

پایش یکپارچه خشکسالی در حوضه سد استقلال میناب از طریق مدل سازی وابستگی متقابل بارش، رطوبت خاک و جریان سطحی با توابع کاپولا (مقاله پژوهشی)

۱- الهام همتی گل سفیدی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲- یحیی اسماعیل پور، دانشیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۳- ام البنین بذرافشان*، استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

۴- حسین زمانی، استادیار، گروه آمار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۵- مهدی بی‌نیاز، استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به‌طور هم‌زمان بخش‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی از جمله بارش، رواناب و رطوبت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش، به‌منظور پایش یکپارچه خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی در حوضه آبخیز سد استقلال میناب، یک شاخص چند متغیره مبتنی بر توابع کاپولا با عنوان JDI توسعه داده شد. برای این منظور از داده‌های بارش ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی، جریان رودخانه ایستگاه برنطین و داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک GLDAS طی دوره آماری ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۲ استفاده گردید. ابتدا شاخص‌های تک متغیره SPI12، SRI12 و SMDI12 محاسبه و سپس ساختار وابستگی میان آن‌ها با استفاده از توابع کاپولا مدل‌سازی شد و صحت عملکرد آن‌ها توسط آزمون‌های نیکویی برازش Cramér-von Mises و AIC در سطح اطمینان ۹۵٪ آزمون گردید. نتایج برازش توزیع‌های حاشیه‌ای نشان داد که توزیع لجستیک برای بارش و رواناب با مقادیر AIC برابر ۶۳۰/۹۴ و ۵۶۳/۳۶ مناسب‌ترین توزیع بوده و برای رطوبت خاک توزیع نرمال با مقدار AIC برابر ۶۳۶/۰۷ بهترین برازش را ارائه داد. در تحلیل وابستگی، کاپولای فرانک بهترین عملکرد را نشان داد؛ به‌طوری‌که ضریب تاو کندال برای جفت متغیره‌های SPI12-SRI12 برابر ۰/۴۴۱ و برای SRI12-SMDI12 برابر ۰/۵۶۷ برآورد شد. نتایج نشان داد شاخص چندمتغیره JDI توانایی بیشتری در شناسایی رخداد‌های شدید و طولانی خشکسالی دارد، به‌طوری‌که براساس تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت و بزرگی) و معیارهای آماری شامل ضریب همبستگی، شاخص توافق و ضریب کاپا، عملکرد بهتری در بازنمایی شرایط خشکسالی نشان داد. به‌گونه‌ای که بیشترین شدت خشکسالی برابر ۳/۳۵، بیشترین مدت ۱۰ ماه و بیشترین بزرگی خشکسالی ۲۱/۴ بدست آمد. همچنین همبستگی این شاخص با SPI12 برابر ۰/۸۱ و با SRI12 برابر ۰/۷۱ بود که اعتبار رفتاری این شاخص را تأیید می‌کند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز نشان داد مؤلفه اول حدود ۹۲/۰۶ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کند. به‌طور کلی، شاخص پیشنهادی قادر است با ترکیب اطلاعات بارش، رواناب و رطوبت خاک، تصویری جامع‌تر از شرایط خشکسالی ارائه دهد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در سامانه‌های پایش و مدیریت منابع آب در مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: خشکسالی چند متغیره، توابع کاپولا، شاخص JDHMI، رطوبت خاک، حوضه آبخیز میناب.

مقدمه

پایه داده‌های بارندگی محاسبه می‌شود [۱۲]. به‌طور مشابه، شاخص استاندارد رواناب (SRI) برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی براساس داده‌های جریان رودخانه توسعه یافته است [۱۸]. همچنین شاخص رطوبت خاک به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم در پایش خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا کاهش رطوبت خاک به‌طور مستقیم بر رشد گیاهان و عملکرد محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد.

با وجود کاربرد گسترده شاخص‌های تک متغیره، این شاخص‌ها تنها بخشی از رفتار خشکسالی را منعکس می‌کنند و قادر به توصیف کامل روابط پیچیده بین مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی نیستند. در بسیاری از موارد، متغیرهای مرتبط با خشکسالی دارای همبستگی قابل توجهی با یکدیگر هستند و تغییر در یک متغیر می‌تواند بر سایر متغیرها تأثیر بگذارد [۲]. با این حال، محدودیت اصلی شاخص‌های تک متغیره تنها در تک منبعی بودن آن‌ها خلاصه نمی‌شود، بلکه در ناتوانی آن‌ها برای بازنمایی ناهمزمانی پاسخ اجزای مختلف چرخه هیدرولوژیکی به کسری آب نهفته است. به بیان دیگر، بهبود موقت در یک مؤلفه، به‌ویژه بارش، لزوماً به‌معنای بازیابی همزمان رواناب و رطوبت خاک نیست. از این‌رو، شاخص‌های مبتنی بر یک متغیر ممکن است پایان خشکسالی را زودتر از واقع نشان دهند یا شدت بحران را در دوره‌هایی که آثار کمبود آب همچنان در سامانه هیدرولوژیکی باقی است، کمتر از مقدار واقعی برآورد کنند. این محدودیت در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک که پاسخ هیدرولوژیکی آن‌ها به بارش با تأخیر و نوسان همراه است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

با این حال، همه شاخص‌های چندمتغیره از نظر ساختار و دامنه کاربرد یکسان نیستند. برخی از این شاخص‌ها بیشتر با هدف تلفیق آماری چند متغیر و تحت فرض وابستگی‌های ساده یا در مقیاس‌های زمانی مشخص توسعه یافته‌اند؛ بنابراین، لزوماً قادر

خشکسالی به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و پرهزینه‌ترین مخاطرات طبیعی، تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب، تولیدات کشاورزی و پایداری اکوسیستم‌ها دارد. این پدیده معمولاً به‌صورت کمبود طولانی‌مدت بارش نسبت به شرایط نرمال اقلیمی تعریف می‌شود و در مقایسه با سایر مخاطرات طبیعی نظیر سیل و طوفان، دارای گستره فضایی وسیع‌تر و تداوم زمانی طولانی‌تری است [۱۵،۲۰]. به‌دلیل ماهیت تدریجی و تجمعی خشکسالی، شناسایی و پایش به‌موقع آن یکی از چالش‌های مهم در مدیریت منابع آب محسوب می‌شود [۸].

خشکسالی پدیده‌ای چند بعدی است که می‌تواند بخش‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار دهد. بر همین اساس، این پدیده معمولاً به چهار نوع اصلی شامل خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی طبقه‌بندی می‌شود [۲۱]. خشکسالی هواشناسی که ناشی از کاهش بارش است، غالباً نخستین مرحله بروز خشکسالی محسوب می‌شود و می‌تواند با یک تأخیر زمانی به کاهش رطوبت خاک و در نتیجه خشکسالی کشاورزی منجر شود. در صورت تداوم این شرایط، کاهش جریان‌های سطحی و افت ذخایر آب زیرزمینی نیز رخ داده و خشکسالی هیدرولوژیکی شکل می‌گیرد [۱۱،۲۲]. از این‌رو، درک تعامل بین اجزای مختلف چرخه هیدرولوژیکی برای ارزیابی جامع خشکسالی اهمیت زیادی دارد.

برای پایش و کمی‌سازی خشکسالی، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند که هر یک براساس یک یا چند متغیر هیدرو-اقلیمی محاسبه می‌شوند. این شاخص‌ها به‌طور کلی در چهار گروه شامل شاخص‌های تک متغیره، دو متغیره، چند متغیره و شاخص‌های ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۳]. شاخص‌های تک‌متغیره تنها براساس یک متغیر اقلیمی یا هیدرولوژیکی محاسبه می‌شوند. به‌عنوان مثال، شاخص استاندارد بارش (SPI) یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی است که تنها بر

همزمان بارش، رواناب و رطوبت خاک در قالب یک شاخص استاندارد شده و قابل مقایسه وجود دارد؛ شاخصی که بتواند وابستگی غیرخطی بین این مؤلفه‌ها را حفظ کرده و تصویر واقع‌بینانه‌تری از تداوم و شدت خشکسالی در کل سامانه هیدرولوژیکی ارائه دهد. این موضوع به‌ویژه در حوضه‌هایی که مدیریت مخزن و بهره‌برداری از منابع آب به‌شدت به برآورد صحیح وضعیت خشکسالی وابسته است، اهمیت دوچندان دارد.

با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و حساسیت بالای منابع آب به تغییرات اقلیمی، توسعه شاخص‌های جامع برای پایش خشکسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حوضه آبخیز سد استقلال میناب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در استان هرمزگان، در دهه‌های اخیر با نوسانات شدید بارش و جریان رودخانه مواجه بوده و در معرض دوره‌های مکرر خشکسالی قرار داشته است. در چنین شرایطی، استفاده از شاخص‌های چند متغیره که بتوانند اطلاعات مربوط به بارش، رواناب و رطوبت خاک را به‌صورت یکپارچه ترکیب کنند، می‌تواند درک دقیق‌تری از وضعیت خشکسالی در این منطقه فراهم سازد.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش توسعه یک شاخص چند متغیره جامع مبتنی بر توابع کاپولا برای پایش یکپارچه خشکسالی در حوضه آبخیز سد استقلال میناب است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های بارش، رواناب و رطوبت خاک، شاخصی ترکیبی برای ارزیابی همزمان خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی توسعه داده شده و عملکرد آن با شاخص‌های متداول تک‌متغیره مقایسه می‌شود. به‌طور مشخص، این پژوهش در پی آن است که محدودیت شاخص‌های رایج در بازنمایی جداگانه اجزای خشکسالی را کاهش داده و با ارائه یک شاخص مبتنی بر وابستگی چند متغیره، ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از شدت، تداوم و الگوی زمانی خشکسالی در حوضه ارائه کند. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود سیستم‌های پایش خشکسالی و مدیریت پایدار منابع

نیستند سه مؤلفه اصلی خشکسالی، یعنی بارش، رواناب و رطوبت خاک را به‌طور همزمان و در قالب یک چارچوب یکپارچه بازنمایی کنند. علاوه بر این، در شماری از رویکردهای موجود، وابستگی میان متغیرها به‌صورت خطی یا با ساده‌سازی قابل توجه در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که روابط میان مؤلفه‌های خشکسالی در واقعیت اغلب ماهیتی غیرخطی دارند، به شرایط حدی حساس‌اند و با تأخیر زمانی همراه هستند. بنابراین استفاده از شاخص‌های چند متغیره می‌تواند تصویر جامع‌تری از وضعیت خشکسالی ارائه دهد. در این راستا، شاخص‌هایی نظیر MSPI، JDI و MSRI با ترکیب چند متغیر هیدرو-اقلیمی توسعه یافته‌اند و توانسته‌اند عملکرد بهتری در شناسایی رخداد‌های خشکسالی نسبت به شاخص‌های تک متغیره نشان دهند [۹].

