

ارزیابی شاخص خشکسالی چندمتغیره MSDI و پایش خشکسالی هواشناسی - کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری

پوریا محیط اصفهانی^{۱*}، سعید سلطانی کوپائی^۱، رضا مدرس^۱ و سعید پورمنافی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۸)

چکیده

خشکسالی به عنوان یکی از پیچیده ترین پدیده های طبیعی هر ساله خسارت های زیادی به صورت مستقیم و غیرمستقیم به بخش های مختلف وارد می کند. از این جهت شناسایی و پایش خشکسالی بر اساس یک متغیر شاید به اندازه کافی جوابگوی تصمیم گیری و مدیریت مناسب برای این پدیده نباشد. در این مطالعه با استفاده از متغیرهای بارش و رطوبت خاک و محاسبه شاخص چندمتغیره استاندارد (MSDI) اقدام به پایش خشکسالی هواشناسی - کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری شد. همچنین برای ارزیابی کارایی و عملکرد شاخص MSDI در شناسایی و پایش پدیده خشکسالی از شاخص های بارش استاندارد (SPI) برای پایش خشکسالی هواشناسی و رطوبت خاک استاندارد (SSI) برای پایش خشکسالی کشاورزی در این استان استفاده شد. شاخص MSDI بر اساس احتمال رخداد توأم دو متغیر بارش و رطوبت خاک ساخته می شود. در این مطالعه از روش گرین گورتن به طور تجربی و توابع خانواده ارشمیدسی کوپلا به صورت پارامتریک اقدام به برآورد احتمال توأم دو متغیر مذکور شد. نتایج نشان داد که MSDI بیش از دو برابر قابلیت شناسایی پدیده خشکسالی را نسبت به شاخص های SSI و SPI دارد. همچنین پایش خشکسالی بر اساس شاخص MSDI نشان داد که استان چهارمحال و بختیاری در سال های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۴ دچار خشکسالی های شدید هواشناسی - کشاورزی بوده است.

واژه های کلیدی: خشکسالی، شاخص بارش استاندارد، شاخص رطوبت خاک استاندارد، همبستگی متقابل، کوپلا

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: p.mohit@na.iut.ac.ir

مقدمه

اشاره کرد. همچنین مساعدی و همکاران (۱۲) در استان گلستان با استفاده از شاخص بارش استاندارد (Standardized Precipitation Index, SPI) به بررسی خشکسالی هواشناسی پرداختند و بیان داشتند که ترسالی و خشکسالی‌های مهم با فواصل زمانی یازده سال به وقوع پیوسته است. صنیع ثالث (۱۴) اقدام به ارزیابی شاخص خشکسالی پالمر استاندارد شده (Standardized Palmer Drought Index, SPDI) در استان چهارمحال و بختیاری و پایش خشکسالی این استان بر اساس این شاخص کرد. همچنین جوانمرد و همکاران (۶) نیز با استفاده از شاخص SPI اقدام به تحلیل مکانی و زمانی خشکسالی در کل ایران کردند. از مهم‌ترین مطالعات انجام شده در زمینه پایش خشکسالی بر اساس شاخص‌های چندمتغیره در دنیا می‌توان به مطالعه همزمان مدت و شدت خشکسالی در تایوان و رودخانه زرد چین به‌وسیله کوپلا دومتغیره توسط شیائو (۱۶)، بررسی طول دوره خشکسالی تعیین شده توسط شاخص SPI، $SPI < -1$ ، میانگین SPI در دوره‌های خشکسالی، حداقل مقدار SPI در دوره خشکسالی و گستردگی مکانی آن به صورت همزمان و به کمک تابع کوپلای t چهار بعدی در جزیره سیسیل ایتالیا توسط سرینالدی و همکاران (۱۵)، پایش خشکسالی هواشناسی - کشاورزی در کالیفرنیا و کارولینای شمالی با استفاده از شاخص چندمتغیره استاندارد شده (Multivariate Standardized Drought Index, MSDI) توسط هائو و آقاچوک (۵)، بررسی روند خشکسالی هواشناسی و کشاورزی با استفاده از شاخص MSDI در ایران توسط گلیان و همکاران (۴) اشاره کرد. همچنین عرب زاده و همکاران (۱) در حوضه رودخانه سفیدرود با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (Principal Components Analysis, PCA) اقدام به ساخت شاخص خشکسالی چندمتغیره جریان پایه کردند و پایش خشکسالی بر اساس این شاخص را کارآمدتر دانستند. کانگ و سریده‌ها (۷) با استفاده از شاخص‌های رطوبت خاک استاندارد (Standardized Soil Moisture Index, SSI) و شاخص شدت خشکسالی اصلاح شده پالمر

خشکسالی به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین بلاهای طبیعی در سراسر جهان شناخته می‌شود؛ که در هر منطقه با هر اقلیمی ممکن است رخ دهد. خشکسالی هر ساله به‌طور متوسط شش بلیون دلار خسارت در مقیاس جهانی به بخش‌های مختلف وارد می‌کند و نسبت به سایر مخاطرات طبیعی افراد بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳). کشور ایران به‌عنوان یکی از مناطق خشک جهان در دهه‌های گذشته خشکسالی‌های متعددی را تجربه کرده است. بررسی روند بلندمدت بارش سالیانه نشان می‌دهد که در برخی از مناطق وقایع خشکسالی دارای دوره بازگشت پنج تا هفت سال هستند درحالی که برای مقیاس ملی بین بیست تا سی سال است. از این‌رو خشکسالی به‌عنوان یک پدیده نرمال از شرایط اقلیمی ایران محسوب می‌شود (۹). یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین ابزارهای در دسترس برای شناسایی و پایش کیفی و کمی خشکسالی، شاخص‌های خشکسالی هستند. استفاده از شاخص‌های خشکسالی از سال ۱۹۶۵ با ارائه شاخص خشکسالی پالمر رواج یافت (۱۳) و ساخت انواع شاخص‌های خشکسالی بسته به دیدگاه‌های مختلف تا به امروز همچنان ادامه دارد. نکته قابل تأمل در این باره این است که اکثر شاخص‌های ارائه شده برای پایش خشکسالی بسته به دیدگاه مورد نظر فقط یک متغیر را در نظر می‌گیرند و خشکسالی را فقط از یک جنبه یا دیدگاه مورد ارزیابی قرار می‌دهند؛ درحالی که اثرات این پدیده می‌تواند آنقدر گسترده باشد که روی حوزه‌های دیگر نیز تأثیرگذار باشد. لذا امروزه پایش خشکسالی بر اساس روش‌های چندمتغیره برای مدیریت یکپارچه این پدیده امری ضروری به‌شمار می‌رود و متأسفانه هنوز در کشور ما مطالعات جدی در این ارتباط صورت نگرفته است. از مطالعات مهم اخیر در زمینه خشکسالی در کشور ما می‌توان به تعیین دوره‌های بازگشت و ریسک تداوم خشکسالی در ایستگاه‌های قدیمی ایران با فرض استقلال و ایستایی سرهای زمانی بارندگی سالانه و برآورد ریسک خشکسالی به‌ازای ۵۰ درصد احتمال وقوع خشکسالی توسط خلیلی و بذرافشان (۱۰)

و بختیاری و داده‌های رطوبت خاک، از سایت آژانس فضایی اروپا (European Space Agency, ESA) تهیه شد (<https://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/93>). آژانس داده‌های رطوبت خاک جمع‌آوری شده توسط بسیاری از ماهواره‌ها مانند Auqa, TRMM, Coriolis و غیره را به صورت فایل‌های رستری با دقت پیکسلی 0.25×0.25 درجه از سال ۱۹۸۰ به بعد برای سراسر کره زمین به صورت رایگان در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در این مطالعه طول دوره آماری مشترک برای داده‌های بارش و رطوبت خاک از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ به مدت بیست سال انتخاب شد. شکل ۱ موقعیت مکانی تقسیمات اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری، سلول‌های رطوبت خاک و ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

