

An Assessment of Drought Severity Using Drought Indices based on Potential Evapotranspiration-Based and the TOPSIS Multi-Criteria Decision-Making Model at Selected Stations within the Zayandeh-Rud River Basin

Fatemeh Zolfaghari*, Sayed Saeid Eslamian, Ali Reza Gohari, Mohammad Mehdi Matinzadeh and Sara Azadi¹

(Received: August 14-2024 ; Revised: December 15-2024 ; Accepted: March 9-2025)

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author Email: f.zolfaghari@ag.iut.ac.ir.

Abstract

Drought represents one of the most critical natural disasters, exerting profound impacts on agriculture, society, the economy, and water resources. Various indices are used to monitor drought and its effects. This study aims to monitor drought in the Zayandeh-Rud Basin using the Standardized Precipitation Index (SPI), the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), the Evaporative Demand Drought Index (EDDI), the Palmer Drought Severity Index (PDSI), and the Reconnaissance Drought Index (RDI). All these indices are based on potential evapotranspiration, incorporating parameters such as precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, and sunshine duration. These five indices were calculated and evaluated during the statistical period of 1993–2023 for meteorological stations in Isfahan, East Isfahan, Kabootarabad, Daran, Shahreza, Najafabad, and Mobarakeh. After calculating the indices and using spatial zoning maps, the studied stations were compared in terms of these indices. The continuity of dry and wet periods, as well as the intensity of droughts and wet spells, was analyzed. Subsequently, drought intensities during different years in these stations were ranked using the TOPSIS model based on factors such as precipitation, potential evapotranspiration, and station elevation. The results showed that in stations with a dry climate (such as Isfahan, East Isfahan, and Shahreza), drought occurrences (as indicated by higher rankings) have been consecutive over multiple years. Comparing the performance of the indices in the studied stations using spatial zoning maps revealed that the intensity of droughts and wet spells in regions with dry and semi-dry climates was not very significant. However, in areas with humid climates, the fluctuations in drought and wet spell intensities were quite substantial. The findings indicate that the PDSI and EDDI indices are more suitable for evaluating drought in dry climates.

Keywords: Drought index, Climatic zoning maps, TOPSIS approach model, Zayandeh-Rud river basin, Potential evapotranspiration

How to cite this article: Zolfaghari, F., Eslamian, S., Gohari, A. R., Matinzadeh, M. M. and Azadi, S. 2025. An Assessment of Drought Severity Using Drought Indices based on Potential Evapotranspiration-Based and the TOPSIS Multi-Criteria Decision-Making Model at Selected Stations within the Zayandeh-Rud River Basin. *J. Water and Soil Sci.* 29(2):83-106. DOI: [10.47176/jwss.29.2.64541](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.64541)

Copyright © 2025 Zolfaghari et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

تعیین شدت خشکسالی با کمک شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر تبخیر-تعرق پتانسیل و مدل رویکرد تاپسیس (TOPSIS) در ایستگاه‌های منتخب در محدوده حوضه آبریز زاینده‌رود

فاطمه ذوالفقاری^{*} ID، سید سعید اسلامیان، علیرضا گوهری، محمد مهدی متین زاده و سارا آزادی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹)

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: f.zolfaghari1999@gmail.com

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین بلاهای طبیعی است که آثار ناشی از آن در بخش‌های کشاورزی، اجتماعی، اقتصادی و منابع آب پدیدار می‌شود. برای پایش خشکسالی و آثار آن شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه، پایش خشکسالی حوضه زاینده‌رود با شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر-تعرق پتانسیل (SPEI)، شاخص تقاضای تبخیری (EDDI)، شاخص پالم (PDSI) و شاخص خشکسالی شناسایی مجموع (RDI) که همگی مبتنی بر تبخیر-تعرق پتانسیل بوده و پارامترهای بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی در محاسبه شاخص‌های یادشده دخیل هستند. پنج شاخص یادشده، در طول دوره آماری ۱۹۹۳-۲۰۲۳ و در ایستگاه‌های هواشناسی اصفهان، شرق اصفهان، کبوترآباد، داران، شهرضا، نجف‌آباد و مبارکه محاسبه و ارزیابی شد. بعد از محاسبه شاخص‌های یادشده و با استفاده از نقشه پهنه‌بندی اقلیمی، ایستگاه‌های مورد مطالعه از لحاظ این شاخص‌ها مقایسه شدند و تداوم دوره‌های خشک و تر و شدت وقوع ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها بررسی شدند و سپس با مدل رویکرد تاپسیس (TOPSIS) بر اساس مقدار بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل و ارتفاع ایستگاه وقوع شدت خشکسالی‌ها در سال‌های مختلف در ایستگاه‌های یادشده رتبه‌بندی شد. نتایج نشان داد که در ایستگاه‌هایی که اقلیم خشک (مانند اصفهان، شرق اصفهان و شهرضا) دارند، وقوع خشکسالی (با توجه به رتبه بیشتر) در سال‌های متوالی بوده است. نتایج مقایسه عملکرد شاخص‌ها در ایستگاه‌های یادشده با توجه به نقشه پهنه‌بندی، نشان داد که شدت وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطقی که اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارند، چندان چشمگیر نبوده؛ اما در مناطقی با اقلیم مرطوب، نوسانات شدت وقوع خشکسالی و ترسالی بسیار زیاد است. نتایج حاکی از آن است که دو شاخص PDSI و EDDI برای ارزیابی خشکسالی در اقلیم خشک مناسب هستند.

واژه‌های کلیدی: شاخص خشکسالی، نقشه پهنه‌بندی اقلیمی، مدل رویکرد تاپسیس، حوضه رودخانه زاینده‌رود، تبخیر-تعرق پتانسیل

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

آب یکی از اساسی‌ترین نیازهای بشر است. کمبود آب و خشکسالی می‌تواند منجر به بروز بحران‌های جدی در زندگی انسان شود. خشکسالی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم سبب ایجاد بحران در زندگی اجتماعی انسان‌ها می‌شود. اختلاف برای دستیابی به منابع آب، به‌خطرافتادن بهداشت عمومی و تأثیرات منفی زیست‌محیطی و اکولوژیک نمونه‌هایی از این بحران‌ها هستند (۲۲). خشکسالی پدیده‌ای طبیعی و تکرارپذیر است که در یک دوره زمانی مشخص و به نسبت طولانی بر اثر کاهش بارش رخ می‌دهد (۱۵). خشکسالی به‌عنوان یک پدیده اقلیمی با سرعت کم شروع می‌شود و طبیعت پنهان دارد؛ به‌طوری‌که زمان شروع آن به‌راحتی قابل تشخیص و شناسایی نیست، مدت‌زمان وقوع آن طولانی است و خسارت‌های ناشی از آن در بخش‌های کشاورزی، محیط‌زیست، اقتصاد و سایر بخش‌ها به‌صورت تدریجی آشکار می‌شود (۱). تغییرات شدید در مقدار و شدت و پراکندگی بارش‌ها باعث بروز خشکسالی در مناطق مختلف و ایجاد خسارت در بخش‌های مختلف در سراسر کره زمین شده است (۳ و ۲۵). شدت و مدت خشکسالی‌ها در اقلیم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است (۳۳). بوردی و همکاران در سال ۲۰۰۱ در مورد خشکسالی‌های سال ۲۰۰۰ و ۱۹۵۰ در ایتالیا مطالعاتی با استفاده از شاخص $Precipitation Index \backslash Standardized (SPI)$ در مقیاس‌های زمانی مختلف انجام دادند و نتیجه گرفتند که در بعضی مناطق SPI ۲۴ ماهه یک روند را نشان می‌دهد و بیان کردند که SPI برای تحلیل خشکسالی‌های بلندمدت مناسب است (۸). ویسته سرانو و همکاران در سال ۲۰۱۱ در بررسی آثار فرایند گرم‌شدن زمین بر خشکسالی‌ها و منابع آب در اسپانیا، با استفاده از دو شاخص خشکسالی SPI و $SPEI$ نشان دادند که نتایج حاصل از دو شاخص مشابه هم بوده است (۳۲). اسدی زارچ و همکاران (۲۰۱۱) با ارزیابی دو شاخص بارش استاندارد شده و شاخص شناسایی خشکسالی (روش پنمن مانیتیت) برای ۴۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ایران به این نتیجه رسیدند که هر دو شاخص نتایج مشابهی برای اثر خشکسالی در مناطق

مختلف ایران نشان دادند؛ اما به‌علت اینکه شاخص شناسایی خشکسالی پارامترهای دما و تبخیر-تعرق پتانسیل را با خود همراه می‌سازد، برای ایران که اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد، مناسب‌تر است (۶). لیو و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از شاخص $Evaporative Demand Drought Index (EDDI)$ خشکسالی‌های احتمالی لیاونینگ چین در شش مقیاس زمانی متفاوت را ارزیابی کردند (۲۰). هابینز و همکاران (۲۰۲۰) طی مطالعه‌ای مبنای فیزیکی شاخص خشکسالی تنها مبتنی بر تبخیر-تعرق مرجع ($E0$) شاخص $EDDI$ را ارائه کردند (۱۶). نوگرائو و همکاران (۲۰۲۲) برای محاسبه شاخص $EDDI$ یک دیدگاه پارامتری را ارزیابی کردند و به مقایسه هشت تابع توزیع مختلف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تابع لوگ-لجستیک سه پارامتری برای این شاخص مناسب است و همچنین این تابع برای ایجاد مقادیر استاندارد شده در شرایط آب‌وهوایی متفاوت بهترین انتخاب است (۲۶). دیوز و همکاران روش‌های مختلفی را برای تخمین تقاضای تبخیری جوی مقایسه و شاخص‌های $EDDI$ و SPI را برای زمان‌های حال و آینده در مقیاس‌های منطقه‌ای در ایالات متحده آمریکا محاسبه کردند و به بررسی انتخاب روش مناسب برای تخمین $E0$ و انتخاب مدل گردش عمومی $General Circulation Models (GCMS)$ که مرتبط با حساسیت و دقت روندهای آینده این دو شاخص است، پرداختند (۱۱). اسلامیان و همکاران (۱۳۸۴) با به‌کاربردن ۱۰ مشخصه خشکسالی بر پایه شدت، مدت و فراوانی شاخص استاندارد شده بارش در ۴۵ ایستگاه اصفهان و سپس بر اساس تحلیل خوشه‌ای آن‌ها، پنج گروه مکانی خشکسالی را در اصفهان تشخیص دادند (۱۲). خلیلی و همکاران (۲۰۱۱) طی پژوهش خود نشان دادند که به‌کاربردن داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل موجب افزایش دقت و حساسیت تعیین خشکسالی می‌شود (۱۷). خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۸۵) اظهار داشتند که در روش تاپسیس $Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution$ ، ارتباط سیستماتیک بین مقادیر متغیرهای جوی در سال‌های مختلف وجود دارد که از ارکان مؤثر

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت تقریبی ۲۶۹۱۷ کیلومتر مربع، در قسمت میانی فلات مرکزی ایران واقع است. طول این حوضه از مناطق مرتفع غرب استان اصفهان تا شرق اصفهان است. ارتفاع متوسط این حوضه ۱۴۶۶ متر است (۵). این منطقه طیف وسیعی از آب‌وهوا را در خود جای داده است. ناحیه چلگرد که در غرب حوضه واقع است، سالانه بارش برابر ۱۴۱۶ میلی‌متر دارد. در حالی که تالاب گاوخونی که در شرق حوضه واقع است، سالانه بارشی تقریباً برابر با ۱۰۰ میلی‌متر دریافت می‌کند (۵). در حال حاضر منابع آب موجود در حوضه زاینده‌رود، با وجود ساخت سدها کافی نبوده و منطقه با مسئله کم‌آبی مواجه است. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

در این مطالعه داده‌های ماهانه قابل‌دسترس بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه، سرعت باد، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی برای هفت ایستگاه منتخب در حوضه زاینده‌رود برای دوره آماری ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳ جمع‌آوری شد. گفتنی است هرچه طول دوره آماری بیشتر باشد، خشکسالی با دقت بیشتری پایش و پیش‌بینی می‌شود. همچنین در این مطالعه برای محاسبه شاخص‌های SPEI، EDDI و RDI، داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل نیاز بود که برای محاسبه آن از روش پنمن-پنمن-مانیت فائو استفاده شد (۱۳). علت استفاده از روش پنمن-مانیت فائو وجود داده‌های هواشناسی کافی از جمله دما، ساعات آفتابی، سرعت باد و رطوبت نسبی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه است که باعث دقت زیاد در محاسبه شاخص‌ها می‌شود.

