Journal of Water and Sustainable Development. September 2026
Volume 13. Issue 2 (Serial No. 40). pages 121 to 134

نشریه آب و توسعه پایدار. شهریور ماه ۱۴۰۵
سال سیزدهم. شماره دوم (پیاپی ۴۰). صفحات ۱۲۱ تا ۱۳۴

Document Type: Technical Paper

نوع مقاله: فنی و ترویجی

Quantitative Assessment of Meteorological and Hydrological Drought Propagation in the Zayandehroud Basin Using SPI, SRI, and Severity–Area–Frequency (SAF) Curves

Gh. Bahman[1], M. Tabashiri[2*], M. A. Alijanian[3]

1, 2- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

*** Corresponding, Author Email:** mahditabashiri.mt1379@trn.ui.ac.ir

Received ▶ 19-02-2026
Revised ▶ 17-05-2026
Accepted ▶ 15-06-2026
Available online ▶ 16-09-2026

Abstract

This study quantitatively assesses the propagation of meteorological and hydrological drought in the Zayandehroud Basin using the Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Runoff Index (SRI), and Severity–Area–Frequency (SAF) curves. The primary objective is to investigate the relationships between drought patterns across three critical sections of the basin: the upstream source region, the Zayandehroud Dam, and the downstream demand region. Using monthly precipitation and river flow data for the period 1988–2018, the indices were calculated at 3-, 6-, and 12-month time scales. The results indicate that meteorological droughts occur more frequently and with greater severity in the downstream region than in the upstream region. Hydrological droughts emerge with a time lag and greater severity relative to meteorological droughts, indicating the propagation of drought impacts through the basin's hydrological system. The SAF analysis shows that Zayandehroud Dam moderates the severity of hydrological drought at its outlet, particularly at medium- and long-term time scales; however, this buffering effect weakens during prolonged drought events. In addition, the downstream region exhibits greater vulnerability to spatially extensive droughts. This integrated assessment provides a comprehensive framework for understanding drought propagation in regulated river basins and offers insights into developing drought-adaptive management strategies and reservoir operation policies in the Zayandehroud Basin.

Keywords: Meteorological Drought, Hydrological Drought, Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Runoff Index (SRI), Severity–Area–Frequency (SAF) Curves, Zayandehroud Basin.

ارزیابی کمی انتشار خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه‌ی زاینده‌رود با استفاده از شاخص‌های SPI، SRI و منحنی‌های شدت-مساحت-فراوانی (SAF)

غزاله بهمن[۱]، مهدی تباشیری[۲*]، محمدعلی علیجانیان[۳]

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

***رایانامه نویسنده مسئول:** mahditabashiri.mt1379@trn.ui.ac.ir

تاریخ دریافت ◀ ۱۴۰۵/۱۱/۳۰
تاریخ بازنگری ◀ ۱۴۰۵/۰۲/۲۷
تاریخ پذیرش ◀ ۱۴۰۵/۰۳/۲۵
تاریخ انتشار ◀ ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

چکیده

این مطالعه با کاربرد شاخص استانداردشده بارش (SPI)، شاخص استانداردشده رواناب (SRI) و منحنی‌های شدت-مساحت-فراوانی (SAF)، به ارزیابی کمّی انتشار خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه‌ی زاینده‌رود پرداخته است. هدف اصلی، بررسی ارتباط بین الگوهای خشکسالی در سه بخش حیاتی حوضه شامل منطقه منبع بالادست، سد زاینده‌رود، و منطقه مصرف پایین‌دست است. با استفاده از داده‌های ماهانه بارش و جریان رودخانه در بازه‌ی ۱۹۸۸-۲۰۱۸، شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهد که خشکسالی‌های هواشناسی در منطقه پایین‌دست در مقایسه با بالادست، شدیدتر و مکررتر رخ می‌دهند و خشکسالی‌های هیدرولوژیکی با تأخیر زمانی و شدت بیشتری نسبت به خشکسالی هواشناسی ظاهر می‌شوند که بیانگر فرآیند انتقال اثر خشکسالی در سیستم هیدرولوژیکی حوضه است. تحلیل منحنی‌های SAF نشان می‌دهد که سد زاینده‌رود شدت خشکسالی هیدرولوژیکی را در خروجی خود، به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی متوسط و بلندمدت، تعدیل می‌کند؛ اما این اثر حائلی در دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت کاهش می‌یابد. افزون بر این، منطقه پایین‌دست آسیب‌پذیری بیشتری در برابر خشکسالی‌های گسترده نشان می‌دهد. این ارزیابی یکپارچه، چارچوبی جامع برای درک انتقال خشکسالی در حوضه‌های تنظیم‌شده فراهم می‌کند و بینش‌هایی برای توسعه راهبردهای مدیریتی سازگار با خشکسالی و سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در حوضه‌ی زاینده‌رود ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص استاندارد بارش (SPI)، شاخص استاندارد رواناب (SRI)، منحنی شدت-مساحت-فراوانی (SAF)، حوضه زاینده‌رود.

How to cite this article:

Bahman, Gh., Tabashiri, M. and Alijanian, M.A. (2026). Quantitative Assessment of Meteorological and Hydrological Drought Propagation in the Zayandehroud Basin Using SPI, SRI, and Severity–Area–Frequency (SAF) Curves. Journal of Water and Sustainable Development, 13(2), 121-134. https://doi.org/10.22067/jwsd.v13i2.2602-1506

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالشی فزاینده در قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود (Wilhite، ۲۰۰۰). بر اساس گزارش‌های اخیر سازمان ملل، خسارات اقتصادی ناشی از خشکسالی در دو دهه گذشته از ۱۲۴ میلیارد دلار فراتر رفته و بیش از ۱/۵ میلیارد نفر در سراسر جهان را تحت تأثیر قرار داده است (UNCCD، ۲۰۲۲). ایران که در کمربند خشک جهان قرار دارد، به دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت ناپایدار منابع آب با مخاطرات مضاعف مواجه است (Madani و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات نشان داده‌اند که هم فراوانی و هم شدت رویدادهای خشکسالی در ایران طی سه دهه گذشته به طور قابل توجهی افزایش یافته است (Sharafi و همکاران، ۲۰۲۲).

حوضه‌ی رودخانه زاینده‌رود، به عنوان یک سیستم هیدرولوژیکی حیاتی در فلات مرکزی ایران، نقش کلیدی در تأمین آب، غذا و امنیت اقتصادی برای بیش از ۵ میلیون نفر ایفا کرده و بخش‌های صنعتی مهمی را پشتیبانی می‌کند (Safavi و همکاران، ۲۰۱۴). این حوضه با مساحتی حدود ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع، از کوهستان‌های مرکزی زاگرس سرچشمه گرفته و در تالاب بین‌المللی گاوخونی در شرق اصفهان به پایان می‌رسد (Jalili Pirani و Modaress، ۲۰۲۰). با این حال، تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر و روش‌های مدیریت ناپایدار آب، این اکوسیستم حیاتی را به سوی بحرانی شدید سوق داده‌اند (Morid و همکاران، ۲۰۰۶).

پژوهش‌های موجود در مورد خشکسالی در حوضه زاینده‌رود را می‌توان در چند موضوع دسته‌بندی کرد. یک گروه از مطالعات بر تحلیل روند بارش و دما متمرکز شده‌اند (Tabari و Talaee، ۲۰۱۱؛ Modarres و Silva، ۲۰۰۷). به عنوان مثال، Modarres و Silva (۲۰۰۷) به بررسی روندهای بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پرداخته است. این مطالعه بازه زمانی ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۰ را به عنوان دوره مورد مطالعه انتخاب کرده است. این بازه زمانی به دلیل دسترسی به داده‌های بارش معتبر و مداوم از ایستگاه‌های هواشناسی در سراسر ایران، انتخاب شده است. نتایج نشان داد که بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران ، به‌ویژه در مناطق جنوبی و شرقی کشور، روند کاهشی در بارش را تجربه کرده‌اند.گروه دیگری از شاخص‌های متعارف هواشناسی و هیدرولوژیکی برای پایش خشکسالی استفاده کرده‌اند، مانند ارزیابی تطبیقی هفت شاخص خشکسالی در ایران. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص SPI (به ویژه در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه) به دلیل سادگی محاسبه، پایداری زمانی و تطبیق خوب با شرایط اقلیمی ایران، بهترین عملکرد را در پایش خشکسالی داشته است، در حالی که PDSI به دلیل نیاز به داده‌های دما و تبخیر-تعریق، در ایران کمتر قابل اعتماد بود (Morid و همکاران، ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر، رویکردهای سنجش از دور نیز معرفی شده‌اند؛ Alijanian و Dehghani (۲۰۲۳) دقت داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS را برای پایش خشکسالی با استفاده از ۱۷ ایستگاه ارزیابی کردند. در پژوهشی دیگر محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره را در سراسر ایران مورد سنجش قرار دادند. نتایج نشان داد که CHIRPS به طور کلی دقت قابل قبولی در پیش‌بینی بارش در مناطق مختلف ایران دارد، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، اما در مناطق کوهستانی و دارای تغییرات اقلیمی شدید، دقت آن کمتر است (Ghozat و همکاران، ۲۰۲۱).

