



Joint Analysis of Meteorological Drought Characteristics Based on SPI and CRU Senario

Morteza Samadian¹ | Esmail Asadi² | Mohammad Ali Gorbani³ |
Farshad Ahmadi⁴

1. Department of Water Science and Engineering, Water Resources, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: samadian.morteza@gmail.com
2. Corresponding Author, Water Science and Engineering Department, Water Resources, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: es-asadi@tabrizu.ac.ir
3. Department of Water Science and Engineering, Water Resources, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: ghorbani@tabrizu.ac.ir
4. Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: f.ahmadi@scu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: November 08, 2022
Received in revised form:
January 08, 2023
Accepted: April 03, 2023
Published online: April 14, 2023

Keywords:

Climate Senarios,
Copula Functions,
Drought,
Statistical extension.

ABSTRACT

There are two limitations in the analysis of drought characteristics, which this study has investigated and resolved. First, the limitation of the length of the statistical period regarding the presentation of meteorological drought characteristics and the other is the frequency analysis. The first case was solved by using CRU climate data and the second case by using copula functions in this research. In this study, while checking the accuracy of the rainfall values extracted from the CRU climate model on a monthly scale, the frequency analysis of drought severity and duration characteristics based on the SPI index in the Zarinerood basin has been analyzed. The results of the investigations showed that the values of the CRU scenario have a suitable accuracy and error rate with the observational data and have a suitable efficiency based on Nash-Sutcliffe criterion, more than 0.72. By extending the statistical period to 60 years, the SPI index was estimated in the studied area, which indicates the increase in the severity and duration of droughts in recent years. 45 percent of the studied statistical period had a lack of rainfall and 8% of the studied months were faced with severe drought. By choosing the distribution of generalized extreme values and logistic for drought severity and duration series in the studied stations, Frank's copula was selected for drought severity-duration pair variable. The results of investigation and joint analysis of drought severity - duration pair variables led to the presentation of drought probability curves in the region, which estimate the regional characteristics of drought with different probabilities. The presented approach has better performance than the historical period and univariate analysis due to the increase of time series memory and the use of joint distribution and copula functions and shows the characteristics of drought better.

Cite this article: Samadian, M., Asadi, E., Gorbani, M. A., & Ahmadi, F. (2023). Joint Analysis of Meteorological Drought Characteristics Based on SPI and CRU Senario. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (1), 189-207. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.350918.1030>





تحلیل هم‌زمان مشخصات خشکسالی هواشناسی مبتنی بر SPI و سناریوی CRU

مرتضی صمدیان^۱ | اسماعیل اسدی^۲ | محمدعلی قربانی^۳ | فرشاد احمدی^۴

۱. گروه علوم و مهندسی آب، منابع آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: samadian.morteza@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، منابع آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: es-asadi@tabrizu.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی آب، منابع آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: ghorbani@tabrizu.ac.ir

۴. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: f.ahmadi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

در تحلیل مشخصه‌های خشکسالی به صورت هم‌زمان دو محدودیت وجود دارد که این مطالعه به بررسی و رفع آن‌ها پرداخته است. اول، محدودیت طول دوره آماری در خصوص نمایان‌سازی مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی و دیگری تحلیل فراوانی هم‌زمان می‌باشد. مورد اول با استفاده از داده‌های اقلیمی CRU و مورد دوم با استفاده از توابع مفصل در این پژوهش مرتفع شد. در این مطالعه، ضمن بررسی دقت مقادیر بارش مستخرج از مدل اقلیمی CRU در مقیاس ماهانه به تحلیل فراوانی هم‌زمان مشخصه‌های شدت و مدت خشکسالی مبتنی بر شاخص SPI در حوضه آبریز زربینه‌رود پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مقادیر سناریو CRU دقت و میزان خطای مناسبی با داده‌های مشاهداتی داشته و از کارایی مناسبی با توجه به آماره نش- ساتکیف بیش از ۰/۷ برخوردار می‌باشند. با تطویل دوره آماری به ۶۰ سال، شاخص SPI در منطقه مورد مطالعه برآورد شد که نشان‌دهنده افزایش شدت و مدت خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر می‌باشد. نتایج نشان داد که ۴۵ درصد دوره آماری مورد بررسی با کمبود بارش و هشت درصد ماه‌های مورد بررسی نیز با خشکسالی شدید روبه‌رو بوده‌اند. با انتخاب توزیع مقادیر حدی و لجستیک برای سری‌های شدت و مدت خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، مفصل فرانک برای جفت متغیر شدت- مدت خشکسالی انتخاب شد. نتایج بررسی و تحلیل هم‌زمان جفت متغیر شدت- مدت خشکسالی منجر به ارائه منحنی‌های احتمال وقوع هم‌زمان در منطقه شد که مشخصات منطقه‌ای خشکسالی را با احتمالات مختلف برآورد می‌کنند. رویکرد ارائه شده به دلیل افزایش حافظه سری زمانی و به کارگیری توزیع هم‌زمان و توابع مفصل از عملکرد بهتری نسبت به دوره تاریخی و تحلیل تک‌متغیره برخوردار بوده و هم‌چنین نسبت به دوره تاریخی، مشخصه‌های خشکسالی را بهتر نمایان می‌سازد.

کلیدواژه‌ها:

تطویل آماری،

توابع مفصل،

سناریوهای اقلیمی،

خشکسالی.

استناد: صمدیان، م.، اسدی، ا.، قربانی، م. ح. و احمدی، ف. (۱۴۰۲). تحلیل هم‌زمان مشخصات خشکسالی هواشناسی مبتنی بر SPI و سناریوی CRU.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۱)، ۱۸۹-۲۰۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.350918.1030>



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین معضلاتی که امروزه بشر با آن روبه‌رو بوده و در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی و روند افزایش تدریجی گرم‌شدن کره زمین اثرات آن تشدید یافته است، خشکسالی است که هم در مناطق خشک و هم در مناطق مرطوب مشاهده می‌شود. در مقیاس جهانی شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها در دهه‌های اخیر افزایش یافته است و شدت وقوع آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیش‌تر از دیگر مناطق اقلیمی می‌باشد (Saadat *et al.*, 2013). طبق گزارش پنجم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) دمای سطح زمین در پایان قرن ۲۱ به اندازه ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ افزایش خواهد یافت (IPCC, 2013). مطالعات مختلفی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی در ایران و جهان مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور مثال، Meresa *et al.* (2016) در پژوهشی شرایط خشکسالی آینده را با استفاده از شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) با استفاده از داده‌های هیدروکلیمایی مشاهداتی و استفاده از آن‌ها در پیش‌بینی‌های متغیرهای اقلیمی (بارش و دما) ۱۰ حوضه آبریز لهستان در دوره مرجع ۲۰۰۰-۱۹۷۱ و دو دوره ۳۰ ساله آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و آینده بسیار دور ۲۱۰۰-۲۰۷۱ برای تخمین تغییرات شرایط خشکسالی آینده مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که فقط پیش‌بینی‌های SPEI شرایط خشک‌تری را در حوضه‌های آبریز در دوره آینده دور نشان می‌دهد. دو شاخص دیگر SPI و SRI نشان‌دهنده آب‌وهوای مرطوب در آینده است. Lee *et al.* (2017) تأثیر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی در دشت وانگا کره شمالی را از سال ۱۹۸۱ تا ۲۱۰۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که خشکسالی شدید احتمالاً در آینده در نتیجه تغییرات آب‌وهوایی اتفاق می‌افتد. Chiang *et al.* (2021) با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI تولید شده از مجموعه‌ای از نه مدل CMIP6 نشان دادند که فعالیت‌های انسانی، فراوانی خشکسالی، حداکثر مدت خشکسالی و حداکثر شدت خشکسالی تجربه شده در بخش‌های بزرگی از قاره آمریکا، آفریقا و آسیا را افزایش داده است. آن‌ها در مطالعه خود یک توصیف جامع از تأثیر نیروی انسانی بر مشخصه‌های خشکسالی ارائه کردند. Mirgol *et al.* (2021) شرایط مکانی و زمانی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه برای دوره‌های گذشته (۲۰۱۷-۱۹۸۸) و آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۸۰) را با استفاده از پنج مدل گردش عمومی (GCMs) تحت سناریوهای IPCC (هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که دوره‌های آبی نسبت به دوره‌های مشاهده شده تحت تمامی سناریوها از نظر روند خشکسالی و مدت زمان خشکسالی، با شرایط خشکسالی کم‌تری مواجه خواهند شد، اما فراوانی خشکسالی‌های شدید فصلی در دوره‌های آبی بیش‌تر از دوره مشاهده شده خواهد بود. هم‌چنین ایستگاه‌های ارومیه (کرانه غربی) و تبریز و مراغه (کرانه‌های شرقی) با بیش‌ترین فراوانی انواع خشکسالی فصلی در دوره‌های آبی نسبت به دوره مشاهده شده مواجه است. هم‌چنین آن‌ها بیان کردند که فراوانی بالای پیش‌بینی شده خشکسالی برای دوره‌های آبی می‌تواند وضعیت کم‌آبی فعلی دریاچه ارومیه را تشدید کند که به‌طور جدی انواع اکوسیستم‌های حوضه را تهدید می‌کند.

