



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 4, No. 16, Winter 2024



Evaluation of MSDI bivariate drought index based on precipitation and runoff (Arazkouse and Galikesh stations of Golestan province)

Khalil Ghorbani^{1*} , Meysam Salarijazi² , Laleh Rezaei Ghaleh³ 

¹Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran, Email: ghorbani.khalil@gau.ac.ir

²Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran

³Ph.D. candidate of Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2023-11-22
Accepted: 2023-12-21

Keywords:
Meteorological drought
Hydrological drought
Multivariate drought
SPI
SSI
MSDI

ABSTRACT

A comprehensive index definition that provides a more complete interpretation of meteorological and hydrological drought is essential. Based on the multivariate drought index (MSDI) was defined in this study based on rainfall and runoff to diagnose meteorological and hydrological droughts. In this regard, two indices, SPI and SSI, were calculated seasonally in the Galikesh and Arazkouse regions in Golestan province. 50-year rainfall and runoff statistics were used for the calculations. The MSDI index was also calculated using joint functions based on flow and precipitation variables. To test the compatibility of the MSDI index with SPI and SSI, the degree of correlation, trend, and change points were checked using Mann-Kendall and Pettit tests. The results showed that while there was no perfect correlation between the SPI and SSI indices, the MSDI index had a high correlation with both of them. The degree of correlation varied in different seasons and stations. Even in the worst case where SPI and SSI had no significant correlation, the MSDI index created a 62% correlation with SPI in Galikesh. The trend and mutation results were in good agreement in the two stations. At Arazkouse station, SPI had no trend, SSI only in spring, and MSDI had a trend in spring and summer. At Galikesh station, MSDI didn't have a trend in any season, SPI had a trend in autumn, and SSI in spring. The MSDI index was similar to SPI and SSI indices in cases where they showed the same dry conditions. Otherwise, it was consistent with the index that showed a drier condition. Additionally, the MSDI index had a tendency to show drier seasons. In conclusion, the MSDI index can be considered a suitable index for the simultaneous analysis of meteorology and hydrology drought.

Cite this article: Ghorbani, Kh., Salarijazi, M., Rezaei Ghaleh, L. (2024). Evaluation of MSDI bivariate drought index based on precipitation and runoff (Arazkouse and Galikesh stations of Golestan province). *Journal of the Climate Change Research*, 4 (16), 77-94.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2023.426470.1179



ارزیابی شاخص دو متغیره خشکسالی MSDI مبتنی بر بارش و دبی (در ایستگاه‌های اراز کوسه و گالیکش استان گلستان)

خلیل قربانی^{۱*}، میثم سالاری جزی^۲، لاله رضائی قلعه^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، رایانامه: Ghorbani.khalil@gau.ac.ir

^۲دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله چکیده

نوع مقاله:

مقاله کامل علمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۳۰

واژه‌های کلیدی:

خشکسالی هواشناسی

خشکسالی هیدرولوژیکی

خشکسالی چند متغیره

SPI
SSI
MSDI

تعریف شاخص جامعی که تفسیر کامل‌تری از خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی داشته باشد ضروری است بر این اساس در پژوهش حاضر شاخص چند متغیره خشکسالی (MSDI) بر مبنای بارش و دبی تعریف شده است تا توانایی آن در تشخیص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی سنجیده شود. برای این منظور دو شاخص SPI و SSI در دو منطقه گالیکش و اراز کوسه در استان گلستان که از آمار بارش و دبی بلند مدت ۵۰ ساله برخوردار بودند در مقیاس فصلی محاسبه شدند شاخص MSDI بر اساس تعریف توزیع مشترک از متغیرهای دبی و بارش با استفاده از توابع مفصل نیز محاسبه شد. به منظور بررسی تطابق این شاخص با SPI و SSI، میزان همبستگی و سپس، روند و جهش آنها با استفاده از آزمون‌های من-کندال و پتیت، بررسی شدند. نتایج نشان داد همبستگی کاملی بین شاخص SPI و SSI وجود ندارد و در فصل‌های مختلف و ایستگاه‌های مختلف میزان همبستگی متغیر است ولی شاخص تعریف شده MSDI از همبستگی بالایی با هر دو شاخص SSI و SPI برخوردار بود. و حتی در بدترین حالت که SPI و SSI هیچ همبستگی معنی‌داری نداشتند این شاخص در بدترین شرایط ۶۲ درصد همبستگی را با SPI در گالیکش ایجاد کرد. نتایج روند و جهش از تطابق خوبی در دو ایستگاه برخوردار بودند. در ایستگاه اراز کوسه SPI فاقد روند، SSI فقط در بهار و MSDI در بهار و تابستان دارای روند می‌باشند. در ایستگاه گالیکش MSDI در هیچ فصل، SPI در پاییز و SSI در بهار دارای روند می‌باشند. شاخص MSDI در مواردی که دو شاخص SPI و SSI شرایط خشکی یکسانی را نشان می‌دادند با آنها مطابقت داشت در غیر اینصورت در بیشتر موارد با شاخصی که شرایط خشک‌تری را داشت هماهنگ بود. در ضمن این شاخص تمایل زیادی به خشک‌تر نشان دادن فصل‌ها داشت بطوری که در برخی از موارد از دو شاخص دیگر شرایط خشک‌تری را نشان می‌داد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت شاخص MSDI می‌تواند شاخص مناسبی برای تحلیل همزمان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود.

استناد: قربانی، خلیل؛ سالاری جزی، میثم؛ رضائی قلعه، لاله. (۱۴۰۲). ارزیابی شاخص دو متغیره خشکسالی MSDI مبتنی بر

بارش و دبی (در ایستگاه‌های اراز کوسه و گالیکش استان گلستان). نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی،

۴ (۱۶)، ۷۷-۹۴.



مقدمه

خشکسالی به عنوان یکی از زیانبارترین مخاطرات طبیعی هر ساله به طور متوسط ۶ میلیارد دلار خسارات در مقیاس جهانی به بخش‌های مختلف وارد می‌کند و نسبت به سایر مخاطرات طبیعی افراد بیشتری را تحت تاثیر قرار می‌دهد (میشرا و همکاران، ۲۰۱۰). در نگاه عام، خشکسالی به کمبود بارش نسبت به میانگین بلند مدت گفته می‌شود، اما کمبود بارش مستمر، منجر به کاهش آب رودخانه‌ها، پایین افتادن تراز سطح آب زیرزمینی و کاهش عملکرد محصولات زراعی به ویژه در زراعت دیم می‌شود. بر این اساس از دیدگاه افراد مختلف، با توجه به تاثیرپذیری ناشی از خشکسالی، تعبیر مختلفی می‌شود و خشکسالی به دسته‌های از قبیل خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی دسته‌بندی می‌شود. پژوهشگران تاکنون برای مشخص کردن شدت خشکسالی و مطالعه آن، شاخص‌های متعددی را تعریف کرده‌اند. در خشکسالی هواشناسی بطور معمول، شاخص‌ها مبتنی بر بارش می‌باشند. مک کی و همکاران (۱۹۹۳) شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI)، خلیلی و همکاران (۱۳۷۰)، شاخص بارش سالانه استاندارد شده^۲ (SIAP)، روی (۱۹۶۵)، شاخص ناهنجاری بارندگی^۳ (RAI)، گیس و ماهر (۱۹۶۷)، شاخص دهک‌های بارندگی^۴ (DPI)، بویان و ویلهایت (۱۹۹۹)، شاخص بارش مؤثر^۵ (EDI) را ارائه کردند. گروهی از پژوهشگران نیز به مقایسه و ارزیابی این شاخص‌ها با یکدیگر پرداختند. مک‌کی و همکاران (۱۹۹۵) عملاً از سال ۱۹۹۴ از شاخص بارندگی استاندارد شده برای پایش خشکسالی در سرتاسر ایالت کلرادو استفاده نمودند. زارع‌ابیان و همکاران (۱۳۸۸) با مطالعه‌ی تطبیقی چهار نمایه خشکسالی هواشناسی بر پایه عملکرد نسبی گندم در استان همدان دریافتند شاخص SPI از نظر شدت خشکسالی‌های برآوردی با شاخص زراعی عملکرد

نسبی گندم همخوانی مطلوب‌تری داشته است. میریعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۸)، با مروری بر شاخص‌های خشکسالی نتیجه گرفتند در بین شاخص‌های خشکسالی، شاخص SPI دارای مزیت نسبی بالایی برای پایش خشکسالی می‌باشد. پورالخاص نوکنده‌یی و همکاران (۱۴۰۲)، در یک مطالعه مروری SPI را از بین شاخص‌های درصد از نرمال بارندگی (PNPI)، شاخص ناهنجاری بارش (RAI)، شاخص خشکسالی بالم و مولی (BMDI)، شاخص دهک (DI)، شاخص کمبود تبخیر-تعرق (ETDI)، شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI)، شاخص مناسب‌تری برای پایش خشکسالی هواشناسی تشخیص دادند. نادری و شیوخی سوغانلو (۲۰۲۳) ضمن تمجید از شاخص SPI، با ایجاد اصلاحیه‌ای قابلیت آن را در پایش خشکسالی در چند نمونه اقلیمی بهبود بخشیدند و آن را برای پایش خشکسالی در اکثر نقاط ایران توصیه کردند. همچنین نتایج آنها نشان داد تابع توزیع حدنهایی عمومی در بیش از ۹۵ درصد موارد مناسبترین تابع توزیع احتمال داده‌های بارش است و توزیع پیش فرض گاما تنها در ۶۶ درصد موارد به عنوان توزیع مناسب انتخاب شد (شیوخی سوغانلو و نادری، ۱۳۹۹).

