فرهادی نژاد^{۱*}، ایرج ویسکرمی^۲ و مهران زند^۳

^۱ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران

^۲ مربی پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران

^۳ دانشیار پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

چکیده مبسوط

مقدمه

خشکسالی، می‌تواند اثرات منفی جدی بر کیفیت آب مورد نیاز برای کشاورزی آبی داشته باشد. سازندهای زمین شناسی منطقه باعث افزایش غلظت عناصر جزیی و کمیاب سمی در آب‌ها می‌شود و از طرف دیگر، فعالیت‌های انسان منجر به آلودگی آب در مناطق مجاور می‌شود. در این پژوهش، به بررسی اثر خشکسالی بر کیفیت آب‌های سطحی، اثر عوامل مختلف از جمله سازندهای زمین شناسی و کاهش یا افزایش بارندگی و دمای هوا بر کیفیت منابع آب، چگونگی تغییرات کیفی آب، تعیین محدودیت‌های مصرف آب در بخش شرب و کشاورزی پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

حوضه رودخانه تیره، با مساحت ۳۲۴۳/۶ کیلومتر مربع به‌عنوان یکی از زیرحوضه‌های رودخانه دز و زیرمجموعه‌ای از حوضه کارون محسوب می‌شود. برای بررسی تاثیر خشکسالی بر کیفیت منابع آب سطحی، ابتدا شاخص‌های بارندگی استاندارد (SPI)، شاخص استاندارد جریان‌های رودخانه‌ای (SSI) و شاخص دهک‌ها (DI) محاسبه شد و سپس روابط آن‌ها با عناصر و ترکیبات هدایت الکتریکی (EC)، کل جامدات محلول (TDS)، pH و آنیون‌های کلر (Cl⁻)، سولفات (SO₄²⁻)، بی‌کربنات (HCO₃³⁻)، کاتیون‌های سدیم (Na)، کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) مورد بررسی قرار گرفت. برای ترسیم الگوی خشکسالی‌ها سه ایستگاه هیدرومتری تنگ محمد حاجی (بالادست)، رحیم‌آباد سیلاخور (میانه) و ایستگاه تیره-درود (خروجی) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که شدیدترین خشکسالی‌های هیدرولوژیک با تداوم دو ساله و کمینه SSI به مقدار ۱/۲۳- در ایستگاه تنگ محمد حاجی در سال‌های آبی ۸۷ و ۸۸ و ایستگاه تیره-درود با تداوم چهار ساله (۱/۱۹-) و ایستگاه رحیم‌آباد سیلاخور با تداوم سه ساله (۱/۱۶-) برای سال‌های آبی ۹۱، ۹۲، ۹۳ و ۹۴ رخ داده است. بررسی داده‌های دبی و بارش زیرحوضه‌های تیره

نشان داد که بین دبی و بارش (SSI و SPI) ایستگاه‌های تنگ محمدحاجی و رحیم‌آباد دارای همبستگی متوسط مثبت در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بوده ($R^2 = ۰/۵۲۶$). بررسی روابط دبی سالانه و پارامترهای کیفیت آب نشان داد که برای بیشتر پارامترها مثل TDS، هدایت الکتریکی، کلر و مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها همبستگی منفی بوده، به طوری که بیشینه تمرکز غلظت پارامترهای کیفیت در خشکسالی‌ها رخ داده است. در ایستگاه تنگ محمدحاجی بیشترین درصد تغییرات مربوط به سدیم و کلر به ترتیب با ۶۲/۵۵ و ۳۹/۷۰ درصد در سال‌های خشک نسبت به میانگین بلندمدت است. نتایج این پژوهش نشان داد که در ایستگاه‌های مورد بررسی در حوضه رودخانه تیره، درصد تغییرات مربوط به کلسیم، منیزیم و سدیم و آنیون‌های کربنات و کلر در سال‌های خشک نسبت به میانگین بلندمدت افزایش پیدا کرده است. همه ایستگاه‌های حوضه تیره دوره خشکسالی هیدرولوژیک نسبتاً خشک (۰/۸۴- تا ۱/۲۸-) را گذرانده، هیچ‌کدام متحمل خشکسالی هیدرولوژیک شدید نشده‌اند.

نتیجه‌گیری

بررسی داده‌های دبی و بارش زیرحوضه‌های تیره نشان می‌دهد که بین دبی و بارش (SPI و SSI) ایستگاه تنگ محمدحاجی که یک زیرحوضه بالادستی تیره است، دارای همبستگی متوسط مثبت در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بوده، در ایستگاه رحیم‌آباد که در میانه حوضه تیره قرار دارد، نیز از نظر پیرسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ دارای همبستگی است. در ایستگاه خروجی حوضه تیره بین متغیرهای دبی و بارش همبستگی معنی‌دار مشاهده نمی‌شود که می‌تواند ناشی از بارش برف و ماندگاری برف در ارتفاعات از سال آبی قبل، احداث سد مروک در بالادست حوضه و همچنین آب‌گیری تالاب بی‌شده‌الان سیلاخور در خشکسالی‌ها و برداشت فراوان آب از رودخانه تیره برای کشاورزی باشد. حوضه بالادست ایستگاه تنگ محمدحاجی کاملاً آهکی بوده که باعث تغییر در پارامترهای کلسیم، TDS، EC و غیره شده است. در ایستگاه رحیم‌آباد سیلاخور و خروجی تیره نیمی از مساحت حوضه اختصاص به سنگ‌های نفوذی مثل گرانیت و گرانودیوریت که باعث افزایش پتاسیم و کلسیم می‌شود. در ایستگاه‌های مورد بررسی در حوضه رودخانه تیره درصد تغییرات مربوط به کلسیم، منیزیم و سدیم و آنیون‌های کربنات و کلر در سال‌های خشک نسبت به میانگین بلندمدت افزایش پیدا کرده است. به طور کلی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که خشکسالی می‌تواند اثرات منفی بر پارامترهای کیفی آب در حوضه رودخانه تیره داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آزمون همبستگی، حوضه رودخانه کارون، DI، SPI و SSI

مقدمه

جمله ژپیس موجود است و منشأ انسانی آن از طریق فاضلاب‌های کشاورزی و صنعتی است (WHO, 2008). همچنین، سدیم به‌طور عمده از فلدسپارهای موجود در سنگ‌های آذرین و دگرسانی آن‌ها ایجاد می‌شود، دیگر منشاهای سدیم می‌تواند آب‌شویی از لایه‌های فوقانی خاک و کانی‌های رسی، تبخیری‌هایی از قبیل هالیت و فاضلاب‌های صنعتی باشد. وجود مقادیر زیاد نیترات در آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی (استفاده زیاد از کودهای معدنی نیتروژنی) و در برخی موارد تخلیه پساب ضایعات نیتروژنی و فضولات انسانی و حیوانی است (Mohammadi, 2015)؛ از طرف دیگر، (Gudmundsson and Stagge, 2016).

منشأ املاح و ترکیبات در آب‌های سطحی می‌تواند طبیعی یا انسانی باشد. سازندهای زمین‌شناسی منطقه باعث افزایش غلظت عناصر جزئی و کمیاب سمی در آب‌ها می‌شود و از طرف دیگر، فعالیت‌های انسان منجر به آلودگی آب در مناطق مجاور می‌شود. آب‌های سطحی به‌طور طبیعی دارای غلظت‌هایی از یون‌های اصلی هستند. برای نمونه، کلرید به‌طور طبیعی در تمامی آب‌ها وجود دارد ولی مقادیر زیاد آن در آب‌های طبیعی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و یا انحلال سنگ‌های حاوی کلرید است (Svensson et al.; Eion and Cameron, 2016). سولفات نیز به‌طور طبیعی در کانی‌هایی از

سطحی ارزیابی شد. برای مقایسه پارامترهای فیزیکوشیمیایی در دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیکی از روش‌های آماری استفاده شد. رابطه منفی معنی‌دار ($p < 0.05$) بین دبی و هدایت الکتریکی و یون‌های اصلی در بیشتر ایستگاه‌های حوضه یافت شد. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به علت محدودیت دوره‌های آماری و انعطاف پذیری در ارزیابی کمبود بارش متداول‌ترین شاخص خشکسالی است (Barker؛ Mckee et al., 1993; et al., 2016).