علی‌رغم این پیشرفت‌ها، شکاف قابل توجهی در درک چگونگی گسترش خشکسالی در طول حوضه آبریز و انتقال خشکسالی از بالادست به پایین‌دست، با لحاظ صریح نقش تنظیمی سد زاینده‌رود، باقی مانده است. مطالعات معدودی به صورت کمّی، اخطار خشکسالی را در سیستم یکپارچه‌ی تأمین طبیعی (بالادست)، تنظیم زیرساختی (سد) و تقاضای انسانی (پایین‌دست) ارزیابی کرده‌اند. این مطالعه با ارائه یک تحلیل سیستماتیک و کمّی از ویژگی‌های خشکسالی در بخش‌های کلیدی حوضه با استفاده از SPI، SRI و منحنی‌های SAF، به پرکردن این شکاف می‌پردازد. اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از: (۱) مقایسه شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در مناطق بالادست، ورودی/خروجی سد و پایین‌دست؛ (۲) ارزیابی نقش سد در تغییر خشکسالی هیدرولوژیکی؛ و (۳) بررسی آسیب‌پذیری فضایی از طریق منحنی‌های SAF. یافته‌ها در جستجوی ارائه مبنای علمی مستحکمی برای راهبردهای مدیریت خشکسالی و بهره‌برداری سازگار از مخازن در حوضه‌های تنظیم‌شده هستند.

منطقه مطالعه

حوضه آبریز زاینده‌رود با مختصات جغرافیایی ´۵۰ °۳۰ تا ´۱۵ °۵۵ شرقی و ´۴۶ °۳۱ تا ´۳۳ °۰۰ شمالی، مهم‌ترین حوضه آبریز فلات مرکزی ایران با وسعت تقریبی ۴۱٫۵۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۱). این حوضه بر اساس عملکرد هیدرولوژیکی به چهار واحد تحلیلی مجزا تقسیم شد تا اثرات تفکیک‌شده خشکسالی ارزیابی شود:

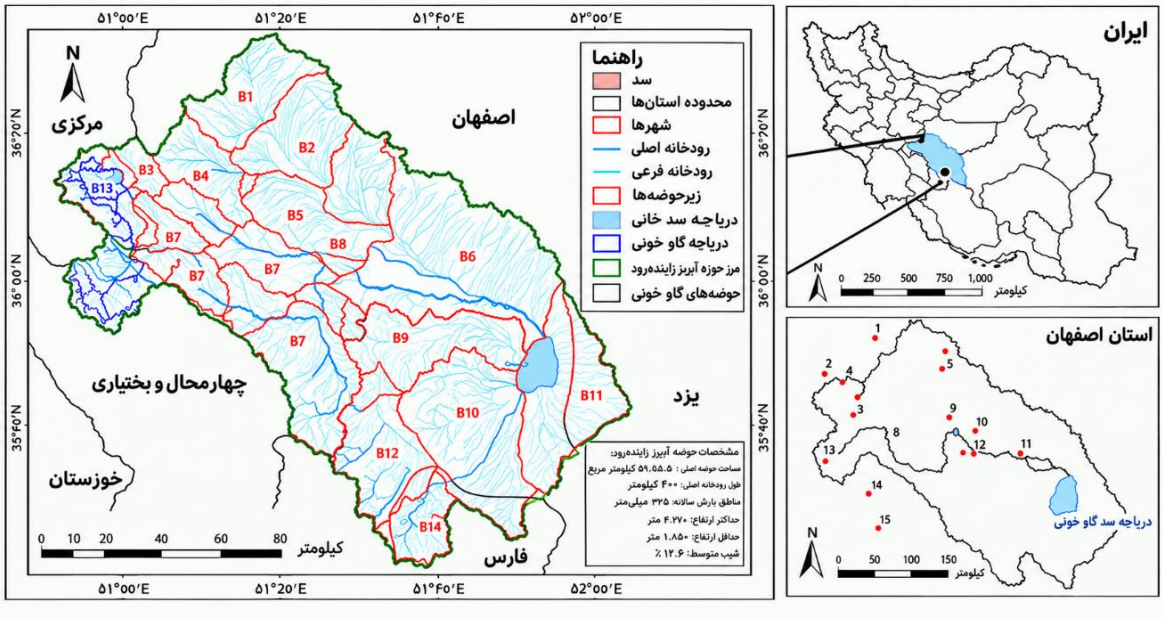
۱) منطقه بالادست سد: ۹ ایستگاه باران‌سنجی در ارتفاعات زاگرس با میانگین بارش سالانه ۴۵۰-۶۵۰ میلی‌متر که ۸۵٪ از جریان سطحی حوضه را تولید می‌کنند.

۲) ورودی به مخزن سد: داده‌های هیدرومتری ماهانه ورودی به مخزن سد زاینده‌رود که نمایانگر خروجی هیدرولوژیکی منطقه بالادست است.

۳) خروجی از سد: داده‌های رهاسازی تنظیم‌شده سد که نشان‌دهنده تأمین آب مدیریت‌شده برای پایین‌دست است.

۴) منطقه پایین‌دست سد: ۸ ایستگاه باران‌سنجی در دشت‌های کشاورزی با میانگین بارش ۱۰۰-۱۵۰ میلی‌متر که ۹۵٪ از مصارف آب حوضه را به خود اختصاص می‌دهند.

این طبقه‌بندی چهارگانه امکان بررسی دقیق‌تر انتشار خشکسالی از منابع طبیعی (بالادست) تا مصارف انسانی (پایین‌دست) با در نظر گرفتن نقش واسطه‌ای سد را فراهم می‌سازد. جدول (۱) موقعیت مکانی ۱۷ ایستگاه را مشخص نموده است.



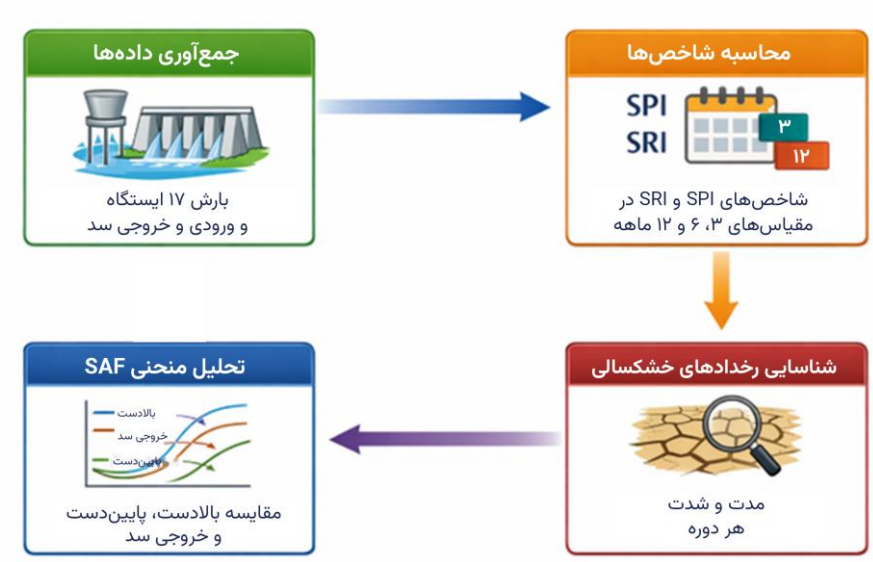
شکل ۱- موقعیت حوضه زاینده‌رود و ایستگاه‌ها

جدول ۱- موقعیت ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی حوضه زاینده‌رود (Islamic Republic of Iran Meteorological Organization [IRIMO], 2018)

شناسه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	موقعیت ایستگاه
۱	آزنوله	50°07′12″	33°10′48″	بالادست
۲	کلب علی	50°43′12″	33°34′48″	بالادست
۳	رزوه چادگان	50°34′12″	33°01′48″	بالادست
۴	سراوان	50°22′12″	33°07′12″	بالادست
۵	یانچشمه	50°43′12″	32°07′12″	بالادست
۶	کوهرنگ	50°07′48″	32°27′36″	بالادست
۷	جونقان	50°38′60″	32°07′12″	بالادست
۸	کردعلیا	50°02′00″	33°32′60″	بالادست
۹	مرغملک	50°28′48″	32°53′60″	بالادست
۱۰	خمینی‌شهر	51°31′48″	32°46′12″	پایین دست
۱۱	پیکان	51°10′12″	32°28′12″	پایین دست
۱۲	تاد	51°31′12″	33°13′48″	پایین دست
۱۳	اصفهان	51°42′36″	32°31′12″	پایین دست
۱۴	اصفهان (فرودگاه)	51°51′36″	32°44′24″	پایین دست
۱۵	کبوترآباد	51°49′48″	32°31′12″	پایین دست
۱۶	فلاورجان	51°31′12″	33°23′60″	پایین دست
۱۷	کلیشاد رخ	51°04′48″	33°36′00″	پایین دست

مواد و روش‌ها

چارچوب روش‌شناختی این پژوهش که در شکل (۲) ارائه شده است، شامل مراحل متوالی و به هم پیوسته‌ای می‌باشد. پس از جمع‌آوری و کنترل کیفیت داده‌ها، شاخص‌های خشکسالی SPIو SRI برای چهار بخش مورد مطالعه محاسبه شد. سپس ویژگی‌های کلیدی خشکسالی شامل شدت، مدت و فراوانی با استفاده از نظریه Run استخراج شد. در مرحله بعد، تحلیل روند زمانی و مقایسه آماری بین واحدهای مختلف انجام گرفت. در نهایت، تحلیل فضایی برای نمایش الگوی مکانی خشکسالی در حوضه به کار رفت.



