

پایش یکپارچه خشک‌سالی‌های هوا-آبشناسی در حوزه آبریز کسلیان (استان مازندران)

مجید چراغعلی‌زاده^۱، آرزو نازی قمشلو^۲ و جواد بذرافشان^{۳*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(دریافت: ۹۶/۸/۷، پذیرش نهایی: ۹۶/۱۱/۱۷)

چکیده

در مطالعه حاضر، پایش یکپارچه وضعیت خشک‌سالی هواشناسی (بر مبنای متغیرهای دما و بارش) و خشک‌سالی آب‌شناسی (بر مبنای جریان رودخانه) در حوزه کسلیان مازندران مورد توجه قرار گرفت. هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه یک شاخص خشک‌سالی ترکیبی با استفاده از روش چند متغیره تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) در حوزه مورد بررسی است. برای پایش خشک‌سالی هواشناسی از شاخص‌های بارش استاندارد (SPI) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) و برای پایش خشک‌سالی آب‌شناسی از شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI) استفاده شد. داده‌های مورد نیاز این مطالعه از ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌شناسی مستقر در حوزه کسلیان برای یک دوره آماری ۴۳ ساله (۱۳۴۹-۵۰ تا ۱۳۹۱-۹۲) گردآوری شد. پس از انجام کنترل‌های مقدماتی روی کیفیت داده‌ها، شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی در چهار پنجره زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ از ابتدای سال آبی محاسبه شد. در مرحله بعد، دو شاخص ترکیبی برای ارزیابی خشک‌سالی‌های هوا-آب‌شناسی، یکی SPI-SDI و دیگری SPEI-SDI با استفاده از روش PCA ساخته شد. شاخص ترکیبی که فرم استاندارد شده نخستین مؤلفه اصلی شاخص‌های مورد استفاده در ترکیب است، به‌طور جداگانه برای ایستگاه‌های آب‌شناسی ولکن و شیرگاه واقع در بالادست و پایین‌دست حوزه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در شناسایی سال‌های خشک، در بالادست حوزه، ترکیب SPEI-SDI به دلیل ساختار همبستگی قوی‌تر و توجه به درصد تغییرپذیری بیشتر توسط اولین مؤلفه اصلی آنها (۷۵/۵ تا ۸۷/۹ درصد) موفقیت بیشتری نسبت به ترکیب SPI-SDI دارد. این در حالی است که بین دو ترکیب در پایش خشک‌سالی‌ها در پایین‌دست تفاوت چندانی وجود ندارد. همچنین، در دوره‌های خشک ممتد، شاخص ترکیبی یک ماه زودتر از شاخص‌های منفرد وضعیت خشک‌سالی را اعلام می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بارش، جریان رودخانه، شاخص‌های ترکیبی، روش چند متغیره؛ تبخیر و تعرق.

۱. مقدمه

بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت رخ می‌دهد. خشک‌سالی آب‌شناسی به مسئله کمبود آب در جریان رودخانه، مخازن و سفره‌های آب زیرزمینی می‌پردازد. خشک‌سالی کشاورزی کمبود رطوبت خاک و در نتیجه افت عملکرد محصول را مورد بررسی قرار می‌دهد (ویلهایت، ۲۰۰۰). اثرات خشک‌سالی از کمبود بارش شروع شده و به تدریج بر روی منابع آب اعم از سطحی و زیر سطحی کشیده می‌شود در نتیجه وقوع خشک‌سالی در مؤلفه‌های مختلف چرخه آب‌شناسی، بخش‌های کشاورزی، شهری و صنعتی دچار مشکل خواهند شد. شاخص‌های خشک‌سالی ابزار کلیدی برای کمی‌سازی تعاریف خشک‌سالی و اجرای برنامه‌های مدیریت

خشک‌سالی عبارت است از شرایط کمبود رطوبت نسبت به حالت نرمال که اساساً به دلیل کمبود بارندگی در یک دوره زمانی ممتد در یک منطقه رخ می‌دهد. این تعریفی است که به نظر می‌رسد متخصصان مختلف بر آن توافق دارند (گاتمن، ۱۹۹۸؛ مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳). انواع خشک‌سالی‌ها به‌طور کلی، در چهار گروه هواشناسی، آب‌شناسی، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم می‌شوند و سه خشک‌سالی هواشناسی، آب‌شناسی و کشاورزی به مسئله کمبود آب در چرخه آب‌شناسی می‌پردازند (جامعه هواشناسی آمریکا، ۱۹۹۷؛ راسموسون و همکاران، ۱۹۹۳؛ وایت و والکات، ۲۰۰۹؛ ویلهایت و گلانتز، ۱۹۸۵). خشک‌سالی هواشناسی به علت کمبود

خشک‌سالی به‌شمار می‌روند (وایت و والکات، ۲۰۰۹). شاخص‌های خشک‌سالی را می‌توان بر حسب تعداد متغیرهای هواشناسی - آب‌شناسی به‌کار گرفته شده به سه گروه یک متغیره مانند شاخص بارش استاندارد (SPI) (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳)؛ شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI) (نالباتیس، ۲۰۰۸)؛ نالباتیس و تساکریس، ۲۰۰۹)؛ دو متغیره مانند شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) (ویسنه سرانو و همکاران، ۲۰۱۰) و چند متغیره مانند شاخص خشک‌سالی جامع (ADI) (کیانتاش و دراکاپ، ۲۰۰۴)؛ شاخص کمبود توأم (JDI) (کائو و گویندراجو، ۲۰۱۰) دسته‌بندی کرد. از دیدگاهی، شاخص‌های خشک‌سالی را می‌توان به دو گروه منفرد و ترکیبی تقسیم نمود. شاخص‌های منفرد قادر هستند تنها وضعیت نوع معینی از خشک‌سالی را تعیین کنند، حال آنکه شاخص‌های ترکیبی وضعیت کلی منطقه را از نظر وقوع دو یا چند نوع خشک‌سالی تعیین می‌کنند (کائو و گویندراجو، ۲۰۱۰)؛ بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۵). به‌طور مثال، شاخص SPI یک شاخص منفرد است که تنها به خشک‌سالی هواشناسی می‌پردازد، درحالی‌که شاخص ADI، خشک‌سالی‌های چرخه آب‌شناسی را به‌طور یکپارچه بررسی می‌کند. منظور از وضعیت کلی، برهم‌کنش اثرات منابع آبی مختلف است که انتظار می‌رود نتیجه آن در بخش‌های مختلف اکوسیستم ظاهر شود.

امروزه محققان خشک‌سالی استفاده از یک شاخص را در پایش خشک‌سالی کافی نمی‌دانند و گرایش به‌سوی استفاده از چندین شاخص دو چندان شده است، زیرا یک شاخص خشک‌سالی به‌تنهایی قادر به توصیف کامل پیچیدگی‌های خشک‌سالی و اثرات آن نیست و هر یک از شاخص‌ها می‌توانند اطلاعات متنوعی از وضعیت خشک‌سالی فراهم کنند (هائو و آقاچوکچک، ۲۰۱۳)؛ هائو و سینگ، ۲۰۱۵). مشکل عمده در استفاده هم‌زمان از چند شاخص، تنوع اعدادی است که در مورد وضعیت خشک‌سالی اعلام می‌کنند. لذا، ممکن است ارزیابی

وضعیت کلی خشک‌سالی را با مشکل مواجه کنند. مسئله اساسی در این پژوهش آن است که چگونه می‌توان شاخص‌های خشک‌سالی را به‌صورت توأم توسط یک شاخص و در قالب یک عدد در هر واحد زمانی بیان کرد؟ روش‌های مختلفی برای ساخت شاخص‌های ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان تحلیل مؤلفه‌های اصلی (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۴)؛ کیانتاش و دراکاپ، ۲۰۰۴)؛ تابع همبند (کائو و گویندراجو، ۲۰۱۰) اشاره کرد. تحقیقات گوناگونی در زمینه تلفیق شاخص‌های منفرد و ارائه یک شاخص ترکیبی انجام شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

