

## مقاله پژوهشی

# اثر همبستگی متقابل متغیرهای شاخص خشکسالی SPEI در تحلیل بلند مدت خشکسالی

نگار رسولی مجد<sup>۱</sup>، مجید منتصری<sup>۲\*</sup>، بابک امیرعطایی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۳- دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: montaseri@hotmail.com; m.montaseri@urmia.ac.ir

## چکیده

در این مطالعه بطور نوآورانه یک ارزیابی جامعی از تأثیر ضریب همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر-تعرق بر عملکرد شاخص خشکسالی SPEI در پیش‌بینی رفتار بلند مدت خصوصیات خشکسالی کشاورزی بر پایه داده‌های ۳۹ ایستگاه سینوپتیک واقع در شرایط اقلیمی و ارتفاع مختلف در سرتاسر ایران انجام پذیرفته و عملکرد آن با شاخص SPI مقایسه گردیده است. بدین منظور سری داده‌های مصنوعی بارندگی و تبخیر-تعرق (به تعداد ۱۰۰۰۰ جفت) با استفاده از مدل استوکاستیک چندگانه اتورگرسیو با تأخیر یک برای دامنه وسیع از ضریب همبستگی متقابل دو متغیر فوق تولید شد و سپس برای پایش و تعیین خصوصیات خشکسالی استفاده گردید. نتایج این مطالعه بیانگر رفتار نظام‌مند و وابسته خصوصیات مختلف خشکسالی با همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر-تعرق بود. بطوریکه، عملکرد دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI با افزایش همبستگی متقابل دو متغیر ( $|R| \Rightarrow$ ) بطور غیرخطی یا توانی نزدیک به هم بوده (ضریب همبستگی  $R=0.85$ ) و برای همبستگی متقابل برابر صفر حداکثر اختلاف مابین خصوصیات خشکسالی برای دو شاخص حاصل شد. نهایتاً نتایج این مطالعه به‌عنوان یک راهنمای جامع در استنباط دقیق و واقعی از رخدادها و خصوصیات خشکسالی بازای شاخص SPEI بوده و می‌تواند کمک مؤثری در تفسیر نتایج خشکسالی با شاخص SPEI داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات خشکسالی، شبیه‌سازی مونت کارلو، مدل‌های تولید داده، همبستگی متقابل، SPEI، SPI

## The Effect of Cross-Correlation between SPEI Variables in Long-Term Drought Analysis

N Rasouli Majd<sup>1</sup>, M Montaseri<sup>2\*</sup>, B Amirataee<sup>3</sup>

Received: October 05, 2020

Accepted: March 14, 2021

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

2- Prof., Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

3- Ph.D. in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

\*Corresponding Author, Email: m.montaseri@urmia.ac.ir , montaseri@hotmail.com

### Abstract

In this study, a comprehensive evaluation of the effect of cross-correlation coefficient between precipitation and evapotranspiration on the performance of SPEI in forecasting the long-term behavior of agricultural drought characteristics in 39 synoptic stations located in different climates and altitudes throughout Iran has been performed, and its performance has been compared with SPI. For this purpose, stochastic precipitation and evapotranspiration time series (10,000 pairs) were generated using the Lag-one Autoregressive Multiple-Site Model (Multi-AR(1)) for a wide range of correlation coefficients of the above two variables and then used to monitor and determine different drought characteristics. The results of this study showed the systematic and dependent behavior of different characteristics of drought with cross-correlation between precipitation and evapotranspiration. So that, the performance of the two SPEI and SPI indices was nonlinearly close to each other ( $R=0.85$ ) by increasing the cross-correlation between the two variables ( $|R|\Rightarrow 1$ ), and for cross-correlation of zero, the maximum difference between the drought characteristics was obtained for the two indices. Finally, the results of this study have been used as a comprehensive guide in the accurate and realistic inference of drought events and characteristics and can be an effective aid in interpreting drought outcomes with the SPEI index.

**Keywords:** Cross-correlation, Data generation models, Drought characteristics, Monte Carlo simulation, SPI, SPEI

### مقدمه

SPI (مکی و همکاران ۱۹۹۳) به عنوان رایج ترین و پرکاربردترین شاخص در مطالعات مختلف پایش خشکسالی شناسایی شده است (میشرا و سینگ ۲۰۱۰، منتصری و امیرعطایی ۲۰۱۷). بررسی تحقیقات مختلف نشان می دهد اکثر مطالعات پایش خشکسالی در سراسر دنیا بر اساس شاخص های تک متغیره بازای بارندگی بوده است. این درحالیست که شاخص های خشکسالی تک متغیره برای توصیف کامل شرایط و پیامدهای پیچیده خشکسالی های غیر هواشناسی مانند کشاورزی و هیدرولوژی دقت مطلوب را نداشته و شاخص های دو یا چند متغیره و پارامترهای گوناگون برای شناسایی

خشکسالی بخشی طبیعی از اقلیم می باشد که می تواند در هر شرایط آب و هوایی در سراسر جهان، نظیر بیابان ها و جنگل های بارانی رخ دهد. خشکسالی عموماً ناشی از کاهش میزان بارندگی در طی فصل رشد یا سال، نسبت به متوسط دراز مدت تاریخی می باشد که منجر به کمبود آب برای برخی فعالیت ها می گردد (میشرا و سینگ ۲۰۱۰). خشکسالی عمدتاً به چهار نوع هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم می شود (دراکوپ و همکاران ۱۹۸۰). شاخص خشکسالی هواشناسی بارش استاندارد

اعمال اثر توأم بارندگی و تبخیر- تعرق معرفی نموده‌اند. در سال‌های اخیر محققین متعددی در نقاط مختلف دنیا مزیت استفاده از آن را در ارزیابی خشکسالی کشاورزی تأیید نموده‌اند که ذیلاً به نمونه‌ای از آن‌ها اشاره می‌شود.

لورنزو لاکروز و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای به بررسی خشکسالی ۱ تا ۴۸ ماهه در حوضه رودخانه تاگوس<sup>۲</sup> واقع در مرکز اسپانیا با استفاده از دو شاخص SPEI و SPI در دوره آماری ۲۰۰۶-۱۹۶۱ پرداختند. نتیجه مطالعه ایشان نشان داد که مدت تداوم و بزرگی خشکسالی‌های تحلیل شده توسط شاخص SPEI بیشتر از شاخص SPI بود. ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به ارزیابی جهانی عملکرد شاخص‌های مختلف خشکسالی و شاخص SPEI با ۴ نسخه شاخص PDSI و شاخص SPI مورد مقایسه قرار دادند. آنها تفاوت‌های اندکی در عملکرد مقایسه‌ای شاخص‌های SPEI و SPI مشاهده کردند، اما نتیجه گرفتند که SPEI توانایی بهتری در شناسایی اثرات خشکسالی درون‌سالی یا کشاورزی خصوصاً در تابستان را در مقایسه با SPI دارد. لی و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای به بررسی شرایط خشکسالی در گام‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه طی دوره زمانی ۲۰۱۲-۱۹۸۲ در ۸۹ ایستگاه در جنوب چین پرداختند و نشان دادند که با افزایش گام زمانی، همبستگی بین دو شاخص SPEI و SPI افزایش می‌یابد. پوتوپووا و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تغییرات خشکسالی در گام‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در جمهوری چک با شاخص‌های SPEI و SPI پرداختند. نتایج نشان داد شاخص SPEI نسبت به SPI، رخدادهای بیشتری در طبقات خشکسالی متوسط و شدید نشان داده و به طور کلی شاخص SPEI رخدادهای کمتری در طبقه بسیار ترسالی نشان داده است. وو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص SPEI ۱ و ۱۲ ماهه طی دوره آماری

جنبه‌های مختلف چنین خشکسالی‌ها مطرح گردیده است (ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۸).