شاخص‌های خشکسالی

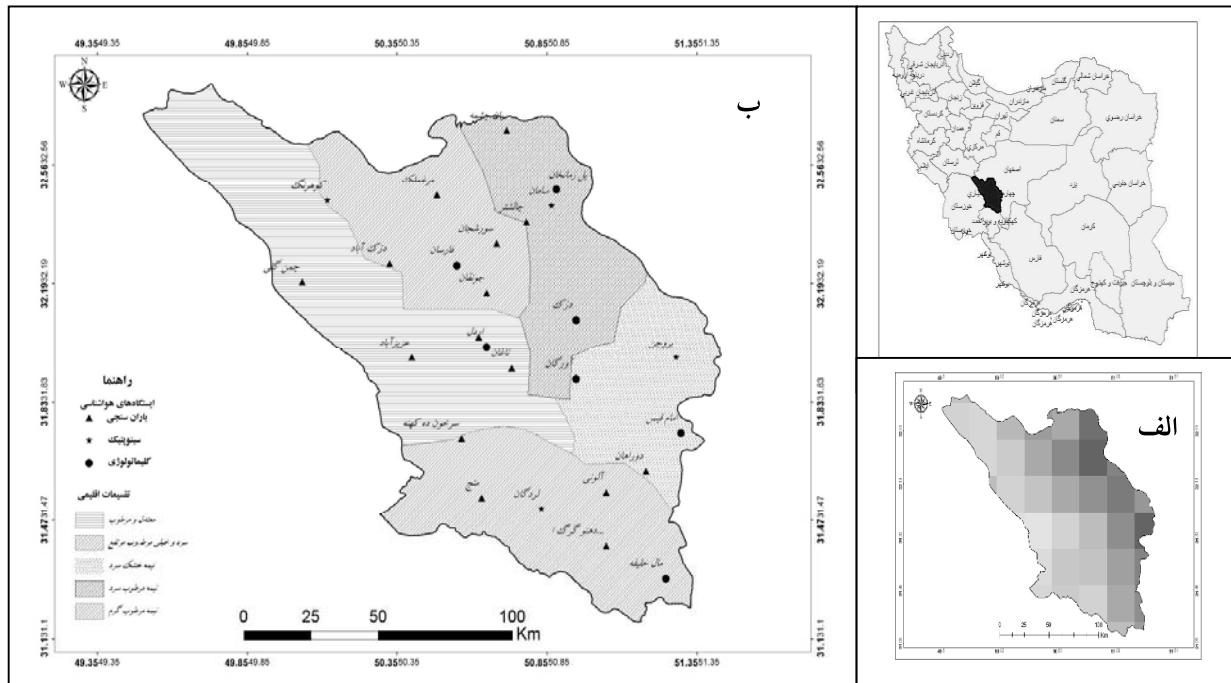
برای ارزیابی شاخص MSDI و به منظور پایش خشکسالی کل استان چهارمحال و بختیاری، از پهنه‌بندی اقلیمی چندمتغیره که توسط سلطانی و همکاران (۱۷) برای استان چهارمحال و بختیاری تعیین شد استفاده شد. همچنین داخل هر یک از پهنه‌های اقلیمی متوسط شاخص‌های SSI، SPI و MSDI ایستگاه‌های موجود در آن، به عنوان مقدار هر یک از شاخص‌ها برای کل محدوده اقلیمی در نظر گرفته شد و از طریق میانگین‌گیری وزنی و وزن‌دهی بر اساس مساحت هر کدام از محدوده‌های اقلیمی مقدار شاخص‌های خشکسالی برای کل استان تعریف شد. با محاسبه شاخص‌های SSI، SPI و MSDI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه، مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط مک‌کی و همکاران (۱۱) مقادیر شاخص‌ها به وضعیت‌های خشکسالی برای کل استان در طول دوره آماری تبدیل شد (جدول ۱). در گام بعدی مقدار فراوانی هر کدام از وضعیت‌های خشکسالی جدول ۱ تعیین و نقشه‌های پهنه‌بندی فراوانی خشکسالی برای کل استان تهیه شد.

(Modified Palmer Drought Severity Index, MPDSI) و MSDI اقدام به پایش خشکسالی و ارزیابی کارایی این شاخص‌ها در ویرجینیا کردند. همچنین کانگ و سریدهار (۸) مجدد با استفاده از سه شاخص SSI، شاخص جریان پایه استاندارد (Standardized Baseflow index, SBI) و MSDI در ایالات متحده آمریکا اقدام پیش‌بینی و شبیه‌سازی خشکسالی کردند. هدف از این مطالعه پایش خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری بر اساس شاخص چندمتغیره خشکسالی استاندارد شده (MSDI) و همچنین بررسی کارایی این شاخص در شناسایی و پایش پدیده خشکسالی نسبت به شاخص‌های رطوبت خاک استاندارد (SSI) و بارش استاندارد (SPI) است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه استان چهارمحال و بختیاری است که در بخش مرکزی رشته کوه‌های زاگرس، بین رشته کوه‌های داخلی و استان اصفهان واقع شده است. استان چهارمحال و بختیاری با وسعت ۱۶۴۲۱ کیلومتر مربع در جنوب غربی و در نوار کوهستانی غرب ایران قرار داشته و حدود یک درصد از مساحت کشور را در برمی‌گیرد. از نظر موقعیت جغرافیایی بین $31^{\circ} 09' 03''$ تا $32^{\circ} 48' 34''$ عرض‌های شمالی و $51^{\circ} 25' 03''$ تا $51^{\circ} 28' 04''$ طول‌های شرقی قرار دارد. از شمال و شرق به استان اصفهان، از غرب به استان خوزستان، از جنوب به کهگیلویه و بویراحمد و از شمال غرب به استان لرستان محدود است. این استان با وجود مساحت کم، ده درصد از منابع آب کشور را در اختیار دارد. از این برای پایش کارآمد خشکسالی در این استان امری حیاتی به‌شمار می‌رود. داده‌های مورد نیاز برای ساخت شاخص‌های SSI، SPI و MSDI شامل بارش و رطوبت خاک ماهیانه است. داده‌های بارش از مجموع ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی، کلیماتولوژی و سینوپتیک توسط سازمان هواشناسی کل استان چهارمحال



شکل ۱. الف) سلول‌های رطوبت خاک ESA و ب) موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و تقسیمات اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری

جدول ۱. طبقه‌بندی خشکسالی با هفت وضعیت

مقدار شاخص	نام اختصاری	نام طبقه	نام طبقه
$-2 \geq I$	ED	Extreme Drought	خشکسالی استثنائی
$-2 < I \leq -1/5$	SD	Severe Drought	خشکسالی شدید
$-1/5 < I \leq -1$	MD	Moderate Drought	خشکسالی متوسط
$-1 < I < 1$	N	Normal	نرمال
$1 \leq I < 1/5$	MW	Moderate Wet	ترسالی متوسط
$1/5 \leq I < 2$	SW	Severe Wet	ترسالی شدید
$2 \leq I$	EW	Extreme Wet	ترسالی استثنائی