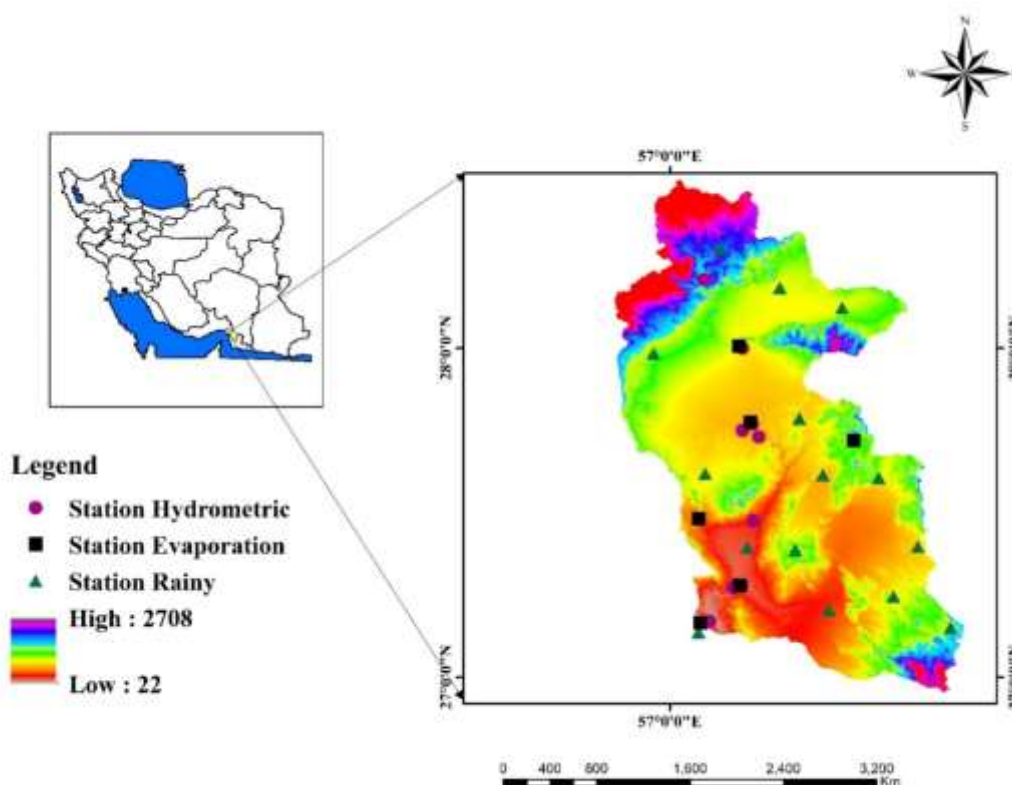
در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های آماری پیشرفته به‌ویژه توابع کاپولا در تحلیل پدیده‌های هیدرو-اقلیمی چندمتغیره مورد توجه قرار گرفته است. توابع کاپولا امکان مدل‌سازی ساختار وابستگی بین متغیرهای مختلف را بدون محدودیت در انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای فراهم می‌کنند و قادرند روابط غیرخطی و وابستگی در نواحی حدی توزیع را نیز به‌خوبی توصیف نمایند [۷، ۱۴]. به‌همین دلیل این روش در مطالعات مربوط به خشکسالی، سیلاب و سایر رخداد‌های حدی هیدرولوژیکی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹، ۵]. برای مثال، اژدری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از چارچوب کاپولا یک شاخص چندمتغیره هیدرو-هواشناسی توسعه دادند که قادر است وابستگی بین بارش و رواناب را در قالب یک شاخص ترکیبی نمایش دهد [۱]. همچنین لن و همکاران (۲۰۲۵) با تلفیق داده‌های سنجش از دور و متغیرهای هواشناسی، شاخصی مبتنی بر کاپولا برای پایش خشکسالی کشاورزی در حوضه رودخانه یانگتسه ارائه کردند که دقت بالایی در شناسایی رخداد‌های خشکسالی داشت [۱۰]. با این وجود، مرور مطالعات نشان می‌دهد که هنوز کمبود یک چارچوب یکپارچه برای تلفیق

مناطقى است که در معرض خشکسالى قرار دارد. رودخانه میناب به‌عنوان مهمترین شريان با نوسانات قابل توجه در دبی، همراه با بارش کم و نامنظم، این منطقه را در برابر دوره‌های طولانی مدت خشکسالی قرار داده است [۱]. نقشه موقعیت این حوضه در شکل ۱ ارائه شده است.

آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش مؤثری ایفا کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی و داده‌های مورد بررسی
حوزه آبخیز میناب با مساحت ۱۰۱۰۰ کیلومتر مربع در جنوب شرق کشور و استان هرمزگان با اقلیم گرم و خشک، با میانگین بارش سالانه ۱۹۲ میلی‌متر، از



شکل ۱- ایستگاه‌های مورد استفاده در تحقیق

در این پژوهش از داده‌های ماهانه رطوبت خاک سامانه جهانی تلفیق داده‌های سطح زمین (GLDAS) طی دوره آماری ۱۳۷۲-۱۴۰۲ استفاده شد. سامانه GLDAS به‌طور مشترک توسط NASA، GSFC، NOAA و NCEP توسعه یافته و با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و زمینی و بهره‌گیری از مدل‌های سطح زمین VIC، Mosaic، Noah، CLM و VIC، برآوردهای پیوسته‌ای از متغیرها و شارهای سطح زمین ارائه می‌دهد [۱۶].

داده‌های این تحقیق شامل دو بخش است. بخش اول، داده‌های استخراج شده مشاهداتی بارش و جریان رودخانه توسط ایستگاه‌های موجود در منطقه و بخش دوم داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک است. در این تحقیق از ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی برای برآورد بارش متوسط وزنی در کل حوضه با استفاده از روش پلیگون‌بندی تیسن و از ایستگاه هیدرومتری برنطین میناب در خروجی حوضه به‌عنوان نماینده جریان رودخانه استفاده شد. جدول ۱، اطلاعات بارش و رواناب حوضه را نشان می‌دهد.

داده‌های مفقود با استفاده از روش رگرسیون خطی و براساس همبستگی با ایستگاه‌های مجاور بازسازی گردید. همچنین به منظور بررسی همگنی سری‌های زمانی و شناسایی تغییرات ناگهانی احتمالی در داده‌ها، از آزمون همگنی پتیت استفاده شد. پس از انجام کنترل کیفی و اصلاح داده‌ها، سری‌های زمانی نهایی برای انجام تحلیل‌های بعدی و محاسبه شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گرفتند [۱۱].

این داده‌ها تقریباً کل خشکی‌های زمین را در بازه عرضی ۶۰ درجه جنوبی تا ۹۰ درجه شمالی پوشش می‌دهند. محصولات GLDAS دارای تفکیک زمانی ۳ ساعته هستند که داده‌های ماهانه از طریق میانگین‌گیری زمانی تولید می‌شوند. در این تحقیق از داده‌ها با فرمت NetCDF میانگین در عمق صفر تا ۱۰ و ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر استفاده شده و پس از استخراج در محدوده مورد مطالعه، سری زمانی رطوبت خاک برای تحلیل خشکسالی پردازش گردید [۶].

جدول ۱- مشخصات متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی حوزه آبخیز سداستقلال میناب

متغیر	طول دوره آماری	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
بارش (mm)	۱۴۰۲-۱۳۷۲	۱۹۳	۳۷/۲	۱۷	۴۳۰/۲
رواناب (m ³ /s)	۱۴۰۲-۱۳۷۲	۳۱	۶۲/۱۱	۰/۰۰۱	۱۹۷/۵۰

که در آن μ پارامتر مکان و S پارامتر مقیاس. پس از برازش توزیع لوجستیک، احتمال تجمعی $G(x)$ محاسبه و به توزیع نرمال استاندارد تبدیل شد تا مقدار شاخص بدست آید:

$$SPI \text{ or } SRI = \Phi^{-1}(G(x)) \quad (2)$$

که در آن $G(x)$ احتمال تجمعی توزیع گاما و Φ^{-1} تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد است [۱۲، ۱۸]. مقادیر این شاخص‌ها حول میانگین صفر نوسان می‌کنند، به طوری که مقادیر منفی نشان‌دهنده شرایط خشکسالی و مقادیر مثبت بیانگر شرایط ترسالی هستند.

ب: شاخص خشکسالی مبتنی بر رطوبت خاک (SMDI)

به منظور کمی‌سازی شدت و تداوم خشکسالی براساس تغییرات رطوبت خاک، در این پژوهش از شاخص خشکسالی مبتنی بر رطوبت خاک (Soil Moisture Drought Index: SMDI) استفاده شد. این شاخص با مقایسه مقادیر رطوبت خاک در یک دوره زمانی مشخص با شرایط بلندمدت و با لحاظ تداوم دوره‌های

شاخص‌های خشکسالی تک متغیره

پس از آماده‌سازی داده‌ها، شاخص‌های تک متغیره برای هر یک از متغیرهای فوق محاسبه شدند تا رفتار انفرادی هر مؤلفه بررسی شود.

الف: شاخص‌های SPI و SPR

در این پژوهش به منظور ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به ترتیب از شاخص‌های استاندارد بارش (SPI) و استاندارد رواناب (SRI) استفاده شد. ساختار محاسباتی این دو شاخص یکسان بوده و تفاوت آن‌ها تنها در نوع داده ورودی است؛ به گونه‌ای که در شاخص SPI از داده‌های بارش و در شاخص SRI از داده‌های رواناب استفاده می‌شود [۱۲، ۱۸]. در ابتدا سری‌های زمانی ماهانه داده‌ها در مقیاس زمانی مورد نظر تجمیع شدند.

سپس برای مدل‌سازی رفتار آماری داده‌ها، توزیع لوجستیک بر سری زمانی برازش داده شد که تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲].

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{x-\mu}{s}}}{s(1+e^{-\frac{x-\mu}{s}})^2} \quad (1)$$

می‌کند، بیان کرد. به بیان دیگر، کاپولا ابزاری برای جداسازی ساختار وابستگی بین متغیرها از توزیع‌های حاشیه‌ای آن‌ها فراهم می‌آورد و امکان مدل‌سازی انعطاف‌پذیر توزیع‌های چند متغیره را فراهم می‌سازد [۱۴و۱].

اگر X_1, X_2, \dots, X_p متغیرهای تصادفی با توابع توزیع $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p)$ حاشیه‌ای تجمعی باشند، تابع توزیع تجمعی مشترک آن‌ها $F(x_1, x_2, \dots, x_p)$ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_p) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p)) \quad (۴)$$

که در آن C تابع کاپولا است که ساختار وابستگی بین متغیرها را توصیف می‌کند. با تعریف متغیرهای یکنواخت:

$$U_1 = F_1(X_1), U_2 = F_2(X_2), \dots, U_p = F_p(X_p) \quad (۵)$$

رابطه فوق به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$C(u_1, u_2, \dots, u_p) = P(U_1 \leq u_1, U_2 \leq u_2, \dots, U_p \leq u_p) \quad (۶)$$

که در آن u_i در بازه $[0, 1]$ قرار دارند. در این حالت تابع کاپولا توزیع تجمعی مشترک متغیرهای یکنواخت را در فضای چند بعدی توصیف می‌کند [۷، ۱۹].

ب: شاخص خشکسالی هیدرو-هواشناسی چند متغیره (JDI) بر مبنای کاپولا

محاسبه شاخص JDI طی یک فرآیند چهار مرحله‌ای مبتنی بر اصول احتمالات و توابع کاپولا انجام می‌شود.

۱- مرحله نخست، سری‌های زمانی تجمعی متغیرهای بارش، رواناب و رطوبت خاک در مقیاس زمانی مورد نظر محاسبه می‌شوند. در این پژوهش از مقیاس زمانی ۱۲ ماهه استفاده شده و مقادیر P_{12} ، R_{12} و SM_{12} به ترتیب نشان‌دهنده مجموع بارش، رواناب و رطوبت خاک در دوره ۱۲ ماهه هستند.