در سال‌های گذشته محققین مختلف سعی به یکپارچه‌سازی مجموعه‌ای از پارامترهای آب و هوایی و شاخص‌های خشکسالی نموده‌اند (هائو و آقاکوچک ۲۰۱۳). در این راستا، نتایج پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های چند متغیره بیانگر وابستگی معنی‌دار خشکسالی‌های کشاورزی به پارامترهای مؤثر مرتبط با خشکی مانند بارندگی، تبخیر- تعرق یا دما، رطوبت خاک و... است (ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۸). لذا توسعه و استفاده از شاخص‌های دو یا چند متغیره برای نظارت بهتر بر جنبه‌های مختلف خشکسالی به‌منظور پایش مؤثرتر و هشدار زود هنگام، مهم است.

در سال ۲۰۱۰ ویسنته سرانو و همکاران شاخص دو متغیره خشکسالی<sup>۱</sup> SPEI را برای پایش خشکسالی کشاورزی توسعه دادند. ساختار تئوریک و ریاضی شاخص SPEI کاملاً مشابه شاخص تک متغیره SPI بوده و تنها بجای متغیر بارندگی (P) از متغیر اختلاف بارندگی و تبخیر- تعرق (P-ET) استفاده می‌کند. شاخص SPEI به دلیل ساختار تئوریک منطقی، داشتن فرم ساده و دقت بالا، مناسب‌ترین شاخص تک متغیره برای پایش خشکسالی هواشناسی بوده ولی پتانسیل لازم جهت تحلیل خشکسالی کشاورزی را ندارد (ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۰)، زیرا خشکسالی کشاورزی خصوصاً کشاورزی دیم علاوه بر بارندگی تابعی از عوامل مؤثر دیگر مانند دما، تبخیر- تعرق گیاه، رطوبت اولیه و نوع خاک و ... در طول دوره رشد گیاهان است. از طرف دیگر اکثر شاخص‌های دو یا چند متغیره موجود، ساختار تئوریک مطمئن یا منطقی همانند SPEI و SPI ندارند. از این رو ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۱۰)، شاخص SPEI را به‌عنوان یک شاخص بسیار مناسب با فرم ساده و دقت بالا برای تحلیل و تعیین خصوصیات خشکسالی کشاورزی با داشتن توانایی

<sup>2</sup> Tagus River

<sup>1</sup> Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

مهم آماری داده‌ها مانند همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق در خصوصیات بلند مدت خشکسالی کشاورزی، که منجر به استخراج نتایج متفاوت و متناقض گردیده است. لذا در این مطالعه بطور نوآورانه یک ارزیابی جامعی از تأثیر ضریب همبستگی متقابل با تأخیر صفر دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق بر عملکرد شاخص خشکسالی SPEI در پیش‌بینی رفتار بلند مدت خصوصیات خشکسالی کشاورزی در شرایط اقلیمی متفاوت در پهنه وسیع کشور ایران مبتنی بر ۳۹ ایستگاه سینوپتیک انجام پذیرفته و عملکرد آن با شاخص SPI مقایسه گردیده است. بدین منظور از شبیه‌سازی مونت کارلو جهت تولید سری بسیار بلند مدت جفت داده‌های تصادفی وابسته بارندگی و تبخیر- تعرق (به تعداد ۱۰۰۰۰ جفت) با دامنه وسیعی از ضریب همبستگی متقابل استفاده گردید.

#### مواد و روش‌ها

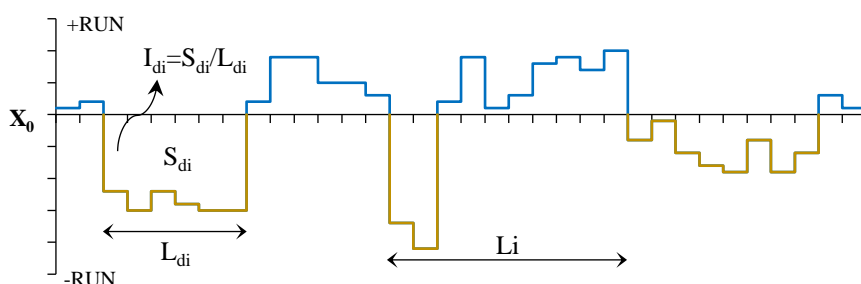
##### شاخص خشکسالی SPEI

شاخص خشکسالی SPEI توسط ویسنته سرانو و همکاران (۲۰۱۰) برای تحلیل خشکسالی معرفی شد. این شاخص براساس معادله بیلان ساده آب یعنی اختلاف بارندگی (P) و تبخیر- تعرق پتانسیل (ET) (تبخیر و تعرق گیاه مرجع) توسعه یافته است. برای برآورد این شاخص، ابتدا توزیع احتمال نظری مناسب (مانند توزیع لوگ لجستیک سه پارامتری پیشنهاد شده توسط ویسنته سرانو و همکاران در سال ۲۰۱۰) به داده‌های طولانی مدت اختلاف بارندگی (P) و تبخیر- تعرق پتانسیل (ET) ( $D_i^* = P_i - ET_i$ ) برازش داده شده و سپس تابع توزیع تراکمی تجربی مقادیر مشاهداتی ( $D_i^*$ ) با استفاده از یک تبدیل مناسب از توزیع برازش یافته به توزیع تراکمی نرمال انتقال داده شده ( $D_i$ ) می‌شود. سپس مقادیر استاندارد شده ( $D_i$ ) جهت پایش خشکسالی بازای طبقه‌بندی دوره‌های خشک و تر SPEI استفاده می‌شود. طبقه‌بندی دوره‌های خشک و تر شاخص SPEI

۱۹۶۱-۲۰۱۶ در چین پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش گام زمانی، نوسانات زمانی SPEI ضعیف‌تر است. نصرتی (۱۳۹۴) به بررسی شاخص SPEI در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در گستره اقلیم‌های مختلف ایران در بازه زمانی ۱۹۷۵ الی ۲۰۰۷ و مقایسه با شاخص SPI پرداخت. نتایج نشان داد که دو شاخص دارای همبستگی معنی‌داری بوده، اما شاخص SPEI پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی دارد. بذرافشان و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای به تحلیل روند خشکالی با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI در مقیاس زمانی ۳ تا ۴۸ ماهه در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در سواحل جنوبی ایران طی دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۲ پرداختند. نتایج نشان داد روند تغییرات دو شاخص مشابه اما شاخص SPEI نسبت به SPI فرکانس بالاتری از خشکسالی و پاسخ سریع‌تری به تغییرات رطوبتی نشان می‌دهد. همچنین بین تمامی مقیاس‌های زمانی محاسبه دو شاخص رابطه مثبت و معنی‌دار وجود دارد. ذبیحی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه‌ای به تحلیل خصوصیات دوره‌های خشک و مرطوب بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI سه ماهه در هفت ایستگاه سینوپتیک استان کردستان پرداختند. نتایج نشان داد، شاخص SPEI متوسط شدت بیشتری را برای دوره‌های خشک و مرطوب در تمام ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه برآورد نموده است.