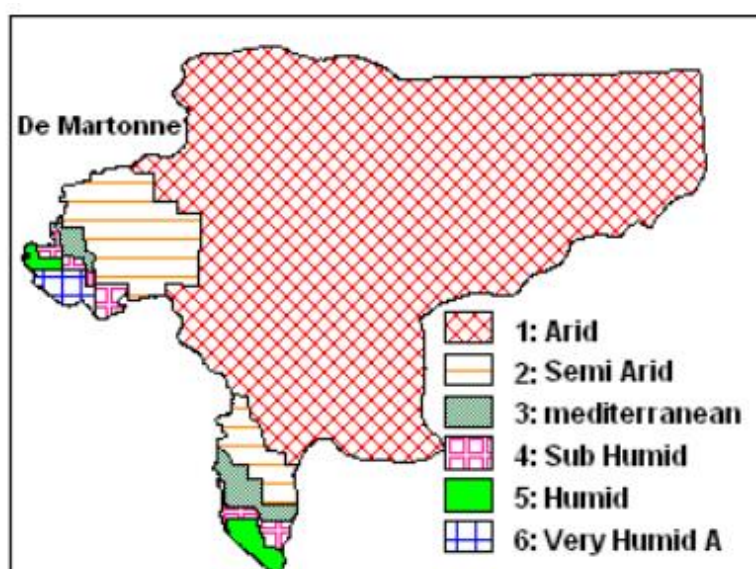
نقشه پهنه‌بندی اقلیمی حوضه

نقشه پهنه‌بندی اقلیمی شکل ۱ بر مبنای روش دومارتن اصلاح‌شده به‌دست آمده است (۳۶). این روش بر اساس عامل دما، بارش و ارتفاع است. در این روش ایستگاه‌های اصفهان، شرق اصفهان، کبوترآباد، شهرضا، مبارکه و نجف‌آباد در اقلیمی خشک قرار گرفته‌اند و ایستگاه داران در اقلیم مدیترانه‌ای قرار گرفته است (۳۶). در روش دومارتن اصلاح‌شده بیشتر

این روش تلقی می‌شود که در روش‌های سنتی، داده‌های هر سال به‌طور مجزا برای تعیین و رتبه‌بندی خشکسالی و ترسالی در نظر گرفته می‌شدند (۱۸). روشن و همکاران (۲۰۱۶) بیان داشتند که با توجه به نرخ فعلی گرمایش جهانی، نمی‌توان تنها متغیر بارش را در مدل تاپسیس در نظر گرفت؛ بلکه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بایستی روند تبخیر نیز در نظر گرفته شود. با اعمال بیشینه و کمینه دما، تاپسیس قادر به حسابرسی افزایش دمای مرتبط با روند گرم‌شدن زمین است. باین‌وجود بارش باید به‌عنوان اساسی‌ترین متغیر در تعیین سال‌های خشک و مرطوب باقی بماند (۲۸). از این‌رو، در این مطالعه، با نقشه پهنه‌بندی اقلیمی دو نوع اقلیم در دو ایستگاه منتخب مشخص می‌شود و سپس با کمک مدل رویکرد تاپسیس شدت وقوع خشکسالی در سال‌های مختلف تعیین و رتبه‌بندی شده و به تحلیل خشکسالی‌ها پرداخته می‌شود. آزادی و همکاران (۱۳۹۴) با پنج روش شاخص پالمر را در حوزه‌های مرکزی ایران ارزیابی و واسنجی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که به‌علت اینکه رطوبت خاک از پارامترهای مهم شاخص پالمر است، اگر با استفاده از واسنجی مدل هیدرولوژیک SWAT، داده‌های رطوبت خاک با دقت زیاد استخراج شوند، سبب ارزیابی دقیق خشکسالی با شاخص پالمر می‌شود. همچنین به‌علت اینکه مبنای شاخص پالمر بیلان آب در خاک است؛ بنابراین در ارزیابی خشکسالی کشاورزی می‌تواند بسیار کارآمد باشد (۴). گفتنی است که انواع شاخص‌های مختلفی برای پایش خشکسالی وجود دارد و هر کدام از شاخص‌ها یک مقداری را مشخص می‌کنند. تاکنون پژوهشی که در آن شاخص‌های مختلف کنار هم قرار گیرند و نوسانات این شاخص‌ها و تغییرات آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف با اقلیم‌های متفاوت مقایسه شود، انجام نشده است. از این‌رو، در این مطالعه با استفاده از نقشه پهنه‌بندی اقلیمی این مقایسه صورت گرفته است و می‌توان بر اساس نوسانات شاخص‌های یادشده و تحلیل شاخص‌ها، شرایط آبی حوضه زاینده‌رود را پیش‌بینی کرد. همچنین با مدل رویکرد تاپسیس شدت وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در سال‌های مختلف تعیین شده و به تحلیل خشکسالی‌ها پرداخته می‌شود.

جدول ۱. ایستگاه های هواشناسی منتخب در محدوده حوضه آبریز زاینده رود

نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی (درجه-دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه-دقیقه)	نوع ایستگاه
اصفهان	۱۵۵۰/۴	۴۰'	۵۱° ۳۲'	سینوپتیک
شهرضا	۱۸۴۵/۲	۵۰'	۵۱° ۳۱'	سینوپتیک
شرق اصفهان	۱۵۴۳	۵۲'	۵۱° ۳۲'	سینوپتیک
کبوترآباد	۱۵۴۵	۵۱'	۵۱° ۳۲'	سینوپتیک
داران	۲۲۹۰	۲۲'	۵۰° ۳۲'	سینوپتیک
نجف آباد	۱۶۴۱	۲۳'	۵۱° ۳۸'	کلیما تولوژی - سینوپتیک
مبارکه	۱۷۱۰	۲۳'	۵۱° ۱۳'	باران سنجی - سینوپتیک



شکل ۱. نقشه پهنه بندی اقلیمی دومارتن اصلاح شده برای ایستگاه های مورد مطالعه در حوضه زاینده رود (۳۶)

خوبی داشته اند؛ ولی برای بخش های مرکزی و شرقی با توجه به تفاوت های اقلیمی، این روش عملکرد خوبی نداشته است (۳۶).

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

به طور کلی این شاخص برای مبنای بارش های طولانی مدت ماهانه برای هر منطقه محاسبه می شود. ابتدا باید متغیرهای مربوط به این تابع برای مقیاس زمانی مد نظر برآورد و تابع

قسمت های استان اصفهان در یک منطقه اقلیمی واحد قرار دارند که بیشتر آن ها در قسمت های مرکزی و شرقی استان اصفهان قرار دارند. همچنین دما عامل مهمی در قسمت های کم ارتفاع شرق استان (مناطق گرم، خشک و گرم) است. عامل بارش نیز بیشترین اثر را در ارتفاعات غربی و جنوبی استان (مرطوب، سرد و نیمه مرطوب و سرد) را داشته است. به طور کلی عوامل بارش، تغییر دما و تغییر ارتفاع برای جداسازی بخش های غربی و جنوبی عملکرد

بارش‌های برابر با صفر میلی‌متر m باشد، q از معادله (۶) به دست می‌آید:

$$q = \frac{m}{n} \quad (۶)$$

در این مرحله شاخص SPI محاسبه می‌شود (معادله ۷) و به این صورت است که احتمال تجمعی $H(X_W)$ به متغیر نرمال استاندارد Z یا میانگین صفر واریانس یک تبدیل می‌شود که این متغیر نرمال استقرار، همان شاخص SPI است.

$$SPI_W = \phi^{-1}(u_w) = \phi^{-1}(H(x_w)) \quad (۷)$$

طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر SPI در جدول ۲ قابل مشاهده است. بر مبنای مطالعات بسیاری از پژوهشگران، مناسب‌ترین توابع برای برازش روی داده‌های بارش، تابع توزیع گاما است (۳۱).

شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق (SPEI)

در شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر-تعرق، SPEI، علاوه بر بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل نیز در نظر گرفته می‌شود و در این شاخص اثر افزایش دما بر بیلان آب نیز لحاظ می‌شود. دامنه تغییرات شاخص SPEI نیز همانند SPI است؛ ولی شاخص SPEI تا حدودی محدودیت‌های شاخص SPI را برطرف کرده است. برای محاسبه شاخص SPEI، ابتدا باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه محاسبه شود و سپس با یک مدل ساده بیلان آب، اختلاف بین مقدار بارش (P) و مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) برای ماه نام محاسبه شود (معادله ۸).

$$PE = P - PET \quad (۸)$$

محاسبه این شاخص مانند روشی که برای محاسبه شاخص SPI ارائه شد، نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر D_i از طریق برازش یک تابع چگالی احتمال است. چون مقادیر D_i از کران پایین به مقدارهای منفی منتهی می‌شود، توابع احتمال دو پارامتری نمی‌توانند به کار گرفته شوند. ویسته سرانو و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی توابع مختلفی که دارای سه پارامتر بودند، بیان داشتند که تابع چگالی احتمال لوگ-لجستیک دارای

توزیع تجمعی محاسبه شود و به یک تابع توزیع تجمعی نرمال یا $Q^{-1}(uw)$ برای محاسبه SPI تبدیل شود. به عبارت دیگر، مقدار شاخص SPI را می‌توان با متغیر استاندارد که میانگین صفر و انحراف معیار یک دارد نشان داد؛ بنابراین تابع توزیع گاما روی داده‌های بارش استاندارد مد نظر برازش داده می‌شود. تابع توزیع گامای دو پارامتری مطابق معادله (۱) است:

$$f_{X_W}(X_W) = \frac{X_W}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-X_W/\beta} \quad X_W > 0 \quad (۱)$$

X_W مقدار بارش در مقیاس زمانی W و Γ تابع گاما است که به صورت معادله (۲) قابل تعریف است:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (۲)$$

متغیرهای α و β با روش حداکثر درست نمایی (Maximum Likelihood) برآورد می‌شوند که به صورت معادله (۳) است:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \\ \hat{\beta} &= \frac{\bar{X}_W}{\hat{\alpha}} \\ A &= \ln(\bar{X}_W) - \frac{\sum \ln(x_w)}{n} \end{aligned} \quad (۳)$$

در این معادله n تعداد مشاهدات مربوط به بارش است.