اولین شاخص چند متغیره تحت عنوان شاخص ADI ارائه شد. شاخص ADI با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی و تکیه بر مؤلفه اصلی اول تصویری از تغییرات در متغیرهای چرخه آب‌شناسی (بارش، تبخیر و تعرق، جریان رودخانه، ذخیره مخزن و برف پشته) ارائه می‌دهد و از نظر پایش خشک‌سالی‌های تاریخی در سه ناحیه آب‌وهوایی کالیفرنیا مورد ارزیابی قرار گرفت (کیانتاش و دراکاپ، ۲۰۰۴). شاخص JDI برای بررسی یکپارچه خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناسی در ایالت ایندیانا آمریکا ارائه شد. نتایج نشان داد که شاخص JDI توان لازم برای مدل‌سازی ساختار پیچیده خشک‌سالی را دارد. دامنه کاربرد شاخص‌های ترکیبی به ارزیابی خشک‌سالی کشاورزی نیز کشیده شد و شاخص خشک‌سالی ترکیبی (CDI) ارائه گردید. شاخص CDI از ترکیب شاخص SPI، بی‌هنجاری رطوبت خاک و بی‌هنجاری کسری از جذب تابش فعال فتوسنتزی در گیاهان (fAPAR) به دست آمد (اسپولکر و همکاران، ۲۰۱۲). شاخص چندمتغیره خشک‌سالی استاندارد (MSDI) بر اساس توابع همبند پیشنهاد شد. شاخص مذکور از ترکیب شاخص SPI و شاخص رطوبت خاک استاندارد (SSI) به دست می‌آید. نتایج کاربرد شاخص مذکور در چندین بخش از کالیفرنیا شمالی نشان داد که شاخص MSDI شروع خشک‌سالی را همانند شاخص

کالیفرنیا و کارولینای شمالی ارائه داد. شاخص مذکور ترکیبی از شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص رطوبت خاک استاندارد (SSI) است. نتایج نشان داد که MSDI از نظر تعیین شروع خشک‌سالی شبیه SPI و از نظر تداوم خشک‌سالی شبیه SSI عمل می‌کند. راد و همکاران (۲۰۱۷) یک شاخص ترکیبی مبتنی بر توابع همبند برای پایش یکپارچه خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناسی در حوضه کرخه ارائه کردند. این شاخص ترکیبی از شاخص SPI برای پایش خشک‌سالی هواشناسی و SDI برای پایش خشک‌سالی آب‌شناسی است. آنها نتیجه گرفتند که شاخص ترکیبی توانایی تعیین شروع خشک‌سالی و تداوم آن را دارد.

برای ترکیب شاخص‌ها و ارائه یک شاخص واحد باید یک رابطه علی- معلولی بین خشک‌سالی‌ها وجود داشته باشد. این وضعیت بین خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناسی صدق می‌کند، زیرا کاهش یا افزایش بارش می‌تواند به صورت کاهش یا افزایش رواناب در جریان رودخانه ظاهر شود. در همین رابطه و با مثالی دقیق‌تر، اگر جریان رودخانه در حالت خشک‌سالی شدید و بارش در حالت نزدیک نرمال باشد، وضعیت کلی خشک‌سالی منطقه، نه در شرایط هواشناسی و نه در شرایط جریان رودخانه جستجو می‌شود بلکه در شرایطی بین دو حالت ذکر شده اتفاق می‌افتد زیرا شرایط نزدیک نرمال بارش تا حدودی خشک‌سالی آب‌شناسی را تعدیل می‌کند. راه‌حل دقیق برای بررسی خشک‌سالی کلی، استفاده از مدل‌هایی است که فیزیک خشک‌سالی و موجودی آب را مطالعه می‌کنند، اما در روش‌های آماری، وضعیت کلی خشک‌سالی در ساختار وابستگی سیستم (در اینجا شامل دو متغیر بارش و جریان رودخانه) یا ماتریس وابستگی سیستم جستجو می‌شود. یکی از روش‌های آماری برای بررسی ماتریس وابستگی، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. مطالعه حاضر بر آن است که با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، که برتری آن بر روش تابع همبند به‌ویژه از نظر پایش خشک‌سالی‌های حدی در ایران نشان

SPI و طول دوره خشک‌سالی را همانند شاخص SSI ارزیابی می‌کند. همچنین، زمانی که هر دو عامل بارش و رطوبت خاک مقدارشان کم باشد شاخص MSDI خشک‌سالی با درجه سختی بیشتر را گزارش می‌کند (هائو و سینگ، ۲۰۱۵). قابلیت شاخص JDI برای پایش خشک‌سالی در شمال غربی ایران ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که شاخص JDI خشک‌سالی‌های در حال ظهور و طولانی‌مدت را بهتر از SPI تشخیص می‌دهد (میرعباسی و همکاران، ۲۰۱۳). برای ترکیب اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت کمبود آب در مقیاس‌های زمانی چندگانه، شاخص بارش استاندارد چند متغیره (MSPI) ارائه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد، هنگامی که مقیاس زمانی شاخص بارندگی استاندارد (SPI) برای محققان مشخص نباشد، می‌توان از MSPI استفاده کرد. نتایج کاربرد شاخص مذکور در اقلیم‌های مدیترانه‌ای بهتر از اقلیم‌های خشک بود (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۴). عبدی و همکاران (۲۰۱۷) از شاخص MSPI و روش‌های تحلیل خوشه‌ای در شناسایی مناطق همگن از نظر خشک‌سالی در ایران استفاده کردند. عربزاده و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مفهوم MSPI یک شاخص ترکیبی منطقه‌ای برای پایش خشک‌سالی‌های آب‌شناسی در حوضه سفیدرود معرفی کردند. بذرافشان و همکاران (۲۰۱۵) شاخص‌های چند متغیره کمبود توأم JDI تجربی و MSPI را در شرایط اقلیمی ایران مقایسه کردند. نتایج نشان داد که MSPI توانایی تشخیص اوج شدت خشک‌سالی را برخلاف JDI دارد. مقایسه شاخص کمبود توأم در دو حالت تجربی و نظری تحت شرایط اقلیمی ایران نشان داد که محاسبه شاخص کمبود توأم نظری بر مبنای تابع همبند تی- استیودنت در تمام ایستگاه‌ها نتایج بهتری نسبت به دیگر توابع همبند عاید می‌سازد (هاشمی‌نسب و همکاران، ۱۳۹۴). هائو و آفاکوچک (۲۰۱۳) با استفاده از مفهوم تابع همبند، شاخص استاندارد چند متغیره خشک‌سالی (MSDI) را برای پایش یکپارچه خشک‌سالی‌های هواشناسی و کشاورزی در ایالت‌های

واقع شده است. این حوضه در محدوده ارتفاعی ۲۲۰ تا ۳۲۳۸ متر از سطح دریا قرار گرفته است. حوضه کسلیان کمتر تحت تأثیر عوامل غیرطبیعی نظیر کشاورزی و انسانی قرار گرفته است و بارندگی در تمام ماه‌های سال در این حوضه رخ می‌دهد (زارع و همکاران، ۲۰۱۷). داده‌های مورد نیاز این تحقیق شامل بارندگی ماهانه، دمای متوسط ماهانه، دبی ماهانه جریان رودخانه از ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی واقع در حوضه کسلیان از سازمان تحقیقات منابع آب کشور دریافت شد. این داده‌ها یک دوره آماری مشترک ۴۳ ساله (۵۰-۱۳۴۹ تا ۹۲-۱۳۹۱) را پوشش می‌دهند. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی قابل دسترس در حوضه کسلیان در جدول ۱ آمده است.

داده شده است (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۵)، به پایش یکپارچه وضعیت خشک‌سالی هوا-آب‌شناسی در حوضه کسلیان بپردازد. بنابراین، هدف اصلی مقاله حاضر ارائه شاخصی تلفیقی از خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناسی در حوضه مورد مطالعه است.