در مطالعات مختلف، پژوهش‌گران شرایط خشکسالی‌ها را براساس مشخصه‌های شدت و مدت توصیف نموده و اغلب مطالعات بر مبنای این دو مشخصه انجام شده است. شناخت چندمتغیره از ویژگی‌های پدیده‌های هیدرولوژیکی نظیر سیلاب یا خشکسالی برای برنامه‌ریزی، توسعه و طراحی بهینه سامانه‌های منابع آب ضروری است. برای اولین بار Snyder (1962) و Wong (1963) شیوه‌های تحلیل چندمتغیره را برای متغیرهای هیدرولوژیکی به‌کار گرفتند و سپس این روش در مدل‌سازی خصوصیات بارش، خشکسالی و سیلاب توسط پژوهش‌گران مختلف کاربردی شده است. در اکثر این مطالعات مدل‌های دومتغیره کاربردی شده و بر یکی از فرضیات زیر استوار بودند (Mirabbasi *et al.*, 2012): الف-

متغیرهای مورد بررسی از توزیع‌های آماری یکسانی پیروی می‌کردند، ب- همه داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کرده یا قابل تبدیل به توزیع نرمال هستند، ج- متغیرها کاملاً مستقل از هم بوده و وابستگی ندارند (Mirabbasi *et al.*, 2012). اما در شرایط واقعی متغیرهای هیدرولوژیک به یکدیگر وابسته بوده و به‌ندرت از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همچنین این فرض که دو متغیر توزیع یکسانی داشته باشند نیز همیشه صادق نبوده و این امر امکان استفاده از روش‌های تحلیل چندمتغیره معمول را با مشکلات فراوانی همراه می‌کند (Ahmadi *et al.*, 2018). بنابراین در این مطالعه به‌منظور بررسی جامع‌تر خشکسالی‌ها از شیوه آماری توابع مفصل استفاده شد. توابع مفصل مشکلات روش‌های چندمتغیره معمول را نداشته و توانسته‌اند در سال‌های اخیر به‌عنوان یک شیوه مناسب در تحلیل چندمتغیره پدیده‌های هیدرولوژیک مطرح شوند (Ahmadi *et al.*, 2018). اما استفاده از مفصل‌ها برای داده‌های ثبت‌شده فعلی نمی‌تواند دیدگاه دقیقی را برای مدیریت این پدیده در اختیار قرار دهد. از این‌رو، نیاز است تا آمار درازمدت منطقه مورد مطالعه در دسترس قرار گیرد. Azizabadi *et al.* (2016) با در نظر گرفتن سناریوهای اقلیمی و خروجی‌های مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت سه سناریو RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی خشکسالی در حوزه آبریز قره‌سو، استان گلستان، ایران در دوره آینده پرداختند. در خصوص ریزمقیاس نمایی آماری آن‌ها از مدل SDSM برای دوره ۲۰۴۸-۲۰۱۹ استفاده کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که متغیرهای بارش و دمای ماهانه در حوضه، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و در دوره پایه، دوره بازگشت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۱۰ و مدت برابر یا کم‌تر از شش ماه، پنج سال می‌باشد. Olusola *et al.* (2018) جهت برآورد فراوانی خشکسالی چندمتغیره در هفت منطقه آب‌وهوایی چین بین سال‌های ۱۹۶۱ و ۲۰۱۳ از توابع سه لایه سه‌بعدی، یعنی کلایتون (Clayton)، علی-میخائیل-حق (AMH)، گامبل-هوگارد (Gumbel-Hougaard) و فرانک (Frank) استفاده کردند. نتایج نشان داد که مفصلی کلایتون در مدل‌سازی وابستگی هم‌زمان متغیرهای خشکسالی در مقایسه با کلاس دیگر مفصل‌ها عملکرد بهتری دارد. Ramezani *et al.* (2019) در مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی خشکسالی‌های منطقه جنوب غربی آسیا (ایران، افغانستان، پاکستان و ترکمنستان) از شاخص کمبود هم‌زمان (JDI) در دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۱ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که تعداد ماه‌های خشک در منطقه مورد مطالعه (به‌ویژه در مناطق مرطوب ایران) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. همچنین روند تغییرات مقادیر JDI در مقیاس سالانه در منطقه مورد مطالعه کاهش یافته و میزان کاهش در JDI و افزایش تعداد ماه‌های خشک در ایران قابل‌توجه بوده است که نشانگر افزایش خشکسالی در ایران، به‌ویژه در زمستان است. Nazeri Tahroudi *et al.* (2020a) روش جدیدی برای مدل‌سازی وقوع متغیرهای مرتبط براساس تراکم شرطی توابع مفصل برای بررسی پویایی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه زربنه‌رود (جنوب‌شرقی دریاچه ارومیه) طی دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۹۴ انجام دادند. تجزیه و تحلیل هفت تابع مفصلی مختلف برای ایجاد توزیع هم‌زمان نشان داد که مفصل فرانک بهترین عملکرد را در توصیف رابطه بین شدت و مدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی دارد. همچنین با دانستن تراکم شرطی، می‌توان به‌راحتی مشخصات خشکسالی هیدرولوژیکی را برای مشخصات خشکسالی هواشناسی برآورد کردند. Nazeri Tahroudi *et al.* (2022) به‌منظور تحلیل مقادیر کمبود بارش و کمبود دبی جریان در حوضه آبریز سیمینه‌رود، جنوب دریاچه ارومیه، ایران از توابع مفصل استفاده کردند. آن‌ها با تحلیل هم‌زمان مقادیر کمبود، بیان کردند که مقادیر کمبود دبی جریان را می‌توان با دقت بالا برای مقادیر معلوم کمبود بارش مشخص تخمین زد. با توجه به معادله پیشنهادی آن‌ها، مقادیر کمبود دبی جریان را می‌توان تحت تأثیر مقادیر کمبود بارش برای مدت دوام ۱۰ روز با اطمینان و دقت بالا پیش‌بینی کرد.

در مطالعات تغییر اقلیم و بررسی خشکسالی در مناطق مختلف، طول دوره آماری بسیار اهمیت دارد، زیرا حافظه بلندمدت داده‌ها بهتر می‌تواند مشخصه‌های خشکسالی از قبیل شدت و مدت را نمایان سازد. از این‌رو، هرچه طول دوره آماری بیش‌تر باشد، مشخصه‌های خشکسالی و تحلیل آن‌ها با قطعیت بالاتری ارائه خواهد شد که در بیش‌تر ایستگاه‌های مورد مطالعه طول دوره آماری کافی وجود ندارد. یکی از راه‌های تطویل دوره آماری استفاده از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی می‌باشد که فیزیک مسئله رعایت نمی‌شود. در این صورت لزوم استفاده از مدلی که بتواند جایگزین مقادیر اصلی شود، از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از مدل‌های مهم می‌تواند مدل مبتنی بر سناریو واحد تحقیقات اقلیمی یا CRU باشد. بدین منظور در این پژوهش از داده‌های اقلیمی CRU (نسخه ۴/۳) استفاده شده است تا اطلاعات مورد نیاز بارش برای بیش از نیم‌قرن گذشته مورد بررسی قرار گیرد و برای آینده نیز در صورت نیاز با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم، تحلیل‌های لازم قابل اجرا خواهد بود. با دسترسی به این اطلاعات می‌توان دیدگاه بسیار مناسبی از شرایط خشکسالی درازمدت به‌دست آورده و شرایط مدیریتی مربوط به خشکسالی‌ها را با اطمینان بیش‌تری تدوین نمود. این مدل با توجه به ابعاد شبکه آن، می‌تواند دقت کافی در شبیه‌سازی مقادیر بارش در هر منطقه داشته باشد. بر این اساس، در این مطالعه دو هدف اصلی مدنظر است؛ ۱- بررسی دقت و میزان خطای مقادیر CRU در ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز زرینه‌رود و ۲- تحلیل دومتغیره و هم‌زمان مقادیر شدت و مدت خشکسالی مبتنی بر SPI در منطقه مورد مطالعه با استفاده از توابع مفصل و مقادیر CRU. حوضه آبریز مورد مطالعه نیز با توجه به این‌که یکی از بزرگ‌ترین زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه بوده و هم‌چنین به‌دلیل وجود داده‌های کامل‌تر به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زرینه‌رود یکی از زیرحوضه‌های اصلی و مهم دریاچه ارومیه می‌باشد. این حوضه در محدوده شهرستان‌های میاندوآب، شاهین‌دژ و تکاب در استان آذربایجان غربی و شهرستان سقز در استان کردستان و بخش کوچکی در آذربایجان شرقی قرار گرفته است. سد بوکان، سد اصلی مورد بهره‌برداری در این حوضه بوده و از آن برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب استفاده می‌شود. در شکل (۱)، موقعیت حوضه آبریز زرینه‌رود و ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مشخصات آماری داده‌های مورد بررسی نیز به‌صورت جدول (۱) می‌باشد. در این مطالعه، سه ایستگاه هواشناسی میاندوآب، بوکان و تکاب در محدوده استان آذربایجان غربی که دوره آماری کامل‌تری دارند، مورد استفاده قرار گرفت.

