

Research Paper



Assessment of Meteorological and Hydrological Drought Situation Case Study: Sub-Basins in the Central Plateau Basin of Iran



Roya Ahmadi¹, Hoda Ghasemieh^{2*}, Reza Ghazavi³



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/hyd.2024.62269.1746

Reference to this article: Ahmadi, Roya Ghasemieh, Hoda; Ghazavi, Reza. (2024). Assessment of Meteorological and Hydrological Drought Situation Case Study: Sub-Basins in the Central Plateau Basin. Hydrogeomorphology, 10(35): 87 –114.

Keywords

SPI, SPEI, RDI, SSI
Central Plateau Basin
of Iran.

ABSTRACT

Drought is one of the most complex meteorological phenomena that can occur in most parts of the world; however, its impact is more pronounced in arid and semi-arid regions, making its study crucial for water resource management. In this research, the meteorological and hydrological drought status in the Qom-Kahak, Neyzar-Salafchegan, Marvdasht-Kharameh, and Beyza-Zarqan basins located in the Central Plateau basin was investigated using the SPI, SPEI, RDI, and SSI indices on 1-, 6- and 12-months timescales during the statistical period of 2004 to 2023. The results indicated that more than 95% of the study stations have experienced all conditions from very wet to very severe drought. SPI index on 1-month time scale in all study stations and SPEI index on 6-month time scale in 83.3% of stations and on 12-month time scale in 67.7% of stations showed drought more severely than other drought indices. Examination of the occurrence frequency for the SSI hydrological index classes on a 12-month timescale also showed that the highest drought classes were observed in Shadabad and Kharamah stations. The comparative analysis of meteorological and hydrological drought indices in each of the basins showed that showed that the highest cross-correlation between the SPI and SSI on a 12-month timescale was observed in Salafchegan and Qaleh Cham stations with a forward time lag of 12 months equal to 0.574, and the highest pearson correlation coefficient on a 12-month timescale was for Salafchegan-Qaleh Cham stations ($r = 0.309$ and $p\text{-value} = 0.001$).

Receive Date: 2024/07/04

Accept Date: 2024/09/16

Available: 2025/01/19

* Corresponding Author: Hoda Ghasemieh
E-mail: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

1. Ph. D Student of Watershed Management Engineering and Sciences, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: ahmadirooya@gmail.com
2. Associate Professor of Watershed Management Engineering and Sciences, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir
3. Professor of Watershed Management Engineering and Sciences, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: ghazavi@kashanu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Drought is one of the most complex meteorological phenomena that can occur in the most diverse regions of the world and is not confined to any particular area. However, its impact is more pronounced in arid and semi-arid regions (Sobhani et al., 2019: 181; Timouri et al., 2022: 17; Hosseini Saddiq and Jalali, 2024: 95;). From an evolutionary perspective, drought encompasses various types of meteorological, hydrological, agricultural, and socioeconomic droughts, all of which are influenced by various factors within the water cycle (Das et al., 2022: 2483). Meteorological drought refers to a prolonged period of below-average precipitation. If this type of drought persists, it can lead to hydrological and agricultural droughts (Janbozorgi et al., 2021: 2) and during hydrological drought, the quantity and quality of river water decreases (Parchemi et al., 2022: 21). Extensive research has been conducted both domestically and internationally on various types of droughts, particularly meteorological and hydrological droughts. This is because drought has emerged as a significant challenge for managers in global community (Novidtalab et al., 2020: 107) and has even become a permanent feature of Iran's climate in recent years (Masoompour Samakosh et al., 2024: 82). The current study aims to investigate the meteorological and hydrological drought status in some arid and semi-arid sub-basins within the Central Plateau Basin.

Methodology

To achieve the study objectives, precipitation, temperature, evapotranspiration, and streamflow data from synoptic and hydrometric stations located in the Qom-Kahak, Neyzar-Salafchegan, Marvdasht-Kharameh, and Beyza-Zarqan basins were utilized to compute the SPI, SPEI, RDI, and SSI indices on 1-, 6-, and 12-month timescales during the statistical period 2004 to 2023. The DrinC software packages, and the R programming language were employed to calculate these indices, and Excel software was used to generate corresponding graphs. Also, to investigate the temporal relationship between meteorological and hydrological drought indicators, Pearson and Cross correlations were used.

Results and Discussion

The analysis results of the SPI, SPEI, RDI, and SSI index values at the study stations revealed that over 95% of the meteorological and hydrometric stations within the study basins have experienced all conditions ranging from very severe wet to very severe drought. Examination of the maximum and minimum values of the SPI, SPEI, and RDI drought indices indicated that on a 1-month timescale, the SPEI index depicted wet conditions with more intensity and the SPI index depicted more severe drought conditions among the maximum and minimum values across all stations. On a 12-month timescale, the SPI index estimated more severe wet conditions and the SPEI index estimated more severe drought conditions in the stations of Qom, Kahak, and Takht-e-Jamshid. On a 6-month timescale, the SPEI index captured the most severe drought in all the stations except for Zarqan, whereas, within the same timescale, the most severe wet conditions in the three stations of Qom, Salafchegan, and Zarqan were represented by the SPI index and in the stations of Kahak, Dorudzan, and Takht-e-Jamshid, by the RDI index. Therefore, it can be concluded that the SPI index on a 1-month timescale in all stations within the study basins and the SPEI index on a 6-month timescale in 83.3% of the stations and on a 12-month timescale in 67.7% of the stations indicated drought with greater severity compared to the other drought indices. Examination results of the minimum values for the SSI drought index revealed that the minimum SSI index values were observed in Pol Khan station on a 1- and 6- month timescales, and in Shadabad station on a 12-month timescale.

The results regarding the occurrence frequency of meteorological drought class types for the investigated timescales during the statistical period also indicated that for all indices and study meteorological stations (except for Kahak station in the two indices of SPI and RDI) on 12-month timescale, the occurrence frequency of drought classes is higher than the occurrence frequency of wet classes. Additionally, for all indices and all stations (except Zarqan), the occurrence frequency of the moderate drought class is higher than that of severe and extreme drought classes. Other findings obtained from the calculation of meteorological drought indices

on a 12-month time scale indicate that the highest frequency of drought classes occur in Droodzen and Takht-e-Jamshid meteorological stations (located in the Morvdasht-Kharameh basin) and the lowest frequency of drought classes has been observed in Qom and Kahak stations (located in the Qom-Kahak basin). The results of examining the occurrence frequency of SSI hydrological index classes on a 12-month timescale during the considered statistical period revealed that drought classes are more prevalent in Shadabad and Kharamah stations than in other study stations. The hydrometric station of Pol Khan has also experienced more wet conditions than drought conditions. Additionally, in all study hydrometric stations, the occurrence frequency of severe wet was found to be higher than that of other wet classes.

The results obtained from plotting each meteorological and hydrological drought index for 1-, 6-, and 12-month timescales at all study stations indicate that the duration of wet and dry periods is longer on a 12-month timescale, and the identification and separation of periods are better. Furthermore, the beginning and end of drought and wet periods are more consistent across all meteorological drought indices on a 12-month timescale. Yan-Jun et al. (2012) also examined the evolutionary trend of SPI drought in Haihe River and concluded that drought severity increases on long-term timescales.

The compliance results of the meteorological drought indices SPI, SPEI, and RDI with SSI hydrological drought in the meteorological and hydrometric stations of each basin showed that, in general, the trends of the meteorological and hydrological drought indices were consistent with each other, and streamflow fluctuations were influenced by the amount of precipitation and evapotranspiration, such that with a decrease or increase in these two parameters, streamflow also decreased or increased. Additionally, the highest cross-correlation between the SPI and SSI indices on the 12-month timescale was observed in Salafchegan and Qaleh Cham stations with a forward (positive) time lag of 12 months, equal to 0.574. The highest Pearson correlation coefficient on the 1-month timescale was observed in the Takht-e-Jamshid and Kharamah stations ($r = 0.041$ and $p\text{-value} = 0.529$), on the 6-month timescale in Salafchegan-Qaleh Cham stations ($r = 0.152$ and $p\text{-value} = 0.023$), and on the 12-month timescale in Salafchegan-Qaleh Cham stations ($r = 0.309$ and $p\text{-value} = 0.001$). Other findings also indicated that only between the SPI and SSI drought indices in the Salafchegan and Qaleh Cham stations on 6- and 12-month timescales, there was a significant correlation at the 5% and 1% levels, respectively.

Conclusions

Based on the obtained results, drought is a natural disaster that gradually develops over a long period. Meteorological drought initially occurs due to long-term decreases in precipitation amount, and if it persists, hydrological drought occurs, leading to a decline in surface and groundwater levels. According to the conducted investigations, all meteorological and hydrometric stations located in the study basins have experienced alternating periods of wet and dry conditions during the statistical period from 2004 to 2023; so that, On a 12-month timescale, the end of the last wet period in all meteorological stations except Takht-e-Jamshid and Zarqan was in late 2021, and currently, the stations of Qom, Kahak, Salafchegan, and Dorudzan have been experiencing a drought period since 2021. Examination of wet and dry periods on a 12-month timescale in the hydrometric stations of the study basins also indicates that all hydrometric stations are currently experiencing a wet period, highlighting the delayed impact of meteorological drought on hydrological drought.

References

- Das, S., Das, J., & Umamahesh, N.V., (2023). A non-stationary based approach to understand the propagation of meteorological to agricultural droughts. *Water Resources Management*, 37, 2483-2504.
- Hosseini Seddigh, S.M., & Jalali, M. (2024). Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's Self-Adjustment Index. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 2 (1):93-106.
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. 1400. Temporal changes of meteorological-hydrological drought (Case study: Gilan province). *Journal of Water and Soil Management and Modeling*, 1 (2): 1-13.

- Masoompour Samakosh, J., Miri, M., & Rezaei, S. (2024). Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) of Iran based on multivariable standardized drought index. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4 (1), 82-98.
- Navidtalab, A., Askari, Gh., Ahmadpour, F., & Tahmasebi, M. (2020). Drought evaluation of a thirty-year period (1988–2017) in Lorestan province using the Percent of Normal precipitation Index (PNI). *Hydrogeomorphology*, 7 (24), 107-125.
- Parchami, N., Mostafazadeh, R., Esmaili Ouri, A., & Imani, R. 2023. Spatial variations of hydrological drought in different time scales in the rivers of Ardabil province. *Hydrogeomorphology*, 33 (10): 21-36.
- Sobhani, B., Jafarzadehaliabad, L., & Safarianzengir, V., (2020). Modelling, Analysis, and Prediction of Drought Phenomenon in Iran. *Hydrogeomorphology*, 6 (21): 181-202.
- Teimouri, M., Gholami, V., Khaleghi, M.R., 2023. Assessment of drought impacts on rainfed wheat yield using SPI and Agricultural- SPI indices (Case study: North Khorasan province). *Journal of Agricultural Meteorology*, 10 (2): 17-27.



مقاله پژوهشی



ارزیابی وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مطالعه موردی: زیرحوضه‌هایی از حوضه آبریز فلات مرکزی ایران



رویا احمدی^۱، هدی قاسمیه^{۲*}، رضا قضاوی^۳



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت‌یو کامانز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: احمدی، رویا؛ قاسمیه هدی ؛ قضاوی، رضا (۱۴۰۳). ارزیابی وضعیت خشکسالی و هیدرولوژیکی مطالعه موردی: زیرحوضه‌هایی از حوضه آبریز فلات مرکزی. ۱۱ (۴۱): ۸۷-۱۱۴
هواشناسی

DOI:10.22034/hyd.2024.62269.1746



چکیده

خشکسالی، یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های آب و هوایی است که می‌تواند در اکثر مناطق جهان رخ دهد؛ اما تأثیر آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر است و بررسی آن، در مدیریت منابع آب بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه‌های قم- کهک، نيزار- سلفچگان، مرودشت- خرامه و بیضا- زرقان واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی با استفاده از شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه طی دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بیش از ۹۵ درصد ایستگاه‌های مطالعاتی، تمامی وضعیت‌های ترسالی بسیار شدید تا خشکسالی بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱ ماهه در کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی و شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۶ ماهه در ۸۳/۳ درصد ایستگاه‌ها و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ۶۷/۷ درصد ایستگاه‌ها، خشکسالی را با شدت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی نشان داده است. بررسی فراوانی وقوع طبقات شاخص هیدرولوژیکی SSI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه نشان داد که بیشترین طبقات خشکسالی در ایستگاه‌های شادآباد و خرامه مشاهده شده است. بررسی انطباقی مقادیر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در هر یک از حوضه‌ها نشان داد که بیشترین همبستگی متقاطع بین SPI و SSI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سلفچگان و قلعه‌چم در تأخیر زمانی رو به جلو به اندازه گام زمانی ۱۲ ماه برابر ۰/۵۷۴ و بیشترین مقدار همبستگی پیرسون در گام زمانی ۱۲ ماهه مربوط به ایستگاه سلفچگان- قلعه‌چم ($r = 0/309$) و $p\text{-value} = 0/001$ است.

کلیدواژه‌ها

SSI, RDI, SPEI, SPI
حوضه آبریز فلات مرکزی
ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

* نویسنده مسئول: هدی قاسمیه

رایانامه: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری تخصصی رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲. دانشیار رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳. استاد رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

خشکسالی^۱، یک بحران طبیعی و ناهنجاری اقلیمی دوره‌ای است که در اثر به هم خوردن اجزای بیلان آب در یک دوره زمانی طولانی مدت و با اثرات گسترده به وقوع می‌پیوندد (لی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۱؛ عبادی نهاری و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۴۳). وقوع انواع خشکسالی متأثر از تغییرات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی، مدیریت منابع آب موجود را با مشکل مواجه می‌کند (فرجی عموقین و همکاران، ۱۴۰۳: ۱). خشکسالی، یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های آب‌وهوایی است که می‌تواند در اکثر مناطق جهان رخ دهد و مختص ناحیه‌ای خاص نیست، اما تأثیر آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر است (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۸۱؛ تیموری و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۷؛ حسینی صدیق و جلالی، ۱۴۰۳: ۹۵). انجمن هواشناسی آمریکا، خشکسالی را یک فعل و انفعال پیچیده بین کمبود بارش و افزایش تبخیر و تعرق در یک بازه زمانی طولانی و بهره‌برداری نامناسب و زیاد از منابع آبی و نیز شیوه نادرست توزیع و مصرف آب تعریف می‌نماید (میلر و فاکس^۴، ۲۰۱۷: ۳۶). از آن‌جا که پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی در آینده متأثر از افزایش رخدادهای شدید است، بروز خشکسالی به صورت بالقوه در آینده زیاد خواهد شد (چان^۵ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱). خشکسالی آن هم به صورت مکرر، اثرات قابل توجهی از نظر اقتصادی و اجتماعی بر اکوسیستم منطقه می‌گذارد (لی^۶ و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). بنابراین بررسی وضعیت خشکسالی در مناطق مختلف جهان به منظور جلوگیری از وقایع مخرب متأثر از آن و نیز خسارات مالی و جانی، بسیار حائز اهمیت است.