شکل ۲- نمودار روش‌شناسی تحقیق (گردآوری داده‌ها، محاسبه شاخص، شناسایی رخداد خشکسالی، تحلیل منحنی SAF)

۱. مجموعه داده‌ها و کنترل کیفیت

سه منبع داده اصلی استفاده شد: (۱) داده‌های ماهانه بارش (۱۹۸۸-۲۰۱۸) از ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی (سازمان هواشناسی ایران)؛ (۲) داده‌های ماهانه ورودی و خروجی سد زاینده‌رود (شرکت آب منطقه‌ای اصفهان)؛ و (۳) سری‌های زمانی ماهانه دبی جریان در سه نقطه هیدرومتری. یک رویه چندمرحله‌ای کنترل کیفیت اعمال شد: تحلیل منحنی جرم مضاعف برای شناسایی ناهمگنی‌ها (Searcy و Hardison، ۱۹۶۰)، آزمون پتیت برای تشخیص نقاط تغییر ناگهانی (Pettitt، ۱۹۷۹) و پرکردن داده‌های مفقود با روش نسبت نرمال اصلاح‌شده با در نظرگیری همبستگی فضایی و ارتفاع (Teegavarapu و همکاران، ۲۰۱۹). این مراحل برای اطمینان از کیفیت داده‌ها قبل از تحلیل‌های بعدی (مثل تحلیل خشکسالی) انجام می‌شود تا نتایج قابل اعتماد باشند.

۲. شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده

- شاخص استاندارد شده بارش (Standardized Precipitation Index - SPI)

SPI که توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳) توسعه یافت، مبتنی بر این اصل است که کمبود بارش مهم‌ترین علت خشکسالی هواشناسی است. الگوریتم محاسبه SPI در این پژوهش شامل مراحل زیر بود:

۱) برازش توزیع گاما: توزیع گاما بهترین برازش را داشت بنابراین، برای هر ماه تقویمی (ژانویه تا دسامبر) در هر ایستگاه، توزیع گاما دوپارامتره به داده‌های بارندگی تاریخی برازش داده شد:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{\frac{-x}{\beta}} \qquad X > 0$$

که در آن α پارامتر شکل و β پارامتر مقیاس است.

۲) تبدیل به احتمال تجمعی: احتمال تجمعی برای هر مقدار بارندگی مشاهده‌شده محاسبه شد.

۳) استانداردسازی نرمال: با استفاده از تبدیل معکوس توزیع نرمال استاندارد، مقادیر SPI به دست آمد:

$$SPI = \phi^{-1}(F(x))$$

ϕ^{-1} معکوس توزیع نرمال استاندارد و F(x) تابع توزیع تجمعی گاما است.

- شاخص استانداردشده جریان (Standardized Runoff Index - SRI)

برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی در نقاط ورودی و خروجی سد، از شاخص SRI استفاده شد که توسط Shukla و Wood (۲۰۰۸) توسعه یافت. SRI از لحاظ مفهومی مشابه SPIاست، اما به جای بارندگی، بر داده‌های رواناب سطحی اعمال می‌شود. مراحل محاسبه SRI در این مطالعه شامل:

۱) محاسبه جریان ماهانه: تبدیل داده‌های روزانه به مقادیر ماهانه با حفظ پیوستگی زمانی.

۲) برازش توزیع لجستیک تعمیم‌یافته (Generalized Logistic Distribution): این توزیع به دلیل انعطاف‌پذیری در توصیف رفتار جریان‌های سطحی انتخاب شد.
۳) استانداردسازی: مشابه SPI ، مقادیر جریان به مقادیر استاندارد تبدیل شدند.

۳. طبقه‌بندی شدت خشکسالی

مقادیر SPI و SRI بر اساس طبقه‌بندی استاندارد جدول (۲) تفسیر شدند (Yevjevich ، ۱۹۶۷).

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیرSPI/SRI

طبقه خشکسالی	مقدارSPI/SRI
خشکسالی خفیف	۰ تا ۰/۹۹-
خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۵- تا ۱/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از ۲-

۴. استخراج ویژگی‌های خشکسالی

برای هر دوره خشک شناسایی‌شده، سه ویژگی کلیدی استخراج گردید: شدت به‌عنوان مجموع مقادیر منفی شاخص در طول دوره، مدت به‌عنوان تعداد ماه‌های متوالی خشکسالی، و بزرگ‌ترین کسری به‌عنوان بیشترین مقدار منفی شاخص در طول دوره. تحلیل‌های آماری شامل آزمون روند من-کندال برای شناسایی روندهای معنادار در سری‌های زمانی شاخص‌ها (Mann ، ۱۹۴۵) و تخمین‌گر سِن برای محاسبه شیب روند خطی (Sen، ۱۹۶۸) بود. همچنین، برای مقایسه همزمان ویژگی‌های خشکسالی بین چهار واحد تحلیلی، تحلیل واریانس چندمتغیره انجام شد. در ادامه، منحنی‌های شدت-مساحت-فراوانی (SAF) برای بررسی رابطه بین شدت خشکسالی، میزان پوشش منطقه‌ای و دوره بازگشت ترسیم شدند (شکل ۷). در تحلیل SAF، مؤلفه مساحت بر اساس پوشش ایستگاه‌های مورد بررسی در حوضه تعیین شد و برای سطوح مختلف پوشش، شدت متناظر با دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه گردید.