احتمال تجمعی برای هر رویداد بارش بعد از برازش تابع گاما روی داده‌های ایستگاه‌های منتخب به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$F_{X_W}(x_w) = \frac{1}{\hat{\beta} \hat{\alpha} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^{x_w} x_w^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x_w}{\hat{\beta}}} dx_w \quad (۴)$$

تابع توزیع گاما دارای حد پایین صفر است و چولگی به راست (مثبت) دارد؛ به این علت که تابع توزیع گاما دارای نقطه صفر تعریف نشده است؛ ولی مقادیر بارش ممکن است صفر باشند. ابتدا باید داده‌های صفر از سری داده‌ها حذف شوند و بعد تابع توزیع گامای $f(x'_w)$ سری داده‌های جدید x'_w ، محاسبه و سپس احتمال تجمعی به صورت معادله (۵) محاسبه شود:

$$H(x_w) = q + (1-q) \cdot F(x'_w) \quad (۵)$$

q انتقال مقدار بارش صفر میلی‌متر است. در صورتی که تعداد

جدول ۲. طبقه بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI

طبقه بندی	مقادیر SPI
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۴۹- تا ۱/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	۲- و کمتر

با $1-P$ می شود و علامت نتایج SPEI عوض می شود. مقادیر ثابت معادله (۱۱) به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} C_0 &= 2.515517 & C_1 &= 0.802853 & C_2 &= 0.010328 \\ d_1 &= 1.432788 & d_2 &= 0.189269 & d_3 &= 0.001308 \end{aligned}$$

در شاخص SPEI میانگین داده ها برابر صفر و انحراف معیار آن ها برابر یک است. اگر مقدار SPEI صفر شود، نشان می دهد این مقدار متناظر با مقدار ۵۰ درصد در تابع توزیع تجمعی D بر اساس تابع توزیع لوگ- لجستیک است (۲۹). طبقه بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر SPEI در جدول ۳ قابل مشاهده است. گفتنی است که در مطالعه حاضر از بسته محاسبات SPEI قابل استفاده در نرم افزار Rstudio که توسط برگوئرا و ویسته سرانو در سال ۲۰۱۷ توسعه داده شده است، برای محاسبه این شاخص استفاده شد (۹).

شاخص خشکسالی تقاضای تبخیری (EDDI)

شاخص خشکسالی تقاضای تبخیری برای اولین بار در سال ۲۰۱۶ توسط هایبیز معرفی شد (۱۶ و ۲۱). بیشتر شاخص های خشکسالی با متغیرهای بارش و دما، ناهنجاری های آب و هوایی را نشان می دهند. شاخص تقاضای تبخیری، ارتباط بین تقاضای تبخیری (E_0) و تبخیر و تعرق واقعی (ET) است. تقاضای تبخیری جو را می توان از تبخیر- تعرق پتانسیل (PET) یا تبخیر

بهترین برازش بر مقادیر P_i است. شکل کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت معادله (۹) است.

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

که در آن پارامترهای α, y, β به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D_i است و تابع احتمال تجمعی لوگ-لجستیک سه پارامتری از معادله (۱۰) به دست می آید.

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

و در مرحله آخر مقادیر احتمال تجمعی برای مقدارهای D_i به تابع نرمال استاندارد شده ای با میانگین صفر و انحراف معیار یک تبدیل می شود که این مقادیر برابر با مقادیر شاخص SPEI هستند. تابع کلاسیک ابراموتیزواستیگان با استفاده از مقادیر تابع $F(x)$ تخمینی برای مقدار شاخص SPEI به صورت معادله (۱۱) است (۲۳).

$$SPEI = w - \frac{C_0 + C_1 w + C_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (11)$$

که مقدار w در معادله (۱۱) به صورت معادله (۱۲) محاسبه می شود.

$$W = \sqrt{-2L_R}(P) \quad \text{for } P \leq 0.5 \quad (12)$$

$$P = 1 - F(x)$$

که P برابر مقدار احتمال فراتر رفتن از مقدار D_i تعیین شده است.

اگر مقدار P بزرگ تر از ۰/۵ باشد، در این صورت مقدار P برابر

جدول ۳. طبقه بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI

طبقه بندی	مقادیر SPEI
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۴۹- تا ۱/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	۲- و کمتر

این شاخص بر مبنای برازش توزیع دو پارامتری گاما یا لوگ نرمال روی داده های بارش و تقسیم مقادیر بارش بر تبخیر-تعرق پتانسیل به دست می آید. برای محاسبه این شاخص ابتدا مقدار اولیه α_k طبق معادله (۱۳) محاسبه می شود:

$$i = 1 : N \quad j = 1 : 12 \quad \alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}} \quad (13)$$

در فرمول بالا P_{ij} و PET_{ij} به ترتیب مقدار بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل ماه j ام سال i ام است. N برابر با تعداد سال های آماری و k برابر با مقیاس زمانی مورد تحقیق (سه، شش، نه و ۱۲ ماهه) است. با این فرض که مقادیر α_k از توزیع لوگ نرمال پیروی می کنند، مقدار استاندارد شده RDI برای تعیین گروه خشکسالی از معادله (۱۴) به دست می آید:

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (14)$$

در فرمول بالا $\bar{y}$ میانگین حسابی و σ_y انحراف معیار $y^{(i)}$ هستند.

به دلیل اینکه از شاخص بارش استاندارد شده برای توسعه شاخص شناسایی خشکسالی استفاده شده است؛ بنابراین آستانه های طبقه بندی این شاخص مشابه با شاخص بارش استاندارد شده است.

ساکریس و همکاران (۲۰۰۸) بیان داشتند که برای

و تعرق مرجع (E0) تخمین زد؛ اما هر کدام از دو متغیر مفهوم های متفاوتی دارند (۲۴). در محاسبه شاخص EDDI برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (که به عنوان داده ورودی استفاده می شود)، از یک روش فیزیکی مانند روش محاسبه پنمن-مانتیت فائو (۲۷) و یا پنمن-مانتیت انجمن مهندسين عمران آمریکا استفاده می شود (۳۳). داده های ورودی مورد نیاز برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل، دما، تشعشع خورشیدی، سرعت باد، رطوبت نسبی و فشار جو است. محاسبه شاخص EDDI مطابق روش محاسبه شاخص SPI است و تابع توزیع گاما روی داده ها برازش داده می شود. نوگرائو و همکاران (۲۰۲۲) برای محاسبه شاخص EDDI یک دیدگاه پارامتری را ارزیابی کردند و به مقایسه هشت تابع توزیع مختلف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تابع لوگ-لجستیک سه پارامتری برای این شاخص مناسب است و همچنین این تابع برای ایجاد مقادیر استاندارد شده در شرایط آب و هوایی متفاوت بهترین انتخاب است (۲۶). طبقه بندی شاخص EDDI مشابه شاخص SPI است.

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

ساکریس و ونجلیس (۲۰۰۵) با توجه به اینکه در مناطقی که بارش کم و دما و تبخیر و تعرق زیاد است، نمایه بارش استاندارد شده توانایی نشان دادن خشکسالی را ندارد، شاخص شناسایی خشکسالی را ارائه دادند (۲۹).

گسترده شاخص پالمر در مطالعات و با توجه به لزوم بررسی و ارزیابی خشکسالی و ترسالی در مناطق اقلیمی مختلف ایران، نیاز است شاخص پالمر برای شرایط کشور بررسی و واسنجی شود (۱۳). از این رو با توجه به نتایج مثبت شاخص پالمر واسنجی شده (۷)، برای دوران ترسالی ضرایب p و q به ترتیب برابر $۰/۹۴۶$ و $۰/۰۰۲$ و برای دوران خشکسالی برابر $۰/۸۹۲$ و $۰/۰۰۲$ است. ضرایب p و q به ترتیب مدت زمان استمرار و دوام یک واقعه خشکسالی یا ترسالی را تعیین می‌کنند (۷). از این رو در این مطالعه از ضرایب وزنی مشخصه اقلیمی تعدیل شده و شاخص شدت خشکسالی پالمر واسنجی شده برای ایران استفاده شده است (۶). در مطالعه اشاره شده، از تلفیق اطلاعات ۵۰۶ زیرحوزه هیدرولوژیک کشور کلیه ضرایب وزنی مشخصه اقلیمی برای ۱۷ حوزه مطالعاتی بزرگ‌تر استخراج و در ادامه ضرایب معادله نهایی پالمر برای کل کشور واسنجی شد. معادله شدت در روش اصلی پالمر (PDSI) مستخرج برای ۱۳ دوره خشکسالی و ۹ منطقه در آمریکا به صورت معادله (۱۸) است (۷):

$$X_i = 0.897X_{i-1} + 0.333Z_i \quad (18)$$

که ضرایب $۰/۸۹۷$ و $۰/۳۳۳$ به عنوان عوامل دوام دوره (تیین مدت زمان استمرار و دوام دوره خشکسالی) هستند. معادله شدت خشکسالی پالمر واسنجی شده (PDSI_{calb}) برای ۳۶ دوره خشکسالی و ترسالی در ۱۷ منطقه مطالعاتی در ایران (معادلات ۱۹ و ۲۰) (۴):

$$X_i = 0.892X_{i-1} + 0.002Z_i \quad (19)$$

$$X_i = 0.946X_{i-1} + 0.002Z_i \quad (20)$$

در این مطالعه، شاخص پالمر واسنجی شده با استفاده از اطلاعات ماهانه دما و بارش برای دوره آماری ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳ و همچنین از مقادیر شبیه‌سازی شده ظرفیت خاک (AWC) مستخرج از اجرای مدل ابزار ارزیابی آب خاک (SWAT)، محدوده هفت ایستگاه هواشناسی منتخب در این مطالعه محاسبه شده است (۱۳). در این پژوهش مقدار رطوبت برای اولین مقطع زمانی صفر در نظر

مقیاس‌های زمانی مختلف در مناطق متفاوت α_k هم از توزیع لوگ نرمال و هم از توزیع گاما پیروی می‌کند و در بسیاری از موارد توزیع گاما موفق‌تر ظاهر شده است (۳۰). همچنین توزیع گاما برای مقیاس‌های کوچک زمانی که مقدار شاخص خشکسالی مجموع برابر صفر خواهد شد و روش بالا مناسب نیست، را حل خواهد کرد (معادله ۱۵):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad x > 0 \quad (15)$$

در این معادله γ پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس، x مقدار بارش و $\Gamma(\gamma)$ تابع گاما هستند. مقادیر γ و β با روش حداکثر درست‌نمایی برای هر ایستگاه و هر مقیاس زمانی تخمین زده می‌شوند. تخمین γ و β با روش حداکثر درست‌نمایی به صورت معادله (۱۶) است:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\gamma}$$

که n برابر با تعداد مشاهدات است.

از آنجایی که توزیع گاما برای مقادیر $x = 0$ تعریف نشده و توزیع بارش می‌تواند مقادیر برابر با صفر را نیز اختیار کند، توزیع تجمعی به صورت معادله (۱۷) نوشته می‌شود:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (17)$$

که q احتمال بارش صفر و $G(x)$ برابر با احتمال تجمعی گامای ناقص است. اگر m برابر با شماره صفر در سری زمانی α_k باشد، مقدار q برابر m/n است. مقدار $H(x)$ در نهایت با استفاده از اصل انتقال هم‌احتمال به پارامتر استاندارد شده z با میانگین صفر و انحراف معیار یک برده می‌شود که همان RDI_{st} خواهد بود (۱۱).