پدیده خشکسالی با توجه به دیدگاه تکاملی آن نسبت به فاکتورهای مختلف چرخه آب، شامل انواع خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی است (داس^۷ و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۴۸۳). پدیده خشکسالی هواشناسی به کمبود بارش در یک دوره زمانی بلندمدت گفته می‌شود. این نوع خشکسالی در صورت تداوم، منجر به خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی می‌شود (جان‌بزرگی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲) و در زمان وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی، کمیت و کیفیت آب رودخانه‌ها کم می‌شود (پرچمی و همکاران، ۱۴۰۱: ۲۱). پژوهش‌های متعددی در خارج و داخل کشور در زمینه انواع خشکسالی‌ها به‌ویژه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی صورت گرفته است؛ چرا که در حال حاضر، خشکسالی به یک چالش جدی برای مدیران در جامعه جهانی تبدیل شده (نویدطلب و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۷) و حتی در سال‌های اخیر در ایران، به یکی از پدیده‌های همیشگی اقلیم تبدیل شده است (معصوم‌پور سماکوش و همکاران، ۱۴۰۳: ۸۲). به عنوان مثال، لی و همکاران (۲۰۲۰: ۵۸۶) به بررسی شاخص‌های SPI^۸، SSI^۹ و SRI^{۱۰} در حوضه آبخیز رودخانه یلو (زرد)^۱ چین پرداختند. نتایج این مطالعه، بیان‌گر همبستگی مثبت و قوی بین این شاخص‌ها بود. گموس^۲ (۲۰۲۳) نیز به ارزیابی تأثیر شاخص‌های SPI و SPEI^۳ در هفت منطقه جغرافیایی ترکیه پرداخت. وی برای این منظور، از داده‌های هواشناسی بین سال‌های ۱۹۷۰ و ۲۰۲۱ برای ۱۹۹ ایستگاه استفاده نمود. نتایج پژوهش وی حاکی از این است که SPEI، درصد وقوع بالاتری از خشکسالی‌های متوسط و شدید را در تمام مناطق جغرافیایی با افزایش تا ۱۵ درصد نسبت به SPI شناسایی کرد، در حالی که SPI درصد بیشتری از خشکسالی‌های شدید را نشان داد. وو^۴ و همکاران (۲۰۲۴: ۱) طی تحقیقی در محدوده رودخانه‌های یلو (زرد)، یانگ‌تسه^۵ و لانگانگ^۶، اثرات تغییر رژیم آب و هواشناسی را بر روابط انتشار و آستانه از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی بررسی نمودند. ایشان بدین منظور، دوره‌های تغییر رژیم را با استفاده از آزمون منحنی رتبه اختلاف تجمعی^۷ (زوی بارش و جریان رودخانه در مقیاس زمانی سالانه شناسایی نمودند و به منظور تعیین زمان پاسخ خشکسالی هیدرولوژیکی SSI به خشکسالی هواشناسی SPI از ضریب همبستگی پیرسون^۸ استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که حساسیت پاسخ SSI به SPI و احتمالات و آستانه انتشار از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی بین دوره‌های روند افزایشی و کاهشی متغیرهای آب‌وهواشناسی متفاوت است. هنگامی که ویژگی‌های تغییر رژیم در نظر گرفته شد، آستانه خشکسالی هواشناسی که به خشکسالی هیدرولوژیکی انتشار می‌یابد؛ ۲/۸۱

1. Drought

2. Li

3. Wang

4. Miller & Fox

5. Chan

6. Li

7. Das

8. SPI: Standardized Streamflow Index

9. SSI: Standardized Precipitation Index

10. SRI: Standardized Runoff Index

1. Yellow river

1. Gumus

1. SPEI: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

1. Wu 4

1. Tangtze 5

1. Lancang 6

1. Cumulative difference curve-rank test

1. Pearson Correlation Coefficient

درصد تا ۱۶/۹۰ درصد بیشتر بود. این نتایج نشان داد که هنگام بررسی روابط و آستانه‌های انتشار خشکسالی براساس دیاگرام سانکی؛ در نظر گرفتن متغیرهای هواشناسی در محاسبه تغییرات رژیم می‌تواند هشدار اولیه خشکسالی را بهبود بخشد و تلاش‌های کنترل و کاهش خشکسالی را افزایش دهد. در پژوهشی دیگر ژانگ و همکاران (۲۰۲۴: ۱)، به بررسی خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی با استفاده از شاخص‌های SPI، SPEI، SSI و SWI تحت تأثیر تغییر اقلیم با به‌کارگیری مدل SWAT و سناریوهای RCP پرداختند. یافته‌های پژوهش ایشان نشان داد که طی سال‌های آینده ۲۰۲۳-۲۰۹۹ برای ۴ شاخص، احتمال خشکسالی خفیف به میزان ۲۶/۱۵ تا ۴۱/۰۶ درصد افزایش یافته و دوره بازگشت از ۳/۸ به ۲/۴ سال تغییر کرده است. همچنین احتمال مشترک خشکسالی متوسط (هواشناسی- هیدرولوژیکی، هواشناسی- کشاورزی، هیدرولوژیکی- کشاورزی)، بین ۳/۷۶ تا ۱۴/۱۱ درصد و دوره بازگشت، ۷ تا ۲۶/۶ سال به دست آمد. پژوهش‌گران مختلفی در داخل کشور نیز به بررسی و مطالعه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و میزان تطابق آن‌ها پرداخته‌اند. به عنوان مثال، جهانگیر و موسوی رینه (۱۳۹۹: ۱) به مقایسه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و هیدرولوژیک SSI در استان تهران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این دو شاخص، کاملاً بر هم منطبق هستند و منابع آب سطحی در استان تهران به شدت از بارش تأثیرپذیر است. سلیمی و همکاران (۲۰۲۱: ۲)، به مطالعه وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های SPI، SPEI و SSI در حوضه‌های آبخیز ليقوان، ناورود و سقز پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که این شاخص‌ها از همبستگی بالایی برخوردار هستند. جهانگیر و همکاران (۱۴۰۱: ۵۴)، به مطالعه تطبیقی شاخص‌های SPI و SSI براساس بهترین تابع توزیع تجمعی در ارومیه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این دو شاخص با یکدیگر، رابطه مستقیم دارند و شاخص SPI برای پیش‌بینی شروع خشکسالی و شاخص SSI برای سنجش تداوم و شدت خشکسالی مناسب هستند. پورالخاص نوکنده‌یی و همکاران (۱۴۰۳: ۷۴۹۹) نیز با استفاده از شاخص‌های SPI، RDI، PNPI و SWSI به ارزیابی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که شاخص SPI برای پایش خشکسالی هواشناسی، شاخص مناسب‌تری نسبت به سایر شاخص‌ها است؛ شاخص RDI نسبت به سایر شاخص‌ها به تغییرات اقلیمی حساس‌تر است و شاخص PNPI به علت خطاهای زیاد، شاخص مناسبی برای ارزیابی نیست. شاخص SWSI نیز کارایی مناسبی دارد.

با توجه به مباحث مطرح شده می‌توان در جمع‌بندی سوابق پژوهشی مذکور بیان نمود که شاخص‌های متعددی برای بررسی وضعیت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مناطق مختلف جهان استفاده شده است و هر کدام از این شاخص‌ها، دارای کارایی متفاوتی بوده‌اند. همچنین مقایسه تطبیقی بین انواع شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حاکی از این است که در برخی مناطق مطالعاتی، میان این دو نوع شاخص رابطه و همبستگی معنی‌دار وجود دارد و خشکسالی هواشناسی، مقدمه‌ای بر خشکسالی هیدرولوژیکی بوده است و در بعضی مناطق دیگر، رابطه معنی‌داری بین این دو نوع خشکسالی یافت نشده و ممکن است خشکسالی هیدرولوژیکی از خشکسالی هواشناسی پیروی نکند. در بعضی مطالعات نیز، روابط و آستانه انتشار خشکسالی به منظور تعیین زمان پاسخ خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی وضعیت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در مناطق مختلف جهان به‌ویژه در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک بسیار حائز اهمیت است و کمک شایانی در اختصاص منابع آب به انواع کاربری‌ها از جمله کاربری‌های کشاورزی، شرب و شهری، صنعت، خدمات و غیره می‌کند.

در این تحقیق نیز تلاش می‌گردد وضعیت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به صورت هم‌زمان در بعضی زیرحوضه‌های واقع در دو حوضه آبریز دریاچه نمک و طشک- بختگان و مهارلو ارزیابی گردد. زیرحوضه‌های منتخب مطالعاتی در این پژوهش، شامل زیرحوضه‌های قم- کهک، نیزار- سلفچگان، مروشد- خرامه و بیضا- زرقان هستند که با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک حاکم بر این زیرحوضه‌ها و میزان نزولات جوی طی سال‌های اخیر، از اهمیت بالایی برای ارزیابی وضعیت خشکسالی و به تبع آن مدیریت جامع منابع آب برخوردار هستند. بدین منظور در این تحقیق، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI، SPEI و RDI و نیز هیدرولوژیکی SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه (کوتاه مدت و میان مدت) طی یک دوره مشترک آماری ۲۰۲۳-۲۰۰۴ برای ایستگاه‌های سینوپتیک

¹. Sankey Diagram

². Zhang

و هیدرومتری موجود در مناطق مطالعاتی محاسبه و ارزیابی می‌شوند. پس از ارزیابی مقادیر شاخص‌ها و نیز بررسی فراوانی وقوع طبقات هر کدام از شاخص‌های خشکسالی، مقایسه تطبیقی بین شاخص خشکسالی هواشناسی منتخب و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی صورت می‌گیرد تا ارتباط یا عدم ارتباط زمانی بین این دو نوع شاخص و به عبارت دیگر، زمان پاسخ خشکسالی هیدرولوژیکی به خشکسالی هواشناسی در مناطق مطالعاتی به منظور مدیریت بین میزان آب ورودی و خروجی (نزولات جوی و بهره‌برداری از منابع آب) مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

مناطق مورد مطالعه در تحقیق حاضر، حوضه‌های دریاچه نمک و طشک- بختگان و مهارلو با اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع در حوضه آبریز درجه ۱ فلات مرکزی ایران است. حوضه دریاچه نمک در مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی با وسعتی معادل ۹۲۸۸۴/۲ کیلومترمربع و حوضه طشک- بختگان و مهارلو در مختصات جغرافیایی ۲۹ تا ۳۱ درجه عرض شمالی و ۵۱ تا ۵۴ درجه طول شرقی با وسعتی برابر ۳۱۴۵۱/۹ کیلومترمربع در فلات ایران مرکزی واقع شده‌اند. رودخانه‌های اصلی حوضه دریاچه نمک شامل قمرود، قره‌چای و جاجرود و رودخانه اصلی حوضه طشک- بختگان و مهارلو، رود کر است. رژیم بارش در هر دو حوضه، مدیترانه‌ای و متوسط بارش سالانه کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در جنوب و شرق و در ارتفاعات تا ۸۰۰ میلی‌متر است. برای انجام پژوهش حاضر، زیرحوضه‌های قم- کهک و نیزار- سلفچگان از حوضه دریاچه نمک و زیرحوضه‌های بیضا- زرقان و مروشد- خرامه از حوضه طشک- بختگان و مهارلو انتخاب شده‌اند. مساحت زیرحوضه‌های قم- کهک، نیزار- سلفچگان، بیضا- زرقان و مروشد- خرامه به ترتیب برابر ۱۸۴۲/۹، ۳۶۶۵/۵، ۱۷۲۷/۵ و ۳۹۲۶/۱ کیلومترمربع است. شایان ذکر است که شیپ‌فایل^۱ زیرحوضه‌های مطالعاتی از پورتال ارائه آمار پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران (تماب)^۲ دریافت و مختصات جغرافیایی و مساحت آن‌ها در نرم‌افزار Arc-GIS استخراج گردیده است. همچنین شیپ‌فایل آبراهه‌ها و رودخانه‌های موجود در زیرحوضه‌های مطالعاتی نیز از طریق شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت‌های آب منطقه‌ای استان اصفهان و شیراز تهیه شده است. در شکل (۱)، موقعیت مناطق مطالعاتی در حوضه آبریز فلات مرکزی و کشور ایران نشان داده شده است.