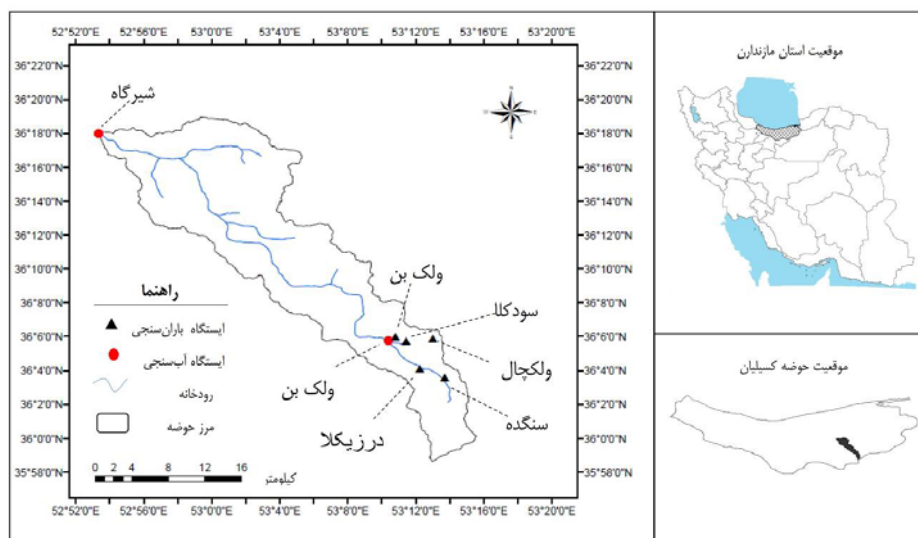
۲. مواد و روش

۲-۱. منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد نیاز

در مطالعه حاضر از ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی حوضه کسلیان استفاده شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. حوضه کسلیان با مساحت ۳۴۳/۴ کیلومترمربع، بارندگی متوسط سالانه ۸۱۳/۸ میلی‌متر، اقلیم نیمه‌مرطوب تا مرطوب و با پوشش غالب جنگلی در استان مازندران

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی (وزارت نیرو) در حوضه کسلیان.

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	بارش (mm)	دمای هوا (°C)	میانگین سالانه ۴۳ ساله (۵۰-۱۳۴۹ تا ۹۲-۱۳۹۱)	
				جریان رودخانه (m ³ .s ⁻¹)	ارتفاع از سطح دریا (m)
درزیکلا	باران‌سنجی	۶۵۰/۲۶	۱۱/۴۵	-	۱۳۰۰
سنگده	باران‌سنجی	۸۴۸/۰۹	-	-	۱۳۳۷
سودکلا	باران‌سنجی	۵۱۹/۲۴	-	-	۱۲۵۰
ولیک‌بن	باران‌سنجی	۶۷۸/۰۹	-	-	۱۱۰۰
ولیک‌چال	باران‌سنجی	۸۵۴/۲۴	-	-	۱۵۰۰
ولک‌بن	آب‌سنجی - بالادست	-	-	۰/۴۵۲	۱۱۰۶
شیرگاه	آب‌سنجی - پایین‌دست	-	-	۰/۲۸۳	۲۲۰



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی در حوضه کسلیان.

۲-۲. روش پژوهش

در تحقیق حاضر، ابتدا کیفیت داده‌های گردآوری شده از ایستگاه‌های مستقر در حوضه کسپلیان از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، با استفاده از روش تحلیل همبستگی، مناسب‌ترین ایستگاه که همبستگی بالایی با جریان رودخانه در بالادست و پایین‌دست حوضه داشته باشد، انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه باران‌سنجی منتخب و شاخص خشک‌سالی آب‌شناسی SDI در ایستگاه‌های آب‌سنجی ولک بن و شیرگاه واقع در بالادست و پایین‌دست حوضه محاسبه می‌شود. در نهایت، با استفاده از شاخص‌های منفرد خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی در بالادست و پایین‌دست حوضه کسپلیان و به کمک روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شاخص‌های ترکیبی خشک‌سالی برای پایش یکپارچه خشک‌سالی‌های هوا-آبشناسی، ساخته شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند. جزئیات محاسبات در ادامه ارائه می‌شوند.

۲-۲-۱. کنترل کیفی داده‌ها

در مطالعه حاضر، کیفیت داده‌های گردآوری شده با استفاده از روش‌های آماری در سطح اطمینان پنج درصد کنترل گردید. فرآیند کنترل کیفی با تعیین خلأهای آماری ایستگاه‌ها آغاز و پس از شناسایی آمار قابل بازسازی، داده‌های ثبت نشده با استفاده از روش نسبت نرمال تکمیل شد (یانگ، ۱۹۹۲). در مرحله بعد، احتمال وجود داده‌های پرت با استفاده از روش دامنه‌ی میان‌چارکی تعدیل شده مورد بررسی قرار گرفت (هویرت و وندرویرن، ۲۰۰۸). به‌علاوه، آزمون‌هایی مانند آزمون پتیت برای تحلیل همگنی داده‌ها (پتیت، ۱۹۷۹)، آزمون گردش والد-ولفویتز برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (والد و ولفویتز، ۱۹۴۰)، آزمون هارست برای بررسی کفایت طول دوره آماری منتخب (هارست، ۱۹۵۱)، و در نهایت، آزمون مان-کندال (مان، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵) و

برآوردگر شیب سن (سن، ۱۹۶۸) برای تحلیل روند سری‌های زمانی انجام شدند.

۲-۲-۲. شاخص‌های خشک‌سالی منفرد

در مطالعه حاضر، برای پایش خشک‌سالی هواشناسی دو شاخص خشک‌سالی منفرد شامل شاخص SPI و شاخص SPEI و برای پایش خشک‌سالی آب‌شناسی از شاخص SDI استفاده شد. علیرغم متفاوت بودن متغیرهای ورودی مورد نیاز برای محاسبه شاخص‌های مذکور، همگی از روشی یکسان برای کمی‌سازی خشک‌سالی استفاده می‌کنند. در ادامه، به‌طور مختصر، مراحل محاسبه شاخص‌ها ارائه می‌شود:

تجمع داده‌ها در پنجره زمانی متحرک معین: در مورد شاخص SPI مجموع بارش ماهانه و برای شاخص SDI مجموع حجم ماهانه جریان رودخانه در پنجره زمانی معین محاسبه می‌شود. شاخص SPEI بر مبنای اختلاف بارش با تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می‌شود. در این پژوهش تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش تورنت‌وایت برآورد می‌شود. تورنت‌وایت (۱۹۴۸) یک رابطه بین متوسط ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل و دما به‌صورت زیر معرفی کرد:

$$PET = 16.2 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (1)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.154} \quad (2)$$

$$a = (0.675I^3 - 77.1I^2 + 17920I + 492390) \times 10^{-6} \quad (3)$$

که در آن T ، دما ($^{\circ}C$)، I ، شاخص حرارتی سالانه؛ PET، تبخیر و تعرق ماهانه (mm)؛ a ، شاخص تجربی است. در روش تورنت‌وایت فرض شده که طول روز ۱۲ ساعت و تعداد روزهای ماه ۳۰ روز است؛ بنابراین تبخیر و تعرق پتانسیل باید برای منطقه مورد مطالعاتی واسنجی شود. برای این منظور با توجه به تعداد روز و متوسط طول روز هر ماه سال، تبخیر و تعرق پتانسیل برای منطقه مورد مطالعه واسنجی می‌شود که به‌صورت زیر بیان شده است:

حجم جریان رودخانه یا اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل باشد، به ترتیب شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص خشک سالی جریان رودخانه (SDI)، شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) است. طبقه بندی و شدت خشک سالی شاخص های SPI، SDI و SPEI در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای رعایت ایجاز، خواننده می تواند محاسبات شاخص های SPI، SDI و SPEI را در منابع مک کی و همکاران (۱۹۹۳)، نالباتیس (۲۰۰۸)، نالباتیس و تساکریس (۲۰۰۹) و ویسته سرانو و همکاران (۲۰۱۰) مطالعه کند.

