



Investigating meteorological and hydrological drought characteristics and their propagation relationship under the influence of human activities in Ardabil plain

Erfan Faraji Amogein¹ | Amin Kanooni² | Mahsa Hasanpour Kashani³

1. Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: e.faraji@student.uma.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: amin.kanooni@uma.ac.ir
3. Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: m.hkashani@uma.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 31 January 2024
Received in revised form
16 April 2024
Accepted 14 May 2024
Published online 23 November 2024

Keywords:

Drought propagation
Hydrological drought
Human activities
Meteorological drought

ABSTRACT

The occurrence of droughts that are affected by the change of climatic factors and the development of human activities have faced more serious problems in the management of limited water resources. In this research, SPI and SSI indices were used in different time scales in order to investigate meteorological and hydrological drought characteristics and extract the propagation relationship between them in the basin overlooking Samian station in Ardabil plain. To conduct the research, first, the average monthly rainfall of the study area was extracted using the IDW method. Then, by identifying the change point, the flow time series was divided into two periods before (natural) and after (disturbed) construction of Yamchi reservoir dam, and SPI and SSI indices were calculated for each period. In the natural period, hydrological drought prevailed about 30% of the time, but the share of hydrological and meteorological droughts was the same in this period. However, in the distributed period, the frequency of meteorological drought was less than 30%, but the frequency of hydrological drought was about 80%. This issue shows the effect of the construction and operation of Yamchi Dam so that in the years after the construction of the dam, the hydrological regime of the river was affected and experienced more drought. According to the correlation between SPI and SSI indices in two natural and disturbed periods, the propagation of meteorological drought to hydrological has been a third-order relationship.

Cite this article: Faraji Amogein, E., Kanooni, A., & Hasanpour Kashani, M. (2024). Investigating meteorological and hydrological drought characteristics and their propagation relationship under the influence of human activities in Ardabil plain. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (3), 649-664.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.371936.1141>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.371936.1141>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و رابطه انتشار آن‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی در دشت اردبیل

عرفان فرجی عموقین^۱ | امین کانونی^۲ | مهسا حسن پورکاشانی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: e.faraji@student.uma.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: amin.kanooni@uma.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m.hkashani@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

کلیدواژه‌ها:

انتشار خشک‌سالی

خشک‌سالی هواشناسی

خشک‌سالی هیدرولوژیکی

فعالیت‌های انسانی

وقوع انواع خشک‌سالی که متأثر از تغییر عوامل اقلیمی و گسترش فعالیت‌های انسانی می‌باشد مدیریت منابع محدود آب را با مشکلات جدی‌تری روبه‌رو کرده است. در این پژوهش به‌منظور بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و استخراج رابطه انتشار بین آن دو در حوضه مشرف به ایستگاه سامیان در دشت اردبیل از شاخص‌های SPI و SSI در مقیاس‌های مختلف زمانی استفاده شد. برای انجام این پژوهش، ابتدا میانگین بارش ماهانه منطقه مورد مطالعه به کمک روش IDW استخراج شد. سپس با تشخیص نقطه تغییر، سری زمانی جریان به دو دوره قبل (طبیعی) و بعد (آشفته) از احداث سد مخزنی یامچی تقسیم و شاخص‌های SPI و SSI برای هر دوره محاسبه شدند. در دوره طبیعی، حدود ۳۰ درصد مواقع خشک‌سالی هیدرولوژیکی حاکم بود ولی سهم خشک‌سالی و ترسالی هواشناسی در این دوره یکسان بوده است. با این حال در دوره آشفته، فراوانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی کم‌تر از ۳۰ درصد ولی فراوانی وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی حدود ۸۰ درصد بوده است. این موضوع تأثیر احداث و بهره‌برداری از سد یامچی را به‌خوبی نشان می‌دهد، چرا که در سال‌های بعد از احداث سد رژیم هیدرولوژیکی رودخانه تحت تأثیر قرار گرفته و خشک‌سالی بیش‌تری را تجربه کرده است. با توجه به همبستگی بین شاخص‌های SPI و SSI در دو دوره طبیعی و آشفته، رابطه انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی از درجه سوم بوده است.

استناد: فرجی عموقین، عرفان؛ کانونی، امین و حسن پورکاشانی، مهسا (۱۴۰۳). بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و رابطه انتشار آن‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی در دشت اردبیل. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۳)، ۶۴۹-۶۶۴.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.371936.1141>



۱. مقدمه

بررسی ناهنجاری‌های موجود در چرخه هیدرولوژیکی که منجر به محدودیت دسترسی به منابع آب می‌شود پایش خشک‌سالی نام دارد (Dai, 2011). وجود عوامل متعدد مؤثر در خشک‌سالی و تغییرات مکانی و زمانی آن‌ها، خشک‌سالی را به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های طبیعی تبدیل کرده است (Kiem *et al.*, 2016). وقوع خشک‌سالی تأثیر زیادی بر منابع طبیعی و بخش‌های اجتماعی و اقتصادی جوامع انسانی دارد (Heim Jr, 2002). طبق گزارش سازمان جهانی هواشناسی در دوره ۲۰۱۹-۱۹۷۰، فراوانی وقوع خشک‌سالی نسبت به سایر مخاطرات طبیعی کم‌تر ولی تلفات انسانی آن بیش‌تر بوده است (WMO, 2014). پیش‌بینی‌های انجام‌یافته نیز نشان می‌دهد که فراوانی وقوع خشک‌سالی در آینده رو به افزایش است (Yao *et al.*, 2020).

خشک‌سالی با توجه به پارامترهای مؤثر در آن به انواع مختلف هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی طبقه‌بندی می‌شود (Ashok and Vijay, 2011). شدت تأثیر خشک‌سالی هیدرولوژیکی به مراتب بیش‌تر از خشک‌سالی هواشناسی است که این موضوع در پژوهش Bevacqua *et al.* (2021) که در آن فراوانی و متوسط شدت خشک‌سالی و مدت زمان بین دو خشک‌سالی متوالی در ۴۵۷ حوضه آبریز واقع در برزیل را بررسی کردند، ارائه شده است. یکی از راه‌های مدیریت و کنترل خشک‌سالی بررسی رابطه انتشار آن به خشک‌سالی‌های دیگر است. به این منظور مطالعات فراوانی انجام شده است. Huang *et al.* (2017) در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک در چین به کمک روش تحلیل موجک رابطه بین خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که فاصله زمانی بین وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در تابستان و بهار کم‌تر از پاییز و زمستان بوده است. Shin *et al.* (2018) ارتباط دو شاخص بارش استاندارد شده و پالمر را در دو مقیاس زمانی سه و شش ماهه ارزیابی کردند. به این ترتیب، احتمال وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی به شرط وقوع خشک‌سالی هواشناسی در مقیاس سه‌ماهه برابر با ۰/۳۳ و در مقیاس شش‌ماهه برابر با ۰/۴۸ به دست آمد. Bae *et al.* (2019) در بررسی رابطه خشک‌سالی هواشناسی با خشک‌سالی هیدرولوژیکی و کشاورزی ابتدا به کمک روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، منطقه مورد مطالعه را از لحاظ بارش به چهار بخش تقسیم کردند و سپس، با انتخاب مقیاس زمانی سه‌ماهه، روابط خشک‌سالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی را به کمک پارامترهای بارش، تراز آب مخازن کشاورزی و تراز آب سدهای مخزنی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که در شرایط وقوع خشک‌سالی هواشناسی، سطح آب مخازن کشاورزی افزایش ولی سطح آب سدهای مخزنی کاهش می‌یابد که همین موضوع به‌عنوان شاخص مناسبی جهت ارزیابی انواع خشک‌سالی بیان شد. Sattar *et al.* (2019) به منظور بررسی رابطه دو شاخص SPI^1 (خشک‌سالی هواشناسی) و SSI^2 (خشک‌سالی هیدرولوژیکی) در کره شمالی از شبکه بیزی و توابع کاپولا استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که هرچه شدت خشک‌سالی هواشناسی بیش‌تر باشد زمان تأخیر کوتاه‌تری برای انتشار به خشک‌سالی هیدرولوژیکی خواهد داشت و برعکس Fang *et al.* (2020) در پژوهشی رابطه بین دو شاخص خشک‌سالی SPI و SSI را به کمک ضرایب همبستگی خطی و غیرخطی در مقیاس‌های زمانی ۴ تا ۱۰۴ هفته ارزیابی کردند. با بررسی نتایج مربوط به شدت خشک‌سالی‌های تجمعی هیدرولوژیکی و هواشناسی و انطباق زمانی آن‌ها، تأخیر ۲۵ الی ۳۹ هفته‌ای برای انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی پیشنهاد شد. Guo *et al.* (2020) در مطالعه‌ای به کمک توابع کاپولا و با ارزیابی فاصله زمانی گسترش خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی، فواصل زمانی هفت، ۱۴ و ۲۷ ماهه را برای بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه پیشنهاد دادند. Yao *et al.* (2020) روابط بین شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی را با استفاده از تحلیل موجک و محاسبه ضریب همبستگی پیرسون (دو به دو برای شاخص‌ها) بررسی کردند. نتایج نشان داد که رابطه