شاخص پالمر (PDSI)

شاخص شدت خشکسالی پالمر توسط پالمر (۱۹۶۵) برای سنجش میزان نوسانات ذخیره‌ی رطوبتی خاک برای ایالات متحده‌ی آمریکا توسعه یافته است؛ اما به علت کاربرد

ایده آل منفی برابر بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل و یا کمترین مقدار بارش است.

$$A^* = \{\sqrt{i}^* \dots \dots \sqrt{n}^*\} \quad (22)$$

$$A' = \{\sqrt{i}' \dots \dots \sqrt{n}'\} \quad (23)$$

در گام چهارم نیز با استفاده از معادله‌های (۲۴) و (۲۵) به ترتیب مقدار فاصله از ایده آل‌های مثبت و ایده آل‌های منفی به دست می‌آید:

$$si^* = \left[C \left(\sqrt{i}^* - \sqrt{ij} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad i = 1000000m \quad (24)$$

$$si' = \left[C \left(\sqrt{i}' - \sqrt{ij} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad i = 1000000m \quad (25)$$

در گام بعدی با استفاده از مقدار فاصله از ایده آل مثبت و ایده آل منفی، مقدار شاخص شباهت طبق معادله (۲۶) محاسبه می‌شود:

$$ci^* = \frac{si'}{si^* + si'} \quad 0 < ci^* < 1 \quad (26)$$

ci^* بیانگر شاخص شباهت است و مقدار آن بین صفر و یک است هرچه این مقدار بیشتر باشد، مرتبه بیشتری خواهد گرفت (۱۹) و بیانگر حالت مرطوب است و هرچه مقدار آن کمتر باشد، بیانگر حالت خشک تر است. گفتنی است که تمام مراحل روش تاپسیس در نرم افزار متلب و با کدنویسی برای هر ایستگاه صورت گرفته است.

نتایج و بحث

به طور کلی ایستگاه اصفهان با توجه به اینکه در اقلیم خشک قرار دارد، ماهیت اقلیم خشک میزان بارش کم و میزان تبخیر-تعرق پتانسیل زیاد است. همچنین مقدار رطوبت خاک در ایستگاه یادشده اندک است. با توجه به شکل ۲ در سال‌های اخیر (۲۰۲۳-۲۰۱۹) شاخص‌های PDSI و EDDI هر دو بیانگر وقوع ترسالی با شدت متفاوت هستند؛ یعنی طی این سال‌ها میزان رطوبت نسبی که مبنای محاسبه هر دو شاخص است، زیاد بوده است. شاخص SPI و SPEI نیز در سال‌های اخیر به موازات هم ولی با شدت وقوع متفاوت نوسان داشته‌اند.

گرفته شده است؛ اما چون این شاخص بر اساس بیلان آب در خاک است، مقادیر رطوبت خاک در دو لایه سطحی و عمقی برای کل سری زمانی محاسبه می‌شود.

مدل رویکرد TOPSIS

تاپسیس (TOPSIS) که توسط هوانگ ویون در سال ۱۹۸۱ مطرح شد، به عنوان یک روش ساده در رتبه‌بندی کاربرد دارد. در روش تاپسیس، استاندارد انتخاب بهترین گزینه به این شکل است که به طور همزمان کمترین فاصله را با راه‌حل‌های ایده آل مثبت و بیشترین فاصله را با راه‌حل‌های ایده آل منفی داشته باشد (۱۰ و ۳۴).

در روش تاپسیس مقادیر بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل و ارتفاع هر ایستگاه به عنوان متغیرهای ماتریس اولیه تصمیم‌گیری هستند.

برای اجرای روش تاپسیس ابتدا باید با استفاده از معادله (۲۰) ماتریس اولیه تصمیم‌گیری را به یک ماتریس بی بعد تبدیل کرد.

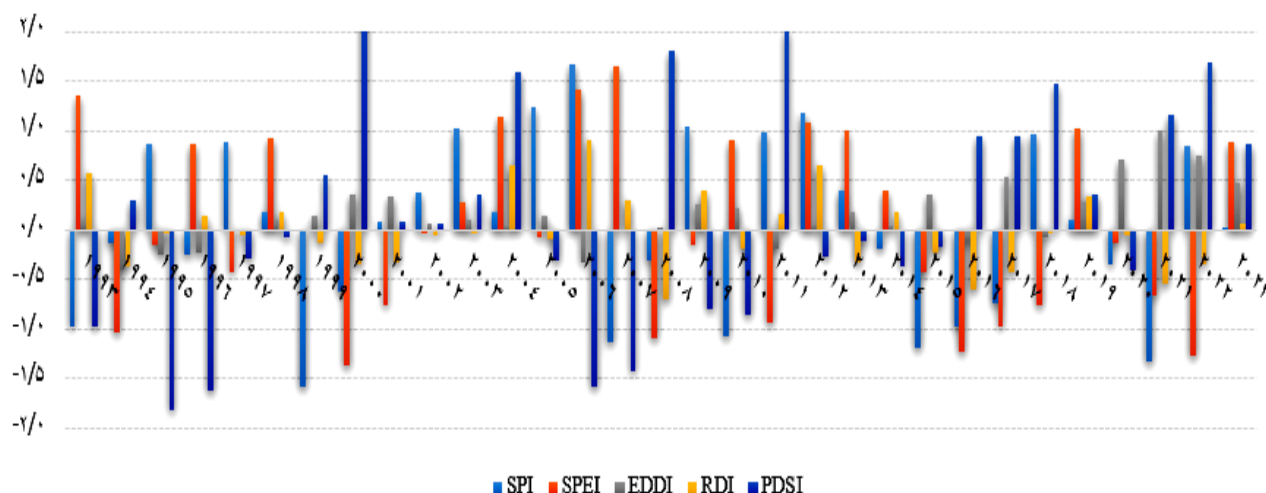
$$\gamma_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{C x_{ij}^2}} \quad (20)$$

که در این معادله، x_{ij} و γ_{ij} به ترتیب درایه‌های اصلی و نرمال شده ماتریس تصمیم‌گیری هستند. در گام دوم باید ماتریس بی بعدشده وزن دهی شود؛ بنابراین درایه‌های ماتریس نرمال شده تصمیم‌گیری در وزن متغیرها ضرب خواهد شد (معادله ۲۱).

$$\sqrt{ij} = w_i \gamma_{ij} \quad (21)$$

در این معادله، w_i وزن هر یک از متغیرهاست. وزن دهی درایه‌ها بر اساس مقدار میانگین بارش سالانه و مقدار میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه است. در گام سوم با توجه به درایه‌های جدید وزن دهی شده باید مقدار ایده آل مثبت و ایده آل منفی هر یک از متغیرها مشخص شوند. معادله‌های (۲۲) و (۲۳) بیانگر این موضوع هستند.

در این پژوهش مقدار ایده آل مثبت برابر بیشترین مقدار بارش و کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل است و مقدار



شکل ۲. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی یادشده در ایستگاه اصفهان

دو بیانگر وقوع ترسالی با شدت وقوع متفاوت هستند و علت آن است که در اقلیم مرطوب تبخیر-تعرق پتانسیل اندک و میزان رطوبت خاک زیاد است. به‌طورکلی در ایستگاه داران نوسانات شدت وقوع ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها زیاد است.

در این ایستگاه (با توجه به شکل ۶) بیشترین شدت وقوع خشکسالی و ترسالی را شاخص PDSI نشان داده است. بیشترین مقدار شاخص SPI در سال‌های اخیر منفی بوده که بیانگر حالت خشکسالی است و بیشترین مقدار شاخص SPI در سال ۲۰۱۲ بوده است. در این ایستگاه شاخص SPEI بیشترین نوسان وقوع خشکسالی و ترسالی را داشته است.

در این ایستگاه نیز بیشترین شدت وقوع خشکسالی و ترسالی را شاخص PDSI نشان می‌دهد و نوسانات زیادی دارد. در سال‌های اخیر میزان بارش کم بوده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، شاخص SPI و SPEI نیز در سال‌های اخیر به‌موازات هم ولی با شدت وقوع متفاوت خشکسالی را نشان داده‌اند.

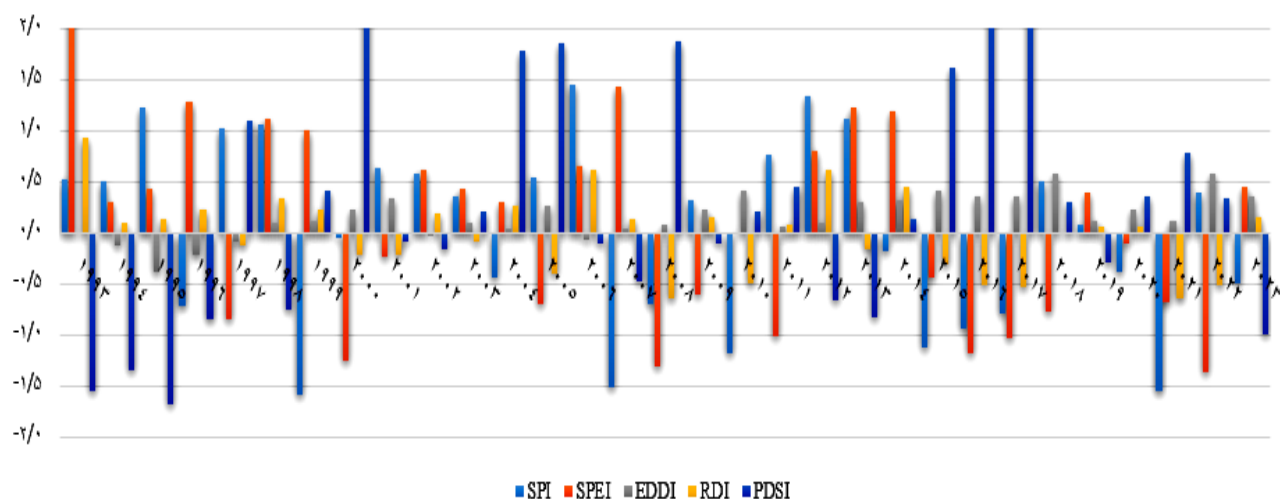
با توجه به شکل ۸ در سال‌های اخیر شاخص‌های PDSI و EDDI هر دو بیانگر وقوع ترسالی با شدت وقوع متفاوت هستند. این ترسالی بیانگر این است که میزان رطوبت خاک در این سال‌ها در حد نرمال بوده و میزان تبخیر-تعرق پتانسیل کم بوده است. همچنین در سال ۲۰۱۷ شاخص SPI بیشترین شدت وقوع خشکسالی را نشان می‌دهد که بیانگر کمترین میزان بارش است.

در هر سالی که میزان بارش کم (مقدار SPI منفی) و مقدار EDDI مثبت بوده، در نتیجه شاخص RDI که از تقسیم مجموع مقدار بارش بر مجموع مقدار تبخیر-تعرق به دست می‌آید، منفی بوده و بیانگر وقوع خشکسالی است.