۲- مرحله دوم، برای هر متغیر به طور جداگانه یک توزیع احتمال مناسب برازش داده می‌شود تا توابع

کمبود رطوبت خاک محاسبه می‌شود. فرمول محاسبه شاخص SMDI به صورت زیر است:

$$SMDI_{i,m} = \frac{\frac{1}{IP} \sum_{j=0}^{IP-1} SM^*(i,m-j)}{\frac{1}{n \times IP} \sum_{k=1}^n \sum_{j=0}^{IP-1} SM^*(i,m-j)} \times \quad (۳)$$

$$\sqrt{\frac{RL_{m,i}(SM^*)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RL_{m,k}(SM^*)}}$$

SM^* : مقدار اصلاح‌شده رطوبت خاک؛ i : اندیس موقعیت مکانی (سلول یا ایستگاه مورد مطالعه)؛ m : اندیس زمانی مربوط به ماه مورد نظر؛ j : اندیس ماه‌های داخل دوره میانگین‌گیری؛ k : اندیس سال در دوره آماری؛ IP : دوره انتگرال‌گیری یا طول میانگین متحرک (بر حسب ماه)؛ n : تعداد سال‌های دوره آماری؛ $RL_{m,i}(SM^*)$: طول دوره‌های متوالی کمبود رطوبت خاک (Run Length) در ماه m و مکان i ؛ $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RL_{m,k}(SM^*)$: میانگین طول دوره‌های کمبود رطوبت خاک در کل دوره آماری.

در این مطالعه، به منظور حذف اثر مقیاس و امکان مقایسه زمانی و مکانی، مقادیر به دست آمده استانداردسازی شده و به عنوان شاخص نهایی SMDI مورد استفاده قرار گرفت.

شاخص خشکسالی چندمتغیره مبتنی بر کاپولا

از آنجا که خشکسالی یک پدیده چند بعدی است و بررسی تک متغیره آن نمی‌تواند ارتباط متقابل مؤلفه‌های هیدرولوژیکی را نشان دهد [۱۷]، در این پژوهش شاخص JDI برای ارزیابی توام خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی توسعه یافت. این شاخص بر مبنای نظریه کاپولا پایه‌گذاری شده است.

الف: تئوری توابع کاپولا

توابع کاپولا چارچوبی ریاضی و آماری برای مدل‌سازی وابستگی بین متغیرهای تصادفی چند متغیره فراهم می‌کنند. طبق قضیه اسکالر [۱۸]، هر تابع توزیع تجمعی چند متغیره را می‌توان به صورت ترکیبی از توابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای تک متغیره و یک تابع کاپولا که ساختار وابستگی بین متغیرها را توصیف

استفاده از تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد انجام می‌شود:

$$JDI = \Phi^{-1}(K_C) \quad (11)$$

به‌طور کلی، مقادیر مثبت JDI نشان‌دهنده شرایط مرطوب، مقادیر نزدیک به صفر بیانگر شرایط نرمال و مقادیر منفی بیانگر وقوع خشکسالی هستند. در واقع مقدار $K_C > 0.5$ نشان‌دهنده شرایط مرطوب، $K_C = 0.5$ بیانگر شرایط نرمال و $K_C < 0.5$ نشان‌دهنده شرایط خشک است [۱۲، ۱۸].

در این پژوهش برای مدل‌سازی وابستگی بین متغیرهای بارش، رواناب و رطوبت خاک از دو خانواده متداول توابع کاپولا شامل کاپولاهای آرشمیدسی و بیضوی استفاده شد. از میان کاپولاهای آرشمیدسی، کاپولای فرانک و از خانواده کاپولاهای بیضوی، کاپولای گوسی مورد بررسی قرار گرفتند. کاپولاهای آرشمیدسی به‌طور کلی با استفاده از یک تابع مولد تعریف می‌شوند و ساختار کلی آن‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C(u_1, u_2, u_3) = \varphi^{-1}(\varphi(u_1) + \varphi(u_2) + \varphi(u_3)) \quad (12)$$

که در آن φ تابع مولد کاپولا و φ^{-1} معکوس آن است. در مقابل، کاپولای گوسی به‌عنوان یک کاپولای بیضوی براساس ماتریس همبستگی بین متغیرها تعریف شده و قادر است وابستگی خطی بین متغیرهای تصادفی را مدل‌سازی کند. در این مطالعه پارامترهای کاپولا با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی برآورد شده است. برای ارزیابی کیفیت مدل کاپولا، برازش مدل با استفاده از آزمون‌های آماری غیرپارامتریک نظیر آزمون کرامر-ون میسس (CVM) و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) بررسی می‌شود. این آزمون‌ها میزان انحراف بین توزیع تجربی داده‌ها و توزیع برازش‌شده کاپولا را اندازه‌گیری کرده و معیار کمی برای پذیرش یا رد مدل ارائه می‌دهند [۳].

توزیع تجمعی حاشیه‌ای برآورد شوند. انتخاب توزیع مناسب براساس تحلیل‌های آماری شامل آزمون‌های برازش نظیر کولموگروف-اسمیرنوف و همچنین بررسی نمودارهای Q-Q انجام می‌شود. پس از تعیین توزیع مناسب، مقادیر هر متغیر به مقادیر یکنواخت در بازه [0, 1] تبدیل می‌شوند:

$$u_1 = F_1(P_{12}); u_2 = F_2(R_{12}); u_3 = F_3(SM_{12}) \quad (7)$$

در این روابط F_1 ، F_2 و F_3 توابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای مربوط به بارش، رواناب و رطوبت خاک هستند.

۳- مرحله سوم که هسته اصلی تشکیل شاخص ترکیبی محسوب می‌شود، وابستگی بین سه متغیر با استفاده از یک تابع کاپولای سه بعدی مدل‌سازی می‌شود. در این حالت تابع توزیع تجمعی مشترک به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_C = C(u_1, u_2, u_3) \quad (8)$$

که در آن C تابع کاپولا و K_C احتمال تجمعی مشترک وقوع مقادیر مشاهده‌شده برای سه متغیر است. پارامترهای کاپولا با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی

(Maximum Likelihood Estimation)

برآورد می‌شوند. برای انتخاب بهترین مدل کاپولا از معیارهای اطلاعاتی آکایک و بیزی استفاده می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$AIC = -2\ln(L) + 2k \quad (9)$$

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n) \quad (10)$$

که در آن L مقدار تابع درست‌نمایی، k تعداد پارامترهای مدل و n تعداد داده‌ها است. مدلی که دارای کمترین مقدار AIC و BIC باشد به‌عنوان مدل بهینه انتخاب می‌شود (Requena et al., 2016).

۴- مرحله چهارم، احتمال تجمعی مشترک حاصل از کاپولا به مقیاس نرمال استاندارد تبدیل می‌شود تا شاخص نهایی خشکسالی بدست آید. این تبدیل با

$$M = \sum_{t=t_1}^{t_2} |DI_t| \quad (14)$$

شدت خشکسالی نیز به صورت میانگین بزرگی در طول مدت رویداد تعریف می‌شود:

$$S = \frac{M}{D} \quad (15)$$

همچنین پیک خشکسالی به شدیدترین مقدار شاخص در طول دوره خشکسالی اشاره دارد و به صورت کمینه مقدار شاخص در طول رویداد تعریف می‌شود:

$$P = \min(DI_t) \quad (16)$$

این چهار شاخص اطلاعات مهمی درباره رفتار زمانی و شدت رویدادهای خشکسالی فراهم می‌کنند و امکان مقایسه ویژگی‌های خشکسالی در دوره‌های زمانی مختلف را فراهم می‌سازند [۵]. شکل ۲، مرحله انجام تحقیق را نشان می‌دهد.

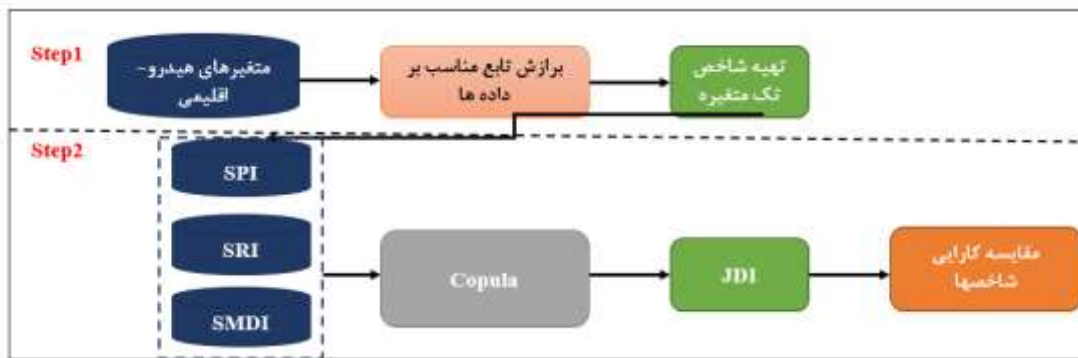
تحلیل ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی براساس تئوری ران

برای شناسایی و تحلیل ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی از نظریه ران (Run Theory) استفاده می‌شود که یکی از روش‌های متداول در مطالعات خشکسالی است [۵]. در این روش ابتدا یک مقدار آستانه برای شاخص خشکسالی در نظر گرفته می‌شود. زمانی که مقدار شاخص خشکسالی DI_t کمتر از مقدار آستانه باشد، یک دوره خشکسالی آغاز می‌شود و زمانی که مقدار شاخص مجدداً از آستانه عبور کند، رویداد خشکسالی پایان می‌یابد.

ویژگی‌های اصلی هر رویداد خشکسالی شامل مدت، بزرگی، شدت و پیک است. اگر یک رویداد خشکسالی از زمان t_1 شروع شده و در زمان t_2 پایان یابد، مدت خشکسالی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D = t_2 - t_1 + 1 \quad (13)$$

بزرگی خشکسالی که بیانگر مجموع کمبود شاخص در طول رویداد است، از رابطه زیر بدست می‌آید:



شکل ۲- مراحل انجام تحقیق

و معیارهای اطلاعاتی آکائیکه (AIC) و بیزی (BIC) انتخاب گردید. نتایج مربوط به برازش توزیع‌های حاشیه‌ای در جدول (۲) ارائه شده است.

براساس نتایج، توزیع لجستیک بهترین برازش را برای متغیرهای بارش و رواناب نشان داد. برای بارش، پارامترهای توزیع شامل $\mu = -0.036$ و $\sigma = 0.547$ به دست آمد و مقادیر معیارهای ارزیابی AIC و BIC به ترتیب برابر با ۶۳۰.۹۴ و ۶۳۷.۴۸ محاسبه شد.

نتایج

برازش توابع حاشیه‌ای و کاپولا بر متغیرهای مورد بررسی

به منظور مدل‌سازی رفتار آماری متغیرهای مورد بررسی، ابتدا توابع توزیع حاشیه‌ای مناسب برای بارش، رواناب و رطوبت خاک تعیین شد. بدین منظور چندین تابع توزیع متداول برازش داده شد و بهترین توزیع براساس آماره کولموگروف-اسمیرنوف (K-S)

است. برای جفت متغیر SPI12-SRI12 مقدار پارامتر کاپولا برابر با $4/8$ و ضریب همبستگی تاو کندال برابر با $0/441$ برآورد شد. همچنین برای جفت متغیر رواناب-رطوبت مقدار پارامتر کاپولا $7/1$ و ضریب تاو کندال $0/567$ به دست آمد که بیانگر وابستگی نسبتاً قوی بین این دو شاخص است. در مقابل، برای جفت متغیر بارش-رطوبت کاپولای گوسی بهترین برازش را ارائه داد و مقدار ضریب تاو کندال آن برابر با $0/32$ محاسبه شد که نشان‌دهنده وابستگی ضعیف‌تر نسبت به رواناب-رطوبت است.