خشک‌سالی کشاورزی با خشک‌سالی هواشناسی قوی‌تر از رابطه خشک‌سالی هیدرولوژیکی با خشک‌سالی هواشناسی می‌باشد. Ding *et al.* (2021) با بررسی گسترش خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی به کمک تحلیل موجک نشان دادند که سرعت انتشار خشک‌سالی در اقلیم مرطوب بیش‌تر از اقلیم خشک است. هم‌چنین در تابستان و پاییز نسبت به زمستان و بهار رابطه قوی‌تری بین خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود دارد.

تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی در حوضه‌های آبریز، ویژگی‌ها و نحوه انتشار انواع مختلف خشک‌سالی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. Wu *et al.* (2017) در یک حوضه تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، به کمک تئوری ران^۳ از مدل‌های غیرخطی برای ارزیابی انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی استفاده کردند. به همین منظور، سری زمانی خشک‌سالی به دو قسمت طبیعی و آشفته تقسیم و به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل لگاریتمی برای بیان رابطه انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. Xing *et al.* (2021) به‌منظور بررسی رابطه انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی در حوضه‌ای با چندین سد مخزنی، دوره آماری سری زمانی مربوطه را به دو دوره طبیعی و آشفته تقسیم و سپس با تحلیل فراوانی و استفاده از ضریب همبستگی، مقیاس زمانی سه‌ماهه برای بیان رابطه انتشار بین خشک‌سالی‌ها انتخاب کردند. Zhang *et al.* (2022) به‌منظور برآورد تأثیر فعالیت‌های انسانی بر خشک‌سالی و بررسی تأثیر آن بر سرعت انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی مطالعه‌ای را در حوضه‌ای در چین انجام دادند. نتایج نشان داد که فعالیت‌های انسانی باعث افزایش شدت و فراوانی خشک‌سالی هیدرولوژیکی شده است. هم‌چنین تأثیر فعالیت‌های انسانی بر خشک‌سالی در فصول زمستان و پاییز کم‌تر از سایر فصول بوده است.

بررسی و تعیین دقیق ویژگی‌های خشک‌سالی باید با توجه به خصوصیات هیدروکیلیمایی حوضه آبریز مورد مطالعه، شاخص‌های خشک‌سالی و مقیاس زمانی مناسب، انجام شود. با بررسی شاخص‌های خشک‌سالی در مقیاس زمانی مناسب می‌توان تحلیل صحیحی از وضعیت خشک‌سالی ارائه داد. در مناطقی که منابع آب‌های سطحی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته‌اند، روند معنی‌داری در سری زمانی جریان به‌وجود آمده و لذا نایستایی جریان رودخانه‌ها، ویژگی‌های خشک‌سالی را تغییر می‌دهد. دشت اردبیل به‌دلیل کاهش نزولات جوی با خشک‌سالی‌های متعددی مواجه بوده است. نزول بارش‌های نامنظم و روند کاهش بارش طی سال‌های اخیر بر وسعت و شدت این خشک‌سالی‌ها افزوده است. لذا مشکلات متعددی در مدیریت منابع محدود آب در منطقه وجود دارد. با شروع بهره‌برداری از سد مخزنی یامچی که بر روی رودخانه بالخلوچای احداث شده رژیم جریان پایین‌دست رودخانه تفاوت معنی‌داری با شرایط قبل پیدا کرده است. در این پژوهش با بررسی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و رابطه انتشار بین آن‌ها، اثرات احداث سد یامچی بر ویژگی‌های انواع خشک‌سالی بررسی شد تا بتوان راه‌کارهای مناسبی برای مدیریت مناسب منابع آب اتخاذ کرد.

۲. مواد و روش تحقیق

۲.۱. محدوده مورد مطالعه

حوضه مشرف به ایستگاه هیدرومتری سامیان واقع در استان اردبیل که قسمتی از حوضه آبخیز قره‌سو است محدوده مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشد که به مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۳۹ درجه طول شرقی و ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه و ۴۸ درجه عرض شمالی محدود می‌شود. این منطقه از شمال به شهرستان مشگین‌شهر، از شرق به استان گیلان، از جنوب به رشته‌کوه‌های بزقوش و از غرب به رشته‌کوه‌های مرتفع سبلان محدود می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به‌ترتیب برابر با ۱۲۹۰ و ۴۷۹۰ متر از سطح دریا بوده و مساحت آن نیز حدود ۴۰ هزار

کیلومتر مربع تخمین زده می‌شود. هم‌چنین، میانگین بارش سالانه برابر با ۳۰۳ میلی‌متر و میانگین دما برابر با ۹ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به داده‌های مربوط به پارامترهای هواشناسی، اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد می‌باشد. قره‌سو و بالخلوچای رودهای پرآب و مهم این حوضه به‌شمار می‌روند که رواناب‌های سطحی را به دره‌رود و از آنجا به رود مرزی ارس و در نهایت به دریای خزر هدایت می‌کنند. شکل (۱) محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

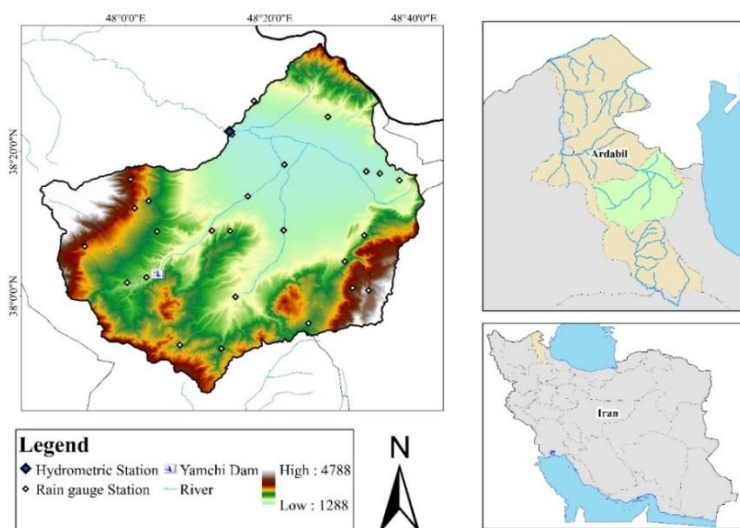


Figure 1. Location of the study area

در این مطالعه از داده‌های ۲۶ ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه هیدرومتری در خروجی حوضه (ایستگاه سامیان) طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از آرشیو شرکت آب منطقه‌ای اردبیل که توسط باران‌سنج‌ها و ایستگاه هیدرومتری در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه اندازه‌گیری می‌شود، استخراج شد (جدول ۱).