در زمینه خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص‌ها از تنوع بیشتری برخوردار هستند. در تعریف این شاخص‌ها، از دبی جریان، دبی پایه، رطوبت خاک و تراز سطح سفره آب زیرزمینی استفاده شده و شاخص‌های دبی جریان رودخانه^۶ (SSI)، شاخص دبی پایه^۷ (BFI)، شاخص خشکسالی پالم^۸ (PSDI)، شاخص خشکسالی تراز آب زیرزمینی^۹ (SWI) و شاخص خشکسالی منابع آب زیرزمینی^{۱۰} (GRI) ارائه شده‌اند. از بین این شاخص‌ها، SSI وضعیت آب قابل

⁶ Standardized streamflow index

⁷ Base Flow Index

⁸ Palmer Drought Severity Index

⁹ Standardized water-level index

¹⁰ Groundwater Resource Index

¹ Standardized precipitation index

² Standard Index of Annual Precipitation

³ Rainfall anomaly index

⁴ Decile Precipitation Index

⁵ Effective Drought Index

وجود همبستگی ضعیف بین دو نمایه SPI و SWSI در طول دوره آماری، فاصله ی زمانی بین دو رخداد بین ۳ تا ۱۱ ماه و با میانگین ۷ ماه متغیر است. نتایج تحقیقات مفیدی پور (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز اترک نشان داد که بیشترین همبستگی بین SPI و SDI^{۱۱} در مقیاس سه ماهه وجود دارد.

افزایش دمای ناشی از گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، وضعیت منابع آبی را تحت تأثیر قرار داده و با فرض ثابت بودن بارش، وضعیت خشک‌تری نسبت به گذشته حاکم کرده است. از اینرو تعریف خشکسالی با یک متغیر تنها نمی‌تواند تصویر درستی از خشکسالی را نشان دهد. برای این منظور، شاخص دو متغیره بارش و تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) توسط وینسنت سرانو (۲۰۱۰) ارائه شد. رضایی قلعه و همکاران (۱۳۹۶)، دو شاخص SPI و SPEI^{۱۲} را در چند نمونه اقلیمی در استان گلستان مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که شاخص SPEI نسبت به SPI تعداد وقایع ترسالی و خشکسالی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین، شاخص SPEI طول دوره بزرگتری از خشکسالی و ترسالی و شاخص SPI وقایع حدی بزرگتری را نسبت به SPEI نشان می‌دهد. عبداللهی و همکاران (۱۴۰۱)، در تحلیل روند مشخصه‌های خشکسالی تک و چند متغیره در ایران با استفاده از شاخص تک متغیره SPI و شاخص چندمتغیره کمبود توام مبتنی بر کاپولا (JDI) به این نتیجه رسیدند که JDI در مقایسه با SPI-12 در اکثر ایستگاه‌ها، کلاس خشکسالی خیلی شدید را تخمین می‌زند اما برخلاف آن، SPI-12 تخمین غیرمنتظره‌ای در برآورد کلاس خشکسالی در برخی ایستگاه‌ها دارد. آزمون روند نیز بیانگر آن است که JDI روند رو به کاهش خشکسالی را در ایران تخمین می‌زند در حالی که SPI-12 در اکثر ایستگاه‌ها روند قابل توجهی را نشان نمی‌دهد از اینرو JDI ارزیابی کاملتری از خشکسالی ارائه می‌دهد. اژدری و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از دو دیدگاه تحلیل آماری چندمتغیره و

دسترس رودخانه را نشان می‌دهد. این شاخص که کاهش حجم جریان رودخانه‌ای را نسبت به متوسط درازمدت آن بررسی می‌کند، همانند شاخص SPI محاسبه می‌شود با این تفاوت که در محاسبه آن از داده‌های دبی جریان به جای بارش استفاده می‌شود. با توجه به فراوانی تعداد ایستگاه‌های هواشناسی نسبت به ایستگاه‌های هیدرومتری، محاسبه شاخص خشکسالی هواشناسی در مناطق مختلف و سطح وسیع امکان‌پذیرتر می‌باشد. از طرفی دیگر بسیاری از رودخانه‌ها فصلی و خشک می‌باشند، همچنین تعداد زیادی از آنها نیز فاقد ایستگاه و یا ایستگاه‌های تازه تأسیس می‌باشند که سال‌های آماری آنها برای محاسبه و تحلیل شاخص خشکسالی کافی نمی‌باشد. از اینرو پژوهشگران زیادی روابط بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را بررسی می‌کنند. تیموری و همکاران (۱۳۹۴)، به مطالعه‌ی تطبیقی نمایه‌های هواشناسی با نمایه‌های هیدرولوژیکی برای پایش خشکسالی به روش داده‌کاوی در ایستگاه ارازکوسه استان گلستان پرداختند و نتیجه گرفتند تطابق کاملی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود ندارد و با توجه به وضعیت خشکسالی در دوره‌های قبل، جریان رودخانه رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. همچنین کمبود بارش با زمان تأخیر کمتری نسبت به پیشبود بارش بر جریان رودخانه تأثیر می‌گذارد. مظفری (۱۳۸۵) با بررسی تطابق خشکسالی هیدرولوژیک و هواشناسی در شیرکوه یزد به این نتیجه رسید که در ایستگاه اسلامیه بین بارندگی و دبی رابطه معناداری وجود ندارد، اما در ایستگاه فخر آباد ضریب همبستگی ۰/۴۳ در سطح ۹۵ درصد معنا دار بوده است. شاهرخ‌وندی و همکاران (۱۳۸۸) ارتباط خشکسالی هیدرولوژیک با بارش را در حوضه خرم آباد بررسی نمودند. با بررسی همبستگی‌های متوالی مشخص شد که همبستگی بین بارش مهر، آبان و آذر با خشکسالی هیدرولوژیک مهر، آبان و آذر معنی‌دار می‌باشد. بابائی و همکاران (۱۳۹۱) فاصله زمانی رخداد خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی را در حوزه آبخیز زاینده رو بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد با

¹¹ Streamflow Drought Index

¹² Standardized precipitation evapotranspiration index

توانایی این شاخص در نشان دادن وضعیت توأم خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و موجودیت داده‌ها: پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل شدت تداوم توالی‌های خشک و مرطوب بر اساس شاخص‌های SSI, SPI و MSDI در ۲ ایستگاه هیدرومتری آراز کوسه و گالیکش در منطقه‌ای با اقلیمی نیمه مرطوب و مرطوب که از قدمت بالایی نیز (دوره آماری با طول بیش از ۵۰ سال) برخوردار هستند و همچنین دارای ایستگاه هواشناسی نیز هستند انجام شد. بدین منظور داده‌های هواشناسی و هیدرولوژی مورد نیاز از سال ۱۳۵۰ (مجموع بارندگی ماهانه و مجموع دبی ماهانه) از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد.

شاخص‌های خشکسالی: به منظور برآورد و مطالعه ویژگی‌های خشکسالی از شاخص استاندارد شده بارش (SPI)، شاخص دبی جریان رودخانه‌ای استاندارد شده (SSI) و شاخص ترکیبی بارش-دبی جریان رودخانه استاندارد شده (MSDI) استفاده شد. نحوه محاسبه این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشد.