شاخص SPI برای محاسبه خشکسالی در مقیاس کوتاه مدت و بلندمدت و بر مبنای داده‌های بارش که همبستگی بالایی نسبت به هم دارند استوار است (Núñez et al., 2016). SPI طولانی مدت (۱۲، ۲۴، ... ماهه) خشکسالی را بهتر منعکس می‌کند و مناسب‌ترین تابع توزیع برای برازش داده‌های بارندگی ماهانه توابع گاما است. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده بارندگی کمتر از بارش متوسط و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بارندگی بیشتر از میانگین بارندگی بلندمدت است. با توجه به مطالعات انجام گرفته به وسیله محققین (Fernández؛ Zahedi-Kalaki, 2004؛ Alizadeh, 2004)؛ Shokouhi-Far and Izadpanah, 2013؛ et al., 2006؛ Mahmoudi et al.؛ Hoseini et al., 2013؛ Jorquera, 2013؛ Morshed Ahmad et al.؛ Rahimi et al., 2016؛ al., 2015؛ Lee et al., 2023؛ Johnston et al., 2022؛ al., 2022)، خشکسالی یک اختلال در رژیم طبیعی اقلیمی و هیدرولوژیکی است که می‌تواند به طرق مختلف بر عوامل تعیین کننده کیفیت آب تاثیر بگذارد. کاهش جریان/سطح آب و افزایش دما در طول برخی خشکسالی‌ها ممکن است نرخ فرایندهایی مانند بهره‌وری، تنفس و هوادهی مجدد را تغییر دهد. خشکسالی، همچنین ممکن است الگوی تحویل اجزای کیفیت آب را تغییر دهد، آن‌ها را در حوضه‌ها در شرایط خشک حفظ کند و در شرایط مرطوب رها کند (Van Loon, 2015).

تحقیقات برخی محققین نشان داده است که دوره‌های خشکسالی باعث کاهش کیفیت آب رودخانه‌ها می‌شوند (Abasi et al., 2017؛ Mosley, 2015).

(Azish et al., 2019) در پژوهشی با هدف بررسی و تحلیل اثرات خشکسالی از طریق محاسبه شاخص SPI^۱ بر کمیت و کیفیت آب رودخانه دز نتیجه گرفته‌اند که روند تغییرات شوری آب دز نشان می‌دهد، در ایستگاه‌های سپیددشت-سزار، سپیددشت-زاز و تنگ پنج-سزار، روند تغییرات شوری معنی‌دار نیست، این در حالی است که در ایستگاه‌های پایین دست رودخانه روند تغییرات شوری معنی‌دار و مثبت است و در سال‌های خشکسالی میزان شوری آب رودخانه دز به طور متوسط ۱۵/۲۴ درصد افزایش داشته است.

(Heshmatpour et al., 2019) در قسمتی از حوزه آبخیز گرگانرود اثر خشکسالی بر روی ۱۳ پارامتر فیزیکوشیمیایی در یک دوره ۴۳ ساله (۱۳۹۳-۱۳۵۰) ارزیابی کرده‌اند و با استفاده از روش شاخص بارندگی استاندارد، میانگین متحرک و تعیین یک دوره خشکسالی شاخص پنج ساله دریافتند که میانگین غلظت بیشتر آنیون‌ها و کاتیون‌ها، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم از بالاترین به پایین دست رودخانه روند افزایشی داشته است، به طوری که این افزایش در ایستگاه انتهایی گرگانرود حدود هفت برابر سرشاخه‌های آن در دوره خشکسالی است و نتیجه گرفته‌اند که وقوع دوره‌های خشکسالی تاثیر به‌سزایی بر روی عوامل کیفی آب در مقایسه با دوره طولانی مدت دارد، به طوری که با کاهش میزان بارندگی و دبی رودخانه در دوره خشکسالی، کیفیت آب در بخش کشاورزی به شدت کاهش یافته است. در پژوهشی (Peña-Guerrero et al., 2020) برای بررسی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی از شاخص‌های استاندارد خشکسالی استفاده کردند. این پژوهش در منطقه‌ای از شیلی و از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ انجام شد. برای درک رابطه بین خشکسالی و کیفیت آب، همبستگی بین دبی روزانه و مشاهدات کیفیت آب‌های

¹ Standardized Precipitation Index

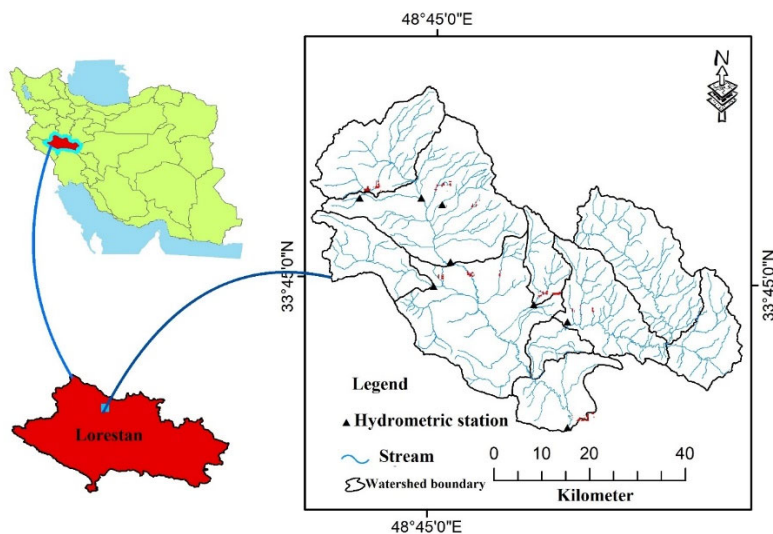
به‌عنوان یکی از زیرحوضه‌های رودخانه سزار و دز و زیرمجموعه‌ای از حوضه کارون بزرگ محسوب می‌شود و در تقسیم‌بندی بزرگ‌تر در زیرمجموعه حوضه خلیج فارس و دریای عمان قرار می‌گیرد. سزار و بختیاری، دو شاخه اصلی رودخانه دز هستند. رود سزار در شمالی‌ترین قسمت حوضه دز جریان دارد و از سه شاخه ماربره (ازنا و الیگودرز)، تیره (بروجرد و درود) و سبزه (دامنه غربی و جنوبی اشترانکوه) تشکیل شده است (شکل ۱). حوضه آبخیز رودخانه تیره در ارتفاعات دامنه‌های غربی زاگرس جز مناطق پرباران کشور به شمار می‌رود، بخش عمده بارش‌های جوی این حوضه در فصل‌های پاییز و زمستان به‌صورت برف است و آب‌شدن آن‌ها از اواخر فصل زمستان تا اواخر بهار، بخش عمده آب سالانه رواناب‌های سطحی این حوضه را تامین می‌کند.

این حوضه در سه زون زمین‌شناسی با سنگ‌شناسی متفاوت قرار دارد. در بخش‌های شمالی، در زون سنندج سیرجان قرار دارد که دارای سنگ‌های آذرین و دگرگونی است که عمدتاً از گرانیت و شیست تشکیل شده‌اند. در بخش میانی، حوضه عمدتاً از آبرفت‌های عهد حاضر و در بخش‌های جنوبی، سازندهای عمدتاً آهکی و خرد شده زون زاگرس مرتفع هستند.

در مقیاس محلی، اثرات کیفیت آب در خشک‌سالی و سیل بسته به ویژگی‌های بیوفیزیکی بدنه‌های آبی و حوزه‌های آبخیز آن‌ها می‌تواند کاملاً متغیر و خاص باشد (Prathumratana et al., 2008). در درون حوزه آبخیز دز، شهرهای مهم وجود دارد و از آب این رودخانه برای مصارف شرب نیز استفاده می‌شود. همچنین، با توجه به این‌که بسیاری از فعالیت‌های کشاورزی بستگی به کیفیت آب‌های سطحی دارد و در درون حوضه تیره و همچنین در پایین دست آن فعالیت‌های مهم کشاورزی، دامداری و صنعتی وجود دارد، سعی شده است که در این پژوهش، به بررسی اثر خشک‌سالی بر کیفیت آب‌های سطحی، اثر عوامل مختلف از جمله سازندهای زمین‌شناسی و کاهش یا افزایش بارندگی و دمای هوا بر کیفیت منابع آب، چگونگی تغییرات کیفی آب، تعیین محدودیت‌های مصرف آب در بخش شرب و کشاورزی پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

معرفی حوضه مورد تحقیق: حوضه آبخیز رودخانه تیره، از نظر موقعیت جغرافیایی بین مختصات $33^{\circ}27'$ تا $34^{\circ}8'$ عرض شمالی و $48^{\circ}29'$ تا $49^{\circ}27'$ طول شرقی قرار گرفته است. این حوضه با مساحت $3243/6$ کیلومتر مربع،



شکل ۱- موقعیت حوضه رودخانه تیره در لرستان و ایران
Fig. 1. Location of Tirah River Basin in Lorestan and Iran

این پژوهش از آن‌ها استفاده نشده است. ایستگاه‌های ونایی گله‌رود، ونایی سراب سفید، بیاتون، مروک و تنگ محمد حاجی در بالادست حوضه، ایستگاه رحیم‌آباد سیلاخور در میانه و در دشت سیلاخور و ایستگاه تیره درود در خروجی حوضه قرار دارند.

