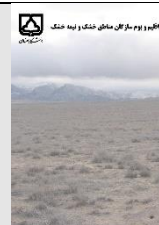




Semnan University

Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions

<https://ceasr.semnan.ac.ir>



Research Article

Trend Analysis of Meteorological Drought Using SPI in Damghan Region

Mahin Khosravi^{a,*} and Soghra Poodineh^b

^a Ph.D. Graduate, Department of Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.

^b M.Sc. Graduate, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:
Research full paper

Article history:
Received: 25 may 2024
Revised: 15 november 2024
Accepted: 5 march 2025

Keywords:
Meteorological drought,
Standardized
Precipitation Index,
Damghanroud
Watershed, Spatial-
temporal patterns.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Meteorological drought, a critical challenge in semi-arid regions, profoundly impacts agriculture, water resources, and ecosystems in Semnan Province, Iran. The Damghan region, a vital agricultural area, is highly vulnerable to climatic fluctuations due to its arid climate and reliance on seasonal precipitation. Understanding temporal and spatial drought patterns is essential for effective water management and enhancing agricultural resilience. This study aims to analyze meteorological drought in the Damghan region using Standardized Precipitation Index (SPI) over a 30-year period. Selected for its simplicity and flexibility across the time scales, SPI enables assessment of drought severity and frequency. Monthly precipitation data from three meteorological stations, representing distinct regions (rain-fed agriculture, transitional, and ecologically sensitive arid zones), were analyzed to evaluate drought patterns at short-term (1- and 3-month), medium-term (6- and 12-month), and long-term (24- and 48-month) scales, providing a framework for drought monitoring and sustainable water policy.

Materials and Methods: Monthly precipitation data from three meteorological stations in the Damghan region, which reflect diverse land uses and microclimates, were collected from 1990 to 2020. Data quality was ensured through statistical tests, including normality (Shapiro-Wilk), homogeneity (Pettitt), and outlier detection (IQR method), with anomalies corrected via interpolation. The SPI was calculated at 1-, 3-, 6-, 12-, and 24-month scales using a gamma distribution fitted via maximum likelihood estimation, followed by transformation to a standard normal distribution to identify dry ($SPI < -1$) and wet ($SPI > 1$) periods. Analyses were conducted using R software to ensure computational accuracy. Spatial variability was assessed by comparing station results based on regional characteristics (topography, land use).

Results and Discussion: SPI analysis revealed significant variability in drought patterns across the three stations, driven by microclimatic and land-use differences. The Damghan station, in a rain-fed agricultural area, exhibited frequent short-term droughts in late winter and spring, coinciding with critical planting phases for crops like wheat and barley, likely reducing yields and disrupting farming schedules. The Fooladmahale station, in a transitional zone, recorded autumn and winter droughts, decreasing soil moisture for cereals and pulses, and increasing

* Corresponding author: mahin15140@gmail.com

irrigation needs. The Chahardeh-Damghan station, in a drier, ecologically fragile area, experienced spring and early summer droughts, leading to reduced vegetation cover, increased soil erosion, and land degradation. At medium-term scales (6 and 12 months), all stations showed persistent dry periods, straining surface and groundwater resources and challenging irrigated agriculture and rural water supply. Long-term (24-month) droughts, though less frequent, were severe, threatening groundwater-dependent ecosystems. The limited number of stations reduced spatial resolution, while the focus on precipitation excluded factors like temperature and evapotranspiration, limiting comprehensive drought analysis. Future studies should incorporate satellite data (e.g., TRMM, GPM), complementary indices like SPEI, and hydrological models (e.g., SWAT, CMIP6). Practical measures, such as farmer training, drip irrigation, and rainwater harvesting, are recommended.

Conclusion: Multi-scale SPI analysis confirmed Damghan's high vulnerability to meteorological droughts, with distinct impacts on agricultural, transitional, and arid zones, underscoring the need for region-specific water management. Advanced monitoring, integrated modeling, and climate adaptation strategies are crucial for sustaining water resources and agriculture. This study offers a framework for local policy-making.

Cite this article: Khosravi, M. and Poodineh, S. (2025). Trend analysis of meteorological drought using SPI in Damghan region. *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 2(2), 1-17.

© 2024 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.37883.1051>

تحلیل روند خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI در منطقه دامغان

مهین خسروی^{۱*} و صغری پودینه^۲^۱دانش آموخته دکتری، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: نویسنده مسئول، mahin15140@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵	سابقه و هدف: خشکسالی هواشناسی، به عنوان چالشی کلیدی در مناطق نیمه‌خشک، کشاورزی، منابع آب، و اکوسیستم‌های استان سمنان را تهدید می‌کند. حوضه دامغان‌رود، به دلیل اقلیم خشک و وابستگی به بارش‌های فصلی، در برابر نوسانات اقلیمی آسیب‌پذیر است. این مطالعه با هدف تحلیل چندمقیاسی خشکسالی در این حوضه با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در یک دوره ۳۰ ساله انجام شد. داده‌های بارش ماهانه از سه ایستگاه هواشناسی (کشاورزی دیم، انتقالی، خشک) برای بررسی الگوهای خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت، و بلندمدت تحلیل شد تا چارچوبی برای پایش خشکسالی ارائه شود.
واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی، شاخص بارش استاندارد، حوضه دامغان‌رود، الگوهای مکانی-زمانی.	مواد و روش‌ها: داده‌های ماهانه بارش از سه ایستگاه هواشناسی در منطقه دامغان، که نشان‌دهنده کاربری‌های مختلف زمین و میکرواقلیم‌ها هستند، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ جمع‌آوری شدند. کیفیت داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری شامل نرمال بودن (شاپیرو-ویلک)، همگنی (پتیت) و تشخیص داده‌های پرت (IQR) بررسی شد و ناهنجاری‌ها از طریق درونیابی اصلاح شدند. شاخص SPI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه با استفاده از توزیع گاما که از طریق برآورد حداکثر درست‌نمایی تنظیم شده بود، محاسبه شد و سپس به توزیع نرمال استاندارد تبدیل شد تا دوره‌های خشک ($SPI < -1$) و مرطوب ($SPI > 1$) شناسایی شوند. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار R برای اطمینان از دقت محاسباتی انجام شدند. تغییرات مکانی با مقایسه نتایج ایستگاه‌ها بر اساس خصوصیات منطقه‌ای (توپوگرافی، کاربری زمین) ارزیابی شد.
	یافته‌ها: تحلیل شاخص SPI، تنوع قابل ملاحظه‌ای در الگوهای خشکسالی بین سه ایستگاه را نشان داد که عمدتاً به تفاوت‌های میکروکلیمایی و کاربری اراضی نسبت داده می‌شود. ایستگاه دامغان، واقع در منطقه‌ای با کشاورزی دیم، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت را در اواخر زمستان و بهار نشان داد. این دوره‌ها، که با مراحل کاشت محصولات کلیدی مانند گندم و جو هم‌زمان هستند، می‌تواند بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده و برنامه‌ریزی زراعی را مختل کند. ایستگاه فولادمحله، در ناحیه‌ای انتقالی، خشکسالی‌های پاییزی و زمستانی را نشان داد که رطوبت خاک را برای کشت غلات و حبوبات کاهش داده و نیاز به آبیاری تکمیلی را افزایش داده است. ایستگاه چهارده دامغان، در منطقه‌ای خشک‌تر و حساس از نظر زیست‌محیطی، خشکسالی‌های بهاری و اوایل تابستان را تجربه کرده است که می‌تواند به کاهش پوشش گیاهی منجر شود. در مقیاس‌های میان‌مدت (۶ و ۱۲ ماهه)، هر سه ایستگاه دوره‌های خشکی پایداری را ثبت کردند که می‌تواند به کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی منجر شود. در مقیاس بلندمدت (۲۴ ماهه)، خشکسالی‌های شدید اما با فراوانی کم مشاهده شد که پایداری اکوسیستم‌های وابسته به آب‌زیرزمینی را تهدید می‌کند. این تنوع الگوها اهمیت مدیریت منطقه‌محور منابع آب را برجسته می‌سازد. از محدودیت‌های موجود در این تحقیق تعداد محدود ایستگاه‌های هواشناسی است، که وضوح مکانی مطالعه را کاهش داد. تمرکز بر بارش و نبود داده‌های دما، تبخیر و داده‌های اجتماعی-اقتصادی تحلیل جامع خشکسالی را محدود کرده است. پیشنهاد می‌شود در

مطالعات آتی از داده‌های ماهواره‌ای (GPM, TRMM)، شاخص SPEI و مدل‌های هیدرولوژیکی (CMIP6, SWAT) استفاده شود.