۲-۳-۲. شاخص ترکیبی خشک سالی

روش مورد استفاده در این تحقیق برای ساخت شاخص ترکیبی، تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) است. روش PCA یا توابع متعامد تجربی (EOF) که برخی مواقع به اشتباه تحلیل عاملی (FA) نامیده می شود، ترکیبات خطی از K متغیر اولیه به صورت رابطه زیر محاسبه می شود (ویلکس، ۲۰۱۱).

$$PC_i = E_i^T X = \sum_{k=1}^K e_{ki} X_k, \quad k=1,2,3,\dots,K \quad (8)$$

که در آن، PC_i مؤلفه اصلی i ام، E_i^T بردار-ویژه ویژه i ام، X_k متغیر اولیه k ام و e_{ki} عنصر k ام بردار-ویژه i ام است. این ترکیبات خطی حاصل از مؤلفه های اصلی اولاً: بر هم عمود و مستقل از یکدیگرند، ثانیاً: تعداد آنها می تواند حداکثر به اندازه تعداد متغیرهای اولیه باشد، و ثالثاً: آن چنان استخراج می شوند که اولین مؤلفه اصلی (PC_1) بتواند درصد زیادی از واریانس K متغیر اصلی را توجیه کند (شارما، ۱۹۹۶). روش PCA هنگامی مفید است که همبستگی بین متغیرهای اصلی زیاد باشد. این وضعیت سبب می شود که اولین مؤلفه اصلی بتواند بخش زیادی از واریانس موجود در متغیرهای اولیه را توجیه کند (ویلکس، ۲۰۱۱). تشکیل ماتریس ضرایب همبستگی بین متغیرهای اولیه، پیش نیاز تحلیل مؤلفه های اصلی است. با

$$PET_m = PET \left(\frac{\theta}{30} \right) \left(\frac{h}{12} \right) \quad (4)$$

که در آن θ ، تعداد روز ماه؛ h ، متوسط طول روز ماهانه (hr)؛ PET_m ، تبخیر و تعرق تعدیل شده (mm) شده است. برای محاسبه متوسط طول روز ماهانه باید میانگین طول روز برای هر ماه محاسبه شود، برای این منظور محاسبه طول روز (LD) برای یک سال به صورت زیر بیان می شود.

$$\delta_i = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} i - 1.39 \right), \quad i=1,2,3,\dots,365 \quad (5)$$

$$\omega_s = \text{Arc cos}(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad (6)$$

$$LD = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (7)$$

که در آن δ زاویه میل خورشیدی (rad)؛ ω_s ، زاویه ساعتی خورشید (rad)؛ φ ، عرض جغرافیایی (rad)؛ i شماره روز از اول ژانویه (۱ تا ۳۶۵) و LD طول روز (hr) است.

محاسبه شاخص های منفرد خشک سالی: برای سهولت در بیان محاسبه شاخص ها، در اینجا، سری زمانی تجمیع در پنجره زمانی معین برای هر سه شاخص مذکور را سری X می نامیم. ذکر این نکته لازم است که در این مطالعه، محاسبات شاخص ها در چهار پنجره ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه که به ترتیب معرف ماه های مهر تا آذر به عنوان فصل پاییز، مهر تا اسفند به عنوان فصل های پاییز و زمستان، مهر تا خرداد به عنوان فصل های پاییز، زمستان و بهار، مهر تا شهریور به عنوان سال آبی، انجام می شود تا تصویر متحرکی از وضعیت خشک سالی با دور شدن از ابتدای سال آبی فراهم شود. مراحل محاسبه شاخص های خشک سالی به شرح زیر است.

برازش توزیع احتمال مناسب بر سری X : در مطالعه حاضر، برازش ۴۹ توزیع احتمال موجود در نرم افزار EasyFit بر سری X مورد ارزیابی قرار گرفت.

تبدیل هم احتمال سری X از توزیع احتمال مناسب به توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک: نتیجه این تبدیل بسته به نوع سری X که می تواند بارش،

دارای میانگین صفر و واریانس یک هستند، PC_1 از چنین ویژگی برخوردار نیست (کیانتاش و دراکاپ، ۲۰۰۴). بنابراین، لازم است سری زمانی PC_1 نسبت به میانگین و انحراف معیار مقیاس‌های مختلف زمانی استاندارد شود که به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$Z_{1ym} = \frac{PC_{1ym} - \overline{PC_{1m}}}{SD_{1m}} \approx \frac{PC_{1ym}}{SD_{1m}} \quad (9)$$

که در آن، Z_{1ym} : مقدار استاندارد شده PC_1 در سال ym و پنجره زمانی m ام، $\overline{PC_{1m}}$ میانگین PC_1 در پنجره زمانی m ام، SD_{1m} : انحراف معیار PC_1 در پنجره زمانی m ام می‌باشد. Z_{1ym} همان شاخص ترکیبی خشک‌سالی (CDI) است که ممکن است از ترکیب شاخص‌های SPI-SDI و SDI-SPEI به دست آید. مقدار $\overline{PC_{1m}}$ به لحاظ آماری بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است، از این رو، می‌توان از آن در صورت کسر معادله (۲) صرف‌نظر نمود (کیانتاش و دراکاپ، ۲۰۰۴). طبقات مختلف شاخص ترکیبی خشک‌سالی (CDI) همانند SPI است که در جدول ۲ آورده شده است.

تشکیل این ماتریس، مقدار- ویژه‌ها و بردار- ویژه متناظر با هر مقدار- ویژه محاسبه می‌شود. عناصر بردار- ویژه متناظر با بزرگ‌ترین مقدار- ویژه، در واقع، همان ضرایب وزنی اولین مؤلفه اصلی (PC_1) به شمار می‌روند. ضرایب وزنی دومین مؤلفه اصلی (PC_2)، عناصر بردار- ویژه متناظر با دومین مقدار- ویژه بزرگ است و الی آخر.

در مطالعه حاضر، برای پایش یکپارچه خشک‌سالی هوا-آبشناسی، ترکیبی از شاخص‌های منفرد خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI و شاخص خشک‌سالی آب‌شناسی SDI مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، مؤلفه اصلی اول (PC_1) شاخص‌های SPI-SDI و SDI-SPEI محاسبه شد. PC_1 ترکیبی خطی از K متغیر اولیه است که می‌تواند بیشترین درصد تغییرپذیری در K متغیر اولیه را توضیح دهد. در مطالعه حاضر تعداد متغیر اولیه برابر با دو است. به دلیل خصلت جبری PC_1 ، مقادیر آن نیز بین سال‌ها و مکان‌های مختلف قابل مقایسه نیست، یعنی بر خلاف شاخص‌هایی مانند SPI، SPEI یا SDI که

جدول ۲. حدود احتمال و مقادیر SPI برای طبقات مختلف شدت خشک‌سالی (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳). این طبقه‌بندی برای SDI، SPEI و CDI نیز استفاده می‌شود.

وضعیت	حدود طبقات SPI	حدود احتمال
ترسالی استثنائی	مساوی یا بزرگ‌تر از +۲	مساوی یا بزرگ‌تر از ۹۷/۷ درصد
ترسالی شدید	+۱/۵ تا +۲	۹۳/۳ تا ۹۷/۷ درصد
ترسالی متوسط	+۱ تا +۱/۵	۸۴/۱ تا ۹۳/۳ درصد
نرمال	+۱ تا -۱	۱۵/۹ تا ۸۴/۱ درصد
خشک‌سالی متوسط	-۱ تا -۱/۵	۶/۷ تا ۱۵/۹ درصد
خشک‌سالی شدید	-۱/۵ تا -۲	۲/۳ تا ۶/۷ درصد
خشک‌سالی استثنائی	مساوی یا کمتر از -۲	مساوی یا کمتر از ۲/۳ درصد

۳. نتایج

قدم اول در ارائه یک شاخص ترکیبی در مطالعه حاضر، انتخاب ایستگاه باران‌سنجی مناسب در حوضه کسلیان است. گرچه تعداد پنج ایستگاه باران‌سنجی در حوضه وجود دارد که همگی در بالادست حوضه قرار گرفته‌اند، اما تنها در ایستگاه درزیکلا علاوه بر داده‌های بارش، دما نیز اندازه‌گیری شده است که امکان محاسبه شاخص‌هایی از خشک‌سالی که علاوه بر بارش به دما نیز نیاز دارند را فراهم می‌کند. نتایج تحلیل همبستگی این ایستگاه با ایستگاه‌های مجاور نشان داد که همبستگی بین بارش ایستگاه درزیکلا با بارش ایستگاه‌های مجاور در محدوده ۰/۵۳۴ و ۰/۸۴۶ بوده و در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار هستند. همچنین، بین داده‌های بارش درزیکلا و ایستگاه آب‌سنجی ولک‌بن در بالادست و شیرگاه در پایین‌دست حوضه به ترتیب همبستگی‌های ۰/۶۸۵ و ۰/۵۴۸ وجود دارد که در سطح ۵ درصد معنی‌دار هستند؛ بنابراین، ایستگاه درزیکلا به عنوان ایستگاه مناسب برای تحلیل خشک‌سالی‌های هواشناسی در حوضه معرفی شد. دو ایستگاه ولک‌بن و شیرگاه به ترتیب در

