

معرفی و این کاپولاها در ارزیابی ریسک خشکسالی

فاطمه تیموری^{۱*}، حامد احمدپور^۲

۱- * دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران:

F.Teimouri93@gmail.com

۲- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، رئیس اداره منابع طبیعی شهرستان بستک

چکیده

به عنوان یک خطر طبیعی، خشکسالی یک پدیده چند متغیره پیچیده است که تنها به یک متغیر آب و هواشناسی وابسته نیست و همچنین در نظر گرفتن نوع خاصی از خشکسالی ممکن است برای مدیریت خشکسالی موثر نباشد. از واین کاپولا برای حل روابط غیرخطی و نامتقارن بین شاخص‌های خشکسالی به دلیل انعطاف‌پذیری آن نسبت به سایر انواع کاپولاها در هر مرحله از ساختار سلسله مراتبی در مدل‌سازی با ابعاد بالا استفاده می‌گردد. در این مطالعه به معرفی تابع کاپولای چند بعدی واین که با استفاده از ۴ شاخص SPI، SSI، SPEI و SMDI به طور همزمان منعکس کننده‌ی هواشناسی، هیدرولوژیکی و متغیرهای خشکسالی کشاورزی (بارش، رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک) می‌باشد پرداخته شده است. همچنین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بیانگر آن است که یک شاخص جدید چند متغیره مبتنی بر تابع واین کاپولا با بررسی هم زمان سه خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی می‌تواند موجب بهبود دقت پایش و مدیریت خشکسالی گردد.

واژه‌های کلیدی: واین کاپولا، شاخص یکپارچه خشکسالی، ریسک، خشکسالی

۱-مقدمه

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی مکرر است که به دلیل کمبود آب برای مدت طولانی (فصل یا سال) رخ می‌دهد. خشکسالی‌ها اغلب در مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ گسترش می‌یابند. پدیده‌ی خشکسالی معمولاً با استفاده از شاخص‌های تشخیص و پایش خشکسالی توصیف می‌شود. به طور معمول خشکسالی‌ها به چهار طبقه عمده تقسیم می‌شوند: هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی [1]. خشکسالی هواشناسی با کمبود بارش به عنوان شاخص اصلی شناسایی می‌شود، در حالی که خشکسالی کشاورزی با کمبود رطوبت کل خاک مرتبط است. از سوی دیگر، خشکسالی هیدرولوژیکی با کمبود جریان رودخانه و همچنین منابع آب زیرزمینی مشخص می‌شود. از این رو، درک رابطه بین انواع مختلف خشکسالی و توزیع مکانی-زمانی آن‌ها برای نظارت و برنامه‌ریزی به منظور کاهش آن ضروری است [2].

خشکسالی یک پدیده‌ی چند متغیره است و اثرات آن در ویژگی‌های خشکسالی چند متغیره (مانند مدت، بزرگی و شدت خشکسالی) منعکس می‌شود. ارزیابی ریسک تک متغیره خشکسالی فقط یک ویژگی خشکسالی را در نظر می‌گیرد و قطعاً ویژگی‌های پیچیده رویدادهای خشکسالی را منعکس نمی‌کند. برای شناسایی دقیق رویدادهای خشکسالی، یک شاخص خشکسالی قابل اعتماد ضروری است [3]. شاخص خشکسالی می‌تواند منعکس کننده‌ی ناهنجاری‌ها یا درجات خشکسالی باشد و همچنین مبنایی برای ارزیابی معتبر خطر خشکسالی است. در حال حاضر از شاخص‌های متعدد خشکسالی شامل شاخص‌های تک، چندگانه و ترکیبی برای ارزیابی انواع خشکسالی استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل خشکسالی بر اساس یک متغیر (یا شاخص) ممکن است کافی نباشد زیرا پدیده‌ی خشکسالی با متغیرهای متعددی (به عنوان مثال، بارش، رواناب و رطوبت خاک) مرتبط است. در حالی که شاخص خشکسالی چندگانه متغیرهای بیش‌تری را در نظر می‌گیرد. شاخص خشکسالی منفرد یا شاخص خشکسالی دومتغیره معمولاً می‌تواند منعکس کننده‌ی یک نوع خشکسالی (خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی یا خشکسالی اجتماعی-اقتصادی) باشد [4]. علاوه بر این، شناسایی رویدادهای خشکسالی بر اساس شاخص‌های مختلف خشکسالی کمی با یکدیگر متفاوت است. مهمتر از همه، انواع مختلف خشکسالی ممکن است به طور همزمان رخ دهد و تشخیص آن‌ها دشوار است. بنابراین، شاخص‌های تک و چندگانه خشکسالی برای نشان دادن رابطه‌ی پیچیده بین متغیرهای مختلف کافی نیست. برای غلبه بر این موضوع، شاخص ترکیبی پیشنهاد گردیده است. یک شاخص ترکیبی مستلزم ساخت یک شاخص بر اساس شاخص‌های مختلف خشکسالی است که می‌تواند متغیرهای خشکسالی چند متغیره را به طور همزمان منعکس کند [5].