نتیجه‌گیری: تحلیل SPI در دوره‌های بازگشت مختلف، آسیب‌پذیری منطقه دامغان را به خشکسالی‌های هواشناسی تأیید کرد. الگوهای خشکسالی، مناطق کشاورزی، انتقالی و خشک را به‌طور متفاوتی تحت تأثیر قرار می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی ضرورت مدیریت آب منطقه‌محور است. بنابراین، پایش پیشرفته، مدل‌سازی تلفیقی و پیاده‌سازی روش‌های سازگار با اقلیم برای پایداری منابع آب و کشاورزی ضروری است.

استناد: خسروی، م. و پودینه، ص. (۱۴۰۴). تحلیل روند خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI در منطقه دامغان. *اقلیم و بوم‌سازگان مناطق خشک و نیمه‌خشک*، ۲(۲)، ۱-۱۷.

ناشر: دانشگاه سمنان

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.37883.1051>

۱. مقدمه

خشکسالی، پدیده‌ای طبیعی، پیچیده و تکرارشونده، تهدیدی جدی برای امنیت آبی، تولید غذا و ثبات اقتصادی-اجتماعی در مناطق نیمه‌خشک جهان به شمار می‌رود. در ایران، که بیش از ۶۰ درصد از مساحت آن در دسته مناطق خشک یا نیمه‌خشک قرار دارد، خشکسالی موجب تشدید کم‌آبی موجود می‌شود؛ مسئله‌ای که ناشی از الگوهای نامنظم بارندگی و فشارهای فزاینده انسانی نظیر بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و کشاورزی فشرده است (Madani, ۲۰۱۴). از این‌رو، پایش مؤثر خشکسالی برای کاهش آثار آن و تدوین راهبردهای مدیریت تطبیقی منابع آب ضروری است. شاخص SPI، که توسط McKee و همکاران در سال ۱۹۹۳ توسعه یافت، ابزاری شناخته‌شده در سطح جهانی برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی است؛ چرا که با نیاز داده‌ای کم، امکان تحلیل کمبود بارندگی را در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) فراهم می‌سازد. انعطاف‌پذیری SPI آن را به ابزاری کلیدی در مطالعات خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است. مطالعات Zarei (۲۰۱۹)، Bazrafshan و همکاران (۲۰۱۹)، Cavus و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند که شاخص SPI برای تحلیل الگو، فراوانی، مدت زمان و شدت خشکسالی هواشناسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است. با این حال، بسیاری از این مطالعات عمدتاً بر حوضه‌های بزرگ‌تر یا در مقیاس ملی متمرکز بوده‌اند، که ویژگی‌های اقلیمی و اقتصادی-اجتماعی آنها با مقیاس‌های کوچک تفاوت قابل توجهی دارد (Babaeian و همکاران، ۲۰۲۱؛ Zarei و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین، اگرچه برخی پژوهش‌ها در استان سمنان به بررسی SPI پرداخته‌اند، اما اغلب نتوانسته‌اند خشکسالی را با پیامدهای عملی آن برای کشاورزی منطقه مرتبط سازند (Khosravi و Yazdani, ۲۰۲۴). این خلأ پژوهشی مانع از آن می‌شود که سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان محلی راهکارهای هدفمند و متناسب با شرایط خاص منطقه دامغان را برای کاهش آثار خشکسالی تدوین کنند. کمبود مطالعات جامع و محلی، به‌ویژه با توجه به آسیب‌پذیری بالای این منطقه در برابر نوسانات اقلیمی و نقش راهبردی آن به‌عنوان قطب کشاورزی، نگران‌کننده است. مطالعات جهانی اخیر بر لزوم تحلیل‌های خشکسالی منطقه‌محور برای درک ناهمگنی مکانی بارش که تأثیر به‌سزایی بر آثار خشکسالی دارند، تأکید کرده‌اند (Li و همکاران، ۲۰۲۳؛ Cavus و همکاران، ۲۰۲۳). در ایران، ادغام چنین تحلیل‌هایی با توصیه‌های کاربردی برای مقابله با پیامدهای اقتصادی-اجتماعی خشکسالی، به‌ویژه در مناطق روستایی با منابع محدود، توصیه شده است (Adib و همکاران، ۲۰۲۴).

منطقه دامغان، نمونه‌ای شاخص از چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی در نواحی نیمه‌خشک است. این منطقه با وسعتی بیش از ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع و میانگین بارندگی سالانه بین ۱۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر، دارای اقتصادی مبتنی بر کشاورزی است.

کشاورزان منطقه برای کشت محصولاتی مانند گندم، جو و پسته، به بارش‌های فصلی و منابع محدود آب زیرزمینی وابسته‌اند (Kheyruri و همکاران، ۲۰۲۳). بروز مکرر خشکسالی‌ها منجر به کاهش سطح منابع آب زیرزمینی شده، چرخه‌های آبیاری را مختل کرده و در نهایت باعث کاهش عملکرد محصولات کشاورزی، افزایش فرسایش خاک، و تهدید معیشت ساکنان و خدمات اکوسیستمی منطقه می‌شود. به‌عنوان مثال، خشکسالی‌های شدید اوایل دهه ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ کاهش چشمگیری در تولیدات کشاورزی دامغان به همراه داشت، به‌طوری که گزارش‌ها از افت عملکرد تا حدود ۳۰ درصد در محصولات دیم حکایت دارند (Kheyruri و همکاران، ۲۰۲۳). این مطالعه، با هدف پر کردن این خلأ، به بررسی خشکسالی هواشناسی در منطقه دامغان با استفاده از شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه می‌پردازد. اهداف مشخص آن عبارتند از: ۱) سنجش شدت، مدت و فراوانی دوره‌های خشکسالی بر اساس داده‌های بارندگی از سه ایستگاه دامغان، فولادمحله و چهارده دامغان؛ ۲) شناسایی سال‌های بحرانی خشکسالی و بررسی روند آنها و ۳) شناسایی تأثیر آنها بر مدیریت آب کشاورزی برای افزایش تاب‌آوری در برابر خشکسالی‌ها. این پژوهش با ارائه درکی دقیق از پویایی‌های خشکسالی، درصدد توانمندسازی کشاورزان، مدیران آب و سیاست‌گذاران منطقه برای اتخاذ راهکارهای پایدار در جهت کاهش اثرات خشکسالی و پشتیبانی از بهره‌وری بلندمدت کشاورزی است.

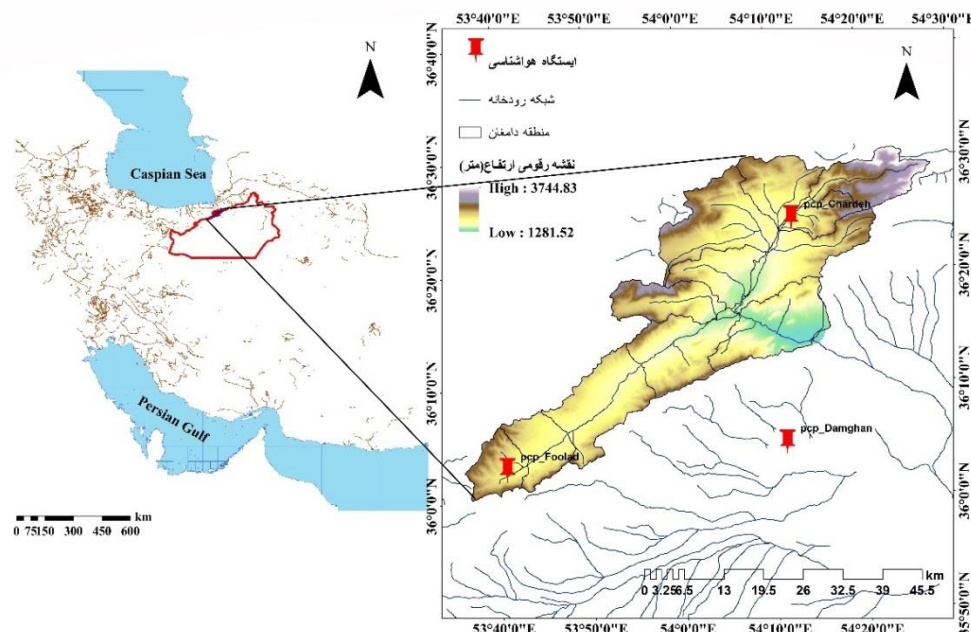
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه پژوهش