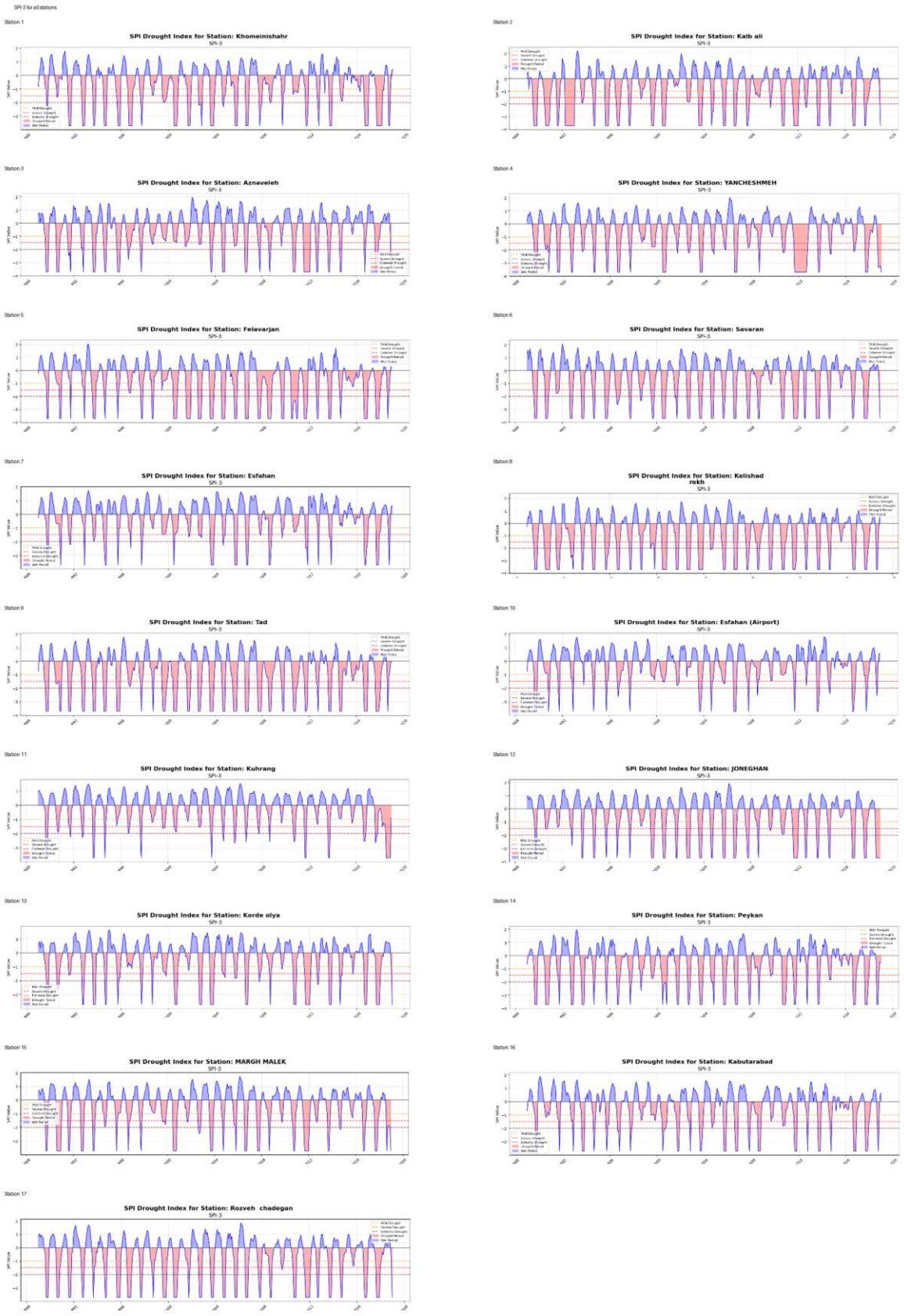
نتایج

۱. محاسبه شاخص‌های خشکسالی

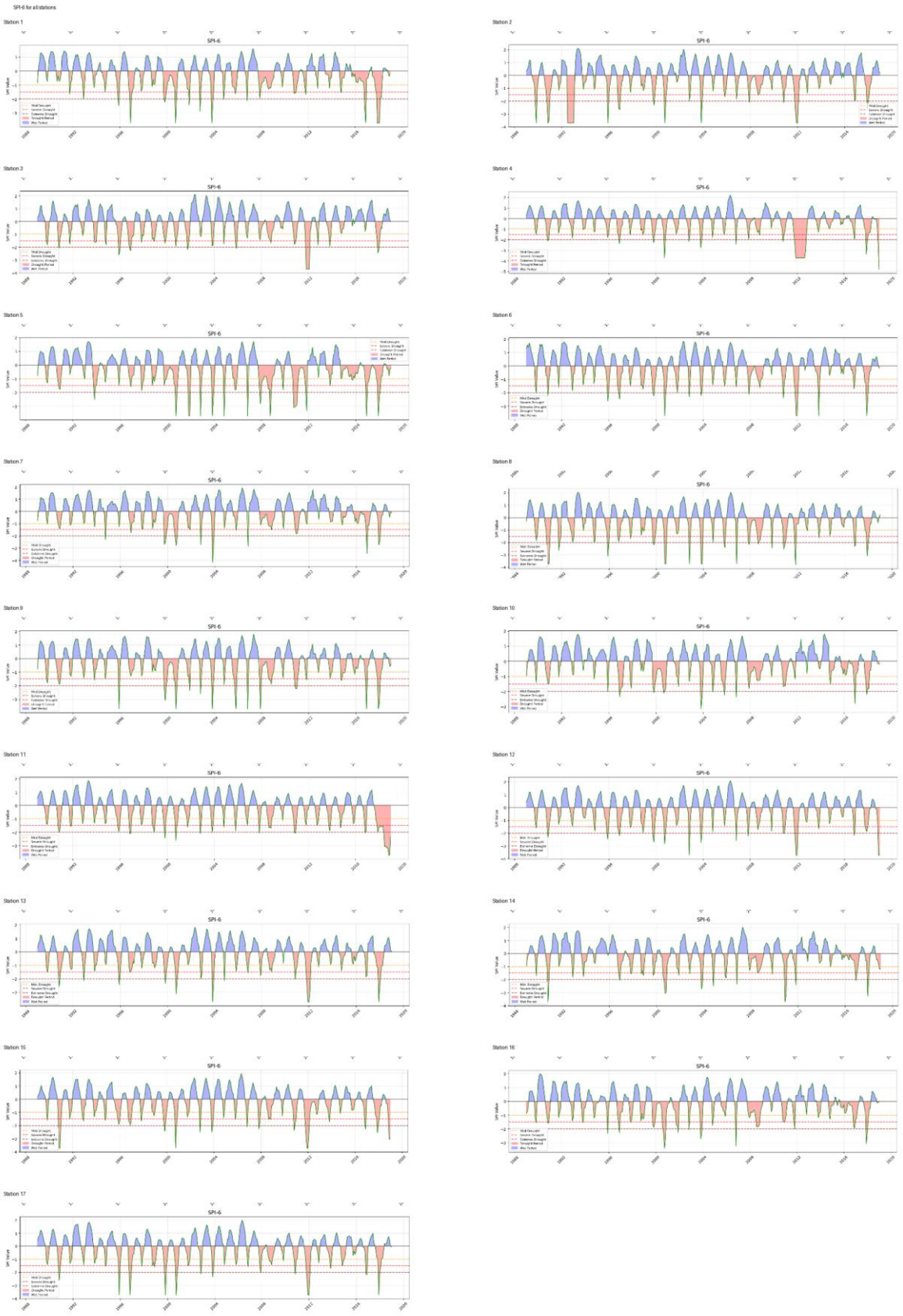
در این پژوهش، شاخص SPI برای سه مقیاس زمانی مختلف محاسبه شد: مقیاس سه ماهه که به تغییرات فصلی و خشکسالی‌های کوتاه‌مدت کشاورزی حساس است، مقیاس شش ماهه که شرایط میان‌مدت و تأثیر بر منابع آب سطحی را نشان می‌دهد، و مقیاس دوازده ماهه که بیانگر خشکسالی‌های بلندمدت و اثرات هیدرولوژیکی می‌باشد. نمودار زمانی شاخص SPI در سه دوره زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای هر ۱۷ ایستگاه رسم شد و دوره‌های خشکسالی تعیین گردید. در شکل (۳) نمودار SPI_3,6,12 برای هر ۱۷ ایستگاه، از بالادست و پایین‌دست نمایش داده شده است. نمودار زمانی شاخص SRI نیز در سه دوره زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای ورودی و خروجی سد زاینده رود رسم شد و دوره‌های خشکسالی تعیین گردید. در شکل (۴) و (۵) نمودار شاخص SRI_3,6,12 به ترتیب برای ورودی و خروجی سد مشخص شده است.

۲. تحلیل منحنی‌های شدت-مساحت-فراوانی (SAF)