بالادست و پایین‌دست حوضه برای تحلیل خشک‌سالی‌های آب‌شناسی مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل‌های اولیه بر روی سری‌های زمانی بارش، دمای هوا و دبی جریان در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور، ملاحظه می‌شود که فرضیه تصادفی بودن داده‌ها بر مبنای آزمون گردش در ایستگاه‌های مذکور در سطح ۵ درصد رد نمی‌شود. همچنین، آزمون پتیت وجود پرش در داده‌ها را در سطح ۵ درصد تأیید نکرد و بر مبنای آزمون مان-کندال فقط داده‌های دما در ایستگاه درزیکلا دارای روند مثبت معنی‌دار است. مقادیر آزمون هارست بیشتر از ۰/۵ است که بیانگر طول دوره آماری مناسب برای انجام این مطالعه است و سری‌های زمانی دارای حافظه بلندمدت هستند.

پس از بررسی‌های مقدماتی داده‌ها، شاخص‌های خشک‌سالی منفرد هواشناسی شامل SPI و SPEI در ایستگاه درزیکلا و شاخص خشک‌سالی آب‌شناسی SDI در ایستگاه‌های آب‌سنجی ولک‌بن و شیرگاه واقع در بالادست و پایین‌دست حوضه کسلیان محاسبه شدند.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های آماری سری‌های زمانی بارش و دبی در ایستگاه‌های منتخب حوضه کسلیان. (**): سطح معنی‌داری ۱ درصد، *: سطح معنی‌داری ۵ درصد، ns: عدم معنی‌داری)

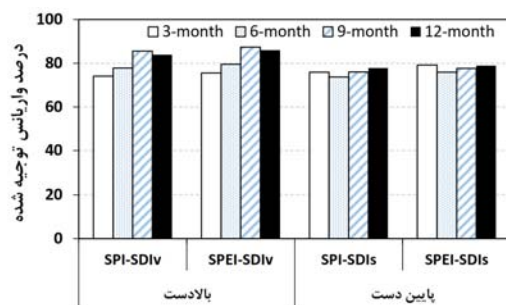
ایستگاه	پارامتر	آماره گردش	آماره هارست	آماره پتیت	آماره من-کندال
درزیکلا	بارش	ns ۰/۶۲	۰/۵۴	ns ۷۸	ns ۰/۲۶
درزیکلا	دما	ns -۰/۳۱	۰/۷۹	ns ۲۲۳	۲/۵۱**
سنگده	بارش	ns ۰/۵۲	۰/۵۲	ns ۹۰	ns ۰/۶۱
سودکلا	بارش	ns -۱/۲۵	۰/۶۲	ns ۱۶۱	ns -۱/۳۹
ولیک‌بن	بارش	ns ۰/۴۳	۰/۴۳	ns ۷۰	ns ۰/۰۰
ولیک‌چال	بارش	ns -۰/۶۳	۰/۷۹	ns ۱۸۰	ns ۰/۴۷
ولک‌بن	جریان رودخانه	ns -۰/۳۳	۰/۵۹	ns ۱۶۸	ns -۱/۲۶
شیرگاه	جریان رودخانه	ns ۰/۳۱	۰/۶۳	ns ۹۲	ns -۰/۰۲

محاسبات شاخص‌ها در چهار پنجره زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه از شروع سال آبی انجام شد. مسئله اصلی در محاسبه شاخص‌های مذکور، برازش توزیع احتمال مناسب بر سری تجمعی در پنجره زمانی معین است. توزیع توصیه شده توسط پژوهشگران برای SPI و SDI توزیع احتمال گاما و برای SPEI توزیع لوگ-لجستیک سه پارامتری است. در پژوهش حاضر، برای محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی مذکور در هر یک از پنجره‌های زمانی، بهترین توزیع احتمال از بین ۴۹ توزیع احتمال موجود در نرم‌افزار EasyFit تعیین شد. نتایج به دست آمده بر اساس آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح اطمینان ۵ درصد نشان داد که توزیع‌های وک‌بی (Wb) و مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) بر دیگر توزیع‌های احتمال برتری دارند. با محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی در مقیاس‌های زمانی مختلف امکان محاسبه ماتریس همبستگی مقاطع آنها و در نتیجه ساخت شاخص ترکیبی فراهم می‌شود. ماتریس همبستگی هر یک از شاخص‌های SPI و SPEI با SDI در بالادست حوضه (SDIv) و SDI در پایین‌دست حوضه (SDIs) در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول مذکور مشاهده می‌شود که با افزایش پنجره زمانی از سه به ۱۲ ماه، همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی و آب‌شناسی در بالادست حوضه افزایش یافته ولی این افزایش در

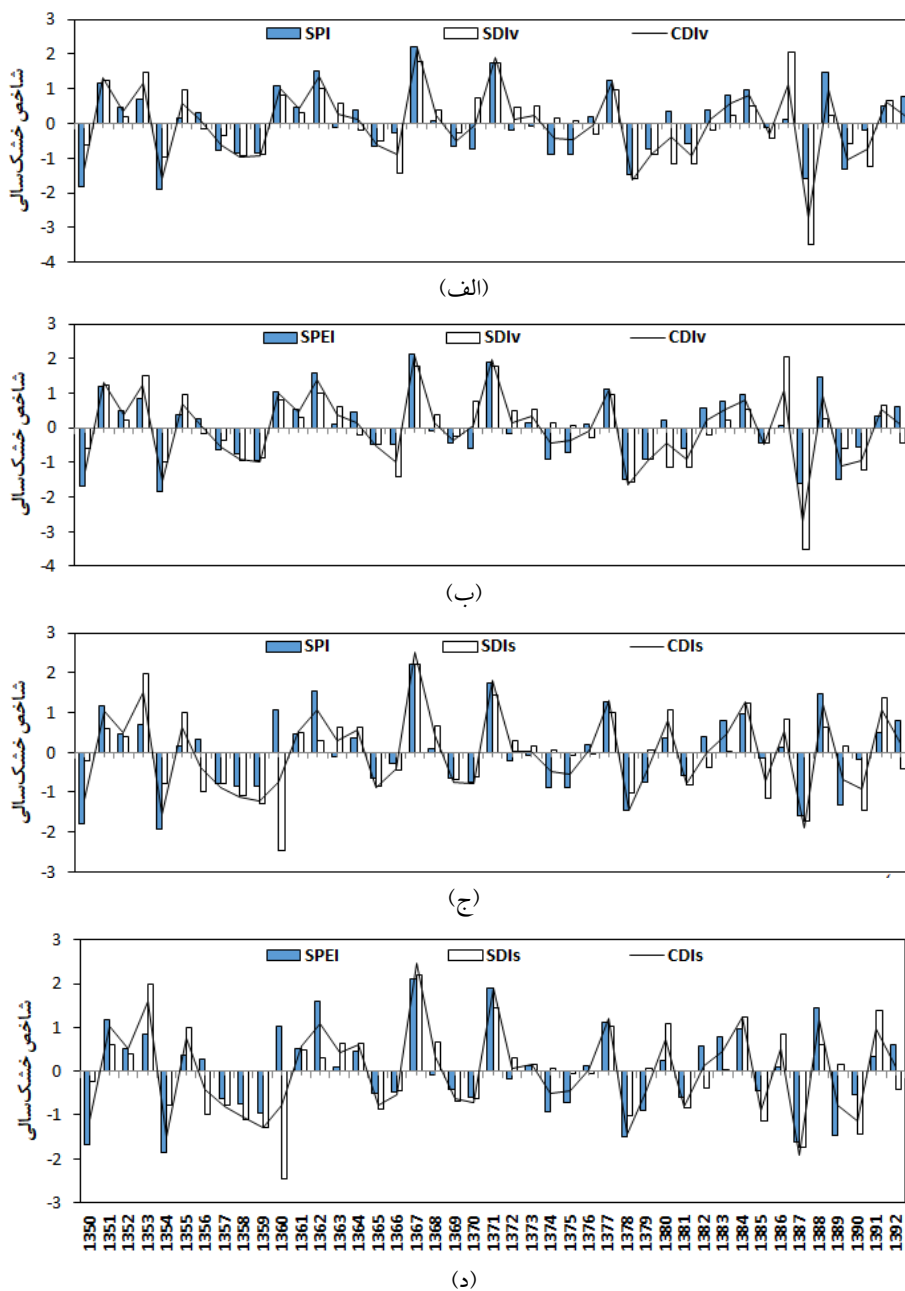
پایین‌دست حوضه چندان مشهود نیست. به علاوه، SDI به‌ویژه در بالادست حوضه، همبستگی بالاتری با SPEI در مقایسه با SPI دارد. ذکر این نکته لازم است که تمام ضرایب همبستگی در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار هستند. این وضعیت امکان استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد متغیرهای اولیه را فراهم می‌کند. در این مطالعه چهار شاخص ترکیبی شامل دو شاخص SPI-SDIv، SPEI-SDIv در بالادست و دو شاخص SDIs، SPEI-SDIs در پایین‌دست حوضه تعریف شد. مؤلفه اصلی نخست هر یک از ترکیب‌های چهارگانه فوق محاسبه شد. در شکل ۲، درصد واریانس توجیه شده توسط مؤلفه اصلی نخست در هر یک از پنجره‌های زمانی نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، PC_1 توانسته است بین ۷۴/۳ تا ۸۷/۹ درصد تغییرات موجود در ترکیبات مختلف را توجیه کند. همچنین، سهم واریانس توجیه شده توسط مؤلفه نخست در مورد ترکیب SPEI-SDI هم در بالادست و هم در پایین‌دست حوضه و در هر چهار پنجره زمانی بیشتر از ترکیب SPI-SDI است. با توجه به جدول ۴ این نتیجه را می‌توان به همبستگی بالاتر SPEI با SDI در مقایسه با همبستگی بین SPI و SDI نسبت داد. نتیجه استانداردسازی مؤلفه نخست هر یک از ترکیب‌های مذکور، یک شاخص خشک‌سالی هوا-آبشناسی است.

