

بررسی شاخص‌های مختلف خشکسالی برای یافتن تطبیق‌پذیرترین شاخص (مطالعه موردی: شهرستان دامغان)

حمیدرضا گازی^{۱*}، سید فرهاد موسوی^۲ و خسرو حسینی^۳

چکیده

بررسی و پایش خشکسالی مهم‌ترین ابزار مدیریت خشکسالی محسوب می‌شود که می‌توان با استفاده از پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیک، شروع و پایان، محدوده مکانی و شدت اثر آن را مشخص کرد و در صورت وجود برنامه‌های مقابله با خشکسالی، زمان تشکیل کارگروه بررسی و مقابله را معین کرد. برای تحلیل و بررسی پدیده خشکسالی، اولین مرحله، کمی‌کردن این پدیده است که این مهم با استفاده از شاخص‌های خشکسالی محقق می‌شود. در پژوهش حاضر، به بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی در منطقه دامغان در استان سمنان پرداخته شد. برای این منظور، مقادیر بارش ماهانه در ایستگاه‌های دامغان، حسین‌آباد، خورزان، قوشه، معبد و آستانه، در یک دوره آماری مشترک (۱۳۷۶-۱۳۹۸)، گردآوری شد. پس از بررسی روند بارش سالانه در هر ایستگاه، تداوم و بیشینه خشکسالی با استفاده از شاخص‌های DI، SPI، CZI، MCZI و ZSI تعیین شد. برای بررسی عملکرد این شاخص‌ها و انتخاب تطبیق‌پذیرترین شاخص برای منطقه از فرضیه کمینه استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، شاخص DI در برآورد خشکسالی شدید و برآورد ترسالی شدید، نسبت به بقیه شاخص‌ها عملکرد مطلوب‌تری داشت. در مرحله بعد، با استفاده از همبستگی اسپیرمن بین پارامتر بارش و شاخص‌های خشکسالی، شاخص PN بهترین عملکرد را داشت. برای مقایسه شاخص‌ها در زمینه برآورد تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی، از میانگین‌های متحرک زمانی در دوره‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه استفاده شد که در نهایت شاخص SPI به عنوان تطبیق‌پذیرترین شاخص در برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه دامغان مشخص شد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های خشکسالی، شدت خشکسالی، ترسالی، آب‌های زیرزمینی

ارجاع: گازی ح. موسوی س. ف. و حسینی خ. ۱۴۰۱. بررسی شاخص‌های مختلف خشکسالی برای یافتن تطبیق‌پذیرترین شاخص (مطالعه موردی: شهرستان دامغان). مجله پژوهش آب ایران. ۴۵: ۳۳-۴۵. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10035.2345>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

* نویسنده مسئول: hamidgazori@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲

مقدمه

کشور ایران به دلیل قرارگرفتن در کمربند خشک جغرافیایی و نوار بیابانی واقع در عرض‌های ۲۰ تا ۴۰ درجه نیمکره شمالی، با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر، جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا به شمار رفته و به همین دلیل خشکسالی از مشخصه‌های اصلی اقلیمی در آن است. همچنین، توزیع نامتناسب مقدار بارندگی در سراسر کشور سبب ایجاد تعاریف متعددی از خشکسالی شده است. وقوع خشکسالی‌ها و استمرار آن‌ها منجر به زیان‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌شود. بنا بر تعاریف مختلف و براساس خساراتی که پدیده خشکسالی بر منابع مختلفی همچون جریان رودخانه‌ها، آبخوان‌ها، رطوبت خاک، میزان محصولات کشاورزی و وضعیت معیشت مردم وارد می‌کند، به چهار دسته خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم می‌شود.

یکی از منابع مهم تأمین آب شیرین مورد نیاز انسان، آب زیرزمینی است که بعد از یخچال‌ها، بزرگ‌ترین ذخیره آب شیرین کره زمین را تشکیل می‌دهند (تاد و میز، ۲۰۰۵). آب آشامیدنی بیش از ۹۰ درصد شهرها و حدود ۷۰ درصد بخش کشاورزی در سراسر جهان از این منابع تأمین می‌شود (عرفان‌منش و افیونی، ۱۳۸۵). وقوع خشکسالی‌ها و بارش‌های شدید مهم‌ترین عواملی هستند که منابع آب زیرزمینی را در بلندمدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آن در اثر افزایش غلظت املاح در ایجاد شوری ثانویه خاک، شوری آب‌های سطحی و کاهش باروری خاک نقش اساسی دارد. بدین ترتیب، شناخت صحیح پدیده خشکسالی و کمی‌سازی آن با استفاده از شاخص‌های خشکسالی مناسب برای هر منطقه، از راه‌های اساسی در جهت سازگاری و مهار این پدیده به شمار رفته و ابزاری مناسب برای مدیران و سیاست‌گذاران بخش‌های مختلف است تا بتوانند با تدابیر از پیش تعیین‌شده، تا حد ممکن خسارات ناشی از آن را به حداقل برسانند.

تغییر اقلیم یک روند مداوم است و جوامع، سازمان‌ها و افراد با تغییر اقلیم گذشته سازگار شده‌اند. با این وجود، بسیاری اکنون در حال تعدیل تغییرات شرایط اقلیمی آینده از طریق اقدامات پیشگیرانه هستند (ساوو و همکاران، ۲۰۱۶). کشور ایران نیز از این قاعده مستثنی

نیست و در ۶۰ درصد از مناطق ایران روند خشکسالی رو به افزایش بوده است و تنها در ۴ درصد از مناطق شاهد پدیده ترسالی هستیم (کشاورز و همکاران، ۱۳۹۱). شاخص خشکسالی هواشناسی بارش استاندارد شده (SPI) برای پیش‌بینی مشخصات یک خشکسالی مانند شروع و خاتمه، شدت و تداوم، در پنجره‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود.

دوسو و سومایلا (۲۰۰۷) در بررسی خشکسالی‌های هواشناسی غرب آفریقا، شاخص SPI را برای مقادیر بارش صفر اصلاح کردند. وو و همکاران (۲۰۰۷)، شاخص خشکسالی SPI را برای مناطق کم‌بارش در فصول خشک استفاده کرده و به محاسبه این شاخص خشکسالی در ۲۱۸ ایستگاه هواشناسی در ۴۰ ایالت آمریکا پرداختند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) در رابطه با ارزیابی شرایط ترسالی و خشکسالی با بهره‌گیری از شاخص خشکسالی SPI در طول یک دوره آماری ۵۷ ساله در چین، به این نتیجه رسیدند که همبستگی خوبی بین آب منطقه و SPI وجود داشته و روند تغییرات خشکسالی در حوضه، دارای روند صعودی محسوس است.

ژو و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی داده‌های بارندگی و دما مربوط به ایستگاه اداره هواشناسی منطقه بنگلادش در طول سال‌های ۱۹۷۹-۲۰۱۸ با استفاده از شاخص‌های EDI و SPI، ویژگی‌ها و تقویم زمانی شروع و پایان و فراوانی خشکسالی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که فرکانس خشکسالی در منطقه بنگال شمالی طی دوره مورد بررسی حداقل افزایش ۱۰ درصدی داشته است.

وفاخواه و رجیبی (۱۳۸۴) شاخص‌های خشکسالی هواشناسی عدد Z (ZSI)، درصد نرمال بارندگی (PN)، دهک‌ها (DI) و ناهنجاری بارش (RAI) در حوضه دریاچه‌های بختگان، طشک و مهارلو را با استفاده از فرضیه کمینه تحلیل کرده و به این نتیجه دست یافتند که شاخص‌های دهک‌های بارندگی و درصد نرمال عملکرد بهتری را دارند.