همچنین برای مدل‌سازی وابستگی همزمان سه متغیر بارش-رواناب-رطوبت از کاپولای فرانک استفاده شد. نتایج برازش نشان داد که این تابع با پارامتر $7/06$ و مقدار تاو کندال $0/56$ قادر است ساختار وابستگی بین این متغیرها را به خوبی توصیف کند. شکل (۳) نیز نمودار چگالی احتمال (PDF) تابع مفصل منتخب برای جفت متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد که بیانگر کفایت مدل کاپولا در بازنمایی وابستگی بین شاخص‌ها است.

همچنین برای رواناب نیز توزیع لجستیک با پارامترهای $\mu = -0.562$ و $\sigma = 0.452$ بهترین برازش را ارائه داد.

در مورد متغیر رطوبت خاک، نتایج نشان داد که توزیع نرمال از برازش مناسب‌تری نسبت به سایر توزیع‌ها برخوردار است. پارامترهای این توزیع به صورت $\mu = 0.029$ و $\sigma = 0.567$ برآورد شد و مقادیر معیارهای AIC و BIC نیز به ترتیب برابر با 636.07 و 642.87 به دست آمد. مقادیر آماره $K-S$ برای هر سه متغیر در سطح معنی‌داری 5% قابل قبول بوده و نشان‌دهنده کفایت توابع انتخاب‌شده در توصیف رفتار آماری داده‌ها است. پس از تعیین توابع توزیع حاشیه‌ای، به منظور بررسی وابستگی بین متغیرها از توابع کاپولا استفاده شد. در این پژوهش چندین خانواده کاپولا مورد آزمون قرار گرفت و بهترین کاپولا براساس بیشینه درست‌نمایی و معیارهای اطلاعاتی AIC و BIC انتخاب گردید. نتایج برازش کاپولا برای جفت متغیرها در جدول (۳) ارائه شده است.

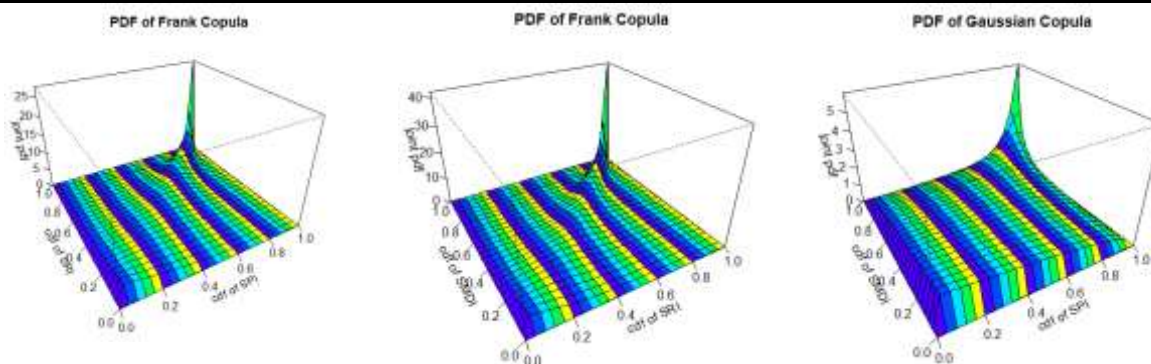
نتایج نشان داد که برای جفت متغیرهای بارش-رواناب و کاپولای فرانک بهترین عملکرد را داشته

جدول ۲- آماره‌ها و معیارهای برازش تعیین بهترین تابع توزیع حاشیه‌ای برازش شده بر متغیرهای مورد بررسی (در سطح معنی‌داری 5%)

متغیر	توزیع منتخب	K-S	p-value	پارامترها	AIC	BIC
بارش	لجستیک	0.063	0.21	$\mu = -0.036$; $\sigma = 0.547$	630.94	637.48
رواناب	لجستیک	0.058	0.34	$\mu = -0.562$; $\sigma = 0.452$	556.48	563.36
رطوبت خاک	نرمال	0.061	0.18	$\mu = 0.029$; $\sigma = 0.567$	636.07	642.87

جدول ۳- آماره‌ها و معیارهای برازش بهترین تابع توزیع کاپولای برازش شده بر متغیرهای مورد بررسی (در سطح معنی‌داری 5%)

متغیر	کاپولا	پارامتر	ضریب همبستگی تاو کندال	لگاریتم تابع درست‌نمایی	آکائیکه	بیزی
بارش-رواناب	فرانک	$4/8$	$0/441$	$74/06$	$211/089$	$202/387$
رواناب-رطوبت	فرانک	$7/1$	$0/567$	$36/6$	$216/02$	$205/86$
بارش-رطوبت	گوسین	$4/7$	$0/32$	$0/34$	$214/21$	$204/69$
بارش-رطوبت-رواناب	فرانک	$7/06$	$0/56$	$34/5$	$114/2$	$203/5$



شکل ۳- نمودار PDF تابع مفصل منتخب جفت متغیرهای مفصل مورد استفاده

در نهایت، شاخص چند متغیره JDI با پیوند دادن این سه مولفه، تصویری جامع از بحران آب در منطقه ارائه می‌دهد؛ این شاخص ترکیبی در سال‌های ۱۳۷۴، ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۴ و ۱۴۰۰ دوره‌های خشکسالی بسیار شدید و در سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۸۵ دوره‌های ترسالی را ثبت کرده است. اتصال این تحلیل‌ها به یکدیگر نشان می‌دهد که چگونه یک سیگنال خشکسالی از اواخر سال ۱۳۷۸ ابتدا در فاز کشاورزی (SMI) ظاهر شده، سپس در سال ۱۳۷۹ به فاز هواشناسی (SPI) سرایت کرده و در نهایت با یک تأخیر فازی در سال ۱۳۸۱ منجر به یک بحران عمیق هیدرولوژیکی (SRI) شده است که اثرات آن تا سال ۱۳۸۵، حتی با وجود شروع ترسالی‌های هواشناسی، در منابع آب سطحی حوضه باقی مانده است؛ این پیوستگی رفتاری ثابت می‌کند که مدیریت سد استقلال میناب نمی‌تواند تنها بر پایه یک شاخص واحد باشد و JDI با ادغام شروع سریع خشکسالی کشاورزی و تداوم طولانی خشکسالی هیدرولوژیکی، ابزاری دقیق برای پیش‌بینی بحران فراهم آورده است.

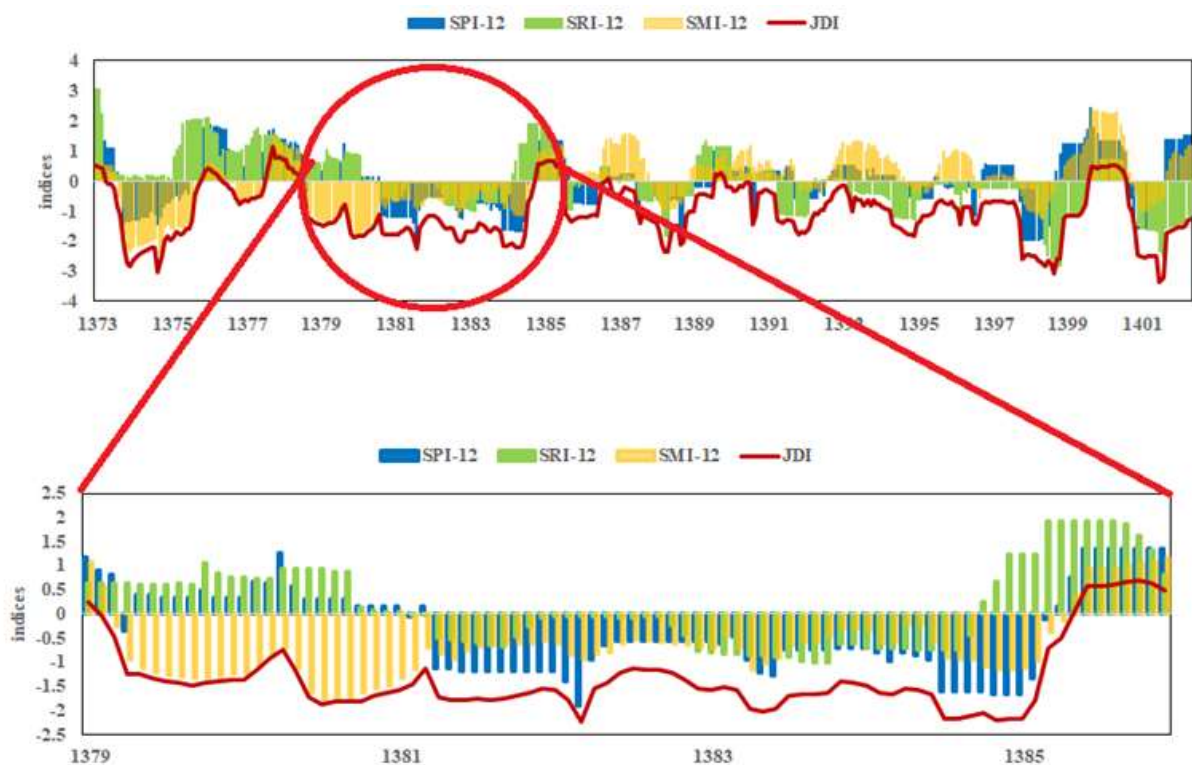
نتایج مقایسه شاخص چند متغیره JDI با شاخص‌های تک متغیره (SPI12, SRI12, SMI12) نشان می‌دهد که هر یک از شاخص‌های تک متغیره تنها بخشی از رفتار خشکسالی را منعکس می‌کنند، در حالی که شاخص JDI قادر است اثر همزمان متغیرهای مختلف هیدرو-اقلیمی شامل بارش، رواناب و رطوبت خاک را در قالب یک شاخص تلفیقی نمایش دهد. براساس شکل ۴-الف، دامنه تغییرات

مقایسه شاخص‌های خشکسالی تک و چند متغیره مبتنی بر کاپولا

شکل ۴ ترکیبی از شاخص‌های تک و چند متغیره مبتنی بر کاپولا را نشان می‌دهد. در بررسی دینامیک زمانی خشکسالی در حوضه آبریز میناب، شاخص SPI-12 که وضعیت خشکسالی هواشناسی را بازتاب می‌دهد، نشان‌دهنده نوسانات شدید اقلیمی در منطقه است؛ به طوری که این شاخص در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵، ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۰ و به‌ویژه در بازه طولانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۴ در فاز خشکسالی قرار داشته و در مقابل، سال‌های ۱۳۷۶، ۱۳۸۵ و ۱۳۹۸ را در فاز ترسالی سپری کرده است. از سوی دیگر، نتایج حاصل از شاخص SRI-12 که وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی را پیش می‌کند، نشان می‌دهد که جریان‌های سطحی حوضه با یک تأخیر فازی نسبت به بارش‌ها واکنش می‌دهند، به گونه‌ای که این شاخص در سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵ و همچنین ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ دوره‌های خشکسالی شدیدی را تجربه کرده و حتی در زمان‌هایی که بارش‌ها در فاز نرمال بوده‌اند، به دلیل تخلیه ذخایر حوضه، همچنان در وضعیت بحرانی باقی مانده است. در همین راستا، شاخص SMI-12 که بیانگر وضعیت خشکسالی کشاورزی است، حساسیت بالای رطوبت خاک منطقه را به تصویر می‌کشد؛ این شاخص در دوره‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵، ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۴ و ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ به طور مستمر در فاز خشکسالی بوده و نشان می‌دهد که تنش رطوبتی در خاک، بسیار سریع‌تر از خشکسالی هیدرولوژیکی آغاز شده و تداوم بیشتری یافته است.