جدول ۴. ماتریس همبستگی مقاطع شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه در بالادست و پایین‌دست حوضه کسلیان. (تمام ضرایب همبستگی در سطح یک درصد معنی‌دار هستند.)

شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI)		پنجره زمانی (ماه)	شاخص خشک‌سالی هواشناسی
پایین‌دست (شیرگاه)	بالادست (ولیک بن)		
۰/۵۱۸	۰/۴۸۲	۳	SPI
۰/۴۷۵	۰/۵۵۶	۶	
۰/۵۲۰	۰/۷۱۲	۹	
۰/۵۵۵	۰/۶۷۵	۱۲	
۰/۵۸۴	۰/۵۱۰	۳	SPEI
۰/۵۱۸	۰/۵۹۱	۶	
۰/۵۵۳	۰/۷۴۸	۹	
۰/۵۷۸	۰/۷۱۹	۱۲	



شکل ۲. درصد واریانس توجیه شده توسط مؤلفه اصلی نخست شاخص‌های ترکیبی در بالادست و پایین دست حوضه کسپلیان.

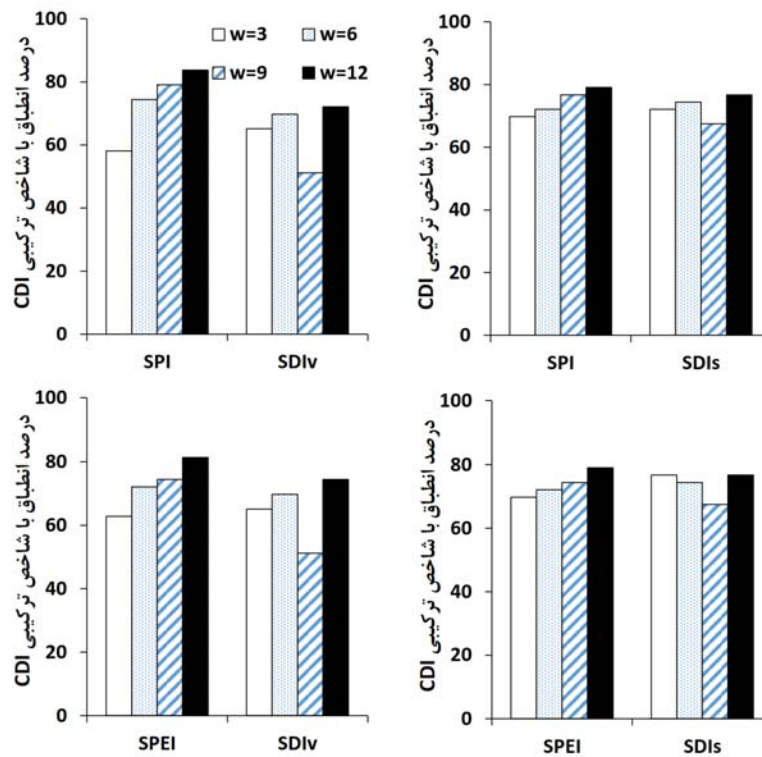


شکل ۳. سری‌های زمانی شاخص‌های ترکیبی و منفرد خشک‌سالی در بالادست (الف و ب) و پایین دست (ج و د) حوضه کسپلیان در پنجره ۱۲ ماهه.

خشک‌سالی را در حوضه اعلام کرده است و همچنین دیرتر از شاخص‌های هواشناسی به خشک‌سالی پایان داده است.

وضعیت هر یک از سال‌های دوره آماری منتخب در حوضه کسلیان به‌وسیله شاخص‌های منفرد خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی و همچنین، شاخص‌های ترکیبی در بالادست و پایین‌دست حوضه از نظر قرار گرفتن در یکی از طبقات جدول ۲ تعیین شد. در شکل ۴ درصد انطباق طبقه‌بندی شاخص‌ها در پنجره‌های زمانی مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل ۴، درصد انطباق SPI و SPEI با شاخص ترکیبی CDI هم در بالادست حوضه و هم در پایین‌دست حوضه با افزایش مقیاس زمانی افزایش می‌یابد. این حالت با قوت کمتری در مورد شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه SDI و CDI برقرار است و حتی در مقیاس ۹ ماهه، هم در بالادست و هم در پایین‌دست حوضه، شرایط معکوس اتفاق می‌افتد و درصد انطباق طبقات کاهش می‌یابد. پنجره زمانی ۹ ماهه دارای نکته ویژه‌ای است. با نگاهی به جدول ۴ می‌توان ملاحظه نمود که در مقیاس ۹ ماهه همبستگی بالایی بین SPI و SDI و همین‌طور SPEI و SDI به‌ویژه در بالادست حوضه برقرار است. بالا بودن همبستگی سبب شده است که طبق شکل ۲ مؤلفه اصلی اول بیشترین درصد تغییرات را در پنجره زمانی ۹ ماهه در بالادست حوضه توجیه کند. در این شرایط انتظار می‌رود که بین شاخص‌های منفرد و ترکیبی در مقیاس ۹ ماهه همبستگی بالایی وجود داشته باشد، که در واقعیت نیز چنین است و مقدار همبستگی بین SDI و شاخص ترکیبی ۰/۹۳ است؛ اما در عمل انطباق خوبی بین SDI و شاخص ترکیبی به دست نیامد. بنابراین، بالا بودن ضریب همبستگی بین شاخص منفرد و شاخص ترکیبی نمی‌تواند دال بر تطابق بهتر شاخص‌ها باشد.