انصافی‌مقدم (۱۳۸۶) به بررسی و مقایسه عملکرد شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI، ZSI، PN و DI) برای ۳۴ ایستگاه هواشناسی منتخب در منطقه دریاچه نمک در طول دوره آماری ۴۴ ساله با بهره‌گیری از آزمون فرضیه کمینه که توسط خلیلی و بذرافشان (۱۳۸۲) مورد استفاده قرار گرفته است، پرداخت. در نتیجه، در پنجره

آب‌های زیرزمینی، معلوم شد که افت سطح آب‌های زیرزمینی در تمام منطقه تحت تأثیر خشکسالی هواشناسی بوده است. خدقلی (۱۳۹۷) با استفاده از داده‌های هواشناسی هشت ایستگاه سینوپتیک منتخب، چندین شاخص خشکسالی را برای حوضه زاینده‌رود تحلیل کرد. به‌منظور یافتن شاخص مناسب، از روش همبستگی اسپیرمن و نظریه کمینه استفاده شد. نتایج نشان داد که از بین شاخص‌های خشکسالی (SIAP, PN, SPI, BMDI,) شاخص‌های RAI و SLAP بهترین عملکرد را در آن منطقه داشتند.

مصباح‌زاده (۱۳۹۷) در مقاله‌ای با عنوان بررسی روند زمانی خشکسالی هیدرولوژیک و هواشناسی در حوزه آبخیز کرخه با بررسی شاخص SPI و SDI در بازه‌های زمانی (۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه) به روش همبستگی پیرسون به این نتیجه دست یافتند که رابطه زمانی وقوع خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با یکدیگر در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است و این همبستگی در بازه ۴۸ ماهه حداکثر است. همچنین وقوع خشکسالی در منطقه، اثر خود را با تأخیر ۲ ماهه یا ۱ ماهه روی منابع آب سطحی نشان داد. میریعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) با مقایسه و بررسی ۸ شاخص خشکسالی متفاوت نتیجه گرفتند که شاخص RDI که بر مبنای بارندگی و تبخیر محاسبه می‌شود، نسبت به شاخص SPI که تنها بر اساس پارامتر بارش محاسبه می‌شود، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات آب‌وهوایی داشته و همچنین شاخص PNPI روشی ناکارآمد برای ارزیابی خشکسالی بوده و پیش‌بینی خشکسالی با توجه به این شاخص خطاهای زیادی خواهد داشت. هدف از تحقیق حاضر، بررسی مداوم و بیشینه خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی (SPI, DI, CZI, MCZI, ZSI) و آمار بارش شش ایستگاه برای یافتن تطبیق‌پذیرترین شاخص در حوضه شهرستان دامغان است. در تعیین عملکرد این شاخص‌ها و انتخاب تطبیق‌پذیرترین شاخص، از فرضیه کمینه نیز استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرستان دامغان با مساحت ۱۲۱۱۰ کیلومتر مربع و جمعیت ۹۴۱۹۰ نفر (مطابق با سرشماری سال ۱۳۹۵)، از

زمانی سالانه نشان داده شد که شاخص‌های SPI و DI نشان‌دهنده کلاس خشکسالی شدید و بسیار شدید در کل ایستگاه‌های مورد مطالعه بودند.

پیرمادیان و همکاران (۱۳۸۷) بیان کردند که شاخص SPI یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای کمی و عددی‌سازی اثرات تغییرات بارش است و با بررسی پنجره‌های مختلف زمانی آن، اثرات خشکسالی بر منابع آب نشان داده می‌شود. طبق نتایج، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت همراه با نوسانات زیاد و حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات میزان رطوبت و بارش هستند؛ اما در پنجره‌های زمانی بلندمدت، خشکسالی‌های شدید دارای دوره‌های طولانی‌تری بوده و در نتیجه می‌توانند پدیده خشکسالی را بهتر منعکس کنند. مرعشی (۱۳۸۷) برای تحلیل مکانیسم‌های پایش خشکسالی در دو حوضه متفاوت مرطوب و خشک، به ترتیب مناطق گلستان و سیستان را انتخاب کرد. سپس با بررسی ایستگاه‌های منتخب در آن مناطق و بررسی‌های آماری بر مبنای توزیع نرمال، از میان شاخص‌های خشکسالی (SPI, DI, CZI, ZSI و PN)، شاخص SPI را به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص برای هر دو منطقه معرفی کرد.

آغچه‌کندی و همکاران (۱۳۹۵) برای انتخاب مناسب‌ترین شاخص خشکسالی در حوضه هراز، داده‌های هواشناسی ۴۰ ساله برای سه ایستگاه هواشناسی منتخب را تحلیل کرده و پس از محاسبه شاخص‌های خشکسالی، با استفاده از نظریه کمینه به این نتیجه دست یافتند که شاخص‌های SPI و ZSI رخداد خشکسالی بسیار شدید و شدید را در همه ایستگاه‌های تحت مطالعه به خوبی نشان دادند.

کرمی (۱۳۹۰) با تحلیل رابطه بین خشکسالی هواشناسی با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در حوضه دشت تبریز نتیجه گرفت که تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در منطقه روندی کاهشی داشته و با مقایسه زمانی دو نوع خشکسالی نشان داد که تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور معمول با تأخیر نسبت به بروز خشکسالی هواشناسی ظهور می‌کند. نوحه‌گر و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی اثر خشکسالی هواشناسی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی و آب سطحی در حوضه رودخانه میناب پرداختند در ابتدا، با تحلیل رابطه شاخص خشکسالی SPI و تغییرات دبی ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه به این نتیجه رسیدند که این دو پارامتر با یکدیگر همبستگی زیادی داشتند. در ادامه، با تحلیل اثر خشکسالی هواشناسی بر تغییرات سطح

دقیقه و ۴۸ ثانیه است. ارتفاع ایستگاه هواشناسی مرکز شهرستان از سطح دریا ۱۱۵۵ متر است. میانگین دمای سالانه شهر دامغان ۱۵/۹ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالانه آن ۱۰۵ میلی‌متر است.



شمال به استان‌های گلستان و مازندران، از جنوب به استان اصفهان، از شرق به شهرستان شاهرود و از غرب به شهرستان‌های سمنان و مهدی‌شهر منتهی می‌شود (شکل ۱). طول جغرافیایی شهرستان دامغان ۵۴ درجه و ۲۰ دقیقه و ۸ ثانیه و عرض جغرافیایی آن ۳۶ درجه و ۹



شکل ۱- محدوده مطالعاتی و موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی

کرد (مکی و همکاران، ۱۹۹۳). براساس جدول این شاخص، اگر SPI بیشتر از ۲ باشد شرایط فوق‌العاده مرطوب و اگر کمتر از ۲- باشد، فوق‌العاده خشک است.

شاخص درصد از نرمال بارش

این شاخص در سال ۱۹۹۴ توسط ویلکی و همکاران ارائه شد و مفهوم اساسی آن نسبت بارندگی واقعی به مقدار نرمال، در یک دوره زمانی مشخص است که به صورت درصد بیان می‌شود و در مقیاس‌های زمانی هفتگی، ماهانه و سالانه قابل محاسبه است:

$$PN = \frac{P}{\bar{P}} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، P مجموع بارندگی در زمان مفروض (میلی‌متر) و \bar{P} میانگین بارش درازمدت (میلی‌متر) است. این شاخص در صورتی کاربرد دارد که میانگین بارندگی بر میانه منطبق بوده یا توزیع بارندگی نرمال باشد. استفاده از این شاخص ساده بوده و قابلیت انعطاف‌پذیری زیادی نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. مطابق با جدول این شاخص، PN کمتر از ۴۰ نشانگر خشکسالی بسیار شدید و PN بزرگتر از ۱۶۰ نشان‌دهنده شرایط بسیار مرطوب است.

شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق

شاخص بارندگی استاندارد شده

شاخص SPI براساس اختلاف بین مقادیر بارش و میانگین بارش برای یک بازه زمانی مشخص و سپس تقسیم این مقدار بر انحراف معیار بارش توسط مکی و همکاران (۱۹۹۳) و ادواردز و مکی (۱۹۹۷) پیشنهاد شده است (معادله (۱)). SPI به اطلاعات توپوگرافیک و رطوبت خاک وابستگی ندارد. این شاخص به دلیل سادگی در محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب‌وهوایی به عنوان شاخص مناسبی شناخته می‌شود. این شاخص برای محاسبه خشکسالی در مقیاس‌های کوتاه مدت (۱، ۳ و ۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ماهه) به کار می‌رود.

$$SPI = \frac{Pi - \bar{P}}{s} \quad (1)$$

که Pi مقدار بارش در دوره مدنظر، \bar{P} میانگین درازمدت در دوره مورد نظر و S انحراف معیار مقادیر بارش در کل دوره است. البته باید توجه داشت که SPI توزیع نرمال را برای بارش در نظر می‌گیرد. چون بارندگی‌ها اغلب از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند؛ بنابراین باید قانون احتمالی حاکم بر آن را پس از مشخص کردن به نرمال استاندارد تبدیل

شاخص دهک‌ها

این شاخص توسط Gibbs and Maher (۱۹۶۷) ارائه شده است. این روش بر مبنای کاربرد توزیع فراوانی تجمعی یک ایستگاه بنا شده است. شاخص دهک‌ها (DI) وقوع بارندگی‌های طولانی‌مدت را در کلاسه‌هایی ده درصدی از توزیع نرمال تقسیم کرده که هریک از این گروه‌ها را یک دهک می‌نامند. تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص، بارش است و مقیاس زمانی که در این شاخص استفاده شده است نیز مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه است. فرمول کلی محاسبه شاخص دهک‌ها به صورت زیر است:

$$Pi = \frac{i}{N + 1} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، Pi احتمال وقوع بارندگی در ردیف نام و N تعداد داده‌های بارندگی است. پس از محاسبه مقدار مشخصه Pi در فاصله دهک (فواصل ۱۰ درصدی) یکی از کلاس‌های رطوبتی به آن نسبت داده می‌شود. طبق جدول این شاخص، DI برابر ۱۰-۰ نشانگر خشکسالی خیلی شدید و DI برابر ۱۰۰-۹۰ نشان‌دهنده شرایط فوق‌العاده مرطوب است.

شاخص‌های CZI، ZSI و MCZI

شاخص CZI: این شاخص براساس تبدیل ریشه سوم رابطه ویلسون هیلفرتی است، با این فرض که داده‌ها از توزیع پیرسون نوع III تبعیت می‌کنند. CZI مطابق با معادله (۴) برآورد می‌شود:

$$Z_{ij} = \frac{6}{C_{si}} \left(\frac{C_{si}}{2} \varphi + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_{si}} + \frac{C_{si}}{6} \quad (4)$$

که در آن Z_{ij} شاخص CZI، i مقیاس زمانی مورد نظر و j سال مورد نظر است. همچنین:

$$C_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^3}{n \times \sigma_i^3} \quad (5)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (6)$$

که \bar{x}_i میانگین، σ_i انحراف معیار بارندگی و همچنین φ_{ij} متغیر استاندارد شده در هر مقیاس زمانی است.

شاخص MCZI: اگر در معادله (۶) به جای میانگین از میانه استفاده شود، شاخص CZI اصلاح شده یا MCZI به دست می‌آید.

شاخص Z-Score (ZSI): معادلات مربوط به محاسبه CZI برای محاسبه ZSI قابل استفاده هستند؛ اما ZSI نیاز به تبدیل داده‌ها و برازش توزیع گاما یا پیرسون نوع III مطابق آنچه در SPI و CZI انجام می‌شود، ندارد. طبق جدول این شاخص، CZI بزرگ‌تر از ۲ نشانگر ترسالی بسیار شدید و CZI کمتر از ۲- نشان‌دهنده شرایط خشکسالی بسیار شدید است.

نتایج و بحث

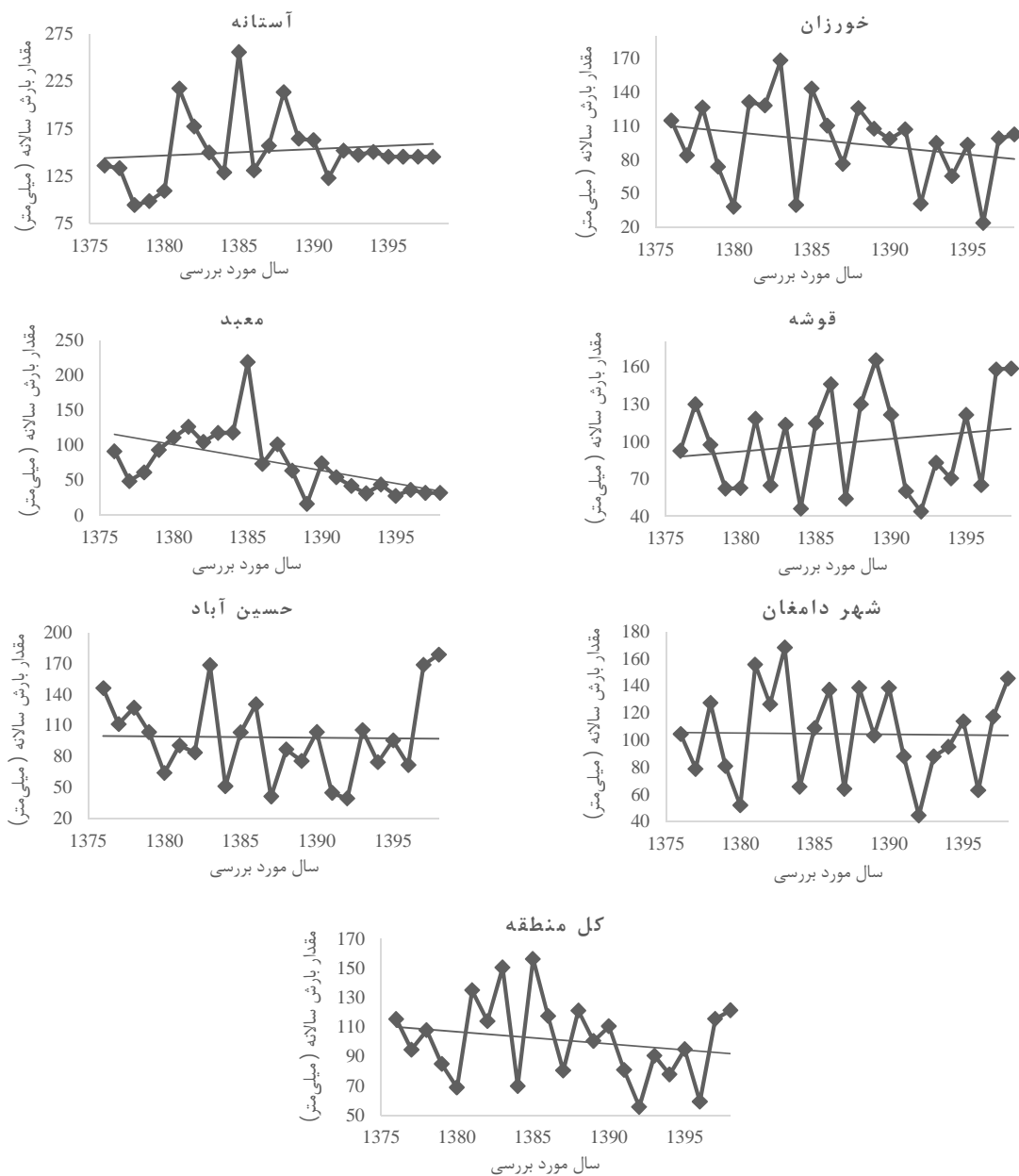
بررسی آماری بارش منطقه

برای مشاهده و بررسی بهتر تغییرات پارامتر بارش در طول دوره مورد بررسی (۱۳۷۶-۱۳۹۸) برای ایستگاه‌های مختلف و کل منطقه، شکل ۲ رسم شد. لازم به توضیح است که بارش میانگین وزنی کل منطقه در هر سال به روش پلیگون‌بندی ایستگاه‌های شش‌گانه محاسبه شده است.