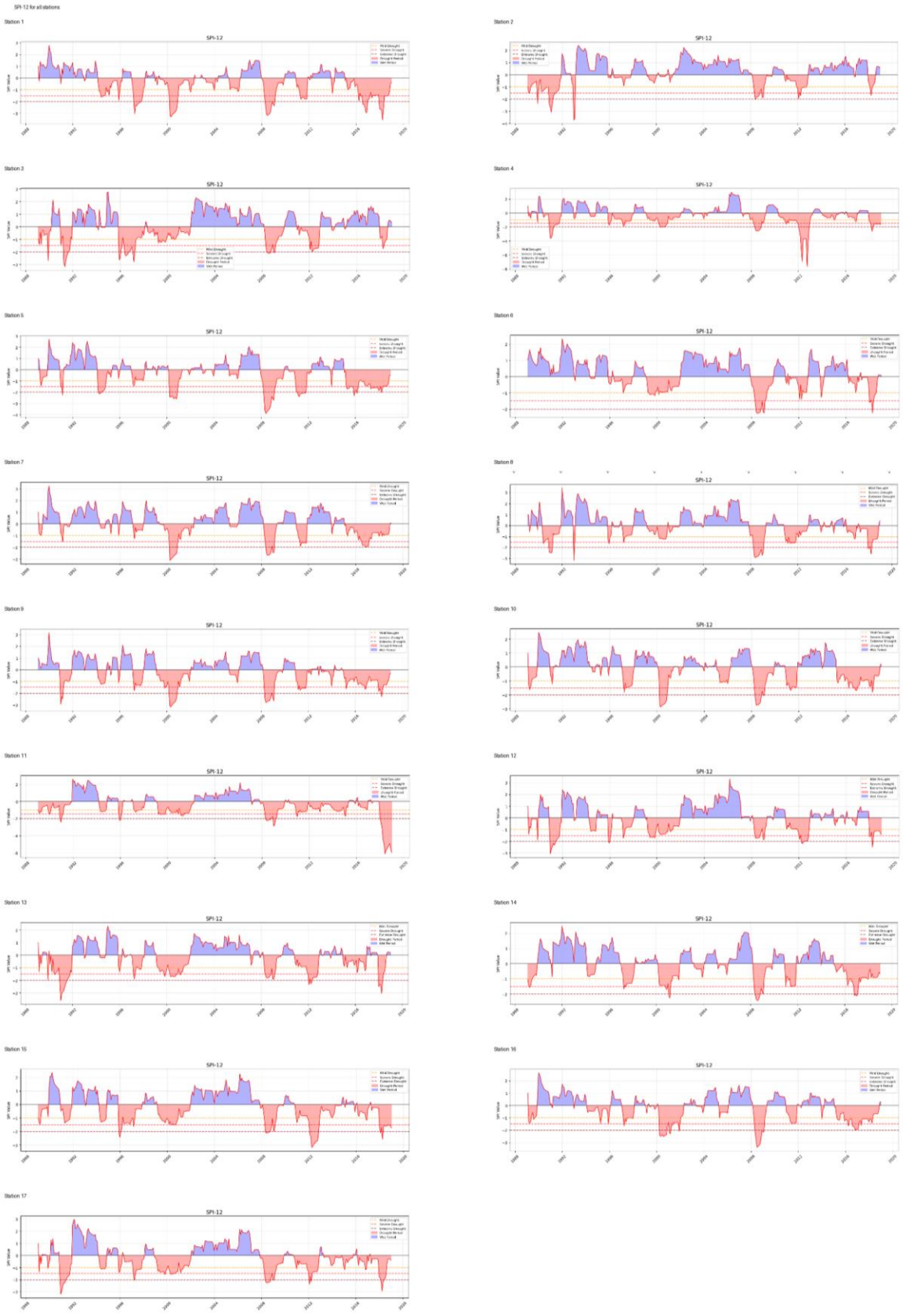
برای ایستگاه‌های باران‌سنجی، گستره مکانی خشکسالی به‌صورت درصد ایستگاه‌هایی که به‌طور هم‌زمان در وضعیت خشکسالی قرار دارند تعریف شد. نتایج حاصل از نمودارهای شکل (۶) و (۷) به ترتیب در بالادست و پایین‌دست که رابطه بین درصد مساحت تحت تأثیر خشکسالی (percent area) و مقادیر شاخص SPI را برای دوره‌های بازگشت مختلف (T=5, 10, 20, 50) نشان می‌دهند، روند کلی مشابهی را در هر دو بخش حوضه آشکار می‌سازد. در تمامی نمودارها، مشاهده می‌شود که با افزایش"percent area"، مقادیر شاخص‌های SPI-3، SPI-6 و SPI-12 کاهش می‌یابند. این روند بیانگر آن است که هرچه گستردگی مناطق تحت تأثیر خشکسالی افزایش یابد، شدت خشکسالی (بر اساس SPI) در کل حوضه، اعم از بالادست و پایین‌دست، افزایش می‌یابد. تفاوت‌های جزئی در رفتار سری‌های مربوط به دوره‌های بازگشت مختلف (T) مشاهده می‌شود. به طور کلی، سری‌های با دوره بازگشت طولانی‌تر مانند (T=50) تمایل به نشان دادن مقادیر پایین‌تر SPI یا کاهش سریع‌تر آن با افزایش "percent area" دارند، که این امر بر تأثیر عمیق‌تر و ماندگارتر خشکسالی‌های بلندمدت تأکید دارد.


SPI-3 for all stations
Station 1
SPI Drought Index for Station: Khomeinishahr
SPI-3
Station 2
SPI Drought Index for Station: Kalb ali
SPI-3
Station 3
SPI Drought Index for Station: Aznaveleh
SPI-3
Station 4
SPI Drought Index for Station: YANCHESHMEH
SPI-3
Station 5
SPI Drought Index for Station: Felavarjan
SPI-3
Station 6
SPI Drought Index for Station: Savaran
SPI-3
Station 7
SPI Drought Index for Station: Esfahan
SPI-3
Station 8
SPI Drought Index for Station: Kelishad rokh
SPI-3
Station 9
SPI Drought Index for Station: Tad
SPI-3
Station 10
SPI Drought Index for Station: Esfahan (Airport)
SPI-3
Station 11
SPI Drought Index for Station: Kuhrang
SPI-3
Station 12
SPI Drought Index for Station: JONEGHAN
SPI-3
Station 13
SPI Drought Index for Station: Korde olya
SPI-3
Station 14
SPI Drought Index for Station: Peykan
SPI-3
Station 15
SPI Drought Index for Station: MARGH MALEK
SPI-3
Station 16
SPI Drought Index for Station: Kabutarabad
SPI-3
Station 17
SPI Drought Index for Station: Rozveh chadegan
SPI-3

(الف)

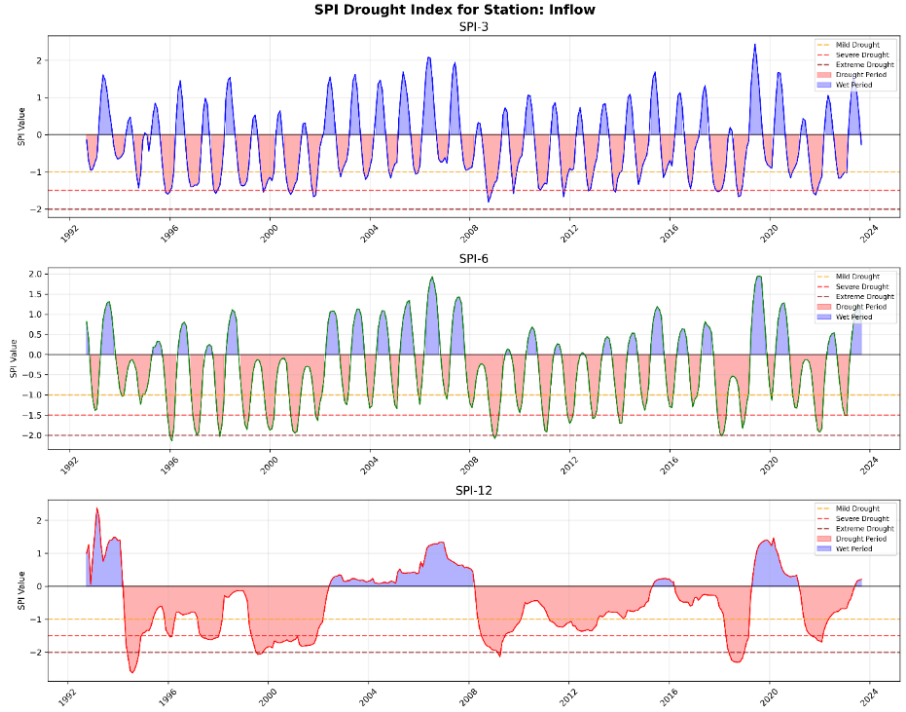

SPI-6 for all stations
Station 1
Station 2
Station 3
Station 4
Station 5
Station 6
Station 7
Station 8
Station 9
Station 10
Station 11
Station 12
Station 13
Station 14
Station 15
Station 16
Station 17
SPI-6

(ب)

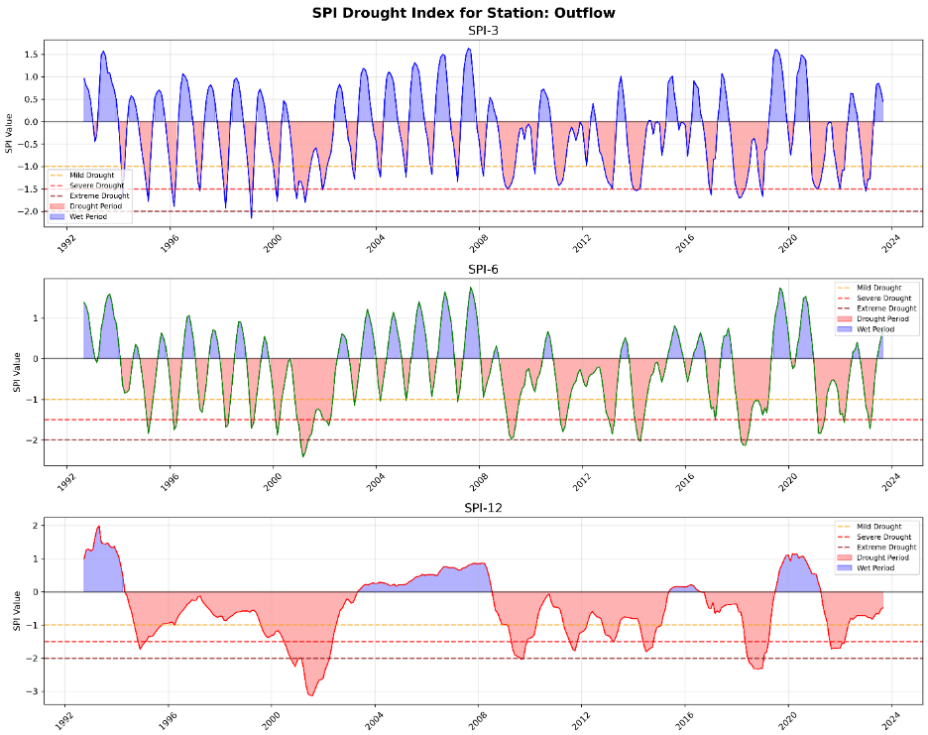


(ج)