روش تحقیق

جمع‌آوری داده و اطلاعات پایه

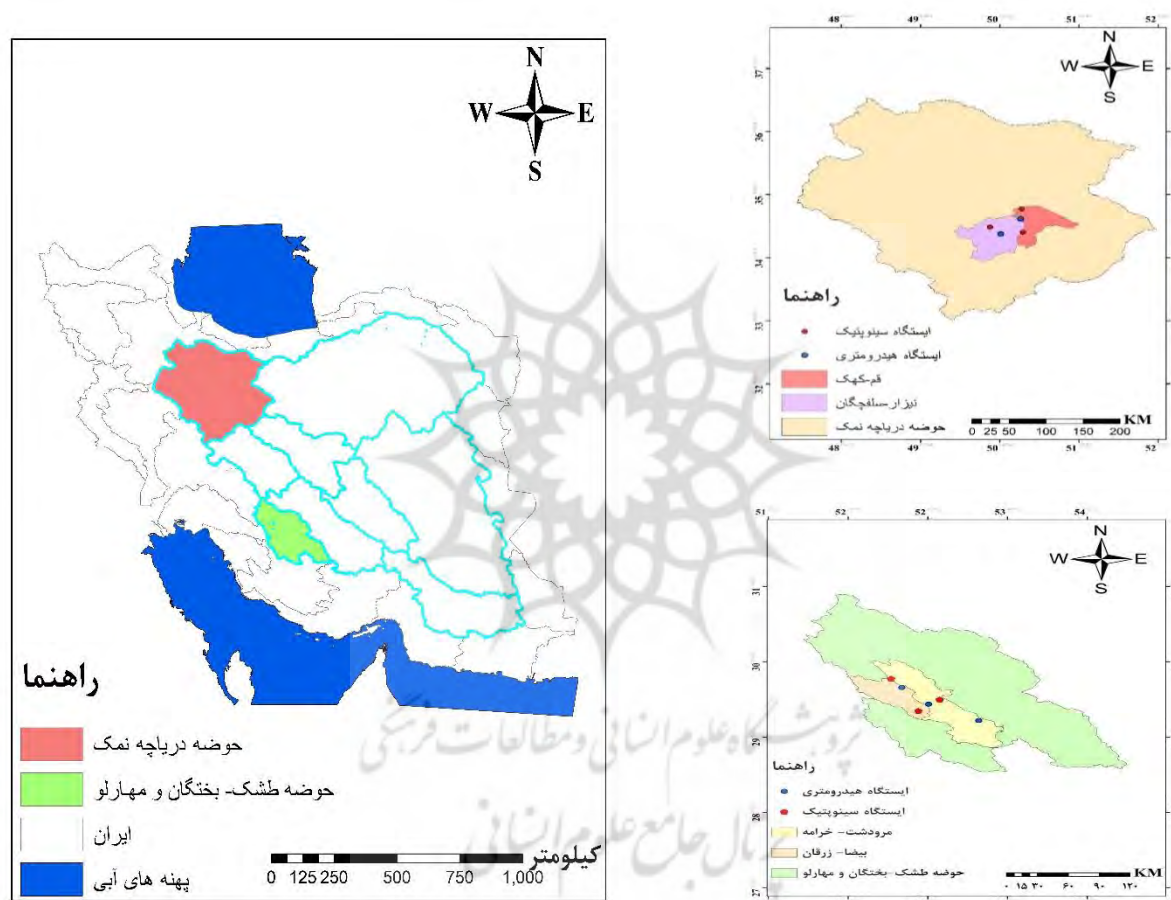
در این تحقیق به منظور بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز مطالعاتی، به داده‌های ماهانه بارش، دام و تبخیر و تعرق ایستگاه‌های سینوپتیک قم، کهک، سلفچگان، درودزن، تخت جمشید و زرقان و نیز دبی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری شادآباد، قلعه‌چم، پل‌خان و خرامه نیاز است. لذا بدین منظور، داده‌های هواشناسی مذکور در مقیاس زمانی ماهانه برای کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی از سایت درخواست آمار مربوط به سازمان هواشناسی کل کشور^۳ و داده‌های دبی در مقیاس روزانه از طریق پورتال ارائه آمار پایه مربوط به شرکت مدیریت منابع آب ایران طی سال‌های آماری مشترک ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ تهیه شدند. آن‌گاه میانگین ماهانه دبی برای هر ایستگاه هیدرومتری همانند داده‌های هواشناسی بارش و تبخیر و تعرق براساس ماه‌های میلادی به دست آمدند. از جمله دلایل استفاده از این دوره آماری، فقدان داده‌های هواشناسی و هیدرومتری هم‌زمان طولانی‌تر در کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری مناطق مطالعاتی بود؛ به گونه‌ای که اولاً سال تأسیس ایستگاه‌ها متفاوت بود، ثانیاً داده‌های اولیه مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک و

^۱. Shapefile

^۲.
https://stu.wrm.ir/tbl_amarrequests_add.asp

^۳. <https://Data.irimo.ir>

هیدرومتری در این محدوده مطالعاتی در بعضی ماه‌ها و سال‌ها دارای نواقص آماری بودند. لذا سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ که کلیه ایستگاه‌های مورد بررسی دارای اطلاعات جامع و کاملی بود، به‌عنوان دوره مشترک آماری در نظر گرفته شد. در ادامه پس از محاسبه میانگین بارش و دمای سالانه هر کدام از ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره آماری مذکور، شاخص خشکی دومارتن^۱ برای هر کدام از ایستگاه‌ها محاسبه گردید و به تبع آن، نوع اقلیم هر ایستگاه براساس طبقه‌بندی دومارتن به‌دست آمد (مزیدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۹ و ۴۰). جدول (۱)، مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک شامل ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، میانگین بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه، ضریب خشکی دومارتن و طبقه اقلیمی هر کدام از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نیز، مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت زیرحوضه‌های مطالعاتی در حوضه آبریز فلات مرکزی
Figure (1): The location of study sub-basins in the Central Plateau basin

¹. De Martonne Aridity Index

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در زیرحوضه‌های مطالعاتی
Table (1): Characteristics of synoptic stations located in studied sub-basins

زیر حوضه	ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (m)	طول جغرافیایی			عرض جغرافیایی			میانگین بارندگی سالانه (mm)	میانگین دمای سالانه (°C)	ضریب دومارتن	طبقه اقلیمی
			درجه- دقیقه- ثانیه			درجه- دقیقه- ثانیه						
قم- کهک	قم	۸۷۹/۱	۱۷"	۵۱'	۵۰°	۲۸"	۴۶'	۳۴°	۱۳۵	۱۹/۰۵	۴/۶۶	خشک
	کهک	۱۴۰۳	۸"	۵۲'	۵۰°	۱۳"	۲۴'	۳۴°	۱۵۷	۱۷/۰۸	۵/۸۱	خشک
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۱۳۸۱/۴	۹"	۲۸'	۵۰°	۳"	۲۹'	۳۴°	۱۶۹	۱۷/۴۵	۶/۱۵	خشک
مرودشت- خرامه	درودزن	۱۶۴۲	۵۵"	۲۷'	۵۲°	۵۹"	۱۰'	۳۰°	۳۹۹	۱۷/۷۹	۱۴/۳۷	نیمه‌خشک
	تخت‌جمشید	۱۶۰۵	۲۳"	۵۳'	۵۰°	۱۲"	۵۵'	۲۹°	۲۷۵	۱۷/۸۰	۹/۹۰	خشک
	زرقان	۱۵۹۶	۱۴"	۴۲'	۵۲°	۴۱"	۴۶'	۲۹°	۲۶۳	۱۷/۲۶	۹/۶۴	خشک

جدول (۲): مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در زیرحوضه‌های مطالعاتی
Table (2): Characteristics of hydrometric stations located in studied sub-basins

زیرحوضه	نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (m)	طول جغرافیایی (درجه - دقیقه - ثانیه)			عرض جغرافیایی (درجه - دقیقه - ثانیه)		
نیزار - سلفچگان	شادآباد	۱۰۰۰	۵۶"	۴۶'	۵۰°	۱۵"	۳۴'	۳۴°
	قلعه‌چم	۱۲۰۳	۵۵"	۳۶'	۵۰°	۳۰"	۲۲'	۳۴°
مرودشت - خرامه	پل‌خان	۱۶۰۳	۱۰"	۴۶'	۵۰°	۰۱"	۵۱'	۲۹°
	خرامه	۱۵۷۱	۰۹"	۲۰'	۵۳°	۰۰"	۳۴'	۲۹°

محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

در این مرحله، وضعیت خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی SPI، RDI و SPEI برای ایستگاه‌های سینوپتیک مد نظر با استفاده از نرم‌افزارهای DrinC و بسته نرم‌افزار R و وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SSI برای ایستگاه‌های هیدرومتری مذکور در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ و با استفاده از نرم‌افزار DrinC به‌دست آمدند (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۴۲؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۳۵؛ سرائی تبریزی و بارز، ۱۴۰۲: ۱۸۲؛ آلمو^۱ و همکاران، ۲۰۲۴: ۷). شایان ذکر است که بسته نرم‌افزار DrinC توسط دانشگاه ملی فن آتن با مرکزیت ارزیابی مخاطرات طبیعی و برنامه‌ریزی فعال و آزمایش کارهای بازسازی و مدیریت منابع آبی در سال ۲۰۱۳ تهیه شده است. ورودی‌های این نرم‌افزار، داده‌های متوسط جریان، بارش، دما و تبخیر و تعرق ماهانه بوده و از جمله خروجی‌های آن، مقادیر SPI، RDI و SDI است (سرائی تبریزی و بارز، ۱۴۰۲: ۱۸۲).

- شاخص SPI

شاخص SPI، یک ابزار قوی برای تحلیل داده‌های بارندگی و اندازه‌گیری خشکسالی در مقیاس‌های زمانی گوناگون است که با استفاده از رابطه (۱) به‌دست می‌آید (مک‌کی^۳ و همکاران، ۱۹۹۳: ۱۸۱؛ جوان، ۱۳۹۹: ۱۲۴).

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (1)$$

که در این رابطه، SPI شاخص بارش استاندارد شده، P_i مقادیر بارندگی در زمان i ، $\bar{P}$ میانگین بارندگی طولانی مدت و SD انحراف معیار بارندگی در طول دوره آماری است (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳: ۱۸۱؛ ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۷؛ جوان، ۱۳۹۹: ۱۲۴).

¹. Alemu

2. RDI: Reconnaissance Drought Index

³. McKee

محاسبه شاخص SPI، مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب به سری داده‌های بارندگی در هر مقیاس زمانی دلخواه در هر ایستگاه است. بسیاری از پژوهش‌گران از جمله مک‌کی و همکاران، توزیع گاما^۱ را پیشنهاد داده‌اند که از رابطه‌های (۲) تا (۶) قابل محاسبه است (کاراتایو^۲ و همکاران، ۲۰۲۲: ۳). بسیاری از برنامه‌ها و نرم‌افزارها مانند DIP، DrinC و R نیز برای محاسبه این شاخص، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهانه یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن را محاسبه نموده و سپس با انتقال احتمال تجمعی به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر شاخص SPI را محاسبه می‌کنند (مساعدی و قبائی سوق، ۱۳۹۰: ۱۲۰۹؛ ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۴: شاه^۳ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۲۴۶).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{for } x > 0 \quad (2)$$

$$\tau(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} \cdot e^{-y} \cdot dy \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad A = \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad \beta = \frac{x}{a} \quad (4)$$

که در این رابطه، $g(x)$ تابع چگالی احتمال، $\alpha > 0$ پارامتر شکل، $\beta > 0$ پارامتر مقیاس، $x > 0$ مقدار بارندگی، $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما و n تعداد مشاهده‌ها هستند کاراتایو و همکاران، ۲۰۲۲: ۳.

– شاخص RDI

شاخص RDI، اولین بار توسط ساکاریس و انگلیس^۴ (۲۰۰۵) برای ناحیه مدیترانه پیشنهاد شد. به منظور محاسبه این شاخص ابتدا با استفاده از نسبت بارندگی P به تبخیر و تعرق پتانسیل، PET مقادیر اولیه a_0^i برای زمان‌های دلخواه براساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$a_0^i = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{i,j}} \quad i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, 12 \quad (5)$$

که در این رابطه، P_i باران و $PET_{i,j}$ تبخیر و تعرق پتانسیل ماه j ام از سال i ام و N تعداد سال‌های آماری است. روش پیشنهادی محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش تورنت وایت است (ساکاریس و انگلیس، ۲۰۰۵: ۸؛ ساکاریس و همکاران، ۲۰۰۷: ۸۲۳). در مرحله دوم، RDI نرمال شده (RDI_n) به وسیله مقادیر a_0^i مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$RDI_n^i = \frac{a_0^i}{\bar{a}_0} - 1 \quad (6)$$

که در این رابطه، $\bar{a}_0$ میانگین حسابی مقادیر a_0^i در سال‌های مورد بررسی است که برابر است با نسبت شاخص خشکسالی ارائه شده توسط فائو^۵ (FAO). مرحله سوم محاسبه این شاخص، مقادیر استاندارد شده (RDI_{st}) است که در آن فرض بر این است که a_0^i از توزیع لوگ نرمال پیروی می‌کند (رابطه ۵).

$$RDI_{st}^i = \frac{y_i - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (7)$$

در این رابطه، $\ln a_0^i = y_i$ ، $\bar{y}$ میانگین حسابی و $\hat{\sigma}_y$ انحراف معیار y_i هستند (ساکاریس و همکاران، ۲۰۰۷: ۸۲۳).

– شاخص SPEI

شاخص SPEI، شاخص بارش استاندارد شده بارش و تبخیر و تعرق است که اولین بار توسط وینسته‌سرانو^۶ (۲۰۰۶) پیشنهاد شده است. این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب استفاده می‌کند که به شرح زیر است (وینسته‌سرانو و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۷۰۲؛ وینسته‌سرانو و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۰).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (8)$$

1. Gamma distribution

2. Karatayev

3. Shah

4. Tsakiris & Vangelis

5. FAO: Food and Agriculture Organization

6. Lognormal distribution

7. Vicente-Serrano

که در این رابطه، P_i : بارش، PET_i : تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده از طریق روش تورنت وایت^۱ و D_i : بیلان آب است. وینسته سرانو و همکاران با بررسی توابع چگالی مختلف، تابع لوگ لجستیک سه پارامتری^۲ را به عنوان بهترین تابع برازش بر مقادیر D_i تشخیص دادند که رابطه آن به صورت زیر است.

$$F(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (9)$$

در رابطه فوق، α ، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و منشأ^۳ بر مقادیر D_i در بازه مقادیر $\gamma > D < \infty$ هستند (وینسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۷۰۴). رابطه تابع احتمالی تجمعی لوگ لجستیک سه پارامتری برای D نیز به صورت رابطه زیر است:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (10)$$

در نهایت، مقادیر استاندارد شده تحت عنوان شاخص SPEI و از رابطه تابع کلاسیک آبراموویچ و استگان^۴ در سال ۱۹۶۵ (رابطه (۵)) محاسبه می شود (وینسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۷۰۵؛ وینسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۰).

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad \text{For } P \leq 0.5 \quad W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (11)$$

$$c_0 = 2.515517 \quad c_1 = 0.802853 \quad c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788 \quad d_2 = 0.189269 \quad d_3 = 0.001308$$

که در این رابطه، P احتمال وقوع مقدار D تعیین شده و $P=1-F(x)$ است. پارامترهای d_1 ، d_2 ، d_3 ، c_1 ، c_2 و c_3 نیز ضرایب ثابت این فرمول هستند. همچنین اگر $P > 0.5$ باشد، P با $1-P$ جایگزین می شود و علامت SPEI به دست آمده برعکس می شود.

- شاخص SSI

شاخص SSI، شاخص جریان سطحی استاندارد شده است که براساس محاسبه تابع توزیع تجمعی برای آمار دبی رودخانه، خشکسالی هیدرولوژیکی را ارزیابی می کند. این شاخص، مزایایی مشابه SPI دارد و تنها تفاوت آن با شاخص SPI، استفاده از دبی ماهانه است (وینسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۱؛ جهانگیر و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۸؛ وو و همکاران، ۲۰۲۴). در این پژوهش برای محاسبه شاخص SSI، از نرم افزار DinC استفاده شده که آخرین نسخه آن براساس دو توزیع گاما و لوگ نرمال تنظیم شده است. مطالعات قبلی، توزیع لوگ نرمال را برای محاسبه شاخص SSI به عنوان تابع توزیع مناسب تعیین نموده اند (نیو و همکاران، ۲۰۱۵: ۷۲؛ وو و همکاران، ۲۰۱۸a: ۷۳۰) که در این تحقیق نیز با توجه به نتایج بهتر این توزیع نسبت به توزیع گاما، برای محاسبه شاخص SSI در نرم افزار مذکور انتخاب گردید. در جدول های (۳) و (۴) نیز طبقه بندی مقادیر شاخص های SPI، RDI، SPEI و SSI ارائه شده است (مکی و همکاران، ۱۹۹۳: ۱۸۱؛ وینسته سرانو و همکاران، ۲۰۱۰: یوسفی و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۳۹؛ تیریوارومبو و همکاران، ۲۰۱۸: ۵؛ میرزایی حسنی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۷۸؛ جهانگیر و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۸).