شاخص‌های ترکیبی خشکسالی ساخته شده با ترکیب خطی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش وزن آنتروپی، همگی یک رابطه خطی را بین شاخص‌های مختلف خشکسالی فرض می‌کنند. بنابراین، برخی از محققین پیشنهاد کردند که از تابع کاپولا برای حل رابطه پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای متعدد استفاده شود. تابع کاپولا روشی است که به طور گسترده در زمینه‌های هیدرولوژیکی مانند تجزیه و تحلیل فراوانی خشکسالی چند متغیره و آب و هواشناسی حدی استفاده شده است. کاپولا یک ابزار آماری انعطاف‌پذیر است که می‌تواند برای ساخت تابع توزیع مشترک با ترکیب توابع توزیع حاشیه‌ای چند متغیره با توجه به ساختار وابستگی استفاده شود. مهم‌تر از همه، مجموعه‌ای از خانواده‌های کاپولا وجود دارد که می‌توانند رابطه غیرخطی، متقارن یا نامتقارن را توصیف کنند. تابع کاپولا همچنین می‌تواند در ابعاد بالاتر برای توصیف انواع خشکسالی‌های متعدد به طور همزمان استفاده شود [6]. کاپولا یک ابزار آماری مهم برای مطالعه‌ی رابطه‌ی بین متغیرهای تصادفی چندگانه است. کاپولا با تمرکز بر چگالی تجمعی توام چندک‌های حاشیه‌ای، ویژگی‌های خاص توزیع‌های حاشیه‌ای را کنار گذاشته و مستقیماً به چگونگی ارتباط آن‌ها توجه می‌نماید. به‌طور کلی فقط به 2 بعد محدود نمی‌شود و می‌توان آن را به اندازه‌ی دلخواه به ابعاد بزرگ‌تر گسترش داد اما به لحاظ عملی یک نقطه‌ی ضعف دارد. وقتی احتمال دانان، نظریه‌ی کاپولا را ایجاد کردند به منظور انجام تجزیه و تحلیل بیش‌تر به لحاظ نظری روی زیرمجموعه‌ی بسیار کوچکی از کاپولاها تمرکز کردند که دارای مفروضات ساختاری دقیق در مورد شکل ریاضی خود هستند در واقع زمانی که تنها دو بعد وجود دارد، در بیش‌تر موارد می‌توانند یک جفت متغیر تصادفی را به خوبی با کاپولای دو متغیره مدل‌سازی نمود. با این حال وقتی که ابعاد بالاتر می‌رود، مدل کاپولا کاملاً سفت و سخت می‌شود و تمایل دارد بسیاری از جزئیات مفید را از دست بدهد. بنابراین واین کاپولا دقیقاً برای رسیدگی به این مشکل مدل‌سازی با ابعاد بالا اختراع شده است. در واین کاپولا به جای استفاده از یک کاپولای π بعدی، چگالی احتمال را به احتمالات شرطی و احتمالات شرطی را به کوپل‌های دومتغیره تجزیه می‌نماییم بنابراین در واین کاپولا ما متغیرهای چند بعدی با ابعاد بالا را به کوپل‌های دو متغیره و چگالی‌های حاشیه‌ای تجزیه می‌گرد. استفاده