روش تحقیق، جمع‌آوری آمار و اطلاعات و داده‌ها: از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی وزارت نیرو در دوره ۱۳۶۷-۱۳۹۶ استفاده شد. جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی و طول دوره آماری برداشت داده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. ایستگاه تپه چغا و بروجرد سازمان آب دارای دوره آماره سی‌ساله نبوده، در

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های کیفیت‌سنجی مورد استفاده

Table 1. Specifications of used water quality measurement stations

Number	Station name	River	Station code	Longitude	latitude	Height	Data collection period
1	Venai-Ghalerud	Galehrud	259-21	48.61	33.90	2000	60-96
2	Venai-Sarabsefid	Sarabsefid	257-21	48.6	33.91	1980	60-96
3	Biatun	Biatun	265-21	48.98	33.71	1620	60-96
4	Borujerd	Galehrud	124-21	48.72	33.90	1600	82-96
5	Tapehchogha	Abgarmeh	186-21	48.72	33.90	1570	82-96
6	Tang Mohamad Haji	Absardeh	461-21	48.75	33.74	1570	60-96
7	Maruk-Tireh	Tireh	255-21	49.05	33.66	1540	60-96
8	Rahimabad-Silakhor	Silakhor	261-21	48.80	33.78	1490	60-96
9	Dorud-Tireh	Tireh	267-21	49.06	33.48	1450	60-96

نرمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظر از توزیع گامای به‌دست آمده، مساوی باشد. شاخص SPI، در مطالعه تأثیرات کمبود بارش روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه‌ها، کارایی مناسبی دارد. طبق این روش، دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار منفی یک یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت شود (Lloyd Hughes؛ Edwards and McKee 1997؛ Mishra et al.؛ Wu et al. 2007؛ and Saunders 2002؛ Vlček and Huth 2009؛ 2009). طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی شاخص SPI در جدول ۲، نشان داده شده است (Peña-Guerrero et al., 2020).

محاسبه شاخص‌های استاندارد خشکسالی، شاخص بارندگی استاندارد (SPI): محاسبه شاخص SPI، مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب به سری طولانی مدت داده‌های بارندگی در هر بازه‌ی زمانی دلخواه (سه ماهه، شش ماهه و غیره) در هر ایستگاه است. بسیاری از پژوهشگران خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک توزیع گامای ناقص (برای در نظر گرفتن ماه‌های با بارش صفر) را پیشنهاد دادند (Mosaedi and Ghabbaei, 2011). با فرض پیروی مقدار بارندگی از توزیع گاما، گام بعدی در محاسبه شاخص SPI، انتقال احتمال تجمعی به‌دست آمده از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از معیار یک است. در واقع، SPI عبارت است از متغیری از تابع توزیع

جدول ۲- طبقه‌بندی خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص SPI و SSI (Peña-Guerrero et al., 2020).

Table 2. Meteorological drought classification based on SPI and SSI

Condition	Range	Drought situation
1	$SPI \geq 2.05$	Very wet
2	$1.28 \leq SPI < 2.05$	Extremely humid
3	$0.84 \leq SPI < 1.28$	Relatively humid
4	$-0.84 \leq SPI < 0.84$	Near normal
5	$-1.28 \leq SPI < -0.84$	Extremely dry
6	$-2.05 \leq SPI < -1.28$	Relatively dry
7	$SPI < -2.05$	Super dry

¹ Standardized Streamflow Index

که در رابطه (۲) علائم \bar{V}_k و S_k به ترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات دبی تجمعی برای دوره مبنا (k) است.

شاخص دهک‌ها (DI^۱): این روش، بر مبنای کاربرد توزیع تجمعی یک ایستگاه بنا شده است. شاخص DI، وقوع بارندگی‌های طولانی مدت را در دهک‌های از توزیع نرمال تقسیم کرده که هر یک از این گروه‌ها را یک دهک می‌نامند. تنها عامل موثر در محاسبه این شاخص بارش و یا دبی است و مقیاس زمانی که در این شاخص استفاده شده است نیز ماهانه، فصلی و سالانه است (Peña-Guerrero et al., 2020). در این روش، داده‌های بارندگی و یا دبی ماهانه و یا سالانه پس از مرتب‌سازی صعودی احتمال وقوع از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$PI = i / (N + 1) * 100 \quad (3)$$

که در این رابطه Pi احتمال وقوع بارندگی یا دبی در شماره ردیف i ام و N تعداد داده‌ها است. پس از محاسبه شاخص Pi براساس جدول ۳ دهک‌ها طبقه‌بندی می‌شوند.

شاخص استاندارد جریان‌های رودخانه‌ای (SSI): برای محاسبه خشکسالی‌های هیدرولوژیکی، از شاخص خشکسالی جریان‌های رودخانه‌ای (SSI) استفاده شد. در این روش، فرض می‌شود که سری‌های زمانی حجم جریان‌های رودخانه‌ای ماهانه به صورت Q_{ij} موجود است که در آن اندیس i سال هیدرولوژیکی و اندیس j ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی است. اساس این سری‌ها بر پایه رابطه (۱) خواهد بود (Van Loon, 2015).

$$V_{ki} = \sum_{Q_{ij} j=1}^I \quad (1)$$

که در آن، V_{ik} حجم تجمعی جریانات رودخانه‌ای در سال هیدرولوژیکی i و دوره مبنا k ماهه است. مقادیر k برابر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، به ترتیب بیانگر دوره‌های زمانی سه، شش، نه، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه است. شاخص خشکسالی جریانات رودخانه‌ای (SSI) براساس حجم تجمعی جریانات رودخانه‌ای (V_{ik}) برای دوره مبنا (k) مربوط به (i) سال هیدرولوژیکی به صورت رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$SSI = \frac{V_{ik} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (2)$$

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص دهک‌ها (DI)

Table 3. Classification of drought intensity based on the decile index (DI)

Number	Occurrence percentage	Drought situation	Decimal number
1	<10	Very severe drought	First
2	10-20	Severe drought	Second
3	20-30	Drought	Third
4	30-40	Almost normal	Fourth
5	40-50	Normal	Fifth
6	50-60	A little more than normal	The sixth
7	60-70	A little wet	The seventh
8	70-80	Moist	The eighth
9	80-90	Very wet	Ninth
10	>90	Super moist	The tenth

تحلیل استفاده شد. عناصر و ترکیباتی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از هدایت الکتریکی (EC)، کل جامدات محلول (TDS)، pH و آنیون‌های کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، کاتیون‌های سدیم (Na)، کلسیم (Ca) و

کیفیت آب رودخانه: در مطالعه کیفی جریان‌های سطحی، از نتایج آزمایش ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه تیره طی یک دوره ۳۰ ساله (۱۳۹۶-۱۳۶۷) اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان لرستان استفاده شده است. از میانگین سالانه پارامترها به منظور تجزیه و

¹ Decimal Index

سیلاخور با تداوم سه ساله (۱/۱۶-) برای سال‌های آبی ۹۱، ۹۲، ۹۳ و ۹۴ رخ داده است.

ارتباط خشک سالی هوا شناسی و خشک سالی هیدرولوژیکی: بررسی داده‌های دبی و بارش زیرحوضه‌های تیره نشان می‌دهد که بین دبی و بارش (SPI و SSI) ایستگاه تنگ محمد حاجی که یک زیرحوضه بالادستی حوضه تیره است، دارای همبستگی متوسط مثبت در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بوده (۵۲۶/۰ R^2 =) است.

در ایستگاه رحیم آباد که در میانه حوضه تیره قرار دارد، نیز از نظر پیرسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ دارای همبستگی است (۵۳۹/۰ R^2 =) و در سایر زیرحوضه‌ها از جمله در ایستگاه خروجی حوضه تیره بین متغیرهای دبی و بارش همبستگی معنی‌دار مشاهده نمی‌شود که می‌تواند ناشی از بارش برف و ماندگاری برف در ارتفاعات از سال آبی قبل، احداث سد مروک در بالادست حوضه و همچنین، آب‌گیری تالاب بیشه‌دالان سیلاخور در خشکسالی‌ها و برداشت فراوان آب از رودخانه تیره برای کشاورزی باشد.

دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیک نسبت به دوره‌های خشکسالی هوا شناسی کمتر هستند اما طولانی‌تر بوده و گاهی دو تا چهار سال تداوم دارند. طولانی‌ترین دوره خشکسالی هیدرولوژیک از سال آبی ۹۱ تا ۹۴ ادامه داشته‌است. همه ایستگاه‌های حوضه تیره، دوره خشکسالی هیدرولوژیک نسبتاً خشک (۰/۸۴- تا ۱/۲۸-) را گذرانده و هیچ‌کدام متحمل خشکسالی هیدرولوژیک شدید نشده‌اند.

جدول ۴، مشخصات خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک را نشان می‌دهد. تغییرات زمانی خشکسالی‌ها و ترسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک در شکل‌های ۲ تا ۴ برای زیرحوضه‌های رودخانه تیره نشان داده شده است.

منیزیم (Mg) که ممکن است طی دوره‌های خشکسالی تغییراتی در غلظت آن‌ها ایجاد شود.

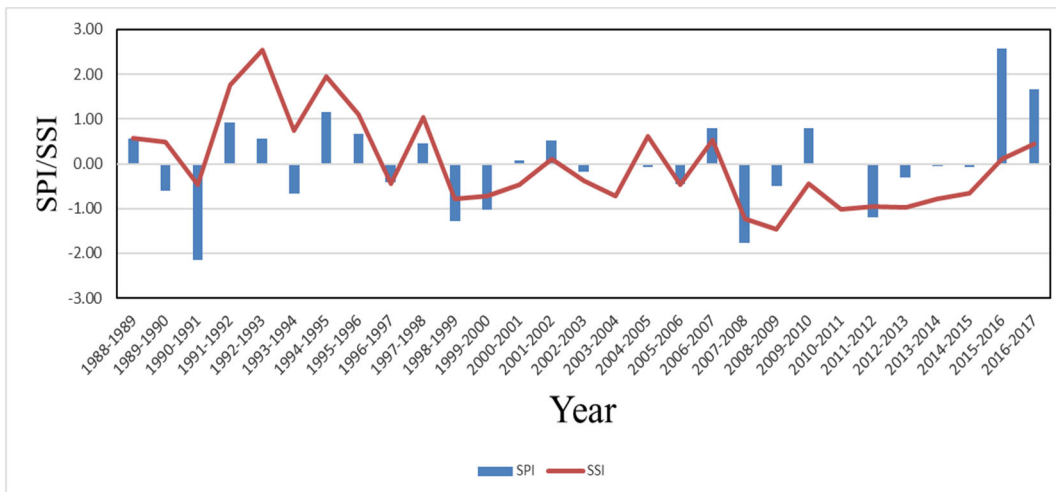
افزایش یا کاهش این پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کیفیت آب را تحت تاثیر قرار داده به طوری که تغییرات این پارامترها می‌تواند استفاده از آب را برای شرب، کشاورزی، صنعت و همچنین، آبی‌پروری دچار محدودیت سازد.

نتایج و بحث

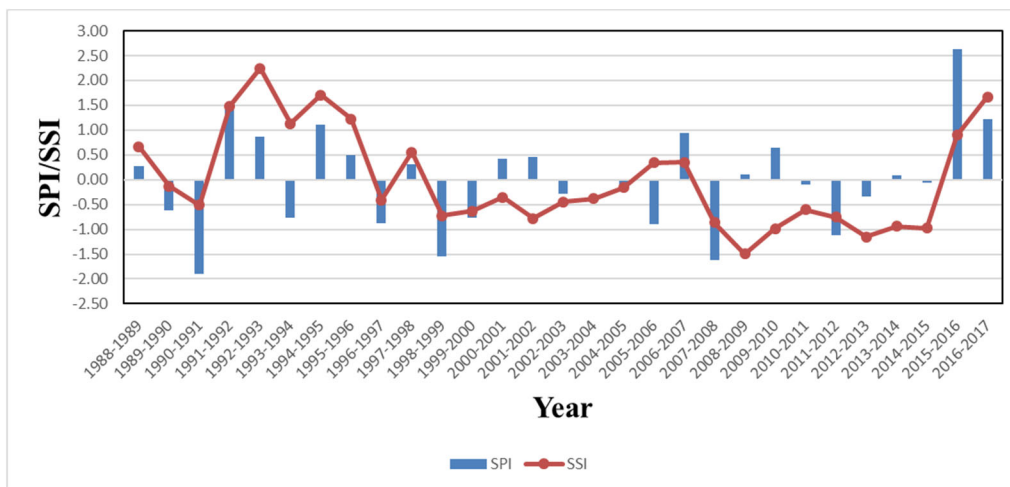
توزیع زمانی و مکانی خشکسالی هوا شناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی: برای ترسیم الگوی خشکسالی‌ها، سه ایستگاه هیدرومتری تنگ محمد حاجی به عنوان حوضه بالا دست، رحیم‌آباد سیلاخور به عنوان میانه حوضه و ایستگاه تیره- درود به عنوان خروجی حوضه تیره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. می‌توان بیان کرد، همه ایستگاه‌ها الگوهای مشابهی در شدت و مدت خشکسالی به تصویر می‌کشند. شدیدترین ترسالی هواشناسی با تداوم دو ساله و بیشینه SPI به مقدار ۲/۵۷ در سال‌های آبی ۹۵ و ۹۶ رخ داده که مربوط به ایستگاه تنگ محمد حاجی است و این درحالی است که شدیدترین خشکسالی هواشناسی با SSI به مقدار ۲/۱۶- در سال آبی ۷۰ رخ داده است.

ترسالی و خشکسالی‌های هیدرولوژیک دارای تداوم بیشتری بوده‌اند، دارای مشابهت الگوی بیشتری هستند. شدیدترین ترسالی هیدرولوژیک با تداوم دو ساله و بیشینه SSI به مقدار ۲/۵۵ در سال‌های آبی ۷۱، ۷۲، رخ داده است. همین ترسالی هیدرولوژیک در ایستگاه تیره-درود با شدت کمتر (۲/۱۸) و تداوم سه ساله رخ داده است.

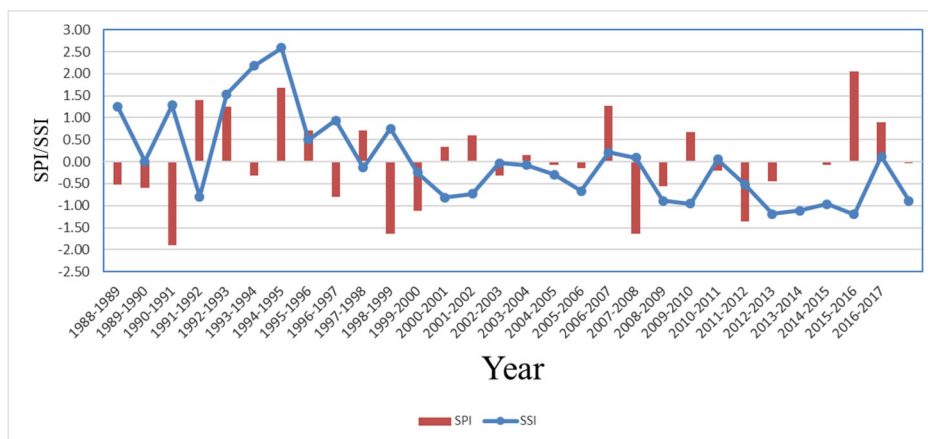
شدیدترین خشکسالی‌های هیدرولوژیک با تداوم دو ساله و کمینه SSI به مقدار ۱/۲۳- در ایستگاه تنگ محمد حاجی در سال‌های آبی ۸۷ و ۸۸ و ایستگاه تیره-درود با تداوم چهار ساله (۱/۱۹-) و ایستگاه رحیم‌آباد



شکل ۲- شاخص‌های SPI و SSI محاسبه‌شده در زیرحوضه تنگ محمد حاجی در مقیاس سالانه
Fig. 2. SPI and SSI indices calculated in Tang Mohammad Haji sub-basin on an annual scale



شکل ۳- شاخص‌های SPI و SSI محاسبه‌شده در زیرحوضه رحیم‌آباد در مقیاس سالانه
Fig. 3. SPI and SSI indices calculated in Rahim Abad sub-basin on an annual scale



شکل ۴- شاخص‌های SPI و SSI محاسبه‌شده در زیرحوضه تیره درود در مقیاس سالانه
Fig. 4. SPI and SSI indices calculated in the Tirah-Droud sub-basin on an annual scale