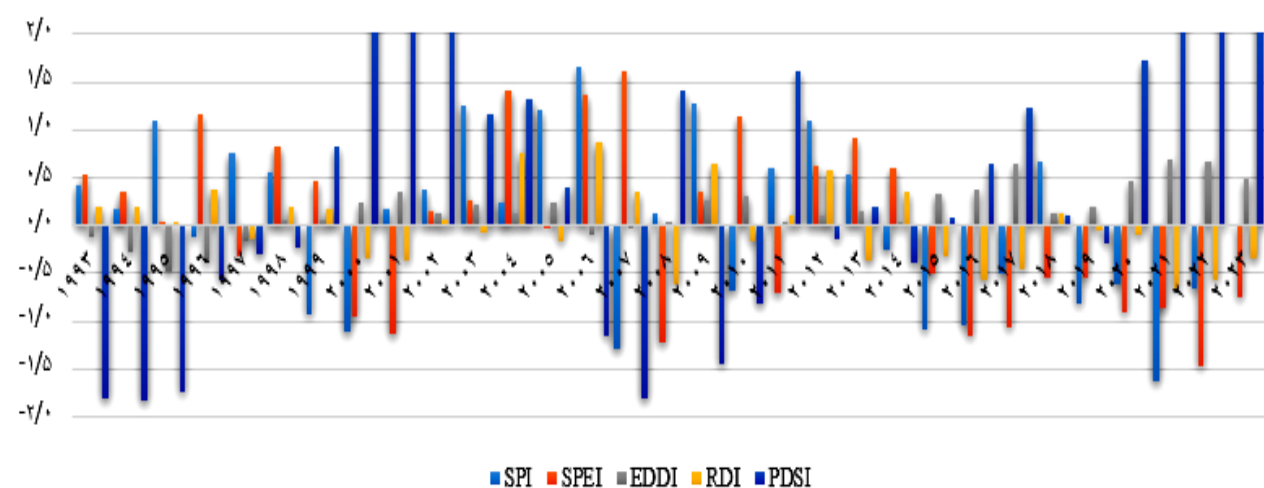
همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، در این ایستگاه با توجه به اقلیم خشک آن شاخص‌های خشکسالی شدت وقوع کمتری را داشته‌اند. در این ایستگاه شاخص PDSI بیشترین نوسان شدت وقوع ترسالی را داشته است. همچنین در سال‌های اخیر شاخص‌ها وقوع خشکسالی‌ها با شدت بیشتر و وقوع ترسالی‌ها با شدت کمتری را نشان می‌دهند.

شکل ۴ بیانگر نوسانات در ایستگاه کبوترآباد در سال‌های اخیر (۲۰۱۹-۲۰۲۳) است که شاخص‌های PDSI و EDDI هر دو بیانگر وقوع ترسالی با شدت وقوع متفاوت هستند؛ یعنی طی این سال‌ها میزان رطوبت نسبی که مبنای محاسبه هر دو شاخص است، زیاد بوده است. در سال ۲۰۲۳ شاخص SPI مقداری ندارد؛ یعنی میانگین بارش صفر است.

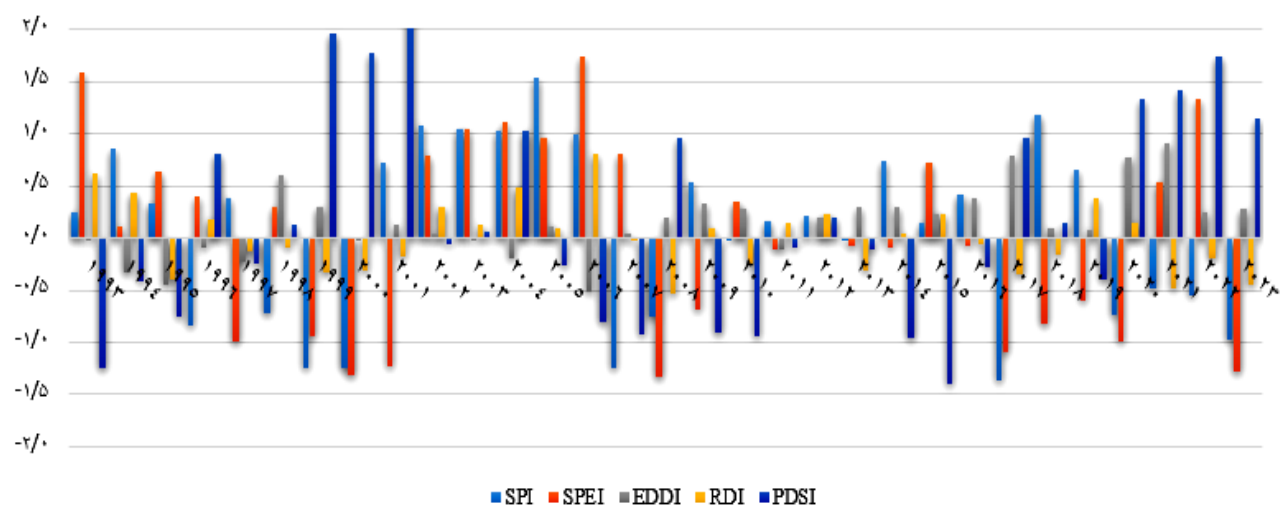
این ایستگاه با توجه به اینکه در اقلیم مرطوب و مدیترانه‌ای واقع است، میزان بارش مورد انتظار در این منطقه زیاد و میزان تبخیر-تعرق پتانسیل کم است. نتایج شاخص‌ها در شکل ۵ نشان می‌دهد که میزان بارش در سال‌های اخیر نسبت به بارش مورد انتظار برای منطقه کم بوده است. شاخص‌های PDSI و EDDI هر



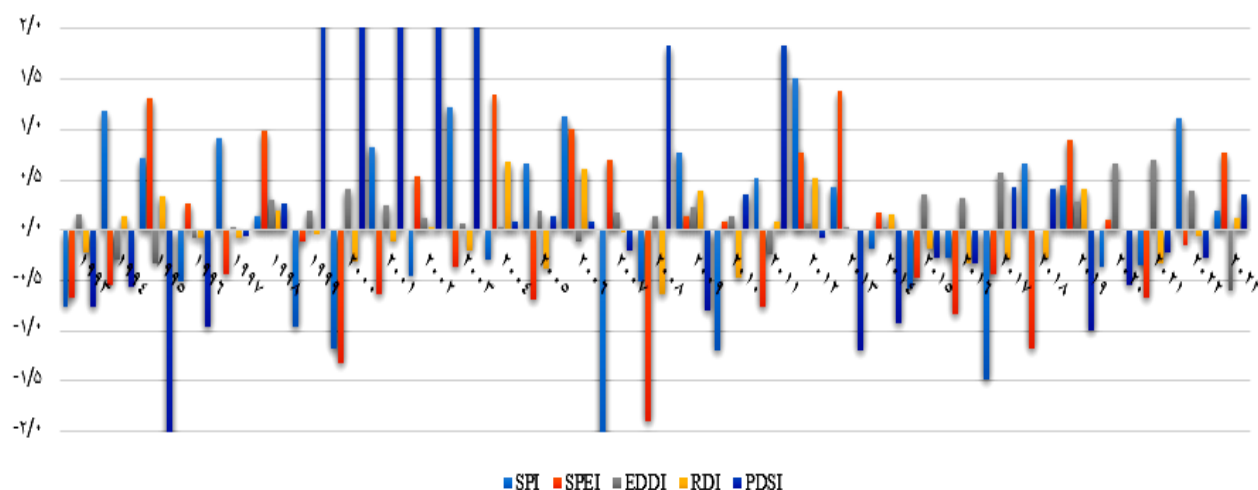
شکل ۳. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی یادشده در ایستگاه شرق اصفهان



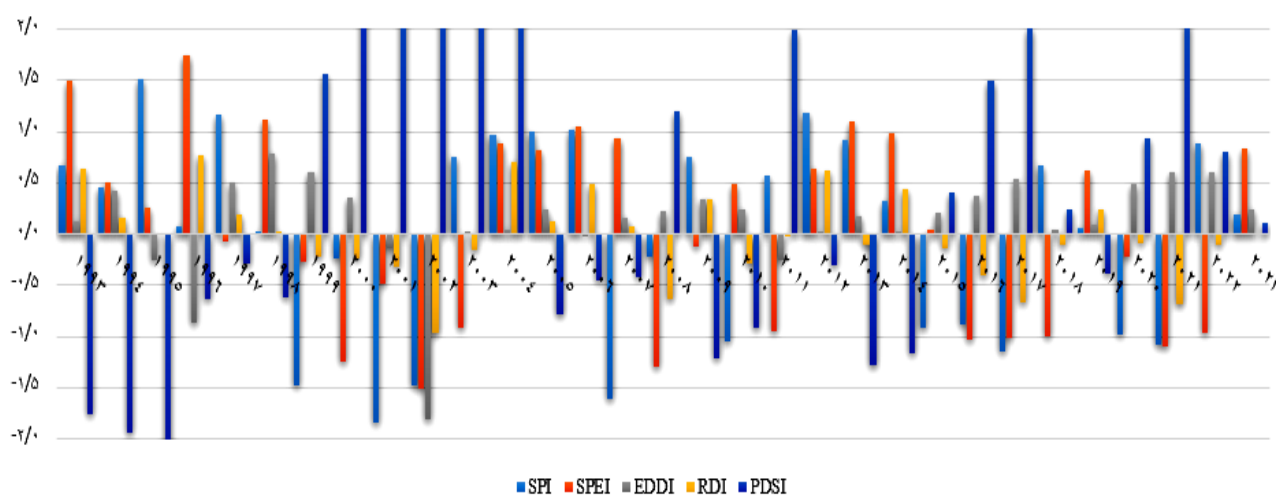
شکل ۴. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی یادشده در ایستگاه کبوترآباد



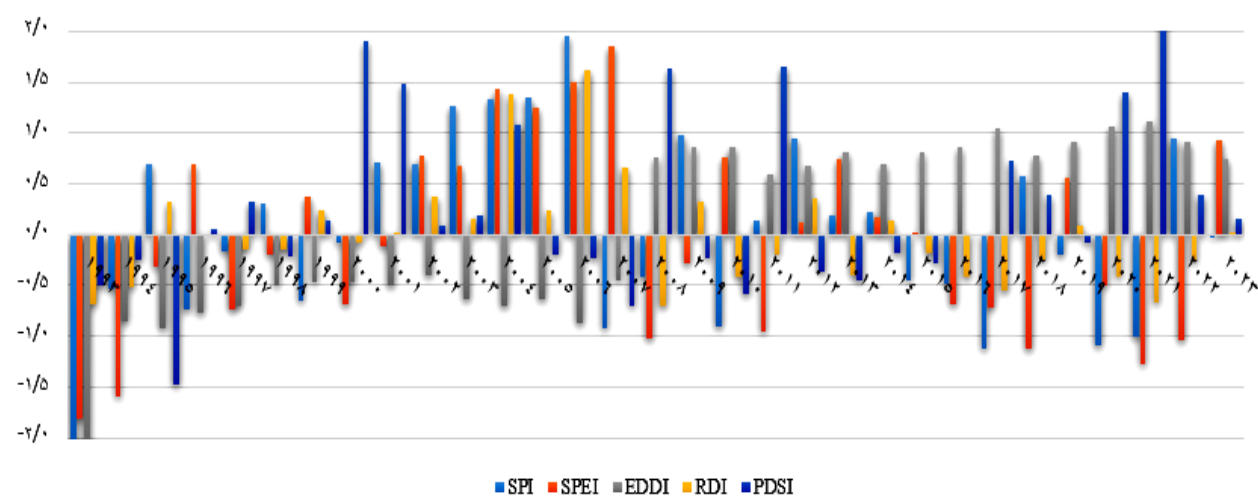
شکل ۵. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی یادشده در ایستگاه داران



شکل ۶. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی یادشده در ایستگاه شهرضا



شکل ۷. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی مذکور در ایستگاه نجف‌آباد



شکل ۸. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های خشکسالی یادشده در ایستگاه مبارکه

نتایج حاصل از مدل تاپسیس (TOPSIS)

پارامترهای بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل و ارتفاع ایستگاه سه متغیر به کاررفته در روش تاپسیس هستند که با توجه به این متغیرها بیشترین مقدار بارش و کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل به عنوان ایده آل مثبت و کمترین میزان بارش و بیشترین میزان تبخیر-تعرق پتانسیل به عنوان ایده آل منفی در نظر گرفته می شود. سپس با توجه به این مقادیر عمل تعیین و رتبه بندی صورت می گیرد. در ادامه این نتایج در قالب جدول ارائه می شود. نتایج روش تاپسیس در تمامی ایستگاه ها همسو با نتایج سایر شاخص ها بوده است. برای نمونه نتایج روش تاپسیس در سال ۲۰۲۰ در ایستگاه اصفهان بیانگر شرایط خشکسالی است و شاخص های SPI، SPEI، RDI و PDSI نیز بیانگر شرایط خشکسالی هستند. در واقع این روش نیز همانند سایر شاخص های خشکسالی عمل می کند و برتری احتمالی آن در این است که در هر سال با توجه به بیشترین مقدار بارش در آن سال یا بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل که به عنوان مقادیر ایده آل تعیین می شوند، شرایط خشکسالی و یا ترسالی را تعیین می کند و نتایج همسو با نتایج شاخص های خشکسالی است. جداول شماره ۴ تا ۱۷ بیانگر نتایج روش تاپسیس در ایستگاه های منتخب در حوضه زاینده رود است.