I: مقدار عددی هریک از شاخص‌های SSI، SPI و یا MSDI

شاخص‌های بارش و رطوبت خاک استاندارد

محاسبه شاخص SSI بر اساس آزمون‌های نکویی برآزش روی سری‌های تجمعی رطوبت خاک هر ایستگاه، بهترین توزیع از نظر آزمون کولموگروف اسمیرونوف انتخاب و به داده‌ها برآزش داده شد. برای اکثر ایستگاه‌ها و سری‌های تجمعی دو توزیع Johnson-SB و Wakeby نسبت به سایر توزیع‌ها از رتبه بهتری برخوردار بودند. با به دست آمدن احتمال رخداد مقادیر متغیرهای تجمعی

در این مطالعه مقادیر شاخص‌های SSI و SPI بر اساس برآزش توزیع‌های احتمال به سری‌های تجمعی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه داده‌های رطوبت خاک و بارش ماهیانه محاسبه شد. توزیع احتمال به کار رفته برای محاسبه شاخص SPI به صورت پیش فرض بر اساس مطالعات مک‌کی و همکاران (۱۱) توزیع گاما، و برای

احتمال توأم دو متغیر مذکور است. با در نظر گرفتن احتمال توأم و با فرض احتمال آستانه خشکسالی ۲۵ درصد برای بارش و رطوبت خاک به صورت تک متغیره و توأم (شکل ۲)، در حالت تک متغیره ناحیه A3 محدوده ترسالی و نواحی A1، A2 و A4 به عنوان محدوده های خشکسالی در نظر گرفته می شوند. این در حالی است که چنانچه احتمال توأم ۲۵ درصد به عنوان آستانه خشکسالی در نظر گرفته شود، محدوده تیره رنگ در ناحیه A3 نیز به محدوده خشکسالی پیوسته و به طور عملی شناس شناسایی خشکسالی توسط احتمال توأم یا MSDI افزایش می یابد (۱).

هائو و آقا کوچک (۵) با شبیه سازی بیش از ۵۰۰۰ نمونه تصادفی از متغیرهای بارش و رطوبت خاک، دو کوپلای فرانک و گامبل را که جزء کوپلای خانواده ارشمیدسی هستند برای به دست آوردن احتمال توأم این دو متغیر در کارولینای شمالی و کالیفرنیا مناسب دانستند. در این مطالعه نیز برای انتخاب بهترین تابع کوپلا، در تمامی ایستگاهها آزمون نکویی Cramer-von Mises برای کوپلایهای Frank, Gumbel, Clayton و AMH انجام گرفت. آماره S_n از آزمون Cramer-von Mises برای کوپلایهای مذکور با بیش از ۱۰۰۰ مجموعه شبیه سازی شده از احتمال رخداد هر یک از سری های تجمعی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه بارش و رطوبت خاک برآورد شد. با توجه به نتایج، تابعی که بیشترین مقدار p-value در نهایت معنادار (در سطح ۵ درصد) و یا کمترین مقدار S_n را به خود اختصاص داده بود به عنوان بهترین تابع کوپلا از میان توابع فوق انتخاب و برای برآورد احتمال توأم دو متغیر بارش و رطوبت خاک در هر ایستگاه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی اثر روش محاسبه شاخص MSDI، علاوه بر روش پارامتریک (Parametric MSDI یا MSDIp) با استفاده از رابطه گرینگورتن این شاخص به صورت تجربی نیز محاسبه شد (Empirical MSDI یا MSDIe). در جدول ۲ به ضابطه توزیع های استفاده شده برای ساخت شاخص های MSDIe، MSDIp، SSI و SPI اشاره شده است. تمامی محاسبات مربوط به آزمون های نکویی تابع کوپلا و برآورد پارامترهای آنها به کمک بسته های Copula و gofCopula در محیط نرم افزار R انجام گرفت.

بارش و رطوبت خاک، با استفاده از انتقال مقادیر احتمال به وارون تابع تجمعی توزیع نرمال استاندارد (Φ^{-1}) مقادیر احتمال به مقادیر استاندارد تبدیل و شاخص های SSI و SPI تعیین شد.

توابع کوپلا و شاخص چندمتغیره استاندارد شده

مهم ترین چالش در برآورد احتمال توأم دو یا چند متغیر با استفاده از توزیع های چندمتغیره و روش های کلاسیک، شرط یکسان بودن توزیع های حاشیه ای تک متغیره هر یک از متغیرها است. این امر به ویژه در مورد متغیرهای تصادفی و طبیعی که ممکن است از توزیع های مختلفی پیروی کنند نمود بیشتری خواهد یافت. در سال ۱۹۵۹ اسکالر (Skaler) تئوری توابع کوپلا را بیان کرد که مطابق با آن می توان احتمال توأم دو یا چند متغیر را با استفاده از توابع مفصل کوپلا صرف نظر از توزیع حاشیه ای هر یک از متغیرها به دست آورد. طبق تئوری اسکالر به ازای هر تابع تجمعی d بعدی F و توابع حاشیه ای یک متغیره F_1, \dots, F_d یک کوپلای C وجود دارد، به نحوی که برای تمام x_i ها ($i=1, \dots, d$) در $[-\infty, +\infty]$ رابطه ۱ برقرار است (۲):

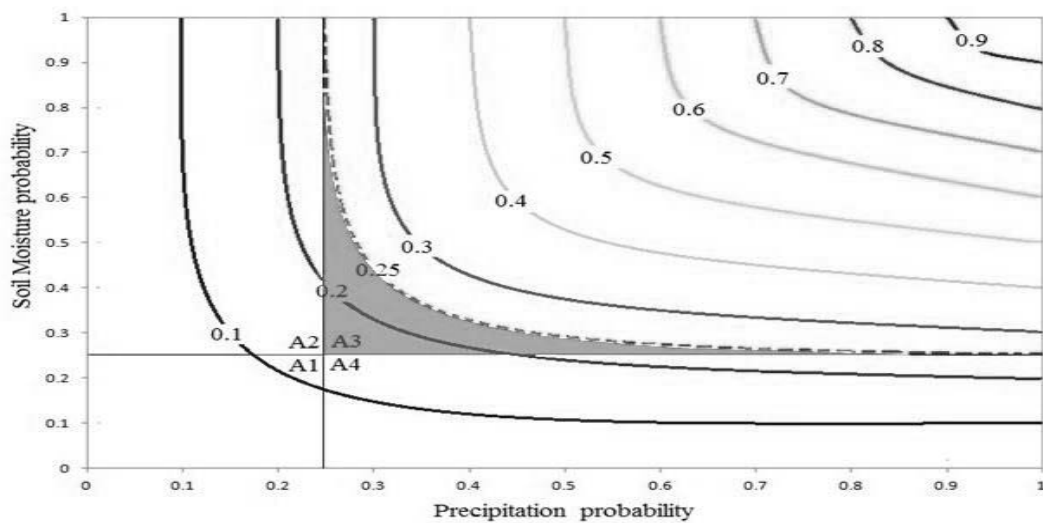
$$F(x_1, \dots, x_d) = C(F(x_1), \dots, F(x_d)) \quad (1)$$

کوپلاها دارای توابع و خانواده های متعددی هستند که بسته به رفتار متغیرها و میزان همبستگی بین آنها می توانند مورد استفاده قرار گیرند. یکی از پرکاربردترین خانواده های توابع کوپلا، توابع خانواده ارشمیدسی هستند که نسبت به سایر خانواده های کوپلا دارای روابط ساده و صریح و نتایج دقیق هستند. از مهم ترین توابع خانواده ارشمیدسی می توان به کوپلایهای Frank, Gumbel, Clayton و AMH اشاره کرد.