جدول ۴- ویژگی‌های دروره‌های خشکسالی و ترسالی هواشناسی و هیدرولوژیک برای زیرحوضه‌های رودخانه تیره

Table 4. Meteorological and hydrological features of drought and drought periods for Tirah River sub-basins

Name of subbasin	Type of phenomenon	Meteorological (SPI index)			Hydrological (SSI index)		
		Rainfall year	Intensity	Period (years)	Rainfall year	Intensity	Period (years)
Tang Mohammad Haji (upstream)	Drought	1990-1991	-2.16	1	2008-2009	-1.23	2
		1998-1999	-1.29	2	2009-2010	-1.46	
		1999-2000	-1.03		2010-2011	-1.01	
		2007-2008	-1.78	1	2011-2012	-0.95	
		2011-2012	-1.20	1	2012-2013	-0.97	
	Fruitful year	2013-2014	-0.79	4	1991-1992	1.75	
		1994-1995	1.15		1	1992-1993	2.55
		2005-2006	2.57		2	1993-1994	1.94
		2006-2007	1.67			1994-1995	1.10
		1995-1996	1.03		1	1995-1996	1.03
Rahim Abad (middle)	Drought	1996-1997	-1.89	1	2008-2009	-1.50	2
		1998-1999	-0.88	1	2009-2010	-0.99	
		2005-2006	-1.54	1	2012-2013	-1.16	
		2007-2008	-0.89	1	2013-2014	-0.94	
		2011-2012	-1.63	1	2014-2015	-0.97	
	Fruitful year	1991-1992	1.52	2	1991-1992	1.52	
		1992-1993	0.86		1992-1993	0.86	
		1995-1996	1.10		1	1994-1995	1.10
		2006-2007	0.93		1	2006-2007	0.93
		2013-2014	2.63		1	2015-2016	2.63
Tirah-Droud (outlet)	Drought	2016-2017	1.21	1	2016-2017	1.21	2
		1989-1989	-1.89	1	2007-2008	-0.89	
		1997-1998	-1.65	2	2008-2009	-0.95	
		1998-1999	-1.12		2011-2012	-1.19	
		2006-2007	-1.64	1	2012-2013	-1.11	
	2010-2011	-1.37	1	2013-2014	-0.97		
	Fruitful year	2014-2015	-1.20	4	2014-2015	-1.20	
		2016-2017	-0.88		1	2016-2017	-0.88
		1990-1991	1.39		2	1987-1988	1.24
		1991-1992	1.25			1989-1990	1.28
1993-1994		1.67	1		1991-1992	1.54	
2005-2006	1.27	1	1992-1993	2.18			
2014-2015	2.05	2	1993-1994	2.59			
2015-2016	0.90		1995-1996	0.94			

و مجموع کاتیون‌ها، به ترتیب بیشترین همبستگی به مقدار ۰/۶۵۵، ۰/۶۴۱، ۰/۵۸۲، ۰/۶۰۲ و ۰/۵۸۸ در ایستگاه رحیم‌آباد رخ داده است که همگی دارای سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ هستند ($p < 0.05$).

برای بی‌کربنات، سختی کل و سختی موقت، بیشترین همبستگی با سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ به ترتیب ۰/۵۶۶، ۰/۵۳۹ و ۰/۵۵۹ است و همچنین، در ایستگاه مروک، منیزیم بیشترین همبستگی با سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ و برابر با ۰/۵۱۳ است. پتاسیم و یون کربنات در همه زیرحوضه‌ها فاقد همبستگی معنی‌دار هستند که ناشی از عدم برداشت در بسیاری از نمونه‌برداری‌ها است. SAR، pH، Na و یون سولفات، در

خشکسالی هیدرولوژیکی و کیفیت آب: به‌منظور بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی از میانگین سالانه پارامترهای مورد بررسی استفاده شد. برای ارتباط با یکدیگر از ضرایب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. همبستگی بین دبی روزانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و پارامتر فیزیکی‌وشیمیایی مربوطه دوره آماری از سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۶ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در جدول ۵ نشان داده شده است.

روابط منفی معنی‌داری برای کل جامدات محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، منیزیم، بی‌کربنات، کلر، مجموع آنیون‌ها، مجموع کاتیون‌ها، سختی موقت و سختی کل، مشاهده می‌شود. برای کل جامدات محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، کلر، مجموع آنیون‌های

برخی زیرحوضه‌ها دارای همبستگی معنی‌دار بوده که دارای همبستگی ضعیفی هستند. یون سولفات تنها یونی است که در همه زیرحوضه‌ها دارای همبستگی مثبت با دبی است.

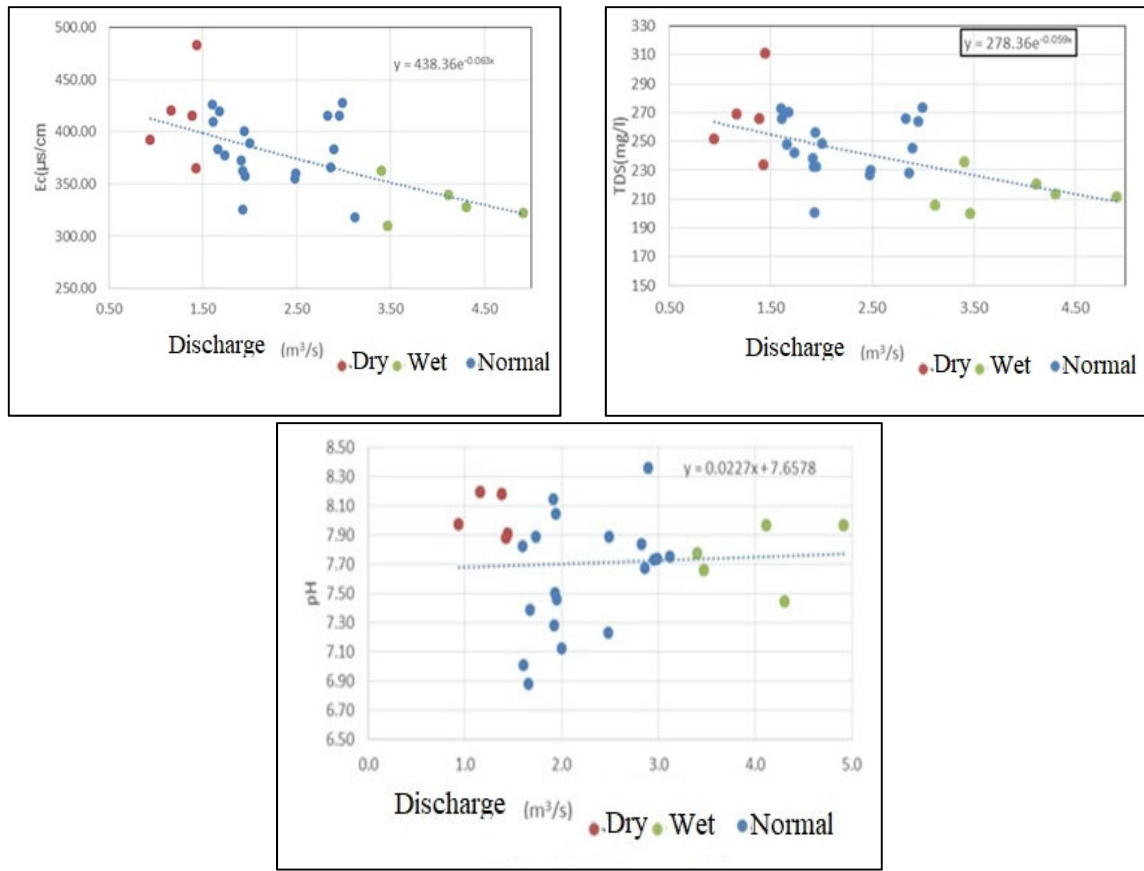
جدول ۵- همبستگی پارامترهای فیزیکیوشیمیایی و دبی روزانه برداشت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه رودخانه تیره
Table 5. Correlation of physicochemical parameters and daily discharge collected in the hydrometric stations of Tirah river basin