Table 1. Details of stations located in the study area

No	Station	Established year	Longitude	Latitude
1	Sarein	1992	48-04-09	38-09-05
2	Niaraq	1972	48-37-56	38-15-59
3	Hir	1997	48-30-26	38-04-54
4	Atashgah	1973	48-03-30	38-12-58
5	Baghrabad	2001	48-33-01	38-08-23
6	Saein	2000	48-01-39	38-12-09
7	Hellabad	1972	48-25-21	37-56-18
8	Tutunsiz	1970	48-07-35	37-53-10
9	Goli	2009	48-11-52	37-49-54
10	Abibagloo	1999	48-33-29	38-16-54
11	Ardabil	1971	48-17-02	38-13-51
12	Polealmas	2000	48-11-58	38-09-03
13	Samian	1972	48-14-47	38-22-29
14	Siahpoosh	1995	48-13-17	37-52-42
15	Shamsabad	2000	48-14-58	38-00-11
16	Kuzetopraqi	1972	48-22-02	38-07-19
17	Gilandeh	1998	48-21-59	38-18-41
18	Lay	1979	47-54-25	38-06-55
19	MollaAhmad	1999	48-17-48	38-04-28
20	Namin	1971	48-28-03	38-24-51
21	Nir	1973	48-01-07	38-02-22
22	Neor	1973	48-33-42	38-00-47
23	Shamshir Khaneh	1977	48-00-39	38-16-15
24	Abbasabad	1974	48-31-02	48-31-02
25	Yamchi Olia	1998	48-02-53	38-02-35
26	Aladizga	1997	48-35-16	38-17-03

۲.۲. روش تحقیق

به منظور انجام پژوهش، ابتدا داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و دبی جریان ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه تهیه و پس از آماده‌سازی، مقادیر ماهانه آن‌ها استخراج شد. با توجه به نقطه‌ای بودن بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی، نقشه پهنه‌بندی بارش برای حوضه مورد مطالعه تهیه شد. در ادامه شاخص‌های خشک‌سالی متناسب با مقادیر بارش و دبی ماهانه حوضه برآورد شدند و در نهایت رابطه انتشار بین شاخص‌های خشک‌سالی مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۲) فرایند انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

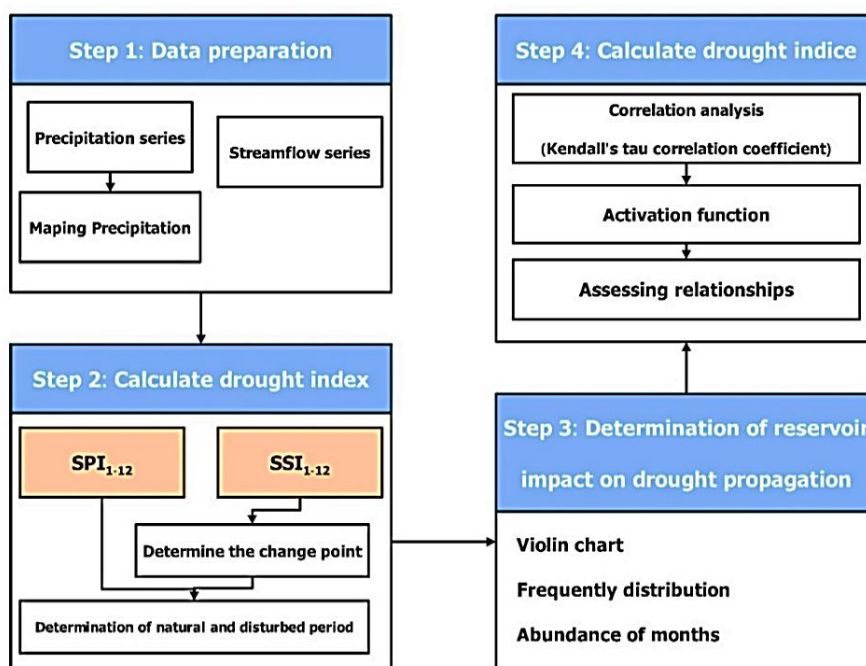


Figure 2. Flowchart of the research process

۳.۲. پهنه‌بندی بارش

برای تعیین بارش ماهانه محدوده مورد مطالعه، از روش IDW برای تهیه نقشه پهنه‌بندی بارش استفاده شد. این روش به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی توسط Faraji Amogin and Kanooni (2020) پیشنهاد شده است. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و به‌کمک روش IDW نقشه پهنه‌بندی بارش منطقه برای ۳۷۲ ماه تهیه شد. در ادامه خلاصه روش درون‌یابی IDW تشریح شده است.

۳.۲.۱. روش IDW

این روش بر مبنای فاصله نقاط از یکدیگر استوار است که توسط Shepard (1968) ارائه شد. طبق این روش، هرچه فاصله‌ی بین دو نقطه کم‌تر باشد، تأثیر بیشتری در تخمین مقدار پارامتر مورد نظر خواهد داشت. بنابراین، از رابطه (۱) برای تخمین مقادیر مورد نظر استفاده می‌شود.

$$F(r) = \sum_{k=1}^N W(r_k) f(r_k) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، $F(r)$ مقدار تخمین زده شده، N تعداد نقاط معلوم و تأثیر گذار (در اینجا تعداد ایستگاه‌ها)، $f(r_k)$ مقادیر واقعی و ثبت شده در نقاط معلوم، $r_k \equiv (x_k, y_k)$ مختصات نقاط تأثیر گذار و $W(r_k)$ وزن نقاط (ایستگاه‌ها) است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$W(r_k) = \frac{d_k(r)^{-p}}{\sum_{k=1}^N d_k(r)^{-p}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، $d_k(r)$ فاصله اقلیدسی بین دو نقطه و p توان وزن دهی فاصله است که بین ۰/۲۵ تا ۱۰۰ متغیر می‌باشد. هرچه مقدار p افزایش یابد تأثیر فاصله بیش تر می‌شود و نقاط با فاصله‌های نزدیک تر نقش بیش تری می‌گیرند. برای محاسبه $d_k(r)$ می‌توان از رابطه (۳) استفاده نمود (Zimmerman et al., 1999):

$$d_k(r) \equiv \sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، X و Y مختصات نقاط هستند.

۴.۲. تعیین شاخص‌های خشک‌سالی

شاخص‌های مختلفی برای تعیین مشخصات خشک‌سالی ارائه شده که در این پژوهش به دلیل ارزیابی هم‌زمان خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی از دو شاخص SPI و SSI استفاده شده است.

۴.۲.۱. شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص بارش استاندارد یکی از شاخص‌های پیشنهاد شده برای بیان خشک‌سالی در نقاط مختلف جهان است. این شاخص به دلیل انعطاف‌پذیری در مقیاس زمانی و مکانی، استفاده از تابع توزیع احتمالاتی و تک‌پارامتری بودن، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر مثبت شاخص SPI نشان‌دهنده ترسالی و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده خشک‌سالی در منطقه است. برای به دست آوردن شدت خشک‌سالی در این روش از روابط (۴) تا (۱۱) استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا تابع چگالی احتمال توزیع گاما معرفی می‌شود (رابطه ۴).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، α و β به ترتیب پارامتر شکل و مقیاس هستند، x مقدار بارش و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است. این پارامترها با استفاده از روابط (۵) تا (۸) قابل تعیین هستند.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x)}{n} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، n تعداد مشاهدات بارندگی است. با توجه به عدم بارندگی در تعدادی از ماه‌ها، تابع توزیع تجمعی در توزیع گاما ($G(x)$) به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad \text{رابطه ۹} \quad q = \frac{m}{n} \quad \text{که در آن}$$

که در آن، q احتمال صفر بودن بارش و m تعداد ماه‌هایی که در سری زمانی صفر می‌باشند. پس از محاسبه $H(x)$ برای تبدیل توزیع احتمال گاما به توزیع احتمال نرمال از پارامتر t طبق رابطه (۱۰) استفاده می‌شود.