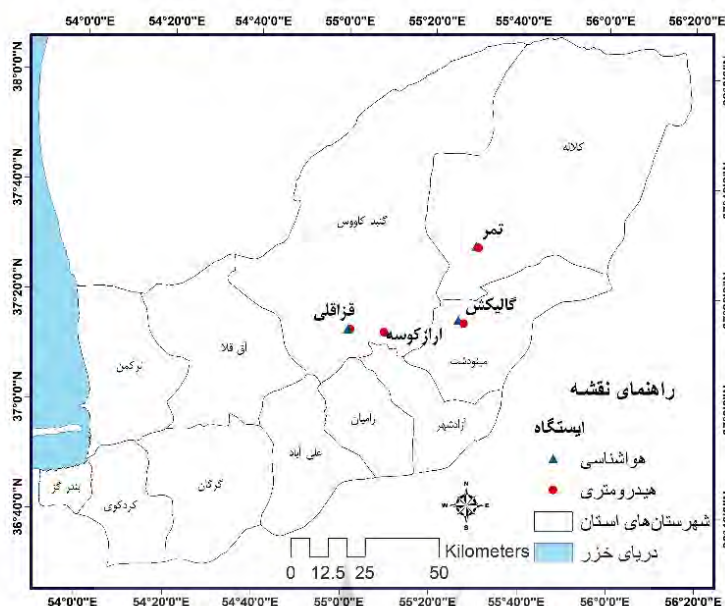
شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص دبی جریان رودخانه‌ای استاندارد شده (SSI): شاخص بارش استاندارد شده توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳)، بر پایه داده‌های بارندگی ماهانه معرفی شد. برای محاسبه این شاخص، ابتدا سری زمانی داده‌ها تشکیل و توزیع گاما بر آنها برآزش می‌یابد و سپس تابع توزیع تجمعی آن ترسیم و مقدار هم‌احتمال تابع توزیع Z استاندارد آن محاسبه و مقدار Z آن برابر مقدار SPI در نظر گرفته می‌شود. دلیل استفاده از توزیع گاما را بذرافشان (۱۳۸۱) با مقایسه برآزش هفت توزیع احتمال شامل نرمال، لوگ نرمال ۲ پارامتری، لوگ نرمال ۳ پارامتری، گاما ۲ پارامتری، پیرسون نوع III، لوگ پیرسون نوع III و گامبل در اقلیم‌های مختلف ایران بررسی کرد و نتیجه گرفت که در چهار پنجره زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه توزیع گاما برآزش مناسبتری بر داده‌های بارندگی دارد. نحوه

توابع مفصل، خشکسالی هواشناسی را در استان هرمزگان تجزیه و تحلیل کردند و نتیجه گرفتند شاخص چند متغیره بارش استاندارد شده نسبت به شاخص کمبود توأم تصویر واقع‌بینانه‌تری از خشکسالی را نشان می‌دهد. همبستگی بین مشخصه‌های خشکسالی (شدت، مدت و بزرگی) در بیشتر موارد در شاخص چند متغیره بارش استاندارد شده بیشتر از شاخص کمبود توأم بوده، بدین معنی که ساختار همبستگی را بهتر از توابع مفصل برآورد می‌نماید. برآورد درصد فراوانی طبقات خشکسالی از ملایم تا خیلی شدید نشان داد، شاخص چند متغیره بارش استاندارد شده در برآورد کلاس‌های خشکسالی شدید و خیلی شدید کارایی بهتری داشته و برآورد صحیح‌تری از کلاس‌های خشکسالی دارد. همچنین هائو و آقا کوچک (۲۰۱۴) شاخص چند متغیره استاندارد شده خشکسالی (MSDI^{۱۳}) را برای توصیف خشکسالی بر اساس وضعیت بارش و رطوبت خاک تعریف کردند و نتیجه گرفتند که شاخص MSDI، خصوصیات جالب و قابل‌توجهی دارد، از قبیل اینکه در مقایسه با شاخص‌های تک متغیره مبتنی بر بارش و یا رطوبت خاک، این شاخص با احتمال بیشتری می‌تواند خشکسالی را تشخیص دهد. محیط اصفهانی و همکاران (۱۳۹۹)، خشکسالی هواشناسی-کشاورزی را در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از شاخص خشکسالی چند متغیره MSDI مورد بررسی قرار داد. از شاخص‌های بارش استاندارد (SPI) برای پایش خشکسالی هواشناسی و رطوبت خاک استاندارد (SSI) برای پایش خشکسالی کشاورزی در این استان استفاده کرد. نتایج نشان داد که MSDI بیش از دو برابر قابلیت شناسایی پدیده خشکسالی را نسبت به شاخص‌های SSI و SPI دارد. با توجه به توانایی شاخص‌های چند متغیره خشکسالی، و اهمیت بارش و رواناب در وضعیت خشکسالی در منطقه مطالعاتی، هدف از انجام این پژوهش تعریف شاخص دو متغیره خشکسالی MSDI بر اساس دو مقدار بارش ودبی و ارزیابی

¹³ Multivariate Standardized Drought Index

ماهانه استفاده می‌شود.

محاسبه شاخص SSI نیز همانند شاخص SPI می‌باشد با این تفاوت که به جای بارش ماهانه از میانگین دبی



شکل ۱: منطقه مطالعاتی

هستند. Copula C انعطاف پذیری را برای ساخت توزیع مشترک متغیرهای تصادفی از نظر توزیع‌های حاشیه‌ای آنها ارائه می‌دهد. کاربرد مخروط در ساختار وابستگی مدل‌سازی (غیر خطی) داده‌های چند متغیره در مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیمی، مانند تحلیل فرکانس چند متغیره، ارزیابی ریسک، مدل‌سازی خشکسالی و تعامل ژئواستاتستی (آفاکوچک و همکاران، ۲۰۱۰؛ آفاکوچک و همکاران، ۲۰۱۰؛ باردوسی، ۲۰۰۶؛ فاوهره و همکاران، ۲۰۰۴؛ ژنست و همکاران، ۲۰۰۷؛ سالوادوری و دمیشل، ۲۰۱۰ و شیایو، ۲۰۰۶) می‌باشد.

طیف گسترده‌ای از خانواده‌های copula وجود دارد که برای مدل‌سازی ساختار وابستگی متفاوتی از متغیرهای تصادفی استفاده شده‌اند (آفاکوچک و همکاران، ۲۰۱۰؛ آفاکوچک و همکاران، ۲۰۱۲ و سالوادوری و همکاران، ۲۰۰۷). به‌عنوان مثال، Frank copula یک ساختار وابستگی متقارن را ارائه می‌دهد، در حالی که همپوش‌های Gumbel و Clayton ساختار وابستگی نامتقارن را نشان می‌دهند (سالوادوری و همکاران، ۲۰۰۷ و تریودی و زیمر، ۲۰۰۵). Frank

شاخص چند متغیره خشکسالی بارش-دبی استاندارد شده (MSDI): با استفاده از SPI معمولی که توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) طراحی شده است، مدل چند شاخصه را می‌توان از طریق ساختن توابع توزیع مشترک دو یا چند متغیره خشکسالی بدون تغییر (یا شاخص‌ها) توسعه داد. در این تحقیق، شاخص تنش خشکی استاندارد چند متغیره (MSDI) با گسترش SPI بدون تغییر از طریق توزیع مشترک بارش و دبی به منظور تعیین ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی و جریان‌های رودخانه‌ای پیشنهاد شده است. توابع کوپلا، توابعی هستند که می‌توانند برای توزیع مشترک دو یا چند متغیره، صرف نظر از توزیع‌های حاشیه‌ای اصلی آنها، استفاده شوند. با فرض اینکه بارش و دبی به عنوان متغیرهای تصادفی X و Y ، به ترتیب، توزیع مفصل با احتمال اتصال تجمعی p می‌تواند با یک copula C به عنوان رابطه زیر بیان شود (نلسن، ۲۰۰۶ و اسکلا، ۱۹۵۹).

$$P(X \leq x, Y \leq y) = C[F(X), G(Y)] = P \quad (1)$$

در این جا C ، copula می‌باشد و $F(X)$ و $G(Y)$ توابع توزیع تجمعی توزیع شده از متغیرهای تصادفی X و Y

کائو و گوییناردای (۲۰۱۰) ابتدا مفهوم استفاده از احتمال تجمعی مشترک را به عنوان شاخص خشکسالی عمومی ارائه دادند و شاخص کسری مشترک را بر اساس توزیع کندال پیشنهاد دادند. در این مطالعه، ما از احتمال تجمعی مشترک برای ساخت MSDI به عنوان یک پسوند اصلی توسعه یافته توسط مک کی و همکاران استفاده می‌کنیم (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳). بنابراین، MSDI پیشنهاد شده، شباهتی نزدیک به SPI بر اساس این واقعیت دارد که می‌توان آن را برای نظارت بر خشکسالی در مقیاس زمانی مختلف استفاده کرد (به عنوان مثال ۱، ۳، ۶ ماهه) (هائو و آفاکوچک، ۲۰۱۳).

تحلیل روند و جهش در سری‌های زمانی: به منظور بررسی روند در سری زمانی شاخص‌های خشکسالی از آزمون من-کندال (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵) استفاده شد. در این آزمون به جای استفاده از خود داده‌ها، از مرتبه آنها استفاده می‌شود و برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۰). فرض مورد بررسی در این آزمون به صورت زیر می‌باشد:

H_0 : داده‌ها صورت تصادفی توزیع شده‌اند (روند ندارند). H_1 : داده‌ها دارای روند هستند.