جدول (۳): طبقه بندی مقادیر شاخص های SPI، RDI، SPEI و SSI

Table (3): Classification of values of SPI, RDI, SPEI and SSI indices

وضعیت	طبقه بندی SPI، SPEI، RDI	وضعیت	طبقه بندی SSI
رطوبت (ترسالی) بسیار شدید	بزرگ تر یا مساوی ۲	ترسالی شدید	بزرگ تر از ۱/۴۶
رطوبت (ترسالی) شدید	۱/۵۰ تا ۱/۹۹	ترسالی متوسط	۱/۴۶ تا ۰/۵۲
رطوبت (ترسالی) متوسط	۱ تا ۱/۵۰	نرمال	۰/۵۲ تا -۰/۵۲
نرمال	-۰/۹۹ تا +۰/۹۹	خشکسالی متوسط	-۱/۴۶ تا -۰/۵۲
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی شدید	کوچک تر از -۱/۴۶
خشکسالی شدید	-۱/۵۰ تا -۱/۹۹		
خشکسالی بسیار شدید	کوچک تر یا مساوی -۲		

¹. Thornthwait

². Three-parameter log logistic function

³. scale, shape, and origin parameters

⁴. Abramowitz & Stegun

⁵. Niu

⁶. Wu

⁷. Tirivarombo

محاسبه فراوانی وقوع طبقات مختلف انواع شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

در این مرحله، فراوانی وقوع طبقات مختلف انواع شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده در تحقیق برای کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه (کوتاه‌مدت و میان‌مدت) به‌دست آمد و نتایج به‌دست آمده در ایستگاه‌های مختلف با هم مقایسه شدند تا تأثیر نوع شاخص و تغییر مقیاس زمانی روی فراوانی وقوع طبقات شاخص‌های خشکسالی مورد ارزیابی قرار گیرد.

بررسی نمودارهای تغییرات زمانی انواع شاخص‌های خشکسالی

در این بخش از پژوهش، نمودارهای تغییرات زمانی انواع شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (شامل SPI، SPEI و RDI) و هیدرولوژیکی (SSI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه برای کلیه ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی منتخب در محیط نرم‌افزار Excel تهیه و با یکدیگر مقایسه شدند.

بررسی ارتباط زمانی بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و خشکسالی هیدرولوژیکی SSI

به‌منظور بررسی ارتباط بین شاخص خشکسالی‌های هواشناسی SPI و خشکسالی هیدرولوژیکی SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه و نیز بررسی هم‌زمانی و یا عدم هم‌زمانی وقوع خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی از ضرایب همبستگی پیرسون و متقاطع^۱ در محیط نرم‌افزار Minitab استفاده شد. علت این اقدام این است که مشخص شود چه مدت طول می‌کشد که خشکسالی هواشناسی در یک منطقه به خشکسالی هیدرولوژیکی تبدیل شود (اقتدارنژاد و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۳؛ وو و همکاران، ۲۰۲۴: ۴).

رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب معادلات مربوط به همبستگی پیرسون و متقاطع را نشان می‌دهد. در این رابطه‌ها، هر کدام از پارامترها عبارتند از: r_{xy} همبستگی پیرسون، x_i متغیر مستقل، y_i متغیر وابسته و R همبستگی متقاطع. لازم به ذکر است که ضریب همبستگی پیرسون برای توصیف همبستگی بین دو متغیر که با استفاده از مقیاس فاصله‌ای یا نسبی اندازه‌گیری می‌شوند، به کار می‌رود. از ضریب همبستگی متقاطع نیز برای شناسایی زمان تأخیر بین دو متغیر مستقل و وابسته استفاده می‌گردد (چوبین و همکاران، ۱۳۹۵: ۳۸؛ طالبی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۷۵).

$$r_{xy} = \frac{(\sum x_i - \bar{x})(\sum y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum x_i^2} \sqrt{\sum y_i^2}} \quad (12)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_{i-d} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i-d} - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

نتایج و بحث

بیشترین و کمترین مقدار شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

بعد از محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی برای هر کدام از ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری در زیرحوضه‌های مطالعاتی، بیشترین و کمترین مقدار هر شاخص به تفکیک هر ایستگاه طی دوره آماری مد نظر مشخص گردید که نتایج آن در جدول‌های (۴) تا (۸) ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از جدول‌های (۴) تا (۶) نشان داد که برای کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی در حوضه‌های قم- کهک و نیزاز- سلفچگان، بیشترین مقدار ثبت شده در مقیاس زمانی ۱ ماهه مربوط به شاخص SPEI و در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، مربوط به شاخص SPI است. در حوضه مرودشت- خرامه، نتایج متفاوتی برای هر دو ایستگاه مطالعاتی به‌دست آمده است، به‌طوری‌که در ایستگاه درودزن، بیشترین مقدار در مقیاس زمانی ۱ ماهه مربوط به شاخص SPEI و در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲

^۱ Cross correlation

ماهه مربوط به شاخص RDI است. این در حالی است که در ایستگاه تخت جمشید، بیشترین مقدار در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه به ترتیب مربوط به شاخص‌های SPEI، RDI و SPI است. برای ایستگاه سینوپتیک زرقان واقع در حوضه بیضا- زرقان نیز، بیشترین مقدار در مقیاس زمانی ۱ ماهه مربوط به شاخص SPEI و در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه مربوط به شاخص‌های SPI و RDI است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص SPEI در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت ۱ ماهه در کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی، بیشترین ترسالی را با شدت بیشتری نشان داده است. برای مقیاس زمانی کوتاه‌مدت ۶ ماهه و میان‌مدت ۱۲ ماهه نیز، نتایج در زیرحوضه‌های منتخب واقع در حوضه دریاچه نمک شبیه یک‌دیگر و در زیرحوضه‌های منتخب واقع در حوضه طشک- بختگان و مهارلو متفاوت به‌دست آمده است. همچنین برای کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی در حوضه قم- کهک و حوضه مروودشت- خرامه، کمترین مقدار ثبت شده در مقیاس زمانی ۱ ماهه مربوط به شاخص SPI و در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، مربوط به شاخص SPEI است. برای ایستگاه سلفچگان واقع در حوضه نیزار- سلفچگان، کمترین مقدار ثبت شده در مقیاس‌های زمانی ۱ و ۱۲ ماهه مربوط به شاخص SPI و در مقیاس زمانی ۶ ماهه، مربوط به شاخص‌های SPI و SPEI است. برای ایستگاه زرقان واقع در حوضه بیضا- زرقان، کمترین مقدار ثبت شده در مقیاس زمانی ۱ ماهه مربوط به شاخص SPI و در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، مربوط به شاخص RDI است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص SPI در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت ۱ ماهه در کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی و شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، در ایستگاه‌های قم، کهک، درودزن و تخت جمشید بیشترین خشکسالی را با شدت بیشتری نشان داده است. طبق یافته‌های ارائه شده در جدول (۷) نیز، بیشترین مقدار شاخص SSI در کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری در مقیاس زمانی ۱ ماهه به‌دست آمد. سایر نتایج در جدول (۷) قابل مشاهده است.

جدول (۴): بیشترین و کمترین مقدار SPI در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Table (4): The highest and lowest SPI values in study synoptic stations

نام حوضه	نام ایستگاه	مقیاس زمانی	بیشترین مقدار SPI	زمان وقوع	کمترین مقدار SPI	زمان وقوع
قم- کهک	قم	۱ ماهه	۲/۴۰	جولای ۲۰۲۳	-۳/۱۰	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۵۳	اکتبر ۲۰۱۹	-۲/۵۰	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۳۷	فوریه ۲۰۲۱	-۲/۱۷	دسامبر ۲۰۲۲
	کهک	۱ ماهه	۲/۳۹	سپتامبر ۲۰۱۰	-۲/۸۷	نوامبر ۲۰۱۷
		۶ ماهه	۲/۶۵	مارس ۲۰۲۰	-۳/۳۶	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۵۸	مارس ۲۰۲۰	-۱/۷۶	نوامبر ۲۰۱۶
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۱ ماهه	۲/۷۶	جولای ۲۰۰۵	-۳/۱۴	دسامبر ۲۰۱۱
		۶ ماهه	۲/۳۸	اکتبر ۲۰۱۹	-۳/۴۹	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۳۸	آوریل ۲۰۲۰	-۲/۳۱	ژانویه ۲۰۱۸
	درودزن	۱ ماهه	۲/۳۵	جولای ۲۰۱۶	-۲/۳۱	ژانویه ۲۰۱۶
		۶ ماهه	۲/۴۲	فوریه ۲۰۱۳	-۳/۲۸	دسامبر ۲۰۱۰
		۱۲ ماهه	۲/۴۱	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۱۹	ژانویه ۲۰۱۸
مروودشت- خرامه	تخت جمشید	۱ ماهه	۲/۴۰	ژوئن ۲۰۱۰	-۲/۶۲	آوریل ۲۰۱۶
		۶ ماهه	۲/۵۵	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۸۸	آگوست ۲۰۰۹
		۱۲ ماهه	۲/۵۲	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۲۲	آوریل ۲۰۲۲
	زرقان	۱ ماهه	۲/۳۱	جولای ۲۰۲۳	-۲/۴۹	ژانویه ۲۰۲۲
		۶ ماهه	۲/۶۱	می ۲۰۰۵	-۳/۳۶	دسامبر ۲۰۱۰
		۱۲ ماهه	۲/۷۱	نوامبر ۲۰۰۵	-۱/۷۹	دسامبر ۲۰۰۷

جدول (۵): بیشترین و کمترین مقدار شاخص RDI در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Table (5): The highest and lowest value of RDI index in study synoptic stations

نام حوضه	نام ایستگاه	مقیاس زمانی	بیشترین مقدار RDI	زمان وقوع	کمترین مقدار RDI	زمان وقوع
قم - کهک	قم	۱ ماهه	۲/۴۳	ژانویه ۲۰۰۹	-۲/۹۰	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۴۸	اکتبر ۲۰۱۹	-۲/۴۸	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۲۳	فوریه ۲۰۲۱	-۲/۲۵	دسامبر ۲۰۲۲
کهک	کهک	۱ ماهه	۳/۲۵	ژانویه ۲۰۰۹	-۲/۵۸	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۶۵	مارس ۲۰۲۰	-۳/۳۷	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۵۴	آوریل ۲۰۲۰	-۱/۷۳	نوامبر ۲۰۱۶
نیزار - سلفچگان	سلفچگان	۱ ماهه	۲/۹۱	ژانویه ۲۰۰۹	-۲/۹۱	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۳۲	اکتبر ۲۰۱۹	-۳/۴۷	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۳۳	آوریل ۲۰۲۰	-۲/۲۴	ژانویه ۲۰۱۸
مروودشت - خرامه	درودزن	۱ ماهه	۳/۰۹	ژانویه ۲۰۱۵	-۱/۶۲	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۵۰	فوریه ۲۰۱۳	-۳/۲۹	دسامبر ۲۰۱۰
		۱۲ ماهه	۲/۴۳	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۱۶	ژانویه ۲۰۱۸
تخت جمشید	تخت جمشید	۱ ماهه	۲/۴۰	جولای ۲۰۱۰	-۲/۵۴	آوریل ۲۰۱۶
		۶ ماهه	۲/۶۹	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۸۶	آگوست ۲۰۰۹
		۱۲ ماهه	۲/۵۰	نوامبر ۲۰۰۵	-۲/۲۷	آوریل ۲۰۲۲
بیضا - زرقان	زرقان	۱ ماهه	۲/۷۷	ژانویه ۲۰۱۵	-۱/۹۵	ژانویه ۲۰۲۲
		۶ ماهه	۲/۵۵	می ۲۰۰۵	-۳/۳۸	دسامبر ۲۰۱۰
		۱۲ ماهه	۲/۷۵	نوامبر ۲۰۰۵	-۱/۸۳	می ۲۰۱۷

جدول (۶): بیشترین و کمترین مقدار شاخص SPEI در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Table (6): The highest and lowest value of SPEI index in study synoptic stations

نام حوضه	نام ایستگاه	مقیاس زمانی	بیشترین مقدار SPEI	زمان وقوع	کمترین مقدار SPEI	زمان وقوع
قم - کهک	قم	۱ ماهه	۲/۴۸	ژانویه ۲۰۰۹	-۲/۹۴	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۴۷	اکتبر ۲۰۱۹	-۲/۵۱	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۱۸	نوامبر ۲۰۲۱	-۲/۲۹	دسامبر ۲۰۲۲
کهک	کهک	۱ ماهه	۳/۸۴	ژانویه ۲۰۰۹	-۲/۶۶	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۵۸	اکتبر ۲۰۱۹	-۳/۳۸	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۴۷	آوریل ۲۰۲۰	-۱/۷۶	نوامبر ۲۰۱۶
نیزار - سلفچگان	سلفچگان	۱ ماهه	۲/۹۵	ژانویه ۲۰۰۹	-۲/۹۶	مارس ۲۰۰۹
		۶ ماهه	۲/۳۱	اکتبر ۲۰۱۹	-۳/۴۹	دسامبر ۲۰۱۷
		۱۲ ماهه	۲/۲۷	آوریل ۲۰۲۰	-۲/۲۷	ژانویه ۲۰۱۸
مروودشت - خرامه	درودزن	۱ ماهه	۳/۲۳	ژانویه ۲۰۱۵	-۱/۶۳	فوریه ۲۰۰۷
		۶ ماهه	۲/۰۲	فوریه ۲۰۱۳	-۳/۴۱	دسامبر ۲۰۱۰
		۱۲ ماهه	۱/۸۹	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۲۵	ژانویه ۲۰۱۸
تخت جمشید	تخت جمشید	۱ ماهه	۲/۴۰	ژوئن ۲۰۱۰	-۲/۵۶	آوریل ۲۰۱۶
		۶ ماهه	۲/۵۷	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۹۳	آگوست ۲۰۰۹
		۱۲ ماهه	۲/۲۳	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۳۵	آوریل ۲۰۲۲
بیضا - زرقان	زرقان	۱ ماهه	۲/۸۸	ژانویه ۲۰۱۵	-۱/۹۶	ژانویه ۲۰۲۲
		۶ ماهه	۲/۵۷	فوریه ۲۰۱۳	-۲/۹۳	آگوست ۲۰۰۹
		۱۲ ماهه	۲/۰۱	فوریه ۲۰۱۳	-۱/۸۲	مارس ۲۰۱۷