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \frac{1}{[H(x)]^2}} & \text{if } 0 < H(x) \leq 0.5 \\ \sqrt{\ln \frac{1}{[1-H(x)]^2}} & \text{if } 0.5 < H(x) < 1 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

و در نهایت شاخص SPI به صورت رابطه (۱۱) بیان می شود.

$$\begin{cases} Z = \text{SPI} = \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ Z = \text{SPI} = + \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] & 0.5 < H(x) \leq 1 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

مقادیر ثابت موجود در رابطه (۱۱) به شرح جدول (۲) ارائه شده است (McKee et al., 1993).

Table 2. The coefficients of the SPI equation

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_0	2.5355	d_1	3.4327
C_1	0.8028	d_2	0.1926
C_2	0.030	d_3	0.0033

۲.۴.۲. شاخص جریان استاندارد (SSI)

محاسبات مربوط به شاخص SSI همانند شاخص SPI است با این تفاوت که در آن مقدار دبی جریان رودخانه به جای بارش استفاده می شود (Nalbantis and Tsakiris, 2009).

۲.۵. تشخیص نقطه تغییر

به منظور تشخیص دقیق زمان شروع تغییرات (نقطه شروع تأثیر فعالیت های انسانی) در سری های زمانی از آزمون ناپارامتریک پتیت^۴ استفاده شد (Pettitt, 1979). در این روش، ابتدا پارامتر K_t با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۴) تعیین می شود.

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$U_{i,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$K_t = \max |U_{i,T}|, \quad 1 \leq t \leq T \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن، $\text{sgn}()$ تابع علامت و x_j مقدار سری زمانی در گام t ام است به طوری که $i > j$ می باشد. $U_{i,T}$ نیز آماره من-ویتنی برای آزمون و T تعداد کل مشاهدات است. سپس برای تعیین نقطه تغییر در آماره مشاهده در سطح معنی داری دلخواه، از رابطه (۱۵) استفاده می شود.

$$P \cong 2 \exp\left(\frac{-6k_t^2}{T^3 + T^2}\right) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

اگر مقدار آماره P کم تر از سطح معنی داری باشد، نقطه مورد نظر شروع تغییرات خواهد بود (Pettitt, 1979).

۲.۶. تئوری ران

از این روش برای استخراج ویژگی های خشک سالی استفاده می شود. برای این منظور، ابتدا حد آستانه ای تعیین و در

نتیجه آن، مقادیر کمتر و یا بیش‌تر از آن حد آستانه به‌صورت تجمعی محاسبه و سپس طول دوره خشک‌سالی و یا ترسالی مشخص می‌شود. همچنین برای بیان شدت خشک‌سالی از میانگین شدت دوره‌های تر و یا خشک استفاده می‌شود (Yevjevich, 1967). به کمک این روش می‌توان ویژگی‌های خشک‌سالی در مناطق مختلف را استخراج و با استفاده از آن روابط انتشار خشک‌سالی را به‌دست آورد (Chang et al., 2016).

۷.۲. بررسی انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی و رابطه بین آن‌ها

برای بررسی رابطه انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی مدل‌های مختلفی (خطی، سهمی، توانی، نمایی و لگاریتمی) بررسی شدند و سپس مدل مناسب براساس ضریب تعیین و ضریب همبستگی تاوکندال^۵ انتخاب شد. لازم به ذکر است که با توجه به وجود نقطه تغییر در سری زمانی جریان رودخانه، رابطه انتشار خشک‌سالی برای دو دوره طبیعی و آشفته به‌طور جداگانه بررسی شد.

۸.۲. ارزیابی مدل‌ها

به‌منظور ارزیابی مدل‌های مختلف از ضریب تعیین (R^2) و ریشه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که طبق روابط (۱۶) و (۱۷) قابل محاسبه هستند.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

که در آن، O مقدار واقعی، S مقدار تخمین‌زده، \bar{O} و \bar{S} به‌ترتیب میانگین مقادیر واقعی و تخمین‌زده، و n تعداد کل داده‌ها است (Chai and Draxler, 2014).

۳. نتایج و بحث

به‌منظور تعیین ویژگی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه مورد مطالعه، ابتدا با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی، نقشه‌های پهنه‌بندی بارش ماهانه (۳۷۲ نقشه) با روش IDW تهیه و سپس میانگین بارش ماهانه حوضه مورد مطالعه محاسبه شد. شکل (۳) سری زمانی میانگین بارش ماهانه حوضه و دبی جریان خروجی از آن را نشان می‌دهد. با مشخص شدن میانگین بارش ماهانه و جریان خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری سامیان، شاخص‌های SPI و SSI در مقیاس‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای حوضه مورد مطالعه محاسبه شدند. شکل (۴) سری زمانی شدت خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس یک، شش و دوازده ماهه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقیاس‌های زمانی کوتاه به‌خوبی شرایط خشک‌سالی و ترسالی را نشان می‌دهند، در صورتی که با افزایش مقیاس‌های زمانی، ناهنجاری‌های بلندمدت حوضه نمایان‌تر می‌شوند.

با احداث سد مخزنی یامچی و شروع بهره‌برداری آن در سال ۱۳۸۳ (سال ۲۰۰۴ میلادی) رژیم جریان رودخانه بالخلوچای تحت تأثیر قرار گرفته است. این موضوع با بررسی هیدروگراف جریان در ایستگاه هیدرومتری پایین دست سد مخزنی قابل مشاهده است (شکل ۳-a). بررسی نتایج شاخص‌های خشک‌سالی نیز، تأثیر احداث سد بر جریان خروجی از حوضه را آشکار می‌کند.