بر اساس ارزیابی نتایج مطالعات مذکور، نکات اساسی این مطالعات بقرار زیر قابل تفکیک است: الف- اکثر مطالعات نشان دادند که نتایج پایش خشکسالی کشاورزی در مقیاس‌های زمانی برون‌سالی (برابر یا بزرگتر از ۱۲ ماه) مشابه نتایج شاخص‌های خشکسالی هواشناسی است (شراقتی و همکاران ۲۰۲۰)، چرا که پایش خشکسالی کشاورزی در دوره‌های کوتاه مدت (۱، ۳، ۶ و ۹ ماه) به طور قابل توجهی تحت تأثیر تبخیر- تعرق یا دما است (ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۰). ب- عدم ارزیابی و روشن نبودن اثر مشخصات

آستانه ( $X_0$ ) مشخص قرار می‌گیرد (میشرا و همکاران ۲۰۰۹). در این مطالعه با توجه به طبقه‌بندی شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI، سطح آستانه برابر با ۱- در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- نمایش گرافیکی مشخصات اصلی خشکسالی بر اساس تئوری ران بازی آستانه خشکسالی  $X_0$

می‌باشد. جهت تعیین محدوده مناسب چهار همبستگی مذکور، مطالعه اولیه بر اساس ۳۹ ایستگاه سینوپتیک واقع در شرایط اقلیمی (طبقه‌بندی اقلیمی اصلاح شده کوپن-گیگر<sup>۳</sup> (بک و همکاران ۲۰۱۸) و ارتفاع مختلف در سرتاسر ایران انجام پذیرفت. توزیع ایستگاه‌های منتخب در سرتاسر ایران یکنواخت بوده و دارای آمار بلند مدت مشترک ۵۳ سال (۱۹۶۶-۲۰۱۸) پارامترهای هواشناسی هستند. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در شکل ۲ نشان داده شده است.

شاخص خشکسالی SPEI براساس دسترسی به داده‌های دو متغیر بارندگی ( $P$ ) و تبخیر-تعرق پتانسیل ( $ET$ ) (تبخیر و تعرق گیاه مرجع) توسعه یافته و براساس مقادیر انتقال یافته به توزیع نرمال ( $D_i$ ) قابل استفاده است. تقریباً در تمام نقاط دنیا داده‌های بارندگی در دسترس بوده، در حالیکه در اکثر نقاط دنیا اندازه‌گیری مستقیم و واقعی تبخیر-تعرق پتانسیل با لایسیمتر انجام پذیرفته و با استفاده از روش‌های تجربی مختلف مانند تورنت وایت (ویسنه سرانو و

همانند شاخص SPI می‌باشد (ویسنه سرانو و همکاران ۲۰۱۰).

#### مشخصه‌های خشکسالی

یوجویچ در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد استفاده از تئوری ران و تعیین مشخصات خشکسالی را طبق شکل ۱ ارائه نمود. تئوری ران پیمایش سری زمانی و قسمتی از آن است که در آن مقادیر خشکسالی، در زیر سطح

بر اساس شکل ۱، چهار پارامتر اصلی خشکسالی به صورت زیر تعریف می‌گردد (یوجویچ ۱۹۶۷):

۱- مدت خشکسالی ( $L_{di}$ ): مدت زمان بین شروع و پایان پدیده خشکسالی می‌باشد؛ ۲- بزرگی خشکسالی ( $S_{di}$ ): بزرگی خشکسالی برابر با مجموع مقدار یا طبقه خشکسالی است که در یک دوره پیوسته زیر سطح بحرانی قرار دارند؛ ۳- شدت خشکسالی ( $I_{di}$ ): متوسط مقدار یا طبقه خشکسالی است که در یک دوره پیوسته زیر سطح بحرانی قرار دارند. شدت خشکسالی از تقسیم بزرگی خشکسالی بر مدت زمان آن بدست می‌آید؛ ۴- فاصله بین دو دوره خشکسالی پیوسته ( $Li$ ): فاصله زمانی بین شروع دو خشکسالی پیوسته می‌باشد.

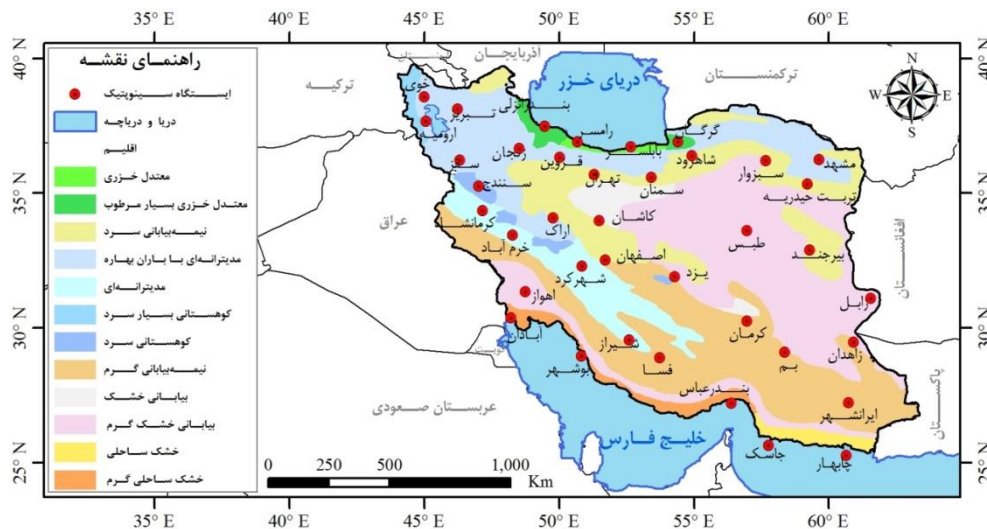
تعیین محدوده مجاز همبستگی داخلی و همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق

در این مطالعه چهار همبستگی مهم مابین دو متغیر (بارندگی و تبخیر-تعرق) شاخص SPEI مورد نظر بوده که شامل همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق با تأخیر صفر ( $R_{0,P,ET}$ ) و یک ( $R_{1,P,ET}$ ) و همبستگی داخلی بارندگی و تبخیر-تعرق با تأخیر یک ( $R_{1,P,P}$ ) و

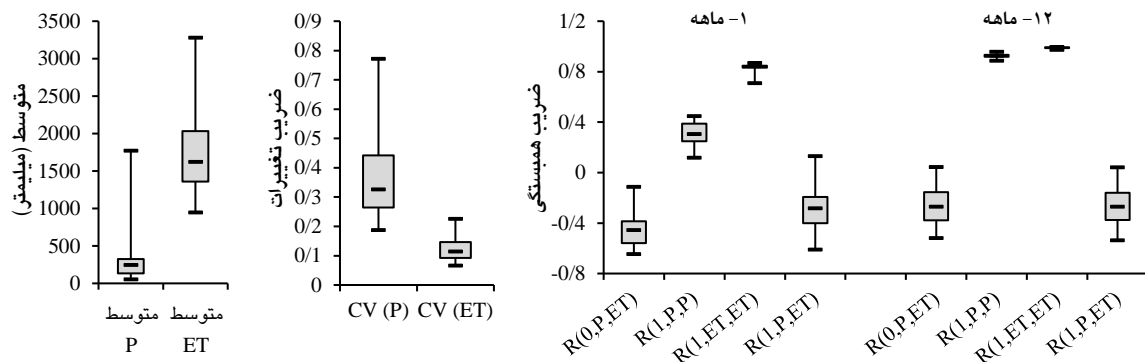
<sup>3</sup> Koppen-Geiger

همکاران (۲۰۱۰) برآورد می‌شود. در این میان سازمان خوار و بار جهانی (FAO)، کمیته بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID) و انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE)، روش تجربی پنمن-مانتیث را بعنوان روش استاندارد برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل پیشنهاد نموده و بطور گسترده‌ای در سرتاسر دنیا (ویسنه سرانو و همکاران ۲۰۱۰) و کشور ایران از جمله دین‌پژوه و

بابامیری (۲۰۲۰)، دین‌پژوه و همکاران (۲۰۱۹)، دین‌پژوه و همکاران (۲۰۱۱) و حسینی و همکاران (۱۳۹۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه نیز مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل ایستگاه‌های منتخب با استفاده از روش پنمن-مانتیث بصورت ماهیانه در طول دوره تاریخی (۲۰۱۸-۱۹۶۶) برآورد گردید.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در منطقه مطالعاتی