شاخص چندمتغیره استاندارد شده یا MSDI مشابه با شاخص های SSI و SPI از تبدیل مقادیر هم احتمال یک متغیر به مقادیر نرمال استاندارد ساخته می شود. با این تفاوت که احتمال منتقل شده به وارون تابع تجمعی توزیع نرمال استاندارد (Φ^{-1}) احتمال توأم برای دو متغیر بارش و رطوبت خاک است.

$$MSDI = \Phi^{-1}(P), \quad P(x,y) = P[X \leq x, Y \leq y] \quad (2)$$

که X و Y به ترتیب متغیرهای بارش و رطوبت خاک و $P(x,y)$



شکل ۲. شناسایی خشکسالی بر اساس احتمال رخداد متغیرهای منفرد بارش و رطوبت خاک و احتمال توأم آنها (خطوط منحنی)

جدول ۲. توزیع‌های مناسب برای محاسبه شاخص‌های MSDIp, MSDIe, SSI و SPI

شاخص	متغیر	نام توزیع احتمال	ضابطه توزیع احتمال
SSI	رطوبت خاک	SB-Johnson	$F(x) = \phi(\gamma + \delta \ln(\frac{z}{1-z})), z = \frac{x - \xi}{\lambda}$
		Wakeby	$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} (1 - (1-F)^\beta) - \frac{\gamma}{\delta} (1 - (1-F)^{-\delta})$
SPI	بارش	Gamma	$F(x) = \frac{\Gamma_{x/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$
MSDIe	رطوبت خاک و بارش	Gringorton	$P(x_k, y_k) = \frac{M_k - 0.44}{n + 0.12}$
MSDIp	رطوبت خاک و بارش	AMH	$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}, -1 \leq \theta \leq 1$
		Frank	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right], \theta \neq 0$
MSDIp	رطوبت خاک و بارش	Clayton	$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-\frac{1}{\theta}}, \theta \geq 0$
		Joe	$C(u, v) = 1 - [(1-u)^\theta + (1-v)^\theta - (1-u)^\theta(1-v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}, \theta \geq 1$
		Gumbel	$C(u, v) = \exp \left\{ - \left[(-\ln(u))^\theta + (-\ln(v))^\theta \right]^{\frac{1}{\theta}} \right\}, \theta \geq 1$

$(\xi, \delta, \lambda, \gamma, \theta, \alpha)$: پارامترهای توزیع‌ها، M_k : تعداد زوج مشاهدات (x_i, y_i) که در آن $x_i \leq x_k$ و $y_i \leq y_k$ ، $\Gamma(x)$ و $\Gamma(x)$ به ترتیب توابع گاما و گامای ناقص، Φ : تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد هستند.

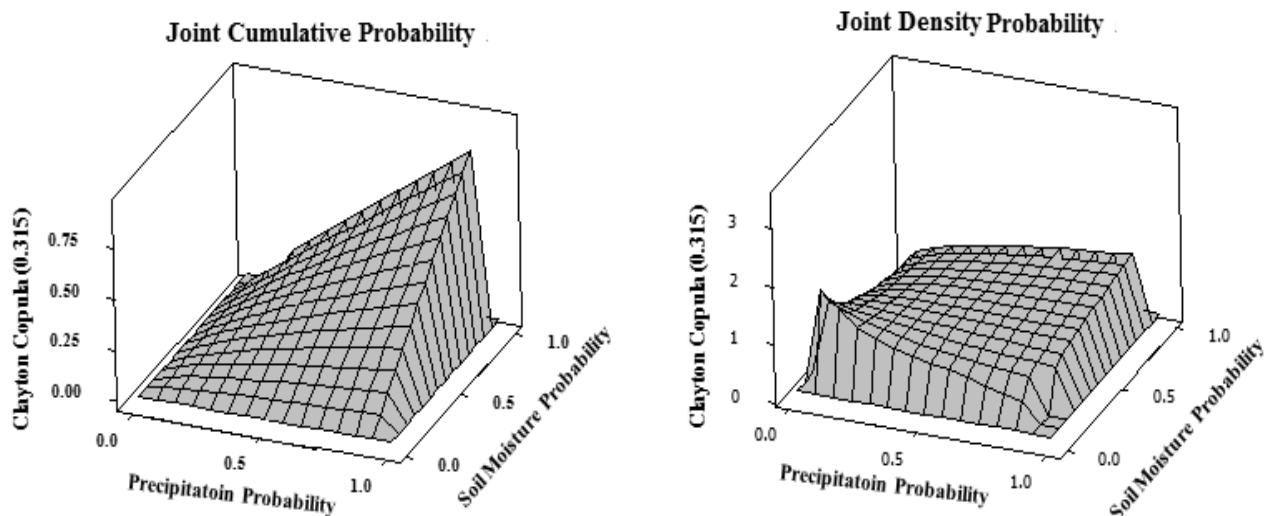
داده‌های بارش و رطوبت خاک ایستگاه پل زمانخان به‌عنوان نمونه اشاره شده است. برای هر یک از ستون‌های مقیاس زمانی تابع

نتایج و بحث

در جدول ۳ به نتایج حاصل از آزمون Cramer-von Mises برای

جدول ۳. پارامتر کوپلاها و آماره آزمون نکویی Cramer-von Mises در ایستگاه پل زمانخان

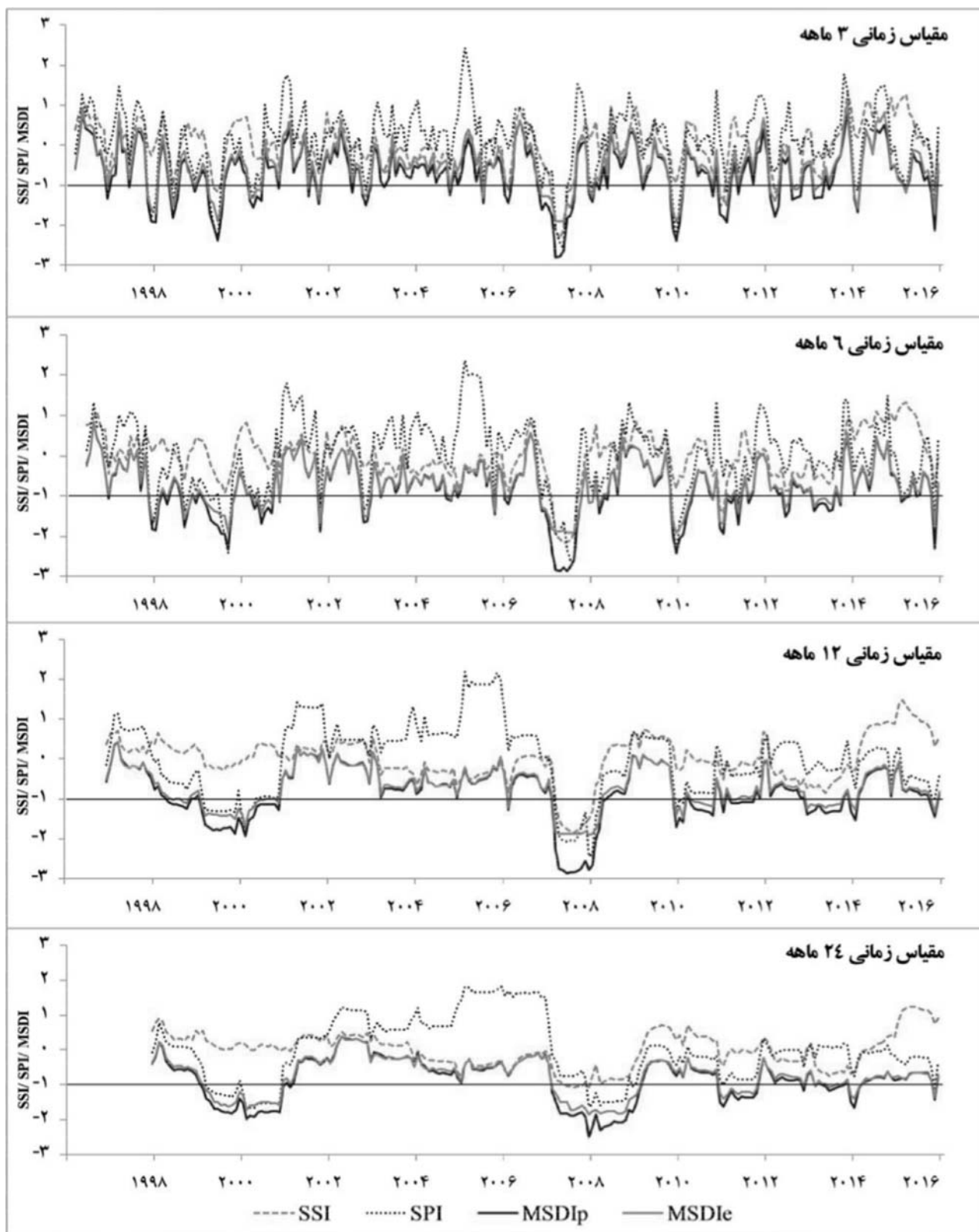
مقیاس زمانی (ماه)				پارامتر	توابع کوپلا خانواده ارشمیدسی
۲۴	۱۲	۶	۳		
۰/۲۸۲	۰/۶۳۵	۰/۴۸۸	۰/۵۶۹	θ	AMH
۰/۰۸۴	۰/۰۵۱	۰/۰۳۰	۰/۰۲۵	Sn	
۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۱۱۸	۰/۲۵۹	P-value	
۰/۱۱۵	۰/۴۴۰	۰/۲۶۰	۰/۳۱۵	θ	کلایتون
۰/۰۸۴	۰/۰۴۷	۰/۰۳۳	۰/۰۲۱	Sn	
۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۴۸	۰/۴۲۵	P-value	
۰/۵۳۷	۱/۵۰۰	۱/۰۴۴	۱/۲۱۷	θ	فرانک
۰/۰۷۶	۰/۰۱۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۰	Sn	
۰/۰۵۱	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۹۰	P-value	
۱/۰۰۰	۱/۱۳۴	۱/۱۰۳	۱/۱۲۵	θ	گامبل
۰/۱۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۳۴	۰/۰۴۱	Sn	
۰/۰۰۰	۰/۰۷۳	۰/۰۲۷	۰/۰۲۲	P-value	