تضاد رفتاری شاخص‌ها در شکل ۴-ب (بازه ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵) به وضوح ضرورت نگاه تک متغیره و چند متغیره را تبیین می‌کند. در حالیکه در سال ۱۳۸۱ شاخص بارش (SPI) به سمت شرایط نرمال حرکت کرده، شاخص‌های SMI و SRI هم‌چنان در فاز خشکسالی شدید باقی مانده‌اند. این تاخیر فازی نشان می‌دهد که بازیابی رطوبت خاک و جریان‌های سطحی در حوضه میناب بسیار کندتر از توقف در خشکسالی هواشناسی است. در این مقطع، شاخص JDI با ترکیب این سه رفتار متفاوت، از اعلام زودهنگام پایان خشکسالی اجتناب کرده و تداوم بحران را تا اواسط سال ۱۳۸۵ (زمانی که هر سه مؤلفه به پایداری رسیدند) به درستی پایش کرده است.

شاخص‌های تک متغیره در طول دوره مورد مطالعه حدود $+3$ تا -3 است. شاخص SPI12 که بیانگر وضعیت بارش است، در برخی سال‌ها مقادیر مثبت نزدیک به ۲ را نشان می‌دهد و در دوره‌های خشکسالی به حدود -2 کاهش می‌یابد. در مقابل، شاخص SRI12 که نمایانگر شرایط رواناب است، در برخی مقاطع به‌ویژه در انتهای دوره تا حدود -3 کاهش یافته که بیانگر حساسیت بیشتر سیستم هیدرولوژیک به تداوم کمبود بارش است. شاخص SMI12 که وضعیت رطوبت خاک را منعکس می‌کند، نوساناتی در حدود $+2$ تا حدود -2.5 داشته و در برخی دوره‌ها خشکسالی کشاورزی را زودتر از سایر شاخص‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۴- الف) تغییرات سری زمانی متغیرهای مورد بررسی؛ ب) تغییرات شاخص‌ها در سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵

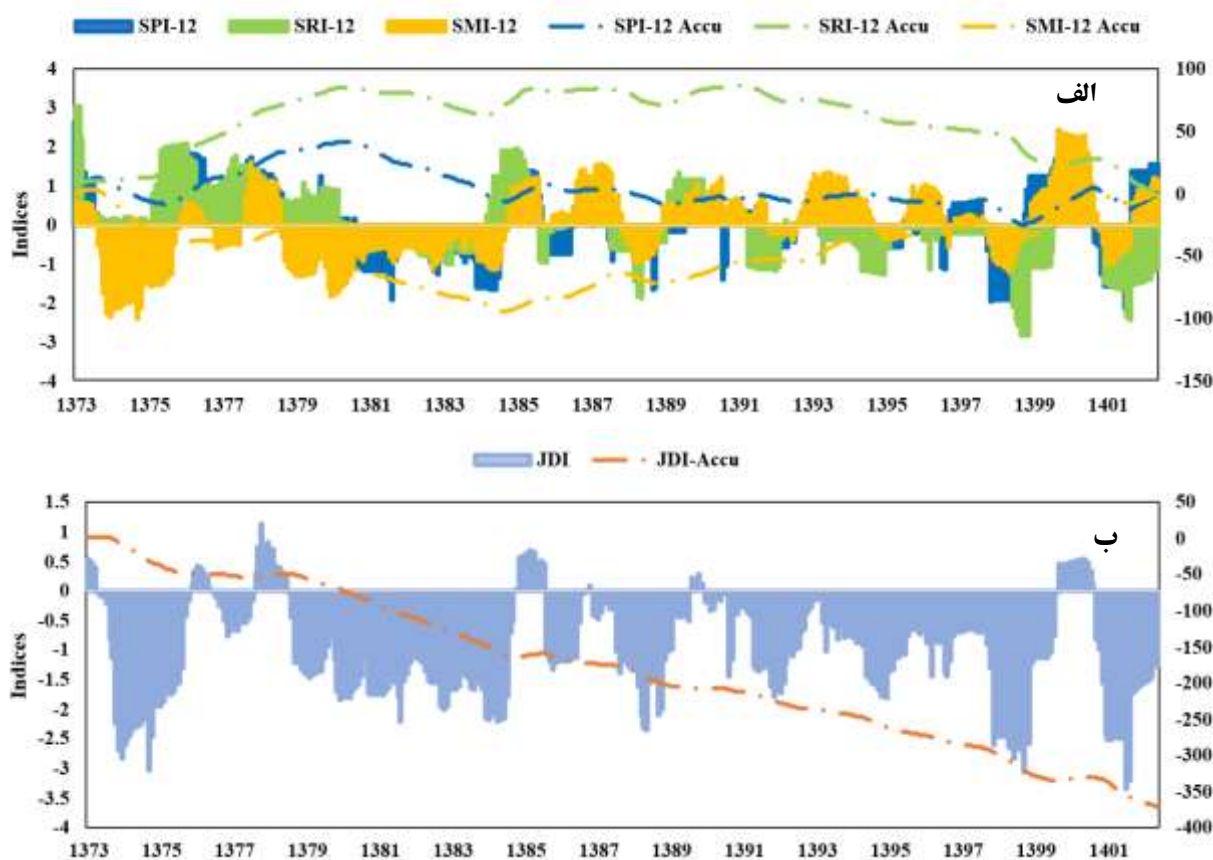
در سری تجمعی SPI12 روندی نسبتاً نزولی مشاهده می‌شود که بیانگر تداوم دوره‌های کم‌بارشی در بخش‌هایی از دوره مورد مطالعه است. این کاهش تجمعی نشان می‌دهد که کسری بارش در طول زمان انباشته شده و به تدریج شرایط مستعد خشکسالی را در حوضه ایجاد کرده است. در مقابل، سری تجمعی

شکل ۵- الف) تغییرات زمانی سری‌های تجمعی مؤلفه‌های اصلی آن شامل بارش، رواناب و رطوبت خاک و شاخص JDI را نشان می‌دهد. بررسی این شکل نشان می‌دهد که رفتار تجمعی این سه متغیر یکسان نیست و هر یک الگوی متفاوتی از تغییرات بلندمدت را نمایش می‌دهند.

۳.۵- می‌رسد که نشان‌دهنده وقوع خشکسالی شدید است. همچنین سری تجمعی JDI روند نزولی قابل توجهی را از حدود مقدار نزدیک به صفر در ابتدای دوره تا حدود ۳۵۰- در انتهای دوره نشان می‌دهد که بیانگر انباشت اثرات خشکسالی در طول زمان است. به‌طور کلی، تحلیل شکل ۵ نشان می‌دهد که در حالی که افت تجمعی بارش و کاهش رطوبت خاک نقش مهمی در شکل‌گیری شرایط خشکسالی داشته‌اند، رواناب در مقیاس تجمعی کاهش شدیدی نشان نمی‌دهد و بنابراین شدت خشکسالی مشاهده‌شده در شاخص JDI بیشتر تحت تأثیر کمبود بارش و افت تدریجی رطوبت خاک بوده است. این نتیجه اهمیت استفاده از شاخص‌های چند متغیره را نشان می‌دهد، زیرا آنها می‌توانند سهم نسبی هر یک از مؤلفه‌های هیدرواقليمی را در شکل‌گیری خشکسالی به‌طور دقیق‌تر منعکس کنند.

SRI12 کاهش شدیدی را نشان نمی‌دهد و تغییرات آن نسبتاً ملایم‌تر است. این موضوع بیانگر آن است، که اگرچه نوساناتی در جریان سطحی وجود داشته، اما در مقیاس تجمعی افت قابل توجهی مشابه بارش مشاهده نمی‌شود و سیستم هیدرولوژیک تا حدی توانسته است بخشی از کمبود بارش را از طریق ذخایر یا تأخیرهای هیدرولوژیکی جبران کند.

در مقابل، سری تجمعی رطوبت خاک روند نزولی مشخص‌تری نسبت به رواناب نشان می‌دهد که حاکی از کاهش تدریجی ذخیره رطوبتی خاک در طول زمان است. این وضعیت معمولاً زمانی رخ می‌دهد که کاهش بارش و افزایش تبخیر-تعرق موجب افت تدریجی رطوبت در لایه‌های خاک شود، حتی اگر رواناب در کوتاه‌مدت تغییرات شدیدی نشان ندهد. همزمان با این تغییرات، مقدار شاخص JDI در اغلب سال‌های دوره مورد مطالعه در محدوده منفی قرار دارد (شکل ۵ ب) و در برخی مقاطع به حدود



شکل ۵- تغییرپذیری زمانی سری و تجمعی شاخص‌های تک متغیره (الف) و (ب) JDI آن در حوضه مورد مطالعه

که نشان می‌دهد ارتباط رطوبت خاک با سایر مؤلفه‌های هیدرواقليمی نسبتاً ضعیف‌تر است.

نتایج ضریب همبستگی نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد؛ به طوری که بیشترین همبستگی بین JDI و SPI-12 با مقدار ۰/۸۱ مشاهده شد، در حالی که همبستگی JDI با SRI-12 و SMI-12 به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۴ به دست آمد. همچنین همبستگی بین شاخص‌های تک متغیره در محدوده ۰/۶۰ تا ۰/۷۳ قرار داشت که بیانگر ارتباط قابل قبول میان مؤلفه‌های مختلف خشکسالی است. به طور کلی، قرارگیری مقادیر شاخص توافق در بازه ۰/۵۸ تا ۰/۷۹ و ضرایب همبستگی در محدوده ۰/۶۰ تا ۰/۸۱ نشان می‌دهد که شاخص JDI از همخوانی مناسبی با شاخص‌های تک متغیره برخوردار بوده و در عین حال قادر است اطلاعات ترکیبی بارش، رواناب و رطوبت خاک را به صورت یکپارچه در توصیف شرایط خشکسالی منعکس کند.

بررسی هم‌پوشانی، ارتباط و سهم هر شاخص در پدیده خشکسالی

نتایج شاخص توافق (AI) و ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های تک متغیره و چند متغیره در جدول ۴ نشان می‌دهد که ارتباط نسبتاً قوی و معناداری بین این شاخص‌ها وجود دارد. براساس شاخص توافق، بیشترین میزان توافق مربوط به رابطه بین شاخص چند متغیره JDI و شاخص بارش SPI-12 با مقدار ۰/۷۹ است که نشان می‌دهد تغییرات JDI تا حد زیادی با نوسانات بارش همسو است. پس از آن، بیشترین توافق بین SPI-12 و SRI-12 با مقدار ۰/۷۱ مشاهده می‌شود که بیانگر ارتباط نزدیک بین شرایط بارش و رواناب در حوضه مورد مطالعه است. میزان توافق بین JDI و SRI-12 برابر ۰/۶۹ و بین SPI-12 و SMI-12 برابر ۰/۶۳ گزارش شده است. کمترین مقدار توافق نیز مربوط به رابطه بین SRI-12 و SMI-12 با مقدار ۰/۵۸ و همچنین بین JDI و SMI-12 با مقدار ۰/۶۱ است.