۲.۲. شاخص خشکسالی SPI

تعیین روند گسترش زمانی و مکانی خشکسالی‌ها با بهره‌گیری از شاخص‌های خشکسالی امکان‌پذیر می‌باشد. در واقع استفاده از این شاخص‌ها، امکان کمی‌سازی تغییرات اقلیمی را فراهم می‌شود. شاخص خشکسالی SPI توسط McKee et al. (1993) به‌عنوان جایگزین شاخص PDSI و به‌منظور کمی‌سازی کاهش بارش به‌عنوان یک ابزار پایش خشکسالی و نشانگر شرایط خشکسالی برای ایالت کلرادو آمریکا توسعه داده شد. برای محاسبه SPI یک توزیع احتمالاتی بر داده‌های بلندمدت بارش ثبت‌شده برازش داده می‌شود (عموماً توزیع گاما) که در نهایت به توزیع نرمال انتقال داده می‌شود. تا به امروز شاخص SPI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی در سطح جهان کاربرد بیش‌تری داشته است که دلیل آن نیاز به داده‌های ورودی کم‌تر و انعطاف‌پذیری در محاسبه آن می‌باشد (Ahmadi et al., 2022).

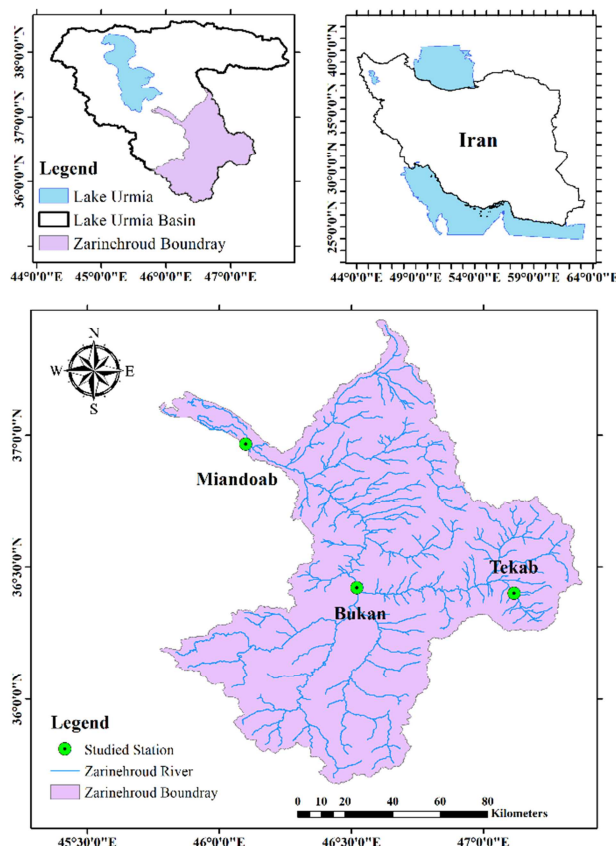


Figure 1. The location of Zarinchroud River Basin and the studied meteorological stations

Table 1. Characteristics of observed rainfall data in the study area

Station	Max Rainfall (mm)	Mean Rainfall (mm)	STD. Rainfall (mm)	Elevation (m)	Established year	Primary period
Bukan	132.21	29.23	31.22	1480	1345	2005-2019
Tekab	165.72	27.47	28.73	1380	1365	1986-2019
Miandoab	133.20	23.35	26.45	1295	1343	2002-2019

۳.۲ داده‌های اقلیمی CRU

واحد تحقیقات آب‌وهوایی (CRU)^۱ وابسته به دانشگاه شرق آنجلیا (East Anglia) در انگلستان؛ یکی از مؤسسات پیشرو در زمینه مطالعه تغییرات طبیعی و انسانی آب‌وهوا می‌باشد که به تهیه و انتشار تعدادی از مجموعه داده‌های آب‌وهوایی با تفکیک‌های مختلف می‌پردازد. CRU مجموعه داده‌های سری زمانی این مؤسسه با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه جغرافیایی است که نسخه چهار آن دوره زمانی ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۹ و تمام خشکی‌های سطح زمین (به‌جز قطب جنوب) را پوشش می‌دهد. این مجموعه داده شامل شش متغیر آب‌وهوایی مستقل دمای متوسط، دامنه دمای روزانه، بارش، تعداد روزهای بارانی، فشار بخار آب و پوشش ابر می‌باشد. دمای حداکثر و حداقل نیز از این متغیرها و براساس رابطه‌های زیر محاسبه شده‌اند. متغیرهای ثانویه از قبیل فراوانی روزهای یخبندان، تبخیر- تعرق نیز از شش متغیر اولیه با استفاده از فرمول‌های شناخته‌شده نظیر پنمن-مانتیس برآورد می‌شود. روابط (۱) و (۲) به ترتیب حداقل دما و حداکثر دما را برآورد می‌کنند (Harris et al., 2014; Mitchell et al., 2005).

$$TMN = TMP - \frac{DTR}{2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$TMX = TMP - \frac{DTR}{2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روابط، TMN حداقل دما، TMX حداکثر دما، DTR نوسان روزانه دما و TMP متوسط دما است. مجموعه داده‌های واحد آب‌وهوایی CRU به‌طور مستقیم از داده‌های بازبینی‌شده بیش از ۴۰۰۰ ایستگاه‌های زمینی در خشکی‌ها به‌دست می‌آید. منبع این داده‌ها در مقیاس جهانی عبارتند از داده‌های ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی وابسته به سازمان هواشناسی جهانی، داده‌های ماهانه آب‌وهوا جهانی تهیه‌شده توسط مرکز ملی داده‌های آب‌وهوایی ایالات‌متحده، داده‌های دهه‌ای رکوردهای جهانی هوا که بین سرویس‌های ملی هواشناسی و مرکز ملی داده‌های آب‌وهوایی ایالات‌متحده تبادل می‌شود. علاوه بر این، از اطلاعات و داده‌های دیگری که حاصل تبادل با سایر دانشمندان و مؤسسات آب‌وهوایی است (نظیر سازمان هواشناسی استرالیا و کانادا) و در قالب سری داده‌های آب‌وهوایی منتشر می‌شود، نیز استفاده می‌گردد. این مجموعه داده به‌طور خاص همگن نیست، زیرا بسیاری از مشاهدات اغلب توسط سازمان‌های ملی هواشناسی قبل از انتشار همگن می‌شوند (Harris et al., 2014). برای تبدیل شبکه نامنظم داده‌ها به شبکه منظم نیز از روش‌های درون‌یابی به‌ویژه Thin-plate splines استفاده می‌شود که جزئیات چگونگی درون‌یابی به‌طور کامل توسط New et al. (1999) تشریح شده است.

۴.۲. تصحیح بایاس

مدل‌های جهانی آب‌وهوا (GCM) منبع اولیه اطلاعات برای ساخت سناریوهای آب‌وهوایی بوده‌اند و مبنایی را برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم تغییر آب‌وهوا در همه مقیاس‌ها، از محلی تا جهانی را فراهم می‌کنند. با این حال، مطالعات تأثیرات تغییر اقلیم به‌ندرت به‌طور مستقیم از خروجی‌های GCM استفاده می‌کنند، زیرا مدل‌های آب‌وهوایی به‌دلیل وضوح فضایی محدود، فیزیک ساده‌شده و فرایندهای ترمودینامیکی، طرح‌های عددی یا دانش ناقص فرایندهای سیستم آب‌وهوایی، خطای سیستماتیک (سوگیری‌ها) را نشان می‌دهند. خطاها در شبیه‌سازی GCM نسبت به مشاهدات تاریخی زیاد است. از این‌رو، اصلاح جهت‌گیری خروجی‌های مدل آب‌وهوای خام به‌منظور تولید پیش‌بینی‌های اقلیمی که مناسب‌تر برای مدل‌سازی کشاورزی هستند، مهم است. رویکرد تصحیح سوگیری یا تصحیح بایاس (BC)^۲ مطابق رابطه (۳)، خروجی GCM خام پیش‌بینی‌شده را با استفاده از تفاوت در میانگین و تنوع بین GCM و مشاهدات در یک دوره مرجع تصحیح می‌کند.

$$R_{BC}(t) = \bar{O}_{REF} + \frac{\sigma_{O,REF}}{\sigma_{T,REF}} (T_{RAW}(t) - \bar{T}_{REF}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، O_{REF} برابر با مشاهدات در دوره مرجع تاریخی، T_{REF} برابر با خروجی GCM از دوره مرجع تاریخی، T_{RAW} برابر با خروجی خام GCM برای دوره تاریخی یا آینده و R_{BC} برابر با خروجی GCM تصحیح شده است (Ishizaki et al., 2020).