جدول ۸ و ۹ مربوط به ایستگاه کبوترآباد، جدول ۱۰ و ۱۱ بیانگر نتایج ایستگاه شهرضا و جدول ۱۲ و ۱۳ نتایج ایستگاه نجف آباد می باشد که همگی در اقلیم خشک قرار دارند و نتایج تقریباً مشابهی دارند.

جدول ۱۴ و ۱۵ مربوط به ایستگاه مبارکه و جدول ۱۶ و ۱۷ بیانگر نتایج ایستگاه داران که اقلیمی مرطوب دارد، می باشد. باتوجه به نتایج به دست آمده در ایستگاه اصفهان، سال های ۲۰۱۴، ۲۰۰۰ و ۱۹۹۵ به ترتیب بیشترین رتبه را دارند و این به این معنی است که در این سال ها ترسالی شدید حاکم بوده است. در این ایستگاه، سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ با توجه به رتبه به دست آمده، خشکسالی با شدت وقوع متفاوت حاکم بوده است؛ یعنی در این سال ها مقدار بارش از مقدار بارش ایده آل کمتر بوده

و مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل زیاد است. طبق جدول ۵، در سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ ترسالی تداوم داشته است که با توجه به رتبه های به دست آمده، شدت وقوع متفاوتی داشته اند؛ یعنی در این سال ها مقدار بارش از مقدار بارش ایده آل بیشتر و از طرفی مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل کم بوده است.

در ایستگاه کبوترآباد نوسان سال های تر و خشک به خوبی دیده می شود؛ برای نمونه سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ خشکسالی حاکم بوده و سال ۲۰۱۸ وقوع ترسالی را داشته ایم. سال ۲۰۲۳ بیشترین شدت وقوع خشکسالی را متحمل شده است.

تمام ایستگاه های واقع در اقلیم خشک، در سال ۲۰۲۳ متحمل وقوع خشکسالی بوده اند و نوسان وقوع خشکسالی و ترسالی در سال های متوالی در تمام ایستگاه های این اقلیم قابل توجه است. در ایستگاه داران سال ۱۹۹۵ و ۲۰۰۰ بیشترین رتبه را داشته؛ بنابراین بیشترین شدت ترسالی را داشته است. در سال های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ نیز بیشترین شدت خشکسالی بوده است. سال ۲۰۲۳ نیز در این ایستگاه متحمل وقوع خشکسالی است.

به طور کلی نتایج شاخص های خشکسالی استفاده شده در این مطالعه، شدت وقوع ترسالی و خشکسالی و همچنین تداوم دوره های خشک و تر طی دوره آماری بررسی شده را نشان می دهند. ابتدا از مقایسه شاخص های خشکسالی به کاررفته در این مطالعه نتیجه گرفته شد که شاخص PDSI نوسانات زیادی در وقوع خشکسالی ها و ترسالی ها نسبت به سایر شاخص ها نشان می دهد. در روش محاسبه شاخص خشکسالی EDDI، خشکسالی تنها بر اساس تبخیر-تعرق پتانسیل ارزیابی می شود که برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل از روش پنمن-مانتیت استفاده می شود. با توجه به اینکه متغیرهای اقلیمی دیگر مثل رطوبت نسبی و سرعت باد در روش پنمن-مانتیت به کار می روند، در نتیجه شاخص EDDI با دقت زیادی خشکسالی را ارزیابی می کند و در تحلیل مناطق خشک و نیمه خشک بسیار مناسب است. از طرفی شاخص PDSI نیز پارامتر رطوبت خاک را در نظر می گیرد و در بیشتر ایستگاه ها دو شاخص PDSI و EDDI نتایج مشابه دارند. شاخص SPEI در اقلیم مرطوب نسبت به اقلیم خشک و نیمه خشک نوسان زیادی

جدول ۴. تعیین مقادیر ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی با استفاده از مدل تاپسیس

مقدار عددی	ایده‌آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۶	مقدار ایده‌آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۲	مقدار ایده‌آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۱۱	مقدار ایده‌آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۰۷	مقدار ایده‌آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۵. رتبه‌بندی خشکسالی ایستگاه اصفهان با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده‌آل منفی	فاصله از مقدار ایده‌آل مثبت	سال
۱۶	۰/۶۴	۰/۱۱	۰/۰۶	۱۹۹۳
۲	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۴	۱۹۹۴
۲۹	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۱۹۹۵
۲۴	۰/۴۲	۰/۰۷	۰/۰۹	۱۹۹۶
۲۵	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۱۰	۱۹۹۷
۸	۰/۵۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۱۹۹۸
۳	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۱۱	۱۹۹۹
۳۰	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۱۲	۲۰۰۰
۱۸	۰/۳۵	۰/۰۶	۰/۱۱	۲۰۰۱
۷	۰/۴۴	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۰۲
۹	۰/۴۲	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۰۳
۱۳	۰/۶۷	۰/۱۱	۰/۰۵	۲۰۰۴
۵	۰/۳۶	۰/۰۶	۰/۱۱	۲۰۰۵
۲۱	۰/۸۷	۰/۱۵	۰/۰۲	۲۰۰۶
۲۶	۰/۵۶	۰/۰۹	۰/۰۷	۲۰۰۷
۲۸	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۱۵	۲۰۰۸
۴	۰/۶۶	۰/۱۱	۰/۰۵	۲۰۰۹
۱۱	۰/۳۳	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۰
۱۰	۰/۵۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۰۱۱
۲۳	۰/۷۹	۰/۱۳	۰/۰۳	۲۰۱۲
۶	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۱۰	۲۰۱۳
۳۱	۰/۶۵	۰/۱۱	۰/۰۵	۲۰۱۴
۱۹	۰/۴۵	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۱۵
۱۵	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۲۰۱۶
۲۷	۰/۲۴	۰/۰۴	۰/۱۳	۲۰۱۷
۱	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۱۰	۲۰۱۸
۲۲	۰/۵۸	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۱۹
۱۷	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۱۰	۲۰۲۰
۱۲	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۱۳	۲۰۲۱
۲۰	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۲۰۲۲
۱۴	۰/۵۲	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۰۲۳

جدول ۶. ایده آل مثبت و ایده آل منفی در مقیاس سالانه در ایستگاه شرق اصفهان

مقدار عددی	ایده آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۵	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۳	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۰۶	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۱	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۷. رتبه بندی ایستگاه شرق اصفهان با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده آل منفی	فاصله از مقدار ایده آل مثبت	سال
۲۹	۰/۷۸	۰/۱۳	۰/۰۳	۱۹۹۳
۲۵	۰/۴۹	۰/۰۸	۰/۰۸	۱۹۹۴
۳۰	۰/۴۵	۰/۰۸	۰/۰۹	۱۹۹۵
۱۶	۰/۵۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۱۹۹۶
۱۸	۰/۴۰	۰/۰۷	۰/۱۰	۱۹۹۷
۱۳	۰/۶۱	۰/۱۰	۰/۰۶	۱۹۹۸
۲۴	۰/۵۵	۰/۰۹	۰/۰۷	۱۹۹۹
۲۶	۰/۳۹	۰/۰۶	۰/۱۰	۲۰۰۰
۲۷	۰/۴۳	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۰۱
۲۸	۰/۵۷	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۰۲
۳۱	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۱۰	۲۰۰۳
۸	۰/۵۹	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۰۴
۵	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۲۰۰۵
۱۱	۰/۷۷	۰/۱۳	۰/۰۳	۲۰۰۶
۹	۰/۵۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۰۰۷
۲۳	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۲۰۰۸
۳	۰/۶۰	۰/۱۰	۰/۰۶	۲۰۰۹
۲۱	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۲۰۱۰
۲	۰/۵۵	۰/۰۹	۰/۰۷	۲۰۱۱
۱۵	۰/۷۷	۰/۱۳	۰/۰۳	۲۰۱۲
۴	۰/۴۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۲۰۱۳
۷	۰/۷۴	۰/۱۳	۰/۰۴	۲۰۱۴
۱۹	۰/۴۳	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۱۵
۱۰	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۶
۱۲	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۶	۲۰۱۷
۱۷	۰/۳۲	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۸
۶	۰/۳۲	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۹
۲۲	۰/۳۴	۰/۰۶	۰/۱۱	۲۰۲۰
۱۴	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۱۶	۲۰۲۱
۲۰	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۱۶	۲۰۲۲
۱	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۱۰	۲۰۲۳

جدول ۸. ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی در مقیاس سالانه در ایستگاه کبوترآباد

مقدار عددی	ایده‌آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۵	مقدار ایده‌آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۲	مقدار ایده‌آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۰۶	مقدار ایده‌آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۳	مقدار ایده‌آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۹. رتبه‌بندی ایستگاه کبوترآباد با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده‌آل منفی	فاصله از مقدار ایده‌آل مثبت	سال
۱۶	۰/۴۰	۰/۱۳	۰/۰۳	۱۹۹۳
۲۹	۰/۴۱	۰/۰۸	۰/۰۸	۱۹۹۴
۳۰	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۰۹	۱۹۹۵
۸	۰/۴۰	۰/۰۹	۰/۰۸	۱۹۹۶
۲۵	۰/۲۶	۰/۰۷	۰/۱۰	۱۹۹۷
۱۳	۰/۳۵	۰/۱۰	۰/۰۶	۱۹۹۸
۵	۰/۴۰	۰/۰۹	۰/۰۷	۱۹۹۹
۳	۰/۲۰	۰/۰۶	۰/۱۰	۲۰۰۰
۲۴	۰/۴۷	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۰۱
۳۱	۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۰۲
۲۳	۰/۳۸	۰/۰۷	۰/۱۰	۲۰۰۳
۲۱	۰/۶۲	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۰۴
۱۸	۰/۲۴	۰/۰۵	۰/۱۲	۲۰۰۵
۲۸	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۰۳	۲۰۰۶
۶	۰/۴۶	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۰۰۷
۲۷	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۱۳	۲۰۰۸
۱۱	۰/۶۸	۰/۱۰	۰/۰۶	۲۰۰۹
۷	۰/۳۳	۰/۰۵	۰/۱۲	۲۰۱۰
۱	۰/۴۹	۰/۰۹	۰/۰۷	۲۰۱۱
۴	۰/۶۹	۰/۱۳	۰/۰۳	۲۰۱۲
۲	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۰۸	۲۰۱۳
۱۵	۰/۵۸	۰/۱۳	۰/۰۴	۲۰۱۴
۲۶	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۰۹	۲۰۱۵
۹	۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۶
۱۰	۰/۲۳	۰/۰۱	۰/۱۶	۲۰۱۷
۱۹	۰/۴۶	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۸
۲۲	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۱۱	۲۰۱۹
۱۲	۰/۳۵	۰/۰۶	۰/۱۱	۲۰۲۰
۱۷	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۱۶	۲۰۲۱
۲۰	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۱۶	۲۰۲۲
۱۴	۰/۳۰	۰/۰۶	۰/۱۰	۲۰۲۳