جدول ۴- شاخص توافق و ضریب همبستگی بین شاخص‌های تک و چند متغیره

	SPI-12	SRI-12	SMI-12	JDI
AI				
SPI-12	۱	۰.۷۱	۰.۶۳	۰.۷۹
SRI-12	۰.۷۱	1	۰.۵۸	۰.۶۹
SMI-12	۰.۶۳	۰.۵۸	۱	۰.۶۱
JDI	۰.۷۹	۰.۶۹	۰.۶۱	۱
Correlation				
SPI-12	۱	۰.۷۳	۰.۶۵	۰.۸۱
SRI-12	۰.۷۳	۱	۰.۶	۰.۷۱
SMI-12	۰.۶۵	۰.۶	۱	۰.۶۴
JDI	۰.۸۱	۰.۷۱	۰.۶۴	۱

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که مؤلفه اول (PC1) با تبیین حدود ۹۲۶/۰۶ درصد از واریانس کل داده‌ها، بخش عمده تغییرپذیری شاخص‌های خشکسالی را توضیح می‌دهد، در حالی که مؤلفه دوم (PC2) تنها حدود ۷/۶۷ درصد از واریانس را شامل می‌شود. مقادیر بارهای عاملی در PC1 برای شاخص‌های SPI12، SRI12، SMI12 و JDI به ترتیب برابر با ۰/۵۳، ۰/۵۰، ۰/۴۹ و ۰/۴۹ است که نشان می‌دهد، تمامی شاخص‌ها در این مؤلفه نقش نسبتاً مشابهی دارند و به یک عامل مشترک مرتبط با شرایط کلی خشکسالی پاسخ می‌دهند. در مقابل، در مؤلفه دوم بیشترین بار عاملی مربوط به SPI12 با مقدار ۰/۷۴ و پس از آن SRI12 با مقدار ۰/۶۵ است، در حالی که

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که مؤلفه اول (PC1) با تبیین حدود ۹۲۶/۰۶ درصد از واریانس کل داده‌ها، بخش عمده تغییرپذیری شاخص‌های خشکسالی را توضیح می‌دهد، در حالی که مؤلفه دوم (PC2) تنها حدود ۷/۶۷ درصد از واریانس را شامل می‌شود. مقادیر بارهای عاملی در PC1 برای شاخص‌های

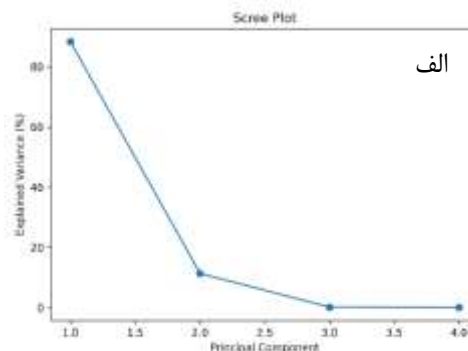
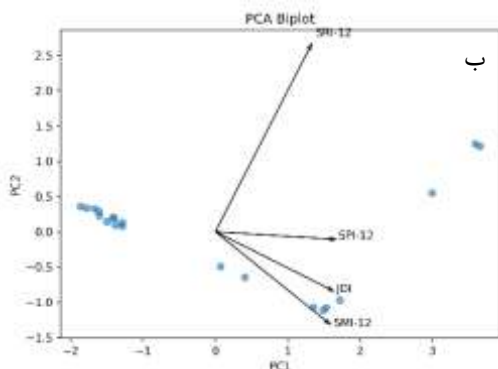
سهم را در تبیین واریانس داده‌ها دارد و پس از آن افت شدیدی در میزان واریانس مشاهده می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخش عمده اطلاعات موجود در مجموعه شاخص‌ها در مؤلفه اول متمرکز شده است. همچنین در نمودار بای‌پلات PCA (شکل ۶ ب)، جهت بردارهای شاخص‌ها نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین آن‌ها است و نزدیکی بردارها بیانگر شباهت رفتار شاخص‌ها در توصیف شرایط خشکسالی می‌باشد. در این نمودار، بردارهای SPI12 و SRI12 در جهت مشابهی قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده نقش غالب بارش و رواناب در تغییرات مؤلفه اصلی است، درحالی‌که JDI و SMI12 نیز در نزدیکی این شاخص‌ها قرار دارند و بیانگر هم‌سوئی کلی آن‌ها در بازنمایی شرایط خشکسالی حوضه هستند.

JDI و SMI12 بارهای عاملی منفی و بسیار کوچک‌تری دارند. این موضوع نشان می‌دهد که مؤلفه دوم بیشتر بازتاب‌دهنده تغییرات مربوط به بارش و تا حدودی رواناب است و نقش رطوبت خاک و شاخص ترکیبی در آن محدودتر می‌باشد. این الگو نشان می‌دهد که PC2 عمدتاً بازتاب‌دهنده تغییرات سریع‌تر و کوتاه‌مدت‌تر مرتبط با بارش و تا حدی پاسخ هیدرولوژیکی آن در قالب رواناب است، در حالی که متغیرهای وابسته به ذخیره رطوبت در سامانه، مانند رطوبت خاک و شاخص ترکیبی، سهم کمتری در این مؤلفه دارند. بنابراین، می‌توان PC2 را به‌عنوان مؤلفه‌ای مرتبط با نوسانات جوی و واکنش اولیه سامانه هیدرولوژیکی به تغییرات بارش تفسیر کرد، درحالی‌که PC1 بیانگر وضعیت یکپارچه و بلندمدت‌تر خشکسالی در حوضه است.

نمودار اسکری پلات (شکل ۶ الف) نیز این نتایج را تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که مؤلفه اول بیشترین

جدول ۵- درصد مشارکت متغیرها در مؤلفه‌ها

متغیر	سهم در PC1 (%)	سهم در PC2 (%)	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2
SPI-12	۲۷%	۵۴%	۰.۵۳	۰.۷۴
SRI-12	۲۵%	۴۱%	۰.۵	۰.۶۵
SMI-12	۲۴%	۳%	۰.۴۹	-۰.۱۲
JDI	۲۴%	۲%	۰.۴۹	-۰.۰۹
کل	۱۰۰	۱۰۰	۹۲.۰۶	۷.۶۷



شکل ۶- الف: اسکری پلات و (ب) نمودار دو متغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA Biplot) نشان‌دهنده سهم مؤلفه‌های اصلی

مقایسه مشخصه‌های خشکسالی در شاخص‌های تک و چند متغیره مبتنی بر کاپولا در جدول ۶ ارائه شده است. تحلیل ویژگی‌های آماری رخدادهای خشکسالی

مشخصه‌های خشکسالی در شاخص‌های تک و چند متغیره مبتنی بر کاپولا

در حوضه مورد مطالعه نشان‌دهنده تفاوت‌هایی در پاسخ زیرسیستم‌های مختلف هیدرواقليمی به پدیده کم‌آبی است. براساس نتایج حاصل از شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI12)، این منطقه ۹ رخداد خشکسالی را با میانگین شدت ۱.۳۲ و میانگین مدت ۳.۹ ماه تجربه کرده است که نشان‌دهنده نوسانات سریع در ورودی‌های اتمسفریک حوضه است.

در همین راستا، بررسی خشکسالی کشاورزی از طریق شاخص SMI12 حاکی از آن است که رطوبت خاک لایه سطحی با ثبت ۱۱ رخداد خشکسالی (بیشترین تعداد در میان شاخص‌های تک متغیره) و میانگین شدت ۱.۳۷، حساس‌ترین بخش حوضه به تغییرات اقلیمی بوده و با میانگین مدت ۴.۱ ماه، تداوم بیشتری را نسبت به خشکسالی هواشناسی نشان می‌دهد.

همچنین، شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (SRI12) اگرچه با ۶ مورد، کمترین تعداد رخداد را به ثبت رسانده است، اما میانگین شدت آن با مقدار ۱.۴۱ به مراتب بالاتر از خشکسالی هواشناسی است که این امر بیانگر پدیده تقویت خشکسالی در فرآیند تبدیل بارش به رواناب در حوضه میناب می‌باشد؛

به‌طوریکه میانگین مدت خشکسالی در این بخش ۳.۲ ماه ثبت شده است.

در نهایت، شاخص چند متغیره JDI با تلفیق این سه رویکرد، توانسته است تصویری جامع‌تر و بحرانی‌تر از وضعیت حوضه ارائه دهد، به گونه‌ای که این شاخص با ثبت ۱۰ رخداد، بیشترین مقادیر را در تمامی پارامترهای حدی شامل ماکزیمم شدت (۳.۳۵)، ماکزیمم مدت (۱۰ ماه)، ماکزیمم بزرگی (۲۱.۴) و ماکزیمم پیک (۳.۳۵) به خود اختصاص داده است. همچنین میانگین شدت (۱.۶۲)، میانگین مدت (۴.۴) ماه و میانگین بزرگی (۷.۲) در شاخص JDI به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از شاخص‌های تک متغیره است که این موضوع توانمندی بالای شاخص ترکیبی مبتنی بر کاپولا را در شناسایی دوره‌های بحرانی طولانی‌مدت و شدید که ممکن است توسط شاخص‌های منفرد به‌درستی پایش نشوند، تایید می‌کند. علیرغم این تفاوت‌ها در مقادیر حدی و میانگین، شباهت در مقادیر مینیمم شدت و مدت در تمامی شاخص‌ها نشان‌دهنده رفتار همسان حوضه در لحظه شروع و آستانه وقوع تنش‌های آبی است.

جدول ۶- آماره‌های توصیفی مشخصه‌های خشکسالی

JDI	SMI-12	SRI-12	SPI-12	آمار توصیفی
۱۰	۱۱	۶	۹	تعداد خشکسالی
۳.۳۵	۲.۳۶	۲.۲۱	۱.۹۸	ماکزیمم شدت خشکسالی
۱۰	۹	۶	۸	ماکزیمم مدت خشکسالی
۲۱.۴	۱۵.۸	۱۰.۹	۱۳.۷	ماکزیمم بزرگی خشکسالی
۳.۳۵	۲.۴۱	۲.۸۴	۲.۱۵	ماکزیمم پیک خشکسالی
۱.۶۲	۱.۳۷	۱.۴۱	۱.۳۲	میانگین شدت خشکسالی
۴.۴	۴.۱	۳.۲	۳.۹	میانگین مدت خشکسالی
۷.۲	۵.۹	۴.۵	۵.۳	میانگین بزرگی خشکسالی
۲.۰۱	۱.۶۳	۱.۷۴	۱.۵۸	میانگین پیک خشکسالی
۱.۰۵	۱	۱.۰۱	۱.۰۲	مینیمم شدت خشکسالی
۳	۳	۳	۳	مینیمم مدت خشکسالی
۱.۰۵	۱	۱.۰۱	۱.۰۲	مینیمم بزرگی خشکسالی
۱.۰۸	۱.۰۱	۱.۰۲	۱.۰۵	مینیمم پیک خشکسالی

با $0/52$ است. همچنین شاخص چند متغیره JDI بیشترین میزان توافق را با $SRI12(0/77)$ و $SMI12(0/74)$ نشان می‌دهد و توافق آن با $SPI12(0/61)$ نیز نسبتاً بالا است. این نتایج نشان می‌دهد که شاخص JDI توانسته است تا حد زیادی اطلاعات شاخص‌های مختلف را در خود تلفیق کند و همخوانی مناسبی با آن‌ها داشته باشد.