آزمون ناپارامتری نقطه شکست پتی برای بررسی وقوع نقطه شکست در سری زمانی داده‌ها بر پایه رتبه بندی و توزیع آزاد^{۱۴} بوده و برای تعیین تغییرات معنی‌دار آماری در میانگین سری زمانی و تعیین مکان نقطه شکست استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن سری زمانی داده‌ها به صورت X_1, X_2, \dots, X_T وجود نقطه شکست در τ جز سری $(X_1, X_2, \dots, X_\tau)$ دارای توزیع $F_1(\cdot)$ و جز سری $(X_{\tau+1}, X_{\tau+2}, \dots, X_T)$ دارای توزیع $F_2(\cdot)$ می‌باشد و بنابراین $F_1(\cdot) \neq F_2(\cdot)$ است. فرض صفر به صورت عدم وجود نقطه شکست است ($\tau = T$) و در برابر فرض متقابل $1 \leq \tau < T$ با

copula به عنوان مثال، می‌تواند بیان کند که (سالوادوری و همکاران، ۲۰۰۷).

(۲)

$$C(u, v) = \frac{1}{\theta} \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$$

در اینجا θ پارامتر است، u و v به ترتیب احتمال و توزیع احتمالی حاشیه بارش و دبی هستند. پارامتر θ می‌تواند از همبستگی رتبه Kendall برآورد شود (ژنست و فاوهره، ۲۰۰۷).

$$\tau = 1 + 4[D(\theta) - 1]/\theta \quad (۳)$$

در اینجا $D(\theta)$ بصورت زیر بیان می‌شود:

$$D(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{\exp(t)-1} dt \quad (۴)$$

در اینجا t یک متغیر یکپارچه است. از احتمال اتصال مفصل تجمعی p که در معادله (۲-۱) نشان داده شده است، شاخص چند متغیره خشکسالی استاندارد (MSDI) می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$MSDI = \varphi^{-1}(p) \quad (۵)$$

در اینجا φ توابع توزیع نرمال استاندارد است. معادله (۲-۵) احتمال مشترک را به MSDI تبدیل می‌کند که در فضای مشابه SPI اصلی قرار گرفته است و امکان مقایسه مقادیر شاخص‌های مختلف خشکسالی را فراهم می‌کند. روش برای توسعه SPI نیز می‌تواند به سایر متغیرها مانند رطوبت خاک و رواناب اعمال شود (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳؛ مو، ۲۰۰۸ و شوکلا و همکاران، ۲۰۱۱). در این مطالعه از شاخص دبی استاندارد (SDI) برای مقایسه مقدماتی استفاده شده است. MSDI پیشنهاد شده شامل شرایط خشکسالی منعکس شده از بارش و دبی می‌باشد. شبیه به SPI اصلی، یک توالی از MSDI منفی نشان می‌دهد که شرایط آب و هوایی خشک است (خشکی)، در حالی که یک توالی از MSDI مثبت نشان دهنده شرایط آب و هوایی مرطوب است. MSDI نزدیک صفر به شرایط آب و هوایی معمولی اشاره دارد (هائو و آفاکوچک، ۲۰۱۳).

می‌رسد و نسبت به شاخص SSI از همبستگی بالاتری برخوردار است (شکل ۲)

استفاده از آماره ناپارامتری $K_T = \max |U_{i,T}| = \max(K_{T+}, K_{T-})$ آزمون می‌گردد.

$$U_{i,T} = \sum_{j=i}^T \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_t - X_j)$$

(۶)

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (۷)$$

و $K_{T+} = \max U_{i,T}$ در حالت انتقال رو به پایین^{۱۵} و $K_{T-} = -\min U_{i,T}$ در حالت انتقال رو به بالا^{۱۶} در نظر گرفته می‌شود. سطح معنی‌داری^{۱۷} مرتبط با K_{T+} و K_{T-} به‌طور تقریبی با رابطه زیر تعیین می‌گردد.

(۸)

$$\rho = \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right)$$

در شرایطی که ρ از یک سطح اعتماد خاص مانند ۰/۹۵ پایین‌تر باشد فرض صفر رد می‌شود. احتمال معنی‌داری نقطه شکست به صورت $P = 1 - \rho$ تعریف می‌شود. بدیهی است که در صورت وجود نقطه شکست معنی‌دار سری زمانی در مکان نقطه شکست به دو جز سری^{۱۸} تقسیم می‌شود. نسبت میانگین جز سری دوم به میانگین جز سری اول بزرگی نقطه شکست^{۱۹} نامیده می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج بررسی شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه ارازکوسه: در فصل بهار یک همبستگی متوسط بین شاخص‌های SPI و SSI برقرار است. شاخص دومتغیره MSDI که بر اساس دو شاخص SPI و SSI محاسبه شده است همبستگی بالایی را با هر دو شاخص SPI و SSI برقرار می‌کند این همبستگی با شاخص خشکسالی هواشناسی SPI به بیش از ۹۲ درصد

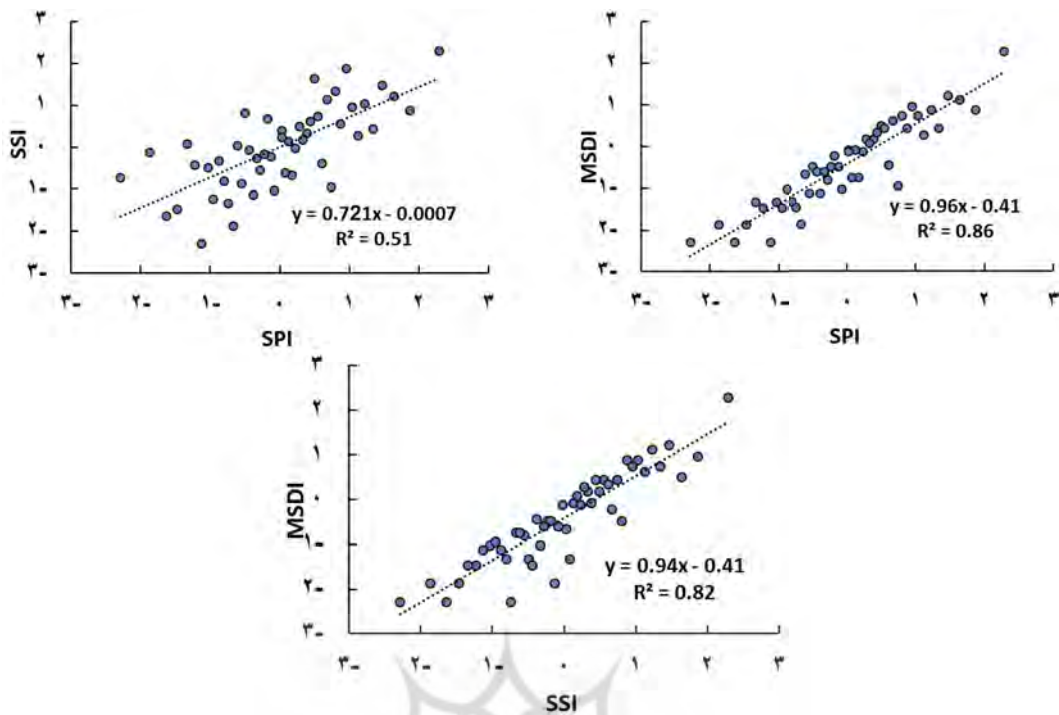
¹⁵ Downward Shift

¹⁶ Upward Shift

¹⁷ Significance Level

¹⁸ Sub-Series

¹⁹ Change Point Magnitude

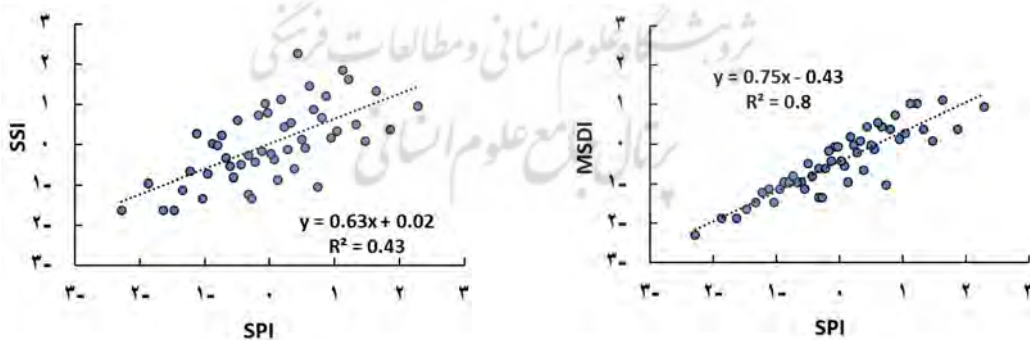


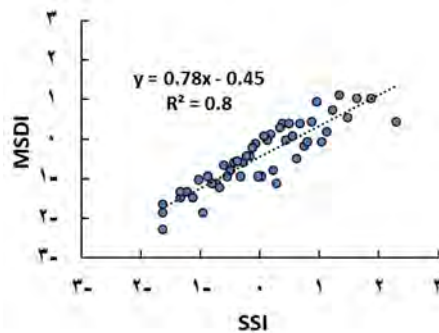
شکل ۲: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا - سمت راست)، شاخص MSDI با SPI