شکل ۳- تغییرات شدت و تداوم خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف براساس شاخص‌های استاندارد بارش (الف: SPI-3، ب: SPI-6 و ج: SPI-12) در ۱۷ ایستگاه مورد مطالعه طی دوره آماری تحقیق



شکل ۴- شاخص SRI_3,6,12 ورودی سد زاینده‌رود



شکل ۵- شاخص SRI_3,6,12 خروجی سد زاینده‌رود

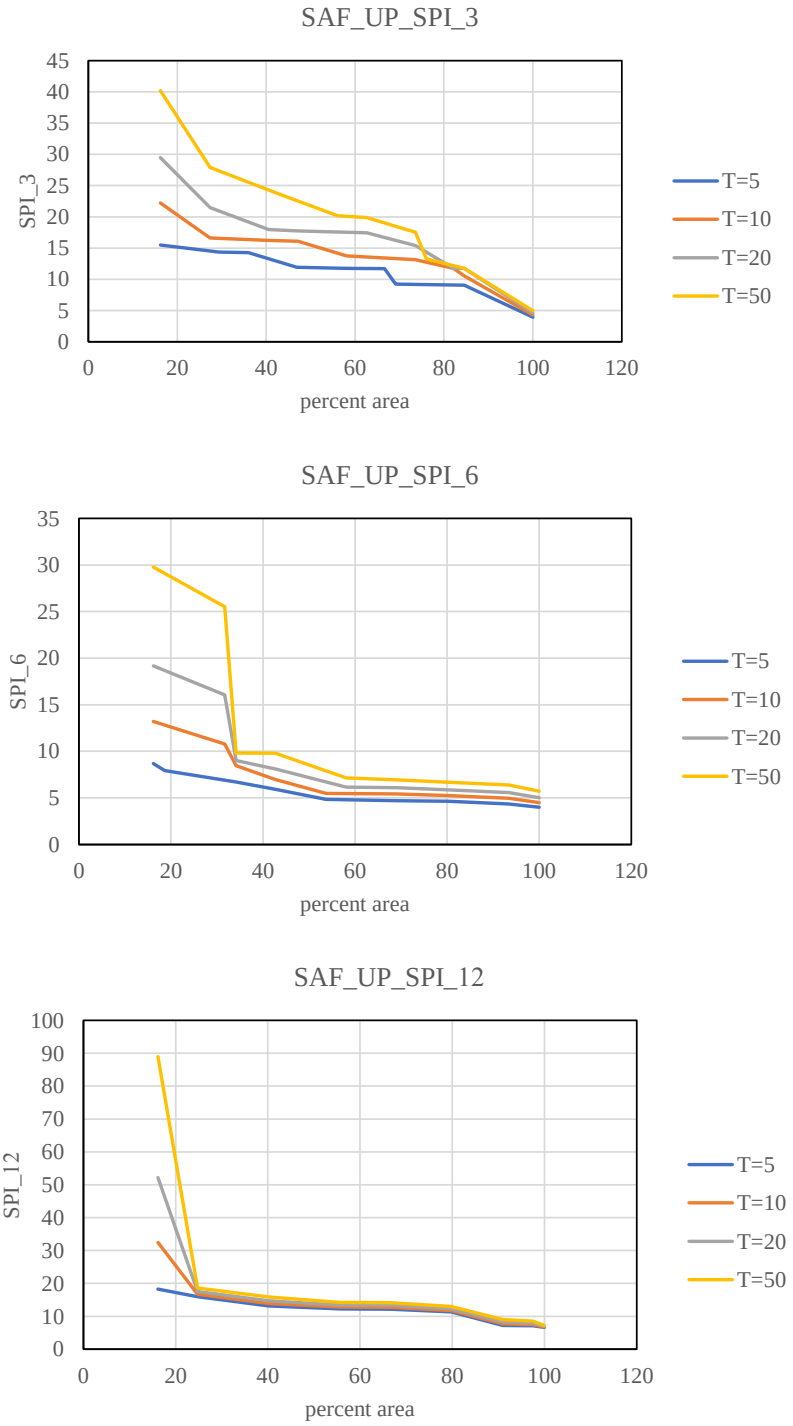
یک نکته قابل توجه در نمودار SAF_DOWN_SPI_12 (پایین‌دست)، افزایش شیب کاهش شاخص در محدوده ۷۰٪ تا ۹۰٪ "percent area" است که می‌تواند نشان‌دهنده یک آستانه بحرانی در تأثیر خشکسالی‌های بلندمدت بر این منطقه باشد.

برای تحلیل نقش سد، منحنی‌های SAF به‌طور جداگانه برای دبی ورودی و خروجی سد استخراج و مقایسه شدند (جدول ۳). تحلیل داده‌های دبی ورودی و خروجی سد در دوره‌های بازگشت مختلف (T=5 تا ۵۰ سال) نشان می‌دهد که سد نقشی کلیدی در تعدیل شاخص خشکسالی (SRI) ایفا

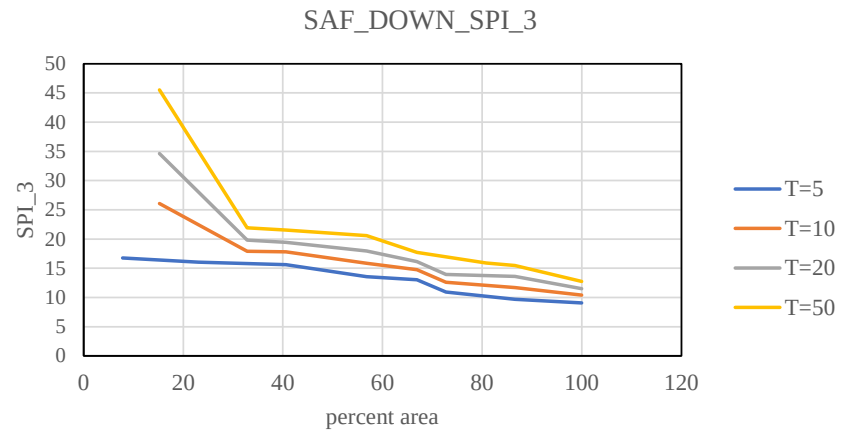
می‌کند. در سطوح خشکسالی خفیف تا متوسط (SRI=3 و ۶)، سد با آزادسازی تدریجی ذخایر، دبی خروجی را نسبت به ورودی افزایش می‌دهد و این اثر با افزایش دوره بازگشت تشدید می‌شود. این امر به حفظ جریان در دوره‌های طولانی‌تر کم‌آبی کمک می‌کند. اما در خشکسالی‌های شدید (SRI=12)، سد ابتدا با کاهش دبی خروجی (در T=5 سال) نقش کنترلی ایفا کرده و سپس با افزایش دوره بازگشت (T>5)، به سمت آزادسازی بیشتر ذخایر حرکت می‌کند تا جریان پایدارتری را تأمین نماید. در اوج خشکسالی (T=50 سال)، سد با افزایش چشمگیر دبی خروجی، حداکثر توان خود را در حفظ جریان به کار می‌گیرد. این رفتار انعطاف‌پذیر سد، آن را به عنصری حیاتی در مدیریت منابع آبی و کاهش اثرات خشکسالی در حوضه تبدیل کرده است.