منطقه دامغان که در گستره خشک استان سمنان در مرکز ایران قرار دارد، به‌عنوان یکی از مناطق اکولوژیک و کشاورزی حیاتی در یکی از کم‌آب‌ترین مناطق کشور شناخته می‌شود. این حوضه در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز واقع شده و به‌عنوان شریان حیاتی برای جوامع روستایی وابسته به منابع آب محدود آن برای کشاورزی و مصارف خانگی عمل می‌کند. اقلیم نیمه‌خشک منطقه با بارندگی بین ۱۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر مشخص می‌شود که عمدتاً در زمستان و اوایل بهار متمرکز است، در حالی که ماه‌های تابستان با دوره‌های طولانی خشکسالی همراه هستند (Bazrafshan و همکاران، ۲۰۱۹). تنوع ارتفاعی قابل توجهی در این منطقه وجود دارد؛ به‌طوری که ارتفاع از حدود ۱۰۰۰ متر در دشت‌های جنوبی تا بیش از ۳۸۰۰ متر در ارتفاعات شمالی در دامنه‌های البرز مرکزی تغییر می‌کند. این اختلاف ارتفاع باعث شکل‌گیری ریزاقلیم‌هایی در نقاط مختلف حوضه شده که الگوهای بارندگی دما و نوع پوشش گیاهی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار داده است. تابستان‌ها بسیار گرم و خشک بوده و میزان تبخیر-تعرق بالا، فشار زیادی بر منابع آب وارد می‌کند. این ویژگی‌ها سبب شده‌اند که کشاورزی و منابع طبیعی منطقه با حساسیت بالایی نسبت به تغییرات اقلیمی و خشکسالی مواجه باشند (Khosravi و Yazdani، ۲۰۲۴).

چشم‌انداز طبیعی این حوضه ترکیبی از ارتفاعات ناهموار، دشت‌های آبرفتی و پوشش گیاهی پراکنده با گونه‌های معرف *Artemisia sieberi* و *Pistacia atlantica* است (Javadian و Nemati، ۲۰۱۸). جغرافیای انسانی این حوضه نیز ویژگی‌های خاص خود را دارد؛ با روستاها و شهرهای کوچک پراکنده‌ای که کشاورزی، به‌ویژه کشت پسته، بادام و غلات، ستون فقرات اقتصاد محلی را تشکیل می‌دهد. سیستم‌های سنتی قنات که یکی از روش‌های باستانی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی هستند، همچنان در کنار زیرساخت‌های نوین آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند و بیانگر سابقه طولانی این منطقه در مدیریت هوشمندانه منابع آب است (Madani، ۲۰۱۴). با این حال، اتکای بیش از حد به منابع آب زیرزمینی به دلیل تکرار دوره‌های خشکسالی، منجر به افت سطح آبخوان‌ها شده و پایداری بلندمدت منابع آب را با خطر مواجه کرده است (Khosravi و Yazdani، ۲۰۲۴). منطقه دامغان از نظر استراتژیک نیز اهمیت زیادی دارد، چرا که در امتداد مسیرهای تاریخی تجاری قرار گرفته و به‌عنوان گذرگاهی میان فلات مرکزی ایران و ارتفاعات شمالی عمل می‌کند. این موقعیت،

اهمیت این منطقه را در برنامه‌ریزی منابع آب منطقه‌ای و تلاش‌های مقابله با خشکسالی دوچندان می‌سازد. این مطالعه بر تحلیل الگوهای خشکسالی هواشناسی در این منطقه متمرکز است و با استفاده از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های کلیدی هواشناسی، به درک پویایی‌های زمانی و مکانی خشکسالی می‌پردازد. در شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در منطقه دامغان نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه دامغان در سمنان و ایران

Fig. 1 Geographical location of the Damghan region in Semnan and Iran

۲-۲. داده‌های استفاده شده

تحلیل خشکسالی هواشناسی در منطقه دامغان بر پایه مجموعه داده‌های جامع بارش است که برای ثبت تغییرات زمانی بارندگی در منطقه نیمه‌خشک بسیار حیاتی است. داده‌های بارش روزانه در بازه زمانی سه دهه (۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰) از طریق همکاری با سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)، به دست آمده‌اند. این داده‌ها از شبکه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی که به‌طور استراتژیک در داخل و اطراف منطقه دامغان قرار گرفته‌اند، جمع‌آوری شدند تا پوشش مکانی مناسبی از ریزاقلیم‌های متنوع منطقه فراهم شود. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس سابقه عملیاتی طولانی مدت و ثبات در گزارش‌دهی داده‌ها انجام شده که برای تحلیل دقیق خشکسالی با استفاده از شاخص SPI ضروری است (Bazrafshan و همکاران، ۲۰۱۹). برای اطمینان از اعتبار داده‌ها، از آزمون‌های آماری شامل بررسی نرمال بودن (شاپیرو-ویلک)، همگن (پیتیت) و شناسایی داده‌های پرت (IQR) استفاده شد. تنها ایستگاه‌هایی که دارای دوره‌ی ۳۰ ساله آماری (۱۹۹۰-۲۰۲۰) بودند و شکاف‌های داده‌ای کمی در سوابق خود داشتند، استفاده شدند. نواقص داده‌های بارش با روش درونیابی اصلاح شد. تمام مراحل بررسی نرمال بودن و همگنی داده‌ها و اصلاح آنها در نرم افزار R انجام شد. سپس شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه شد. فرآیند محاسبه شامل تجمیع داده‌های بارش، برازش توزیع گاما با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی و تبدیل مقادیر به توزیع نرمال استاندارد بود که با استفاده از نرم‌افزار R انجام شد. این روش امکان شناسایی دوره‌های خشک ($SPI > 1$) و مرطوب ($SPI < 1$) را فراهم کرد. برای ارزیابی توزیع مکانی، نتایج ایستگاه‌ها با توجه به ویژگی‌های منطقه‌ای (توپوگرافی، کاربری اراضی) مقایسه شد.

۳-۲. روش درونیابی

روش درونیابی استفاده شده در این پژوهش، استناد به داده‌های ایستگاه‌های مجاور است که برای رفع نواقص آماری داده‌های بارش استفاده شد تا یک سری زمانی منسجم تولید شود. گستره زمانی ۳۰ ساله این داده‌ها (۱۹۹۰-۲۰۲۰)، زمینه‌ای کافی برای ثبت نوسانات بین سال‌ها و چنددهه‌ای بارش فراهم کرده که برای ارزیابی الگوهای خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه) لازم است. در مرحله بعد، داده‌های بارش با توزیع گاما برازش داده شدند تا برای محاسبات شاخص SPI سازگار باشند (McKee و همکاران، ۱۹۹۳). در نهایت، محاسبات شاخص SPI انجام شد و مجموعه داده پایه‌ای برای تحلیل شدت، مدت و فراوانی خشکسالی در منطقه دامغان فراهم شد.

۴-۲. ایستگاه‌های هواشناسی

تحلیل خشکسالی هواشناسی در منطقه دامغان با استفاده از داده‌های بارش انجام شد، که از مجموعه‌ای منتخب از ایستگاه‌های هواشناسی تحت نظارت سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شدند این ایستگاه‌ها به صورت استراتژیک در سراسر منطقه مطالعاتی توزیع شده‌اند تا گرادین‌های متنوع اقلیمی منطقه را که از دشت‌های خشک تا دامنه‌های نیمه‌خشک رشته کوه البرز گسترش یافته‌اند، به خوبی پوشش دهند. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس سابقه عملیاتی طولانی مدت آن‌ها صورت گرفته تا مجموعه داده‌ای قوی برای تحلیل تغییرات بارندگی در چند دهه فراهم شود (Bazrafshan و همکاران، ۲۰۱۹). هر ایستگاه به گونه‌ای انتخاب شده است که نماینده مناطق مختلف اقلیم - زراعی منطقه باشد و تنوع الگوهای بارندگی - که بر کشاورزی محلی و دسترسی به منابع آب مؤثر است را منعکس کند. جمع‌آوری داده‌ها در اقلیم نیمه‌خشک دامغان با چالش‌های متعددی از جمله شرایط آب‌وهوایی سخت و کمبود داده در مناطق دورافتاده همراه بود (Zarei و همکاران، ۲۰۲۳). برای مقابله با این چالش‌ها، تنها ایستگاه‌هایی که سابقه‌ای از ثبت داده‌های قابل اعتماد و نسبتاً پیوسته داشتند، در این مطالعه لحاظ شدند. این فرایند انتخاب دقیق تضمین کرد که داده‌های حاصل برای محاسبه شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه مناسب باشند. داده‌های این ایستگاه‌ها بینش‌های حیاتی درباره پویایی زمانی و مکانی خشکسالی در منطقه مطالعاتی ارائه می‌دهند و امکان شناسایی نواحی مستعد خشکسالی را در منطقه دامغان فراهم می‌کنند که این امر در تدوین راهبردهای هدفمند مدیریت منابع آب برای جوامع کشاورزی استان سمنان نقش کلیدی دارد. در شکل ۱، موقعیت ایستگاه‌های منتخب منطقه مطالعاتی نمایش داده شده است.