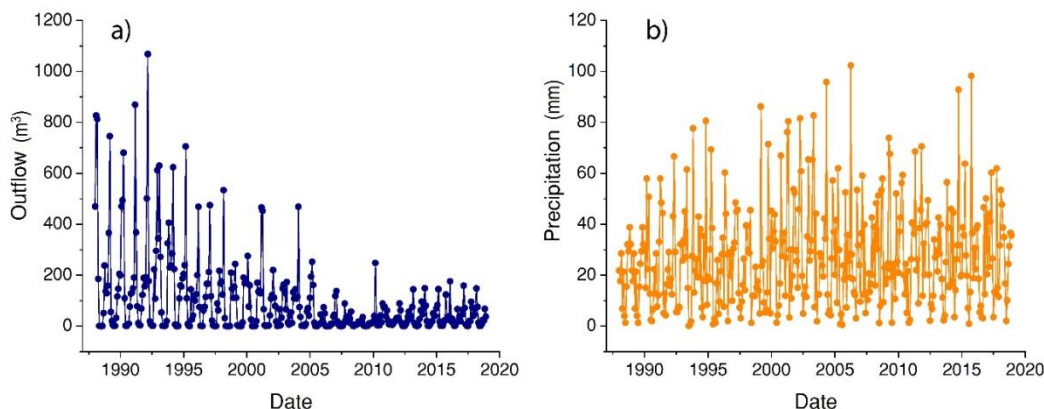


Figure 3. Time series of precipitation and outflow of the basin

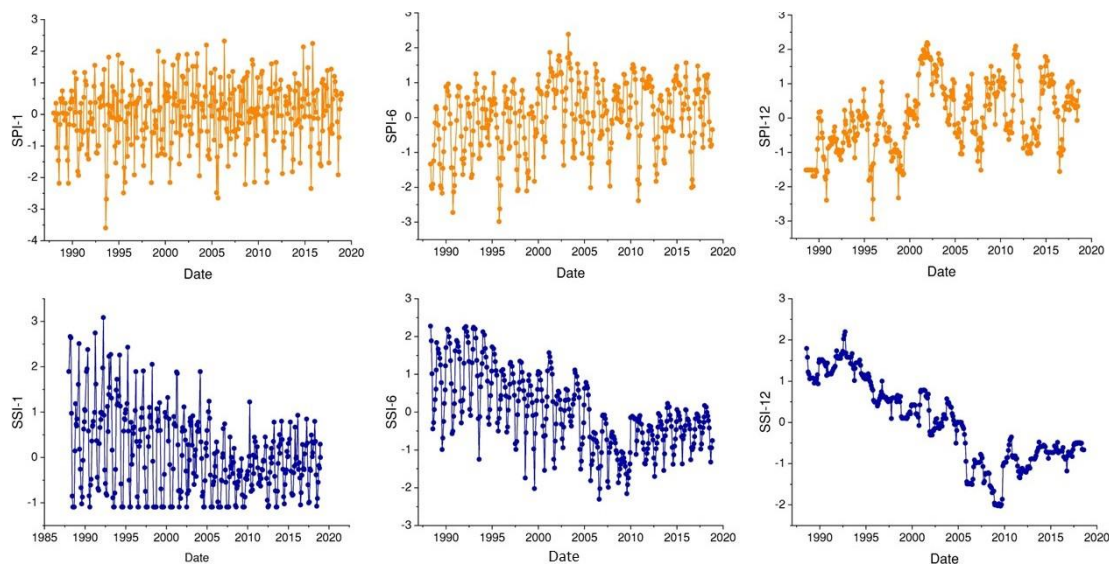


Figure 4. SPI and SSI time series

در ادامه پژوهش، به منظور تعیین دقیق نقطه شروع تغییرات شاخص خشک‌سالی، از آزمون پتیت استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی در نقطه تغییر (فروردین‌ماه سال ۱۳۸۳) که همزمان با شروع بهره‌برداری سد یامچی بوده است، تغییر روند داده است. از نقطه تغییر به بعد، میانگین جریان ۷۵ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که شاخص خشک‌سالی هواشناسی هیچ نقطه شروع تغییر معنی‌داری نداشته است. با توجه به این که ویژگی‌های آماری داده‌ها قبل و بعد از نقطه تغییر، متفاوت می‌باشد لذا، سری مربوط به شاخص‌های SPI و SSI به دو بخش طبیعی و آشفته به ترتیب قبل و بعد از نقطه تغییر، تقسیم شدند تا ویژگی‌های خشک‌سالی هر دوره به تفکیک بررسی شوند.

به‌منظور درک بهتر الگوی کلی رویدادهای خشک‌سالی از نمودار ویلونی ارائه‌شده در شکل (۶) استفاده شد. همان‌طور که در سری داده‌های مربوط به کل دوره مشخص است در خشک‌سالی هواشناسی، بیش‌ترین فراوانی وقوع خشک‌سالی حول میانه قرار دارد و هرچه از میانه فاصله می‌گیرد فراوانی داده‌ها کاهش می‌یابد. در صورتی که در داده‌های مربوط به خشک‌سالی هیدرولوژیکی، فراوانی خشک‌سالی‌ها حول میانه و کم‌تر از آن تقریباً یکسان است اما در دوره‌های ترسالی، فراوانی

خشک‌سالی‌ها کاهش می‌یابد. در دو دوره طبیعی و آشفته نیز با توجه به عدم تأثیر فعالیت‌های انسانی بر شاخص خشک‌سالی هواشناسی، الگوی تغییرات فراوانی داده‌های خشک‌سالی مشابه با نمودار کل دوره است اما شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی در دو دوره آشفته و طبیعی الگویی کاملاً متفاوت دارند. در دوره طبیعی مقدار میانه داده‌ها بیش‌تر از سری کل داده‌ها است و بیش‌ترین فراوانی بالاتر از میانه می‌باشد که نشان از وقوع ترسالی‌های بیش‌تر است، اما در سری آشفته میانه، کم‌تر از سری کل داده‌ها است و با توجه به عدم تقارن داده‌ها حول میانه، فراوانی داده‌های خشک‌سالی بیش‌تر از داده‌های ترسالی است.

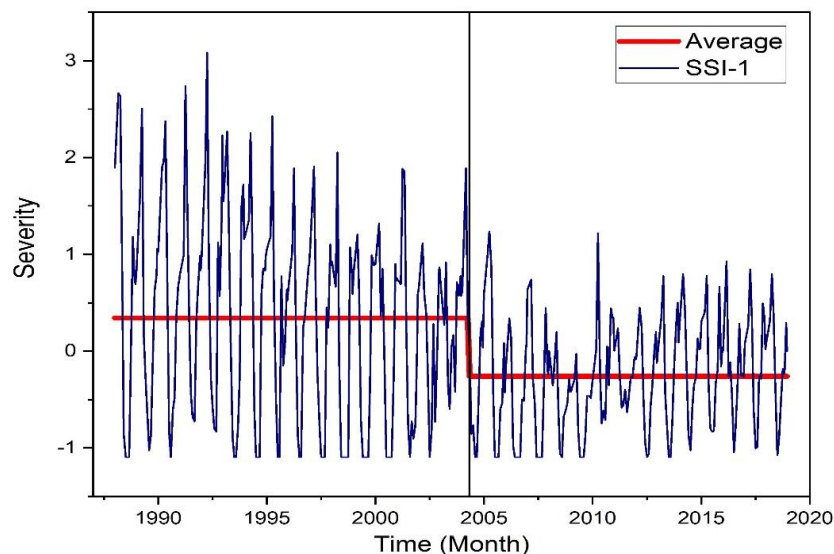


Figure 5. Disturbed and natural series characteristics in hydrological drought

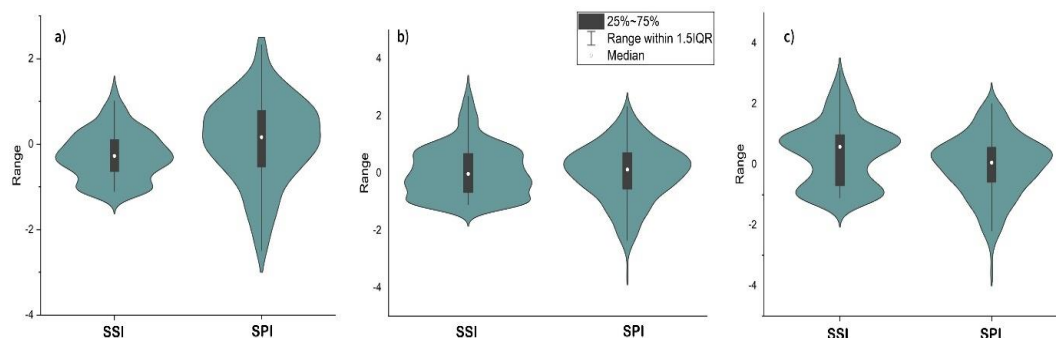


Figure 6. Violon diagram of drought intensity, disturbed period (a), total period (b) and natural period (c)

هم‌چنین، به‌منظور بررسی فراوانی وقوع خشک‌سالی در ماه‌های مختلف، از نمودار دایره‌ای ارائه‌شده در شکل (۷) برای دو دوره طبیعی و آشفته استفاده شد. همان‌طورکه مشخص است مساحت مربوط به نمودار خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حالت آشفته بزرگ‌تر از حالت طبیعی است، لذا وقایع خشک‌سالی هیدرولوژیکی بیش‌تری در دوره آشفته نسبت به دوره طبیعی رخ داده است. هم‌چنین، فراوانی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در ماه‌های انتهایی تابستان و اوایل پاییز در دوره آشفته نسبت به دوره طبیعی افزایش یافته است که دلایل مختلفی من‌جمله استفاده از جریان‌های سطحی برای آبیاری اراضی کشاورزان می‌تواند داشته باشد.