با توجه به روند کلی بارش سالانه در شکل ۲ و با توجه به خط روند کشیده شده در هریک از بخش‌های این شکل، ملاحظه می‌شود که به صورت کلی، روند تغییرات بارش سالانه در هر ایستگاه در طول دوره آماری مورد بررسی (۱۳۷۶ تا ۱۳۹۸) چگونه بوده است. مثلاً برای ایستگاه دامغان، وضعیت تقریباً به صورت بدون روند و ثابت بوده، برای ایستگاه‌های آستانه و قوشه مقادیر بارش سالانه تقریباً به صورت افزایشی و در ایستگاه‌های حسین‌آباد، معبد و خورزان روند بارش به صورت کاملاً کاهشی بود. در مجموع، در کل منطقه شهرستان دامغان نیز روند بارش سالانه به صورت نزولی به دست آمده که این خود به معنی اعلام خطری زود هنگام در رابطه با کمبود روزافزون مقادیر منابع آب در منطقه و در نتیجه اهمیت بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی و در مرحله بعد تحلیل اثر خشکسالی هواشناسی بر سطح آب‌های زیرزمینی است.

بررسی روند خشکسالی با استفاده از شاخص SPI

برای بررسی روند خشکسالی در ایستگاه‌های مختلف برای پنجره‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه از لحاظ شدت و مدت دوره خشکسالی، از مقادیر خروجی شاخص SPI استفاده شده است. برای هریک از ایستگاه‌ها و همچنین کل منطقه جدولی مثل جدول ۱ تنظیم شده است.



شکل ۲- روند سالانه بارش برای همه ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۱- روند خشکسالی ایستگاه دامغان

						SPI (ماه)
۴۸	۲۴	۱۲	۶	۳	۱	عناوین مورد بررسی
۴	۸	۱۲	۲۰	۲۷	۲۹	تعداد دوره‌های خشک
۶۴	۳۵	۳۱	۲۴	۱۹	۵	بیشینه تناوم
۲۶/۵	۱۴/۱۲	۱۰/۸۳	۶/۳۵	۴/۲۵	۲/۷۹	میانگین دوره‌های خشک
-۱/۹۷	-۲/۶۷	-۲/۶۹	-۲/۳۴	-۳/۸۸	-۲/۱۲	شدیدترین ماه خشک
-۷۴/۴۲	-۴۹/۴۱	-۳۶/۵۹	-۲۶/۵۸	-۱۵/۷۷	-۵/۴	شدیدترین دوره خشکسالی

در ایستگاه معبد عدد ۱۰۲/۵- و کمترین مقدار در ایستگاه قوشه به مقدار ۵۴- رخ داد.

در پژوهشی مشابه، پیرمردیان و همکاران (۱۳۸۷) با بررسی خشکسالی در پنجره‌های زمانی مختلف بیان کردند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت همراه با نوسانات زیاد و حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات میزان رطوبت و بارش هستند؛ اما در بررسی پنجره‌های زمانی بلندمدت، خشکسالی‌های شدید دارای دوره‌های پایداری طولانی‌تری بوده و در نتیجه می‌توانند پدیده خشکسالی را بهتر منعکس کنند که کاملاً مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش است.

مقایسه شاخص‌های خشکسالی برای یافتن

مناسب‌ترین شاخص

بررسی نظریه کمینه

یکی از راه‌هایی که برای یافتن تطبیق‌پذیرترین شاخص خشکسالی در منطقه مورد استفاده قرار گرفته، نظریه کمینه است. با توجه به این نظریه، کمینه بارش سالانه در دوره بلندمدت زمانی مورد بررسی در هر ایستگاه مشخص شده و شاخصی که بتواند به بهترین وجه آن سال را به‌عنوان خشکسالی شدید تشخیص دهد، به‌عنوان شاخص بهینه برای آن ایستگاه در نظر گرفته می‌شود (خلیلی و بذرافشان، ۱۳۸۲). نتایج این کار در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج این جداول در راستای تحلیل خشکسالی، ملاحظه شد که در پنجره‌های زمانی کوتاه‌مدت (سه‌ماهه) مقادیر شاخص بارش استاندارد شده دارای نوسانات زیادی است. به عبارتی، دوره‌های خشک و مرطوب در بازه زمانی کوتاه‌مدت از تداوم زیادی برخوردار نبوده و شدیداً تحت تأثیر بارش‌های ماهانه هستند. در حالی که دوره‌های زمانی طولانی‌تر (بازه‌های زمانی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) واکنش‌های کندتری نسبت به تغییرات بارش نشان می‌دهند. همچنین، فراوانی وقوع دوره‌های خشک در مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه بسیار کمتر از بازه کوتاه‌مدت است. در نتیجه، زمان بازگشت به اوضاع نرمال در هریک از انواع خشکسالی‌ها (هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی) متفاوت است.

با توجه به نتایج این جداول، بیشترین بیشینه تداوم خشکسالی برای دوره زمانی مورد بررسی در ایستگاه معبد با مقدار ۱۱۱ ماه رخ داده است و کمترین تداوم نیز در ایستگاه آستانه به میزان ۴۳ ماه به وقوع پیوست. همچنین، بیشترین میانگین طول دوره خشک در ایستگاه قوشه با مقدار ۸۳/۵ و کمترین آن در ایستگاه آستانه برابر با ۲۲/۸ بود. شدیدترین ماه در دوره مورد بررسی از نظر شدت خشکسالی برآورد شده توسط شاخص SPI در ایستگاه خورزان با مقدار ۳/۹- و کمترین در ایستگاه قوشه برابر با ۲/۴۳- بود. در نهایت، شدیدترین دوره خشکسالی

جدول ۲- نتایج برآورد شدت خشکسالی توسط شاخص‌های مختلف در سالی که کمترین میزان بارندگی رخ داده است

ایستگاه	سال	SPI	ZSI	CZI	MCZI	DI	PN
حسین‌آباد	۱۳۹	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	نزدیک به نرمال	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی متوسط
	۲						
آستانه	۱۳۷	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط	نزدیک به نرمال	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی متوسط
	۸						
معبد	۱۳۹	خشکسالی متوسط	نزدیک به نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک به نرمال	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
	۵						
قوشه	۱۳۹	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی بسیار شدید
	۲						
خورزان	۱۳۸	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی	نرمال
	.						
دامغان	۱۳۹	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط	نزدیک به نرمال	خشکسالی خیلی شدید	خشکسالی متوسط
	۲						
کل منطقه دامغان	۱۳۹	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	نزدیک به نرمال	خشکسالی خیلی شدید	نرمال
	۲						

به‌منظور بررسی کامل‌تر مسئله تطبیق‌پذیرترین شاخص شده و پیش‌بینی ترسالی توسط این شاخص‌ها نیز انجام در منطقه دامغان، مقادیر بیشینه بارش سالانه نیز بررسی گرفته، که نتایج در جدول ۳ ارائه شده‌است.