از توابع مفصل چند متغیره و این، روشی جدید و بسیار مناسب در تحلیل چند متغیره است. و این کاپولا دارای ساختار چند بعدی است که فقط از جفت کاپولا (کاپولای دو متغیره) تشکیل شده است. برتری و این کاپولا نسبت به کاپولاهای قبلی این است که دارای انعطاف‌پذیری بالایی در مدل‌سازی است و همچنین آزادی کامل برای انتخاب کاپولای دو متغیره در هر مرحله از ساختار سلسله مراتبی را فراهم می‌نماید. روش کار در توابع مفصل چند متغیره این گونه است که مفصل‌ها با پیوند زدن توابع توزیع حاشیه‌ای تک متغیره مختلف، در نهایت یک ساختار از توابع چند متغیره را ایجاد می‌کنند [7]. با این وجود، از آنجایی که مطالعات انجام شده در مورد ساخت شاخص خشکسالی یکپارچه براساس تابع کاپولای و این هنوز محدود است، هدف این مطالعه معرفی و این کاپولا در ارزیابی ریسک خشکسالی می باشد.

1. محاسبه شاخص بارندگی - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنوايت استفاده می‌نماید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (SPEI) تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه i به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه 2 محاسبه می‌شود.

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i} \quad (2)$$

که k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه می‌باشد. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. بدین ترتیب تابع تجمعی احتمال سری داده‌های D براساس تابع لجستیک لگاریتمی به صورت رابطه 3 می‌باشد.

$$F(X) = \left[1 + \left(\frac{a}{\beta - \gamma} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

که α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل و γ پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده $\gamma < D < \infty$ است. بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد. شاخص SPEI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند یک ماه، 3 ماه، 6 ماه، 12 ماه، 24 ماه و 48 ماه محاسبه گردد [8]. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد.

۲- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شاخصی است که بر اساس احتمال بارش برای مقیاس‌های زمانی متفاوت به کار برده می‌شود. همچنین، رخداد شرایط خشکسالی را قبل از وقوع پیش‌بینی می‌کند و به تخمین شدت خشکسالی کمک کرده است. بسیاری از برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان خشکسالی، چند منظوره بودن شاخص بارش استاندارد را درک کرده و به اهمیت فوق‌العاده آن پی برده‌اند. محاسبه شاخص بارش استاندارد شده برای هر منطقه بر اساس ثبت داده‌های بارش در بلند مدت برای یک دوره‌ی دلخواه استوار می‌باشد. بنابراین متوسط بارش استاندارد شده برای هر منطقه و برای هر دوره دلخواهی صفر و انحراف معیار آن یک می‌باشد [9].

۳- شاخص خشکسالی جریان سطحی استاندارد (SSI)

در شاخص جریان سطحی استاندارد از پارامتر دبی رودخانه استفاده شده است. این روش براساس محاسبه تابع توزیع تجمعی برای داده‌های دبی سالانه می‌باشد، در نتیجه برای محاسبه‌ی $F(x)$ از توابع توزیع تجمعی مختلف استفاده گردید تا در نهایت بهترین تابع توزیع تجمعی برای هر ایستگاه مشخص شود، شاخص SSI استفاده از معادله رابطه زیر به دست می‌آید.

$$SSI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1 + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (4)$$

که در معادله بالا مقادیر ثابت عبارتند از: $C_0 = 2/535537$, $C_1 = 0/802853$, $C_2 = 0/030328$, $d_1 = 3/43788$, $d_2 = 0/0189269$, $d_3 = 0/003308$ و مقدار W از معادله $W = \sqrt{-2LN(P)}$ حاصل می‌شود که در آن مقدار P برای $P \leq 0/5$ برابر است با $P = 1 - F(x)$ و برای $P > 0/5$ برابر است با $P = F(x)$ که در این مورد علامت نهایی SSI برعکس می‌شود. مقادیر نهایی SSI نرمال است به طوری که میانگین آن برابر صفر و انحراف معیار آن برابر یک می‌باشد. [10].