مقایسه فراوانی وقوع بین شاخص SPI و SSI در دو دوره طبیعی و آشفته، تأثیر فعالیت‌های انسانی را به خوبی نشان می‌دهد. در دوره آشفته نسبت به دوره طبیعی ترسالی‌های هواشناسی بیش‌تری اتفاق افتاده است (فراوانی زیاد شاخص SPI) اما برخلاف شاخص SPI، فراوانی خشک‌سالی هیدرولوژیکی (SSI) در دوره آشفته نسبت به دوره طبیعی بیش‌تر بوده است.

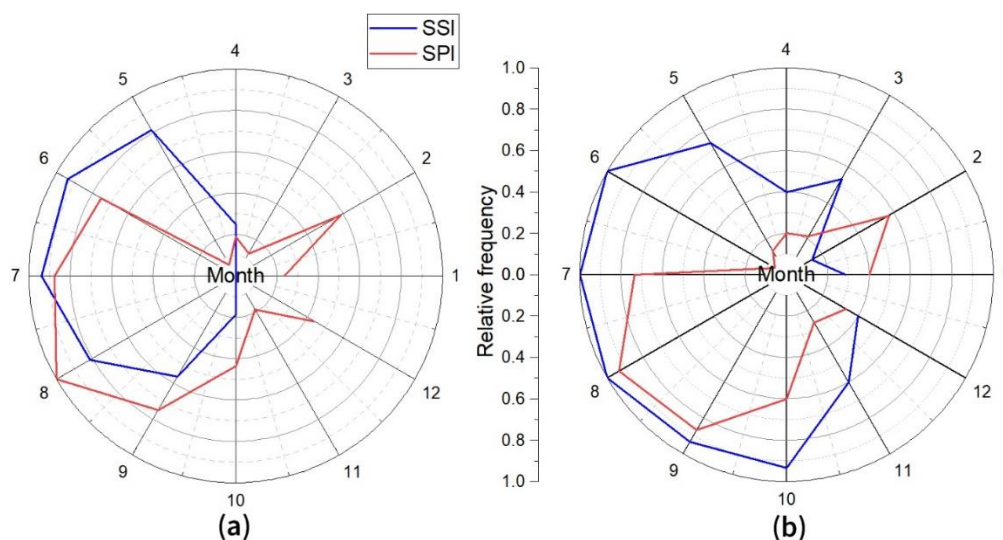


Figure 7. Monthly Frequency of meteorological and hydrological droughts in natural (a) and disturbed (b) periods

به منظور تحلیل احتمالاتی وقوع خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دو دوره طبیعی و آشفته، تابع توزیع تجمعی احتمال وقوع خشک‌سالی در مقیاس‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ ماهه ترسیم و در شکل (۸) ارائه شد. در دوره طبیعی، حدود ۳۰ درصد مواقع خشک‌سالی هیدرولوژیکی حاکم بوده است، اما طبق شاخص SPI سهم خشک‌سالی و ترسالی هواشناسی در این دوره یکسان بوده است. با این حال، در دوره آشفته شرایط متفاوتی رخ داده است. به این ترتیب که فراوانی وقوع خشک‌سالی هواشناسی کم‌تر از ۳۰ درصد اما فراوانی وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی حدود ۸۰ درصد بوده است. این موضوع تأثیر احداث و بهره‌برداری از سد یامچی را به خوبی نشان می‌دهد به طوری که در سال‌های بعد از احداث سد، رژیم هیدرولوژیکی رودخانه (در محل ایستگاه هیدرومتری سامیان) تحت تأثیر قرار گرفته و خشک‌سالی بیش‌تری را تجربه کرده است.

پس از بررسی وضعیت خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دو دوره طبیعی و آشفته و به منظور تعیین رابطه انتشار بین آن‌ها، ابتدا همبستگی بین شاخص‌های SSI و SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در دو دوره طبیعی و آشفته با استفاده از ضریب همبستگی تاوکندال تعیین شد. ضریب همبستگی تاوکندال به دلیل رتبه‌بندی داده‌ها معیار مناسبی در بیان همبستگی شاخص‌های خشک‌سالی به شمار می‌رود. این ضریب با رتبه‌بندی داده‌ها، افزایش (یا کاهش) شدت خشک‌سالی هواشناسی را با افزایش (یا کاهش) شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی در محاسبه ضریب همبستگی بین دو شاخص دخالت می‌دهد. شکل (۹) نتایج همبستگی بین دو شاخص SSI و SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. می‌توان گفت که در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت، همبستگی بین شاخص‌ها بیش‌تر بوده است. همبستگی بین شاخص‌های SSI و SPI در دوره آشفته نسبت به دوره طبیعی زیاد بوده است. از طرف دیگر در دوره طبیعی، همبستگی شاخص‌های SSI و SPI در

مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت (یک و دو ماهه) زیاد و در دوره آشفته مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر SPI با مقیاس‌های مختلف زمانی SSI همبستگی خوبی نشان می‌دهند. به بیان دیگر، با وجود این که وقوع خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دوره طبیعی در یک مقیاس زمانی مشابه اتفاق می‌افتد اما در دوره آشفته، خشک‌سالی هواشناسی با مقیاس‌های بزرگ با خشک‌سالی هیدرولوژیکی کوتاه‌مدت همبستگی بالایی دارد.