جدول ۳- نتایج برآورد شدت ترسالی توسط شاخص‌های مختلف در سالی که بیشترین میزان بارندگی رخ داده‌است

سال	SPI	ZSI	CZI	MCZI	DI	PN
۱۳۹۸	فوق‌العاده مرطوب	فوق‌العاده مرطوب	فوق‌العاده مرطوب	نزدیک به نرمال	فوق‌العاده مرطوب	نرمال
۱۳۸۵	مرطوب	بسیار مرطوب	فوق‌العاده مرطوب	نزدیک به نرمال	فوق‌العاده مرطوب	نرمال
۱۳۸۵	بسیار مرطوب	بسیار مرطوب	بسیار مرطوب	نزدیک به نرمال	فوق‌العاده مرطوب	ترسالی بسیار شدید
۱۳۸۹	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	بسیار مرطوب	خشکسالی ضعیف
۱۳۸۳	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	تقریباً نرمال	نیمه مرطوب
۱۳۸۳	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	نزدیک به نرمال	بسیار مرطوب	ترسالی ضعیف
۱۳۸۵	بسیار مرطوب	فوق‌العاده مرطوب	بسیار مرطوب	نزدیک به نرمال	فوق‌العاده مرطوب	نرمال

بررسی همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌ها و مقادیر بارش

با توجه به آزمون ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (جدول ۴)، معنی‌دار بودن همبستگی شاخص‌های خشکسالی با بارش را در سطح یک درصد در تمامی ایستگاه‌ها تأیید می‌کند. نتایج این بررسی در جدول ۵ ارائه شده‌است. در دو سطر آخر این جدول، میانگین و انحراف معیار ضرایب همبستگی رتبه‌ای شاخص‌ها در هر ایستگاه با هم مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌های خشکسالی با پارامتر بارش نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌ها همبستگی مطلوبی بین این دو برقرار است؛ به‌جز ایستگاه قوشه که هیچ‌کدام از شاخص‌ها نتوانستند همبستگی مطلوبی را با مقادیر بارش نشان دهند و شاخص MCZI نیز در تمامی ایستگاه‌ها نسبت به بقیه شاخص‌های خشکسالی نتایج ضعیف‌تری را حاصل کرد.

بنابر نتایج کسب‌شده در جداول ۲ و ۳، با توجه به فرضیات نظریه کمینه، شاخص DI با برآورد صحیح پنج مورد از هفت مورد (۷۱ درصد) به‌عنوان منطبق‌ترین شاخص انتخاب‌شده، در جایگاه بعدی شاخص PN با دو مورد و شاخص‌های SPI و MCZI با یک مورد هستند و شاخص‌های CZI و ZSI نتوانستند هیچ‌کدام از موارد مورد بررسی را به‌صورت صحیح برآورد کنند.

در قیاس با شرایط ترسالی نیز شاخص DI با چهار مورد صحیح از هفت مورد (۵۷ درصد) به‌عنوان منطبق‌ترین شاخص برآوردکننده ترسالی انتخاب شده و در رتبه بعدی شاخص‌های CZI و ZSI با دو مورد صحیح و شاخص‌های SPI و PN با یک مورد صحیح قرار دارند. اما، شاخص PN در ایستگاه قوشه، وضعیت آب‌وهوایی سالی که بیشترین مقدار بارش در آن رخ داده‌است را به‌عنوان خشکسالی ضعیف برآورد کرده و در جایگاه آخر نیز شاخص MCZI قرار دارد که در تمامی هفت ایستگاه وضعیت نرمال را به‌دست آورده و در هیچ مورد پیش‌بینی صحیحی نداشته است.

جدول ۴- درصد احتمال کلاس‌های رطوبتی مختلف در توزیع نرمال استاندارد

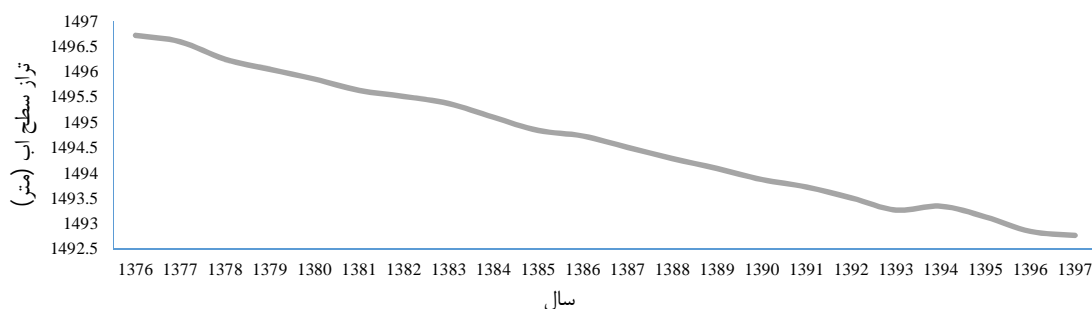
احتمال (درصد)	علامت اختصاری	طبقات شدت خشکسالی	طبقات شدت خشکسالی
۲/۲۷۵	EW	Extremely wet	ترسالی بسیار شدید
۴/۴۰۶	SW	Severe wet	ترسالی شدید
۹/۱۸۵	MW	Moderately wet	ترسالی متوسط
۶۸/۲۶۸	N	Normal	نرمال
۹/۱۸۵	MD	Moderately drought	خشکسالی متوسط
۴/۴۰۶	SD	Severe drought	خشکسالی شدید
۲/۲۷۵	ED	Extremely drought	خشکسالی بسیار شدید

جدول ۵- مقایسه همبستگی اسپیرمن شاخص‌های خشکسالی با بارش در هر ایستگاه

نام ایستگاه مورد بررسی	PN	DI	SPI	ZSI	MCZI	CZI
دامغان	۰/۹۲۹	-۰/۸۲۸	-۰/۷۸۵	-۰/۸۱۴	-۰/۴۷۱	-۰/۷۹۹
خورزان	۰/۸۸۵	-۰/۷۹۷	-۰/۵۷۳	-۰/۷۹۹	-۰/۵۹۴	-۰/۷۷۱
قوشه	۰/۳۸۷	-۰/۲۹۹	-۰/۱۵۶	-۰/۲۳۸	-۰/۲۲۲	-۰/۲۰۶
معبد	۰/۹۳۳	-۰/۸۴۹	-۰/۴۷۴	-۰/۸۰۷	-۰/۴۳۱	-۰/۷۲۸
آستانه	۰/۹۳	-۰/۸۴۸	-۰/۸۲۹	-۰/۸۴۸	-۰/۵۶۹	-۰/۸۳۴
حسین‌آباد	۰/۹۰۷	-۰/۸۱۱	-۰/۵۸۶	-۰/۷۷۷	-۰/۴۲۱	-۰/۷۵۳
کل منطقه	۰/۸۷۸	-۰/۷۶۲	-۰/۸۷۴	-۰/۸۶۸	-۰/۵۶۹	-۰/۸۶۶
میانگین همه ایستگاه‌ها	۰/۸۳۵	-۰/۷۴۲	-۰/۶۱۱	-۰/۷۳۵	-۰/۴۶۸	-۰/۷۰۸
انحراف معیار	۰/۱۹۹	-۰/۱۹۷	-۰/۲۴۹	-۰/۲۲۱	-۰/۱۲۹	-۰/۲۲۶

همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی با تراز آب‌های زیرزمینی

با توجه به داده‌های چاه‌های پیرومتری تهیه شده از سازمان آب منطقه‌ای سمنان برای حوزه شهرستان دامغان، مقادیر تراز آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS برای کل منطقه میانگین وزنی گرفته و محاسبه شده و در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- روند سالانه بارش برای همه ایستگاه‌های مورد بررسی

مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه پرداخته شده است (جدول ۶).