شکل ۳. احتمال چگالی و تجمعی توأم بارش و رطوبت خاک در ایستگاه پل زمانخان

چهارمحل و بختیاری در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مشخص شد که استان از دیدگاه کشاورزی در سال ۲۰۰۸ و از دیدگاه‌های هواشناسی و هواشناسی-کشاورزی در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ در وضعیت خشکسالی به‌سر برده است و شدیدترین حالت خشکسالی از هر سه دیدگاه متعلق به سال ۲۰۰۸ است (شکل ۴).

مفصل مناسب با توجه به آماره Sn و p-value مربوط به آن مشخص شده است. همچنین شکل ۳ نیز مقادیر احتمال توأم بارش و رطوبت خاک (تابع کوپلا کلایتون با مقدار پارامتر ۰/۳۱۵) را برای نمونه در ایستگاه پل زمانخان با مقیاس زمانی سه ماهه نشان می‌دهد. با محاسبه شاخص‌های SSI، SPI و MSDI برای کل استان



شکل ۴. مقادیر شاخص‌های SSI، SPI، MSDIp، MSDIe در استان چهارمحال و بختیاری از ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

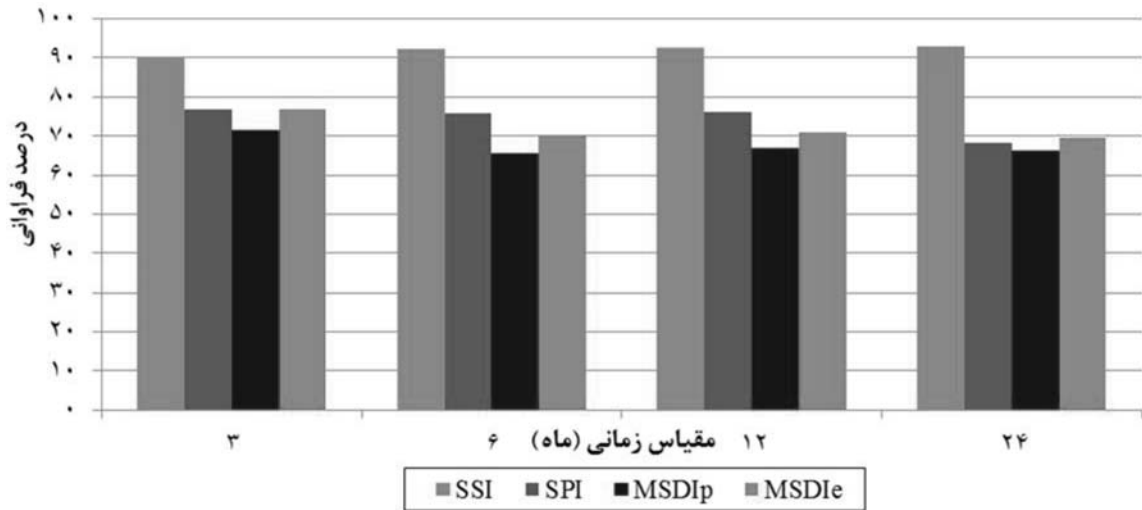
همبستگی متقابل

به منظور بررسی ارتباط زمانی خشکسالی‌های شناخته شده توسط سه شاخص MSDI، SSI و SPI همبستگی متقابل بین شاخص MSDI با دو شاخص دیگر با تأخیرهای صفر تا ۲۴ ماه و برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه برقرار شد. نتایج نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها با افزایش مقیاس زمانی از ۳ به ۲۴ ماهه تداوم همبستگی MSDI با دو شاخص دیگر به‌ازای تأخیرهای کوتاه مدت (۱ تا ۵ ماه) بیشتر می‌شود؛ این امر در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه محسوس‌تر است. شکل ۷ نمونه‌ای از این تغییرات همبستگی را برای ایستگاه پل زمانخان نشان می‌دهد. شکل ۸ باکس پلات تغییرات همبستگی به‌دست آمده از همه ایستگاه‌ها را به‌ازای تأخیرهای صفر تا ۲۴ ماهه برای مقیاس زمانی ۱۲ ماهه نشان می‌دهد.