شکل ۲- نمودار باکس پلات تغییرات میانگین و ضریب تغییرات داده‌های بارندگی و تبخیر-تعرق و همچنین

مقادیر همبستگی‌های چهارگانه ۱ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های منتخب در دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۶۶

ماهه) در ۳۹ ایستگاه منتخب محاسبه گردید. شکل ۳ نمودار باکس پلات تغییرات میانگین و ضریب تغییرات داده‌های بارندگی و تبخیر-تعرق و همچنین نمودار باکس پلات مقادیر همبستگی‌های چهارگانه ۱ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. براساس

برای تعیین محدوده مجاز همبستگی‌های چهارگانه مورد نظر، همبستگی متقابل (با تأخیر صفر و یک) و همبستگی داخلی (با تأخیر یک ساله) بارندگی و تبخیر-تعرق بازای گام‌های زمانی مختلف (۱ الی ۱۲

استاندارد استفاده شد. مدل اتورگرسیو چندگانه با تأخیر یک مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود (متلس ۱۹۶۷).

$$Z_i = AZ_{i-1} + BV_i \quad [1]$$

که در آن،  $Z_i$  بردار  $(2 \times 1)$  مقادیر انتقال یافته به میانگین صفر دو متغیر وابسته (بارندگی و تبخیر-تعرق) و  $V_i$  بردار  $(2 \times 1)$  مقادیر تصادفی از توزیع نرمال استاندارد پیروی  $i$  و مستقل از  $Z_{i-1}$  می‌باشد.  $A$  و  $B$  ماتریس‌های ضرایب با ابعاد  $(2 \times 2)$  می‌باشند که مقادیر آنها بر اساس محدوده مشخص شده همبستگی‌های چهارگانه و با استفاده از روابط (۲) تا (۵) محاسبه می‌گردند.

$$A = S_1 S_0^{-1} \quad [2]$$

$$BB^T = S_0 - AS_0 A^T \quad [3]$$

$$S_0 = \begin{bmatrix} 1 & R_{0,P,ET} \\ R_{0,ET,P} & 1 \end{bmatrix} \quad [4]$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} R_{1,P,P} & R_{1,P,ET} \\ R_{1,ET,P} & R_{1,ET,ET} \end{bmatrix} \quad [5]$$

که در آن،  $R_{0,P,ET}$  یا  $R_{0,ET,P}$  همبستگی متقابل با تأخیر صفر بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل و  $R_{1,P,ET}$  همبستگی با تأخیر یک بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل بوده و برابر هم باید باشند.  $R_{1,ET,ET}$  و  $R_{1,P,P}$  برترتیب خود همبستگی با تأخیر یک مقادیر بارندگی و تبخیر-تعرق پتانسیل هستند.

#### مراحل روش تحقیق

محدوده حاصل برای چهار همبستگی مذکور مبنای شبیه‌سازی استوکاستیک در این مطالعه بوده است. بنابراین سری‌های زمانی تولیدی مستقل از زمان و مکان بوده که امکان ارزیابی جامع اثر همبستگی متقابل با تأخیر صفر بارندگی و تبخیر-تعرق در تحلیل خشکسالی با شاخص SPEI امکان‌پذیر باشد. همچنین با توجه به پایه زمانی و مکانی تحلیل اولیه، سری‌های زمانی تولیدی می‌تواند معرفی از داده‌های بارندگی و تبخیر-تعرق ۱ الی ۱۲ ماهه و همچنین در شرایط اقلیمی مختلف باشد. در این راستا سری زمانی از داده‌های مصنوعی وابسته بارندگی و تبخیر-تعرق با استفاده از مدل اتورگرسیو چندگانه با تأخیر یک از توزیع نرمال به

نمودار، دامنه تغییرات همبستگی داخلی بارندگی و تبخیر-تعرق در محدوده مطالعاتی برای بازه‌های زمانی ۱ و ۱۲ ماه محدود است. در حالیکه همبستگی متقابل خصوصاً با تأخیر صفر بارندگی و تبخیر-تعرق  $(R_{0,P,ET})$  دارای دامنه تغییرات بیشتری (۰/۰۵ تا -۰/۶۴) بود. از طرف دیگر از میان همبستگی‌های چهارگانه مذکور، همبستگی متقابل با تأخیر صفر اثر بسیار مؤثر و مستقیم در تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI را دارد و سایر همبستگی‌ها دارای اثر غیرمستقیم و کمتر است. نهایتاً در این مطالعه اثر همبستگی متقابل با تأخیر صفر در تحلیل خشکسالی بازای شاخص SPEI بدلیل اهمیت ویژه و تأثیر مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. ضمناً مقادیر سه همبستگی دیگر بدلیل دامنه تغییرات ناچیز در بازه زمانی مختلف (شکل ۳) و ساده نمودن مسئله، بطور ثابت برابر مقادیر متوسط آن‌ها (یعنی  $R_{1,P,ET} = -0.3$ ,  $R_{1,ET,ET} = 0.8$ ,  $R_{1,P,P} = 0.3$ ) در محدوده مورد آزمون فرض گردید.

#### شبیه‌سازی مونت کارلو

توسعه الگوهای عمومی اثر همبستگی در تحلیل خشکسالی با شاخص SPEI، با استفاده از یک فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سری داده‌های جانشین با خصوصیات مشخص مورد نظر امکان‌پذیر خواهد بود. روش مونت کارلو توسط محققین متعددی برای پیش‌بینی رفتار بلند مدت پدیده‌های هیدرولوژی مورد استفاده قرار گرفته است (اسمیت و هبرت ۱۹۷۹، استدینجر و ووگل ۱۹۸۴، سریکانتان و مک ماهون ۲۰۰۱، بریسته و همکاران ۲۰۰۷، خلیلی و همکاران ۲۰۰۹، کالیانپو و همکاران ۲۰۱۲، دومینگوئز کراستو و همکاران ۲۰۱۹). بدین منظور در این مطالعه از مدل اتورگرسیو چندگانه با تأخیر یک، برای تولید سری مصنوعی داده‌های بارندگی و تبخیر-تعرق با مقادیر مشخص همبستگی‌های چهارگانه از توزیع نرمال

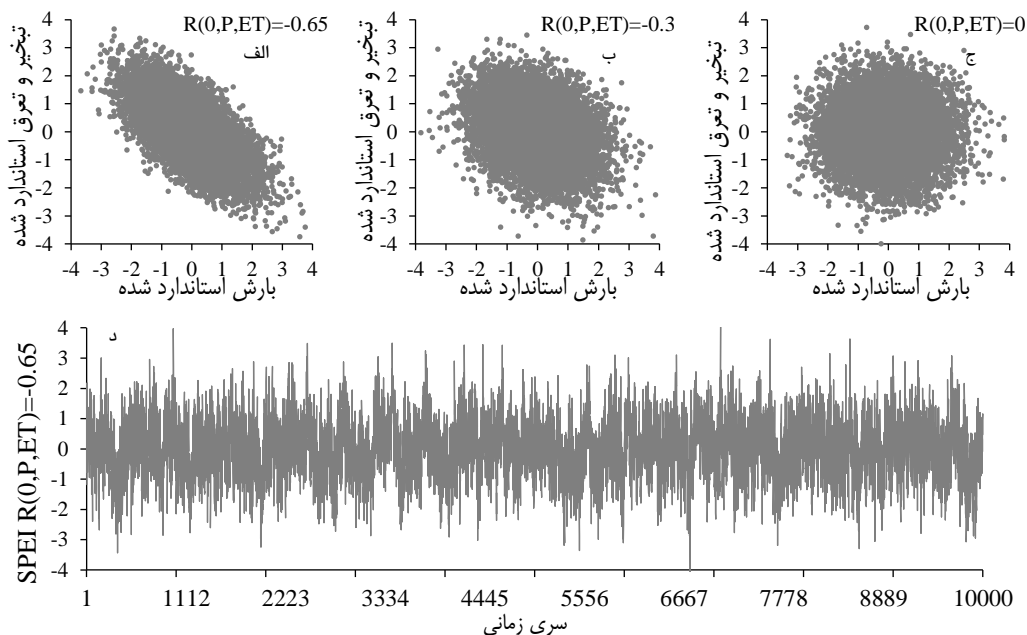
صفر در رفتار بلند مدت خصوصیات مختلف خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت.