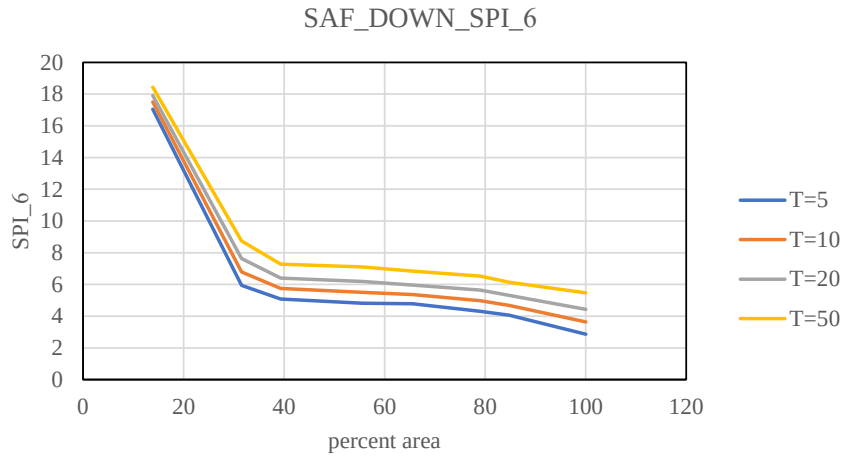
۳. مقایسه SPI و SRI برای حوضه و مخزن

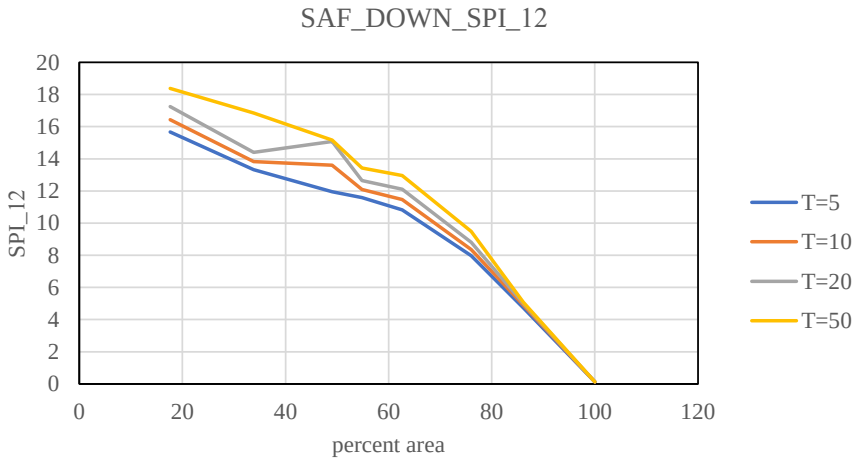
در شکل (۸)، SPI میانگین فضای بالادست با SRI در ورودی سد برای بررسی انتشار خشکسالی مقایسه شد.



شکل ٦- منحنی SAF برای ایستگاه‌های بالادست در مقیاس‌های SPI-3، SPI-6، SPI-12



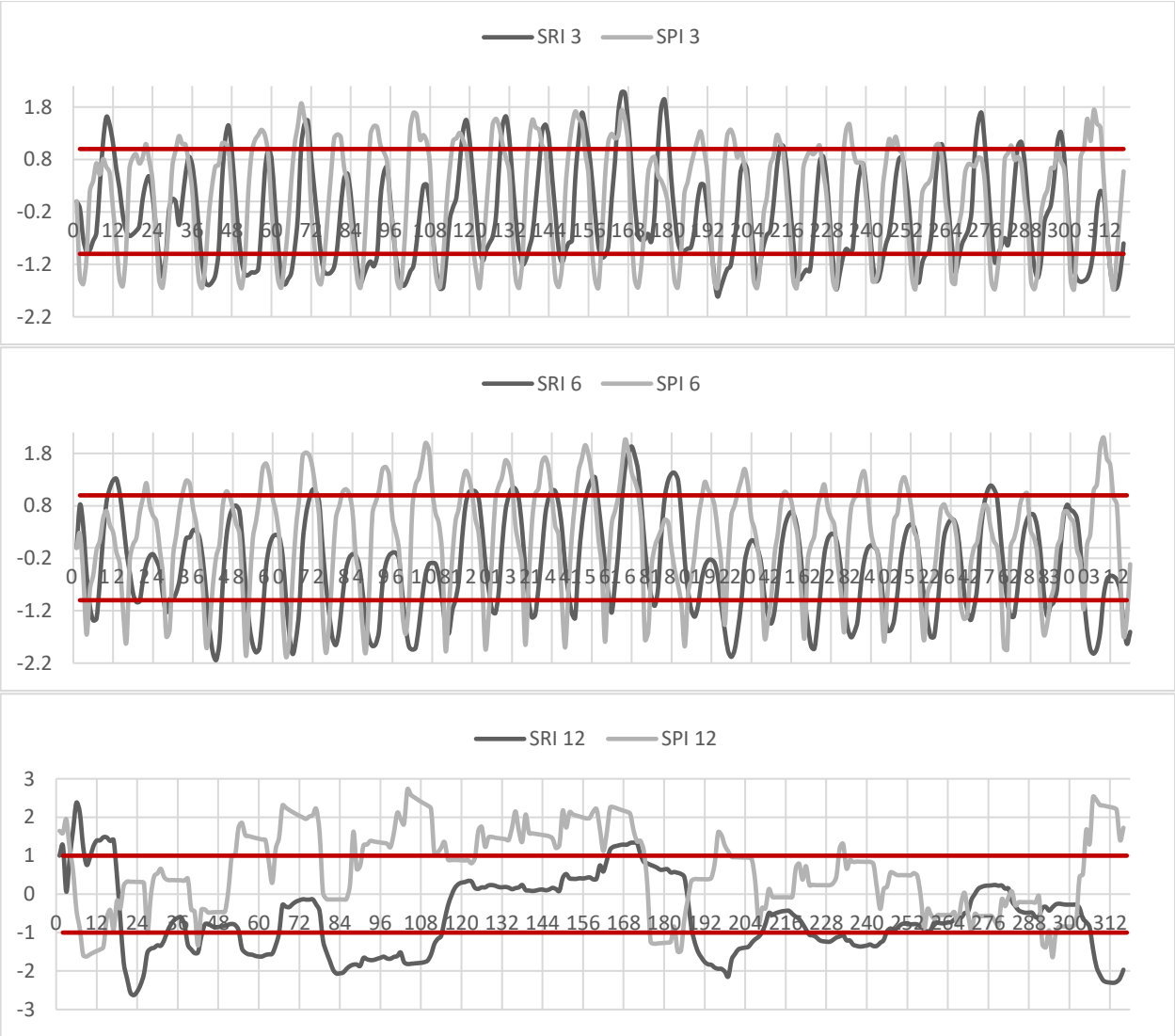




شکل ۷- منحنی SAF برای ایستگاه‌های پایین‌دست در مقیاس‌های SPI-3، SPI-6، SPI-12

جدول ۳- مقایسه SAF ورودی و خروجی سد در مقیاس‌های SRI-3، SRI-6، SRI-12

SRI	نوع جریان	T=5 سال	T=10سال	T=20سال	T=50سال
۳ ماهه	ورودی	۶/۸۸۸	۷/۸۳۵۷۳	۸/۶۱۸۳	۹/۴۹۹۲
	خروجی	۶/۹۹۶	۸/۸۳۹	۱۰/۸۰۱۸۷	۱۳/۶۲۷۹۷
۶ ماهه	ورودی	۶/۹۵۲	۸/۶۹۷۷۳	۱۰/۵۰۳	۱۳/۰۳
	خروجی	۱۱/۲۰۹	۱۶/۰۴۷	۲۲/۱۹۰۲۵	۳۲/۶۹۳۴
۱۲ ماهه	ورودی	۳۹/۰۳	۴۷/۶۲۶۹	۵۴/۷۲۶	۶۲/۷۱۶
	خروجی	۲۸/۷۸۶	۴۱/۲۹۳	۵۷/۵۷۵۰۲	۸۶/۱۰۱۱۷



شکل ۸- مقایسه SPI (بالادست) و SRI (جریان ورودی سد) در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه

تحلیل شاخص‌های خشکسالی در حوضه زاینده‌رود نتایج مشخصی را در ابعاد مختلف آشکار کرد. همانطور که انتظار می‌رود، بر اساس شاخص استاندارد بارش (SPI)، خشکسالی‌های هواشناسی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت نوسان بیشتری نشان می‌دهند، درحالی‌که در مقیاس‌های بلندمدت تداوم بالاتری دارند. همچنین، ایستگاه‌های واقع در مناطق پایین‌دست به‌طور مداوم خشکسالی‌های شدیدتر و مکررتری را نسبت به ایستگاه‌های بالادست تجربه کرده‌اند که حاصل ترکیب دو عامل بارش کمتر و تقاضای آبی بالاتر در دشت‌های کشاورزی است.

از سوی دیگر، شاخص استاندارد رواناب (SRI) نشان داد که خشکسالی‌های هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی‌های هواشناسی، هم شدیدتر و هم طولانی‌تر هستند و با تأخیر زمانی واضحی پس از آنها ظاهر می‌شوند. این تأخیر، بیانگر فرآیند انتشار خشکسالی در سیستم هیدرولوژیکی حوضه است، به‌طوریکه کمبود بارش به تدریج و با گذشت زمان به کاهش جریان سطحی تبدیل می‌گردد.

بررسی منحنی‌های شدت-مساحت-فراوانی (SAF) نیز نشان می‌دهد که با افزایش وسعت جغرافیایی خشکسالی، شدت آن برای یک دوره بازگشت معین کاهش می‌یابد. شیب تندتر این منحنی‌ها در منطقه پایین‌دست در مقایسه با بالادست، حاکی از آسیب‌پذیری بیشتر این ناحیه در برابر خشکسالی‌های گسترده است.