۵-۲. محاسبه شاخص SPI

شاخص SPI یکی از ابزارهای رایج و پذیرفته شده برای پایش خشکسالی هواشناسی است که به دلیل سادگی و توانایی آن در ارزیابی کمبود بارندگی در بازه‌های زمانی مختلف، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، از شاخص SPI برای تحلیل ویژگی‌های خشکسالی در منطقه دامغان استفاده شده است. این شاخص به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، قابلیت شناسایی الگوهای خشکسالی کوتاه‌مدت (مثلاً ماهانه) تا بلندمدت (چند ساله) را دارد که برای برنامه‌ریزی منابع آب و کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک اهمیت زیادی دارد (McKee و همکاران، ۱۹۹۳).

فرایند محاسبه شاخص استاندارد شده بارش (SPI) با استانداردسازی داده‌های بارندگی آغاز می‌شود تا امکان مقایسه‌ای منسجم میان مناطق مختلف اقلیمی در محدوده مطالعه فراهم شود. ابتدا، داده‌های روزانه بارش برای بازه‌های زمانی مختلف شامل ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه به صورت تجمعی محاسبه شدند تا نوسانات فصلی و سالانه که بر چرخه‌های کشاورزی منطقه تأثیرگذارند، به خوبی بازتاب داده شوند. سپس، برای تبدیل داده‌های تجمعی به یک توزیع نرمال استاندارد، از توزیع گاما با روش حداکثر درست‌نمایی بهره گرفته شد. این روش به دلیل توانایی در مدل‌سازی رفتار نامتقارن بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک انتخاب شده است و قابلیت بازنمایی دقیق دوره‌های بسیار خشک یا بسیار مرطوب را دارد (Barker و

همکاران، ۲۰۱۶). در نهایت، مقادیر حاصل از SPI میزان انحراف بارندگی از میانگین بلندمدت را نشان می‌دهند؛ به‌طوری که مقادیر مثبت بیانگر شرایط مرطوب و مقادیر منفی نشان‌دهنده شرایط خشکسالی هستند. همچنین، بر اساس معیار ارائه شده توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳)، شدت خشکسالی در هفت سطح طبقه‌بندی شده که در جدول ۱ ارائه شده است. محاسبات شاخص SPI با استفاده از نرم‌افزارهای R انجام شده است تا دقت و تکرارپذیری نتایج تضمین شود. مطالعات Zarei (۲۰۱۹) نشان داد که این رویکرد امکان شناسایی زمان آغاز، مدت‌زمان و شدت خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را فراهم می‌کند. در جدول ۱، طبقه‌بندی آب‌وهوا بر اساس مقادیر SPI ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیم بر اساس مقادیر شاخص SPI

Table 1. Climate classification based on SPI values (McKee et al., 1993)

مقادیر شاخص	کلاسه‌بندی خشکسالی
Index value	Classification of drought
>2	ترسالی شدید
1.99-1.5	Extremely wet
1.49-1	ترسالی زیاد
99.0 to- 0.99	Very wet
-1 to -1.49	ترسالی متوسط
-1.5 to -1.99	Moderately wet
-2<	Moderate drought
	نزدیک به نرمال
	Near normal
	خشکسالی متوسط
	Severe drought
	خشکسالی شدید
	خشکسالی خیلی شدید
	Extreme drought

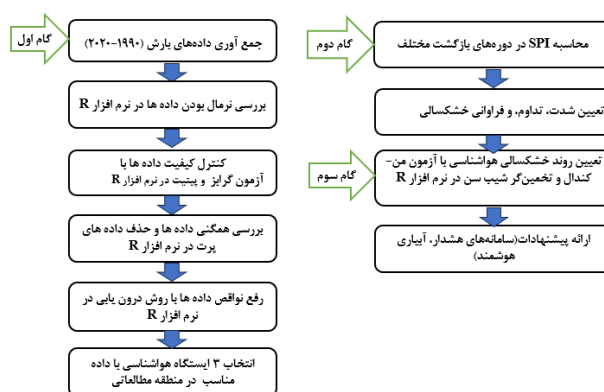
۶-۲. تحلیل روند خشکسالی

درک رفتار بلندمدت خشکسالی هواشناسی برای توسعه راهبردهای مؤثر مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک، به دلیل تأثیرات نوسانات بارندگی بر بهره‌وری کشاورزی ضروری است. در این مطالعه، تحلیل روند با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین‌گر شیب شن برای بررسی تغییرات احتمالی در الگوهای خشکسالی انجام شد. این تحلیل بر اساس شاخص SPI در بازه‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) صورت گرفت. این رویکرد امکان بررسی این موضوع را فراهم می‌کند که آیا فراوانی، شدت یا مدت زمان خشکسالی‌ها طی زمان دچار تغییرات نظام‌مند شده‌اند یا خیر؛ موضوعی که برای پیش‌بینی چالش‌های آینده منابع آب در استان سمنان اهمیت زیادی دارد (Zarei و همکاران، ۲۰۲۱). روش‌های آماری ناپارامتری آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب شن برای داده‌های نامنظم و دارای توزیع غیرنرمال مانند داده‌های بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب هستند. این روش‌ها بررسی می‌کنند که آیا مقادیر SPI روند افزایشی یا کاهشی ثابتی را نشان می‌دهند یا نه، که می‌تواند بیانگر گرایش به شرایط مرطوب‌تر یا خشک‌تر در طول دوره مطالعه باشد. استفاده از این رویکرد، امکان شناسایی روندها را در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (مانند فصلی) و بلندمدت (چند ساله) فراهم کرده و با نیازهای کشاورزان محلی که به بارش‌های به‌موقع برای چرخه‌های زراعی وابسته‌اند، هماهنگ است (Adib و همکاران، ۲۰۲۴). تحلیل روند خشکسالی با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای آماری در R انجام شد تا صحت و تکرارپذیری نتایج

تضمین شود. با بررسی تغییرات زمانی در خصوصیات خشکسالی، این مطالعه در پی ارائه افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی آب است تا بتوان اثرات شرایط اقلیمی در حال تغییر در منطقه دامغان را کاهش داد.

۲-۷. فلوجارت تحقیق

فلوجارت تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. فلوجارت تحقیق

Fig. 2 Research flowchart

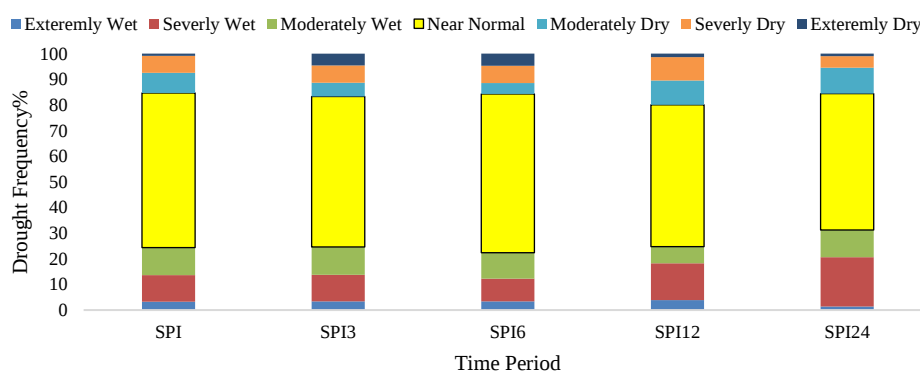
۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج ایستگاه هواشناسی دامغان

بررسی شاخص SPI در ایستگاه دامغان طی دوره‌ی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان داد که این منطقه در برابر نوسانات بارش حساس بوده و الگوهای مشخصی از وقوع خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف دارد. میانگین بارش سالانه در این ایستگاه حدود ۱۵۰ میلی‌متر برآورد شد که نشان‌دهنده شرایط اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک است. تحلیل روند با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن (Sen's Slope) نشان داد که بارش‌های سالانه روند کاهشی معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد داشته‌اند، به‌طوری‌که شیب کاهش میانگین سالانه حدود ۰/۹- میلی‌متر برآورد شد. در این ایستگاه، در سال‌های ۱۹۹۲، ۱۹۹۵، ۱۹۹۹، ۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ خشکسالی‌های خفیف تا شدید ($SPI > 1.5$) مشاهده شد که این نتایج هم‌راستا با مطالعات Zarei و همکاران (۲۰۲۳) و نوری و همکاران (۲۰۲۳) است.