(شکل بالا - سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل بهار در ایستگاه آرازکوسه

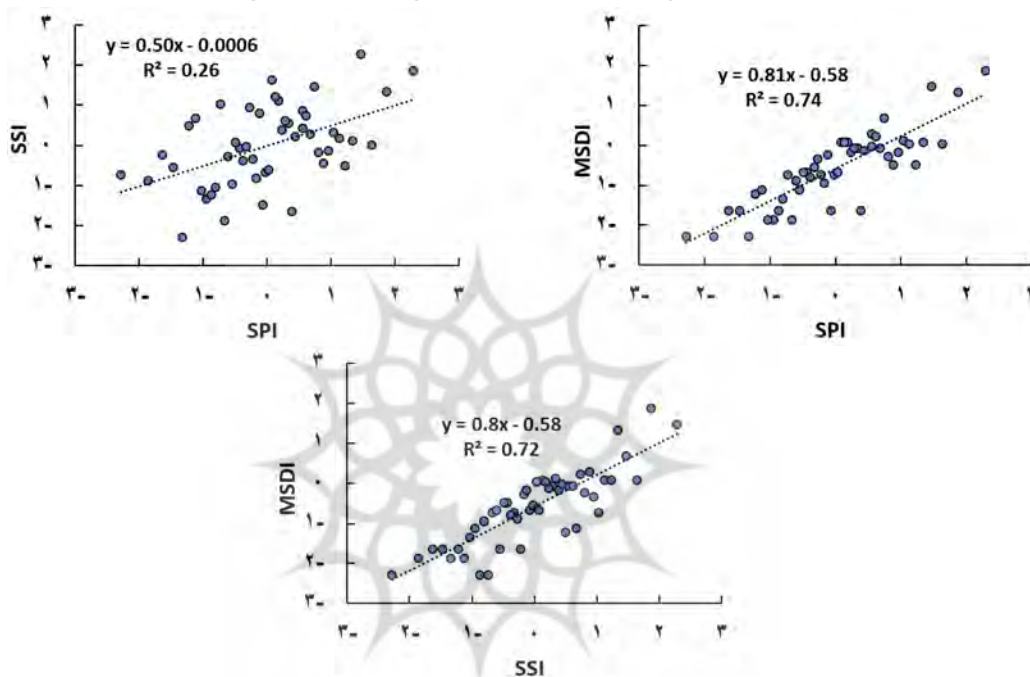
در فصل تابستان همبستگی بین شاخص‌های SPI و SSI و نشان می‌دهد شرایط خشکسالی بهتر مدل شده است. به طوری که در نمودار پراکنش بین MSDI و SPI کاملاً مشهود است.

در فصل تابستان همبستگی بین شاخص‌های SPI و SSI و نشان می‌دهد شرایط خشکسالی بهتر مدل شده است. به طوری که در نمودار پراکنش بین MSDI و SPI کاملاً مشهود است.





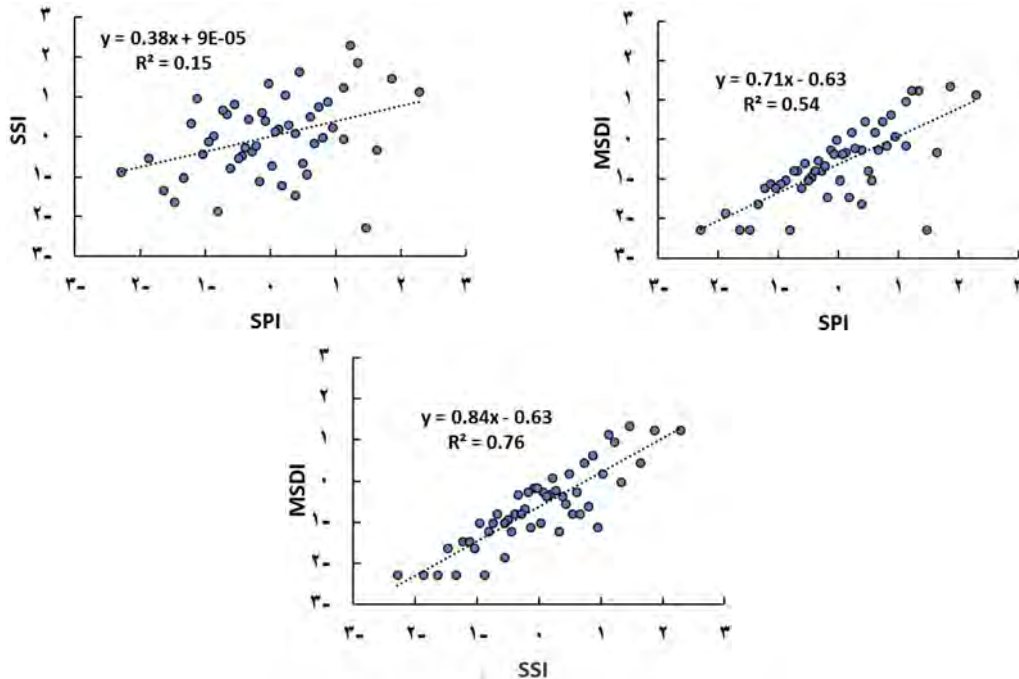
شکل ۳: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا- سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا- سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل تابستان در ایستگاه ارازکوسه



شکل ۴: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا- سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا- سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل پاییز در ایستگاه ارازکوسه

بطوری که میزان این همبستگی به کمتر از ۴۰ درصد می‌رسد. در این فصل شاخص MSDI با شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی همبستگی بالاتری تا بیش از ۸۷ درصد ($R^2=0/76$) برقرار می‌کند که نسبت به شاخص خشکسالی هواشناسی SPI با همبستگی برابر با ۷۳ درصد ($R^2=0/54$) قابل توجه می‌باشد (شکل ۵). در این فصل نیز ترسالی‌های شدید خشکسالی هواشناسی با شاخص MSDI نشان داده نشده است.

در فصل پاییز رابطه بین دو شاخص SPI و SSI از همبستگی پایینی (کمتر از ۵۱ درصد) برخوردار است با این وجود شاخص MSDI با شاخص SPI تا حدود ۸۶ درصد ($R^2=0/74$) همبستگی برقرار می‌کند (شکل ۴). شاخص MSDI ترسالی‌های شدید که در شاخص SPI رخ داده است را به خوبی نشان نداده ولی در شاخص SSI تطابق بیشتری دیده می‌شود. در فصل زمستان رابطه بین شاخص SPI و شاخص SSI به پایین‌ترین درجه همبستگی می‌رسد،



شکل ۵: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا - سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا - سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل زمستان در ایستگاه ارازکوسه

که میزان همبستگی بین SPI و SSI پایین می‌باشد. از اینرو این شاخص می‌تواند نماینگر خوبی از توصیف خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی باشد.

نتایج آزمون همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن در ایستگاه ارازکوسه (جدول ۱)، نشان می‌دهد شاخص MSDI از همبستگی خوبی با دو شاخص SPI و SSI برخوردار است حتی در فصل‌هایی مثل زمستان و پاییز

جدول ۱: همبستگی رتبه‌ای بین شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه ارازکوسه

شاخص‌ها	SPI, SSI	SPI, MSDI	SSI, MSDI
فصل			
بهار	۰/۷۳	۰/۹۲	۰/۹۲
تابستان	۰/۶۵	۰/۸۹	۰/۸۹
پاییز	۰/۵۱	۰/۸۶	۰/۸۵
زمستان	۰/۳۸	۰/۷۴	۰/۸۷

نشان می‌دهند. در دیگر فصل‌ها هیچ گونه و روندی را هیچ‌کدام از شاخص‌ها نشان نمی‌دهند (جدول ۲). در این ایستگاه تطابق خوبی بین نتایج آزمون جهش و روند وجود دارد و نشان می‌دهد هر روندی که اتفاق افتاده است همراه با جهش بوده است.