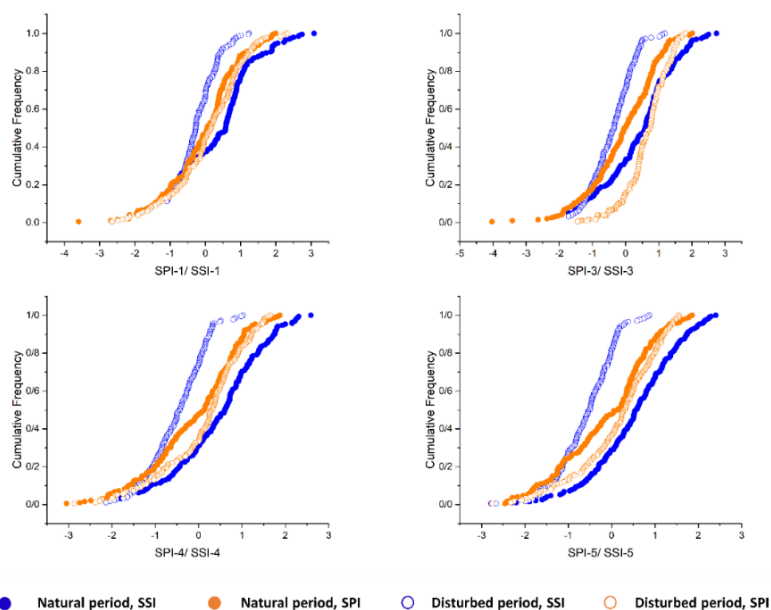


Figure 8. Frequency analysis of SSI and SPI

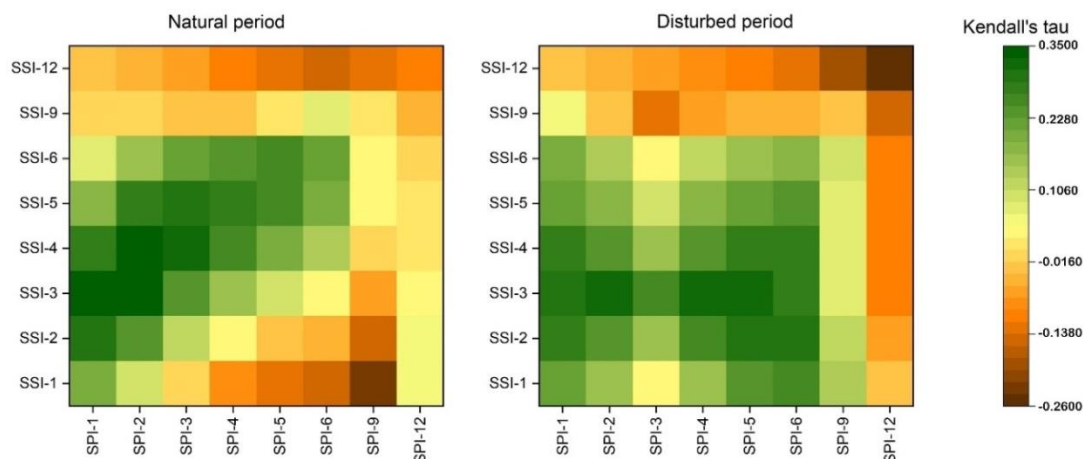


Figure 9. Correlation of SPI and SSI for different time scales in two natural and disturbed periods

با توجه به وجود همبستگی بین SPI و SSI در مقیاس‌های زمانی مختلف، رابطه انتشار بین این دو شاخص با استفاده از مدل‌های مختلف خطی و غیرخطی بررسی و به کمک معیارهای R^2 و RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول‌های (۳) و (۴) نتایج مربوط به مدل‌های مورد بررسی به ترتیب در دوره طبیعی و آشفته را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوره طبیعی، معادلات درجه سوم نسبت به سایر معادلات ارجحیت دارند. همچنین مدل‌هایی که از مقیاس

زمانی دوماهه استفاده کرده‌اند در مقایسه با سایر مقیاس‌های زمانی، دقت بالایی دارند. لذا معادله (۱۲) (جدول ۳) با حداکثر ضریب تعیین ($R^2=0/8$) و حداقل ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE=0/45$) بهترین معادله انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی خواهد بود.

Table 3. Derived equations for the natural period

RMSE	R^2	Fitting equation	No	RMSE	R^2	Fitting equation	No
0.54	0.70	$SSI - 3 = -0.038 - 0.89SPI - 3$	13	0.63	0.62	$SSI - 1 = 0.42 + 0.89SPI - 1$	1
0.57	0.71	$SSI - 3 = 0.13 - 1.04SPI - 3 - 0.02SPI - 3^2$	14	0.62	0.63	$SSI - 1 = 0.34 + 0.96SPI - 1 + 0.11SPI - 1^2$	2
0.99	0.05	$SSI - 3 = \exp\left(6.66 - \left(\frac{0.46}{SPI - 3 + 8.12}\right)\right)$	15	1.07	0.28	$SSI - 1 = \exp\left(-7.35 - \left(\frac{-0.14}{SPI - 1 - 6.14}\right)\right)$	3
0.67	0.55	$SSI - 3 = -1.13 + 0.6^{SPI-3}$	16	0.68	0.56	$SSI - 1 = -0.81 + 2.15^{SPI-1}$	4
0.52	0.72	$SSI - 3 = -284.4 \exp\left(\frac{SPI - 3}{45.8}\right) + 284.4 + 5.27SPI - 3$	17	0.63	0.62	$SSI - 1 = 56.98 \exp\left(\frac{SPI - 1}{46.66}\right) - 56.57 - 0.32SPI - 1$	5
0.48	0.76	$SSI - 3 = -0.08 - 1.17SPI - 3 + 0.15SPI - 3^2 + 0.17SPI - 3^3$	18	0.53	0.73	$SSI - 1 = 0.56 + 1.4SPI - 1 - 0.36SPI - 1^2 - 0.34SPI - 1^3$	6
0.75	0.38	$SSI - 4 = 0.06 - 0.69SPI - 4$	19	0.49	0.75	$SSI - 2 = -0.02 - 0.95SPI - 2$	7
0.94	0.26	$SSI - 4 = -0.14 - 0.54SPI - 4 - 0.28SPI - 4^2$	20	0.47	0.77	$SSI - 2 = 0.14 - 1.07SPI - 2 - 0.21SPI - 2^2$	8
975.5	0.00	$SSI - 4 = \exp\left(6.9 - \left(\frac{0.66}{SPI - 4 + 8.37}\right)\right)$	21	0.99	0.06	$SSI - 2 = \exp\left(-21.37 - \left(\frac{0.28}{SPI - 2 - 19.88}\right)\right)$	9
0.75	0.39	$SSI - 4 = -1.06 + 0.57^{SPI-4}$	22	0.62	0.61	$SSI - 2 = -1.13 + 0.56^{SPI-2}$	10
0.71	0.45	$SSI - 4 = 0.05 \exp\left(\frac{SPI - 4}{0.32}\right) - 0.25 - 1.01SPI - 4$	23	0.48	0.77	$SSI - 2 = -358.5 \exp\left(\frac{SPI - 2}{37.62}\right) + 358.5 + 8.5SPI - 2$	11
0.71	0.45	$SSI - 4 = -0.4 - 0.8SPI - 4 + 0.8SPI - 4^2 + 0.39SPI - 4^3$	24	0.45	0.80	$SSI - 2 = -0.02 - 1.2SPI - 2 + 0.07SPI - 2^2 + 0.17SPI - 2^3$	12

با توجه به رابطه بین شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌توان گفت که در دوره آشفته برازش مناسب‌تری نسبت به دوره طبیعی انجام گرفته است. در این دوره نیز، مدل درجه سوم دقت بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. همچنین، مقیاس زمانی چهارماهه و دوماهه نسبت به سایر مقیاس‌های زمانی دقت بالاتری دارند. در این دوره نیز، معادله (۲۴) (جدول ۴) با حداکثر ضریب تعیین ($R^2=0/89$) و حداقل ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE=0/14$) بهترین معادله انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی می‌باشد.