در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (SPI) یک‌ماهه و سه‌ماهه، دوره‌های خشکسالی متوسط تا شدید (حدود ۲۳٪)، به‌ویژه در ماه‌های پایانی زمستان و آغاز بهار مشاهده شد که مصادف با مراحل بحرانی رشد محصولات زراعی مانند گندم و جو است که این می‌تواند اختلال‌هایی در دوره کاشت و آبیاری محصولات زراعی به‌وجود آورد. در مطالعه‌ای که توسط Bazrafshan و همکاران (۱۳۹۸) انجام شد، تأثیر خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بر روند رشد گیاهان تأیید شد. نتایج آنها نشان داد که کمبودهای کوتاه‌مدت منابع آب منجر به آسیب‌پذیری بالای کشاورزی دیم در مناطق نیمه‌خشک می‌شوند، که با نتایج این مطالعه هم‌راستا است. در بازه‌های میان‌مدت، SPI شش‌ماهه و دوازده‌ماهه این ایستگاه فراوانی کمتری از خشکسالی شدید (حدود ۲۱٪) را نشان داد. همچنین، در این بازه، خشکسالی‌هایی به صورت ممتد و با شدت‌های بالا $SPI > 1.5$ مشاهده شد که می‌تواند باعث کاهش تغذیه آبخوان‌ها در منطقه مطالعاتی شده باشد. در مطالعات مشابهی، Noori و همکاران (۲۰۲۳) گزارش دادند که خشکسالی‌ها در میان‌مدت منجر به کاهش میانگین سالانه تغذیه آبخوان‌ها به میزان حدود ۳/۸- میلی‌متر در سال می‌شوند. نتایج شاخص SPI در بازه بلندمدت (۲۴ ماهه) نشان داد که با افزایش طول دوره، تعداد خشکسالی‌ها افزایش یافته و به

حدود ۲۹ رسیده است؛ در حالی که شدت خشکسالی‌ها کاهش یافته است ($SPI > 1.2$) که می‌تواند به دلیل کمبود تجمعی بارش باشد که منجر به کاهش دسترسی بلندمدت به آب برای مصارف کشاورزی و خانگی می‌شود. مطالعات متعدد در ایران نشان داده‌اند که مقادیر منفی SPI-24 با کاهش قابل توجه سطح آبخوان‌ها و کاهش تغذیه آب زیرزمینی همبستگی دارند. برای مثال، در مطالعه‌ای، Ebrahimi و همکاران (۲۰۲۳) تأیید نمودند که کاهش بارش‌های بلندمدت باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی شده و فشار قابل توجهی بر منابع آب وارد می‌کند. نکته قابل توجه آن است که این ایستگاه در اوایل و اواخر دوره مطالعه، فراوانی بیشتری از خشکسالی‌های متوسط ($SPI > 1.5$) را نشان داد که با نوسانات اقلیمی منطقه‌ای گزارش شده در مرکز ایران همخوانی دارد (Zarei and Destouni, 2024). این یافته‌ها بر اهمیت اجرای راهبردهای مدیریت منابع آب متناسب با شرایط منطقه‌ای تأکید دارند؛ از جمله استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و تقویت سامانه‌های برداشت آب باران به منظور کاهش اثرات خشکسالی‌های مکرر در اطراف این ایستگاه است. در شکل ۳، درصد وقوع خشکسالی‌ها در ایستگاه دامغان در بازه‌های زمانی مختلف ارائه شده است.



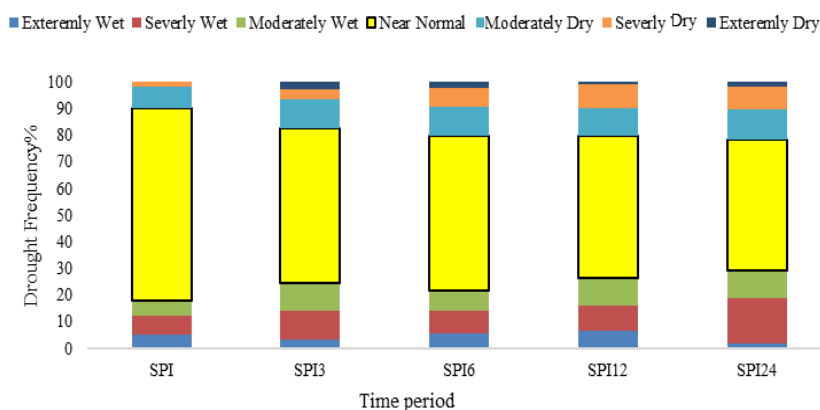
شکل ۳. درصد وقوع خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف در ایستگاه دامغان

Fig. 3 Percentage of drought occurrence at different return periods in Damghan station

۲-۳. نتایج ایستگاه هواشناسی فولادمحله

ارزیابی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه فولاد محله در منطقه دامغان، با استفاده از شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه نشان داد که الگوی خشکسالی تأثیرات قابل توجهی بر منابع آب و کشاورزی محلی دارد. برای مثال، مقادیر شاخص SPI در بازه‌های کوتاه‌مدت (۱ و ۳ ماهه) وقوع خشکسالی‌های متوسط تا شدید را با حدود ۱۷٪ تا ۲۳٪ به‌ویژه در ماه‌های پاییز و زمستان قابل نشان داد. این وضعیت بویژه در دوره‌هایی که رطوبت خاک برای آغاز رشد گیاهان پیش از فصل زراعی اهمیت دارد، چالش‌برانگیز است. کمبود بارش در این بازه‌ها، برای کشاورزانی که به کشت دیم وابسته‌اند - مانند تولیدکنندگان غلات و حبوبات - مشکل ساز بوده و نیاز به استفاده از آبیاری تکمیلی را برجسته می‌کند. در مطالعه‌ای Zhou و همکاران در سال ۲۰۲۵ گزارش دادند که شاخص SPI برای شناسایی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت کشاورزی و شاخص SPEI برای تحلیل تغییرات بلندمدت اقلیمی در مناطق نیمه‌خشک بسیار مناسب است. انتخاب بازه زمانی مناسب برای هر شاخص نقش کلیدی در بهبود مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری پایدار دارد و می‌تواند به توسعه راهکارهای مقاوم‌تری در برابر خشکسالی کمک کند. در بازه‌های میان‌مدت (۶ و ۱۲ ماهه)، ایستگاه فولاد محله، با حدود ۲۰٪ تا ۲۵٪ خشکسالی متوسط تا شدید، دوره‌های خشکی بلندمدت را نشان داد که در چندین فصل ادامه داشت که می‌تواند بر منابع آب سطحی و زیرزمینی فشار پایداری را ایجاد کند. این نتایج با مطالعات Isazade و همکاران (۲۰۲۳) هم‌راستا است. آنها

گزارش نمودند که کمبود منابع آب متأثر از نوسانات بلندمدت اقلیمی است. شاخص SPI در بازه ۲۴ ماهه، با حدود ۲۸٪ خشکسالی متوسط تا شدید، دوره‌های طولانی‌تری از خشکسالی را نشان داد که می‌تواند به کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی منجر شود. این ایستگاه، در سال‌های ۱۹۹۲، ۱۹۹۵، ۱۹۹۹، ۲۰۰۱، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ شرایط خشکسالی را در طول دوره مطالعه نشان داد که با "سال‌های خشک" چرخه‌های خشکسالی منطقه‌ای مطابقت دارد (۲۰۲۴). در شکل ۴، درصد وقوع خشکسالی‌ها در بازه‌های زمانی مختلف در ایستگاه فولادمحله ارائه شده است.