در شکل ۳ شاخص‌های ترکیبی هوا-آبشناسی (CDI) با شاخص‌های منفرد SPI، SPEI و SDI در بالادست و پایین‌دست حوضه کسلیان در پنجره زمانی ۱۲ ماهه (به‌عنوان نمونه) مقایسه شده است. با توجه به شکل مذکور، مشاهده می‌شود که شاخص‌های ترکیبی در بالادست ۳-الف و ۳-ب و پایین‌دست ۳-ج و ۳-د حوضه، تغییرات شاخص‌های منفرد SPI و SPEI را به‌خوبی دنبال می‌کنند و دوره‌های خشک و تر را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کنند. در مواقعی که شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی وضعیت ترسالی یا خشک‌سالی و شاخص خشک‌سالی آب‌شناسی وضعیت ترسالی یا خشک‌سالی را گزارش کرده باشند، شاخص ترکیبی وضعیت متعادل‌تری که در محدوده تغییرات شاخص‌های منفرد قرار می‌گیرد، گزارش می‌کند. برای مثال، با توجه به شکل ۳-د، در سال ۱۳۶۰، SPEI وضعیت ترسالی و SDI وضعیت خشک‌سالی و شاخص ترکیبی CDI حالت خشک‌سالی متوسط را گزارش کرده است یا در سال ۱۳۸۹ از نظر هواشناسی، حوضه در وضعیت کمبود بارش اما از نظر آب‌شناسی در وضعیت نرمال است و شاخص ترکیبی وضعیت خشک‌سالی را گزارش کرده است. این به آن مفهوم است که گرچه بارش در سال ۱۳۸۹ بیشتر از نرمال است اما از دید شاخص ترکیبی هنوز از وضعیت خشک‌سالی خارج نشده است. همچنین، با توجه به همین شکل، یک دوره خشک ممتد از سال ۱۳۵۶ تا ۱۳۶۰ اتفاق افتاده است که توسط شاخص CDI گزارش شده است. در سال ۱۳۵۶، حوضه از نظر هواشناسی در وضعیت بالاتر از نرمال به‌سر می‌برد ولی از نظر جریان رودخانه در وضعیت خشک‌سالی متوسط است. این در حالی است که شاخص ترکیبی خشک‌سالی خفیف را گزارش می‌کند. به‌طور کلی، شاخص ترکیبی در این دوره خشک ۵ ساله (۱۳۵۶ تا ۱۳۶۰) زودتر از شاخص‌های هواشناسی وضعیت



شکل ۴. درصد انطباق طبقه‌بندی شاخص‌های منفرد و ترکیبی خشک‌سالی در بالادست (نمودارهای سمت چپ) و پایین دست (نمودارهای سمت راست) حوضه کسپیلان در پنجره‌های زمانی مختلف.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلفیق خشک‌سالی‌های هوا-آبشناسی در پایین دست و بالادست حوضه کسپیلان با استفاده از تکنیک مؤلفه‌های اصلی مورد توجه قرار گرفت. برای پایش خشک‌سالی هواشناسی از دو شاخص منفرد SPI مبتنی بر بارش و SPEI مبتنی بر بارش و تبخیر و تعرق و برای پایش خشک‌سالی آب‌شناسی از شاخص جریان رودخانه SDI استفاده شد. شاخص تلفیقی مبتنی بر مؤلفه اصلی نخست هر یک از دو ترکیب SPI-SDI و SPEI-SDI در پایین دست و بالادست حوضه کسپیلان در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماه است. نتایج به‌دست آمده در این مطالعه به شرح زیر است:

سهم واریانس توجیه شده توسط مؤلفه نخست در مورد ترکیب SPEI-SDI هم در بالادست و هم در پایین دست

حوضه و در هر چهار پنجره زمانی بیشتر از ترکیب SPI-SDI است. این نتیجه را می‌توان به همبستگی بالاتر SPEI با SDI نسبت داد. واریانس توجیه شده توسط شاخص‌های ترکیبی در همه ترکیب‌ها بیش از ۷۰ درصد بود. در مطالعه کیانتاش و همکاران (۲۰۰۴) این سهم کمتر از ۶۳ درصد و در پژوهش بذرافشان و همکاران (۲۰۱۴) بیش از ۷۴ درصد گزارش شد.

شاخص‌های ترکیبی زودتر از شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی وضعیت خشک‌سالی را در حوضه اعلام نموده و همچنین دیرتر از شاخص‌های هواشناسی به خشک‌سالی پایان می‌دهند. این نتیجه در مطالعات دیگر مانند (بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۴؛ هاشمی‌نسب و همکاران، ۱۳۹۴) که از توابع همبند برای ساخت شاخص ترکیبی استفاده کرده‌اند گزارش نشده است. در مطالعاتی که

توسط نادى (۱۳۹۳) در زمينه رابطه عرض حلقه‌های درختان با خشک‌سالی‌های هواشناسی در چندین سایت نمونه‌برداری از شرق تا غرب جنگل‌های شمال کشور انجام شده است نشان می‌دهد که سال‌های ۱۳۷۸ شمسی (۱۹۹۹ میلادی) و ۱۳۸۷ شمسی (۲۰۰۸ میلادی) خشک‌سالی‌های شدیدی در عرصه‌های جنگلی شمال کشور اتفاق افتاده است. خوشبختانه هم شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هم آب‌شناسی و هم ترکیب آنها چنین خشک‌سالی‌هایی را نشان داده‌اند. کیانتاش و دراکاپ (۲۰۰۴) نیز نتیجه گرفتند که شاخص ترکیبی به‌خوبی می‌تواند خشک‌سالی‌های تاریخی را در کالیفرنیا بازسازی کند.

ترکیب شاخص‌های خشک‌سالی از این نظر که در سرجمع داده‌های مختلف یک‌سری یکتا در اختیار محقق قرار می‌دهد تصمیم‌گیری در مورد وضعیت منطقه را از نظر دوره‌های خشک‌سالی/ترسالی تسهیل می‌کند. برای مثال، اگر پوشش گیاهی حوضه تحت تأثیر هر دوی عوامل هواشناسی و آب‌شناسی باشد استفاده از شاخص ترکیبی هواشناسی-آب‌شناسی ممکن است توجیه مناسب‌تری برای توسعه/زوال پوشش گیاهی باشد تا استفاده از فرم منفرد شاخص‌ها. البته بررسی این مسئله در این تحقیق میسر نشد و می‌تواند به‌عنوان پیشنهادی برای تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

هاشمی‌نسب، آ.، بذرافشان، ج. و قمشلو، آ.، ۱۳۹۴، ارزیابی شاخص خشک‌سالی کمبود توأم تحت شرایط اقلیمی ایران، م. حفاظت منابع آب‌و خاک ایران، ۴ (۳)، ۵۳-۶۴.

نادی، م.، ۱۳۹۳، بازسازی حلقه درختی دوره‌های خشک دو قرن اخیر در چند رویشگاه جنگلی ایران، رساله دکتری، دانشگاه تهران، بهمن ۱۳۹۳.

Abdi, A., Hassanzadeh, Y. and Ouarda, T. B. M. J., 2017, Regional frequency analysis using Growing Neural Gas network, Journal of

توسط راد و همکاران (۲۰۱۷)، هائو و آفاکوچک (۲۰۱۳)، میرعباسی (۲۰۱۳) با استفاده از توابع همبند انجام شده است همگی بر این نکته تأکید کرده‌اند که شاخص ترکیبی توانایی تعیین شروع و تداوم خشک‌سالی را داشته است، نتیجه‌ای که در مطالعه حاضر نیز تأیید شد.

درصد انطباق طبقات SPI و SPEI با شاخص ترکیبی هم در بالادست حوضه و هم در پایین‌دست حوضه با افزایش مقیاس زمانی افزایش می‌یابد. این نتیجه، مشابه نتیجه مطالعه بذرافشان و همکاران (۲۰۱۴) است که دلیل آن همبستگی بالاتر شاخص‌های خشک‌سالی منفرد در مقیاس‌های بزرگ‌تر است. دیگر اینکه، سری‌های زمانی شاخص‌های منفرد در مقیاس‌های بزرگ‌تر نوسان‌های کمتری دارد یا هموارتر است. همبستگی‌های بالا بین شاخص‌های ترکیبی و منفرد در مطالعه راد و همکاران (۲۰۱۷) و کائو و گویندراجو (۲۰۱۰) نیز گزارش شده است.