۴- محاسبه شاخص خشکسالی مبتنی بر رطوبت خاک حاصل از سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی (GLDAS-SMDI)

شاخص خشکسالی مبتنی بر رطوبت حاصل از سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی در این مطالعه براساس رابطه زیر محاسبه شده است.

$$GLDAS - SMDI_{i;m} = \frac{\frac{1}{IP} \sum_{j=0}^{IP-1} SM_{i;(m-j)}^*}{\frac{1}{(n * IP)} \sum_{k=1}^n [\sum_{j=0}^{IP-1} SM_{i;(m-j)}^*]} * \sqrt{\frac{RL_{m;i}^{(SM^*)}}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RL_{m;k}^{(SM^*)}}} \quad (5)$$

که در آن SM مقدار رطوبت خاک اصلاح شده ماهانه است که رابطه $SM+1$ به دست می‌آید، IP دوره‌ی انتخابی موردنظر، $RL(SM)$ طول دوره‌ی اجرا که برابر با حداکثر تعداد ماه‌های زیر متوسط رطوبت خاک طولانی مدت است، Z مجموع پارامترهای اجرایی پوشش‌دهنده‌ی P و K مجموع پارامتر پوشش‌دهنده‌ی سال‌هایی است که داده‌های مرتبط با آن‌ها در دسترس است. [11].

5- برآزش توزیع‌های تک متغیره بر مشخصه‌های خشکسالی

5-1- توابع توزیع حاشیه‌ای

هرگاه X و Y به عنوان متغیرهای تصادفی یک پدیده فرض شوند، مناسب‌ترین توزیع احتمالی که بدون در نظر گرفتن متغیر تصادفی Y ، بر روی داده‌های متغیر تصادفی X برآزش داده می‌شود، به عنوان تابع توزیع حاشیه‌ای X تعریف می‌گردد. این تعریف برای متغیر تصادفی Y نیز صادق است که در هر دو ساختار تابع چگالی احتمال (PDF) و تابع توزیع تجمعی (CDF) قابل محاسبه و تحلیل هستند [12].

5-2- انتخاب مناسب‌ترین توزیع‌های حاشیه‌ای

پس از آن‌که مقادیر مربوط به مشخصه‌های خشکسالی به‌دست آمد، به کمک نرم‌افزار تجزیه و تحلیل آماری EasyFit توزیع‌های آماری که بیش‌ترین کاربرد در زمینه هیدرولوژی را دارند بر روی این مشخصه‌ها، مورد برآزش و ارزیابی قرار می‌گیرند. در این راستا از آزمون‌های نکویی برآزش از جمله کای اسکوتر، اندرسون-دارلینگ و کولموگروف-اسمیرنوف استفاده می‌شود.

6- تحلیل چند متغیره

6-1- تئوری تابع مفصل

در یک تعریف ساده، تابع مفصل تکنیکی انعطاف‌پذیر است که قادر به اتصال مجموعه‌ای مختلف از توابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای تک متغیره، به یکدیگر بوده و در نهایت منجر به تولید یک تابع تجمعی احتمالاتی چند متغیره می‌شود. به طور کلی تابع مفصل بر وابستگی غیرخطی میان متغیرها مبتنی بوده و توابع حاشیه‌ای و توزیع‌های توأم را به هم پیوند می‌دهد که این پیوندها در حاشیه‌های یکنواخت یک بعدی و در بازه صفر تا یک اتفاق می‌افتد. مفصل‌ها توانایی ترکیب کردن هرگونه توزیع تجمعی احتمالاتی حاشیه‌ای را دارند. بنابراین جهت ساخت یک مدل چند متغیره احتمالاتی از مفصل‌ها، می‌توان توزیع‌های حاشیه‌ای را به صورت مستقل از هم انتخاب نمود و نیازی نیست که توابع حاشیه‌ای همانند توزیع‌های دو متغیره کلاسیک، از توابع خاصی تبعیت کنند. همچنین روش مفصل می‌تواند میزان همبستگی متغیرها را در قسمت‌های مختلف توزیع توأم احتمال مورد تحلیل قرار دهد که این قابلیت در سایر روش‌ها جهت شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی دیده نمی‌شود. تابع مفصل، قادر به اتصال توزیع‌های حاشیه‌ای برای P متغیر تصادفی $(F_1(X_1), F_2(X_2), \dots, F_p(X_p))$ و همچنین تابع توزیع توأم آن‌ها $(F(X_1, X_2, \dots, X_p))$ می‌باشد [13].