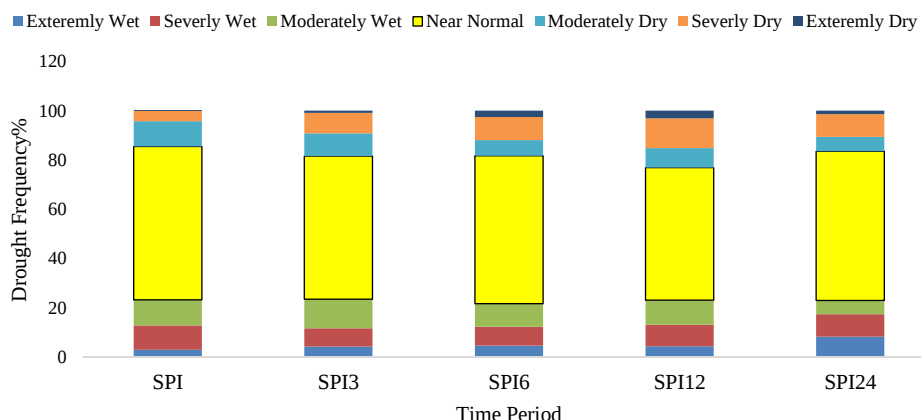
شکل ۴. درصد وقوع خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف در ایستگاه فولاد محله

Fig. 4 Percentage of drought occurrence at different return periods in Fooladmahaleh station

۳-۳. نتایج ایستگاه هواشناسی چهارده دامغان

ارزیابی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه چهارده دامغان با استفاده از شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه نشان داد که الگوی پیچیده‌ای از دوره‌های خشکسالی در منطقه دامغان قابل مشاهده است. مقادیر SPI در بازه کوتاه‌مدت (۱ و ۳ ماهه) با حدود ۲۲٪ خشکسالی شدید تا متوسط که اغلب در فصل‌های بهار و اوایل تابستان قابل مشاهده هستند می‌تواند در بلندمدت روی رشد گیاهان و تغذیه منابع آب سطحی تأثیر گذاشته و منجر به افزایش خطر فرسایش و تخریب خاک در مناطق نیمه‌خشک اطراف ایستگاه شود. در مطالعه‌ای، Bazrafshan و همکاران (۲۰۱۹) نتایج مشابهی را از اثرات کوتاه مدت خشکسالی بر دوره رشد گیاهان گزارش نمودند. در بازه‌های میان‌مدت (۶ و ۱۲ ماهه)، مقادیر SPI، با حدود ۲۲٪ خشکسالی خفیف تا شدید دوره‌های مکرری از بارندگی کمتر از میانگین را در طی چندین ماه نشان دادند که می‌تواند منجر به فشار بر منابع آب محلی شود. این خشکسالی‌های طولانی‌مدت با چالش‌های اقلیمی گسترده‌تری که در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکز ایران مشاهده می‌شود، هم‌راستا هستند. در مطالعه مشابهی، Zarei (۲۰۱۹) گزارش داد که در مناطق جنوبی ایران، روند افزایشی وقوع خشکسالی، به‌ویژه در مقیاس‌های سالانه و فصول سرد، منجر به گرایش کلی منطقه به سمت خشکی می‌شود که در بلندمدت پیامدهای شدیدی برای کشاورزی، مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی منابع آب سطحی و زیرزمینی ایجاد می‌کند. شاخص SPI در مقیاس بلندمدت (۲۴ ماهه) با حدود ۸٪ خشکسالی‌های نادر اما شدید ($SPI > 2$) را نشان داد که تهدیدی جدی برای پایداری اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی و فعالیت‌های کشاورزی در منطقه به شمار می‌آید. در کل، داده‌های این ایستگاه نشان‌دهنده الگوی متناوبی از دوره‌های خشک و مرطوب بود، به‌گونه‌ای که در برخی دهه‌ها، دوره‌های خشک‌تر شدت بیشتری داشتند که با روندهای اقلیمی منطقه مطابقت داشت. Sharafi و Ghaleni (۲۰۲۲) نشان دادند که روند خشکسالی در اغلب اقلیم‌های ایران رو به افزایش است. در مطالعه‌ای دیگر، Babaousmail و همکاران (۲۰۲۱) گزارش نمودند که الگوی متناوبی از دوره‌های خشک و مرطوب در مناطق نیمه‌خشک در جنوب ایران قابل مشاهده

است. تحلیل الگوی مکانی خشکسالی در این ایستگاه نیز مؤید آن است که درصد مناطق تحت تأثیر شرایط خشک در حال افزایش است، به‌ویژه در دهه‌های اخیر که شدت دوره‌های خشکسالی بیشتر شده است. این یافته‌ها با روندهای اقلیمی گسترده‌تری که در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکز ایران، هم‌راستا است و نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه به سمت شرایط خشک‌تر پیش می‌رود. در شکل ۵، درصد وقوع خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف در ایستگاه چهارده دامغان ارائه شده است.



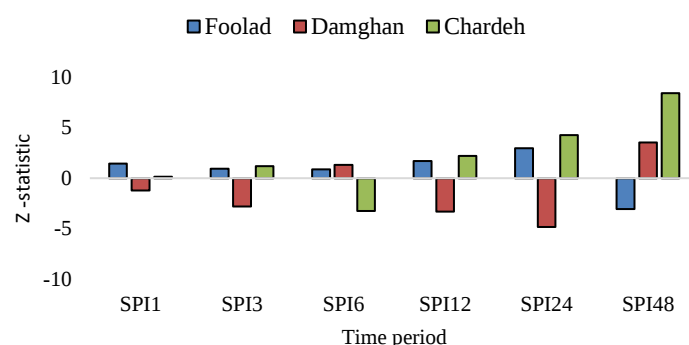
شکل ۵. درصد وقوع خشکسالی در دوره‌های بازگشت مختلف در ایستگاه چهارده دامغان

Fig. 5. Percentage of drought occurrence at different return periods in Chahardeh Damghan station

۳-۴. تحلیل روند شاخص SPI

در تحلیل روند شاخص بارش استاندارد (SPI) در ایستگاه‌های فولادمحله، دامغان و چهارده دامغان در بازه‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) نتایج حاصل از آزمون من-کندال نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌داری در رفتار خشکسالی بین ایستگاه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف است (شکل ۶). در بازه‌های کوتاه‌مدت (۱ و ۳ ماهه)، هیچ روند معناداری در ایستگاه فولادمحله و چهارده دامغان مشاهده نشد؛ در حالی که در بازه سه ماهه (SPI3) در ایستگاه دامغان، روندی نزولی با ضریب معناداری بالا ($Z = -2.796, P = 0.0052$) مشاهده شد. در سایر ایستگاه‌ها، در این بازه روند معناداری مشاهده نشد. ایستگاه چهارده دامغان نیز در SPI6 روند نزولی معناداری ($Z = -3.238, P = 0.0012$) را نشان داد. در بازه‌های SPI12، روندهای قوی‌تری مشاهده شد؛ به‌طوری که در ایستگاه دامغان روندی نزولی ($Z = -3.322, P = 0.0009$) و ایستگاه چهارده دامغان روندی صعودی ($Z = 2.189, P = 0.0286$) مشاهده شد. در SPI24، هر سه ایستگاه دارای روند معنادار بودند: فولادمحله و چهارده دامغان روندی صعودی و ایستگاه دامغان روندی نزولی داشت. در نهایت، در SPI48، بیشترین معناداری مشاهده شد؛ به‌طوری که فولادمحله روندی نزولی، و دامغان و چهارده روندی صعودی و معنادار را تجربه کردند. این تحلیل نشان داد در حالی که نوسانات کوتاه‌مدت بیشتر تصادفی یا بدون روند خاصی بودند، روندهای بلندمدت شاخص بارش استاندارد شده (SPI) تأثیرات اقلیمی معناداری را در مناطق مورد بررسی بازتاب دادند. برای مثال، روندهای بلندمدت شاخص SPI کاهش رطوبت در ایستگاه دامغان و بهبود نسبی شرایط رطوبتی در ایستگاه‌های فولادمحله و چهارده دامغان را نشان داد. نتایج این مطالعه نشان داد که رفتار شاخص SPI در بازه‌های زمانی مختلف و در سه ایستگاه فولادمحله، دامغان و چهارده تفاوت‌های قابل‌توجهی دارد. به‌ویژه، روندهای بلندمدت (SPI24 و SPI48) در مقایسه با دوره‌های کوتاه‌مدت‌تر (SPI1 و SPI3) تغییرات معنادارتری را نشان دادند. برای نمونه، ایستگاه دامغان در SPI3، SPI12 و SPI24 روند نزولی معناداری را تجربه