۵.۲. توابع مفصل و تئوری اسکالر

توابع مفصل، ابزار مناسبی در مدل‌سازی همبستگی متغیرهای تصادفی وابسته می‌باشند. برای شناسایی تابع مفصل با بهترین برازش با توجه به مشاهدات لازم است چند خانواده از این توابع بررسی شوند. مفصلی مناسب است که به بهترین شکل ساختار وابستگی بین متغیرها را توصیف کند. این توابع یک شیوه انعطاف‌پذیر برای ایجاد توزیع‌های

همزمان آماری با توابع توزیع حاشیه‌ای متفاوت می‌باشند. به عبارتی دیگر، مفصل تابعی است که توابع توزیع حاشیه‌ای تک‌متغیره را برای تشکیل یک تابع توزیع دو یا چندمتغیره، به هم ارتباط می‌دهد. در استفاده از روش مفصل مشابه بودن نوع توزیع‌های حاشیه‌ای الزامی نیست. این مزیت انعطاف‌پذیری بیشتری را برای انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای تک‌متغیره مناسب که به خوبی بر داده‌های مشاهده شده برازش دارند، ارائه می‌دهد (Ahmadi et al., 2018). مفصل‌ها یک شیوه انعطاف‌پذیر برای ایجاد توزیع‌های همزمان آماری با توابع توزیع حاشیه‌ای متفاوت می‌باشند. مفصل‌ها توابع توزیع چندمتغیره هستند که حاشیه‌های یک‌بعدی آن‌ها بر بازه صفر و یک یکنواخت باشند. معرفی و ارائه مفصل به Sklar (1959) نسبت داده شده است که در یک تئوری توصیف می‌کند چگونه توابع توزیع تک‌متغیره می‌تواند به فرم توزیع‌های چندمتغیره ترکیب شوند. اسکالر نشان داد که برای متغیرهای تصادفی پیوسته d بعدی $\{X_1, \dots, X_d\}$ با CDFهای حاشیه‌ای $u_j = F_{x_j}(x_j)$ که $j = 1, \dots, d$ ، یک مفصل d بعدی یکنای $C_{U_{x_1, \dots, x_d}}$ وجود دارد به طوری که:

$$C_{U_1, \dots, U_d}(U_1, \dots, U_d) = H_{X_1, \dots, X_d}(X_1, \dots, X_d) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، u_j : زامین حاشیه و H_{X_1, \dots, X_d} همان CDF همزمان $\{X_1, \dots, X_d\}$ می‌باشد. چون برای متغیرهای تصادفی پیوسته تابع CDF حاشیه‌ها از صفر تا ۱ غیر کاهشی می‌باشند، می‌توان مفصل $C_{U_{x_1, \dots, x_d}}$ را به عنوان تبدیل H_{X_1, \dots, X_d} از $[-\infty, \infty]^d$ به $[0, 1]^d$ در نظر گرفت. نتیجه این تبدیل این است که توزیع‌های حاشیه‌ای از H_{X_1, \dots, X_d} جدا می‌شوند و بنابراین، C_{U_1, \dots, U_d} تنها به ارتباط بین متغیرها مربوط می‌شوند و توصیف کاملی از ساختار وابستگی کلی ارائه می‌دهند (Nelsen, 2006). برای تخمین پارامتر وابستگی مفصل در این مطالعه از روش توابع منطقی برای حاشیه‌ها (IFM) که متداول‌ترین روش برای تخمین پارامترهای مفصل است، استفاده شد (Joe, 1997). برای موارد دومتغیره، فرض شد دو متغیر تصادفی همبسته X و Y به ترتیب به صورت توابع $f_X(x; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$ و $f_Y(y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ توزیع شده‌اند که $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ پارامترهای $f_X(x)$ و $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ پارامترهای $f_Y(y)$ هستند. تعداد واقعی پارامترها بستگی به نوع توزیع‌های حاشیه‌ای تک‌متغیره دارد. برای n جفت مشاهده مستقل، تابع لگاریتم درست‌نمایی برای X و Y یعنی $\ln L_X(x; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$ و $\ln L_Y(y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$ به طور مجزا جهت تخمین پارامترها بیشینه شدند. $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_p$ و $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_r$ پارامترهای تخمینی می‌باشند. تابع لگاریتم درست‌نمایی تابع چگالی احتمال همزمان $f_{X,Y}(x, y)$ به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته شد:

$$\ln L(x, y; \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_p, \hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_r, \theta) = \ln L_C(x, y; F_X(x), F_Y(y), \theta) + \ln L_X(x; \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_p) + \ln L_Y(y; \hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_r) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، $\ln L_C$ تابع لگاریتم درست‌نمایی تابع چگالی مفصل‌ها می‌باشند. با جای‌گذاری مقادیر تخمین زده شده برای $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_p$ و $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_r$ در معادله ۳، تابع لگاریتم درست‌نمایی $\ln L$ برای به دست آوردن پارامتر مفصل تخمینی $\hat{\theta}$ بیشینه می‌شود. برای انتخاب مناسب‌ترین مفصل، پارامتر تابع مفصل با روش IFM (Joe, 1997) برآورد می‌شود. سپس با مقایسه نتایج هر کدام از مفصل‌ها با نتایج حاصل از احتمال تجربی، مفصل مناسب برای داده‌های مورد نظر انتخاب می‌شود. مفصل‌های خانواده ارشمیدسی مورد بررسی در این مطالعه به صورت روابط (۶) تا (۹) می‌باشد:

۱- کلاپتون

$$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}, \quad \theta \geq 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

۲- فرانک

$$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right], \theta \neq 0 \quad \text{رابطه (۷)}$$

۳- علی- میخائیل- حق

$$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}, -1 \leq \theta \leq 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این مطالعه، بهترین برازش توزیع مفصل، توزیع مفصل تجربی غیرپارامتری محاسبه و با مقادیر پارامتری مقایسه شد. برای یک مورد هم‌زمان دوعده‌ای، مفصل تجربی داده‌های مشاهده‌شده (u_i, v_i) به شرح رابطه (۹) است:

$$C_e(u_i, v_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I \left(\frac{Q_i}{n+1} \leq u_i, \frac{P_i}{n+1} \leq v_i \right) \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در این رابطه، C_e برابر با مفصل تجربی، n تعداد مشاهدات و $I(A)$ پارامتر شاخص^۴ عبارت منطقی A است. چنانچه عبارت A صحیح باشد، مقدار یک و اگر نادرست باشد مقدار صفر را اختیار می‌کند. P_i و Q_i رتبه داده مشاهداتی i ام مربوط به شدت و مدت خشکسالی هواشناسی مبتنی بر شاخص SPI می‌باشد.

۲.۶. شاخص‌های ارزیابی

در این مطالعه، از شاخص‌های ارزیابی مختلف از جمله جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) و ضریب تعیین R^2 به شرح روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n-1}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$R^2 = \left[\frac{n \left(\sum_{i=1}^n (S_i O_i) \right) - \left(\sum_{i=1}^n (S_i) \right) \left(\sum_{i=1}^n (O_i) \right)}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (S_i^2) - \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (O_i^2) - \left(\sum_{i=1}^n O_i \right)^2 \right]}} \right]^2 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن، S_i برابر با مقادیر محاسباتی، O_i برابر با مقادیر مشاهداتی، \bar{O}_i برابر با متوسط مقادیر مشاهداتی و n نیز برابر با تعداد سری زمانی است (Nash and Sutcliffe, 1970; Raji et al., 2022). از آنجایی که هدف بررسی همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی، برآورد میزان خطا و بررسی کارایی مدل منتخب است به ترتیب از آماره‌های ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی نش ساتکلیف استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

در ادامه نتایج حاصل از بررسی شاخص SPI در ایستگاه‌های مورد مطالعه به همراه مقادیر شدت و مدت آن ارائه شده است. در این مطالعه از شاخص SPI، توابع مفصل خانواده ارشمیدسی و توابع حاشیه‌ای رایج در هیدرولوژی و منابع آب استفاده شده است.

۱.۳. برآورد دقت و میزان خطای مقادیر CRU در منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه ضمن بررسی و دقت مقادیر CRU در ایستگاه‌های مورد مطالعه به برآورد خشکسالی هواشناسی در منطقه مورد مطالعه براساس شاخص SPI پرداخته شد. در ابتدا به بررسی دقت داده‌های CRU پرداخته شد. میزان خطا و کارایی مدل CRU به ترتیب با استفاده از آماره RMSE و R^2 برای دوره آماری مشترک بررسی شد. نتایج بررسی دو آماره یادشده در ایستگاه‌های بوکان، تکاب و میاندوآب به صورت شکل‌های (۲) تا (۴) ارائه شد.

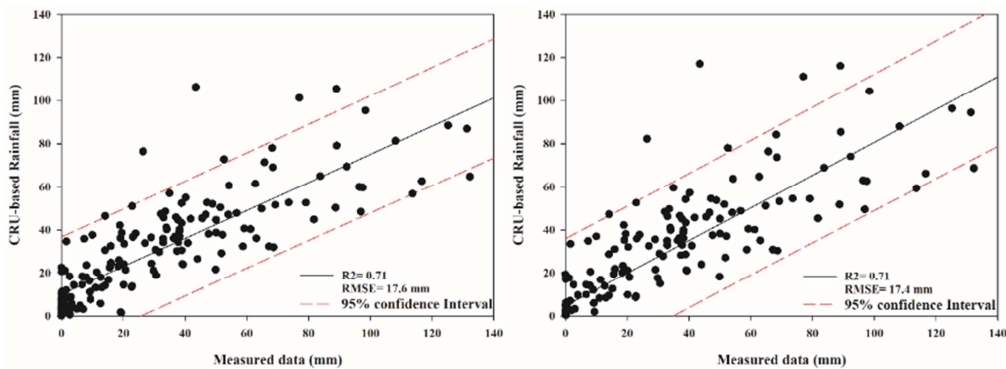


Figure 2. Scattering plot of simulated data based on CRU and observed values of rainfall on a monthly scale in Bukan station (Left: before applying bias correction, right: after applying bias correction)