در جدول ۷ میزان توافق بین شاخص‌های مختلف خشکسالی با استفاده از ضریب کاپا (Cohen's Kappa) نشان داده شده است. نتایج این جدول بیانگر آن است که بین شاخص‌های تک متغیره توافق متوسط وجود دارد. بیشترین توافق میان این شاخص‌ها بین $SPI12$ و $SRI12$ با مقدار $0/58$ مشاهده می‌شود، درحالی‌که توافق بین $SRI12$ و $SMI12$ برابر با $0/49$ و بین $SPI12$ و $SMI12$ برابر

جدول ۷- ماتریس ضریب کاپا (Cohen's Kappa) بین شاخص‌ها

شاخص‌ها	SPI-12	SRI-12	SMI-12	JDI
SPI-12	۱	۰.۵۸	۰.۵۲	۰.۶۱
SRI-12	۰.۵۸	۱	۰.۴۹	۰.۷۷
SMI-12	۰.۵۲	۰.۴۹	۱	۰.۷۴
JDI	۰.۶۱	۰.۷۷	۰.۷۴	۱

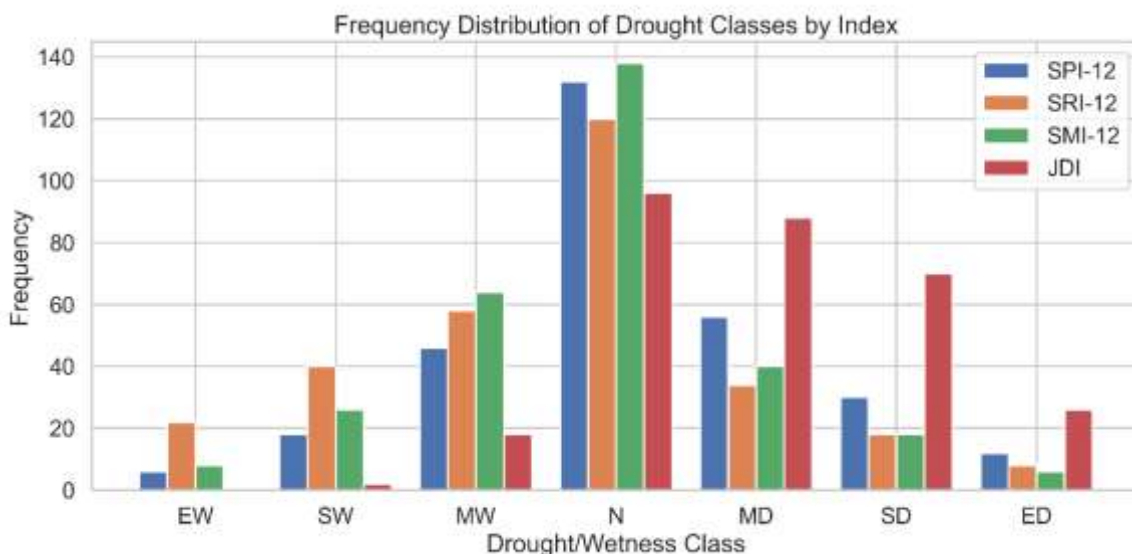
۶۴ واقعه فعال‌تر از بقیه عمل کرده، اما در شناسایی رخدادهای حدی خشکسالی (ED) با تنها ۶ واقعه خشکسالی، کمترین حساسیت را نشان داده است. در نهایت، بررسی شاخص چند متغیره JDI نشان‌دهنده یک تغییر فاحش از کلاس‌های ترسالی و نرمال به سمت کلاس‌های خشکسالی است. این شاخص اگرچه در کلاس نرمال فراوانی کمتری (حدود ۹۶ واقعه) نسبت به سایرین دارد، اما با ثبت ۸۸ واقعه در کلاس خشکسالی ملایم (MD)، ۷۰ واقعه در خشکسالی شدید (SD) و ۲۶ واقعه در خشکسالی بسیار شدید (ED)، بالاترین سطح حساسیت را در شناسایی بحران‌های آبی نشان داده است.

نکته قابل توجه در JDI، حذف تقریباً کامل کلاس‌های ترسالی شدید و بسیار شدید (نزدیک به صفر) و تمرکز بر پایش تداوم خشکسالی است؛ این ویژگی اثبات می‌کند که JDI با تلفیق متغیرها، از اعلام وضعیت ترسالی‌های غیرواقعی (که ممکن است تنها ناشی از یک بارش لحظه‌ای کوتاه‌مدت باشد و اثری بر رواناب یا رطوبت عمقی خاک نداشته باشد) خودداری کرده و بر پایداری وضعیت خشکسالی در کل سیستم تأکید دارد، که این رویکرد در مدیریت

توزیع فراوانی رخدادها در کلاس‌های مختلف (شکل ۷) تفاوت‌های ساختاری شاخص‌های مورد مطالعه را در پایش وضعیت هیدرواقلمی حوضه آشکار می‌سازد. براساس نتایج شاخص خشکسالی هواشناسی ($SPI12$)، این شاخص توزیع نسبی را بین فازهای مختلف نشان می‌دهد، به‌طوری‌که حدود ۱۳۲ مورد در وضعیت نرمال قرار داشته و در فاز خشکسالی، بیشترین تمرکز آن بر کلاس خشکسالی ملایم (MD) با ۵۶ واقعه و خشکسالی شدید (SD) با ۳۰ واقعه است. در مقابل، شاخص هیدرولوژیکی ($SRI12$) تمایل بیشتری به نمایش کلاس‌های ترسالی دارد، به گونه‌ای که بیشترین فراوانی در کلاس‌های ترسالی بسیار شدید (EW) با ۲۲ واقعه و ترسالی شدید (SW) با ۴۰ واقعه در میان تمامی شاخص‌ها متعلق به $SRI12$ است، درحالی‌که در فاز خشکسالی، این شاخص رفتار نرم‌تری داشته و تنها ۸ واقعه خشکسالی بسیار شدید (ED) را ثبت کرده است.

تحلیل شاخص استاندارد شده رطوبت خاک ($SMI12$) نیز نشان‌دهنده بیشترین میزان پایداری در وضعیت نرمال (۱۳۸ واقعه) است؛ این شاخص همچنین در شناسایی ترسالی‌های متوسط (MW) با

ریسک سد استقلال میناب و دید جامع بر پدیده خشکسالی از اهمیت حیاتی برخوردار است.



شکل ۷- فراوانی هر دسته از خشکسالی/ترسالی در انواع شاخص‌های تک و چند متغیره (EW ترسالی بسیار شدید، SW ترسالی شدید، MW ترسالی متوسط، N شرایط نرمال، MD خشکسالی ملایم، SD خشکسالی شدید و ED خشکسالی بسیار شدید)

معناداری میان شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود دارد؛ به طوری که کاهش بارش با تأخیر زمانی محدود موجب افت رواناب و ذخایر رطوبتی خاک می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، کاهش بارش با یک تأخیر زمانی مشخص، موجب افت رواناب ورودی به مخزن و کاهش ذخایر رطوبتی خاک می‌شود. همبستگی نسبتاً قوی میان شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی نشان‌دهنده پاسخ هیدرولوژیکی سریع جریان‌های سطحی حوضه به رخداد‌های بارندگی است. این پدیده عمدتاً ناشی از ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه میناب، پوشش گیاهی تنک و شیب نسبتاً زیاد بخش‌های بالادست است که سبب انتقال سریع رواناب ناشی از بارندگی‌های رگباری به شبکه زهکشی می‌شود؛ امری که با یافته‌های محققین [۵ و ۱۰] در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک مطابقت دارد. در مقابل، همبستگی ضعیف‌تر و همراه با تأخیر طولانی‌تر میان بارش (SPI) و رطوبت خاک (SMI)، بازتاب‌دهنده فرآیندهای پیچیده انتقال جرم و انرژی در منطقه غیراشباع است. در اقلیم‌های خشک و گرمسیری نظیر

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از چارچوب ریاضی توابع کاپولا، شاخصی چند متغیره برای پایش یکپارچه خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی در حوضه آبخیز سد استقلال میناب توسعه داده شد. نتایج نشان داد شاخص چند متغیره پیشنهادی (JDI) که سه مؤلفه بارش، رواناب و رطوبت خاک را ترکیب می‌کند، قادر است تصویری جامع‌تر و پیوسته‌تر از رفتار خشکسالی‌های منطقه ارائه دهد. رخداد‌های خشکسالی شناسایی شده توسط JDI دارای طول دوره و شدت بیشتری از شاخص‌های تک متغیره مانند SPI، SRI و SMDI بودند. ارزیابی عملکرد این شاخص با استفاده از شاخص‌های همبستگی پیرسون، شاخص توافق (AI) و ضریب کاپای کوهن نشان داد که JDI از نظر زمانی و طبقه‌بندی رخداد‌های خشکسالی، سازگاری قابل‌قبولی با شاخص‌های متداول و الگوی کلی تغییرات خشکسالی منطقه دارد.

مدل‌سازی وابستگی میان متغیرهای اقلیمی با استفاده از کاپولای فرانک نشان داد همبستگی

حداقل تا حدود ۳.۵- را ثبت کرده که براساس طبقه‌بندی McKee و همکاران [۱۲] نشان‌دهنده وقوع خشکسالی بسیار شدید است. درحالی‌که شاخص‌های تک متغیره در برخی از این سال‌ها نوسانات موقتی بارش را به‌عنوان بهبود شرایط خشکسالی تعبیر کرده‌اند، شاخص تلفیقی توانست اثر تجمعی و تأخیری کمبود بارش و کاهش رطوبت را بهتر بازتاب دهد [۲۳].

تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که مؤلفه اول با تبیین بیش از ۹۲ درصد واریانس کل، نمایانگر سیگنال غالب خشکسالی در حوضه است؛ موضوعی که تأیید می‌کند شاخص JDI با تلفیق سه متغیر اصلی، برآوردی منسجم و پایدار از وضعیت خشکسالی ارائه می‌دهد. با این حال، این نتیجه لزوماً به معنای برتری مطلق شاخص نیست، بلکه نشان می‌دهد JDI قادر است بخش عمده‌ای از تغییرات مشترک میان متغیرهای مؤثر بر خشکسالی را در یک شاخص واحد بازنمایی کند.

رفتار این شاخص با منطق اقلیمی منطقه نیز هم‌خوان است: در میناب، بارش اندک و تبخیر شدید باعث می‌شود کاهش بارندگی به‌سرعت در رواناب منعکس شود و سپس با اندکی تأخیر، افت رطوبت خاک را نیز رقم بزند. در نتیجه، پاسخ سامانه به خشکسالی هم‌زمان تک مرحله‌ای نیست، بلکه زنجیره‌ای و چندلایه است. از این‌رو، شاخص‌های چند متغیره، به‌ویژه مبتنی بر توابع کاپولا، در اقلیم‌های خشک توان بیشتری در بازنمایی و تحلیل هم‌زمان مؤلفه‌های مختلف خشکسالی دارند؛ رویکردی که Hao و [5] Singh, Kao و Govindaraju [۸] و Wang و همکاران [۲۱] نیز به آن اشاره کرده‌اند.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از شاخص JDI می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای پایش و تحلیل خشکسالی در حوضه میناب فراهم کند. از آنجا که این شاخص به‌طور هم‌زمان تغییرات بارش، جریان و رطوبت خاک را در نظر می‌گیرد، ظرفیت بیشتری برای شناسایی دوره‌های خشکسالی ترکیبی و پایدار دارد. بر این

میناب، بخش عمده‌ای از بارش‌های اولیه پیش از نفوذ به اعماق خاک و تأثیر بر رطوبت ناحیه ریشه، تحت تأثیر پتانسیل بالای تبخیر و تعرق اتمسفری (PET) از دست می‌رود. علاوه بر این، بافت خاک دشت میناب و حضور لایه‌های با نفوذپذیری متفاوت، سرعت انتشار رطوبت به اعماق را محدود می‌سازد. این رفتار تأخیری و غیرخطی در انتقال اثر کمبود اتمسفری به ذخیره رطوبتی خاک، با مبانی فیزیکی هیدرولوژی آب‌های زیرسطحی همخوانی داشته و موید نتایج پژوهش‌های Azhdari و همکاران [۱] است.