کرده که بیانگر تشدید شرایط خشکسالی طی سه دهه اخیر است؛ در حالی که ایستگاه چهارده دامغان در همین بازه‌ها دارای روند صعودی بوده که می‌تواند ناشی از بهبود نسبی رطوبت در این ناحیه باشد. این الگو با یافته‌های پژوهش Raziei و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد که نشان دادند مناطق داخلی و نیمه‌خشک ایران در بازه‌های بلندمدت بیشتر در معرض روندهای نزولی یا صعودی معنادار خشکسالی قرار می‌گیرند. همچنین، Khalili و همکاران (۲۰۱۶) افزایش بی‌نظمی در توزیع بارش، به‌ویژه در بازه‌های زمانی بلندمدت را تأیید نمودند. آنها گزارش دادند که حدود ۵۰ درصد از ایستگاه‌های سینوپتیک ایران طی دوره ۵۰ ساله (۱۹۶۱-۲۰۱۰) روند افزایشی را در شاخص تمرکز بارش داشته‌اند که بیانگر تمرکز زمانی بیشتر رویدادهای بارشی است، به‌ویژه در مناطق مرکزی مانند منطقه دامغان، که بی‌نظمی قابل‌توجهی در بارش‌ها دارند. همچنین، روند کاهشی بارش در فصل زمستان که فصل اصلی بارندگی در ایران محسوب می‌شود، در حدود ۶۴ درصد ایستگاه‌ها مشاهده شد که با روند افزایشی شاخص تمرکز بارش مرتبط بوده است. این شواهد با نتایج SPI در منطقه دامغان، به‌ویژه در بازه‌های ۲۴ و ۴۸ ماهه که روند کاهشی معناداری داشتند، همخوانی دارد و نشان‌دهنده خشکسالی‌های طولانی و شدید است. این تغییرات اقلیمی، آسیب‌پذیری منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک را برجسته کرده و ضرورت تدوین راهبردهای سازگار با شرایط اقلیمی را تأکید می‌کند. به‌طور کلی، نتایج مقایسه مکانی روندهای ایستگاه‌ها در منطقه دامغان بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر شرایط اقلیمی ایستگاه دامغان نسبت به ایستگاه‌های فولادمحل و چهارده بوده و نیاز به راهکارهای مدیریتی متفاوت و ویژه در حوزه منابع آب در منطقه دامغان را نشان می‌دهد.



شکل ۶. روند شاخص SPI در ایستگاه‌های فولادمحل، دامغان و چهارده دامغان

در دوره‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه)

Fig. 6 SPI trend in Foolad Mahalleh, Damghan, and Chahardeh Damghan stations at different time scales (1, 3, 6, 12, 24, and 48-month periods)

۳-۵. الگوهای خشکسالی منطقه دامغان

تحلیل خشکسالی‌های هواشناسی در سه ایستگاه منتخب منطقه دامغان با استفاده از شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه نشان داد که الگوهای خشکسالی منطقه دامغان در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی متفاوت است که می‌تواند بازتابی از تنوع ریزاقلیم‌ها و کاربری‌های اراضی در منطقه دامغان باشد. ایستگاه دامغان که در مرکز منطقه مطالعاتی با ارتفاع کم و کاربری کشاورزی قرار دارد، وقوع مکرر خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (SPI) یک‌ماهه و سه‌ماهه را در اواخر زمستان و اوایل بهار نشان داد که می‌تواند موجب اختلال در زمان‌بندی کاشت محصولات دیم منطقه شود. مقادیر SPI در مقیاس میان‌مدت و بلندمدت، در این ایستگاه، دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت را نشان دادند که می‌تواند بر منابع آب زیرزمینی مورد استفاده در کشاورزی فاریاب تأثیرگذار باشد، که با مطالعات مشابه انجام شده در مناطق نیمه‌خشک ایران (Bazrafshan و همکاران، ۲۰۱۹) هم‌راستا است.

ایستگاه فولاد محله که در منطقه‌ای انتقالی بین کوهستان و دشت قرار دارد، دوره‌های خشکسالی مکرر را در پاییز و زمستان تجربه کرده است که می‌تواند تأثیر مستقیمی بر رطوبت خاک داشته و موجب چالش در کشاورزی دیم شود. همچنین، افزایش خشکسالی‌های میان‌مدت در این ایستگاه می‌تواند فشار قابل توجهی بر منابع آب سطحی وارد کند که با نتایج مشابه (Zarei, 2019) در مناطق نیمه‌خشک شمال غربی ایران هم‌راستا است.

ایستگاه چهارده دامغان که در جنوب منطقه مطالعاتی قرار دارد، خشکسالی‌های قابل توجهی را در بهار و اوایل تابستان نشان داد؛ که منطبق بر دوره‌های رشد پوشش گیاهی است. از سوی دیگر، افزایش درصد وقوع خشکسالی‌های شدید بلندمدت در این ایستگاه، می‌تواند تهدیدی برای پایداری منابع آب زیرزمینی باشد. مطالعات انجام شده، تأثیرات بلندمدت خشکسالی را بر منابع آب زیرزمینی تأیید نموده‌اند (Khosravi و Yazdani, 2024). این تفاوت‌ها بر لزوم تدوین راهکارهای مدیریت خشکسالی متناسب با شرایط میکروکلیمایی منطقه مطالعاتی (هر ایستگاه) تأکید دارند؛ از جمله، برنامه‌های پیشنهادی برای هر منطقه، تنظیم برنامه آبیاری فصلی در ایستگاه دامغان، ارتقای ظرفیت ذخیره‌سازی آب در ایستگاه فولادمحله، و اجرای اقدامات احیای اراضی در ایستگاه چهارده دامغان، برای افزایش تاب‌آوری زیست‌محیطی در منطقه مطالعاتی است.

این مطالعه، با بهره‌گیری از شاخص SPI، دیدگاه‌های ارزشمندی در خصوص الگوهای خشکسالی هواشناسی در منطقه دامغان ارائه داده است. اما در عین حال، دارای محدودیت‌هایی است که باید مورد توجه قرار گیرد. نخست، اتکای مطالعه به داده‌های تنها سه ایستگاه هواشناسی ممکن است دقت مکانی تحلیل خشکسالی را کاهش داده و تغییرات ریزمقیاس درون منطقه دامغان را نادیده بگیرد. دوم، تمرکز صرف بر داده‌های بارندگی بدون در نظر گرفتن سایر عوامل تأثیرگذار مانند دما، تبخیر و رطوبت خاک، ممکن است تصویر کاملی از اثرات خشکسالی بر منابع آب و کشاورزی ارائه ندهد. سوم، محدود شدن تحلیل به داده‌های تاریخی مانع از ارزیابی تغییرات آینده ناشی از گرمایش جهانی شده و می‌تواند پیش‌بینی‌های بلندمدت خشکسالی را تحت تأثیر قرار دهد. در نهایت، نبود داده‌های اجتماعی-اقتصادی در این مطالعه، ارزیابی اثرات خشکسالی بر جوامع محلی و ظرفیت‌های سازگاری آن‌ها را محدود کرده است. برای رفع این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی از شبکه‌ای متراکم‌تر از ایستگاه‌های هواشناسی یا داده‌های ماهواره‌ای بارش استفاده کنند تا پوشش مکانی و دقت تحلیل افزایش یابد. همچنین، ترکیب شاخص SPI با شاخص‌های مکمل مانند شاخص استاندارد بارش-تبخیر (SPEI) می‌تواند با در نظر گرفتن نقش دما و تبخیر، درک جامع‌تری از پویایی خشکسالی ارائه دهد. از سوی دیگر، تلفیق تحلیل SPI با مدل‌های هیدرولوژیک و سناریوهای اقلیمی آینده، امکان پیش‌بینی اثرات خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم را فراهم می‌سازد. در بُعد عملی، توسعه برنامه‌های آمادگی در برابر خشکسالی با مشارکت جوامع محلی، از جمله آموزش روش‌های کشاورزی کم‌آب‌بر و سامانه‌های هشدار زودهنگام، می‌تواند تاب‌آوری مناطق نیمه‌خشک را تقویت کرده و در مسیر مدیریت پایدار منابع آب و تولید کشاورزی مؤثر واقع شود.

۴. نتیجه‌گیری

خشکسالی یکی از پدیده‌های اقلیمی مهم و مخرب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که با افزایش شدت و فراوانی آن در دهه‌های اخیر، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، منابع آب و معیشت جوامع محلی به شمار می‌آید. منطقه دامغان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود در استان سمنان و ویژگی‌های اقلیمی نیمه‌خشک، به‌ویژه در برابر کاهش بارش‌ها و افزایش دما بسیار آسیب‌پذیر است. شناخت دقیق الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی در این منطقه می‌تواند به‌طور مستقیم بر برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، کشاورزی پایدار و کاهش آسیب‌پذیری زیست‌محیطی تأثیرگذار باشد. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مطالعه، از شاخص SPI به‌عنوان ابزاری آماری و معتبر برای تحلیل خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف در ایستگاه‌های منتخب منطقه (دامغان، فولادمحله و چهارده دامغان) استفاده شده است. داده‌های بارش بلندمدت از