جدول ۱۰. ایده آل مثبت و ایده آل منفی در مقیاس سالانه در ایستگاه شهرضا

مقدار عددی	ایده آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۴	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۳	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۰۶	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۱	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۱۱. رتبه بندی ایستگاه شهرضا با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده آل منفی	فاصله از مقدار ایده آل مثبت	سال
۲۵	۰/۴۳	۰/۰۶	۰/۰۸	۱۹۹۳
۲۶	۰/۵۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۱۹۹۴
۲۹	۰/۵۸	۰/۰۹	۰/۰۶	۱۹۹۵
۱۶	۰/۴۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۱۹۹۶
۱۳	۰/۵۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۱۹۹۷
۸	۰/۶۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۱۹۹۸
۳۰	۰/۵۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۱۹۹۹
۱۸	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۱۰	۲۰۰۰
۲۸	۰/۵۲	۰/۰۸	۰/۰۷	۲۰۰۱
۱۱	۰/۵۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۲۰۰۲
۱۵	۰/۳۸	۰/۰۵	۰/۰۹	۲۰۰۳
۱	۰/۸۳	۰/۱۲	۰/۰۲	۲۰۰۴
۴	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۱۱	۲۰۰۵
۲۴	۰/۸۰	۰/۱۲	۰/۰۳	۲۰۰۶
۳۱	۰/۴۲	۰/۰۶	۰/۰۹	۲۰۰۷
۲۳	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۱۱	۲۰۰۸
۵	۰/۸۳	۰/۱۳	۰/۰۲	۲۰۰۹
۲	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۰۹	۲۰۱۰
۷	۰/۶۷	۰/۱۰	۰/۰۵	۲۰۱۱
۱۰	۰/۸۰	۰/۱۲	۰/۰۳	۲۰۱۲
۹	۰/۵۹	۰/۰۹	۰/۰۶	۲۰۱۳
۲۷	۰/۶۱	۰/۰۹	۰/۰۶	۲۰۱۴
۳	۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۲۰۱۵
۲۱	۰/۴۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۲۰۱۶
۲۲	۰/۲۰	۰/۰۳	۰/۱۲	۲۰۱۷
۶	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۱۲	۲۰۱۸
۱۹	۰/۵۷	۰/۰۸	۰/۰۶	۲۰۱۹
۲۰	۰/۳۷	۰/۰۵	۰/۰۹	۲۰۲۰
۱۴	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۱۲	۲۰۲۱
۱۲	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۰۹	۲۰۲۲
۱۷	۰/۴۵	۰/۰۷	۰/۰۸	۲۰۲۳

جدول ۱۲. ایده آل مثبت و ایده آل منفی در مقیاس سالانه در ایستگاه نجف آباد

مقدار عددی	ایده آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۶	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۱	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۰۶	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۰۹	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۱۳. رتبه بندی ایستگاه نجف آباد با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده آل منفی	فاصله از مقدار ایده آل مثبت	سال
۷	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۱۳	۱۹۹۳
۸	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۱۳	۱۹۹۴
۴	۰/۴۰	۰/۰۷	۰/۱۰	۱۹۹۵
۲۵	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۱۵	۱۹۹۶
۲۹	۰/۲۹	۰/۰۵	۰/۱۲	۱۹۹۷
۹	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۱۲	۱۹۹۸
۱۰	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۵	۱۹۹۹
۱۶	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۵	۲۰۰۰
۲	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۱۴	۲۰۰۱
۱	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۱۳	۲۰۰۲
۵	۰/۴۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۲۰۰۳
۶	۰/۹۵	۰/۱۷	۰/۰	۲۰۰۴
۲۴	۰/۶۷	۰/۱۲	۰/۰۶	۲۰۰۵
۳	۰/۸۴	۰/۱۵	۰/۰۲	۲۰۰۶
۱۸	۰/۶۰	۰/۱۱	۰/۰۷	۲۰۰۷
۲۸	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۱۳	۲۰۰۸
۲۶	۰/۷۷	۰/۱۴	۰/۰۴	۲۰۰۹
۱۱	۰/۴۵	۰/۰۸	۰/۱۰	۲۰۱۰
۲۳	۰/۵۷	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۱۱
۳۰	۰/۸۹	۰/۱۶	۰/۰۱	۲۰۱۲
۲۱	۰/۵۴	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۰۱۳
۱۹	۰/۸۱	۰/۱۴	۰/۰۳	۲۰۱۴
۳۱	۰/۴۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۲۰۱۵
۱۵	۰/۴۰	۰/۰۰۷	۰/۱۰	۲۰۱۶
۲۷	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۱۵	۲۰۱۷
۱۲	۰/۴۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۲۰۱۸
۱۷	۰/۶۴	۰/۱۱	۰/۰۶	۲۰۱۹
۲۲	۰/۴۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۲۰۲۰
۱۴	۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۱۴	۲۰۲۱
۲۰	۰/۵۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۰۲۲
۱۲	۰/۵۸	۰/۱۰	۰/۰۷	۲۰۲۳

جدول ۱۴. ایده آل مثبت و ایده آل منفی در مقیاس سالانه در ایستگاه مبارکه

مقدار عددی	ایده آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۸	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۰	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۰۳	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۲	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۱۵. رتبه بندی ایستگاه مبارکه با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده آل منفی	فاصله از مقدار ایده آل مثبت	سال
۱	۰/۰	۰/۰	۰/۲۶	۱۹۹۳
۲	۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۲۰	۱۹۹۴
۲۹	۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۱۴	۱۹۹۵
۲۵	۰/۳۹	۰/۱۰	۰/۱۶	۱۹۹۶
۵	۰/۳۵	۰/۰۹	۰/۱۷	۱۹۹۷
۱۶	۰/۳۷	۰/۰۹	۰/۱۶	۱۹۹۸
۶	۰/۴۸	۰/۱۲	۰/۱۳	۱۹۹۹
۲۸	۰/۳۹	۰/۱۰	۰/۱۶	۲۰۰۰
۱۸	۰/۴۳	۰/۱۱	۰/۱۵	۲۰۰۱
۴	۰/۵۱	۰/۱۳	۰/۱۲	۲۰۰۲
۸	۰/۴۸	۰/۱۲	۰/۱۳	۲۰۰۳
۲۱	۰/۷۶	۰/۲۰	۰/۰۶	۲۰۰۴
۹	۰/۴۷	۰/۱۲	۰/۱۳	۲۰۰۵
۲۶	۰/۸۲	۰/۲۱	۰/۰۴	۲۰۰۶
۳۰	۰/۵۷	۰/۱۵	۰/۱۱	۲۰۰۷
۳	۰/۳۶	۰/۰۹	۰/۱۶	۲۰۰۸
۱۳	۰/۷۰	۰/۱۸	۰/۰۷	۲۰۰۹
۱۱	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۱۶	۲۰۱۰
۷	۰/۵۳	۰/۱۴	۰/۱۲	۲۰۱۱
۲۴	۰/۶۶	۰/۱۷	۰/۰۸	۲۰۱۲
۱۰	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۱۵	۲۰۱۳
۲۳	۰/۵۸	۰/۱۵	۰/۱۱	۲۰۱۴
۳۱	۰/۵۲	۰/۱۳	۰/۱۲	۲۰۱۵
۱۹	۰/۴۹	۰/۱۳	۰/۱۳	۲۰۱۶
۲۷	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۱۷	۲۰۱۷
۱۵	۰/۴۳	۰/۱۱	۰/۱۴	۲۰۱۸
۲۲	۰/۵۴	۰/۱۴	۰/۱۱	۲۰۱۹
۲۰	۰/۳۷	۰/۱۰	۰/۱۶	۲۰۲۰
۱۷	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۱۸	۲۰۲۱
۱۲	۰/۴۴	۰/۱۱	۰/۱۴	۲۰۲۲
۱۴	۰/۵۲	۰/۱۳	۰/۱۲	۲۰۲۳

جدول ۱۶. ایده آل مثبت و ایده آل منفی در مقیاس سالانه در ایستگاه داران

مقدار عددی	ایده آل مثبت و منفی	بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۴	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	بیشترین مقدار بارش
۰/۰۳	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	کمترین مقدار بارش
۰/۰۷	مقدار ایده آل منفی (بدترین)	بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل
۰/۱۰	مقدار ایده آل مثبت (بهترین)	کمترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل

جدول ۱۷. رتبه بندی ایستگاه داران با استفاده از مدل تاپسیس

رتبه	شاخص شباهت	فاصله از مقدار ایده آل منفی	فاصله از مقدار ایده آل مثبت	سال
۳	۰/۶۲	۰/۰۹	۰/۰۵	۱۹۹۳
۱۶	۰/۶۳	۰/۰۹	۰/۰۵	۱۹۹۴
۳۱	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۳	۱۹۹۵
۲۹	۰/۴۹	۰/۰۷	۰/۰۷	۱۹۹۶
۲۵	۰/۳۳	۰/۰۴	۰/۰۹	۱۹۹۷
۷	۰/۴۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۱۹۹۸
۸	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۱۰	۱۹۹۹
۳۰	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۱۰	۲۰۰۰
۲۱	۰/۳۳	۰/۰۴	۰/۰۹	۲۰۰۱
۹	۰/۶۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۲۰۰۲
۵	۰/۵۴	۰/۰۷	۰/۰۶	۲۰۰۳
۱۵	۰/۶۵	۰/۰۹	۰/۰۵	۲۰۰۴
۲۶	۰/۴۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۲۰۰۵
۶	۰/۷۶	۰/۱۱	۰/۰۳	۲۰۰۶
۱۸	۰/۳۴	۰/۰۴	۰/۰۹	۲۰۰۷
۱۳	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۱۲	۲۰۰۸
۲۲	۰/۶۱	۰/۰۹	۰/۰۵	۲۰۰۹
۲۸	۰/۴۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۲۰۱۰
۴	۰/۶۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۲۰۱۱
۲۴	۰/۶۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۲۰۱۲
۱۱	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۰۹	۲۰۱۳
۲۷	۰/۴۷	۰/۰۶	۰/۰۷	۲۰۱۴
۲۰	۰/۶۶	۰/۰۹	۰/۰۴	۲۰۱۵
۱۹	۰/۵۲	۰/۰۷	۰/۰۶	۲۰۱۶
۱۰	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۱۱	۲۰۱۷
۱۷	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۰۹	۲۰۱۸
۱	۰/۵۹	۰/۰۸	۰/۰۵	۲۰۱۹
۲	۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۲۰۲۰
۱۲	۰/۱۹	۰/۰۲	۰/۱۱	۲۰۲۱
۲۳	۰/۳۱	۰/۰۴	۰/۱۰	۲۰۲۲
۱۴	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۲	۲۰۲۳

تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده شده است. با استفاده از نقشه پهنه‌بندی اقلیمی، ایستگاه‌های مورد مطالعه از لحاظ این شاخص‌ها مقایسه شدند و تداوم دوره‌های خشک و تر و شدت وقوع ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها بررسی شدند. نتایج نشان داد که تغییرات شاخص PDSI و EDDI نسبت به سایر شاخص‌ها روند کندتر و نوسان کمتری داشته است. علت آن است که هر دو شاخص بر مبنای رطوبت خاک هستند. همچنین در ایستگاه واقع در اقلیم مرطوب نوسانات شدت وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها زیاد است. یکی از محدودیت‌های شاخص SPI این است که فقط متغیر بارش را در نظر می‌گیرد و سایر متغیرهای اقلیمی مثل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی را که نقش تعیین‌کننده در تحلیل خشکسالی‌های هواشناسی دارند را در نظر نمی‌گیرد؛ در نتیجه در ایستگاه‌های واقع در اقلیم خشک که میزان بارش کم است، این شاخص نوسان زیادی نداشته است. در ایستگاه داران شاخص RDI در ترسالی بیشترین نوسان شدت وقوع را داشته؛ در حالی که در ایستگاه‌های اقلیم خشک بیشترین نوسان شاخص RDI در خشکسالی بوده است.