### نتایج و بحث

عملکرد مدل اتورگرسیو چندگانه در تولید سری داده بارندگی و تبخیر-تعرق

در این مطالعه محدوده تغییرات همبستگی متقابل با تأخیر صفر بارندگی و تبخیر-تعرق، معادل همبستگی واقعی مابین دو متغیر مذکور در شرایط آب و هوایی مختلف ایران لحاظ گردید  $R_{0,P,ET} = (-0.65 \text{ to } (0.0))$ .

تعداد ۱۰۰۰۰ داده تولید گردید. در مرحله بعد مقادیر  $D_i$  (بارندگی منهای تبخیر-تعرق) با همبستگی متقابل مشخص شده برای پایش و تعیین خصوصیات خشکسالی با شاخص خشکسالی SPEI و مقایسه نتایج با شاخص SPI مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات خشکسالی مورد نظر در این مطالعه برای دو شاخص SPEI و SPI براساس تئوری ران استخراج گردید. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی استوکاستیک خشکسالی، جهت تعیین اثر همبستگی متقابل با تأخیر



شکل ۴- نمودار پراکندگی داده‌های تولیدی بارندگی و تبخیر-تعرق برای سه همبستگی متقابل مختلف الف)  $-0.65$ ، ب)  $-0.3$ ، ج)  $0$  و د) نمودار سری زمانی مقادیر SPEI برای همبستگی متقابل  $-0.65$  بارندگی و تبخیر-تعرق.

تعرق با همبستگی متقابل  $-0.65$ ،  $-0.3$  و  $0$  و همچنین نمودار سری زمانی مقادیر SPEI برای داده‌های تولیدی وابسته بارندگی و تبخیر-تعرق با همبستگی متقابل  $-0.65$  را نشان می‌دهد. اثر وابستگی (معکوس) دو متغیر بارندگی و تبخیر-تعرق در سری داده‌های

در مرحله بعد با استفاده از مدل استوکاستیک ۱۰۰۰۰ جفت داده مصنوعی وابسته بهم بارندگی و تبخیر-تعرق برای همبستگی متقابل از  $-0.65$  تا  $0$  تولید شد. شکل ۴ نمودار پراکندگی سه نمونه (a,b,c) از داده‌های مصنوعی تولیدی وابسته بارندگی و تبخیر-

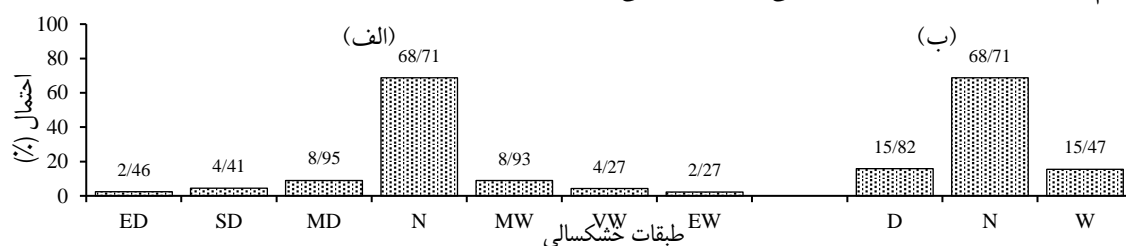


متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق بود. بطوریکه با کاهش میزان همبستگی متقابل دو متغیر ( $|R| \rightarrow 0$ ) میزان احتمال خشکسالی کاهش یافته و ضریب رگرسیون مابین دو احتمال خشکسالی و همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق ( $R_{0,P,ET}$ ) حدود  $0.75$  بود. ضمناً نتایج نشان داد که اختلاف مقادیر احتمال حالت خشکسالی بازای دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI رابطه معنی‌داری با همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق دارد (شکل ۶). بطوریکه با کاهش میزان همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق ( $R_{0,P,ET}$ )، نسبت اختلاف مقادیر احتمال خشکسالی دو شاخص افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر، با نزدیک شدن مقدار  $R_{0,P,ET}$  به صفر، نسبت اختلاف مقادیر احتمال خشکسالی دو شاخص  $(SPEI-SPI)/SPI$  افزایش یافته است.

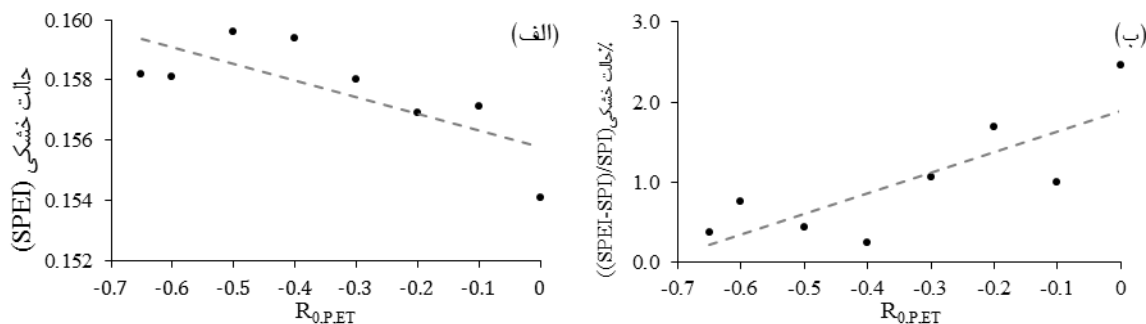
مصنوعی تولیدی و همچنین رفتار تصادفی مقادیر SPEI در محدوده  $-4$  و  $+4$  در شکل ۴ کاملاً مشخص است.

تابع چگالی احتمال (PDF) مقادیر شاخص خشکسالی SPEI تابع چگالی احتمال مقادیر شاخص خشکسالی SPEI براساس کلاس‌بندی خشکسالی و ضریب همبستگی متقابل برابر  $R_{0,P,ET} = -0.65$  در شکل ۵ ارائه شده است. تابع چگالی مذکور تقریباً منطبق بر تابع چگالی توزیع نرمال استاندارد بوده و مقادیر احتمال حالت نرمال، ترسالی و خشکسالی در آن بترتیب برابر  $68/71$ ،  $15/47$  و  $15/82$  درصد بدست آمد.