Water discharge in stations							Parameter
Venai-Ghalerud	Venai-Sarabsefid	Rahimabad-Silakhor	Maruk-Tireh	Dorud-Tireh	Biatun	Tang Mohamad Haji	
-0.464	-0.293	-0.641	-0.469	-0.483	-0.491	-0.211	TDS
-0.466	-0.289	-0.655	-0.467	-0.488	-0.51	-0.22	Ec
0.012	-0.028	-0.061	0.068	0.051	0.254	0.133	PH
0.00	0.081	-0.175	-0.027	0.037	-0.242	-0.725	CO3
-0.465	-0.351	-0.513	-0.377	-0.566	-0.525	-0.251	HCO3
-0.279	0.026	-0.582	-0.581	-0.434	-0.471	-0.164	Cl
-0.035	0.051	0.149	0.235*	0.083	0.181*	0.122	So4
-0.477	-0.293	-0.602	-0.467	-0.504	-0.538	-0.178	Anions
-0.176	-0.085	-0.396	0.081	-0.385	-0.331	0.072	Ca
-0.328	-0.195	-0.366	-0.513	-0.469	-0.316	-0.254	Mg
-0.105	0.136	-0.333	-0.337	-0.222	-0.389	-0.052	Na
-0.043	-0.144	-0.093	0.142	-0.068	-0.066	0.113	K
-0.423	-0.295	-0.588	-0.464	-0.497	-0.54	-0.172	Cations
-0.063	0.151	-0.284	-0.324	-0.156	-0.364	-0.033	SAR
0.012	0.148	-0.193	-0.266	-0.052	-0.302	0.04	%Na
-0.459	-0.346	-0.51	-0.365	-0.559	-0.518	-0.244	MH
-0.408	-0.329	-0.515	-0.365	-0.539	-0.481	-0.158	TH

اعداد با فونت سیاه ضریب همبستگی اسپیرمن با سطح معنی‌داری بالای ۹۵ درصد را نشان می‌دهند ($p < 0.05$). EC به واحد $\text{scm}\mu^{-1}$ و سایر پارامترها به واحد mg l^{-1} EC به واحد $\text{scm}\mu^{-1}$ و سایر پارامترها به واحد mg l^{-1}

تاثیر خشکسالی بر پارامترهای کیفیت آب:
جدول‌های ۶ تا ۸، نتایج مقایسه متوسط پارامترهای کیفیت آب طی سال‌های مرطوب، خشک و نرمال یا نزدیک نرمال با میانگین بلندمدت طی دوره آماری (۳۰ ساله) در ایستگاه تنگ محمدحاجی، رحیم‌آباد سیلاخور و تیره درود را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه تنگ محمدحاجی بیشترین درصد تغییرات مربوط به سدیم و کلر به ترتیب با ۶۲/۵۵ و ۳۹/۷۰ درصد در سال‌های خشک نسبت به میانگین بلندمدت است (جدول ۶). مقدار TDS نسبت به میانگین بلندمدت ۹/۴۲ درصد و EC نسبت به میانگین بلندمدت ۹/۴۸ درصد افزایش داشته‌اند، به استثنای SO₄، همه پارامترها سال‌های مرطوب در این ایستگاه تنگ محمدحاجی دارای روند کاهشی نسبت به میانگین بلندمدت هستند.

بررسی روابط دبی سالانه و پارامترهای کیفیت آب نشان می‌دهد که برای بیشتر پارامترها مثل TDS، هدایت الکتریکی، کلر و مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها، همبستگی منفی بوده، به طوری که بیشینه تمرکز غلظت پارامترهای کیفیت در خشکسالی‌ها رخ داده است. این در حالی است که برای بیشتر زیرحوضه‌ها رابطه دبی با pH مثبت بوده اگر چه در سطح معنی‌دار ۹۵ درصد قابل قبولی نیست.
به طور کلی، در زمان وقوع ترسالی غلظت پارامترهای TDS و EC در بیشتر ایستگاه‌ها به‌ویژه ایستگاه تنگ محمدحاجی نسبت به خشکسالی‌ها و سال‌های بارندگی نرمال و نزدیک نرمال پایین بوده است (شکل ۵). پارامتر pH در ایستگاه تنگ حاجی رابطه معنی‌داری را در سطح ۹۵ درصد نشان نداده است (شکل ۵).



شکل ۵- روابط بین دبی سالانه و پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه تنگ محمد حاجی
 Fig. 5. Relationships between annual discharge and water quality parameters at Tang Mohammad Haji station

جدول ۶- مقایسه پارامترهای کیفیت آب طی سال‌های مرطوب، خشک و نرمال یا نزدیک نرمال با میانگین بلندمدت در ایستگاه تنگ محمد حاجی
 Table 6. Comparison of water quality parameters during wet, dry and normal or near normal years with the long-term average at Tang Mohammadhaji Station

Parameter	Unit	Mean	Dry priod		Wet period	
			Percentage change	Mean	Percentage change	Mean
TDS	Mg/l	243.11	9.42	266	-11.23	215.8
HCO ₃	Mg/l	3.1	0.73	3.12	-8.81	2.82
Cl	Mg/l	0.35	39.7	0.48	-27.04	0.25
Anions	Mg/l	3.8	4.97	3.99	-7.59	3.51
Cations	Mg/l	3.84	4	3.99	-6.98	3.57
So ₄	Mg/l	0.35	7.74	0.38	24.6	0.44
Mg	Mg/l	0.96	14.6	1.11	-9.39	0.87
Na	Mg/l	0.12	62.55	0.2	-35.58	0.08
TH	Mg/l	184.41	1.81	187.75	-5.96	173.41
EC	µs/cm	379.16	9.48	415.1	-12.42	332.08
pH	-	7.71	4.09	8.03	0.61	7.76

جدول ۷- مقایسه متوسط پارامترهای کیفیت آب طی سال‌های مرطوب، خشک و نرمال یا نزدیک نرمال با میانگین بلندمدت در ایستگاه رحیم‌آباد
Table 7. Average comparison of water quality parameters during wet, dry and normal or near normal years with the long-term average in Rahimabad station

Parameter	Unit	Mean	Dry priod		Wet period	
			Percentage change	Mean	Percentage change	Mean
TDS	Mg/l	426.61	17.33	542.79	-9.73	417.6
HCO ₃	Mg/l	4.4	7.11	4.72	-10.46	3.94
Cl	Mg/l	2.02	3.28	2.63	-12.93	1.76
Anions	Mg/l	6.97	17.17	8.16	-6.53	6.51
Cations	Mg/l	7.02	16.44	8.17	-6.03	6.59
So ₄	Mg/l	0.53	53	0.81	53.99	0.81
Mg	Mg/l	2.14	18.08	2.53	-12.57	1.87
Na	Mg/l	1.12	35.79	1.52	17.81	1.31
TH	Mg/l	284.06	14.14	324.24	-10.29	254.84
EC	µs/cm	710.77	17.74	836.89	-11.84	626.65
pH		7.67	2.12	7.84	0.77	7.73

جدول ۸- مقایسه متوسط پارامترهای کیفیت آب طی سال‌های مرطوب، خشک و نرمال یا نزدیک نرمال با میانگین بلندمدت در ایستگاه تیره-درود

Table 8. Average comparison of water quality parameters during wet, dry and normal or near-normal years with the long-term average in Tirah-Duroud station

Parameter	Unit	Mean	Dry priod		Wet period	
			Percentage change	Mean	Percentage change	Mean
TDS	Mg/l	425.02	4.5	444.19	-7.36	398.78
HCO ₃	Mg/l	4.44	2.02	4.53	-12.3	3.89
Cl	Mg/l	1.47	5.16	1.54	-0.18	1.46
Anions	Mg/l	6.44	3.96	6.69	-4.54	6.15
Cations	Mg/l	6.48	3.4	6.7	-3.91	6.23
So ₄	Mg/l	0.54	16.59	0.63	47.63	0.79
Mg	Mg/l	1.97	3.63	2.05	-15.5	1.67
Na	Mg/l	0.96	10.97	1.07	32.8	1.28
TH	Mg/l	266.99	3.27	275.71	-9.7	241.08
EC	µs/cm	659.25	4.29	687.52	-8.37	6.4.08
pH		7.6	2.45	7.79	-0.7	7.55

نسبی متغیرهای شیمیایی، مقادیر هدایت الکتریکی (EC) و مقدار کل جامدات محلول (TDS) و سایر بنیان‌های شیمیایی برای دوره آماری سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۶ نشان می‌دهد که دارای چولگی بوده و نرمال نیستند (جدول ۹).