6-2- تابع مفصل سری واین

مفصل واین نرمال یک مدل گرافیکی است که توسط بدفورد و کوک^۱ برای توزیع‌هایی با ابعاد بالاتر ارائه گردید. واین نرمال متشکل از یک ساختار کلی است که خود آن نیز از تعداد زیادی مفصل دو بعدی تشکیل شده است. در این راستا سه زیرخانواده مهم از واین‌های منظم R-Vine، سی-واین (C-Vine) و دی-واین (D-Vine) تعریف شده‌اند، که هریک از واین‌ها روش مشخصی را در جهت تجزیه و تحلیل تابع چگالی ارائه می‌دهند. مفصل‌های R-Vine ساختار مشخصی ندارند و هر گره می‌تواند با رعایت شرط مجاورت و بیش‌ترین همبستگی به گره دیگر متصل شود. مجموعه درختان C-Vine یک ساختار ستاره‌ای دارند که در هر درخت آن یک گره ریشه‌ای به دیگر گره‌ها متصل می‌شود. در حالی که D-Vine ها ساختار مسیر مانند داشته و در هر درخت

¹ Bedford and Cooke

هیچ گرهی نمی‌تواند درجه بیش از 2 داشته باشد. می‌توان انواع و این‌ها را از روی شکل گرافیکی آن‌ها تشخیص داد، زیرا و این‌ها حاصل از اتصال مجموعه‌ای از درخت‌ها هستند که از لحاظ ترتیب و نحوه اتصال متغیرها باهم متفاوت هستند. ساختار هر کدام از و این‌ها متشکل از مجموعه‌ای گره (دایره) و لبه (خط) می‌باشد. در این ساختارها گره‌ها و لبه‌ها به ترتیب معرف همان متغیرها (X) و تابع‌های مفصل دو بعدی (C) هستند. کلیه تجزیه و تحلیل‌ها در یک ساختار دی-واین n بعدی، توسط $\frac{n(n-1)}{2}$ لبه (مفصل دو متغیره) صورت می‌گیرد. همچنین مشخص بودن گره‌ها در هر درخت T_j° جهت تشخیص نمایه لبه‌ها در درخت T_{j+1} ضروری است. یکی از مزیت‌های سری واین، انتخاب خانواده‌های مفصل متفاوت برای هر لبه است [14].

7- معیارهای انتخاب مناسب‌ترین تابع مفصل

7-1- معیار اطلاعات آکائیک (AIC)^۲

این معیار که بر مبنای مفهوم آنتروپی استوار است، توسط هیروئوگو آکائیک^۳ ارائه گردید. این معیار قادر است یک تعادل میان دقت مدل با پیچیدگی آن برقرار کند که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AIC = -2LnML + 2K \quad (6)$$

که در آن $LnML$ بیانگر لگاریتم مقدار حداکثر تابع درست‌نمایی و K نیز برابر است با تعداد پارامترهای تابع مفصل. با توجه به داده‌ها ممکن است رتبه‌بندی چندین مدل با این معیار صورت گیرد و در نهایت مدلی که کمترین AIC را به خود اختصاص داده است، به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب می‌گردد.

7-2- معیار اطلاعاتی بیزی (BIC)^۴

معیار اطلاعات بیزی توسط گیدون^۵ معرفی گردید که به عنوان یک ابزار مفید در محاسبات آماری جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل بین تعداد محدودی از مدل‌ها بکار گرفته می‌شود. محاسبه این معیار نیز بر اساس تابع درست‌نمایی و حجم نمونه بوده که با معیار ارزیابی آکائیک ارتباط نزدیکی دارد. هرگاه داده‌های مشاهداتی دارای تعدادی بیش‌تر از تعداد پارامترها بود، استفاده از این معیار پیشنهاد می‌گردد که در قالب رابطه زیر قابل تعریف است.

$$BIC = -2L(\theta) + 2Ln(n)k \quad (7)$$

که در آن $L(\theta)$ معرف لگاریتم-درست‌نمایی، k برابر تعداد پارامترها و n نیز تعداد داده‌ها است [15].