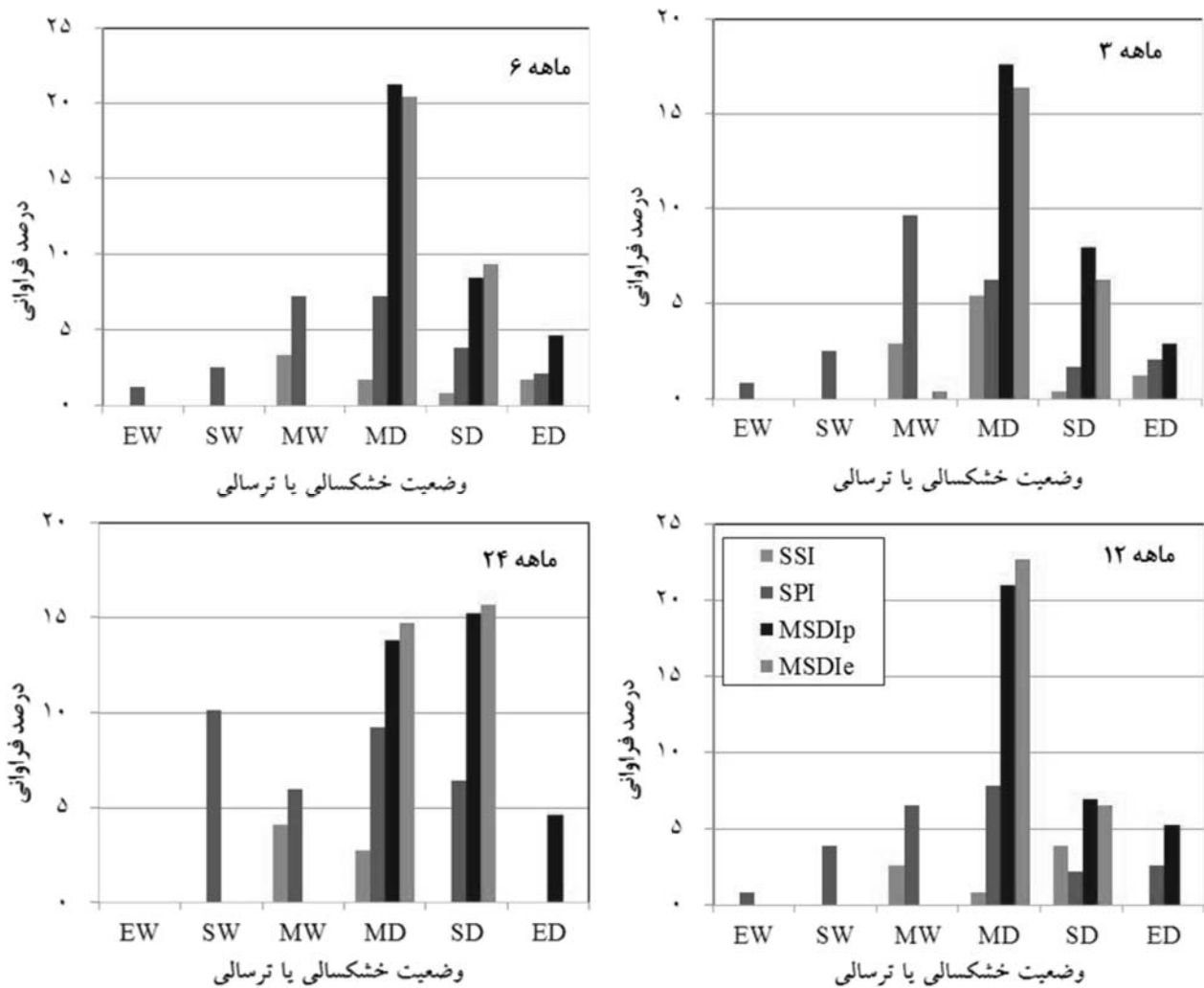
پهنه‌بندی خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری

در نهایت برای ارزیابی کارایی شاخص MSDI برای شناسایی پدیده خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری نقشه‌های پهنه‌بندی فراوانی خشکسالی توسط ایستگاه‌های این استان برای هر سه شاخص SSI، SPI و MSDI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه تهیه شد. با توجه به توضیحات شکل ۲، شاخص MSDI با در نظر گرفتن احتمال توأم دو متغیر عملاً شانس بیشتری در شناسایی پدیده خشکسالی دارد. این امر به‌وضوح در شکل ۹ قابل رؤیت است؛ که در درجه اول فراوانی وضعیت‌های خشکسالی شناخته شده توسط شاخص MSDI در تمامی ایستگاه‌ها بیش از دو شاخص دیگر است (بیش از ۲ برابر) و همچنین در بخش‌های شمالی، شمال غربی و غرب استان فراوانی خشکسالی چه از لحاظ هواشناسی و چه از لحاظ کشاورزی بیش از سایر بخش‌ها است (شکل ۹).

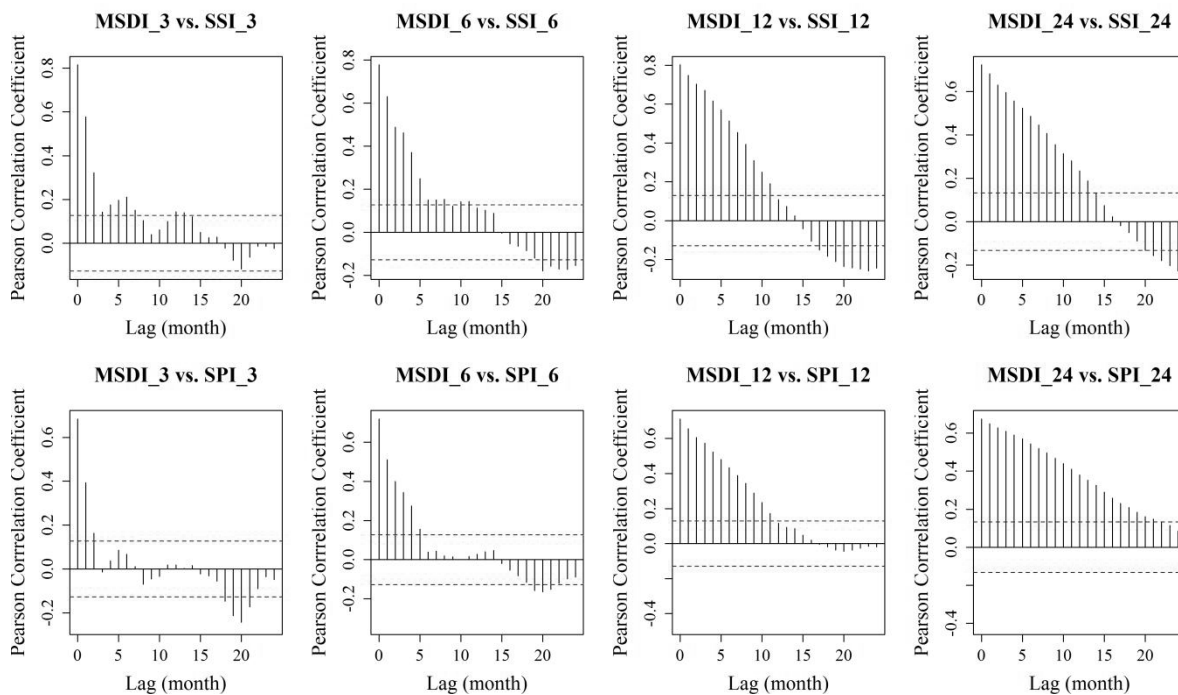
همچنین با تبدیل مقادیر شاخص‌ها به وضعیت‌های خشکسالی مطابق با جدول ۱، فراوانی هر یک از طبقات برای هر سه شاخص تعیین شد (شکل‌های ۵ و ۶). با بررسی فراوانی وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی شناخته شده توسط هر سه شاخص، مشخص شد که در طول دوره آماری، استان از دیدگاه‌های کشاورزی و هواشناسی-کشاورزی فاقد وضعیت‌های ترسالی شدید و استثنائی بوده است. علاوه بر این پس از وضعیت نرمال بیشترین فراوانی وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی از دیدگاه هواشناسی-کشاورزی متعلق به شرایط خشکسالی، به‌ویژه وضعیت‌های خشکسالی متوسط و شدید است. بررسی وضعیت نرمال بر اساس سه شاخص مشخص کرد که شاخص SSI دارای ثبات بیشتری نسبت به شاخص‌های SPI و MSDI است که علت آن تغییرات کمتر رطوبت خاک نسبت به متغیر بارش است (شکل ۴ و ۵). به‌طور کلی شاخص MSDI بسته به روش به‌کار گرفته شده برای محاسبه آن (پارامتریک یا تجربی) رفتار متفاوتی را می‌تواند در وضعیت‌های حادی خشکسالی از خود نشان دهد. در شکل ۴ شاخص MSDIp در سال‌های خشک به‌ویژه سال ۲۰۰۸ وضعیت خشکسالی را شدیدتر از شاخص‌های SSI، SPI و MSDIe نشان می‌دهد در حالی که MSDIe معمولاً وضعیت خشکسالی را خفیف‌تر نشان می‌دهد اما در وضعیت‌های نرمال و ترسالی تفاوت چندانی میان MSDIe و MSDIp وجود ندارد. همچنین مطابق با نتایج آفاکوچک و هاو (۱:۱) MSDI شرایط وقوع خشکسالی را مشابه با SPI و یا SSI شناسایی می‌کند. (۲) MSDI وقوع خشکسالی را نسبت به SPI زودتر شناسایی می‌کند در حالی که پایداری خشکسالی را مشابه با SSI برآورد می‌کند. (۳) MSDI خشکسالی را در شرایطی که هر دو شاخص SPI و SSI دچار کمبود هستند، شدیدتر نشان می‌دهد.