نتایج آزمون روند و جهش بر روی سری زمانی شاخص‌های فصلی خشکسالی نشان می‌دهد در فصل بهار با وجود اینکه روند و جهشی در تغییرات خشکسالی هواشناسی مشاهده نشده است ولی شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SSI و شاخص چند متغیره خشکسالی MSDI هر دو روند و جهش کاهشی را

جدول ۲- نتایج آزمون روند و جهش در شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه ارازکوسه

شاخص خشکسالی	فصل سال	آزمون همگنی پتیت	شیب	آزمون من-کندال
		P_Value	خط روند	P_Value
		t	s	s
		نتیجه آزمون جهش	نتیجه آزمون روند	نتیجه آزمون روند

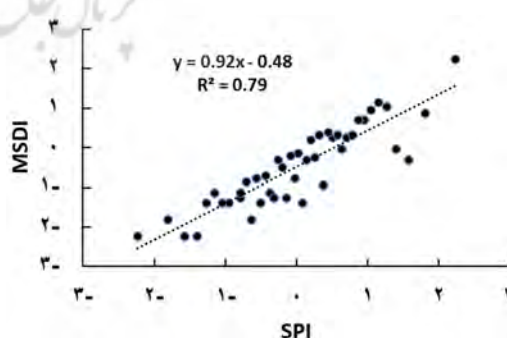
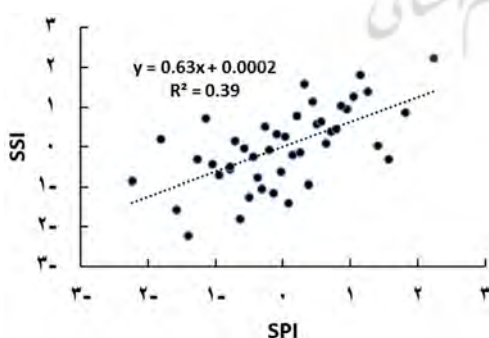
شاخص	بهار	تابستان	زمستان	زمستان	شاخص	بهار	تابستان	زمستان	زمستان
SPI3	۱۴	۱۶	۳۲	۱۴	SPI3	۱۴	۱۶	۳۲	۱۴
SSI3	۲۹	۲۶	۲۹	۲۹	SSI3	۲۹	۲۶	۲۹	۲۹
MSDI3	۱۶	۲۶	۲۹	۲۹	MSDI3	۱۶	۲۶	۲۹	۲۹
SPI6	۳۲	۲۶	۲۹	۲۹	SPI6	۳۲	۲۶	۲۹	۲۹
SSI6	۲۶	۲۶	۲۹	۲۹	SSI6	۲۶	۲۶	۲۹	۲۹
MSDI6	۲۶	۲۶	۲۹	۲۹	MSDI6	۲۶	۲۶	۲۹	۲۹
SPI9	۲۹	۲۶	۲۹	۲۹	SPI9	۲۹	۲۶	۲۹	۲۹
SSI9	۳۶	۲۶	۲۹	۲۹	SSI9	۳۶	۲۶	۲۹	۲۹
MSDI9	۷	۲۶	۲۹	۲۹	MSDI9	۷	۲۶	۲۹	۲۹
SPI12	۱۴	۲۶	۲۹	۲۹	SPI12	۱۴	۲۶	۲۹	۲۹
SSI12	۳۰	۲۶	۲۹	۲۹	SSI12	۳۰	۲۶	۲۹	۲۹
MSDI12	۲۹	۲۶	۲۹	۲۹	MSDI12	۲۹	۲۶	۲۹	۲۹

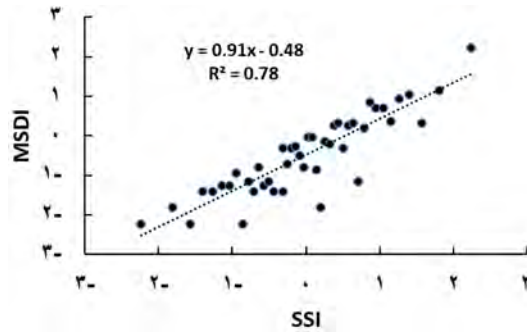
شاخص خشکسالی هواشناسی SPI به کمتر از ۸۰ درصد ($R^2=0/64$) برسد و نسبت به شاخص SSI از همبستگی کمی بالاتر برخوردار است (شکل ۷).

در ایستگاه گالیکش در فصل تابستان هماهنگی خوبی بین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها بین سه شاخص مشاهده نمی‌شود (شکل ۷). در فصل پاییز نیز در ایستگاه گالیکش همبستگی خوبی بین دو شاخص تک‌متغیره SPI و SSI مشاهده نمی‌شود (شکل ۸). اما شاخص MSDI از همبستگی قابل توجهی با این دو شاخص برخوردار است. پس می‌توان نتیجه گرفت اگر هیچ‌گونه همبستگی معنی‌داری بین دو شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود نداشته باشد با این وجود باز می‌توان شاخص MSDI را نماینده مناسبی از این دو شاخص در نظر گرفت.

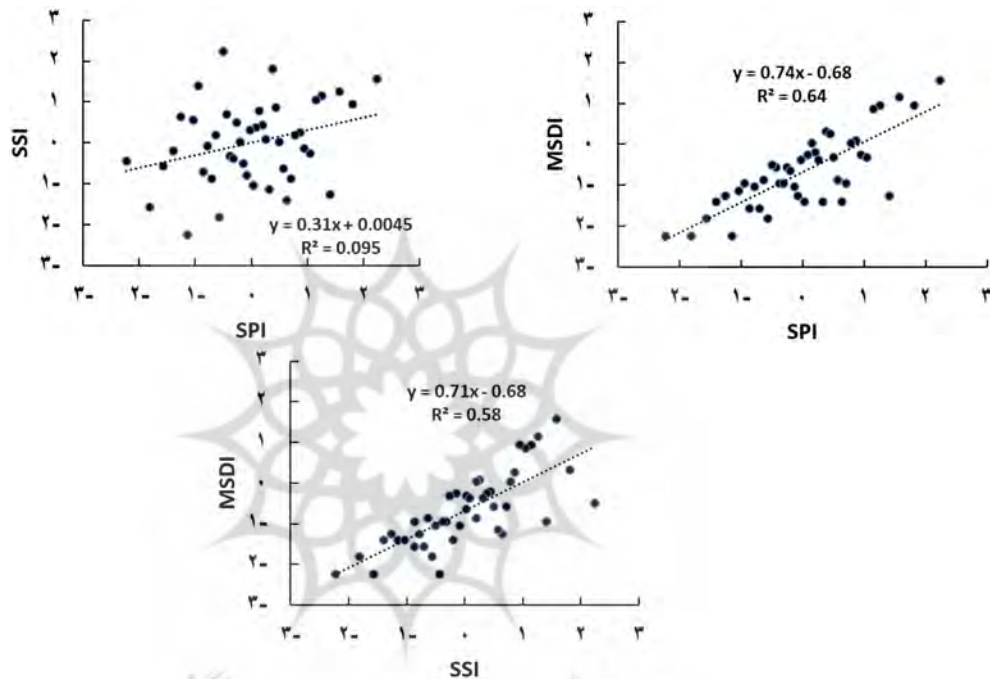
نتایج بررسی شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه

گالیکش: در فصل بهار در ایستگاه گالیکش یک همبستگی نسبتاً پایینی بین شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و شاخص خشکسالی هواشناسی SSI برقرار است. اما شاخص دومتغیره MSDI همبستگی بالایی را با هر دو شاخص SPI و SSI برقرار می‌کند این همبستگی با شاخص خشکسالی هواشناسی SPI به بیش از ۸۸ درصد ($R^2=0/79$) می‌رسد و نسبت به شاخص SSI از همبستگی کمی بالاتر برخوردار است (شکل ۶). در فصل تابستان در ایستگاه گالیکش ارتباط بین شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و شاخص خشکسالی هواشناسی SSI دارای کمترین میزان همبستگی است و ارتباط شاخص دومتغیره MSDI با شاخص SPI و SSI را نیز تحت تأثیر قرار داده و باعث می‌شود میزان همبستگی این شاخص با

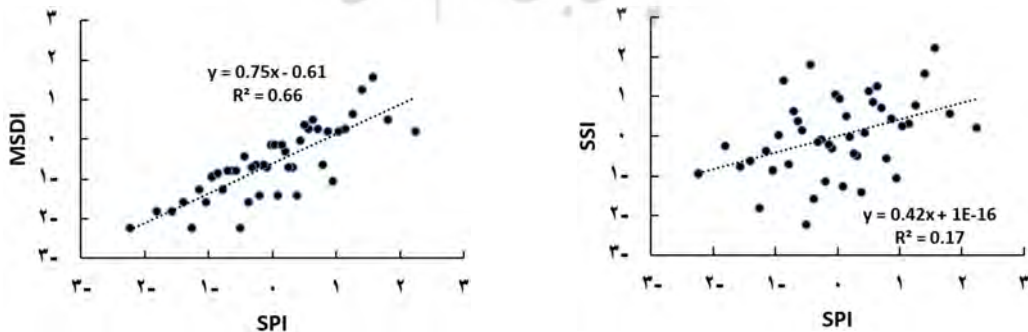


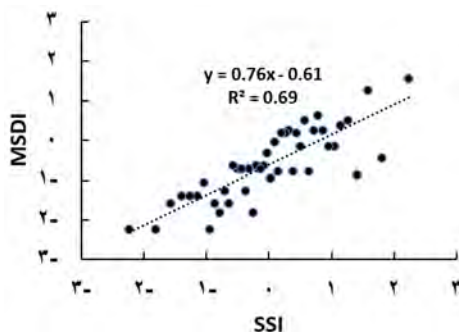


شکل ۶: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا - سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا - سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل بهار در ایستگاه گالیکش