ایستگاه‌های هواشناسی گردآوری و پس از پردازش آماری (حذف داده پرت، همگن‌سازی، درون‌یابی داده‌های مفقود و نرمال‌سازی)، برای محاسبه شاخص SPI استفاده شد تا روندها، شدت و فراوانی خشکسالی‌های منطقه مطالعاتی مشخص شود. نتایج شاخص SPI در بازه‌های زمانی مختلف (SPI1, SPI3, SPI6, SPI12, SPI24, SPI48)، آسیب‌پذیری بالای منطقه دامغان را در برابر خشکسالی‌های طولانی نشان داد که می‌تواند برای کشاورزی، منابع آب و پایداری زیست‌محیطی پیامدهای قابل توجهی داشته باشد. نتایج به‌دست آمده از ایستگاه‌های مورد مطالعه، الگوهای متفاوتی از خشکسالی در منطقه مطالعاتی نشان داد؛ به طوری که تأثیر خشکسالی در مناطق کوهستانی، دشت و مرکز منطقه متفاوت بود که این تفاوت‌ها می‌تواند به دلیل میکروکلیم‌های تشکیل شده در منطقه مطالعاتی باشد. بنابراین، تأثیر کاهش بارش در بازه‌های زمانی مختلف اثرات متفاوتی بر نظام‌های کشاورزی محلی و اکوسیستم‌ها برجای می‌گذارد. برای مثال، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت عمدتاً بر فصل‌های بحرانی رشد محصولات زراعی، به‌ویژه کشاورزی دیم، تأثیرگذار است؛ در حالی که دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت فشار مضاعفی بر منابع آب زیرزمینی و سطحی وارد می‌کند. بنابراین، مدیریت آن برای کشاورزی فاریاب و جوامع روستایی حیاتی است. این نتایج نشان‌دهنده تغییرپذیری مکانی و زمانی اثرات خشکسالی در منطقه دامغان است که می‌تواند متأثر از ریزاقلیم‌ها و الگوهای کاربری اراضی در مناطق نیمه‌خشک ایران باشد. مطالعه حاضر بر نیاز فوری به تدوین راهبردهای سازگاری خاص هر ایستگاه از جمله بهره‌گیری از ارقام مقاوم به خشکسالی، بهینه‌سازی سامانه‌های آبیاری و توسعه فناوری‌های برداشت آب باران تأکید دارد. همچنین، نتایج نشان داد که یکپارچه‌سازی سیستم پایش خشکسالی مبتنی بر شاخص SPI در چارچوب‌های منطقه‌ای می‌تواند به کاهش اثرات خشکسالی کمک کند و استفاده پایدار از منابع و حفاظت از محیط‌زیست را بهبود بخشد. علاوه بر این، نتایج مطالعه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای تصمیم‌گیری‌های سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی به‌کار گرفته شود تا بتوانند چالش‌های روبه‌رشد ناشی از خشکسالی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به‌طور مؤثرتری مدیریت کنند. توجه به سناریوهای تغییر اقلیم، تحلیل‌های زمانی-مکانی دقیق‌تر و تلفیق شاخص‌های دیگر مانند شاخص شدت خشکسالی (SDI) یا شاخص بارش-تبخیر (SPEI)، می‌تواند در مطالعات آتی مفید واقع شود و درک بهتری از تأثیر خشکسالی بر منابع آب و اکوسیستم‌های منطقه فراهم آورد.

۵. داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر، رساله دکتری نویسنده اول است.

۶. تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

۷. مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شرح زیر است:

مشارکت مهین خسروی، مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله است.

مشارکت صغری پودینه، ویرایش نهایی متن مقاله است.

۸. اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

۹. حمایت مالی

حمایت مالی از مرجعی دریافت نشده است.

۱۰. مراجع

1. Adib, A., Amiri, M., Lotfirad, M., & Farajpanah, H. (2024). Evaluation of meteorological drought using SPI and SPEI on wheat yield in southwestern Iran. *Earth (Switzerland)*, 5(4), 1023-1051. <https://doi.org/10.3390/EARTH5040053/S1>
2. Babaeian, F., Delavar, M., Morid, S., & Srinivasan, R. (2021). Robust climate change adaptation pathways in agricultural water management. *Agricultural Water Management*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106904>
3. Babaousmail, H., Hou, R., Ayugi, B., Ojara, M., Ngoma, H., Karim, R., et al. (2021). Evaluation of the performance of CMIP6 models in reproducing rainfall patterns over North Africa. *Atmosphere*, 12, 475. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12040475>
4. Barker, L. J., Hannaford, J., Chiverton, A., & Svensson, C. (2016). From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(6). <https://doi.org/10.5194/hess-20-2483-2016>
5. Bazrafshan, O., Mahmoudzadeh, F., Asgari Nezhad, A., & Bazrafshan, J. (2019). Adaptive evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in analyzing the trend of intensity, duration, and frequency of drought in arid and semi-arid regions of Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(3), 117–131. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585>
6. Cavus, Y., Stahl, K., & Aksoy, H. (2023). Drought intensity-duration-frequency curves based on deficit in precipitation and streamflow for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(18), 3427–3445. <https://doi.org/10.5194/hess-27-3427-2023>
7. Ebrahimi, R. S., Eslamian, S., Zareian, M. J., Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., et al. (2023). Assessing climate change impact on water balance components using integrated groundwater–surface water models (Case study: Shazand Plain, Iran). *Water (Switzerland)*, 15(3), 118843. <https://doi.org/10.3390/su15031993>
8. Isazade, V., Qasimi, A. B., Toomanian, A., & Isazade, E. (2023). The effect of drought phenomenon on the surface of groundwater aquifer in Qazvin Plain in Iran. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 4(02), 80–85. <https://doi.org/10.38094/jastt42176>
9. Javadian, R., & Nemati, M. (2018). Study of thermal comfort in adaptation of architecture to climatic conditions in Semnan city. *Journal of Application of Geographic Information Systems and Remote Sensing in Urban Planning*, 1, 74–92. [In Persian]
10. Khalili, K., Tahoudi, M. N., Mirabbasi, R., & Ahmadi, F. (2016). Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(4), 1205–1221. <https://doi.org/10.1007/S00477-015-1095-4/METRCS>
11. Kheyruri, Y., Sharafati, A., & Neshat, A. (2023). The socioeconomic impact of severe droughts on agricultural lands over different provinces of Iran. *Agricultural Water Management*, 289, 108550. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108550>
12. Khosravi, M., & Yazdani, M. R. (2024). Evaluating the effect of drought on the temporal pattern of groundwater recharge in Damghanroud watershed. *Watershed Management Research*, 38(1), 146–164. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/wmrj.2024.365662.1585>
13. Li, X., Jia, H., & Wang, L. (2023). Remote sensing monitoring of drought in southwest China using Random Forest and eXtreme Gradient Boosting methods. *Remote Sensing*, 15(19), 4840. <https://doi.org/10.3390/RS15194840>
14. Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1007/S13412-014-0182-Z/METRCS>
15. McKee, T. B., Nolan, J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc.*
16. Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S. M., Heggy, E., Javadi, S., et al. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*, 14(1), 6674. <https://doi.org/10.1038/S41467-023-42411-2>
17. Raziei, T., Saghafian, B., Paulo, A. A., Pereira, L. S., & Bordi, I. (2009). Spatial patterns and temporal variability of drought in Western Iran. *Water Resources Management*, 23(3), 439–455. [In Persian] <https://doi.org/10.1007/S11269-008-9282-4/METRCS>
18. Sharafi, S., & Ghaleni, M. M. (2022). Spatial assessment of drought features over different

- climates and seasons across Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3–4), 941–957. <https://doi.org/10.1007/S00704-021-03853-0/METRICS>
19. Zarei, A. R. (2019). Analysis of changes trend in spatial and temporal pattern of drought over south of Iran using standardized precipitation index (SPI). *SN Applied Sciences*, 1(5), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S42452-019-0498-0/TABLES/6>
20. Zarei, A. R., Shabani, A., & Moghimi, M. M. (2021). Accuracy assessment of the SPEI, RDI and SPI drought indices in regions of Iran with different climate conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 178(4), 1387–1403. <https://doi.org/10.1007/S00024-021-02704-3/TABLES/9>
21. Zarei, M., Hosseini, S. H., & Naemitabar, M. (2023). Assessing vulnerability and population exposed to drought in various climatic regions of northeastern Iran. *Weather, Climate, and Society*, 15(4), 925–941. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0143.1>
22. Zarei, M., & Destouni, G. (2024). Research gaps and priorities for terrestrial water and earth system connections from catchment to global scale. *Earth's Future*, 12(1), e2023EF003792. <https://doi.org/10.1029/2023EF003792>
23. Zhou, M., Haseeb, M., Tahir, Z., Mahmood, S. A., Arif, H., Abdullah-Al-Wadud, M., & Tariq, A. (2025). Multiscale drought assessment with analyzing agricultural, meteorological, and hydrological impacts multi-index approaches (1991–2021). *Theoretical and Applied Climatology*, 156(5), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S00704-025-05494-Z/METRICS>