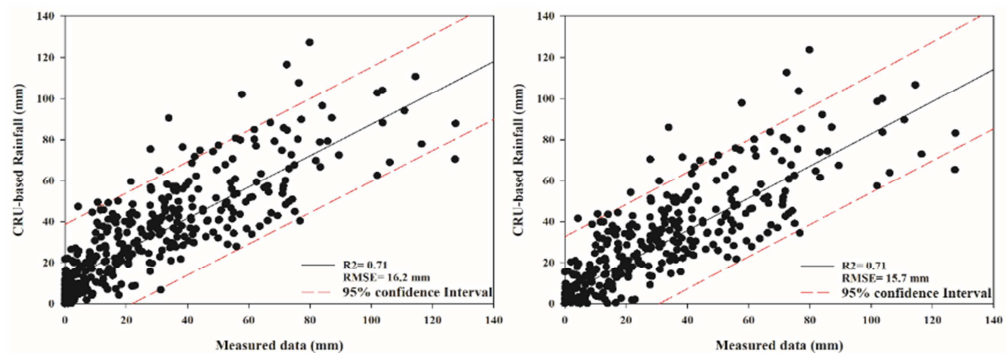


Figure 3. Scattering plot of simulated data based on CRU and observed values of rainfall on a monthly scale in Tekab station (Left: before applying bias correction, right: after applying bias correction)

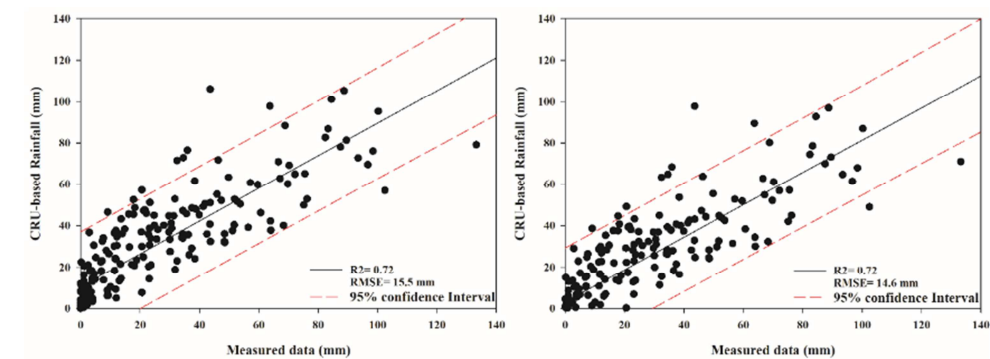


Figure 4. Scattering plot of simulated data based on CRU and observed values of rainfall on a monthly scale in Miandoab station (Left: before applying bias correction, right: after applying bias correction)

نتایج مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی مبتنی بر *CRU* نشان داد که همبستگی قابل‌قبولی بین این دو سری وجود دارد. میزان خطای بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی مبتنی بر *CRU* در ایستگاه‌های بوکان، تکاب و میاندوآب با توجه به شکل‌های ۲- چپ، ۳- چپ و ۴- چپ به ترتیب ۱۷/۶، ۶/۲ و ۱۵/۵ میلی‌متر می‌باشد که این ارقام نسبت به حالت اولیه با تصحیح بایاس به ترتیب حدود یک، سه و شش درصد کمتر شده است. تصحیح بایاس در خصوص داده‌های *CRU* در هر ایستگاه نشان داد که این روش می‌تواند میزان اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی مبتنی بر *CRU* را کاهش دهد. با توجه به شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) می‌توان مشاهده کرد که عمده تغییرات داده‌های تحت سناریوی *CRU* در محدوده اطمینان ۹۵ درصد شبیه‌سازی قرار گرفته است که تأییدی بر داده‌های تحت سناریو *CRU* در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. علاوه بر آماره‌های یادشده، ضریب کارایی مدل نیز با توجه به آماره *NSE* برای داده‌های تصحیح‌شده به صورت جدول (۲) ارائه شد. با توجه به جدول (۲) و ضریب کارایی بیش از ۷۲ درصد، کارایی مقادیر مستخرج‌شده نیز تأیید می‌شود. ضریب کارایی، دقت و میزان خطای مقادیر مستخرج از سناریو *CRU* با توجه به مطالب ارائه‌شده و شاخص‌های آماری قابل‌قبول می‌باشد. Ramezani Etedali and Ababaei (2021) نیز در مطالعات خود مبنی بر تحلیل تغییرات مکانی بارش‌های مستخرج از سناریوی *CRU*، دقت این داده‌ها را مورد قبول عنوان کردند.

Table 2. The results of the Nash-Sutcliffe statistic between the observed rainfall values and the corrected *CRU* values

Station	NSE
Bukan	0.73
Tekab	0.72
Miandoab	0.75

۲.۳. برآورد خشکسالی هواشناسی مبتنی بر شاخص *SPI*

در نهایت با استفاده از مقادیر بارش مستخرج از سناریو *CRU* در منطقه مورد مطالعه در دوره آماری ۱۹۵۷-۲۰۱۹، شاخص خشکسالی هواشناسی *SPI* در مقیاس‌های شش، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه و به صورت شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) ارائه شد.

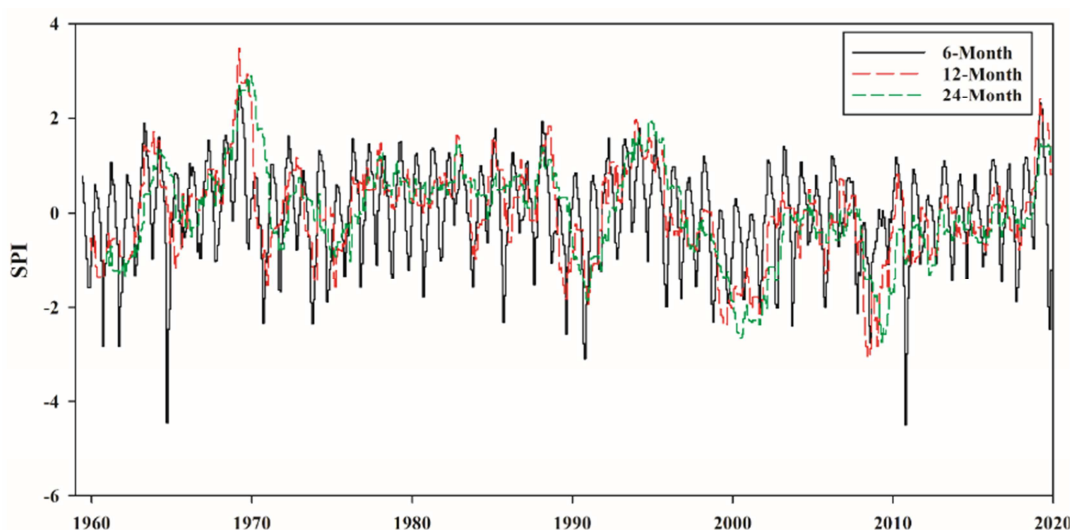


Figure 5. The results of extracting the *SPI* index in the scales of 6, 12 and 24 months at Bukan station in the period of 1959-2019

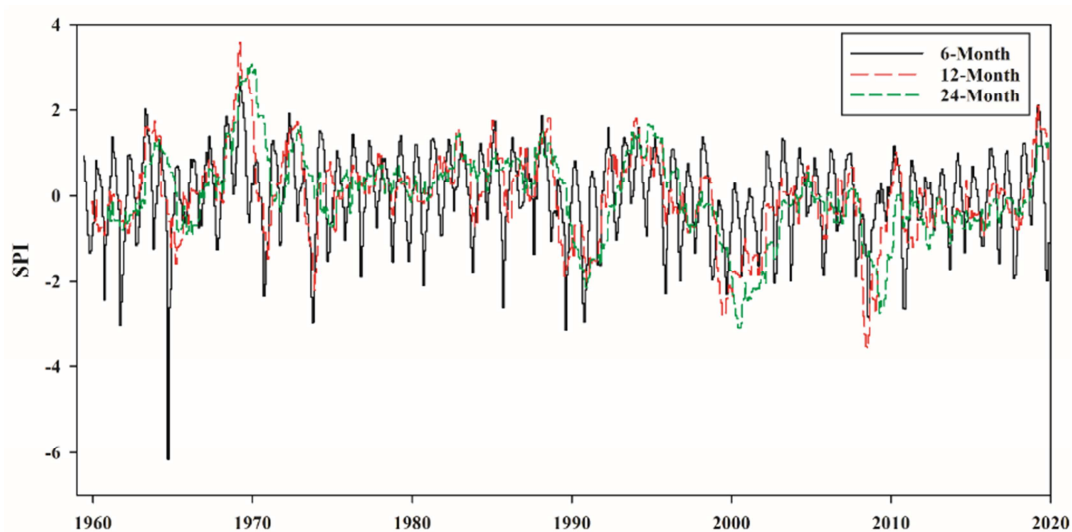


Figure 6. The results of extracting the SPI index in the scales of 6, 12 and 24 months at Tekab station in the period of 1959-2019

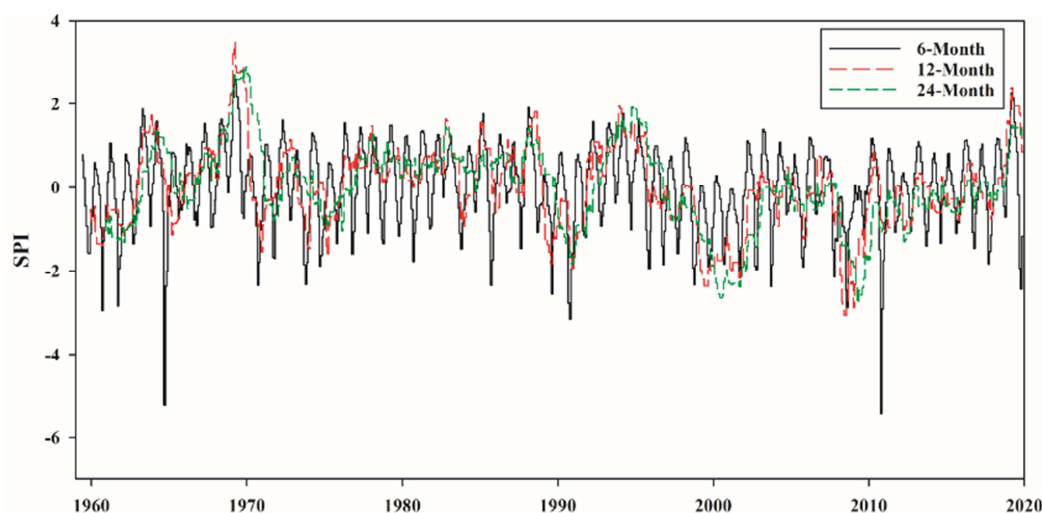


Figure 7. The results of extracting the SPI index in the scales of 6, 12 and 24 months at Miandoab station in the period of 1959-2019