در خصوص نقش سد زاینده‌رود، مقایسه منحنی‌های SAF ورودی و خروجی نشان می‌دهد که این سازه به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، موفق به تعدیل شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در پایین‌دست شده است. با این وجود، ظرفیت تعدیل‌کنندگی سد در دوره‌های خشکسالی طولانی و ممتد کاهش می‌یابد. این مشاهده، که بر اساس دوره‌های بازگشت کوتاه‌تر و میان‌مدت تحلیل شده است، گویای محدودیت ذخیره مخزن در مقابله با خشکسالی‌های پایدار و فراگیر است.

بحث

یافته‌های این مطالعه چندین نکته کلیدی برای بحث ارائه می‌دهد. نخست، تفاوت فضایی مشاهده‌شده در شدت و فراوانی خشکسالی هواشناسی بین بالادست و پایین‌دست، شاخص SPI، بیانگر تفاوت در الگوی زمانی و مکانی کمبود بارش در این دو ناحیه است. با این حال، از آنجا که SPI مستقیماً بر اساس بارش محاسبه می‌شود، این تفاوت را نمی‌توان به‌طور مستقیم به فعالیت‌های کشاورزی یا تقاضای بالای آب نسبت داد. در مقابل، مقایسه هم‌زمان ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌تواند شواهد بیشتری درباره نقش عوامل انسانی در تعدیل یا تشدید انتقال خشکسالی از شرایط جوی به سامانه‌های جریان فراهم کند. در این چارچوب، تفاوت میان الگوهای SPI و SRI، به‌ویژه در شدت، فراوانی، مدت و زمان انتقال خشکسالی، می‌تواند نشان‌دهنده اثر عوامل مؤثر بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، از جمله برداشت آب و فعالیت‌های انسانی باشد؛ هرچند برای انتساب قطعی این تفاوت‌ها به مصرف آب، بررسی مستقل داده‌های برداشت، کاربری اراضی و سایر مؤلفه‌های انسانی ضروری است.

دوم، مشاهده تأخیر زمانی و تشدید خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی، مطابق با نظریه انتشار خشکسالی است (Shukla و Wood، ۲۰۰۸). این پیامد مهمی برای هشدار زودهنگام خشکسالی دارد: پایش خشکسالی هواشناسی در بالادست می‌تواند پنجره زمانی ارزشمندی برای پیش‌بینی و آمادگی در برابر خشکسالی هیدرولوژیکی در پایین‌دست فراهم آورد.

سوم، نقش دوگانه سد زاینده‌رود به عنوان یک تعدیل‌کننده در شرایط عادی و یک محدودیت در خشکسالی‌های ممتد، نشان‌دهنده ظرفیت محدود ذخیره مخازن در رویارویی با خشکسالی‌های بلندمدت و گسترده است. این یافته با مطالعات مشابه در سایر حوضه‌های تنظیم‌شده همخوانی دارد و بر اهمیت رویکردهای مدیریت توأم منابع آب سطحی و زیرزمینی و مدیریت تقاضا در کنار بهره‌برداری از مخزن تأکید می‌کند (Madani و همکاران، ۲۰۱۶).

چهارم، نتایج تحلیل منحنی‌های SAF که آسیب‌پذیری بالاتر پایین‌دست در برابر خشکسالی‌های با گستره وسیع را نشان می‌دهد، می‌تواند مبنایی برای اولویت‌بندی تخصیص منابع و اجرای برنامه‌های کاهش ریسک در این مناطق باشد.

در نهایت، ضعیف‌تر بودن ارتباط بین SPI و SRI در مقیاس ۱۲ ماهه و قوی بودن آن در مقیاس‌های کوتاه‌تر، حاکی از آن است که شاخص‌های بلندمدت به دلیل هموارسازی بیش از حد و حساسیت به اثرات ذخیره و مدیریت، ممکن است برای پایش خشکسالی مخزن در زمان واقعی چندان مناسب نباشند. بنابراین، استفاده از شاخص‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت (۳ تا ۶ ماهه) برای درک پویایی‌های خشکسالی و ارتباط بالادست مخزن در این سیستم تنظیم‌شده مؤثرتر به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی خشکسالی در حوضه‌های تنظیم‌شده‌ای مانند زاینده‌رود نیازمند رویکردی یکپارچه و چندبعدی است که ابعاد زمانی، مکانی و احتمالی را پوشش دهد. نتایج کلیدی به شرح زیر است:

الف) خشکسالی‌های هواشناسی در پایین‌دست به دلیل عوامل اقلیمی شدیدتر و با تواتر بیشتری رخ می‌دهند.

ب) خشکسالی‌های هیدرولوژیکی با تأخیر زمانی منتشر شده و نسبت به خشکسالی‌های هواشناسی تشدید می‌شوند.

ج) سد زاینده‌رود شدت خشکسالی هیدرولوژیکی را تعدیل می‌کند اما توانایی آن در کاهش اثرات خشکسالی‌های طولانی‌مدت محدود است.

د) مناطق پایین‌دست آسیب‌پذیری فضایی بیشتری نشان می‌دهند که توسط شیب تندتر منحنی‌های SAF تأیید می‌شود.

ه) شاخص‌های خشکسالی کوتاه‌مدت و میان‌مدت (۳ تا ۶ ماهه) نسبت به شاخص‌های بلندمدت برای پایش خشکسالی مخزن مؤثرتر هستند.

و) این بینش‌ها می‌توانند مبنایی برای مدیریت تطبیقی آب، شامل عملیات بهینه مخزن، سیاست‌های متمایز برای بالادست و پایین‌دست و ارتقای آمادگی در برابر خشکسالی باشد. پژوهش‌های آتی می‌توانند با تلفیق مدل‌سازی هیدرولوژیکی-عملیاتی و سناریوهای تغییر اقلیم، تاب‌آوری بلندمدت این حوضه را در برابر رژیم‌های تشدیدشده خشکسالی ارزیابی کنند.

منابع

Alijanian, M., & Dehghani, F. (2023). Evaluation of CHIRPS in dry and wet spell assessment utilizing copula-based severity–duration–frequency curves. Hydrological Sciences Journal, 68(14), 2075–2088. doi: 10.1080/02626667.2023.2248971

Ghozat, A., Sharafati, A., & Hosseini, S. A. (2021). Long-term spatiotemporal evaluation of CHIRPS satellite precipitation product over different climatic regions of Iran. Theoretical and Applied Climatology, 143, 211–225. doi: 10.1007/s00704-020-03428-5

Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO). (2018). Precipitation data

Government Printing Office, Washington, USA. doi: 10.3133/wsp1541B

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379–1389. doi: 10.1080/01621459.1968.10480934

Sharafi, S., Ghaleni, M. M., & Sadeghi, S. (2022). Spatial and temporal analysis of drought in various climates across Iran using the Standardized Precipitation Index (SPI). Arabian Journal of Geosciences, 15(14), 1279. doi: 10.1007/s12517-022-10489-5

Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical Research Letters, 35(2), L02405. doi: 10.1029/2007GL032487

Tabari, H., & Talaee, P. H. (2011). Temporal variability of rainfall over Iran: 1966–2005. Journal of Hydrology, 396(3–4), 313–320. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.11.034

Teegavarapu, R. S., Salas, J. D., & Stedinger, J. R. (Eds.). (2019). Statistical Analysis of Hydrologic Variables: Methods and Applications. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.

United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). (2022). Drought in numbers 2022: Restoration for readiness and resilience. Bonn, Germany. Retrieved from https://coilink.org/20.500.12592/s5mhnb, accessed 04 Oct. 2026.

Wilhite, D. A. (2000). Drought: A global assessment. Chapter: Drought as a natural hazard: Concepts and definitions (pp. 3–18). D. A. Wilhite (Ed.). Routledge, London, UK.

Yevjevich, V. M. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Paper No. 23. Colorado State University, Fort Collins, USA.

and meteorological station locations in the Zayandehroud Basin. Isfahan, Iran.

Jalili Pirani, F., & Modarres, R. (2020). Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh Rud basin, Iran. Hydrological Sciences Journal, 65(16), 2678–2692. doi: 10.1080/02626667.2020.1833014

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: Challenges of a water-bankrupt nation. Iranian Studies, 49(6), 997–1016. doi: 10.1080/00210862.2016.1259286

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13(3), 245–259. doi: 10.2307/1907187

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17–22 Jan. 1993 (Vol. 17, No. 22, pp. 179–183). American Meteorological Society, Boston, USA.

Modarres, R., & da Silva, V. D. P. R. (2007). Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. Journal of Arid Environments, 70(2), 344–355. doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.12.024

Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. International Journal of Climatology, 26(7), 971–985. doi: 10.1002/joc.1264

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. doi: 10.2307/2346729

Safavi, H. R., Esfahani, M. K., & Zamani, A. R. (2014). Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. Water Resources Management, 28(6), 1671–1688. doi: 10.1007/s11269-014-0576-4

Searcy, J. K., & Hardison, C. H. (1960). Double-mass curves, with a section fitting curves to cyclic data. Water Supply Paper 1541-B, pp. 31–66. U.S.