Table 4. Derived equations for the disturbed period

RMSE	R^2	Fitting equation	No	RMSE	R^2	Fitting equation	No
0.57	0.4	$SSI - 3 = -0.31 - 0.37SPI - 3$	13	0.32	0.73	$SSI - 1 = 0.69SPI - 1$	1
0.50	0.34	$SSI - 3 = -0.31 - 0.37SPI - 3 - 0.04SPI - 3^2$	14	0.30	0.77	$SSI - 1 = -0.18 + 0.81SPI - 1 + 0.33SPI - 1^2$	2
0.80	0.08	$SSI - 3 = \exp\left(-8.07 - \left(\frac{1.69}{SPI - 3 - 4.83}\right)\right)$	15	1E+09	0.03	$SSI - 1 = \exp\left(20.7 - \left(\frac{-0.94}{SPI - 1 - 23.41}\right)\right)$	3
0.53	0.48	$SSI - 3 = -1.44 + 0.65^{SPI-3}$	16	0.25	0.75	$SSI - 1 = -1.14 + 2.08^{SPI-1}$	4
0.38	0.61	$SSI - 3 = 0.33 \exp\left(\frac{SPI - 3}{1.11}\right) - 0.94 - 0.92SPI - 3$	17	0.32	0.77	$SSI - 1 = 204.2 \exp\left(\frac{SPI - 1}{107.88}\right) - 204.3 - 10.62SPI - 1$	5
0.44	0.64	$SSI - 3 = -0.55 - 0.85SPI - 3 + 0.1SPI - 3^2 + 0.13SPI - 3^3$	18	0.30	0.79	$SSI - 1 = -0.07 + SPI - 1 + 0.02SPI - 1^2 - 0.33SPI - 1^3$	6
0.20	0.77	$SSI - 4 = -0.2 + 0.43SPI - 4$	19	0.27	0.79	$SSI - 2 = -0.26 - 0.54SPI - 2$	7
0.19	0.77	$SSI - 4 = -0.16 + 0.42SPI - 4 - 0.04SPI - 4^2$	20	0.27	0.75	$SSI - 2 = -0.25 - 0.54SPI - 2 - 0.02SPI - 2^2$	8
0.47	0.03	$SSI - 4 = \exp\left(-15.61 - \left(\frac{44.71}{SPI - 4 + 142}\right)\right)$	21	0.57	0.02	$SSI - 2 = \exp\left(-8.38 - \left(\frac{0.74}{SPI - 2 - 5.27}\right)\right)$	9
0.25	0.72	$SSI - 4 = -1.28 + 1.49^{SPI-4}$	22	0.28	0.73	$SSI - 2 = -1.33 + 0.64 -^{SPI-2}$	10
0.25	0.75	$SSI - 4 = 272.5 \exp\left(\frac{SPI - 4}{46.49}\right) - 272.8 - 5.4SPI - 4$	23	0.27	0.75	$SSI - 2 = -285.9 \exp\left(\frac{SPI - 2}{54.54}\right) + 285.7 + 4.67SPI - 2$	11
0.14	0.89	$SSI - 4 = -0.19 + 0.8SPI - 4 - 0.05SPI - 4^2 - 0.25SPI - 4^3$	24	0.26	0.81	$SSI - 2 = -0.25 - 0.86SPI - 2 + 0.05SPI - 2^2 + 0.27SPI - 2^3$	12

۴. نتیجه‌گیری

تغییر در پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز متأثر از عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد که براساس شاخص‌های مختلف خشک‌سالی قابل ارزیابی است. احداث سد مخزنی یا مچپی بر روی رودخانه بالخلوچای تأثیر به‌سزایی

در رژیم جریان رودخانه داشته است. با توجه به این که کاهش بارش‌های جوی در سال‌های اخیر منابع محدود آب را تحت تأثیر قرار داده است، لذا بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی از دیدگاه هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های کلان مدیریت منابع آب نقش مهمی داشته باشد. در این پژوهش ضمن بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی رابطه انتشار آن دو مورد بررسی قرار گرفت. وجود نقطه تغییر در سری زمانی جریان رودخانه بالخلوچای بیانگر تأثیر فعالیت‌های انسانی بر رژیم جریان رودخانه است. لذا با تفکیک سری زمانی جریان به دو دوره قبل (طبیعی) و بعد (آشفته) از نقطه تغییر، ویژگی‌های خشک‌سالی در هر دو دوره بررسی شد. با وجود این که در دوره آشفته فراوانی ترسالی‌های هواشناسی بیش‌تر از خشک‌سالی‌ها بوده است، اما خشک‌سالی هیدرولوژیکی سهم بیش‌تر در این دوره داشته است. این موضوع تأثیر احداث و بهره‌برداری سد مخزنی یامچی را به‌خوبی بیان می‌کند. همچنین در دوره آشفته خشک‌سالی‌ها طولانی‌تر و دارای شدت بیش‌تری بوده است.

خشک‌سالی هیدرولوژیکی علاوه بر این که متأثر از تغییر در عوامل هواشناسی می‌باشد ممکن است تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی موجود در حوضه نیز قرار گیرد. با تشخیص رابطه انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی می‌توان مدیریت مناسبی برای مقابله با محدودیت منابع آب در دوره وقوع خشک‌سالی داشت. ضرایب همبستگی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دو دوره طبیعی و آشفته وجود رابطه معنی‌دار برای بیان انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی می‌باشد. معادلات درجه سوم استخراج‌شده برای هر دو دوره که از مقیاس‌های دو و چهار ماهه شاخص خشک‌سالی بهره می‌برد می‌تواند در انتشار خشک‌سالی هواشناسی به هیدرولوژیکی مفید باشد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Standardized Precipitation Index
2. Standardized Streamflow Index
3. Run theory
4. Pettitt
5. Kendall's τ

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Ashok, K. M., & Vijay, P. (2011). Drought modeling: A review. *Journal of Hydrology*, 403, 157-175 .
- Bae, H., Ji, H., Lim, Y. J., Ryu, Y., Kim, M. H., & Kim, B. J. (2019). Characteristics of drought propagation in South Korea: Relationship between meteorological, agricultural, and hydrological droughts. *Natural Hazards*, 99(1), 1-16 .
- Bevacqua, A. G., Chaffe, P. L., Chagas, V. B., & AghaKouchak, A. (2021). Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. *Journal of Hydrology*, 603, 126902 .
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). *Geoscientific model development discussions*, 7(1), 1525-1534 .
- Chang, J., Li, Y., Wang, Y., & Yuan, M. (2016). Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 540, 824-834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.064>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65 .

- Ding, Y., Xu, J., Wang, X., Cai, H., Zhou, Z., Sun, Y., & Shi, H. (2021). Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China. *Journal of Environmental Management*, 283, 111980.
- Fang, W., Huang, S., Huang, Q., Huang, G., Wang, H., Leng, G., & Wang, L. (2020). Identifying drought propagation by simultaneously considering linear and nonlinear dependence in the Wei River basin of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 591, 125287.
- Faraji, E. & Kanooni, A. (2020). Checking the accuracy of different methods of spatial analysis of monthly rainfall in Ardabil plain. In: The 5th National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, 17 June, University of Birjand, Birjand, Province Khorasan Jonoubi, IRAN,
- Guo, Y., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Fang, W., Wang, L., & Wang, H. (2020). Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels. *Science of the Total Environment*, 712, 136502.
- 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.
- Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., & Ma, L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *Journal of Hydrology*, 547, 184-195.
- Kiem, A., Johnson, F., Westra, S., & Dijk, A. and co authors. (2016). *Natural hazards in Australia: Droughts. Climatic Change*, 139(1), 37-54.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*,
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23, 881-897.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.
- Sattar, M. N., Lee, J. Y., Shin, J.-Y., & Kim, T. W. (2019). Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea. *Water Resources Management*, 33(7), 2439-2452.
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*, <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Shin, J. Y., Chen, S., Lee, J.-H., & Kim, T.-W. (2018). Investigation of drought propagation in South Korea using drought index and conditional probability. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 29(2).
- Wu, J., Chen, X., Yao, H., Gao, L., Chen, Y., & Liu, M. (2017). Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir. *Journal of Hydrology*, 551, 495-507.
- Xing, Z., Ma, M., Zhang, X., Leng, G., Su, Z., Lv, J., Yu, Z., & Yi, P. (2021). Altered drought propagation under the influence of reservoir regulation. *Journal of Hydrology*, 603, 127049.
- Yao, N., Zhao, H., Li, Y., Biswas, A., Feng, H., Liu, F., & Pulatov, B. (2020). National-scale variation and propagation characteristics of meteorological, agricultural, and hydrological droughts in China. *Remote Sensing*, 12(20), 3407.
- Yevjevich, V. M. (1967). Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. An Colorado State University. Libraries.
- Zhang, T., Su, X., Zhang, G., Wu, H., Wang, G., & Chu, J. (2022). Evaluation of the impacts of human activities on propagation from meteorological drought to hydrological drought in the Weihe River Basin, China. *Science of The Total Environment*, 819, 153030.
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. Retrieved from <https://library.wmo.int/records/item/51415-atlas-of-mortality-and-economic-losses-from-weather-climate-and-water-extremes-1970-2012>
- Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., & Armstrong, M. P. (1999). An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, 31(4), 375-390.