با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) می‌توان روندی مشابه در تغییرات مقادیر SPI در منطقه مورد مطالعه مشاهده کرد. در ایستگاه بوکان، ۴۶ درصد ماه‌ها مقادیری منفی و ۵۴ درصد ماه‌ها مقادیری مثبت از شاخص SPI کسب کردند که نشان‌دهنده وقوع خشکسالی در ۴۶ درصد دوره زمانی مورد بررسی می‌باشد. شدیدترین خشکسالی نیز در ایستگاه بوکان با توجه به شکل (۵) در سال‌های ۱۹۶۵ و ۲۰۱۰ رخ داده است که با توجه به شکل‌های (۶) و (۷)، در ایستگاه‌های دیگر نیز این کاهش شدید مقادیر SPI مشاهده می‌شود. در ایستگاه تکاب، در ۴۵ درصد دوره آماری مورد بررسی، مقادیر SPI منفی به دست آمده است. در ایستگاه میاندوآب، تعداد وقوع خشکسالی همانند ایستگاه بوکان و برابر با ۴۶ درصد ماه‌ها است. می‌توان مشاهده کرد که کمتر از نیمی از دوره آماری مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه خشکسالی وجود دارد. مطالعات مختلفی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد که این کاهش بارش‌ها را تأیید می‌کند (Khalili *et al.*, 2016; Mirabbasi Najafabadi *et al.*, 2017; Tahroudi and Khalili, 2017; Ramezani *et al.*, 2020; Nazeri

(۵) و (۶) و (۷) می‌توان روند کاهشی مقادیر SPI را مشاهده کرد. کاهش مقادیر SPI در واقع افزایش خشکسالی‌ها را نشان می‌دهد.

۳.۳. استخراج مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی (شدت و مدت)

با استفاده از تئوری ران به استخراج مشخصه‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. مدت خشکسالی و شدت خشکسالی در ایستگاه‌های بوکان، تکاب و میاندوآب استخراج و به صورت شکل (۸) ارائه شد. مدت خشکسالی یک دوره منفی پیوسته SPI است، درحالی که شدت خشکسالی به عنوان مقادیر تجمعی SPI در دوره خشکسالی تعریف می‌شود. با توجه به شکل (۸) می‌توان مشاهده کرد که مدت خشکسالی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. به طوری که در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ در مناطق مورد مطالعه در هر ۱۲ ماه کمبود بارش مشاهده شده است. شدت خشکسالی نیز در سال‌های اخیر کاهش یافته که کاهش مقادیر SPI را نشان می‌دهد. روند تغییرات مقادیر شدت و مدت خشکسالی هواشناسی مستخرج از شاخص SPI با استفاده از آزمون من-کندال اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت (Nazeri, Tahroudi et al., 2020b) و نتایج نشان داد که روند تغییرات مقادیر شدت خشکسالی در ایستگاه‌های بوکان، تکاب و میاندوآب کاهشی غیرمعنی‌دار در سطح پنج درصد بوده و مقادیر آماره Z در ایستگاه‌های بوکان، تکاب و میاندوآب به ترتیب برابر با $-۰/۹۴$ ، $-۰/۴۹$ و $-۰/۸۷$ می‌باشد. روند تغییرات مدت خشکسالی نیز در طی دوره آماری مورد بررسی افزایشی و در سطح پنج درصد غیر معنی‌دار می‌باشد. آماره آزمون من-کندال اصلاح شده نیز در طی دوره آماری مورد بررسی در ایستگاه‌های بوکان، تکاب و میاندوآب به ترتیب برابر با $۱/۶۲$ ، $۱/۶۸$ و $۱/۰۹$ می‌باشد.

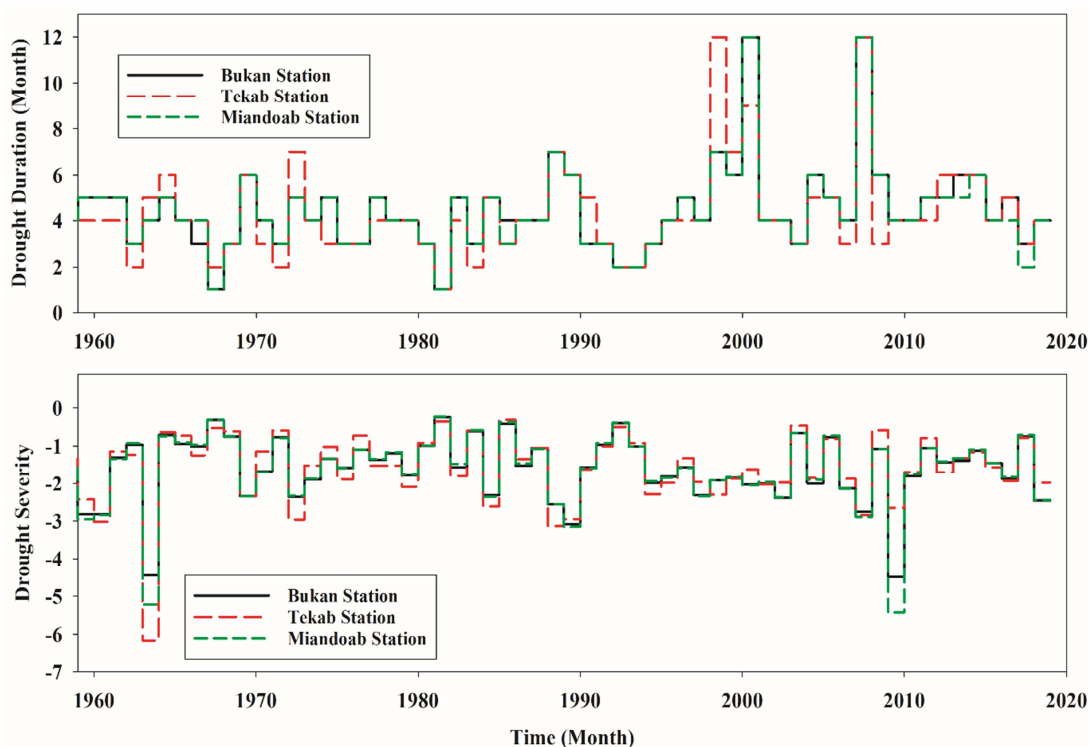


Figure 8. Changes in duration and severity of SPI meteorological drought index in the studied stations

۴.۳. برآورد احتمال وقوع همزمان با استفاده از توابع مفصل

در ابتدا به بررسی توزیع‌های حاشیه‌ای متناسب با مقادیر شدت (Ds) و مدت (Dd) خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. براساس آماره‌های RMSE و NSE به بررسی توزیع‌های متناسب با داده‌های مورد بررسی پرداخته شد. نتایج برازش توزیع‌های برتر به صورت جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

براساس آماره‌های ارائه شده در جدول (۳) می‌توان مشاهده کرد که توزیع‌های GEV و Logistic بهترین برازش را با داده‌های شدت و مدت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه دارند. ضریب کارایی بیش از ۹۳ درصد (NSE) نیز تأییدکننده برازش برتر توزیع‌های منتخب می‌باشد. با انتخاب توزیع‌های حاشیه‌ای متناسب با داده‌های مورد مطالعه، به بررسی مفصل‌های متناسب با جفت سری مدت- شدت (Ds-Dd) در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. در این خصوص از مفصل‌های خانواده ارشمیدس شامل مفصل‌های کلایتون، گامبل، فرانک و علی-میخائیل-حق استفاده شد. با مقایسه مفصل‌های یادشده با مفصل تجربی، نتایج برترین مفصل‌ها به صورت جدول (۴) ارائه شد.

با توجه به جدول (۴) می‌توان مشاهده کرد که برای جفت متغیر Dd-Ds در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، مفصل برتر، مفصل فرانک می‌باشد. مفصل فرانک کم‌ترین میزان RMSE و بیش‌ترین میزان NSE را در تمامی ایستگاه‌ها کسب کرد. Nazeri Tahroudi et al. (2020) نیز در مطالعات خشکسالی در حوضه آبریز زرينه‌رود از مفصل فرانک استفاده کردند. میزان کارایی مفصل فرانک در برازش جفت متغیر Dd-Ds بیش از ۹۴ درصد می‌باشد. با انتخاب پارامتر مفصل بهینه، تحلیل فراوانی همزمان جفت متغیر Dd-Ds مورد بررسی قرار گرفت. نتایج برآورد احتمال وقوع همزمان جفت متغیر Dd-Ds در ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت شکل‌های (۹) تا (۱۱) ارائه شد.

مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی به صورت همزمان قابل بیان هستند. این مشخصات با توجه به وجود همبستگی بین خود، به صورت تک‌متغیره نمی‌توانند واژه خشکسالی را تعریف کنند. به همین دلیل نیاز است که این مشخصات به صورت همزمان و شرطی تحلیل شوند. توابع مفصل یکی از روش‌های کارآمد بوده که توانایی تحلیل فراوانی همزمان را فراهم کرده است. این توابع در مطالعات مختلف در زمینه هواشناسی و تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفته و دقت و کارایی آن‌ها تأیید شده است (Khashei et al., 2022; Khashei-Siukui et al., 2021; Pronoos Sedighi et al., 2022; Tabatabaei et al., 2022; Nazeri Tahroudi et al., 2021&2022).

Table 3. The results of selecting the best marginal distributions according to the intensity and duration of meteorological drought

Station	Drought Characteristics	Dist.	RMSE	NSE
Bukan	Dd	Logistic	6.89	0.94
	Ds	GEV	2.29	0.99
Tekab	Dd	GEV	7.78	0.93
	Ds	Logistic	2.29	0.99
Miandoab	Dd	Logistic	7.04	0.94
	Ds	Logistic	2.73	0.99

Table 4. The results of examining and fitting two-dimensional copulas on the pair-variables of drought duration-severity series

Station	Pair-variable	Copula	RMSE	NSE	Copula parameter
Bukan	Dd-Ds	Frank	0.06	0.96	19.85
Tekab	Dd-Ds	Frank	0.07	0.94	17.35
Miandoab	Dd-Ds	Frank	0.06	0.96	19.82

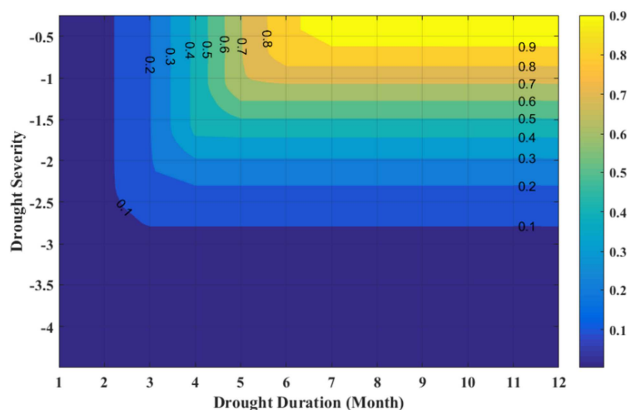


Figure 9. The results of estimating the probability of occurrence of meteorological drought intensity and duration with different probabilities in Bukan station

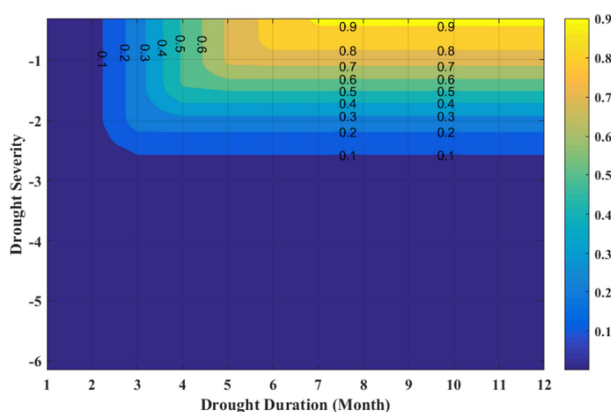


Figure 10. The results of estimating the probability of occurrence of meteorological drought intensity and duration with different probabilities in Tekab station

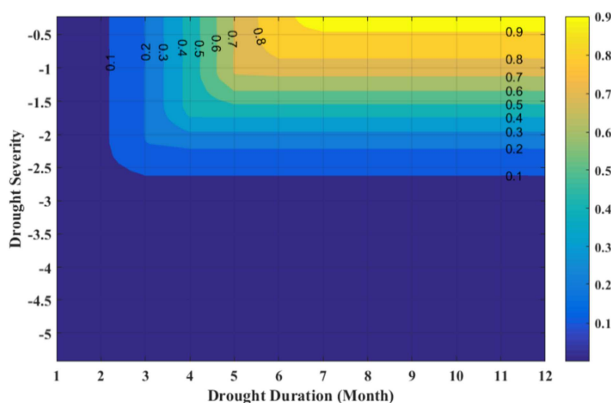


Figure 11. The results of estimating the probability of occurrence of meteorological drought intensity and duration with different probabilities in Miandoab station

با توجه به شکل (۹) می‌توان مشاهده کرد که مقادیر مختلف مدت خشکسالی با توجه به شدت‌های مختلف و احتمالات مختلف قابل برآورد می‌باشد. به‌طور مثال، در صورتی که مدت خشکسالی در ایستگاه بوکان هفت ماه باشد، با احتمالات مختلف نظیر ۵۰ و ۹۰ درصد می‌توان شدت خشکسالی هواشناسی را به ترتیب حدود $1/5$ و $1/6$ تخمین زد. به‌طور مشابه می‌توان

مقادیر موردانتظار دیگری نیز با احتمالات مختلف برای ایستگاه بوکان تخمین شد. با توجه به شکل (۱۰) نیز با احتمالات ۵۰ و ۹۰ درصد می‌توان شدت خشکسالی هواشناسی متناظر با مدت دوام هفت‌ماهه خشکسالی در ایستگاه تکاب را به ترتیب حدود ۱/۵- و ۰/۴- برآورد کرد که بسیار شبیه به ایستگاه بوکان می‌باشد. این اعداد در ایستگاه میان‌دوآب نیز مطابق شکل (۱۱) شبیه به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. با افزایش احتمال در شکل‌های ارائه شده، شدت خشکسالی هواشناسی کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه معکوس بین احتمال وقوع و دوره بازگشت، در یک مدت مشخص خشکسالی، با افزایش احتمال وقوع، دوره بازگشت شدت خشکسالی کاهش می‌یابد. در کنار آن، میزان شدت خشکسالی نیز کاهش می‌یابد. کاهش دوره بازگشت شدت خشکسالی نشان‌دهنده وقوع تقریباً هر ساله خشکسالی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به‌طور کلی، منحنی‌های فراوانی هم‌زمان ارائه شده در این پژوهش، منحنی‌های تیپ متناسب با شرایط ایستگاه‌های مورد بررسی می‌باشد. این منحنی‌ها با توجه به این‌که براساس توزیع حاشیه‌ای داده‌ها و توزیع هم‌زمان مشخصه‌های خشکسالی تولید شده‌اند، مختص هر ایستگاه بوده و متناسب با شرایط منطقه می‌باشند. از این‌رو، این منحنی‌ها در تخمین شدت و مدت خشکسالی در هر منطقه با احتمالات مختلف قابل بهره‌برداری می‌باشند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، جهت تحلیل فراوانی هم‌زمان شدت و مدت خشکسالی هواشناسی در زیرحوضه زرينه‌رود و ایستگاه‌های هواشناسی بوکان، تکاب و میان‌دوآب در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۵۹ در مقیاس ماهانه از داده‌های بارش مستخرج از سناریوی CRU استفاده شد. در ابتدا به بررسی دقت داده‌های مستخرج از سناریو CRU پرداخته شد. بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک به حافظه بلندمدتی نیاز دارد، زیرا برخی ویژگی‌های خشکسالی‌ها در دوره‌های آماری کوتاه‌مدت نمایان نمی‌شود. در برخی ایستگاه‌های موجود در ایران به دلایل مختلفی تعداد داده‌های ثبت شده کم می‌باشد و این کمبود داده‌ها یکی از محدودیت‌های برآورد خشکسالی و برآورد ویژگی‌های آن می‌باشد. داده‌های مستخرج از سناریو CRU با توجه به توزیع شبکه‌ای و با در نظر گرفتن مشخصات جغرافیایی می‌تواند دقت بالایی در تخمین داده‌های ناموجود و افزایش طول دوره آماری داشته باشد. نتایج بررسی دقت و میزان خطای داده‌های مستخرج از سناریوی CRU نشان داد که داده‌های مستخرج همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی داشته و از میزان خطای کمی برخوردار می‌باشند. با توجه به فرارگیری این داده‌ها در محدوده اطمینان ۹۵ درصد شبیه‌سازی، این داده‌ها به خوبی می‌توانند جایگزین داده‌های اصلی شده و دوره آماری را به ۶۰ سال افزایش دهد. با تطویل دوره آماری در ایستگاه‌های مورد مطالعه (۲۰۱۹-۱۹۵۹)، شاخص SPI در مقیاس شش، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه شد. نتایج بررسی شاخص SPI در منطقه مورد مطالعه نشان داد که در ۴۵ درصد دوره آماری مورد بررسی کمبود بارش مشاهده می‌شود که منجر به ارائه خشکسالی‌های متفاوت در منطقه مورد مطالعه شده است. در طی دوره آماری مورد بررسی، ۶۲ مورد خشکسالی شدید ($SPI < -1.5$) در ایستگاه بوکان، ۵۸ مورد در ایستگاه تکاب و ۵۸ مورد نیز در ایستگاه میان‌دوآب رخ داده است که حدود هشت درصد کل ماه‌های مورد بررسی را در بر می‌گیرد. با استخراج مقادیر مدت و شدت خشکسالی مبتنی بر SPI با استفاده از تئوری ران، نتایج نشان داد که متوسط مدت خشکسالی هواشناسی در ایستگاه بوکان، تکاب و میان‌دوآب به ترتیب برابر با ۴/۵، ۴/۳ و ۴/۴ ماه می‌باشد. با بررسی روند تغییرات مقادیر مدت و شدت خشکسالی هواشناسی مبتنی بر SPI نتایج نشان داد که در طی دوره آماری مورد بررسی، شدت و مدت خشکسالی هواشناسی در تمامی ایستگاه‌ها افزایش یافته است. نتایج بررسی توزیع‌های حاشیه‌ای متناسب با داده‌های شدت و مدت خشکسالی هواشناسی در منطقه مورد مطالعه نشان داد که دو توزیع GEV و Logistic بهترین برازش را داشته و از میزان RMSE کم‌تری نسبت به سایر توزیع‌های حاشیه‌ای مورد بررسی برخوردار