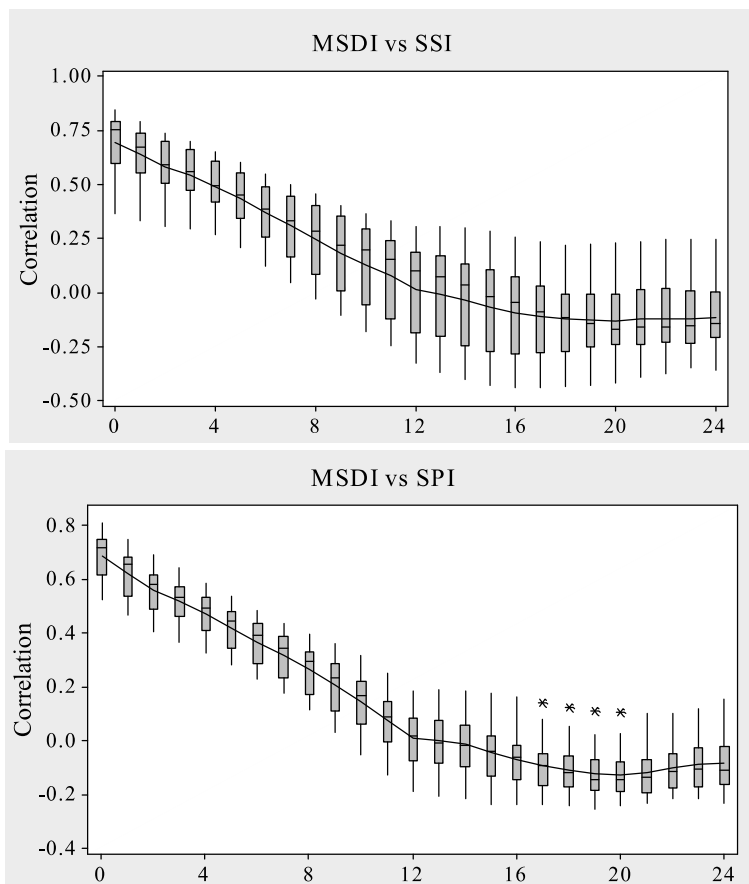
شکل ۵. درصد فراوانی وضعیت نرمال خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



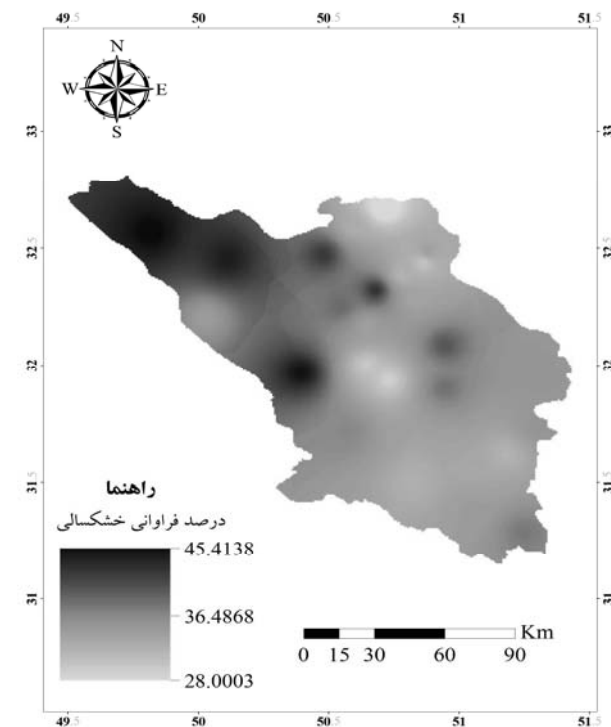
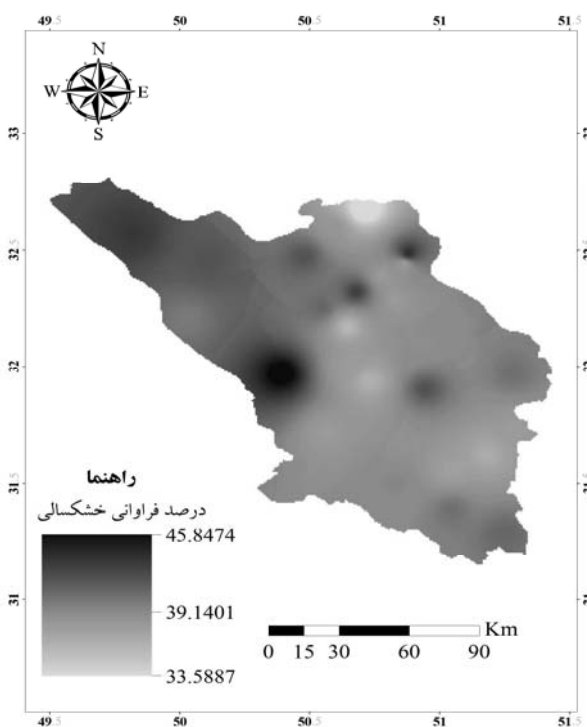
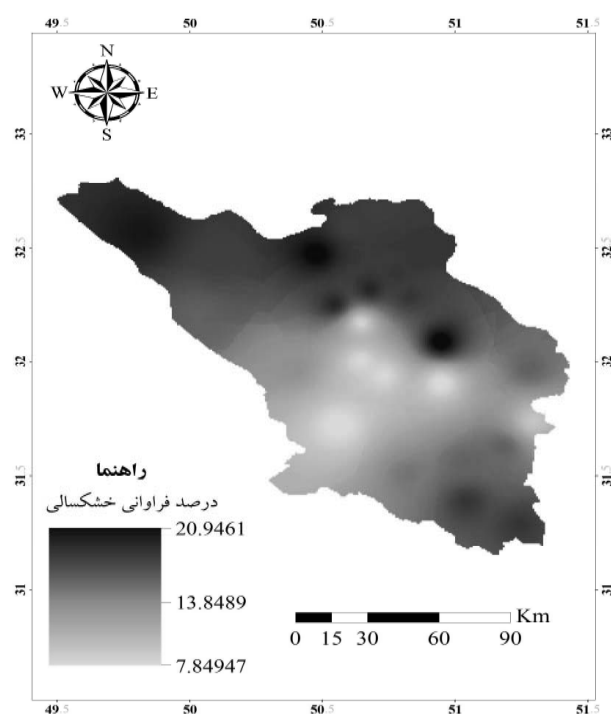
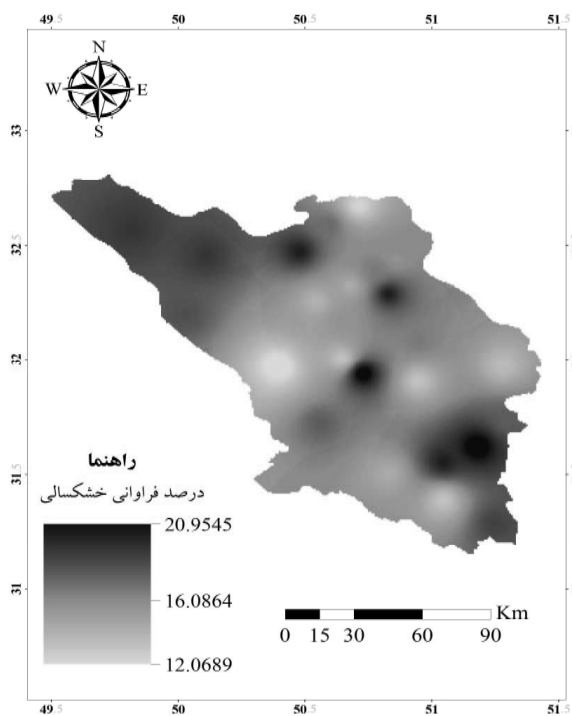
شکل ۶. درصد فراوانی وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. همبستگی متقابل بین MSDI و شاخص های SSI و SPI در ایستگاه پل زمانخان