با توجه به جدول ۶، در مقیاس زمانی یک‌ماهه و سه‌ماهه، شاخص ZSI توانسته بیشترین مقدار همبستگی را بین مقادیر برآورد خشکسالی هواشناسی و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی به دست آورد. به همین ترتیب، در بازه ۶ ماهه شاخص SPI، در بازه ۹ ماهه شاخص CZI، در بازه ۱۲ ماهه شاخص MCZI و در بازه‌های زمانی ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه شاخص SPI بهترین همبستگی را با میانگین تراز آب زیرزمینی منطقه دارند.

از طرف دیگر، با توجه به جدول ۶، با زیاد شدن مدت زمان مورد بررسی، میزان همبستگی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده و این مهم در تمام چهار شاخص

در مجموع، با توجه به نتایج ردیف میانگین هر شاخص برای همه ایستگاه‌ها، شاخص PN با همبستگی ۰/۸۳۵ توانسته بهترین نتیجه را کسب کند و شاخص‌های DI با همبستگی ۰/۷۴۲ در جایگاه دوم، شاخص ZSI با همبستگی ۰/۷۳۵، شاخص CZI با همبستگی ۰/۷۰۸، SPI با همبستگی ۰/۶۱۱ و شاخص MCZI با همبستگی ۰/۴۶۵ جایگاه‌های بعدی را در اختیار دارند.

با توجه به شکل ۳، مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی منطقه در کل دوره مورد بررسی به صورت نزولی بوده، به غیر از سال ۱۳۹۴-۱۳۹۳ که اندکی حالت صعودی گرفته و در سال‌های بعد دوباره روند نزولی خود را ادامه داده است که این خود نشانگر این مفهوم مهم است که منابع آب‌های زیرزمینی در این منطقه به شدت تحت فشار برداشت هستند؛ بنابراین اهمیت شاخصی منطبق با شرایط منطقه که بتواند در بلندمدت تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی را به صورت صحیح شبیه‌سازی کند مشخص می‌شود.

در ادامه، برای تعیین تأثیر خشکسالی هواشناسی بر تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی و انتخاب بهترین شاخص خشکسالی، به بررسی همبستگی بین شاخص‌های منتخب خشکسالی هواشناسی با تراز آب‌های زیرزمینی در

در بازه زمانی بلندمدت مطرح می‌شود که علاوه بر داشتن بیشترین مقدار همبستگی در بازه ۴۸ ماهه، در بازه‌های زمانی ۶، ۱۸ و ۲۴ ماهه نیز از بقیه شاخص‌ها عملکرد بهتری را ثبت کرده است.

قابل‌مشاهده است. این خود نشان‌دهنده تأثیر تدریجی و تأخیری تغییرات میزان بارش بر افزایش و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی منطقه است. با توجه به موارد گفته‌شده، شاخص SPI به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص خشکسالی برای بررسی تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی برای منطقه دامغان

جدول ۶- مقایسه میزان همبستگی شاخص‌های خشکسالی با سطح آب زیرزمینی منطقه

بازه زمانی (ماه)	SPI	MCZI	CZI	ZSI
۱	۰/۰۷۴	۰/۰۵۶	۰/۰۸۱	۰/۰۹۰
۳	۰/۱۵۴	۰/۱۳۵	۰/۱۶۰	۰/۱۶۵
۶	۰/۲۶۲	۰/۲۱۴	۰/۲۶۰	۰/۲۶۰
۹	۰/۳۷۴	۰/۳۶۶	۰/۳۸۰	۰/۳۵۵
۱۲	۰/۳۴۰	۰/۴۴۱	۰/۴۳۲	۰/۴۰۸
۱۸	۰/۴۸۳	۰/۴۴۵	۰/۴۷۸	۰/۴۶۲
۲۴	۰/۵۱۲	۰/۴۴۶	۰/۵۰۰	۰/۴۹۸
۴۸	۰/۶۱۳	۰/۵۵۶	۰/۵۹۷	۰/۶۰۱

مقایسه شده و سپس مجموع اختلافات و حداکثر اختلاف موجود برای هر شاخص محاسبه شده که نتایج انتخاب شاخص مناسب برای هر یک از ایستگاه‌ها با به‌دست‌آمدن کمترین مقدار برای هر دو پارامتر معین شد. درنهایت، شاخصی که بتواند برای تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها به‌عنوان شاخص برتر انتخاب شود، برای کل منطقه نیز برگزیده می‌شود.

نتایج انتخاب شاخص مناسب براساس روش استینمن

انتخاب شاخص برتر در روش استینمن (۲۰۰۳) براساس درصد انطباق رخداد خشکسالی با توزیع نرمال استاندارد انجام می‌شود که این روند برای شاخص‌های مختلف خشکسالی در جداول ۷ تا ۱۳ صورت گرفته‌است. برای این مقایسه، ابتدا اختلاف درصد هر یک از شاخص‌های خشکسالی با درصد توزیع نرمال همان کلاس رطوبتی

جدول ۷- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای ایستگاه قوشه

وضعیت رطوبتی / شاخص	ZSI	CZI	PN	DI	MCZI	SPI
ترسالی بسیار شدید	۵/۶۱	۳/۱۶	۲۴/۲۱	۹/۱۲	۳/۱۶	۲/۴۶
ترسالی شدید	۵/۲۶	۶/۶۷	۳/۱۶	۱۱/۹۳	۶/۶۷	۵/۲۶
ترسالی متوسط	۲/۴۶	۳/۸۶	۰/۰	۹/۴۷	۹/۸۲	۶/۳۲
نرمال	۸۰/۳۵	۷۹/۶۵	۱۱/۵۸	۲۰/۳۵	۷۵/۷۹	۷۸/۹۵
خشکسالی متوسط	۰/۰	۰/۰	۵/۶۱	۱۳/۶۸	۰/۰	۰/۳۵
خشکسالی شدید	۳/۱۶	۳/۵۱	۳/۵۱	۲۰/۳۵	۱/۴۰	۳/۵۱
خشکسالی بسیار شدید	۰/۰	۰/۰	۵۱/۹۳	۱۱/۹۳	۰/۰	۰/۰
جمع خطا	۵۳/۷۲	۳۲/۲۱	۱۴۳/۱۸	۹۲/۶۸	۳۵/۷۷	۲۶/۵۹
بزرگ‌ترین خطا	۱۲/۰۸	۱۱/۳۸	۵۶/۶۹	۴۷/۹۲	۹/۱۹	۱۰/۶۸

جدول ۸- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای ایستگاه دامغان

وضعیت رطوبتی / شاخص	ZSI	CZI	PN	DI	MCZI	SPI
ترسالی بسیار شدید	۶/۶۷	۳/۵۱	۲۳/۱۶	۱۰/۵۳	۲/۸۱	۲/۴۶
ترسالی شدید	۲/۸۱	۴/۵۶	۴/۵۶	۱۱/۲۳	۵/۶۱	۵/۲۶
ترسالی متوسط	۴/۹۱	۷/۳۷	۲/۸۱	۹/۴۷	۸/۴۲	۸/۷۷
نرمال	۶۷/۴۹	۷۳/۶۸	۱۸/۹۵	۲۹/۸۲	۶۷/۰۲	۷۰/۱۸
خشکسالی متوسط	۰/۰	۰/۰	۴/۲۱	۱۳/۶۸	۰/۰	۲/۱۱
خشکسالی شدید	۵/۹۶	۷/۷۲	۵/۹۶	۱۱/۲۳	۱۲/۹۸	۸/۰۷
خشکسالی بسیار شدید	۰/۰	۰/۰	۴۰/۳۵	۱۰/۸۸	۰/۰	۰/۰
جمع خطا	۳۱/۵۱	۲۳/۴۰	۱۲۱/۲۵	۷۳/۷۳	۲۳/۷۹	۱۶/۳۸
بزرگ‌ترین خطا	۹/۱۹	۹/۱۹	۴۹/۳۲	۳۸/۴۴	۹/۱۹	۷/۰۸