شکل ۷: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا - سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا - سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل تابستان در ایستگاه گالیکش

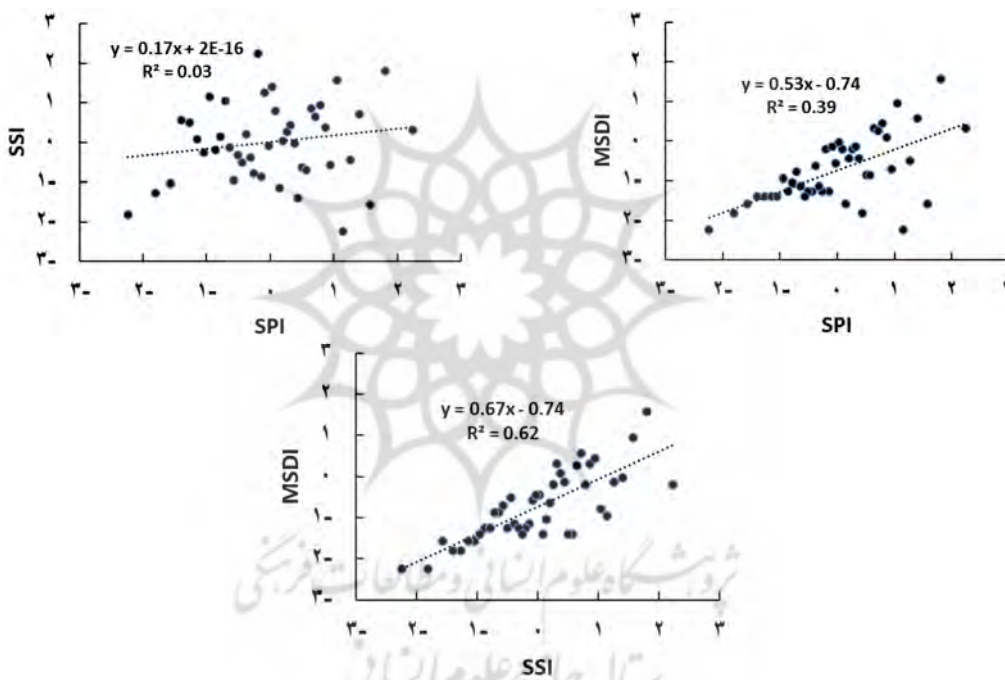




شکل ۸: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا- سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا- سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل پاییز در ایستگاه گالیکش

نشان دادن بارش کل حوضه باشد و نشان از تغییرات مکانی زیاد بارش در این حوضه آبریز را دارد (شکل ۹).

در فصل زمستان ارتباط بین دو شاخص SPI و SSI به کمترین مقدار خود می‌رسد که البته این می‌تواند به مناسب نبودن ایستگاه هواشناسی برای



شکل ۹: نمودار پراکنش بین شاخص SSI و SPI (شکل بالا- سمت راست)، شاخص MSDI با SPI (شکل بالا- سمت چپ) و شاخص MSDI با SSI (شکل پایین) در فصل زمستان در ایستگاه گالیکش

ولی شاخص MSDI همبستگی قابل قبولی را با این شاخص‌ها برقرار می‌کند.

آزمون همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن در ایستگاه گالیکش (جدول ۳)، نشان می‌دهد با وجود اینکه در این منطقه ارتباط خوبی بین SPI و SSI وجود ندارد

جدول ۳: همبستگی رتبه‌ای بین شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه گالیکش

شاخص‌ها			فصل
SSI, MSDI	SPI, MSDI	SPI, SSI	
۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۶۲	بهار

۰/۷۶	۰/۸	۰/۳۱	تابستان
۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۴۲	پاییز
۰/۷۹	۰/۶۲	۰/۱۷	زمستان

۴). شاخص MSDI، هیچ گونه روندی را نشان نمی‌دهد. آزمون جهش نیز تطابق خوبی را با آزمون روند نشان می‌دهد و در تمام موارد در صورتی که روند وجود داشته باشد، این روند همراه با جهش می‌باشد.

نتایج بررسی روند و جهش در سری زمانی شاخص‌ها نشان می‌دهد فصل بهار دبی رودخانه رو به کاهش، در فصل پاییز بارش‌ها رو به کاهش و در دو فصل دیگر روند معنی‌داری مشاهده نمی‌شود (جدول

جدول ۴- نتایج آزمون روند و جهش در شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه گالیکش

شاخص خشکسالی	آزمون همگنی پتیت			شیب خط روند	آزمون من-کندال	
	t	P_Value	نتیجه آزمون جهش		s	P_Value
SPI3	۱۳	۰/۷۷۴	ندارد	-۰/۰۰۸	-۵۵	۰/۵۸۵
SDI3	۲۹	۰/۰۲۱	دارد	-۰/۰۳۲	-۲۴۵	۰/۰۱۴
MSDI3	۲۹	۰/۲۴۴	ندارد	-۰/۰۲۲	-۱۷۲	۰/۰۸۴
SPI6	۲۶	۰/۵۹۲	ندارد	۰/۰۱۳	۷۶	۰/۴۴۸
SDI6	۴۰	۰/۱۳	ندارد	-۰/۰۱۲	-۷۷	۰/۴۴۲
MSDI6	۲۱	۰/۲۰۷	ندارد	۰/۰۰۲	۲۱	۰/۸۴
SPI9	۲۸	۰/۰۴۷	دارد	۰/۰۲۸	۲۱۴	۰/۰۳۱
SDI9	۳۶	۰/۷۵۴	ندارد	-۰/۰۰۷	-۴۰	۰/۶۹۳
MSDI9	۲۷	۰/۳۹۵	ندارد	۰/۰۱۲	۱۰۲	۰/۳۰۷
SPI12	۴۳	۰/۲۳۶	ندارد	۰/۰۱۵	۱۰۰	۰/۳۱۷
SDI12	۳۳	۰/۵۲۳	ندارد	-۰/۰۰۱	-۶۰	۰/۵۵۱
MSDI12	۱۹	۰/۸۵۳	ندارد	-۰/۰۰۱	-۱۲	۰/۹۱۱

خود می‌رسد که با نتایج تیموری و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد.

۲) با وجود اینکه در برخی از فصل‌های سال همبستگی غیر معنی‌داری بین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی وجود داشت، اما شاخص دو متغیره خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (MSDI) همبستگی نسبتاً خوبی (بیش از ۷۰ درصد) را با این دو شاخص نشان داد. در صورتی که همبستگی اولیه بین این دو شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بالا باشد همبستگی شاخص MSDI با آنها را نیز تحت تأثیر قرار داده و آن را افزایش می‌دهد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت شاخص تعریف شده بر اساس توابع کوپلا می‌تواند نماینده قابل اعتمادتری در بیان

نتیجه‌گیری نهایی

در ارزیابی شاخص دو متغیره خشکسالی هواشناسی-هیدرولوژیکی MSDI در چند ایستگاه هیدرومتری استان گلستان مهم‌ترین نتایجی که بدست آمد عبارتند از:

۱) با توجه به تغییرات مکانی زیاد بارش در حوضه‌های آبریز استان گلستان و همچنین دخیل بودن عوامل مختلف دیگری به غیر از مقدار بارش بر رواناب (شدت و مدت بارش، رطوبت خاک حوضه، مقدار رواناب در گام‌های زمانی قبل و ...) و همچنین غیر خطی بودن رابطه بین بارش و رواناب، همبستگی کاملی بین دو شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی SPI و SSI وجود ندارد و در برخی از فصل‌های سال این همبستگی به کمترین مقدار

وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی باشد.

۳) شاخص دو متغیره MSDI در هیچ یک از ایستگاه‌های مطالعاتی، حتی در فصل‌هایی که یکی از شاخص‌های SPI یا SSI روند یا جهش معنی داری را نشان می‌دادند. هیچ‌گونه جهش یا روند معنی‌داری را نشان نداد که این می‌تواند ناشی از تعدیل شدن شاخص MSDI باشد.