اثر همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق در میزان احتمال حالت خشکسالی (مجموع سه حالت خشک ضعیف، متوسط و شدید) تابع چگالی احتمال مقادیر شاخص خشکسالی SPEI بازای جفت داده‌های مصنوعی در شکل ۶ ارائه شده است. شکل ۶ بیانگر رفتار نظام‌مند احتمال حالت خشکسالی با همبستگی



شکل ۵- تابع چگالی احتمال یا احتمال دوره‌های مختلف خشکسالی شاخص SPEI بازای (الف) هفت کلاس خشکسالی، (ب) سه کلاس خشکسالی)



شکل ۶- (الف) رابطه بین مقادیر احتمال سه حالت خشکسالی، ترسالی نرمال با همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق ( $R_{0,P,ET}$ ) بازای جفت داده‌های مصنوعی در پایش خشکسالی توسط شاخص SPEI (ب) رابطه بین اختلاف نسبی مقادیر احتمال خشکسالی با همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق ( $R_{0,P,ET}$ ) در پایش خشکسالی توسط دو شاخص SPEI و SPI

### مدت و بزرگی خشکسالی

رفتار توأم دو متغیر اساسی مدت و بزرگی خشکسالی نقش کلیدی در مدیریت رخداد خشکسالی و کنترل اثرات منفی یا کاهش مخاطرات آن دارد (میشرا و سینگ ۲۰۱۰). در این مطالعه برای تعیین خصوصیات مختلف مدت و بزرگی خشکسالی از روش خشکسالی دنباله پیوسته<sup>۴</sup> استفاده شده است (منتصری و همکاران ۲۰۱۹). در این روش، بطور مثال یک خشکسالی پیوسته سه ماهه، می‌تواند معرف سه خشکسالی یک ماهه، دو خشکسالی دو ماهه و یک خشکسالی سه ماهه باشد. نمودار پراکندگی مدت و بزرگی خشکسالی برای سه همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق (۰/۶۵، ۰/۳ - و ۰/۰) در شکل ۷ ارائه شد. نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد که الف) شیب تغییرات مقادیر بزرگی خشکسالی با مدت خشکسالی تقریباً ثابت و مستقل از میزان همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر-تعرق بوده؛ ب) تعداد دوره‌های پیوسته و دامنه تغییرات رخدادهای مدت و بزرگی خشکسالی برای ضریب همبستگی متقابل برابر  $|R| = 0.65$  (وابستگی معکوس بالا) محدود و با کاهش وابستگی معکوس ( $|R| \rightarrow 0$ ) افزایش یافته است. بطور مثال حداکثر زمان تداوم خشکسالی برای ضرایب همبستگی متقابل ۰/۶۵ و ۰/۰ بترتیب برابر ۱۳ و ۴۳ دوره بوده است. ضمناً نتایج بیانگر کاهش مقادیر ضریب رگرسیون بین بزرگی و مدت خشکسالی با کاهش وابستگی بارندگی و تبخیر-تعرق بود.

مقایسه عملکرد دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI در تعیین خصوصیات مختلف خشکسالی یعنی تعداد دوره‌های پیوسته خشکسالی، میزان مدت و بزرگی خشکسالی برای مقادیر مختلف همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق در شکل ۸ ارائه شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که الف) خصوصیات خشکسالی مورد مقایسه دو شاخص برای همبستگی متقابل  $|R| =$

0.65 دارای حداقل اختلاف بوده و این اختلاف با کاهش همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق ( $|R| \rightarrow 0$ ) بطور توانی افزایش می‌یابد. ب) خصوصیات خشکسالی (تعداد دوره‌های خشکسالی پیوسته، میزان مدت و بزرگی خشکسالی) در شاخص SPEI بطور سیستماتیک وابسته به همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق بوده و از یک رابطه توانی با ضریب همبستگی  $R=0.85$  تبعیت می‌کند. این نتایج عملکرد متناقض دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI در تعیین خصوصیات مختلف خشکسالی در مطالعات پیشین را قابل توجیه می‌کند.

### احتمال عدم وقوع خشکسالی

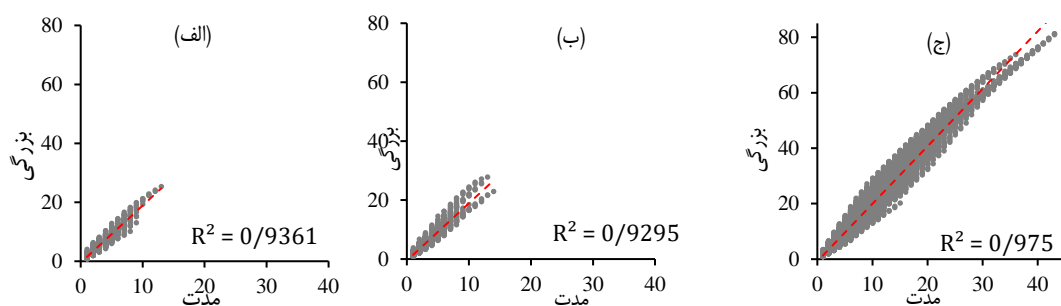
نمودار تغییرات احتمال عدم وقوع خشکسالی (احتمال کوچکتر از)  $P(Ld_i < ld)$ ؛  $Ld_i$ : متغیر مدت خشکسالی متوالی مورد انتظار،  $ld$ : مدت خشکسالی متوالی مورد نظر) و مدت خشکسالی (۱ الی ۱۰ گام زمانی) برای مقادیر مختلف همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق در شکل ۹ ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می‌گردد، رابطه مدت خشکسالی و احتمال عدم وقوع آن بصورت توانی بوده و فرم یا رابطه توانی مذکور با همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق یک رابطه سیستماتیک معنی‌داری داشته است. بطوریکه با افزایش وابستگی بارندگی و تبخیر-تعرق درجه توانی رابطه مذکور افزایش یافته و احتمال وقوع رخداد خشکسالی با مدت یا تداوم بیشتر کاهش می‌یابد، بعنوان مثال احتمال وقوع خشکسالی با مدت زمانی ۶ پریود برای همبستگی متقابل صفر و ۰/۶۵- بترتیب برابر ۵/۲ و ۰/۶۸ درصد است.

ضمناً رابطه احتمال عدم وقوع خشکسالی و همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر-تعرق در مدت‌های خشکسالی مشخص برای دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI در شکل ۱۰ مقایسه شده است. نمودار مذکور، رفتار نظام‌مند رابطه احتمال عدم وقوع خشکسالی و همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر-تعرق را براساس مدت‌های خشکسالی مشخص بیان کرده و

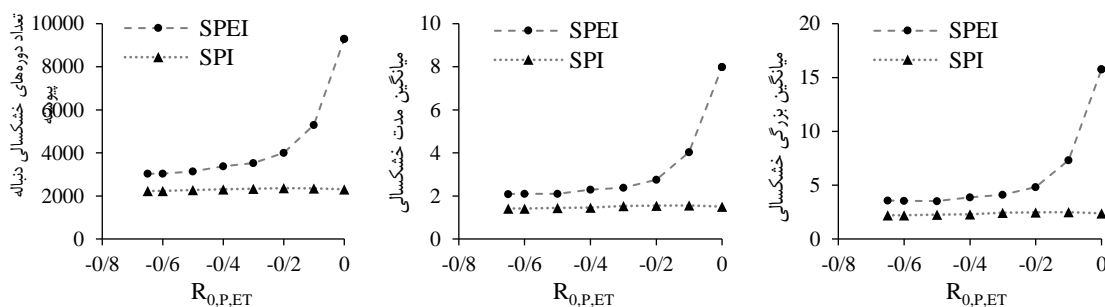
<sup>4</sup> Connected Drought Run

همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق برابر/بالاتر از  $|R| = 0.65$  بود. بطور مثال اختلاف احتمال وقوع خشکسالی در گام زمانی ۲ برای دو همبستگی متقابل  $-0.6$  و صفر برابر ۴ درصد ( $95\% - 99\%$ ) بود.