شکل ۸. باکس پلات همبستگی متقابل شاخص MSDI با شاخص های SSI و SPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه



شکل ۹. پهنه‌بندی فراوانی خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری در مقیاس ۱۲ ماهه

نتیجه گیری

درک ساده تری از نحوه عملکرد شاخص MSDI در شناسایی و پایش پدیده خشکسالی در ذهن خواننده ایجاد می کند. علاوه بر این شاخص MSDI به سبب ادغام اطلاعات از دو متغیر بارش و رطوبت خاک به نوعی اطلاعات حاصل از شاخص های تک متغیره آنها یعنی SPI و SSI را دارا است و عملاً قابلیت پایش خشکسالی را از دو دیدگاه هواشناسی و کشاورزی به طور همزمان فراهم می آورد. این امر به نوبه خود کمک زیادی به مدیریت صحیح و چندجانبه برای کاهش خسارات ناشی از خشکسالی های هواشناسی و کشاورزی می کند. از این برای استفاده از شاخص های چندمتغیره همچون شاخص MSDI برای پایش و شناسایی پدیده خشکسالی برای مدیریت این پدیده توسط تصمیم گیران بسیار توصیه می شود.

در این مطالعه سعی شد علاوه بر پایش خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری به وسیله شاخص چندمتغیره استاندارد شده (MSDI) عملکرد این شاخص توسط شاخص های تک متغیره SPI و SSI نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا مقادیر هر یک از شاخص های فوق برای ۲۵ ایستگاه محاسبه شد؛ اما به علت ارزیابی جامع تر و چشم پوشی از اختلافات جزئی ناشی از موقعیت ایستگاه ها و همچنین ساده سازی و خلاصه سازی نتایج، سعی شد به جای مقایسه شاخص ها در نقاط مشخص (ایستگاه ها) با استفاده از وزن دهی بر اساس مساحت پهنه های اقلیمی، ارزیابی و عملکرد شاخص MSDI نسبت به دو شاخص دیگر در یک سطح انجام گیرد. این امر به نوبه خود

منابع مورد استفاده

1. Arabzadeh, R., M. M. Kholoosi and J. Bazrafshan. 2015. Regional hydrological drought monitoring using principal components analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(1): 04015029.
2. Genest, C. and A. -C. Favre. 2007. Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 12(4): 347-368.
3. Ghabaei, M., A. Mosaedi and H. Zareabyane. 2016. Importance of Drought Monitoring based on Multivariate Indices. 6th National Iran Water Management Conference (2015), 20-22 April, University of Kurdistan, Sanandaj
4. Golian, S., O. Mazdiyasi and A. AghaKouchak. 2015. Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 119: 679.
5. Hao, Z. and A. AghaKouchak. 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A multi-index parametric approach for drought analysis. *Advances in Water Resources* 57: 12-18.
6. Javanmard, S., M. Emamhadi, J. BodaghJamali and A. Didehvarasl. 2017. Spatial-temporal analysis of drought in Iran using SPI during a long-term period. *Earth Sciences* 6(2): 15.
7. Kang, H. and V. Sridhar. 2017. Combined statistical and spatially distributed hydrological model for evaluating future drought indices in Virginia. *Journal of Hydrology* 12: 253-272.
8. Kang, H. and V. Sridhar. 2018. Improved drought prediction using near real-time climate forecasts and simulated hydrologic conditions. *Sustainability* 10(6): 1799.
9. Keshavarz, M., E. Karami and F. Vanclay. 2013. The social experience of drought in rural Iran. *Land Use Policy* 30: 120-129.
10. Khalili, A. and J. Bazrafshan. 2008. Evaluation of drought duration risk using annual secular precipitation data in old stations of Iran. *Iranian Journal of Geophysics* 2(2): 13-23.
11. McKee, T., N. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA.
12. Mosaedi, A., M. Khalilzadeh and A. Mohammadi. 2008. Meteorological drought monitoring in Golestan province. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 15(2): 176-182.
13. Palmer, W. C. 1965. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper No. 45.
14. Saniesales, F. 2015. Drought analysis in Chaharmahal and Bakhtiari province by drought index of SPDI (Standardized Palmer Drought Index). M.Sc. Thesis, Natural Resources Department, Isfahan University of Technology.
15. Serinaldi, F., B. Bonaccorso, A. Cancelliere and S. Grimaldi. 2009. Probabilistic characterization of drought properties through copulas. *Physics and Chemistry of the Earth* 34(10-12): 596-605.

16. Shiau, J. T. 2006 Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management* 20(5):795-815
17. Soltani, S., L. Yaghmaei, M. Khodagholi and R. Sabohi. 2011. Bioclimatic classification of Chahar-Mahal & Bakhtiari province using multivariate statistical methods. *Journal of Water and Soil Science* 14(54): 53-68.

Assessment of Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) and Meteoro-Agricultural Drought Monitoring in Chaharmahal and Bakhtiari Porvince

P. Mohit Esfahani^{1*}, S. Soltani¹, R. Modarres¹ and S. Pourmanafi²

(Received: December 1-2019; Accepted: December 29-2019)

Abstract

Drought, as one of the most complicated natural events, causes many direct and indirect damages each year. Hence, single variable identification and monitoring of drought may not be appropriate enough for decision-making and management. In this study, in order to monitor the meteorological-agricultural drought in Chaharmahal and Bakhtiari province, Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) was calculated using precipitation and soil moisture variables. In addition, to evaluate the performance of MSDI in drought identification and monitoring, Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Soil Moisture Index (SSI) were used for meteorological and agricultural drought monitoring, respectively. MSDI was calculated based on the soil moisture and precipitation joint probabilities. We used the Gringorten probability as an empirical method and Archimedean copulas as the parametric method to calculate the joint probability between soil moisture and precipitation time series. The results indicated that MSDI was twice more capable of detecting drought as SSI and SPI. Furthermore, the MSDI-based drought monitoring results showed Charmahal and Bakhtiari province had experienced severe meteorological-agricultural drought in 2000, 2008, 2011 and 2014.

Keywords: Drought, SPI, SSI, Cross Correlation, Copula.

1. Rangeland and Watershed Management, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Enviroment Science, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: p.mohit@na.iut.ac.ir