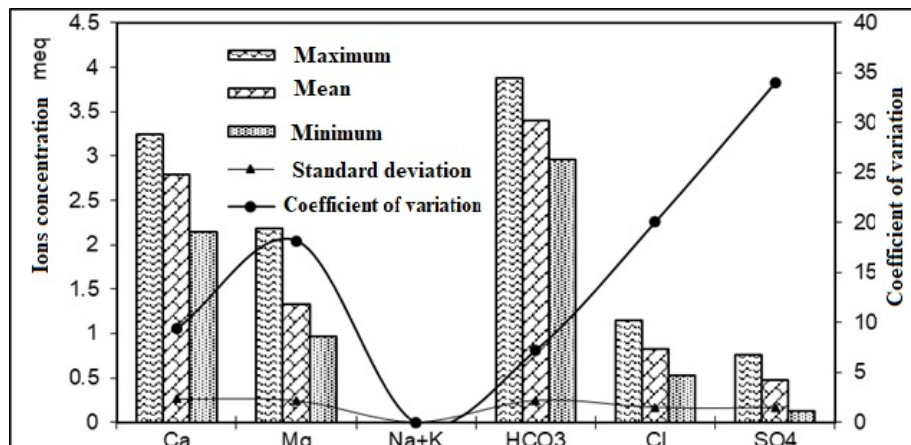
تفاوت زیاد مقادیر بیشینه و کمینه پارامترهای کیفی و یا به عبارت دیگر، دامنه گسترده تغییرات این پارامترها گویای تغییرات زیاد کیفیت منابع آب در نقاط مختلف منطقه و ثابت نبودن کیفیت آب در طول مسیر جریان

خشکسالی‌های هیدرولوژیک در مقیاس سالانه از نوع ضعیف و یا متوسط هستند و هیچ‌گاه کل حوضه مطالعاتی درگیر خشکسالی شدید و بسیار شدید نبوده است. از نظر تداوم خشکسالی‌ها یک دوره سه ساله از سال ۷۸ تا ۸۰، یک دوره دو ساله از ۸۶-۸۷ و ۸۶-۸۷ و یک دوره هفت ساله که از سال ۸۹-۹۰ شروع و تا پایان دوره آماری تداوم داشته است. بررسی آماری داده‌های شیمیایی شامل تعیین مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین حدود تغییرات، انحراف معیار و ضریب انحراف معیار

است. همچنین، این تغییرات در مقدار کاتیون‌ها و آنیون
های آب مشاهده شده و در یون‌های مختلف متفاوت است (شکل ۶).

جدول ۹- پارامترهای آماری داده‌های اندازه‌گیری شده در رودخانه تیره
Table 9. Statistical parameters of measured data in Tirah River

Parameter	Discharge (m ³ /S)	SO4	Cl	CO ₃	HCO ₃	K	Na	Mg	Ca	pH	TDS	EC
Number of samples	36	36	36	35	36	25	36	36	36	36	36	36
Mean	5.1	22.77	29.22	2.14	207.4	3.77	12.9	15.95	55.83	7.7	305.19	473.2
Standard deviation	3	7.73	5.87	3.96	15.06	1.71	6.17	2.9	5.25	0.32	34.49	53.86
Coefficient of variation (percentage)	58.82	33.95	20.1	185.1	7.26	45.36	47.83	18.18	9.4	4.16	11.3	11.38
Maximum	18.22	36.66	40.83	15	236.5	7.18	24.52	26.27	64.92	8.25	385.67	590
Minimum	1.71	6.14	18.69	0	180.7	1.22	2.48	11.65	43	6.92	250.83	389.85
Median	4.57	22.964	27.98	0.268	206.5	3.6328	14.65	15.7	56.504	7.769	295.65	458.3
Scope of changes crookedness	16.51	30.52	22.14	15	55.84	5.96	22.04	14.62	21.92	1.33	134.84	200.15
Variance	2.46	-0.06	0.3	1.95	-0.12	0.67	-0.43	1.19	-0.53	-0.85	0.5	0.47
	9.01	59.82	34.5	15.65	226.8	2.91	38.06	8.41	27.57	0.1	1189.8	2900.6



شکل ۶- مشخصات کیفی منابع آب حوضه رودخانه تیره

Fig. 6. Qualitative characteristics of water sources in the Tirah River Basin

شده است. به طوری که متوسط مقدار مقدار و میانه این یون هر کدام به ترتیب معادل ۰/۱۲ و ۰/۱ میلی اکی‌والانت در لیتر است. همچنین، غلظت‌های سولفات کمتر از بالاترین حد مجاز اعلام شده به وسیله WHO (2008) برای آب آشامیدنی است و از نظر سولفات کیفیت خوب را نشان می‌دهد.

در این میان، بیشترین دامنه تغییرات در مقدار کلسیم (Ca) مشاهده می‌شود. به گونه‌ای که مقدار این یون بین ۰/۵۸ تا ۱/۱ میلی‌اکی‌والانت در لیتر متغیر بوده، متوسط مقدار این پارامتر در حدود ۰/۸ میلی‌اکی‌والانت در لیتر است (شکل ۶). کمترین دامنه تغییرات نیز به میزان ۰/۳۶ میلی‌اکی‌والانت در لیتر و در یون پتاسیم (K) مشاهده

نتیجه‌گیری

خشکسالی، یک پدیده طبیعی و از ویژگی‌های مکرر آب و هوایی است و امکان رخداد این حادثه بدون در نظر گرفتن رژیم های بارش و الگوهای آب و هوایی در سراسر جهان وجود دارد. خشکسالی شروعی کند و منطقه تحت پوشش گسترده‌ای دارد که برای هفته‌ها، ماه‌ها و حتی سال‌ها می‌تواند، مناطق مختلف جهان را تحت تاثیر خود قرار دهد. بررسی داده‌های دبی و بارش زیرحوضه‌های تیره نشان می‌دهد که بین دبی و بارش (SPI و SSI) ایستگاه تنگ محمد حاجی که یک زیرحوضه بالادستی تیره است، دارای همبستگی متوسط مثبت در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بوده، در ایستگاه رحیم‌آباد که در میانه حوضه تیره قرار دارد، نیز از نظر پیرسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ دارای همبستگی است که با نتایج (Abasi et al., 2017) و Mosley (2017) هم‌راستا است. همچنین، در ایستگاه خروجی حوضه تیره بین متغیرهای دبی و بارش همبستگی معنی‌دار مشاهده نمی‌شود که می‌تواند ناشی از بارش برف و ماندگاری برف در ارتفاعات از سد مروک در بالادست حوضه و همچنین آب‌گیری تالاب بیشه‌دالان سیلاخور در خشکسالی‌ها و برداشت فراوان آب از رودخانه تیره برای کشاورزی باشد.

باتوجه به این‌که خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی با یک تاخیر اتفاق می‌افتد، بنابراین، تغییرات خشکسالی هیدرولوژیکی هم بر روی کیفیت آب‌های سطحی با یک تاخیر تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Mohammadi, 2015)، بنابراین، در این پژوهش علاوه بر شاخص SPI، از شاخص‌های SSI و دهک‌ها (DI)، استفاده شد. در بین این شاخص‌ها شاخص دهک به دلیل این‌که توانسته به خوبی سال‌های ترسالی و خشکسالی را از هم تفکیک کند، به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص در این پژوهش شناخته شده است که این می‌تواند در تعیین مناسب‌ترین شاخص برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی در منطقه به‌منظور انجام برنامه‌ریزی‌های مدیریتی آتی استفاده شود. (Gudmundsson and Stagge (2016). نیز در پژوهش خود به این موضوع اشاره کردند.

دوره‌های خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به دوره‌های خشکسالی هواشناسی کمتر هستند اما طولانی‌تر بوده و گاهی دو تا چهار سال تداوم دارند. طولانی‌ترین دوره خشکسالی هیدرولوژیکی از سال آبی ۹۱ تا ۹۴ ادامه داشته است. همه ایستگاه‌های حوضه تیره دوره خشکسالی هیدرولوژیکی نسبتاً خشک (۰/۸۴- تا ۱/۲۸-) را گذرانده، هیچ‌کدام متحمل خشکسالی هیدرولوژیکی شدید نشده‌اند.

در ایستگاه خروجی حوضه تیره، بین متغیرهای دبی و بارش همبستگی معنی‌دار مشاهده نمی‌شود که می‌تواند ناشی از بارش برف و ماندگاری برف در ارتفاعات از سال آبی قبل، احداث سد مروک در بالادست حوضه و همچنین آب‌گیری تالاب بیشه‌دالان سیلاخور در خشکسالی‌ها و برداشت فراوان آب از رودخانه تیره برای کشاورزی باشد. حوضه بالادست ایستگاه تنگ محمد حاجی کاملاً آهکی بوده که باعث تغییر در پارامترهای کلسیم، TDS، EC و غیره شده است. در ایستگاه رحیم‌آباد سیلاخور و خروجی تیره نیمی از مساحت حوضه اختصاص به سنگ‌های نفوذی مثل گرانیت و گرانودیوریت که باعث افزایش پتاسیم و کلسیم می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مورد بررسی در حوضه رودخانه تیره در صد تغییرات مربوط به کلسیم، منیزیم و سدیم، و آنیون‌های کربنات و کلر در سال‌های خشک نسبت به میانگین بلندمدت افزایش پیدا کرده است.