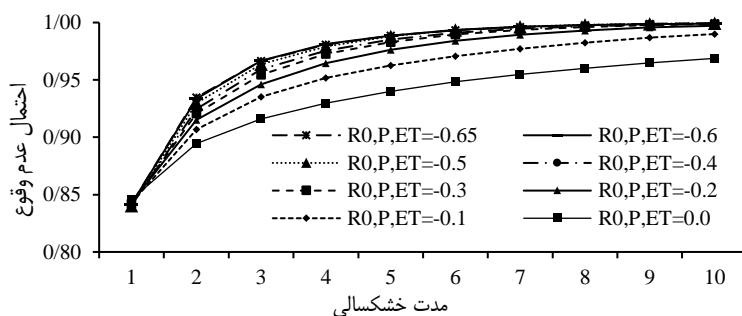
یک تفاوت اساسی از عملکرد شاخص خشکسالی SPEI و SPI را روشن نموده است، بطوریکه احتمال عدم وقوع خشکسالی در شاخص SPEI رابطه معنی‌داری با همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق داشته و مقدار آن با کاهش همبستگی بارندگی و تبخیر- تعرق بصورت تقریباً خطی کاهش پیدا کرده است. ولی در شاخص SPI احتمال عدم وقوع خشکسالی کاملاً مستقل از همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق بوده و مقادیر آن تقریباً نزدیک به مقادیر حاصل از SPEI با

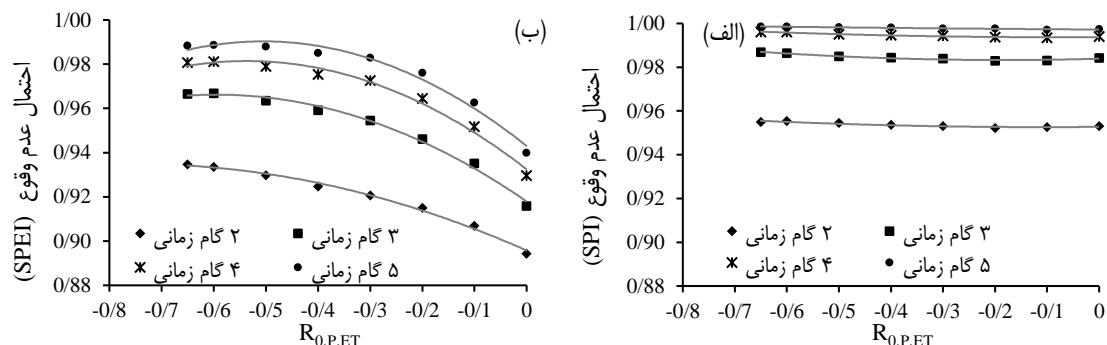


شکل ۷- نمودار پراکنندگی مدت و بزرگی خشکسالی (SPEI) بازای  $R_{0,P,ET}$  برابر با  $-0.65$  (الف)،  $-0.3$  (ب) و  $0.0$  (ج)



شکل ۸- رابطه بین تعداد، متوسط مدت و بزرگی خشکسالی و ضریب  $R_{0,P,ET}$  بر اساس شاخص‌های SPEI و SPI



شکل ۹- احتمال عدم وقوع خشکسالی بازای ضریب  $R_{0,P,ET}$  و گام‌های زمانی مختلفشکل ۱۰- رابطه بین مقادیر ضریب  $R_{0,P,ET}$  و احتمالات عدم وقوع خشکسالی بازای (الف) مقادیر شاخص SPI و (ب) مقادیر شاخص SPEI

با ضریب همبستگی نزدیک یک ( $R=0.99$ ) با همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق بوده و مقدار احتمال وقوع مذکور با کاهش وابستگی بارندگی و تبخیر- تعرق افزایش می‌یابد. در حالیکه رابطه مذکور برای شاخص خشکسالی SPI تقریباً خطی با ضریب زاویه نزدیک به صفر بوده یعنی احتمال وقوع فاصله مشخص بین دو خشکسالی پیوسته مستقل از همبستگی بارندگی و تبخیر- تعرق بود.

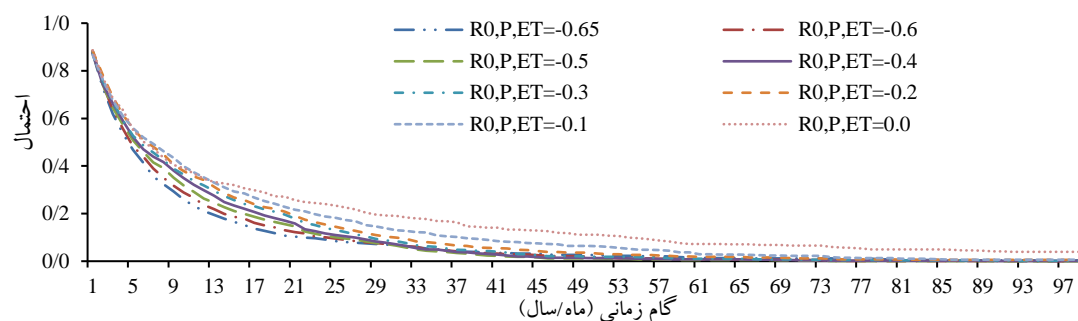
#### نتیجه گیری کلی

در این مطالعه بطور نوآورانه یک فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو جهت ارزیابی جامع اثر ضریب همبستگی متقابل با تأخیر صفر دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق بر عملکرد شاخص خشکسالی SPEI و مقایسه آن با عملکرد شاخص SPI انجام پذیرفت. بدین منظور سری داده‌های مصنوعی بارندگی و تبخیر- تعرق (به تعداد ۱۰۰۰۰ جفت) با استفاده از مدل استوکاستیک چندگانه اتورگرسیو با تأخیر یک برای دامنه وسیع از ضریب همبستگی متقابل دو متغیر فوق (صفر الی  $-0.75$ ) تولید شد و سپس برای پایش و تعیین خصوصیات خشکسالی با شاخص خشکسالی SPEI و SPI استفاده گردید. در نهایت اثر همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق در مشخصه‌های خشکسالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج

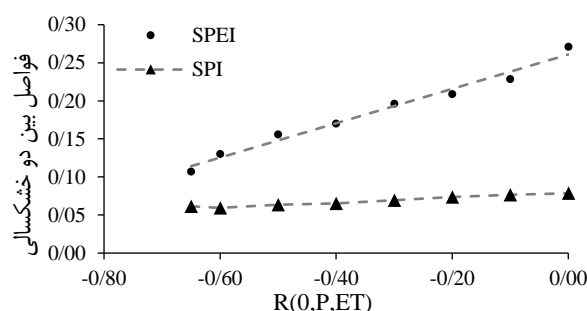
#### احتمال فاصله بین دو خشکسالی متوالی پیوسته

با استفاده از سری زمانی داده‌های تولیدی با همبستگی‌های متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق مشخص، فاصله بین دو خشکسالی پیوسته متوالی (Li در شکل ۱) در بازه‌های زمانی مختلف برای شاخص‌های SPEI و SPI تعیین و سپس احتمال وقوع آنها برای گام‌های زمانی ۲ الی ۱۰۰ برآورد شد. شکل ۱۱ نمودار تغییرات احتمال وقوع فاصله بین دو خشکسالی پیوسته متوالی با بازه زمانی را برای همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق (شاخص SPEI) نشان می‌دهد. روند کاهشی مقادیر احتمال وقوع Li بازای افزایش بازه زمانی دارای رفتار نظام‌مندی بوده و از یک رابطه نمایی تبعیت می‌کند که با کاهش میزان همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق درجه غیرخطی بودن رابطه کاهش پیدا می‌کند. ضمناً شکل ۱۲ مقایسه تغییرات احتمال وقوع فاصله بین دو خشکسالی پیوسته با بازه زمانی برابر یا بزرگتر از ۲۰ با همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق بازای دو شاخص SPEI و SPI را نشان می‌دهد. نمودار مذکور نشان می‌دهد که احتمال وقوع فاصله مشخص بین دو خشکسالی پیوسته متوالی بر اساس مقادیر شاخص SPEI دارای رابطه کاملاً خطی

- بیانگر تأثیر معنی‌دار ضریب همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق در خصوصیات مختلف خشکسالی بازای شاخص خشکسالی SPEI بوده که خلاصه‌ای از نتایج بقرار زیر می‌باشند:
- نتایج بیانگر رفتار نظام‌مند و وابسته خصوصیات مختلف خشکسالی (تابع چگالی احتمال، مدت، بزرگی، فواصل بین دو خشکسالی) با همبستگی متقابل دو متغیر بارندگی و تبخیر- تعرق بود.