8- تحقیقات کاربردی واین کاپولاها در ارزیابی ریسک خشکسالی

در این بخش تحقیقات کاربردی واین کاپولاها در ارزیابی ریسک خشکسالی ارائه شده است.

² Akaike information criterion

³ Akaike

⁴ Bayesian information criterion

⁵ Gideon

12th National Conference on Iranian Rainwater Catchment Systems

(The role of rainwater harvesting methods in revitalizing arid and semi-arid microclimates of Iran)

Feb 13-14, 2024, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

استحصال آب باران و نقش آن در احیا و پایداری
خرد اقلیم‌های مناطق خشک، نیمه خشک و آبخیزهای ساحلی

۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۴۰۲

جدول (1) - نمونه تحقیقات انجام شده در تحلیل چندمتغیره خشکسالی

نویسنده	روش شناسی	چالش و مسئله مورد نظر	داده ها/ متغیرها/ منطقه‌ی تحقیق
[16]	شاخص خشکسالی رواناب (JSDI)	شناسایی خشکسالی هیدرولوژیکی و ارزیابی جریان محیطی	داده‌های جریان و بارش / آلمان، چین و ایالات متحده
[17]	کاپولای چند بعدی	تحلیل جامع ویژگی‌های خشکسالی	متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی (بارش، رواناب، و رطوبت خاک) / چین
[18]	کاپولا	بررسی ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی	داده‌های بارش ماهانه 102 ایستگاه سینوپتیک / ایران
[19]	شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق	پیش‌بینی آماری کاپولا خشکسالی	تبخیر و تعرق، بارش و خواص خشکسالی (شدت، S؛ مدت، D؛ شدت، I) / چین
[20]	واین کاپولا	پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی	داده‌های رطوبت خاک با زمان پیش‌بینی ۱ تا ۲ ماهه برای فصل تابستان (یعنی آگوست در یک مقیاس زمانی ۶ ماهه) / چین
[21]	آنالیز همبستگی متعارف (CCA)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و روش مبتنی بر کاپولا	ارزیابی ریسک خشکسالی آب و هواشناسی	شاخص‌ها بارش و رواناب است که داده‌های تاریخی دوره 1986 تا 2016 در مقیاس زمانی 12 ماهه / حوضه‌های کل مهران و بندر-سدیج / ایران

ادامه جدول (1) - نمونه تحقیقات انجام شده در تحلیل چندمتغیره خشکسالی

نویسنده	روش شناسی	چالش و مسئله مورد نظر	داده ها/ متغیرها/ منطقه‌ی تحقیق
[22]	C-vine کاپولا	پیش‌بینی جریان ماهانه	رویدادهای سیل / حوزه‌ی آبخیز رودخانه خیابانگخی / چین
[23]	کاپولای چند بعدی	ارزیابی خطر خشکسالی هیدرولوژیکی	JDI چند متغیره (شاخص کاهش رواناب)، شدت (S)، مدت (D) و بزرگی (M) / حوضه رودخانه کرخه / ایران
[24]	واین کاپولا	تجزیه و تحلیل چند متغیره بارندگی و نشانه‌های کمبود آن	بارندگی سالانه و کمبود بارندگی در دوره های 10، 30 و 60 روزه / ایران
[25]	روش ترکیبی ماشین یادگیری و کاپولا	تخمین احتمال گسترش خشکسالی هواشناسی به خشکسالی اکولوژیکی	رویدادهای خشکسالی هواشناسی و اکولوژیکی طی سال‌های 1982 تا 2020 / چین

12th National Conference on Iranian Rainwater Catchment Systems

(The role of rainwater harvesting methods in revitalizing arid and semi-arid microclimates of Iran)

Feb 13-14, 2024, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

استحصال آب باران و نقش آن در احیا و پایداری
خرد اقلیم‌های مناطق خشک، نیمه خشک و آب‌خیزهای ساحلی

۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۴۰۲

شاخص خشکسالی یکپارچه (IDI)، با ترکیب چهار شاخص خشکسالی تک متغیره (شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)، شاخص رطوبت (SSI) خاک استاندارد شده و شاخص خشکسالی جریان استاندارد شده (SDI)	بررسی شاخص خشکسالی یکپارچه	واین کاپولا	[26]
--	----------------------------	-------------	------

9- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، تعداد بی‌شماری از رویدادهای شدید، مانند امواج گرما و خشکسالی ناگهانی، بسیاری از مناطق در سراسر جهان را فراگرفته است و خشکسالی باعث زیان اقتصادی قابل توجهی در سراسر جهان شده است. این رویدادهای شدید شروع سریع چند روزه یا چند هفته‌ای دارند و منجر به اثرات مخربی بر تولیدات کشاورزی، امنیت منابع آب و رفاه انسان می‌شوند. بنابراین، پیش‌بینی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی دقیق‌تر (به عنوان مثال، هفتگی) برای مدیران و سیاست‌گذاران جهت مدیریت و برنامه‌ریزی مصرف آب ضروری است. همانطور که بیان شد خشکسالی یک پدیده‌ی چند متغیره است و اثرات آن در ویژگی‌های خشکسالی چند متغیره (مانند مدت، بزرگی و شدت خشکسالی) منعکس می‌شود و ارزیابی ریسک به صورت تک متغیره نمی‌تواند همه‌ی ویژگی‌های خشکسالی پوشش دهد، برای شناسایی دقیق رویدادهای خشکسالی، یک شاخص خشکسالی قابل اعتماد ضروری است، از آنجایی که در واین کاپولا به جای استفاده از یک کاپولای n بعدی، چگالی احتمال را به احتمالات شرطی و احتمالات شرطی را به کوپل‌های دو متغیره تجزیه می‌گردد، بنابراین در واین کاپولا متغیرهای چند بعدی با ابعاد بالا به کوپل‌های دو متغیره و چگالی‌های حاشیه‌ای تجزیه می‌گردد. استفاده از توابع مفصل چند متغیره واین، روشی جدید و بسیار مناسب در تحلیل چند متغیره است. واین کاپولا دارای ساختار چند بعدی است که فقط از جفت کاپولا (کاپولای دو متغیره) تشکیل شده است. بنابراین روش واین کاپولا در ارزیابی ریسک خشکسالی مفید واقع گردد.

10- مراجع

- [1] Heim, R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. Bull. Am. Meteorol. Soc. 83, 1149-1165.
- [2] Mishra, A. K., and V. P. Singh, 2010. A review of drought concepts, J. Hydrol., 391(1-2): 202-216.
- [3] Maity, R., Suman, M., Verma, N.K., 2016. Drought prediction using a wavelet based approach to model the temporal consequences of different types of droughts. J. Hydrol. 539, 417-428.
- [4] Cammalleri, C., Micale, F., Vogt, J., 2015. A novel soil moisture-based drought severity index (DSI) combining water deficit magnitude and frequency. Hydrol. Process. 30(2), 289-301.
- [5] Xu, K., Yang, D., Xu, X., Lei, H., 2015. Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China. J. Hydrol. 527, 630-640.

12th National Conference on Iranian Rainwater Catchment Systems

(The role of rainwater harvesting methods in revitalizing arid and semi-arid microclimates of Iran)

Feb 13-14, 2024, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

دوازدهمین همایش ملی
سامانه‌های سطوح آبگیر باران

استحصال آب باران و نقش آن در احیا و پایداری
خرد اقلیم‌های مناطق خشک، نیمه خشک و آب‌خیزهای ساحلی

۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۴۰۲

- [6] Hao, Z., Singh, V.P., 2015. Drought characterization from a multivariate perspective: a review. *J. Hydrol.* 527, 668–678.
- [7] Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N.T. and Rosso, R. (2007). *Extremes in nature: an approach using copulas*, Springer, Dordrecht.
- [8] Vicente-Serrano S M, Beguería S, LópezMoreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*; 2010; 23: 1696-1718.
- [9] Etedali, H., Nehavi, M., Nik Mehr, S., Ahmad Ali, KH. (2011). Spatial analysis of SPI and SIAP drought indices in Kerman province.
- [10] Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S.M. and Lóp Moreno, J.I., 2013. Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns, *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17(1), p. 105-119.
- [11] Balint, Z., Mutua, F.M. & Muchiri, P. (2011). “Drought Monitoring with the Combined Drought Index”. *Journal of Methodology and Software*. FAO-SWALIM Nairobi, Kenya:1-28.
- [12] Beare, B. K. and J. Seo (2014). Time irreversible copula-based markov models. *Econometric Theory* 30 (5), 923-960.
- [13] Nelsen, R.B., 2006. *An Introduction to Copulas*. Springer, New York. MR2197664.
- [14] Chang, B., & Joe, H. (2019). Prediction based on conditional distributions of vine copulas. *Computational Statistics & Data Analysis*, 139, 45-63.
- [15] Nagler, T., Krüger, D., & Min, A. (2022). Stationary vine copula models for multivariate time series. *Journal of Econometrics*, 227(2), 305-324.
- [16] Li, Z., Zhou, P., Chen, X., & Guan, Y. (2016). A multivariate conditional model for streamflow prediction and spatial precipitation refinement. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(19), 10-116.
- [17] Yang, J., Chang, J., Wang, Y., Li, Y., Hu, H., Chen, Y., ... & Yao, J. (2018). Comprehensive drought characteristics analysis based on a nonlinear multivariate drought index. *Journal of Hydrology*, 557, 651-667.
- [18] 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.
- [19] Dayal, K. S., Deo, R. C., & Apan, A. A. (2020). Development of copula-statistical drought prediction model using the standardized precipitation-evapotranspiration index. In *Handbook of Probabilistic Models* (pp. 141-178). Butterworth-Heinemann.
- [20] Wu, H., Su, X., Singh, V. P., Feng, K., & Niu, J. (2021). Agricultural drought prediction based on conditional distributions of vine copulas. *Water Resources Research*, 57(8), e2021WR029562.
- [21] Azhdari, Z., Bazrafshan, O., Zamani, H., Shekari, M., & Singh, V. P. (2021). Hydro-meteorological drought risk assessment using linear and nonlinear multivariate methods. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 123, 103046.
- [22] Li, H., Huang, G., Li, Y., Sun, J., & Gao, P. (2021). A C-Vine Copula-Based Quantile Regression Method for Streamflow Forecasting in Xiangxi River Basin, China. *Sustainability*, 13(9), 4627.
- [23] Bazrafshan, O., Shekari, M., Zamani, H., Dehghanpir, S., & Singh, V. P. (2021). Assessing hydrologic drought risk using multi-dimensional copulas: case study in Karkheh River basin. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-22.
- [24] Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2022). Multivariate analysis of rainfall and its deficiency signatures using vine copulas. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2005-2018
- [25] Jiang, T., Su, X., Zhang, G., Zhang, T., & Wu, H. (2022). Estimating propagation probability from meteorological to ecological droughts using a hybrid machine learning-Copula method. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-27.

Introducing vine copulas in drought risk assessment

Fatemeh Teimouri^{1*}, Hamed Ahmadpour²

1. Ph.D Student, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran: F.Teimouri93@gmail.com
2. PhD in Watershed Science and Engineering, Head of Natural Resources Department of Bastak

Abstract

As a natural hazard, drought is a complex multivariate phenomenon that is not dependent on only one hydro meteorological variable, and considering a specific type of drought may not be effective for drought management. Vine copula is used to solve non-linear and asymmetric relationships between drought indicators due to its flexibility compared to other types of copulas at each stage of the hierarchical structure in high-dimensional modeling. In this study, we introduce the multi-dimensional Copula function, which reflects the meteorological, hydrological and agricultural drought variables (rainfall, runoff, evaporation and transpiration, and soil moisture) using 4 indices SPI, SSI, SPEI and SMDI at the same time. Also, the research conducted in this field indicates that a new multivariable index (rainfall-runoff-soil moisture and evaporation and transpiration) based on the vine-Copula function by simultaneously examining three meteorological, hydrological and agricultural droughts can improve accuracy monitor and manage drought.

Key words: Vine Copula, Integrated Drought Index, Risk, Drought.