می‌باشند. مفصل فرانک نیز با توجه به توزیع حاشیه‌ای برتر و جفت متغیر شدت- مدت خشکسالی هواشناسی به‌عنوان مفصل برتر در بین خانواده ارشمیدسی انتخاب شد. نتایج برآورد احتمال وقوع هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه نشان داد که با استفاده از توابع مفصل به‌خوبی می‌توان مشخصه‌های خشکسالی را به‌صورت هم‌زمان را ارائه کرد. استفاده از توزیع هم‌زمان و تابع توزیع تجمعی مشترک توابع مفصل در خصوص احتمال وقوع هم‌زمان به‌خوبی می‌تواند به‌صورت هم‌زمان مشخصه‌های خشکسالی را تحلیل و برآورد کند. منحنی‌های احتمال وقوع هم‌زمان می‌تواند به‌صورت هم‌زمان با احتمالات مختلف، مقادیر شدت و مدت خشکسالی هواشناسی مبتنی بر SPI را تخمین شد. این منحنی‌ها از آنجاکه با توجه به توزیع حاشیه‌ای داده‌های هر ایستگاه به‌وجود آمده‌اند، به‌خوبی می‌توانند خصوصیات خشکسالی را در منطقه مورد مطالعه نمایان سازند. از طرفی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مقادیر مستخرج از سناریوی CRU، افزایش دوره آماری صورت گرفته است که با تلفیق این روش با تئوری مفصل دوبعدی، خصوصیات خشکسالی هواشناسی مبتنی بر SPI با حافظه بیش‌تری نسبت به دوره پایه ارائه شده است. تلفیق این دو روش در مناطقی که طول دوره آماری کمی دارند، به‌خوبی می‌تواند خصوصیات خشکسالی را با حافظه مطمئن‌تری بیان کنند. روش پیشنهادی ارائه‌شده به‌دلیل داده‌محور بودن و وجود سناریوی CRU در مختصات‌های مختلف جغرافیایی، محدودیت زمانی و مکانی ندارد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Climatic Research Unit
2. Bias Correction
3. Inference Functions for Margins
4. Indicator variable

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., Mirabbasi, R., & Kumar, R. (2022). Spatiotemporal analysis of precipitation and temperature concentration using PCI and TCI: a case study of Khuzestan Province, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 743-760.
- Ahmadi, F., Radmaneh, F., Sharifi, M. R., & Mirabbasi, R. (2018). Bivariate frequency analysis of low flow using copula functions (case study: Dez River Basin, Iran). *Environmental Earth Sciences*, 77(18), 1-16.
- Azizabadi, M., Bakhtiari, B., Qaderi, K., & Rezapour, M. (2016). The Survey of Climate Change Impact on Drought Severity- Duration- Frequency Curves Using Copulas. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 743-754. doi: 10.22059/ijswr.2016.59981
- Chiang, F., Mazdhyasni, O., & AghaKouchak, A. (2021). Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity. *Nature communications*, 12(1), 1-10.
- Harris, I. P. D. J., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *International journal of climatology*, 34(3), 623-642.
- Hawkins, E., Osborne, T. M., Ho, C. K., & Challinor, A. J. (2013). Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: an idealised case study over Europe. *Agricultural and forest meteorology*, 170, 19-31.

- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). (2013). The physical science basis. *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 1535, 2013.
- Ishizaki, N. N., Nishimori, M., Iizumi, T., Shiogama, H., Hanasaki, N., & Takahashi, K. (2020). Evaluation of two bias-correction methods for gridded climate scenarios over Japan. *Sola*, 16, 80-85.
- Joe, H. (1997). *Multivariate models and multivariate dependence concepts*. CRC press.
- Khalili, K., Tahoudi, M. N., Mirabbasi, R., & Ahmadi, F. (2016). Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(4), 1205-1221.
- Khashei, A., Shahidi, A., Nazeri-Tahroudi, M., & Ramezani, Y. (2022). Bivariate simulation and joint analysis of reference evapotranspiration using copula functions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(3), 639-656.
- Khashei-Siuki, A., Shahidi, A., Ramezani, Y., & Nazeri Tahroudi, M. (2021). Simulation of potential evapotranspiration values based on vine copula. *Meteorological Applications*, 28(5), e2027.
- Lee, S. H., Yoo, S. H., Choi, J. Y., & Bae, S. (2017). Assessment of the impact of climate change on drought characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea using time series SPI and SPEI: 1981-2100. *Water*, 9(8), 579.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Meresa, H. K., Osuch, M., & Romanowicz, R. (2016). Hydro-meteorological drought projections into the 21-st century for selected Polish catchments. *Water*, 8(5), 206.
- Mirabbasi Najaf Abadi, R., Ahmadi, F., Ashuri, M., & Nazeri Tahroudi, M. (2017). Droughts analysis in the Northeast of Iran using Joint Deficit Index (JDI). *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(2), 573-585.
- Mirabbasi, R., Fakheri-Fard, A., & Dinpashoh, Y. (2012). Bivariate drought frequency analysis using the copula method. *Theoretical and applied climatology*, 108, 191-206.
- Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications*, 28(4), e2009.
- Mitchell, T. D., & Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(6), 693-712.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2020a). A New Method for Joint Frequency Analysis of Modified Precipitation Anomaly Percentage and Streamflow Drought Index Based on the Conditional Density of Copula Functions. *Water Resources Management*, 34, 4217-4231.
- Nazeri Tahroudi, M., Ahmadi, F., & Khalili, K. (2018). Impact of 30 years changing of river flow on Urmia Lake basin. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(1), 115-122.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., & Ahmadi, F. (2019). Investigating the trend and time of precipitation and river flow rate changes in Lake Urmia basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(6), 1-13.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2020b). Investigation of the Trend of Water Resources Deficiency Signatures in Lake Urmia Basin. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(3), 918-929. (In Persian)

- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2022). Application of Copula Functions for Bivariate Analysis of Rainfall and River Flow Deficiencies in the Siminehrood River Basin, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(11), 05022015.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2021). Flood routing via a copula-based approach. *Hydrology Research*, 52(6), 1294-1308.
- Nelsen, R. B. (2006). An Introduction to Copulas. Springer, New York. MR2197664.
- New, M., Hulme, M., & Jones, P. (1999). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of climate*, 12(3), 829-856.
- Olusola, O. O., Li, Y., Song, S., Javed, T., & Yao, N. (2018). Probabilistic modelling of drought events in China via 2-dimensional joint copula. *Journal of Hydrology*, 559, 373-391.
- Pronoos Sedighi, M., Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M., & Taghian, M. (2022). Joint frequency analysis of river flow rate and suspended sediment load using conditional density of copula functions. *Acta Geophysica*, 1-13.
- Raji, M., Tahroudi, M. N., Ye, F., & Dutta, J. (2022). Prediction of heterogeneous Fenton process in treatment of melanoidin-containing wastewater using data-based models. *Journal of Environmental Management*, 307, 114518.
- Ramezani Etedali, H., & Ababaei, B. (2021). Investigating spatiotemporal variations of precipitation across Iran over 1957-2016 using the CRU gridded dataset. *Modares Civil Engineering journal*, 21(1), 103-117.
- Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M., & Ahmadi, F. (2019). Analyzing the droughts in Iran and its eastern neighboring countries using copula functions. *IDŐJÁRÁS*, 123(4), 435-453.
- Ramezani, Y., Khashei-Siuki, A., & Nazeri Tahroudi, M. (2020). Spatial distribution of the daily, monthly, and annual precipitation concentration indices in the Lake Urmia basin, Iran. *IDŐJÁRÁS*, 124(1), 73-95.
- Saadat, S., Khalili, D., Kamgar-Haghighi, A. A., & Zand-Parsa, S. (2013). Investigation of spatio-temporal patterns of seasonal streamflow droughts in a semi-arid region. *Natural hazards*, 69, 1697-1720.
- Sklar, M. (1959). Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges. *Publ. inst. statist. univ. Paris*, 8, 229-231.
- Snyder, W. M. (1962). Some possibilities for multivariate analysis in hydrologic studies. *Journal of geophysical research*, 67(2), 721-729.
- Tabatabaei, S. M., Dastourani, M., Eslamian, S., & Nazeri Tahroudi, M. (2022). Ranking and optimizing the rain-gauge networks using the entropy-copula approach (Case study of the Siminehrood Basin, Iran). *Applied Water Science*, 12(9), 1-13.
- Tahroudi, M. N., & Khalili, F. A. K. (2017). Evaluation the trend and trend chang point of Urmia Lake Basin precipitation. *Journal of water and soil*, 31(2), 644-659.
- Wong, S. T. (1963). A multivariate statistical model for predicting mean annual flood in new england1. *Annals of the Association of American Geographers*, 53(3), 298-311.