جدول ۹- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای ایستگاه حسین‌آباد

SPI	MCZI	DI	PN	CZI	ZSI	وضعیت رطوبتی/ شاخص
۲/۸۱	۳/۵۱	۱۰/۵۳	۲۲/۸۱	۴/۲۱	۵/۲۶	ترسالی بسیار شدید
۴/۵۶	۳/۱۶	۱۱/۹۳	۲/۸۱	۳/۵۱	۲/۸۱	ترسالی شدید
۹/۱۲	۱۰/۵۳	۱۲/۲۸	۲/۸۱	۸/۰۷	۵/۹۶	ترسالی متوسط
۷۳/۶۸	۷۱/۹۳	۲۴/۶۸	۱۶/۸۰	۷۵/۴۴	۷۸/۶۰	نرمال
۰/۷۰	۰/۰۰	۱۵/۷۹	۶/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی متوسط
۵/۹۶	۷/۷۲	۱۲/۹۸	۵/۶۱	۵/۶۱	۴/۲۱	خشکسالی شدید
۰/۰۰	۰/۰۰	۸/۷۷	۴۲/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی بسیار شدید
۱۸/۴۸	۲۲/۲۶	۸۴/۱۴	۱۲۲/۸۸	۲۳/۷۹	۲۹/۷۹	جمع خطا
۸/۴۸	۹/۱۹	۴۳/۵۹	۵۱/۴۷	۹/۱۹	۱۰/۳۳	بزرگ‌ترین خطا

جدول ۱۰- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای ایستگاه معبد

SPI	MCZI	DI	PN	CZI	ZSI	وضعیت رطوبتی/ شاخص
۳/۸۶	۲/۸۱	۱۳/۶۸	۳۱/۴۰	۳/۵۱	۵/۹۶	ترسالی بسیار شدید
۰/۰۰	۵/۲۶	۱۰/۸۸	۰/۷۰	۴/۲۱	۳/۱۶	ترسالی شدید
۱۳/۳۳	۸/۰۷	۸/۰۷	۲/۱۱	۶/۳۲	۳/۵۱	ترسالی متوسط
۷۴/۷۴	۷۳/۶۸	۳۰/۲۳	۱۸/۲۲	۷۹/۳۰	۸۲/۱۱	نرمال
۴/۹۱	۰/۰۰	۱۳/۳۳	۵/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی متوسط
۰/۰۰	۷/۰۲	۱۰/۸۸	۳/۵۱	۳/۵۱	۲/۱۱	خشکسالی شدید
۰/۰۰	۰/۰۰	۹/۴۷	۴۸/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی بسیار شدید
۲۷/۵۶	۲۱/۹۹	۴۷/۸۵	۱۲۹/۸۷	۲۷/۶۹	۳۸/۲۱	جمع خطا
۶/۴۷	۹/۱۹	۳۸/۰۴	۵۰/۰۵	۱۱/۰۳	۱۳/۸۴	بزرگ‌ترین خطا

جدول ۱۱- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای ایستگاه آستانه

SPI	MCZI	DI	PN	CZI	ZSI	وضعیت رطوبتی/ شاخص
۲/۸۱	۲/۱۱	۹/۸۲	۲۳/۸۶	۳/۱۶	۴/۲۱	ترسالی بسیار شدید
۴/۲۱	۶/۳۲	۱۲/۹۸	۳/۵۱	۵/۹۶	۴/۹۱	ترسالی شدید
۹/۴۷	۱۰/۵۳	۸/۷۷	۳/۵۱	۷/۳۷	۶/۳۲	ترسالی متوسط
۷۱/۲۳	۶۴/۹۱	۳۲/۴۹	۱۸/۱۰	۶۹/۱۲	۷۳/۶۸	نرمال
۱/۰۵	۰/۰۰	۱۰/۱۸	۵/۶۱	۱/۰۵	۰/۷۰	خشکسالی متوسط
۸/۰۷	۱۲/۹۸	۱۱/۹۳	۱۰/۱۸	۱۰/۱۸	۷/۰۲	خشکسالی شدید
۰/۰۰	۰/۰۰	۹/۸۲	۳۴/۷۴	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی بسیار شدید
۱۸/۰۵	۲۶/۸۱	۶۸/۳۸	۱۲۰/۱۳	۲۱/۲۹	۲۴/۱۰	جمع خطا
۸/۱۳	۹/۱۹	۳۵/۷۸	۵۰/۱۷	۸/۱۳	۸/۴۸	بزرگ‌ترین خطا

جدول ۱۲- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای ایستگاه خورزان

SPI	MCZI	DI	PN	CZI	ZSI	وضعیت رطوبتی/ شاخص
۲/۸۱	۲/۱۱	۱۰/۸۸	۲۶/۳۲	۵/۱۳	۵/۲۶	ترسالی بسیار شدید
۴/۵۶	۴/۹۱	۱۲/۶۳	۱/۷۵	۵/۲۶	۴/۵۶	ترسالی شدید
۷/۷۲	۹/۱۲	۹/۴۷	۳/۱۶	۶/۳۲	۴/۲۱	ترسالی متوسط
۷۶/۱۴	۶۸/۰۷	۳۱/۲۲	۱۶/۵۷	۷۲/۹۸	۷۷/۱۹	نرمال
۰/۰۰	۰/۰۰	۸/۴۲	۵/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی متوسط
۵/۶۱	۱۲/۶۳	۱۳/۶۸	۵/۹۶	۸/۷۷	۵/۶۱	خشکسالی شدید
۰/۰۰	۰/۰۰	۹/۸۲	۴۰/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی بسیار شدید
۲۲/۶۹	۲۰/۶۲	۷۱/۷۶	۱۲۸/۳۳	۲۵/۵۰	۲۹/۷۱	جمع خطا
۹/۱۹	۹/۱۹	۳۷/۰۵	۵۱/۷۰	۹/۱۹	۹/۱۹	بزرگ‌ترین خطا

جدول ۱۳- درصد کلاس‌های رطوبتی هر شاخص برای کل منطقه دامغان

SPI	MCZI	DI	PN	CZI	ZSI	وضعیت رطوبتی/ شاخص
۴/۹۱	۱/۷۵	۱۱/۲۳	۲۱/۷۵	۱/۷۵	۳/۵۱	ترسالی بسیار شدید
۴/۵۶	۶/۳۲	۱۲/۲۸	۵/۲۶	۵/۹۶	۵/۶۱	ترسالی شدید
۹/۸۲	۱۴/۳۹	۷/۰۲	۵/۲۶	۸/۴۲	۵/۹۶	ترسالی متوسط
۶۵/۹۶	۶۲/۴۶	۳۵/۲۶	۲۶/۵۴	۷۶/۷۲	۶۹/۸۲	نرمال
۳/۸۶	۰/۰۰	۸/۴۲	۱۰/۸۸	۲/۴۶	۱/۰۵	خشکسالی متوسط
۷/۷۲	۱۱/۹۳	۱۲/۶۳	۹/۴۷	۱۰/۵۳	۱۰/۸۸	خشکسالی شدید
۰/۰۰	۰/۰۰	۹/۴۷	۲۱/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	خشکسالی بسیار شدید
۱۶/۶۵	۳۲/۴۳	۶۸/۲۱	۹۱/۵۲	۱۸/۵۲	۲۴/۱۰	جمع خطا
۵/۳۳	۹/۱۹	۳۳/۰۳	۴۱/۷۳	۶/۷۳	۸/۱۳	بزرگ‌ترین خطا

شاخص برتر بیشترین امتیاز داده شده و به‌همین ترتیب تا شاخص آخر امتیازدهی می‌شود و در نهایت شاخصی که بیشترین مقادیر امتیاز را در کل کسب کرده باشد (جدول ۱۴) به‌عنوان منطبق‌ترین شاخص با شرایط منطقه انتخاب می‌شود.