در پژوهش حاضر، شاخص ترکیبی CDI همبستگی معنی‌داری در سطح اطمینان ۵ درصد با ترکیب‌های سازنده خود داشته است. این امر نشان‌دهنده همسویی شدت شاخص ترکیبی با شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناسی است. در مواقعی که حوضه از نظر هواشناسی (آب‌شناسی) در طبقه نرمال (خشک‌سالی شدید) و از نظر آب‌شناسی (هواشناسی) در وضعیت خشک‌سالی شدید (نرمال) باشد شاخص ترکیبی وضعیت متعادل‌تری را گزارش می‌کند. این بدان معنی است که شرایط نرمال هواشناسی (آب‌شناسی) سبب تعدیل شرایط خشک‌سالی شدید آب‌شناسی (هواشناسی) شده است. این نتیجه در مطالعات دیگر ذکر نشده است.

بیش از ۸۰ درصد مساحت حوضه مورد مطالعه پوشیده از جنگل است (زارع و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بنابراین ممکن است تأثیر توأم خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناسی در عرض حلقه‌های درختان دیده شود. بررسی‌هایی که

Hydrology, 550, 92-102.
American Meteorological Society, 1997,
Meteorological drought-policy statement.

- Bulletin of the American Meteorological Society, 78, 847–849.
- Arabzadeh, R., Kholoosi, M. M. and Bazrafshan, J., 2016, Regional Hydrological Drought Monitoring Using Principal Components Analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142, 04015029.
- Bazrafshan, J., Hejabi, S. and Rahimi, J., 2014, Drought monitoring using the multivariate standardized precipitation index (MSPI). *Water Resources Management*, 28(4), 1045–1060.
- Bazrafshan, J., Nadi, M. and Ghorbani, K., 2015, Comparison of empirical copula-based joint deficit index (JDI) and multivariate standardized precipitation index (MSPI) for drought monitoring in Iran. *Water Resources Management*, 29(6), 2027–2044.
- Guttman, N. B., 1998, Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index1. *Water Resources Management*, 34(1), 113–121.
- Hao, Z. and AghaKouchak, A., 2013, Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12–18.
- Hao, Z. and Singh, V. P., 2015, Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668–678.
- Hubert, M. and Vandervieren, E., 2008, An adjusted boxplot for skewed distributions. *Computational Statistics & Data Analysis*, 52(12), 5186–5201.
- Hurst, H. E., 1951, Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 770–808.
- Kao, S. C. and Govindaraju, R. S., 2010, A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 380(1), 121–134.
- Kendall, M., 1975, *Multivariate analysis*. London: Charles Griffin and Company Ltd.
- Keyantash, J. A. and Dracup, J. A., 2004, An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40(9), W09304, doi:10.1029/2003WR002610.
- Mann, H. B., 1945, Nonparametric tests against trend. *Econometrica. Journal of the Econometric Society*, 13(3), 245–259.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, 17(22), 179–184.
- Mirabbasi, R., Anagnostou, E. N., Fakhri-Fard, A., Dinpashoh, Y. and Eslamian, S., 2013, Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*, 492, 35–48.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G., 2009, Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881–897.
- Nalbantis, I., 2008, Evaluation of a hydrological drought index. *European Water*, 23(24), 67–77.
- Pettitt, A. N., 1979, A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135.
- Rad, A. M., Ghahraman, B., Khalili, D., Ghahremani, Z. and Ardakani, S. A., 2017, Integrated meteorological and hydrological drought model: A management tool for proactive water resources planning of semi-arid regions. *Advances in Water Resources*, 107, 336–353.
- Rasmusson, E. M., Dickinson, R. E., Kutzbach, J. E. and Cleveland, M. K., 1993, *Climatology, Handbook of Hydrology*. DR Maidment, Ed. McGraw-Hill, 2, 44.
- Sen, P. K., 1968, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Sepulcre, G., Horion, S. M. A. F., Singleton, A., Carrao, H. and Vogt, J., 2012, Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), 3519–3531.
- Sharma, S., 1996, *Applied Multivariate Techniques*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Thornthwaite, C. W., 1948, An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55–94.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S. and Lopez-Moreno, J., 2010, A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.
- Wald, A. and Wolfowitz, J., 1940, On a test whether two samples are from the same population. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11(2), 147–162.
- White, D. H. and Walcott, J. J., 2009, The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop and Pasture Science*, 60(7), 599–616.
- Wilhite, D. A. and Glantz, M. H., 1985, Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.
- Wilhite, D. A., 2000, *Drought: A Global Assessment*. Natural Hazards and Disasters Series, U.K: Routledge Publishers.
- Wilks, D. S., 2011, *Statistical methods in in the*

- Atmospheric Sciences (third edition). Academic Press, 676pp.
- Young, K. C., 1992, A three-way model for interpolating for monthly precipitation values. Monthly Weather Review, 120(11), 2561–2569.
- Zare, M., Nazari Samani, A. A., Mohammady, M., Salmani, H. and Bazrafshan, J., 2017, Investigating effects of land use change scenarios on soil erosion using CLUE-s and RUSLE models. International Journal of Environmental Science and Technology, 14(9), 1905–1918.

Integrated Monitoring of Hydro–Meteorological Droughts in Kasilian's Basin (Mazandaran Province)

Cheraghizadeh, M.¹, Nazi Ghameshloo, A.² and Bazrafshan, J.^{3*}

1. M.Sc. Graduated, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Natural Resources and Agricultural Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Natural Resources and Agricultural Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Natural Resources and Agricultural Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: 29 Oct 2017, Accepted: 6 Feb 2018)

Summary

Drought is a temporary status of water deficit with respect to its long term average condition. Combined Drought Indices (CDIs) are new tools to evaluate general status of drought in a region. In this study, we focus on the integrated monitoring of meteorological droughts (based on temperature and precipitation data) and hydrological droughts (only based on streamflow data) in the Kasilian's basin. The main goal of the investigation is to present a combined drought index called Hydro–Meteorological Drought Index (HMDI) using Principal Component Analysis (PCA) in the basin. PCA is a multivariate technique to reduce dimensionality of data in a number of principal components. The Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI) were applied to monitor meteorological droughts and the Streamflow Drought Index (SDI) for monitoring hydrological droughts. The data were gathered from the meteorological and hydrometric stations located in Kasilian's basin for the period 1349–50 to 1391–92 as the water year. The station Derzikola (in the upstream) was selected for meteorological analysis and two stations Valikbon and Shirgah were employed to analyze hydrologic drought conditions in the upstream and downstream of the basin, respectively. The preliminary controls on the quality of available data were accomplished using some statistical tests for randomness, normality, adequacy of record length, outliers and temporal trend. Employing 49 probability distributions showed that Wakeby is the best fit distribution for precipitation and streamflow data and General Extreme Value for the difference series of precipitation *minus* evapotranspiration. The meteorological (SPI and SPEI) and hydrological (SDI) drought indices were calculated at four time windows including 3, 6, 9 and 12 months (each of which starts from the month October). In the next stage, for calculation of hydro–meteorological droughts, using PCA technique, two combined drought indices including SPI–SDI and SPEI–SDI were built. The combined indices, which are the standardized form of the first principal component (PC1), was individually calculated at upstream (for hydrometric station of Valikbon) and downstream (for hydrometric station of Shirgah) of the basin. PC1s were able to explain 74.3–87.9% of variabilities in data. The PC1 of the combination SPEI–SDI explained more variability than the SPI–SDI, both in upstream and in downstream of the basin. This may be related to the high correlation of SPEI and SDI series. The results showed that, for identification of dry years, SPEI–SDI is more successful than SPI–SDI at the upstream station. Therefore, combination of two indices with high correlation made satisfactory results in detecting overall status of droughts in the basin of interest. On the other hand, both combined drought indices have no differences in monitoring droughts at the downstream station. Also, during continuing dry periods, combined indices indicated drought status one month earlier in comparison with single indices. Accordance of the classified series of SPI and SPEI with combined drought indices was higher at larger time scales than smaller ones. This may be due to smoother series of single drought indices at larger time scales as well as high correlation level between indices employed in constructing HMDI.

Keywords: Precipitation, Streamflow, Combined Indices, Multivariate Methods, Evapotranspiration.

* Corresponding author:

jbazr@ut.ac.ir