جدول (۷): بیشترین و کمترین مقدار شاخص SSI در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی
Table (7): The highest and lowest value of SSI index in study hydrometric stations

نام حوضه	نام ایستگاه	مقیاس زمانی	بیشترین مقدار SSI	زمان وقوع	کمترین مقدار SSI	زمان وقوع
نیزار- سلفچگان	شادآباد	۱ ماهه	۲/۶۳	جولای ۲۰۲۰	-۱/۶۲	آوریل، می ۲۰۱۱
		۶ ماهه	۱/۹۰	سپتامبر ۲۰۲۰	-۲/۰۱	ژانویه، فوریه، مارس ۲۰۱۲
		۱۲ ماهه	۱/۶۸	مارس ۲۰۲۱	-۲/۱۱	مارس ۲۰۱۲
نیزار- سلفچگان	قلعه‌چم	۱ ماهه	۲/۶۵	جولای ۲۰۲۰	-۱/۶۲	ژانویه، آگوست، سپتامبر ۲۰۱۹
		۶ ماهه	۲/۳۰	سپتامبر ۲۰۲۰	-۱/۹۰	اکتبر، نوامبر، دسامبر ۲۰۱۸
		۱۲ ماهه	۲/۱۱	می ۲۰۲۱	-۱/۷۳	مارس ۲۰۱۹
مروذشت- خرامه	پل‌خان	۱ ماهه	۲/۶۴	مارس ۲۰۰۵	-۲/۳۶	می ۲۰۱۸
		۶ ماهه	۲/۵۷	آوریل ۲۰۰۵	-۲/۲۹	سپتامبر ۲۰۰۹
		۱۲ ماهه	۲/۳۷	نوامبر ۲۰۰۵	-۲/۰۹	آوریل ۲۰۱۸
مروذشت- خرامه	خرامه	۱ ماهه	۲/۶۵	ژانویه ۲۰۰۸	-۲/۱۷	ژوئن ۲۰۱۸
		۶ ماهه	۲/۲۸	فوریه ۲۰۰۸	-۲/۱۹	اکتبر ۲۰۱۸
		۱۲ ماهه	۲/۰۵	آوریل ۲۰۰۸	-۱/۸۳	ژانویه ۲۰۱۸

فراوانی وقوع طبقات مختلف شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

نتایج مربوط به فراوانی وقوع انواع طبقات خشکسالی هواشناسی برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه طی دوره آماری مد نظر در جدول‌های (۸)، (۹) و (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۸) ملاحظه می‌گردد، در مقیاس زمانی ۱ ماهه در تمام شاخص‌ها و ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی، مجموع فراوانی طبقات خشکسالی کمتر از مجموع فراوانی طبقات ترسالی است. بیشترین فراوانی وقوع طبقه نرمال برای شاخص SPI در ایستگاه سلفچگان و برای شاخص‌های SPEI و RDI در ایستگاه کهک رخ داده است. همچنین در کلیه ایستگاه‌ها در همه شاخص‌های خشکسالی، فراوانی وقوع طبقه خشکسالی متوسط بیشتر از طبقات خشکسالی شدید و بسیار شدید است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۹)، فراوانی وقوع طبقات خشکسالی در مقیاس زمانی ۶ ماهه برای کلیه شاخص‌ها در ایستگاه‌های سلفچگان و تخت جمشید بیشتر از فراوانی طبقات ترسالی است. همچنین در کلیه ایستگاه‌ها برای همه شاخص‌ها، فراوانی طبقه خشکسالی متوسط بیشتر از طبقات خشکسالی شدید و بسیار شدید به‌دست آمد. در این مقیاس زمانی، بیشترین فراوانی وقوع طبقه نرمال برای شاخص‌های SPI، SPEI و RDI به‌ترتیب در ایستگاه‌های تخت جمشید، درودزن و کهک به‌دست آمدند.

براساس جدول (۱۰) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، در تمام شاخص‌ها و ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی (به‌جز ایستگاه کهک)، فراوانی طبقات خشکسالی بیشتر از فراوانی طبقات ترسالی است. همچنین در تمام شاخص‌ها و برای تمام ایستگاه‌ها (به‌جز زرقان)، فراوانی وقوع طبقه خشکسالی متوسط بیشتر از طبقات خشکسالی شدید و بسیار شدید است. سایر نتایج در جدول‌های مذکور قابل مشاهده است.

جدول (۱۱) نیز، فراوانی وقوع طبقات مختلف خشکسالی هیدرولوژیکی SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه طی دوره آماری مد نظر برای ایستگاه‌های هیدرومتری شادآباد، قلعه‌چم، پل‌خان و خرامه را نشان می‌دهد. براساس جدول‌های مذکور، مجموع فراوانی وقوع طبقات خشکسالی در مقیاس زمانی ۱ ماهه در ایستگاه پل‌خان، در مقیاس زمانی ۶ ماهه در ایستگاه‌های پل‌خان، خرامه و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی بیشتر از طبقات ترسالی به‌دست آمدند. سایر نتایج در جدول‌های مذکور قابل مشاهده است.

جدول (۸): فراوانی وقوع طبقات مختلف شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مقیاس زمانی ۱ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Table (8): The occurrence frequency in different classes of meteorological drought indicators in a 1-month time scale in study synoptic stations

طبقات SPI									
نام حوضه	نام ایستگاه	بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	ترسالی شدید	مجموع طبقات	
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	ترسالی شدید	ترسالی	خشکسالی
قم- کهک	قم	۶	۸	۲۰	۱۷۶	۹	۴	۵	۳۴
۱۸									
قم- کهک	کهک	۵	۹	۲۰	۱۷۲	۱۴	۵	۴	۳۴
۲۳									
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۴	۱۰	۱۸	۱۸۷	۱۴	۵	۳	۳۲
۲۲									
مرودشت- خرامه	دروذن	۶	۸	۳۵	۱۵۸	۱۷	۳	۱	۴۹
۲۱									
مرودشت- خرامه	تخت جمشید	۷	۱۳	۱۲	۱۷۵	۱۷	۳	۱	۳۲
۲۱									
بیضا- زرقان	زرقان	۶	۷	۲۹	۱۶۶	۱۴	۵	۱	۴۲
۲۰									
طبقات SPEI									
نام حوضه	نام ایستگاه	بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	ترسالی شدید	مجموع طبقات	
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	ترسالی شدید	ترسالی	خشکسالی
قم- کهک	قم	۸	۸	۱۵	۱۷۷	۱۰	۷	۳	۳۱
۲۰									
قم- کهک	کهک	۷	۷	۱۴	۱۷۹	۱۲	۷	۲	۲۸
۲۱									
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۶	۱۲	۱۲	۱۷۳	۱۸	۴	۳	۳۰
۲۵									
مرودشت- خرامه	دروذن	۷	۶	۴۰	۱۵۸	۱۳	۵	۰	۵۳
۱۸									
مرودشت- خرامه	تخت جمشید	۷	۱۳	۱۹	۱۶۸	۱۶	۴	۱	۳۹
۲۱									
بیضا- زرقان	زرقان	۶	۶	۴۰	۱۵۶	۱۵	۵	۰	۵۲
۲۰									
طبقات RDI									
نام حوضه	نام ایستگاه	بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	ترسالی شدید	مجموع طبقات	
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	ترسالی شدید	ترسالی	خشکسالی
قم- کهک	قم	۸	۱۰	۱۴	۱۷۷	۹	۷	۳	۳۲
۱۹									
قم- کهک	کهک	۵	۷	۱۵	۱۸۳	۹	۷	۲	۲۷
۱۸									
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۷	۹	۱۱	۱۷۷	۱۸	۳	۳	۲۷
۲۴									
مرودشت- خرامه	دروذن	۸	۷	۴۵	۱۴۴	۱۷	۷	۰	۶۰
۲۴									
مرودشت- خرامه	تخت جمشید	۹	۱۴	۲۰	۱۶۶	۱۴	۴	۱	۴۳
۱۹									
بیضا- زرقان	زرقان	۷	۸	۴۲	۱۵۲	۱۴	۵	۰	۵۷
۱۹									

جدول (۹): فراوانی وقوع طبقات مختلف شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مقیاس زمانی ۶ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Table (9): The occurrence frequency in different classes of meteorological drought indicators in a 6-month time scale in study synoptic stations

طبقات SPI										
نام حوضه	نام ایستگاه	ترسالی		خشکسالی			مجموع طبقات			
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	بسیار شدید	شدید	ترسالی	خشکسالی
قم - کهک	قم	۵	۹	۲۲	۱۵۴	۱۸	۳	۱۲	۳۶	۳۳
قم - کهک	کهک	۳	۱۷	۱۶	۱۵۳	۲۵	۴	۵	۳۶	۳۴
نیزار - سلفچگان	سلفچگان	۴	۱۰	۲۰	۱۵۲	۲۳	۲	۱۲	۳۴	۳۷
مرودشت - خرامه	دروذن	۲	۷	۲۷	۱۵۳	۲۲	۴	۸	۳۶	۳۴
مرودشت - خرامه	تخت جمشید	۵	۷	۱۸	۱۶۱	۲۰	۶	۶	۳۰	۳۲
بیضا - زرقان	زرقان	۵	۶	۲۲	۱۵۵	۲۲	۵	۸	۳۳	۳۵
طبقات SPEI										
نام حوضه	نام ایستگاه	ترسالی		خشکسالی			مجموع طبقات			
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	بسیار شدید	شدید	ترسالی	خشکسالی
قم - کهک	قم	۴	۹	۲۷	۱۴۸	۱۶	۳	۱۶	۴۰	۳۵
قم - کهک	کهک	۴	۱۱	۲۵	۱۴۸	۲۶	۴	۵	۴۰	۳۵
نیزار - سلفچگان	سلفچگان	۵	۷	۲۳	۱۵۲	۲۳	۲	۱۱	۳۵	۳۶
مرودشت - خرامه	دروذن	۱	۵	۲۸	۱۵۶	۲۰	۵	۹	۳۴	۳۴
مرودشت - خرامه	تخت جمشید	۳	۶	۲۶	۱۵۰	۲۰	۷	۱۱	۳۵	۳۸
بیضا - زرقان	زرقان	۲	۷	۲۴	۱۵۴	۱۸	۵	۱۳	۳۳	۳۶
طبقات RDI										
نام حوضه	نام ایستگاه	ترسالی		خشکسالی			مجموع طبقات			
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	بسیار شدید	شدید	ترسالی	خشکسالی
قم - کهک	قم	۴	۱۳	۲۶	۱۴۷	۱۴	۳	۱۶	۴۳	۳۳
قم - کهک	کهک	۴	۱۳	۲۲	۱۷۲	۱۰	۴	۴	۳۹	۱۸
نیزار - سلفچگان	سلفچگان	۵	۱۰	۲۱	۱۵۱	۲۳	۲	۱۱	۳۶	۳۶
مرودشت - خرامه	دروذن	۲	۶	۲۹	۱۵۲	۲۱	۴	۹	۳۷	۳۴
مرودشت - خرامه	تخت جمشید	۲	۹	۲۳	۱۵۵	۱۹	۶	۹	۳۴	۳۴
بیضا - زرقان	زرقان	۵	۶	۲۴	۱۵۳	۲۳	۵	۷	۳۵	۳۵

جدول (۱۰): فراوانی وقوع طبقات مختلف شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی
 Table (10): The occurrence frequency in different classes of meteorological drought indicators in a 12-month time scale in study synoptic stations

طبقات SPI									
نام حوضه	نام ایستگاه	ترسالی		خشکسالی			مجموع طبقات		
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	شدید	ترسالی	خشکسالی
قم- کهک	قم	۱۰	۱۱	۱۰	۱۴۸	۳۰	۶	۲	۳۸
	کهک	۷	۱۰	۲۲	۱۴۱	۲۴	۱۳	۰	۳۷
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۷	۱۴	۹	۱۴۵	۳۶	۵	۱	۴۲
مرودشت- خرامه	درودزن	۳	۱۱	۲۲	۱۳۵	۳۴	۱۰	۱	۴۵
	تخت جمشید	۴	۱۱	۱۶	۱۴۱	۳۲	۱۰	۳	۴۵
بیضا- زرقان	زرقان	۴	۳	۲۴	۱۴۱	۲۰	۲۵	۰	۴۵
طبقات SPEI									
نام حوضه	نام ایستگاه	ترسالی		خشکسالی			مجموع طبقات		
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	شدید	ترسالی	خشکسالی
قم- کهک	قم	۷	۱۴	۱۲	۱۵۰	۲۶	۴	۴	۳۴
	کهک	۳	۱۰	۲۵	۱۳۸	۳۲	۹	۰	۴۱
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۳	۱۵	۱۴	۱۴۱	۳۶	۷	۱	۴۴
مرودشت- خرامه	درودزن	۰	۶	۳۸	۱۲۴	۳۲	۱۶	۱	۴۹
	تخت جمشید	۱	۱۱	۲۴	۱۳۰	۳۳	۱۳	۵	۵۱
بیضا- زرقان	زرقان	۱	۵	۳۳	۱۳۲	۱۵	۳۱	۰	۴۶
طبقات RDI									
نام حوضه	نام ایستگاه	ترسالی		خشکسالی			مجموع طبقات		
		بسیار شدید	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	شدید	ترسالی	خشکسالی
قم- کهک	قم	۸	۱۲	۱۳	۱۵۰	۲۶	۴	۴	۳۴
	کهک	۶	۹	۲۵	۱۴۰	۳۰	۷	۰	۳۷
نیزار- سلفچگان	سلفچگان	۴	۱۵	۹	۱۴۶	۳۵	۷	۱	۴۳
مرودشت- خرامه	درودزن	۲	۱۲	۲۲	۱۳۳	۳۵	۱۲	۱	۴۸
	تخت جمشید	۴	۱۰	۱۶	۱۳۸	۳۸	۸	۳	۴۹
بیضا- زرقان	زرقان	۴	۲	۲۴	۱۴۱	۱۹	۲۷	۰	۴۶

جدول (۱۱): فراوانی وقوع طبقات مختلف شاخص SSI در مقیاس‌های زمانی ۱ ماهه، ۶ ماهه و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی

Table (11): The occurrence frequency in different classes of SSI index in 1-month, 6-month and 12-month time scales in study hydrometric stations

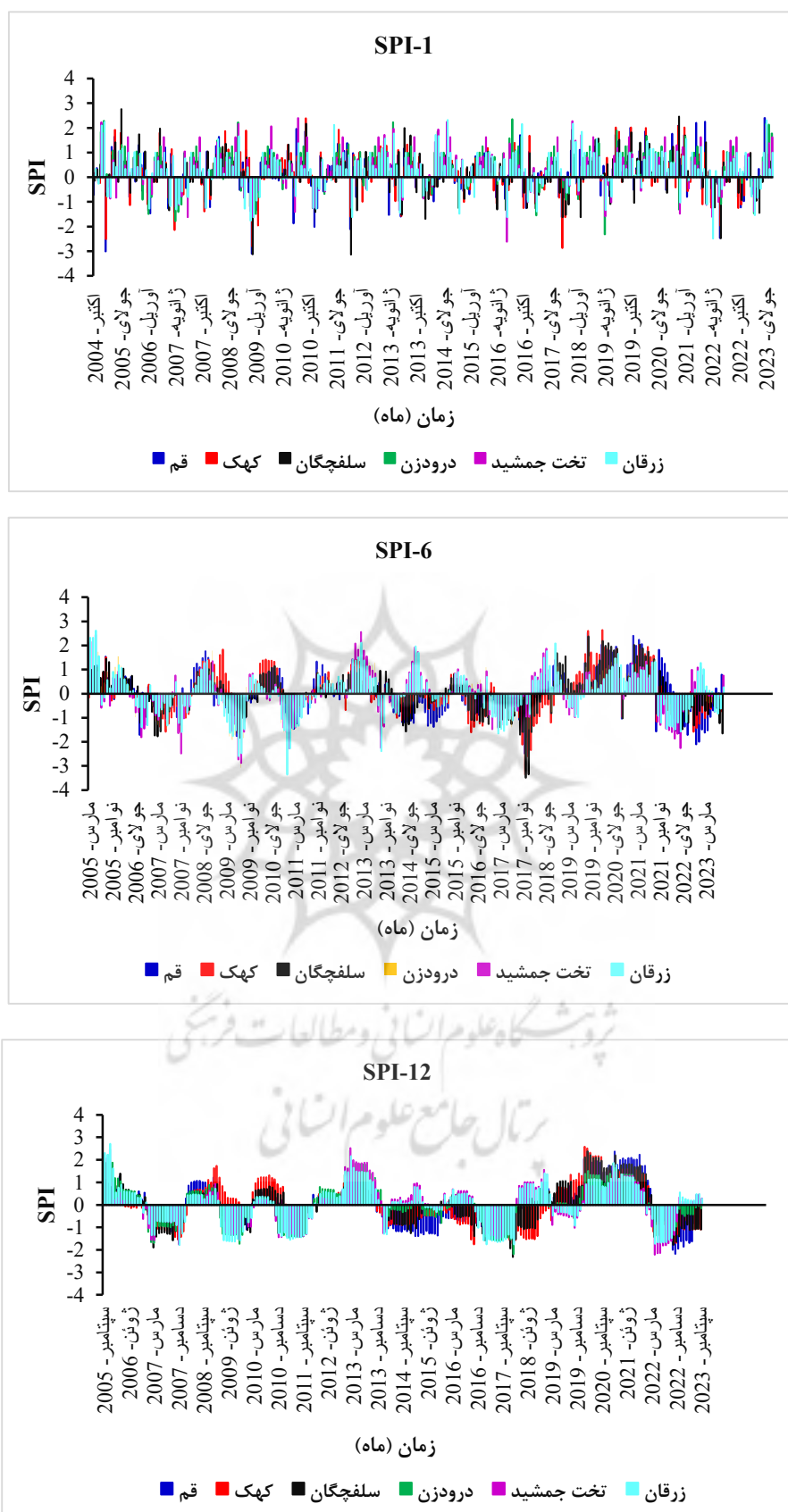
مقیاس زمانی	نام حوضه	ایستگاه	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	شدید	ترسالی	خشکسالی
۱ ماهه	نیزار- سلفچگان	شادآباد	۱۲	۵۳	۱۲۳	۵۳	۵	۶۵	۵۸
		قلعه‌چم	۹	۶۲	۱۴۲	۵۶	۹	۷۱	۶۵
	مرودشت- خرامه	پل‌خان	۲۲	۳۷	۱۴۷	۸۲	۷	۵۹	۸۹
		خرامه	۱۰	۵۷	۱۳۱	۴۵	۸	۶۷	۵۳
مقیاس زمانی	زیرحوضه	ایستگاه	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	شدید	ترسالی	خشکسالی
۶ ماهه	نیزار- سلفچگان	شادآباد	۱۵	۶۹	۱۲۳	۶۵	۱۳	۸۴	۷۸
		قلعه‌چم	۱۲	۶۶	۱۴۲	۵۳	۱۶	۷۸	۶۹
	مرودشت- خرامه	پل‌خان	۲۲	۳۰	۱۴۷	۶۴	۱۴	۵۲	۷۸
		خرامه	۱۳	۵۹	۱۳۱	۸۶	۹	۷۲	۹۵
مقیاس زمانی	زیرحوضه	ایستگاه	شدید	متوسط	نرمال	متوسط	شدید	ترسالی	خشکسالی
۱۲ ماهه	نیزار- سلفچگان	شادآباد	۸	۵۶	۱۲۳	۷۷	۱۱	۶۴	۸۸
		قلعه‌چم	۱۰	۵۷	۱۴۲	۷۸	۶	۶۷	۸۴
	مرودشت- خرامه	پل‌خان	۲۴	۲۰	۱۴۷	۵۰	۱۷	۴۴	۶۷
		خرامه	۱۴	۵۲	۱۳۱	۹۱	۱	۶۶	۹۲

نمودارهای تغییرات زمانی انواع شاخص‌های خشکسالی

در شکل‌های (۲) تا (۵)، تغییرات زمانی انواع خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی برای ایستگاه‌های مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی ارائه شده است. آنچه از نمودارهای تغییرات زمانی شاخص‌ها در همه ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود، گویای این مطلب است که با حرکت از مقیاس زمانی ۱ ماهه به سمت مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، میزان تضاریس نمودارهای خطی کلیه ایستگاه‌ها کمتر شده و شکل نمودارها منعطف‌تر شده است. همچنین نمودارهای ستونی خوشه‌ای‌آدر مقیاس‌های زمانی طولانی‌مدت، دوره‌های خشک و تر را بهتر نمایش می‌دهد.

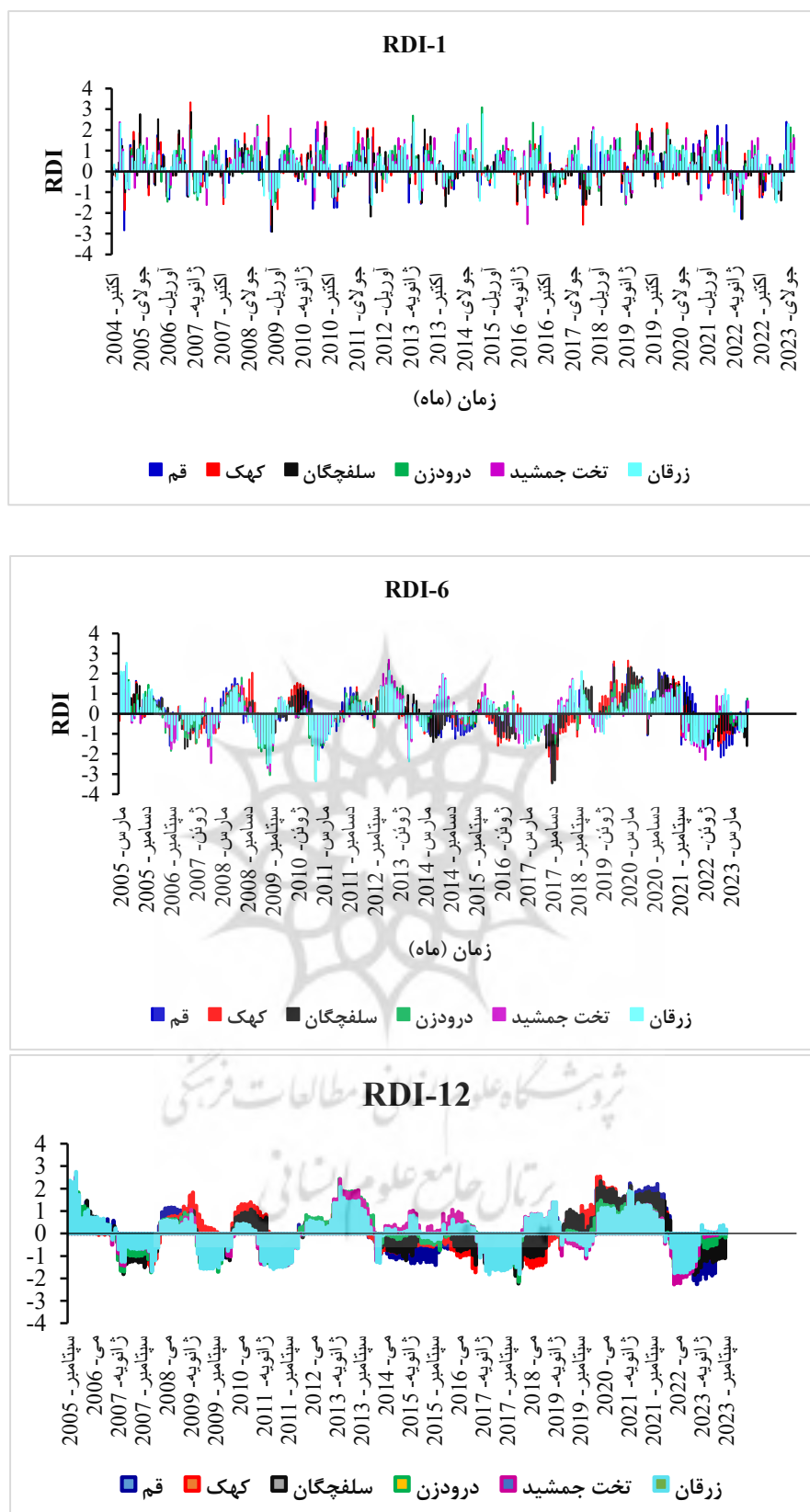
براساس شکل‌های مذکور، نمودارهای شاخص‌ها در همه مقیاس‌های زمانی از روند مشابهی پیروی می‌کنند و مقادیر آن‌ها با حرکت از مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت به سمت مقیاس‌های زمانی بلندمدت به یک‌دیگر نزدیک‌تر می‌شوند و نیز زمان شروع و پایان دوره‌های مرطوب و خشک در هر سه شاخص خشکسالی هواشناسی، تقریباً انطباق بیشتری دارند. سایر نتایج نیز مؤید این موضوع است که شناسایی و تفکیک دوره‌های ترسالی و خشکسالی در کلیه ایستگاه‌ها در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه بهتر صورت می‌گیرد.

¹. Line Charts². Clustered Column



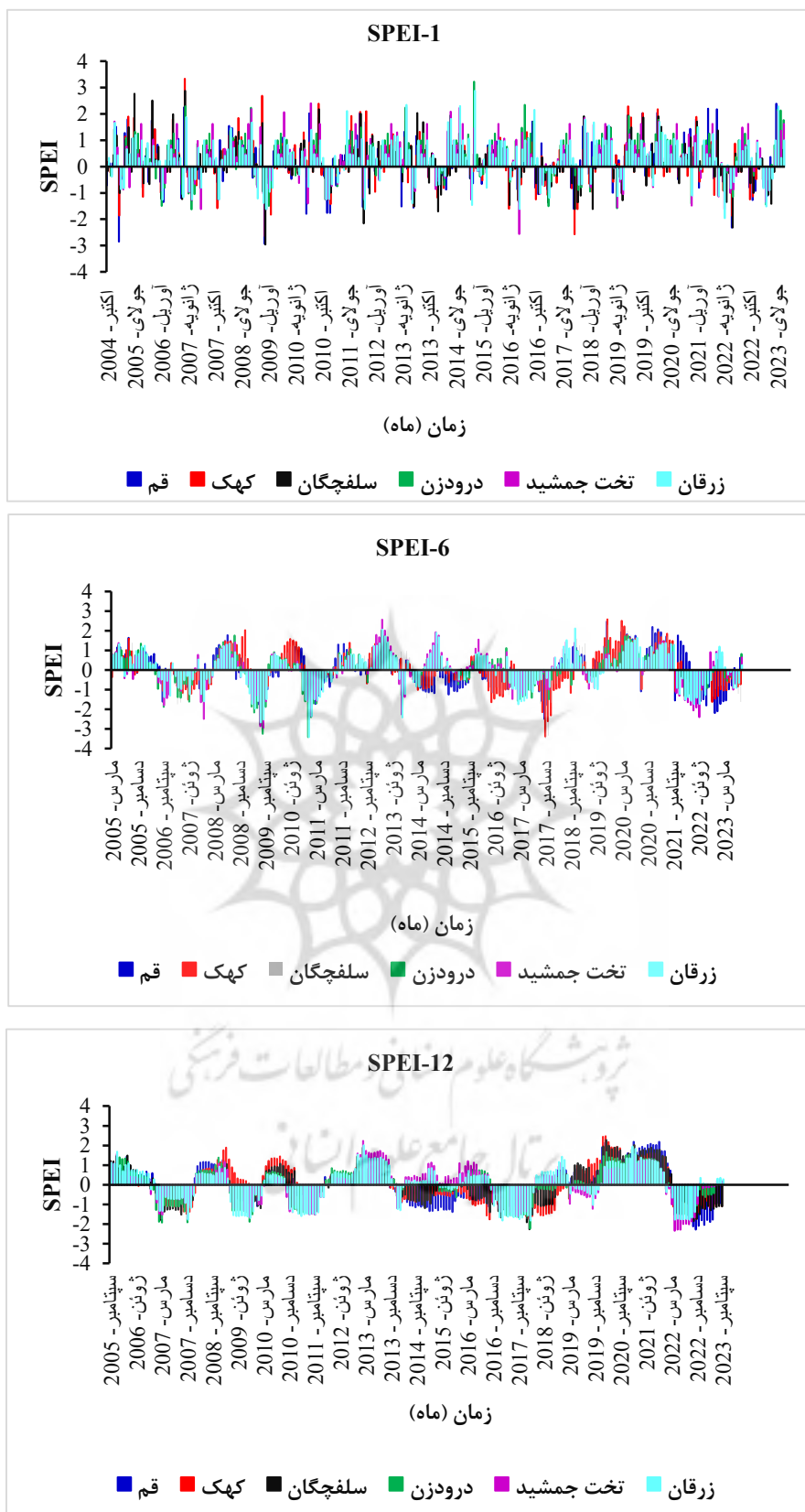
شکل (۲): نمودارهای شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Figure (2): SPI index graphs in time scales of 1, 6 and 12 months in study synoptic stations