شکل ۱۱- احتمال فواصل بین دو خشکسالی بر اساس شاخص SPEI و بازای گام‌های زمانی مختلف.



شکل ۱۲- رابطه بین احتمال فواصل بین دو خشکسالی (گام زمانی ۲۰ام) و مقادیر ضریب  $R_{0,P,ET}$  بر اساس شاخص‌های SPEI و SPI

- عملکرد دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI با افزایش همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق ( $|R| \Rightarrow 1$ ) بطور غیر خطی بهم نزدیک می‌گردد و برای همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق برابر صفر، حداکثر اختلاف مابین خصوصیات خشکسالی برای دو شاخص حاصل شد.
- عملکرد دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI در مطالعات پیشین دارای همگرایی نبوده (لورنزو لاکروز و همکاران ۲۰۱۰؛ ویسنته سرانو و همکاران ۲۰۱۲؛ پوتوپووا و همکاران ۲۰۱۸ و وو و همکاران ۲۰۲۰) که این امر ناشی از اثر ضریب همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق در تعیین خصوصیات خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی SPEI است.
- نتایج این مطالعه نشان داد که تعداد دوره‌های خشکسالی پیوسته و دامنه تغییرات مدت و بزرگی خشکسالی برای حداکثر همبستگی متقابل بارندگی و تبخیر- تعرق ( $|R| = 0.65$ ) حداقل بوده و مقدار آنها با کاهش وابستگی ( $|R| \rightarrow 0$ ) افزایش می‌یابد.

- نتایج این مطالعه همگرایی و یا عدم همگرایی دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI را روشن‌تر نمود.
- نتایج این مطالعه به عنوان یک راهنمای جامع در استنباط دقیق و واقعی از رخدادها و خصوصیات خشکسالی بازای شاخص SPEI بوده و می‌تواند تاثیر قابل توجهی در کاهش حداکثری خسارات ناشی از خشکسالی از طریق تفسیر نتایج خشکسالی بازای شاخص SPEI داشته باشد.

#### منابع مورد استفاده

- Bazrafshan O, Mahmudzadeh F and Bazrafshan J, 2017. Evaluation of temporal trends of the SPI and SPEI drought indices in the southern coast of Iran. *Desert Management* 8:54-69. (In Persian with English abstract)
- Beck H, Zimmermann N, McVicar T, Vergopolan N, Berg A and Wood EF, 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5, 180214.
- Brissette FP, Khalili M and Leconte R, 2007. Efficient stochastic generation of multi-site synthetic precipitation data. *Journal of Hydrology* 345(3-4):121-133.
- Dinpashoh Y and Babamiri O, 2020. Trends in reference crop evapotranspiration in Urmia Lake basin. *Arabian Journal of Geosciences* 13, 372.
- Dinpashoh Y, Jahanbakhsh-Asl S and Rasouli AA, 2019. Impact of climate change on potential evapotranspiration (Case study: west and NW of Iran). *Theoretical and Applied Climatology* 136: 185–201.
- Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri Fard A, Singh VP and Kahya E, 2011. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology* 399(3-4):422-433.
- Domínguez-Castro F, Vicente-Serrano SM, Tomás-Burguera M, Peña-Gallardo M, Beguería S, El Kenawy A, Luna Y and Morata A, 2019. High spatial resolution climatology of drought events for Spain: 1961–2014. *International Journal of Climatology* 39(13):5046-5062.
- Dracup JA, Lee KS and Paulson Jr EG, 1980. On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research* 16(2):289-296.
- Hao Z and AghaKouchak A, 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources* 57:12–18.
- Hosseini SB, Dinpashoh Y and Nikbakht J, 2015. Analysis of droughts of Northwest of Iran using the Reconnaissance Drought Index. *Water and Soil* 29(2): 295-310. (In Persian with English abstract)
- Kalyanapu AJ, Judi DR, McPherson TN and Burian SJ, 2012. Monte Carlo-based flood modelling framework for estimating probability weighted flood risk. *Journal of Flood Risk Management* 5(1):37-48.
- Khalili M, Brissette F and Leconte R, 2009. Stochastic multi-site generation of daily weather data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23(6):837-849.
- Li X, He B, Quan X, Liao Z and Bai X, 2015. Use of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to characterize the drying trend in southwest China from 1982–2012. *Remote Sensing* 7(8):10917-10937.
- Lorenzo-Lacruz J, Vicente-Serrano SM, López-Moreno JI, Beguería S, García-Ruiz JM and Cuadrat JM, 2010. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology* 386(1-4):13-26.
- Matalas NC, 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Research* 3(4):937-945.
- McKee TB, Doesken NJ and Kleist J, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Applied Climatology* (17 (22): 179-183).
- Mishra AK and Singh VP, 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391(1-2):202-216.
- Mishra AK, Singh VP and Desai VR, 2009. Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23(1):41-55.
- Montaseri M and Amirataee B, 2017. Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices. *International Journal of Climatology* 37(2):998-1013.

- Montaseri M, Amirataee B and Yasi M. 2019. Long-term probability of drought characteristics based on Monte Carlo simulation approach. *International Journal of Climatology* 39(1):544-557.
- Nosrati K, 2015. Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for drought identification in different climates of Iran. *Environmental Science* 12(4):63-74. (In Persian with English abstract)
- Potopová V, Štěpánek P, Zahradníček P, Farda A, Türkott L and Soukup J, 2018. Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *International Journal of Climatology* 38:e939-e954.
- Sharafati A, Nabaei S and Shahid S, 2020. Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology* 40(3):1864-1884.
- Smith RE and Hebbert RHB, 1979. A Monte Carlo analysis of the hydrologic effects of spatial variability of infiltration. *Water Resources Research* 15(2):419-429.
- Srikanthan R and McMahon TA, 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union* 5(4):653-670.
- Stedinger JR and Vogel RM, 1984. Disaggregation procedures for generating serially correlated flow vectors. *Water Resources Research* 20(1):47-56.
- Vicente-Serrano SM, Begueria S, Lopez-Moreno JJ, 2010: A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23:1696–1718.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, Camarero JJ, López-Moreno JJ, Azorin-Molina C, Revuelto J, Morán-Tejeda E and Sanchez-Lorenzo A, 2012. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions* 16(10):1-27.
- Vicente-Serrano SM, Miralles DG, Domínguez-Castro F, Azorin-Molina C, El Kenawy A, McVicar TR, Tomás-Burguera M, Beguería S, Maneta M and Peña-Gallardo M, 2018. Global assessment of the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *Journal of Climate* 31(14):5371-5393.
- Wu M, Li Y, Hu W, Yao N, Li L and Liu DL, 2020. Spatiotemporal variability of standardized precipitation evapotranspiration index in mainland China over 1961–2016. *International Journal of Climatology* 40(11):4781-4799.
- Yevjevich V, 1967. An Objective Approach to Definitions and Investigation of Continental Hydrological Droughts, *Hydrology Paper 23*, Colorado State University, Fort Collins, CO, P. 18.
- Zabihi M, Mostafazadeh R and Sharari M, 2017. Analysis of wet and dry spells intensity and duration using precipitation-based and evapotranspiration influenced indices. *Journal of Watershed Management Research* 8(15):125-136. (In Persian with English abstract)