برتری شاخص JDI نسبت به شاخص‌های کلاسیک در دو بعد روشن است: تشخیص مطمئن‌تر خشکسالی‌های طولانی و شدید و بازنمایی واقع‌بینانه‌تر روابط غیرخطی میان مؤلفه‌های اقلیمی. به‌کارگیری تابع کاپولا باعث شد وابستگی‌های غیرخطی بین متغیرها به‌طور مستقیم مدل‌سازی شود و بدون نیاز به هم‌شکل بودن توزیع‌های حاشیه‌ای، مسئله ناهمگونی آماری متغیرها (بارش، جریان سطحی، رطوبت خاک) مدیریت گردد. در مقابل، شاخص‌های تک متغیره ذاتاً فقط یک مسیر از خشکسالی را نمایش می‌دهند و نمی‌توانند هم‌زمان افت بارش، کاهش رواناب و تخلیه تدریجی رطوبت خاک را در یک چارچوب واحد ترکیب کنند. اما شاخص تلفیقی مبتنی بر کاپولا توانست هم‌پوشانی رخدادها را دقیق‌تر ثبت کند؛ به‌ویژه بیشترین توافق میان JDI با SPI و SRI مشاهده شد که نشان می‌دهد این شاخص در بازنمایی کمبود آب ناشی از افت بارش و کاهش آب سطحی عملکرد مناسبی دارد؛ که مشابه یافته‌های Lan و همکاران [۱۰]، Requena و همکاران [۱۷] و Zhong و همکاران [۲۲] است.

الگوی زمانی شاخص‌ها نشان داد خشکسالی‌های شدید در حوضه استقلال میناب عمدتاً در دوره‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۵ و ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ رخ داده‌اند؛ سال‌هایی که بارش به‌طور محسوسی کمتر از میانگین بلندمدت بوده و افزایش دما موجب کاهش رطوبت خاک شده است. شاخص JDI در این دوره‌ها مقادیر

کند و در شناسایی شدت و مدت رخداد‌های خشکسالی تصویری یکپارچه از شرایط منطقه ارائه دهد. با این حال، کاربرد این شاخص در سامانه‌های عملیاتی هشدار زودهنگام نیازمند مطالعات تکمیلی، ارزیابی‌های پیش‌بینی‌پذیری و بررسی عملکرد آن در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف است.

با توجه به نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده به منظور بهبود دقت پایش خشکسالی، متغیرهای دیگری مانند سطح آب زیرزمینی، شاخص‌های پوشش گیاهی مبتنی بر سنجش از دور و دمای سطح زمین در چارچوب شاخص چند متغیره مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ارزیابی عملکرد شاخص توسعه‌یافته در حوضه‌های آبخیز دیگر با شرایط اقلیمی متفاوت می‌تواند به بررسی قابلیت تعمیم آن کمک کند.

اساس، پیشنهاد می‌شود ارزیابی وضعیت خشکسالی در حوضه صرفاً به شاخص‌های هواشناسی محدود نشود و شاخص چند متغیره به‌عنوان یک ابزار مکمل در تحلیل وضعیت منابع آب مورد توجه قرار گیرد.

با این حال، این مطالعه دارای محدودیت‌هایی نیز است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. بخشی از داده‌های مورد استفاده، به‌ویژه داده‌های رطوبت خاک، مبتنی بر محصولات ماهواره‌ای بوده‌اند که ممکن است تحت تأثیر عدم قطعیت‌های سنجش از دور قرار گیرند. همچنین عدم قطعیت‌های مرتبط با انتخاب ساختار کاپولا و توزیع‌های حاشیه‌ای به‌طور صریح کمی‌سازی نشده‌اند که می‌تواند بر نتایج شاخص تأثیر بگذارد.

به‌طور کلی، شاخص JDI توانست روابط وابستگی میان مؤلفه‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی خشکسالی را در قالب یک شاخص واحد مدل‌سازی

References

- [1]. Azhdari, Z., Bazrafshan, O., Shekari, M., & Zamani, H. (2020). Three-dimensional risk analysis of hydro-meteorological drought using multivariate nonlinear index: Z. Azhdari et al. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1311-1327. DOI: 10.1007/s00704-020-03365-3
- [2]. Bazrafshan, O., Zamani, H., & Shekari, M. (2020). A copula-based index for drought analysis in arid and semi-arid regions of Iran. *Natural Resource Modeling*, 33(1), e12237. DOI: 10.1111/nrm.12237
- [3]. Genest, C., Rémillard, B., & Beaudoin, D. (2009). Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study. *Insurance: Mathematics and economics*, 44(2), 199-213. DOI: 10.1016/j.insmatheco.2008.12.005
- [4]. Govindaraju, R. S. (2019). Review of copulas and their applications in water resources engineering by lan zhang and VP Singh. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.000182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000182)
- [5]. Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668-678. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.058
- [6]. Jin, S., & Feng, G. (2013). Large-scale variations of global groundwater from satellite gravimetry and hydrological models, 2002–2012. *Global and Planetary Change*, 106, 20-30. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.04.006
- [7]. Joe, H. (2014). *Dependence modeling with copulas*. CRC press.
- [8]. Kao, S. C., & Govindaraju, R. S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), 121-134. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.018
- [9]. Kumar, Y., Singh, S., & Kumar, A. (2025). Copula-based meteorological drought risk assessment in Northwest India. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(59), 31455-31474. DOI: 10.1007/s11356-024-30889-6
- [10]. Lan, X., Luo, Y., Leng, G., & Cao, J. (2025). A novel copula-based index for agricultural drought monitoring: integrating vegetation response and meteorological drought dynamics in the middle-lower Yangtze River

- Basin. *Ecological Indicators*, 178, 114107. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.114107
- [11]. Liu, R., Yin, J., Kang, S., Yang, Y., Liu, P., Guo, J., & Gu, X. (2023). Machine learning-constrained projection of bivariate hydrological drought magnitudes and socioeconomic risks. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*.
- [12]. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- [13]. Nabaei, S., Sharafati, A., Yaseen, Z. M., & Shahid, S. (2019). Copula based assessment of meteorological drought characteristics: regional investigation of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276, 107611. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107611
- [14]. Nelsen, R. B. (2006). *An introduction to copulas*. New York, NY: Springer New York.
- [15]. Obasi, G. O. P. (1994). WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75(9), 1655-1661.
- [16]. Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., ... & Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society*, 85(3), 381-394. DOI: 10.1175/BAMS-85-3-381
- [17]. Requena, A. I., Flores, I., Mediero, L., & Garrote, L. (2016). Extension of observed flood series by combining a distributed hydro-meteorological model and a copula-based model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(5), 1363-1378. DOI: 10.1007/s00477-015-1113-2
- [18]. Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical research letters*, 35(2). DOI: 10.1029/2007GL032381
- [19]. Singh, H. V., Joshi, N., & Suryavanshi, S. (2026). Evaluating hydrological drought characteristics in a semi-arid river basin using the conditional copula approach under the changing climate. *Journal of Earth System Science*, 135(2), 56. <https://doi.org/10.1007/s12040-026-02757-9>
- [20]. Wilhite, D. A. (2002, November). Combating drought through preparedness. In *Natural resources forum* (Vol. 26, No. 4, pp. 275-285). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishing Ltd. DOI: 10.1111/1477-8947.00031
- [21]. Wang, H., Zhu, Y., Qin, T., & Zhang, X. (2022). Study on the propagation probability characteristics and prediction model of meteorological drought to hydrological drought in basin based on copula function. *Frontiers in Earth Science*, 10, 961871. DOI: 10.3389/feart.2022.961871
- [22]. Zhong, Z., Zhao, Q., Sang, G., Xue, J., Wang, J., & Lin, F. (2026). Copula-based composite drought index combining precipitation, temperature, and NDVI used for drought monitoring. *Theoretical and Applied Climatology*, 157(2), 103. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.135059
- [23]. Zhang, Q., Lu, Z., Ying, J., Qiu, Y., Wang, P., Xu, Z., ... & Li, Y. (2026). Nonstationary agricultural drought risk under compound meteorological drought and hot conditions. *Journal of Hydrology*, 135059. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2026.135059>

Integrated Drought Monitoring in the Minab Esteghlal Dam Basin through Copula-Based Modeling of the Interdependence among Precipitation, Soil Moisture, and Surface Runoff (Research Paper)

1- Elham Hemmati Golsefidi, PhD student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2- Yahya Ismailpour, Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3- Omolbanin Bazrafshan*, Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

4- Hossein Zamani, Assistant Professor, Department of Statistics, Faculty of Basic Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

5- Mehdi Biniiaz, Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Received: 24 Mar. 2026

Accepted: 20 Jun. 2026

Abstract

Drought is one of the most complex and costly natural hazards, particularly in arid and semi-arid regions, affecting different components of the hydrological cycle such as precipitation, runoff, and soil moisture. In this study, a comprehensive multivariate drought index based on copula functions, named the Joint Drought Hydro-Meteorological Index (JDHMI), was developed to monitor meteorological, hydrological, and agricultural droughts simultaneously in the Minab Independence Dam watershed in southern Iran. Monthly precipitation data from 15 rain gauge stations, streamflow data from the Berentin hydrometric station, and satellite-based soil moisture data from the GLDAS dataset during the period 1993–2023 were used. First, the univariate drought indices including SPI-12, SRI-12, and SMDI-12 were calculated. Then, the dependence structure among these variables was modeled using copula functions. The results of marginal distribution fitting indicated that the logistic distribution provided the best fit for precipitation and runoff with AIC values of 630.94 and 563.36, respectively, while the normal distribution was selected for soil moisture with an AIC value of 636.07. Copula analysis showed that the Frank copula performed best in modeling dependence. The Kendall's tau coefficients were estimated as 0.441 for SPI12–SRI12 and 0.567 for SRI12–SMDI12, indicating moderate to strong dependence between these variables. The developed multivariate index demonstrated higher capability in identifying severe and persistent drought events. The maximum drought intensity, duration, and magnitude obtained from the JDHMI were 3.35, 10 months, and 21.4, respectively. Moreover, the correlation of JDHMI with SPI12 and SRI12 was 0.81 and 0.71, respectively, showing strong agreement with conventional indices. Principal component analysis also revealed that the first component explained about 92.06% of the total variance. Overall, the proposed copula-based index provides a more comprehensive representation of drought conditions by integrating precipitation, runoff, and soil moisture information, and can serve as an effective tool for drought monitoring and water resources management in arid regions.

Keywords: Multivariate drought, Copula functions, JDHMI index, Soil moisture, Minab watershed.