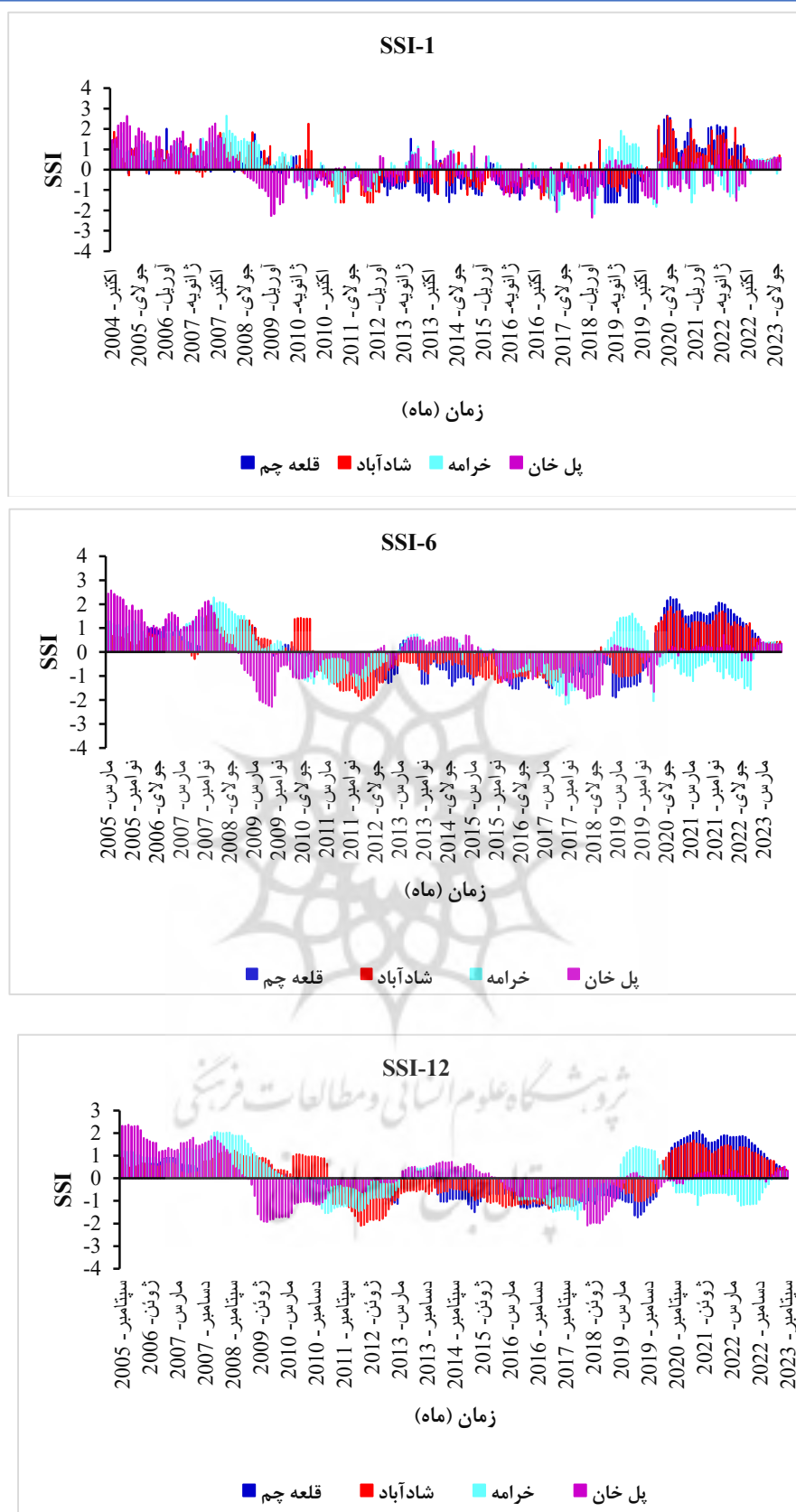
شکل (۳): نمودارهای شاخص RDI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Figure (3): RDI index graphs in time scales of 1, 6 and 12 months in study synoptic stations



شکل (۴): نمودارهای شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

Figure (4): SPE index graphs in time scales of 1, 6 and 12 months in study synoptic stations



شکل (۵): نمودارهای شاخص SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی
Figure (5): SSI index graphs in time scales of 1, 6 and 12 months in study hydrometric stations

ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و هیدرولوژیکی SSI

همان‌طور که از نتایج جدول (۱۲) مربوط به همبستگی‌های پیرسون و متقاطع مشخص است، بیشترین همبستگی بین شاخص‌های SPI و SSI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سلفچگان و قلعه‌چم در تأخیر زمانی رو به جلو (مثبت) به اندازه گام زمانی ۱۲ ماه به ترتیب برابر با ۰/۱۷۲، ۰/۳۵۹ و ۰/۵۷۴ است. در ایستگاه‌های تخت جمشید و خرامه در تأخیر زمانی مثبت، بیشترین مقادیر همبستگی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه برابر با ۰/۱۲۴، ۰/۱۵۲ و ۰/۱۸۴ به دست آمدند.

جدول (۱۲): نتایج همبستگی متقاطع و پیرسون بین SPI و SSI ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی

Table (12): Cross and Pearson correlation results between SPI and SSI of meteorological and hydrological stations

تأخیر			سلفچگان - قلعه‌چم			تخت جمشید - خرامه		
گام زمانی	ماه ۱	ماه ۶	ماه ۱۲	ماه ۱	ماه ۶	ماه ۱۲	ماه ۱	ماه ۶
۰	۰/۰۰۳	۰/۱۵۲	۰/۳۰۹	۰/۰۴۰	۰/۰۵۰	۰/۱۱۴		
۱	۰/۰۱۳	۰/۱۸۷	۰/۳۵۰	۰/۱۲۴	۰/۰۵۵	۰/۱۳۰		
۲	۰/۰۳۲	۰/۲۳۰	۰/۳۸۸	۰/۱۰۷	۰/۰۵۴	۰/۱۴۵		
۳	۰/۰۳۷	۰/۲۶۵	۰/۴۲۲	۰/۰۳۴	۰/۰۶۲	۰/۱۵۹		
۴	۰/۰۷۳	۰/۲۹۳	۰/۴۵۰	۰/۰۰۹	۰/۰۸۲	۰/۱۷۴		
۵	۰/۱۰۵	۰/۳۲۱	۰/۴۷۳	-۰/۰۴۸	۰/۰۹۲	۰/۱۸۴		
۶	۰/۱۶۰	۰/۳۴۹	۰/۴۹۵	-۰/۰۶۱	۰/۱۰۲	۰/۱۹۱		
۷	۰/۰۸۶	۰/۳۴۹	۰/۵۱۱	-۰/۰۶۵	۰/۱۱۴	۰/۱۹۷		
۸	۰/۰۹۳	۰/۳۴۶	۰/۵۲۵	-۰/۰۷۸	۰/۱۳۵	۰/۲۰۲		
۹	۰/۱۰۰	۰/۳۴۸	۰/۵۳۸	-۰/۰۵۶	۰/۱۵۲	۰/۲۰۵		
۱۰	۰/۱۳۳	۰/۳۵۳	۰/۵۵۳	-۰/۰۴۸	۰/۱۵۰	۰/۱۹۹		
۱۱	۰/۱۵۱	۰/۳۵۸	۰/۵۶۷	۰/۰۱۸	۰/۱۴۰	۰/۱۸۸		
۱۲	۰/۱۷۲	۰/۳۵۹	۰/۵۷۴	۰/۰۷۹	۰/۱۳۲	۰/۱۷۳		

همچنین با توجه به جدول (۱۲)، بیشترین مقدار همبستگی پیرسون در گام زمانی ۱ ماهه مربوط به ایستگاه تخت جمشید - خرامه ($r = 0/041$ و $p\text{-value} = 0/529$)، در گام زمانی ۶ ماهه مربوط به ایستگاه‌های سلفچگان - قلعه‌چم ($r = 0/152$ و $p\text{-value} = 0/023$) و در گام زمانی ۱۲ ماهه مربوط به ایستگاه سلفچگان - قلعه‌چم ($r = 0/309$ و $p\text{-value} = 0/001$) به دست آمدند. سایر یافته‌ها نیز حاکی از این است که تنها بین شاخص‌های خشکسالی SPI و SSI در ایستگاه‌های سلفچگان و قلعه‌چم در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، همبستگی معنی‌دار به ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد وجود دارد، چرا که همبستگی محاسباتی در سطوح مذکور بیشتر از همبستگی جدول به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و SSI در حوضه‌های قم - کهک و نیزار - سلفچگان واقع در حوضه آبریز درجه ۲ دریاچه نمک و حوضه‌های مرودشت - خرامه و بیضا - زرقان واقع در حوضه آبریز درجه ۲ طشک - بختگان و مهارلو بررسی گردید که جمع‌بندی نتایج به شرح زیر است.

- نتایج بررسی مقادیر شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و SSI در ایستگاه‌های مطالعاتی نشان داد که بیش از ۹۵ درصد ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در حوضه‌های مطالعاتی، تمامی وضعیت‌های ترسالی بسیار شدید تا خشکسالی بسیار شدید را تجربه کرده‌اند.

- نتایج بررسی بیشترین و کمترین مقدار شاخص‌های خشکسالی SPI، SPEI و RDI نشان داد که در مقیاس زمانی ۱ ماهه در کلیه ایستگاه‌ها، شاخص SPEI ترسالی را با شدت بیشتر و شاخص SPI، خشکسالی را با شدت بیشتر در بین بیشترین‌ها و کمترین‌ها نشان داده است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های قم، کهک و تخت جمشید، شاخص SPI ترسالی را با شدت بیشتر و شاخص SPEI خشکسالی را با شدت بیشتر برآورد نموده است. در مقیاس زمانی ۶ ماهه، شدیدترین مقدار خشکسالی در کلیه ایستگاه‌ها به جز زرقان توسط شاخص SPEI به دست آمد؛ در حالی که در همین مقیاس زمانی، شدیدترین ترسالی در سه ایستگاه قم، سلفچگان و زرقان مربوط به شاخص SPI و در ایستگاه‌های کهک، درودزن و تخت جمشید، مربوط به شاخص RDI است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱ ماهه در کلیه ایستگاه‌های حوزه‌های مطالعاتی و شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۶ ماهه در ۸۳/۳ درصد ایستگاه‌ها و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ۶۷/۷ درصد ایستگاه‌ها، خشکسالی را با شدت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی نشان داده است.

- نتایج بررسی کمترین مقدار شاخص خشکسالی SSI در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی نشان داد که کمترین مقدار شاخص SSI در مقیاس‌های زمانی ۱ و ۶ ماهه، در ایستگاه پل‌خان (واقع در حوضه مرودشت-خرامه) و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، در ایستگاه شادآباد (واقع در حوضه نیزار-سلفچگان) به دست آمدند.

- نتایج مربوط به فراوانی وقوع انواع طبقات خشکسالی هواشناسی برای مقیاس‌های زمانی مورد بررسی طی دوره آماری نیز حاکی از این است که در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در تمام شاخص‌ها و ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی (به جز ایستگاه کهک در دو شاخص SPI و RDI)، فراوانی وقوع طبقات خشکسالی بیشتر از فراوانی وقوع طبقات ترسالی است. همچنین در تمام شاخص‌ها و برای تمام ایستگاه‌ها (به جز زرقان)، فراوانی وقوع طبقه خشکسالی متوسط بیشتر از طبقات خشکسالی شدید و بسیار شدید به دست آمد. سایر نتایج به دست آمده از محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه حاکی از این است که بیشترین فراوانی وقوع طبقات خشکسالی در ایستگاه‌های هواشناسی درودزن و تخت جمشید (واقع در حوضه مرودشت-خرامه) و کمترین فراوانی وقوع طبقات خشکسالی در ایستگاه‌های قم و کهک (واقع در حوضه قم-کهک) مشاهده شده است.

- نتایج بررسی فراوانی وقوع طبقات شاخص هیدرولوژیکی SSI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه طی دوره آماری مد نظر نشان داد که طبقات خشکسالی در ایستگاه‌های شادآباد (مربوط به حوضه نیزار-سلفچگان) و خرامه (مربوط به حوضه مرودشت-خرامه) بیشتر از سایر ایستگاه‌های مطالعاتی است. ایستگاه هیدرومتری پل‌خان (مربوط به حوضه مرودشت-خرامه) نیز، ترسالی را بیشتر از خشکسالی تجربه کرده‌اند. همچنین در کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعاتی، فراوانی وقوع ترسالی شدید بیشتر از سایر طبقات ترسالی به دست آمد.

- نتایج حاصل از ترسیم نمودار مربوط به هر یک از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در گام‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی، بیان‌گر این موضوع است که تداوم دوره‌های مرطوب و خشک در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه طولانی‌تر است و تشخیص و تفکیک دوره‌ها بهتر صورت می‌گیرد. همچنین ابتدا و انتهای دوره‌های خشکسالی و ترسالی در کلیه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، بیشتر بر هم انطباق دارند. یان‌جون و همکاران (۲۰۱۲: ۴۳۴) نیز، سیر تکاملی خشکسالی SPI را در رودخانه هوانگ‌آبررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در مقیاس‌های بلندمدت، شدت خشکسالی افزایش می‌یابد.

- نتایج بررسی انطباقی مقادیر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI، SPEI، RDI با خشکسالی هیدرولوژیکی SSI در ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری هر یک از حوضه‌ها نشان داد که به‌طور کلی، روند شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با هم تطابق داشته و نوسانات دبی جریان متأثر از میزان بارش و تبخیر و تعرق است، به‌طوری که با کاهش و یا افزایش این دو، دبی نیز کم یا زیاد می‌شود که این نتیجه‌گیری با یافته‌های مطالعات آقاچوکچ (۲۰۱۵: ۱۲۷)، جهانگیر و همکاران (۱۴۰۱: ۵۴)، لی و همکاران (۲۰۲۰: ۵۸۶)، سلیمی و همکاران (۲۰۲۱: ۲) و وو و همکاران (۲۰۲۴) مبنی بر وجود ارتباط بین دو نوع خشکسالی مطابقت دارد.