ایستگاه‌های واقع در اقلیم خشک که ماهیت خشک دارند و بارش در این مناطق کم و تبخیر-تعرق زیاد است، شاخص خشکسالی که بتواند میزان خشکسالی که در اقلیم خشک هست را نشان دهد، شاخصی است که پارامترهای رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع خورشیدی و سایر عوامل بیلان آبی را نیز در نظر بگیرد تا تحلیل دقیق‌تری صورت گیرد که شاخص PDSI و EDDI بهترین انتخاب برای اقلیم خشک است. نتایج مدل رویکرد تاپسیس (TOPSIS) نیز حاکی از آن بود که در سال‌های اخیر خشکسالی با شدت وقوع متفاوت در ایستگاه‌های منتخب حاکم است که ایستگاه شرق اصفهان کمترین رتبه را در سال ۲۰۲۳ در بین ایستگاه‌های منتخب داشته که متحمل بیشترین شدت خشکسالی بوده است.

در وقوع خشکسالی و ترسالی طی سال‌های متوالی دارد. با استفاده از روش تاپسیس می‌توان نتیجه گرفت که در ایستگاه‌های مورد مطالعه تداوم دوره‌های خشکسالی و ترسالی زیاد بوده است. برای نمونه طی سه سال متوالی خشکسالی با شدت وقوع متفاوت داشته‌ایم. در روش تاپسیس رتبه‌بندی بر مبنای میزان بارش، تبخیر-تعرق پتانسیل و ارتفاع ایستگاه است؛ در نتیجه در اقلیم خشک و نیمه‌خشک که میزان بارش کم و میزان تبخیر-تعرق زیاد است، ایستگاه‌های واقع در این اقلیم شدت وقوع خشکسالی بیشتری را متحمل می‌شوند. با توجه به نقشه پهنه‌بندی اقلیمی و مقایسه دو ایستگاه اصفهان و داران در دو اقلیم متفاوت می‌توان نتیجه گرفت که هیچ یک از ایستگاه‌های حوضه زاینده‌رود از وقوع خشکسالی در امان نیست و فقط نوسانات شدت وقوع خشکسالی متفاوت است. طبق نقشه پهنه‌بندی چون بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه در شرایط اقلیمی مشابه قرار دارند، روند وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها مشابه است.

در ایستگاه کبوترآباد، مقدار شاخص SPI در سال ۲۰۲۳ صفر بوده که علت آن است که در اقلیم خشک ماه‌های بدون بارش وجود دارد. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج انصاری و همکاران (۲۰۱۰) که پایش خشکسالی با شاخص SPI در مناطق خشک و نیمه‌خشک که میانگین بارندگی پایین و تبخیر-تعرق زیاد است را نامناسب می‌دانند، مطابقت دارد (۳). همچنین در بیشتر ایستگاه‌های مورد پژوهش، شاخص SPI و SPEI به موازات هم نوسانات شدت وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها را نشان داده‌اند که این بخش از نتایج مشابه نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۳) که شاخص SPI و SPEI دارای همبستگی معناداری هستند، مشابهت دارد (۲).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از تمام شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر

References

منابع مورد استفاده

1. Agrawala, S., M. Barlow, H. Cullen and B. Lyon. 2001. The drought and humanitarian crisis in central and southwest Asia: A Climate Perspective. the International Research Institute for Climate Prediction (IRI), Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades
2. Ahmadi, M., K. Nosrati and H. Selki. 2013. Drought and Its Relationship with Soil Moisture. *J. Inter. Iran. Geograph. Geography* 11(38): 77-91.
3. Ansari, H., K. Davary and H. Sanaiejad. 2010. Drought Monitoring with New Precipitation and Evapotranspiration Index Based on Fuzzy Logic. *Water and Soil* 24(1): 38-52.
4. Asadi Zarch, M. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T. and Kousari, M. R. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management* 25:3485-3504.
5. Azadi, S., S. Soltani, M. Faramarzi and S. Pourmanafi. 2018. Calibration of Palmer Drought Index in Iran. *Iranian Water Research Journal* 12(2): 19-28 (in Farsi).
6. Azadi, S., S. Soltani, M. Faramarzi, A. Soltani Tudeshki and S. Pourmanafi. 2015. Evaluation of Palmer Drought Severity Index in Central Iran. *Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources, Water and Soil Sciences* 19: 305-318 (in Farsi).
7. Azadi, S. 2013. Evaluation of Palmer Drought Index in Central Iran. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran (in Farsi).
8. Bordi, I., S. Frigio, P. Parenti, A. Speranza and A. Sutera. 2001. The analysis of the Standardized Precipitation Index in the Mediterranean area: *large-scale patterns*. *Annals of Geophysics* 44(5-6).
9. Begueria, S., S. M. Vicente-Serrano and M. S. Begueria. 2017. Package 'SPEI'. Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index.
10. Chen, S. J. and C. L. Hwang. 1992. Fuzzy multiple attribute decision making methods. PP. 289-486. In: R. Almeida Ribeiro (Eds.), Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer Berlin Heidelberg, Heidelberg.
11. Dewes, C. F., I. Rangwala, J. J. Barsugli, M. T. Hobbins and S. Kumar. 2017. Drought risk assessment under climate change is sensitive to methodological choices for the estimation of evaporative demand. *PloS one* 12: 1-22.
12. Eslamian, S. S., R. Modarres and S. Soltani. 2006. Spatial Grouping of Drought Using Standardized Precipitation Index in Isfahan Province. *Journal of Water and Sewage* 17(1) : 72-75 (in Farsi).
13. Faramarzi, M., K. C. Abbaspour, R. Schulini and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes An International Journal* 23(3): 486-501.
14. Gohari, A., S. Eslamian, J. Abedi-Koupaei, A. M. Bavani, D. Wang and K. Madani. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment* 442: 405-419.
15. Hatefi, A., A. Mosaedi, M. Jabbbari. 1395. The role of evapotranspiration in meteorological drought monitoring in some climatic regions of the country. *Scientific Journal of Water and Soil Protection Research* 23(2): 1-21 (in Farsi).
16. Hobbins, M. T., A. Wood, D. J. McEvoy, J. L. Huntington, C. Morton, M. Anderson and C. Hain. 2016. The evaporative demand drought index. Part I: Linking drought evolution to variations in evaporative. *Journal of Hydrometeorology* 17(6): 1745-1761.
17. Khalili, D., T. Farnoud, H. Jamshidi, A. A. Kamgar-Haghighi and S. Zand-Parsa. 2011. Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resources Management* 25: 1737-1757.
18. Khosh Akhlaq, F., Z. Hejazizadeh, H. Mohammadi and G. Roshan. 2015. An approach to TOPSIS method in determining and ranking drought (case study: drought zoning of several stations in Khuzestan province). *Applied Research Journal of Geographical Sciences* 5(6): 105-127 (in Farsi).
19. Karl, T. 1985. Atlas of monthly Palmer hydrological drought indices (1931-1983) for the contiguous United States. National Climatic Data Center, Asheville.
20. Liu, D. M., R. P. Ji, P. S. Chen, W. W. Zhang and J. Li. 2020. Application of evaporative demand drought index (EDDI) in drought identification of Liaoning Province. *China Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology* 31(10): 3480-3488.
21. McEvoy, D. J., J. L. Huntington, M. T. Hobbins, A. Wood, C. Morton, M. Anderson and C. Hain. 2016. The evaporative demand drought index. Part II: CONUS-wide assessment against common drought indicators. *Journal of Hydrometeorology* 17(6): 1763-1779
22. Mohit esfahani, P. 2018. Assessment of Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) in Chaharmahal & Bakhtiari Province. Master thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
23. Moghimi, M. M., E. Kouhi and A. R. Zarei. 2018. Drought monitoring and forecasting, using RDI index and Markov Chain Mathematical Model. *Irrigation and Water Engineering* 8(3): 153-165
24. McMahon, T. A., M. C. Peel, L. Lowe, R. Srikanthan and T. R. McVicar. 2013. Estimating actual, potential,

- reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(4): 1331-1363.
25. Morid, S., V. Smakhtin and M. Moghaddasi. 2006. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology* 26(7): 971-985.
26. Noguera, I., S. M. Vicente Serrano, F. Domínguez-Castro and F. Reig-Gracia. 2022. Assessment of parametric approaches to calculate the Evaporative Demand Drought Index. *International Journal of Climatology* 42(2): 834-849.
27. Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193(1032): 120-145.
28. Roshan, G., A. Ghanghermeh and S. W. Grab. 2018. Testing a new application for TOPSIS: monitoring drought and wet periods in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 131: 557-571.
29. Tsakiris, G and H. Vangelis. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water* 9(10): 3-11.
30. Tsakiris, G., I. Nalbantis, D. Pangalou, D. Tigkas and H. Vangelis. 2008. Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). The 1st Int. Conference "Drought Management: Scientific and Technological Innovations. Zaragoza, Spain.
31. Thom, H. C. S. 1966. Some methods of climatological analysis. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva.
32. Vicente-Serrano, S. M., J. I. López-Moreno, L. Gimeno, R. Nieto, E. Morán-Tejeda, J. Lorenzo-Lacruz, S. Beguería and C. Azorin-Molina. 2011. A multiscalar global evaluation of the impact of ENSO on droughts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116(D20).
33. Walter, I. A., R. G. Allen, R. R. Elliott, D. Itenfisu, P. Brown, M. E. Jensen, B. Mecham, T. A. Howell, R. Snyder, S. Echling and T. Spofford. 2005. Task committee on standardization of reference evapotranspiration. ASCE: Reston, VA, USA.
34. Wilhite, D. A. 1993. Planning for drought: A methodology. PP. 78-108. In: A. Donald and C. Wilhite (Eds.), Drought assessment, management, and planning: Theory and case studies. Kluwer Academic, Boston.
35. Yoon, K. P and C. L. Hwang. 1995. Multiple attribute decision making: an introduction. Sage Publications, Thousand Oaks.
36. Yaghmaei, L., S. Soltani and M. Khodagholi. 2009. Bioclimatic classification of Isfahan province using multivariate statistical methods. *International Journal of Climatology* 29(12): 1850-1861.