(Eion and Cameron (1996 نشان دادند که تغییرات فصلی میزان آب‌دهی، بر ترکیب شیمیایی آب موثر است. همچنین، بیان داشتند که کمترین میزان یون‌های Mg، Ca، K و HCO_3 مربوط به زمان آب‌دهی بیشینه است. با توجه به این‌که ایستگاه تنگ محمد حاجی کمترین میزان دبی را دارد، وجود بیشترین میزان کلر و سدیم قابل پیش‌بینی بوده است، اما در ایستگاه‌های پایین دست (رحیم‌آباد و تیره-درود) میزان TDS و EC نیز افزایش پیدا کرده است.

(Zahedi-Kalaki et al., (2004 بیان داشتند که تغییرات دبی رودخانه‌ها در افزایش یا کاهش مقدار EC نقش

and Izadpanah (2013) نشان می‌دهد که غلظت یون‌ها با افزایش آبدهی رودخانه‌ها کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

این مقاله در قالب طرح پژوهشی، با همکاری و هزینه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری با شماره مصوب ۹۸۰۲۲۶-۹۸۰۰۸-۹۸۰۰۱-۹۸۰۰۹-۲۹-۵۹-۱۲۴۸ و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان انجام شده است. مولفین بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری این مراکز در کلیه مراحل اجرای طرح صمیمانه سپاسگزاری نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

به سزایی دارد. با توجه به نقش درجه حرارت در میزان هدایت الکتریکی آب (Alizadeh, 2004) در طی سال‌هایی که خشکسالی رخ می‌دهد و دمای هوا نیز افزایش می‌یابد، می‌توان انتظار داشت که EC افزایش پیدا کند، در استگاه تنگ محمد حاجی، مقدار TDS نسبت به میانگین بلندمدت ۹/۴۲ درصد و EC نسبت به میانگین بلندمدت ۹/۴۸ درصد افزایش داشته‌اند. (Mohammadi (2015) بیان داشتند که مقدار EC در دوره‌های خشکسالی نسبت به میانگین دراز مدت در ایستگاه‌های پایاب سر کهک، دامن، لادیز و پیردان در استان سیستان و بلوچستان افزایش پیدا کرده‌است. به استثنای SO₄ (به‌ویژه در ایستگاه تنگ محمد حاجی)، همه پارامترها در سال‌های مرطوب در ایستگاه‌های حوضه مورد مطالعه دارای روند کاهش‌ی نسبت به میانگین بلندمدت هستند. تحقیقات Rahimi et al., (2013)؛ Hoseini et al., (2013)؛ Shokouhi-Far

منابع مورد استفاده

- Abasi, F., Farzadmehr, J., Chapi, K., Bashiri, M., Azarakhshi, M. 2017. Spatial and temporal variations of Groundwater quality parameters in Qorveh-Dehgolan Plain and its relationship with drought. *Hydrogeol.* 1(2), 11-23 (in Persian).
- Alizadeh, A. 2004. Principles of applied hydrology. Ferdowsi University of Mashhad Press (in Persian).
- Azish, S., Asareh, A., Khodadadi Dehkordi, D. 2019. Effect of drought on the water quality and quantity of Dez River. *Iran-Water Resour. Res.* 15(2), 306-318 (in Persian).
- Barker, L.J. 2016. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20(6), 2483-2505.
- Edwards, D.C., McKee, T.B. 1997. Characteristics of 20th century droughts in the United States at multiple time scales. *Climatol. Rep.* 2-97.
- Eion, M., Cameron, M. 1996. Hydrogeochemistry of the Fraser River, British Columbia: seasonal variation in major and minor components. *J. Hydrol.* 182(1-4), 209-225.
- Fernández, A.C., Fernández, A.M., Domínguez, C.T., Santos, B.L. 2006. Hydrochemistry of northwest Spain ponds and its relationships to groundwater. *J. Ecol. Iberian Inland Waters* 25(1-4), 433-452.
- Gudmundsson, L., Stagge, J.H. 2016. SCI: standardized Climate Indices such as SPI, SRI, or SPEI. R package version 1.0.2.
- Heshmatpour, A., Jandaghi, N., Ghareh Mahmoodlu, M., Pasand, S. 2020. Drought effects on surface water quality in Golestan Province for Irrigation Purposes, case study: Gorganroud River. *Physi. Geo. Quart.* 13(48), 75-88.
- Hoseini, P., Ildroumi, A., Hoseini, A. 2013. Evaluation of water quality of Karun River using NSFQI index in the range of Zergan to Kut-Amir (during 5 years). *Quart. Periodi. Human Environ.* 25,1-11 (in Persian).
- Johnston, S.G., Maher, D.T. 2022. Drought, megafires and flood - climate extreme impacts on catchment-scale river water quality on Australia's east coast. *Water Res.* 218, 118510.
- Jorquera, O.C., 2013. Geochemical baselines based on stream waters: applications to environmental studies, Central Chile as a case study. London, UK: Imperial College London.
- Lee, H.J., Bell, M.L., Koutrakis, P. 2023. Drought and ozone air quality in California: Identifying susceptible regions in the preparedness of future drought. *Environ. Res.* 216(1), 114461.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, M.A. 2002. A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.* 22, 1571-1592.

- Mahmoudi, P., Tawousi, T., Shahouzei, A. 2015. Drought and its effects on groundwater resources quality in Sistan and Baluchestan Province. *J. Water Res. Agri.* 29(1), 21-35 (in Persian).
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of 8th Conference on Applied Climatology*. Anaheim, CA, 179-183.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., Desai, V.R. 2009. Drought characterization: a probabilistic approach. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 23, 41-55
- Mohammadi, E. 2015. Investigation of the climatic and hydrologic drought on water quality in the Dorudzan Dam Watershed. Msc thesis, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University (in Persian).
- Morshed Ahmad, M., Yaseen, M., Saqib, S.E. 2022. Climate change impacts of drought on the livelihood of dryland smallholders: Implications of adaptation challenges. *Int. J. Disaster Risk Reduc.* 80, 103210.
- Mosaedi, A., Ghabaei Sough, M. 2011. Modification of Standardized Precipitation Index (SPI) Based on relevant probability distribution function. *Water Soil* 25(5) (in Persian).
- Mosley, L.M. 2015. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth Sci. Rev.* 140, 203-214.
- Nalbantis, I., Tsakiris, G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour. Manage.* 23, 881-897.
- Núñez, J., Hallack-Alegría, M., Cadena, M. 2016. Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: The Latin America and the Caribbean Drought Atlas. *J. Hydrol.* 538, 515-538.
- Peña-Guerrero, M.D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, R.C.L., Meza, F. 2020. Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. *Hydrol. Sci. J.* 65(6), 1005-1021.
- Prathumratana, L., Sthiannopkao, S., Kim, K.W. 2008. The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River. *Environ. Int.* 34(6), 860-866.
- Rahimi, L., Dehghani, A.A., Ghorbani, K. 2016. Comparison of total flow, base flow and waterquality characteristics trend in Arazkuseh Hydrometric Station. *J. Watershed Manage. Res.* 7(13), 83-91 (in Persian).
- Shokouhi-Far, M., Izadpanah, Z. 2013. Evaluation of relation between TDS, EC, HCO₃ and Cl with Karun River water in warm and cold seasons using regression analysis. In *Proceedings 1st National Conference on Water Resources and Agricultural Challenges*, (CHWRA01_068-2013), Islamic Azad University, Khorasgan Branch, Iran (in Persian).
- Svensson, C., Hannaford, J., Prosdoci, I. 2017. Statistical distributions for monthly aggregations of precipitation and streamflow in drought indicator applications. *Water Resour. Res.* 52(2), 999-1018.
- Van Loon, A.F. 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2(4), 359-392.
- Vlček, O., Huth, R. 2009. Is daily precipitation Gamma-distributed? Adverse effects of an incorrect use of the Kolmogorov-Smirnov test. *Atmo. Res.* 93, 759-766.
- WHO. 2008. Guidelines for Drinking-water quality. Fourth edition, 564 pages.
- Wu, H., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., Wilhite, D.A., Wen, F. 2007. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *Int. J. Climatol.* 27, 65-79.
- Zahedi-Kalaki, A. 2004. Impacts evaluation of drought on quality and quantity of Behshahr Town water resources. MSc Thesis, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University (in Persian).