با توجه به مجموع امتیازات در جدول ۱۴، شاخص SPI که توانسته از مجموع آزمون‌ها بیشترین امتیاز را کسب کند، به‌عنوان شاخص برتر انتخاب می‌شود. شاخص DI نیز نتایج مطلوب و دقیقی را در این منطقه به‌دست آورده است.

بنابراین، شاخصی که توانست در بیشترین تعداد ایستگاه به‌عنوان شاخص انتخابی به روش استینمن برگزیده شود، شاخص SPI است که در چهار ایستگاه به‌عنوان شاخص برتر و در سه ایستگاه به‌عنوان شاخص رتبه دوم انتخاب شده‌است. شاخص‌های DI و PN نتوانستند رتبه‌ای را کسب کنند.

نتیجه‌گیری

با توجه به ملاک قراردادن هر چهار آزمون برای گزینش شاخص خشکسالی برتر، برای هر یک از آزمون‌ها با توجه به تعداد شاخص‌هایی که با هم مقایسه می‌شوند به

جدول ۱۴- امتیازدهی به شاخص‌ها در آزمون‌های چهارگانه

MCZI	CZI	ZSI	SPI	PN	DI	آزمون / شاخص
۳	۱	۲	۴	۵	۶	کمینه (خشکسالی)
۱	۵	۴	۳	۲	۶	کمینه (ترسالی)
۱	۳	۴	۲	۶	۵	اسپرمین
۳	۵	۴	۶	-	-	همبستگی با تراز آب
۵	۴	۳	۶	۱	۲	استینمن
۱۳	۱۸	۱۷	۲۱	۱۴	۱۹	مجموع امتیازات

منابع

- ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. یاسوج، ۴۵۰-۴۵۹.
- پیرمردیان ن. شمس‌نیا س. ا. بوستانی ف. و شاهرخ‌نیا م. ع. ۱۳۸۷. ارزیابی دوره بازگشت خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش در استان فارس. مجله دانش نوین کشاورزی. ۴(۱۳): ۷-۲۱.
- خداقلی م. و صبحی ر. ۱۳۹۷. ارزیابی و مقایسه شاخص‌های هواشناسی و تعیین شاخص مناسب

- انصافی‌مقدم ط. ۱۳۸۶. ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک. تحقیقات مرتع و بیابان ایران. ۱۴(۲): ۲۷۱-۲۸۸.
- آغچه‌کندی آ. شاهدی ک. سلیمانی ک. و حبیب‌نژاد روشن م. ۱۳۹۵. ارزیابی چند شاخص خشکسالی هواشناسی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه آبخیز هراز. یازدهمین همایش

- Pyrenees International Workshop on Statistics, Probability and Operations Research.
15. Edwards D. C. and McKee T. B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report Number 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins. 174 p.
16. Gibbs W. J. and Maher J. V. 1967. Rainfall deciles as drought indicators. Bureau of Meteorology, Commonwealth of Australia, Melbourne.
17. McKee T. B. Doesken N. J. and Kleist J. 1993. Drought monitoring with multiple timescales. Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteorological Society. pp. 179-184.
18. Savo V. Lepofsky D. Benner J.P. Kohfeld K.E. Bailey J. and Lertzman K. 2016. Observations of climate change among subsistence-oriented communities around the world. *Nature Climate Change*. 6: 462-473.
19. Steinmann A. 2003. Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation. *Journal of the American Water Resources Association*. 39(5): 1217-1233.
20. Todd D. K. and Mays L. W. 2005. *Groundwater Hydrology*. Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 636 p.
21. Willeke G. Hosking J. W. and Guttman, N. 1994. The national drought atlas. Institute for Water Resources, Report 94-NDS-4, U.S. Army Corps of Engineers. 587 p.
22. Wu H. Svoboda M. D. Hayes M. J. Wilhite D. A. and Wen F. 2007. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid location and dry seasons. *International Journal of Climatology*. 27: 65-79.
23. Zhu X. Dunkerley D. Henley B. 2021. Observed meteorological drought trends in Bangladesh identified with the Effective Drought Index (EDI). *Agricultural Water Management*. 255: 107-117.
24. Zhang B. Wu P. Zhao X. and Wang Y. 2012. Drought variation trends in different subregions of the Chinese Loess Plateau over the past four decades. *Agricultural Water Management*. 115: 167-177.
- در حوضه آبریز زاینده‌رود. نیوار. (۱۰۳-۱۰۲): ۶۰-۴۹.
۵. خلیلی ع. و بذرافشان ج. ۱۳۸۲. ارزیابی کارایی چند نمایه خشکسالی هواشناسی در نمونه‌های اقلیمی مختلف ایران. نیوار. ۴۹: ۷۹-۹۳.
۶. عرفان‌منش م. و آفیونی م. ۱۳۸۵. آلودگی محیط‌زیست: آب، خاک و هوا. اصفهان: انتشارات ارکان. ۳۱۸ ص.
۷. کرمی ف. ۱۳۹۰. ارزیابی ارتباط خشکسالی هواشناسی با افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت تبریز. جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۱۶(۳۷): ۱۱۱-۱۳۱.
۸. کشاورز م. وظیفه‌دوست م. فتاحی ا. و بهیار م. ۱۳۹۱. الگوی توزیعی جهت و شدت روند تغییرات خشکسالی ایران به کمک نمایه توزیعی شدت خشکسالی پالمر. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۷: ۹۷-۱۱۰.
۹. مرعشی م. ۱۳۸۷. بررسی شاخص‌های خشکسالی در مناطق نیمه‌مرطوب و خشک (مطالعه موردی: گلستان - سیستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل. ۱۴۶ ص.
۱۰. مصباح‌زاده ط. و سلیمانی س. ۱۳۹۷. بررسی روند زمانی خشکسالی هیدرولوژیک و هواشناسی در حوزه آبخیز کرخه. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۲: ۱۰۵-۱۱۴.
۱۱. میریعقوب‌زاده م. خسروی ا. و ذبیحی م. ۱۳۹۸. مروری بر شاخص‌های خشکسالی و بررسی عملکرد آن‌ها. دو فصلنامه آب و توسعه پایدار. ۱۱۲(۱): ۱۰۳-۱۱۲.
۱۲. نوحه‌گر ا. قشقایی‌زاده ن. حیدرزاده م. ایدون م. و پناهی م. ۱۳۹۵. ارزیابی خشکسالی و تأثیر آن بر منابع آب سطحی و زیرزمینی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه میناب). پژوهش‌های دانش زمین. ۷: ۲۸-۴۳.
۱۳. وفاخواه م. و رجبی م. ۱۳۸۴. کارایی نمایه‌های خشکسالی هواشناسی برای پایش و ارزیابی خشکسالی‌های حوزه آبخیز دریاچه‌های بختگان، طشک و مهارلو. *مجله بیابان*. ۱۰(۲): ۳۶۹-۳۸۳.
14. Dossou G. and Soumaila M. 2007. Analysis of drought in Burkina Faso by using standardized precipitation index. In: *The*