¹. Yan-Jun². Huaihe River

همچنین بیشترین همبستگی متقاطع بین شاخص‌های SPI و SSI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سلفچگان و قلعه‌چم در تأخیر زمانی رو به جلو (مثبت) به اندازه گام زمانی ۱۲ ماه برابر ۰/۵۷۴ به دست آمد. سایر یافته‌ها نیز حاکی از این است که تنها بین شاخص‌های خشکسالی SPI و SSI در ایستگاه‌های سلفچگان و قلعه‌چم در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، همبستگی معنی‌دار به ترتیب در سطح ۵ و ۱ درصد وجود دارد. در همین زمینه آذرخشی و فرزادmehr (۱۴۰۰) طی پژوهش خود در زمینه ارتباط خشکسالی هواشناسی SPI و هیدرولوژیکی SDI طی بازه زمانی ۱۳۵۴ تا ۱۳۹۴ در ۴۲ حوضه آبخیز در استان خراسان رضوی به این نتیجه رسیدند که در ۹۵ درصد حوضه‌های مطالعاتی، ارتباط معناداری بین شاخص‌های مذکور وجود ندارد و فقط تعداد کمی از حوضه‌ها در تأخیر زمانی ۱۲ ماهه معنی‌دار هستند. وو و همکاران (۲۰۲۴) نیز در محدوده رودخانه‌های یلو، یانگ‌تسه و لانگانگ واقع در چین، به منظور تعیین زمان پاسخ خشکسالی هیدرولوژیکی SSI به خشکسالی هواشناسی SPI از همبستگی پیرسون استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که حساسیت پاسخ SSI به SPI و احتمالات و آستانه انتشار از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی بین دوره‌های روند افزایشی و کاهش متغیرهای آب و هواشناسی متفاوت است. بنابراین هنگام بررسی روابط و آستانه‌های انتشار خشکسالی، در نظر گرفتن متغیرهای هواشناسی در محاسبه تغییرات رژیم می‌تواند هشدار اولیه خشکسالی را بهبود بخشد. در پژوهش‌های جهانگیر و موسوی رینه (۱۳۹۹)، سلیمی و همکاران (۲۰۲۱) و جهانگیر و همکاران (۱۴۰۱) نیز بر انطباق کامل و رابطه مستقیم بین شاخص‌های SPI و SSI تأکید شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، خشکسالی یکی از بلایای طبیعی است که به صورت تدریجی در بازه زمانی بلندمدت به وجود می‌آید؛ به طوری که ابتدا خشکسالی هواشناسی با کاهش بارندگی در طولانی مدت اتفاق می‌افتد و در صورت تداوم آن، خشکسالی هیدرولوژیکی رخ می‌دهد که منجر به کاهش سطح آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. طی بررسی‌های به عمل آمده، کلیه ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری واقع در حوضه‌های مطالعاتی طی دوره آماری ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳، دوره‌های متناوب ترسالی و خشکسالی را پشت سر گذاشته‌اند؛ به طوری که به عنوان مثال برای شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، پایان آخرین دوره ترسالی در همه ایستگاه‌های هواشناسی به جز تخت جمشید و زرقان، اواخر سال ۲۰۲۱ بوده و در حال حاضر، ایستگاه‌های قم، کهک، سلفچگان و درودزن از سال ۲۰۲۱ تا زمان حاضر، دوره خشکسالی خود را سپری می‌کنند. بررسی دوره‌های ترسالی و خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه‌های مطالعاتی نیز حاکی از این است که کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری، دوره ترسالی خود را سپری می‌کنند و این موضوع، نشان‌دهنده تأخیر تأثیر خشکسالی هواشناسی روی خشکسالی هیدرولوژیکی است.

بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات پژوهشی آینده، روابط و آستانه‌های خشکسالی در نظر گرفته شود. همچنین در تصمیم‌گیری‌ها جهت استفاده از منابع آبی موجود تجدیدنظر صورت گیرد تا در آینده مشکل کم‌آبی در ابعاد وسیع وجود نداشته باشد و خسارات ناشی از این موضوع کاهش یابد. به عبارت دیگر، باید مدیریت جامع منابع آب شامل مدیریت عرضه و تقاضای آب به طور جدی در منطقه اجرا گردد و حتی‌الامکان با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی-اجتماعی ساکنان و ذی‌نفعان محلی، کشت محصولات کشاورزی آب‌بر کاهش یابد و از گسترش صنایع آب‌بر در منطقه جلوگیری شود.

شایان ذکر است که با توجه به محدودیت‌های تحقیق حاضر مانند عدم وجود داده‌های طولانی مدت و هم‌زمان بارش، تبخیر و تعرق و دبی در حوضه‌های مطالعاتی، امکان بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در طولانی مدت فراهم نبود. همین موضوع موجب می‌گردد که نتایج به دست آمده با عدم قطعیت همراه باشد. در نتیجه، میزان عدم قطعیت در محاسبه انواع شاخص‌های خشکسالی و به تبع آن در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب باید مد نظر قرار گیرد.

منابع

Azarakhshi, M., & Farzadmehr, J. (2022). Assessment the relation of meteorological and hydrological drought in Khorasan Razavi province. *Journal of Range and Watershed Managment*, 74(4), 689-702.

Abramowitz, M., & Stegun, I.A. (1965). *Handbook of Mathematical Functions, with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, 1046 pp.

- Alemu, G., DestaSh. & Tareke, K. (2024). Characterize and analysis of meteorological and hydrological drought trends under future climate change conditions in South Wollo, North Wollo, and Oromia Zones, in Ethiopia. *Heliyon*, 10(8), e29694.
- Azarakhshi, M., & Farzadmehr, J. (2022). Assessment the relation of meteorological and hydrological drought in Khorasan Razavi province. *Journal of Range and Watershed Managment*, 74(4), 689-702.
- Choubin, B., Malekian, A., & Sajedi-Hosseini, F. (2016). Lag-time and effect of meteorological drought on the groundwater level. *Iran- Watershed Management Science & Engineering*, 10(34), 35-43.
- Chan, S.Sh., Seidenfaden, I.K., Jensen, K.H. & Sonnenborg, T.O. (2021). Climate change impacts and uncertainly on spatiotemporal variation of drought indices for an irrigated catchment. *Journal of Hydrology*, 601, 126814.
- Choubin, B., Malekian, A., & Sajedi-Hosseini, F. (2016). Lag-time and effect of meteorological drought on the groundwater level. *Iran- Watershed Management Science & Engineering*, 10(34), 35-43.
- Das, S., Das, J., & Umamahesh, N.V., (2023). A non-stationary based approach to understand the propagation of meteorological to agricultural droughts. *Water Resources Management*, 37, 2483-2504.
- Ebadi Nehari, Z., Erfanian, M., & Kazempour Choursi. (2023). A new method for evaluation and comprehensive drought monitoring in the Urmia Lake Basin using a Synthesized Drought Index (SDI). *Applied Researches in Geographical Sciences*, 23(68), 243-257.
- Eghtedar Nezhad, M., Bazrafshan, O., & Sadeghi Lari, A. (2017). Adaptive evaluation of SPI, RDI and SDI indices in analyzing the meteorological and hydrological drought characteristics (Case study: Bam plain). *Water and Soil Science*, 26(4.2), 69-81.
- Faraji Amoqein, A., 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*, 10.22059/jwim.2024.371936.1141.
- Gumus, V., (2023). Evaluating the effect of the SPI and SPEI methods on drought monitoring over Turkey. *Journal of Hydrology*, 626, Part B, 130386.
- Hosseini Seddigh, S.M., & Jalali, M. (2024). Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's Self-Adjustment Index. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 2 (1), 93-106.
- Jahangir, M.H., & Mousavi, M. (2020). Comparative study of meteorological (SPI) and hydrological drought index (SSI) based on the best cumulative distribution function in Tehran Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 14(48),1-10.
- Jahangir, M.H., Asghari Kaleshani, F., & Sataryan asil, K. (2022). Comparative study of drought meteorological (SPI) and hydrological (SSI) indices based on the best cumulative distribution function for Urmia Basin, *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 53-63.
- Janbozorgi, M., Hanifepour, M., & Khosravi, H. (1400). Temporal changes of meteorological-hydrological drought (Case study: Gilan province). *Journal of Water and Soil Management and Modeling*, 1(2), 1-13.
- Javan, Kh. (2021). Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia basin. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 119-138.
- Karatayev, M., Clarke, M., Salnikov, V., Bekseitova, R., & Nizamova, M. (2022). Monitoring climate change, drought conditions and wheat production in Eurasia: the case study of Kazakhstan. *Heliyon*, 8(1), e08660.
- Li, M., Feng, Z., Zhang, M., & Yunhang, Y., (2024). Infulence of large-scale climate indices and regional meteorological elements on drought characteristics in the Luanhe river basin. *Atmospheric Research*, 300, 107219.

- Li, Y., Lu, H., Yang, K., Wang, W., Tang, Q., Khem, S., Yang, F., & Huang, Y. (2021). Meteorological and hydrological droughts in Mekong River Basin and surrounding areas under climate change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100873.
- Li, Y., Luo, L., Chang, J., Wang, Y., Guo, A., Fan, J., & Liu, Q. (2020). Hydrological drought evolution with a nonlinear joint index in regions with significant changes in underlying surface. *Journal of Hydrology*, 585, 124794.
- Masoompour Samakosh, J., Miri, M., & Rezaei, S. (2024). Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) of Iran based on multivariable standardized drought index. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 82-98.
- Mazidi, A., enayatpour, M., & Hosseini, S.S. (2021). Climate determination of Kerman province using ambrothermic curve methods, Domarten drought coefficient, Amberjeh climate view. *Geography and Human Relationships*, 4(2), 35-43.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 17-22 January 1993, 179-184.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. In proceeding of the Ninth Conferences on Applied Climatology, 15-20 Jan, Dallas, TX: American Meteorological Society, 233 - 236.
- Miller, R.B. & Fox, G.A. (2017). A Tool for drought planning in Oklahoma: Estimating and using drought-influenced flow exceedance curves. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 10, 35-46.
- Mirzayi hasanlo, A., Hirad Abghari, H., & Erfanian, M. (2021). Evaluation of SPEI drought index and trend analysis using nonparametric methods in the selected stations of Urmia Lake basin, *Journal of Watershed Management Research*, 11(22), 175-187.
- Mosaedi, A., & Ghabaei Sough, M. (2011). Modification of Standardized Precipitation Index (SPI) based on relevant probability distribution function. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 1206-1216.
- Mostafazadeh, R., & Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 633-643.
- Navidtalab, A., Askari, Gh., Ahmadpour, F., & Tahmasebi, M. (2020). Drought evaluation of a thirty-year period (1988–2017) in Lurestan province using the Percent of Normal precipitation Index (PNI). *Hydrogeomorphology*, 7(24), 107-125.
- Niu, J., Chen, J., Sun, & L. (2015). Exploration of drought evolution using numerical simulations over the Xijiang (West River) basin in South China. *Journal of Hydrology*. 526, 68–77.
- Parchami, N., Mostafazadeh, R., Esmaili Ouri, A., & Imani, R. (2023). Spatial variations of hydrological drought in different time scales in the rivers of Ardabil province. *Hydrogeomorphology*, 33(10), 21-36.
- Pouralkhas Nokandeie, M., Amanjahani, V., Hazbavi, Z., & Mostafazadeh, R., (2024). Indicators of estimating and assessing the meteorological and hydrological drought characteristics, *Journal of Environmental Sciences Studies*, 8(4), 7499-7516.
- Salimi, H., Asadi, E., & Darbandi, S. (2021). Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11(11), 1-10.
- Sarai Tabrizi, M., & Bariz, M. (2023). Investigation of drought management indicators downstream of Harirod sub-basin of Afghanistan. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 13, 177-192.
- Sari Saraf, B., Mahmoudi, S., Zangeneh, S., & Pashaei, Z. (2015). Monitoring and Predicting the Wet and Drought Periods in Tabriz Using CLIMGEN Models and SPI. *Hydrogeomorphology*, 2(2), 61-78.

- Shah, R., Bharadiya, N., & Manekar, V. (2015). Drought index computation using Standardized Precipitation Index (SPI) method for Surat district, Gujarat. *Aquatic Procedia*, 4, 1243-1249.
- Sobhani, B., Jafarzadehaliabad, L., & Safarianzengir, V. (2020). Modelling, Analysis, and Prediction of Drought Phenomenon in Iran. *Hydrogeomorphology*, 6(21), 181-202.
- Talebiniaya, M., & Khosravi, H., (2021). The relation between meteorological drought and groundwater quality in arid and semi-arid climate (Case study: Isfahan province). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(41), 269-285.
- Teimouri, M., Gholami, V., & Khaleghi, M.R., (2023). Assesment of drought impacts on rainfed wheat yield using SPI and Agricultural- SPI indices (Case study: North Khorasan province). *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(2), 17-27.
- Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI), *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 106, 1-10.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H., (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9-10, 3-11.
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resource Management*, 21, 821-833.
- Vicente-Serrano, S., Begueria, S., & Lopez-moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S., López-Moreno, J.I., Begueria, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2011). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), 318-332.
- Wang, M., Jiang, Sh., Ren, L., Xu, Ch., Menzel, L., Yuan, F., Xu, Q., Liu, Y., & Yang, X., (2021). Separating the effects of climate change and human activities on drought propagation via a natural and human-impacted catchment comparison method. *Journal of Hydrology*, 603, Part A, 126913.
- Wu, J., Liu, Zh., Yao, H., Chen, X., Chen, X., Zheng, Y., He, Y. (2018a). Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought. *Journal of Hydrology*, 563, 726-736.
- Wu, J., Zhang, X., Wang, G., Wu, W., Zhang, D., & Lan, T., (2024). Impact of hydrometeorological regime shifts on drought propagation: The meteorological to hydrological perspective. *Journal of Hydrology*, 638, 131476.
- Yan-jun, L., Xiao-dong, Zh., Fan, L., & Jing, M., (2012). Analysis of drought evolvment characteristics based on standardized precipitation index in the Huaihe River Basin. *Procedia Engineering*, 2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering, 28, 434-437.
- Yousefi, H., Nohegar, A., Khosravi, Z., & Azizabadi Farahani, M. (2015). Drought modeling and management using SPI and RDI indexes (Case study: Markazi province). *Iranian journal of Ecohydrology*, 2(3), 337-344.
- Zhang, P., Cai, Y., Cong, P., Xie, Y., Chen, W., Cai, J., & Bai, X., (2024). Quantitation of meteorological, hydrological and agricultural drought under climate change in the East River basin of south China. *Ecological Indicators*, 158, 111304.