۴) در زمانی که دو شاخص SPI و SSI در نشان دادن شرایط خشکسالی اختلاف زیادی را داشتند شاخص

MSDI، با شاخصی که مقدار کمتر و شرایط خشک‌تری را نشان می‌داد هماهنگ‌تر بود. این نتیجه با نتایج‌هائو و آقا کوچک (۲۰۱۴) که بیان کردند " MSDI در مقایسه با شاخص‌های تک متغیره مبتنی بر بارش و یا رطوبت خاک، با احتمال بیشتری می‌تواند خشکسالی را تشخیص دهد" مطابقت دارد.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اثرپذیری بخش منابع آب از دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی با هم، استفاده از شاخص دو متغیره خشکسالی می‌تواند نتایج منطبق با واقعیت‌تری را ارائه کند. و به عنوان شاخص جامع‌تر خشکسالی در منطقه معرفی گردد.

تقدیر و تشکر

این طرح تحقیقاتی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و با حمایت این دانشگاه (به شماره طرح ۴۸-۳۹۳-۹۷) انجام شده است. نویسندگان از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان برای حمایت مالی برای انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

۱. اژدری، زهرا، بذرافشان، ام البنین، بذرافشان، جواد، شکاری، مرضیه و زمانی، حسین. ۱۳۹۹. پایش خشکسالی هواشناسی در استان هرمزگان مبتنی بر شاخص‌های چندمتغیره آماری و احتمالاتی. نشریه علمی پژوهشی خشک‌بوم. ۱۰ (۲): ۱-۱۷.
۲. بابایی حمید، هورفر عبدالحسین و عراقی نژاد شهاب. ۱۳۹۱. ارائه مدلی نوین و یکپارچه به منظور ارزیابی ریسک خشکسالی منطقه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۳ (۲): ۱۲۳-۱۲۸.
۳. بذرافشان، جواد. ۱۳۸۱. مطالعه تطبیقی برخی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران-کرج.
۴. پورالخاص نوکنده محمد، امان جهانی، ویدا، حزباوی زینب، مصطفی‌زاده رئوف. ۱۴۰۲. شاخص‌های برآورد و
۵. پوریا محیط اصفهانی، سعید سلطانی، رضا مدرس، پورمنافی، سعید. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص خشکسالی چندمتغیره MSDI و پایش خشکسالی هواشناسی- کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۴ (۳): ۳۳-۴۷.
۶. تیموری فاطمه، قربانی خلیل، بذرافشان جواد و شریفان حسین. ۱۳۹۴. مطالعه تطبیقی نمایه‌های هواشناسی با نمایه‌های هیدرولوژیکی برای پایش خشکسالی به روش داده کاوی (مطالعه موردی: ایستگاه اراز کوسه، استان گلستان). تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶ (۳): ۴۱۳-۴۰۵.

- modelling: application to multisensor precipitation estimates. *Hydrol. Process*, 24(15):2111-24.
18. Aghakouchak, A., Ciach G., & Habib, E. 2010. Estimation of tail dependence coefficient in rainfall accumulation fields. *Adv. Water Res.* 33(9):1142-9.
 19. AghaKouchak A, Easterling D., Hsu K., Schubert S., & Sorooshian, S. 2012. *Extremes in a changing climate*. Netherlands, Dordrecht. Springer.
 20. Bardossy A. 2006. Copula-based geostatistical models for groundwater quality parameters. *Water Resour Res.* 42(11): W11416.
 21. Byun, H.R. & Wilhite D.A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. In: *Journal of Climate*. 12:2747-2756.
 22. Favre, A.C., E.L., Adlouni, S., Perreault, L., Thiémond N., & Bobée, B. 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resour Res.* 40(1):W01101.
 23. Genest, C., & Favre, AC. 2007. Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *J. Hydrol. Eng.* 12(4):347-68.
 24. Gibbs, W.J. and Maher, J.V. 1967. Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology. Bulletin*, 48p.
 25. Hao, Z. and AghaKouchak, A. 2013. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57: 12-18.
 26. Hao, Z. & AghaKouchak, A. 2014. A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. *Journal of Hydrometeorology*, 15: 89-101.
 27. Kao, S.C., & Govindaraju, R.S. 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *J Hydrol.* 380(1-2):121-34.
 28. Kendall, M.G. 1975. *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London. 272.
 29. Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 13: 245-259.
 30. McKee, T.B.N., Doesken, J. & Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eight Conf. On Applied Climatology*. Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. 179-184.
 ۷. خلیلی علی. ۱۳۷۰. گزارش‌های حوضه‌ای هواشناسی طرح جامع آب کشور. وزارت نیرو، جاماب، ایران.
 ۸. رضائی قلعه لاله. قربانی خلیل. ۱۳۹۷. تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPEI و SPI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان. هواشناسی کشاورزی. ۶ (۱): ۴۰-۳۱.
 ۹. زارع ابیانه حمید، یزدانی وحید و اژدری خلیل. ۱۳۸۸. مطالعه تطبیقی چهار نمایه خشکسالی هواشناسی بر پایه عملکرد نسبی محصول گندم دیم در استان همدان. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۱(۶۹): ۴۹-۳۵.
 ۱۰. شاه‌خوندی سیدمنصور، لشنی‌زند مهران و خاک‌پور معصومه. ۱۳۸۸. بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و ارتباط آن با بارش در حوضه رود خانه خرم آباد. آمایش محیط. ۶(۲): ۱۵۵-۱۴۰.
 ۱۱. شیوخی سوغانی و نادى. ۱۳۹۹. بررسی کارایی و اصلاح نمایه SPI در پایش خشکسالی مناطق خشک و نیمه خشک ایران. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۱۰(۲): ۱۷-۳۰.
 ۱۲. عبدالمهی، سنا، بذرافشان، ام البنین و شکاری، مرضیه. ۱۴۰۱. تحلیل روند مشخصه‌های خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های تک و چندمتغیره. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۲(۴): ۳۳۴-۳۵۳.
 ۱۳. قربانی، خلیل، ولیزاده، اسماعیل و برارخان‌پور، صدیقه. ۱۳۹۷. بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی شاخص دو متغیره خشکسالی هواشناسی SPEI در ایران. مدیریت بیابان. ۶(۱۱): ۲۵-۳۸.
 ۱۴. مظفری غلام‌علی. ۱۳۸۵. عدم تطابق خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی در دو حوزه آبریز همجوار در دامنه شمالی شیرکوه یزد. ۱۳۸۵. برنامه‌ریزی و آمایش فضا. ۱۰(۱): ۱۹۰-۱۷۳.
 ۱۵. مفیدی‌پور نازنین. ۱۳۹۱. بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز اترک. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۵(۳): ۲۶-۱۶.
 ۱۶. میریعقوب‌زاده میرحسن، خسروی سیدامین و ذبیحی مصطفی. ۱۳۹۸. مروری بر شاخص‌های خشکسالی و بررسی عملکرد آن‌ها. آب و توسعه پایدار. ۶(۱): ۱۰۳-۱۱۲.
 17. AghaKouchak A., Bárdossy A., & Habib E. 2010. Copula-based uncertainty

38. Shukla, S., Steinemann, A.C., & Lettenmaier, DP. 2011. Drought monitoring for Washington State: indicators and applications. *J. Hydrometeorol.* 12(1):66–83.
39. Sklar A. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. 1959. *Publ Inst Statist Univ Paris.* 8:229–31.
40. Trivedi, P.K., & Zimmer, D.M. 2005. Copula modeling: an introduction for practitioners. *Found Trends Economet.* 1(1): 1–111.
41. Vicente-Serrano, Sergio, Beguería, Santiago & López-Moreno, J.I. 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate.* 23: 1696-1718.
42. Zhang, X., Vincent, L. A., Hogg, W.D. and Niitsoo, A. 2000. Temperature and rainfall trends in Canada during the 20th century. *Atmospheric Ocean.* 38:395-429.
31. Mishra, Ashok K., & Vijay Singh, P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391(1): 202-216.
32. Mo KC. 2008. Model-based drought indices over the United States. *Journal of Hydrometeorol.* 9(6):1212–30.
33. Nadi, M., & Shiukhy Soqanloo, S. 2023. Modification of standardized precipitation index in different climates of Iran. *Meteorological Applications,* 30(5), e2155.
34. Nelsen R.B. 2006. An introduction to copulas. New York, Springer.
35. Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N., & Rosso, R. 2007. Extremes in nature: an approach using copulas. New York: Springer.
36. Salvadori, G., & De Michele, C. 2010. Multivariate multipara meter extreme value models and return periods: a copula approach. *Water Res. Res.* 46:W10501.
37. Shiau, J. 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resource Manage.* 20 (5):795–815.

