

## بررسی تاثیر شرایط اقلیمی بر ماندگاری وضعیت خشکسالی در محدوده شش ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور

منصوره غزنوی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل مساعدی<sup>۲</sup>، محمد قبائی سوق<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، (m.ghaznavi1395@gmail.com)

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، mossaedi@um.ac.ir

۳- دکتری، شرکت مدیریت منابع آب ایران،

### چکیده

خشکسالی از مهم‌ترین و شایع‌ترین بلایای طبیعی است که به طور آرام و پیش‌رونده‌ای منجر به خسارت‌های زیست محیطی، کشاورزی و اقتصادی در همه شرایط اقلیمی و در سرتاسر جهان می‌شود. در این پژوهش ابتدا مقادیر شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شناسایی خشک‌سالی (RDI) و شناسایی مؤثر خشکسالی (eRDI) در مقیاس‌های سالانه و دوره رشد (۹ ماه منتهی به خرداد) در شش ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور ببا شرایط متفاوت آب و هوایی، محاسبه و ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مورد بررسی، تعیین شد. در ادامه با محاسبه ماتریس احتمال انتقال، وضعیت ماندگاری هر یک از دوره‌های رطوبتی خشک، نرمال و مرطوب در هر مقیاس زمانی در محدوده هر یک از ایستگاه‌ها مورد بررسی مشخص شد. نتایج ضریب همبستگی نشان‌دهنده وجود همبستگی قوی بین شاخص‌های SPI با شاخص‌های RDI و eRDI چه در مقیاس دوره رشد و چه در مقیاس سالانه می‌باشد. بیشترین همبستگی بین شاخص SPEI با دیگر شاخص‌ها مربوط به رامسر واقع در اقلیم مرطوب ساحلی می‌باشد و با کم‌شدن مقدار بارش همبستگی آنها با یکدیگر کاهش می‌یابد. هم‌چنین همبستگی شاخص‌ها دوره رشد از قوت بیشتری برخوردار می‌باشد. به عبارت دیگر تشابه عملکردی این شاخص‌ها در دوره رشد (سال آبی منهای فصل تابستان) بیشتر از دوره سالانه می‌باشد. بیشترین وضعیت ماندگاری خشکسالی بر اساس شاخص‌های مختلف و در ایستگاه‌های مختلف مربوط به وضعیت نرمال است. با توجه به نتایج، در اقلیم‌های خشک مانند شهرهای بندرعباس، یزد و سبزواری احتمال ماندگاری خشکسالی در هر یک از وضعیت‌های قبلی بر اساس شاخص‌های SPEI و SPI بسیار متفاوت می‌باشد. شاخص‌های RDI و eRDI هم در اقلیم‌های خشک مانند یزد، سبزواری و بندرعباس رفتار مشابهی داشته و از همبستگی بالایی برخوردارند، در حالی که ماندگاری خشکسالی بر اساس شاخص‌های eRDI و SPEI نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که در پایش خشکسالی و پیش‌بینی ماندگاری آن از شاخص‌هایی استفاده شود که بهتر بتوانند شرایط منطقه را با توجه به عوامل مؤثر بر وقوع خشکسالی پایش نمایند

### واژه‌های کلیدی

شاخص SPEI، شاخص eRDI، ضریب همبستگی، ماتریس احتمال انتقال

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر از میان مخاطرات طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده است، زیان‌بارترین آنها از نظر شدت، مدت، گستره تحت پوشش و خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی وارد شده، پدیده خشکسالی بوده است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۴). از آنجا که سایر مخاطرات طبیعی طی دوره‌ای کوتاه، خسارت سنگین مالی و جانی به جامعه وارد نموده توجه همگان را به خود جلب می‌نماید، اما خسارت خشکسالی، به صورت تدریجی و در مدتی طولانی بروز می‌کند و این امر باعث می‌شود که عکس‌العمل جدی و توجه آنی نسبت به این مسئله اتفاق نیفتد. پدیده خشکسالی را به لحاظ ماهیت تاثیرگذاری با توجه به اثرات تدریجی آن در انواع مختلفی نظیر خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصادی و اجتماعی تقسیم‌بندی کرده‌اند. برای کمی‌سازی مقادیر آن از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود که در آن یک یا چند متغیر هواشناسی و یا هیدرولوژیکی را در بر می‌گیرند. طی سال‌های اخیر شاخص‌های متفاوتی بر پایه مفاهیم شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای پیش‌بینی خشکسالی معرفی و بکار گرفته شده است.

شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق و بارش ارائه شده است (Vicente-Serrano و همکاران، ۲۰۱۰). مهم‌ترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پیش‌بینی خشکسالی در این امر نهفته است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر و تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی و کمبود آب داراست. در جمهوری چک کارایی شاخص SPEI مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که شاخص مذکور در شناسایی شدت خشکسالی دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ که ناشی از افزایش دما بودند، توانا می‌باشد (Potop, ۲۰۱۱). نتایج بررسی شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در مناطق خشک و نیمه خشک طی یک دوره ۳۳ ساله در بازه‌های زمانی مختلف نشان دهنده فراوانی نسبی بیشتر کلاس نرمال در اغلب ایستگاه‌ها برای شاخص SPI و در مقابل، افزایش فراوانی نسبی دیگر کلاس‌های خشکسالی برای شاخص SPEI بود که این تفاوت به تاثیر تغییرات درجه حرارت بر تبخیر و تعرق و شاخص SPEI نسبت داده شد (نصرتی، ۲۰۱۵).

مقایسه همبستگی مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل با شاخص‌های SPI، RDI و SPEI نشان‌دهنده همبستگی بالای مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل با شاخص SPEI به‌ویژه در مناطق کم‌باران و خشک می‌باشد. لذا استفاده از شاخص‌های مبتنی بر بارش و تبخیر و تعرق در مناطق کم‌باران و خشک پیشنهاد می‌شود (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی ویژگی‌های خشکسالی و تغییرات احتمالی آن‌ها در محدوده هشت ایستگاه سینوپتیک کشور در یک دوره آماری ۶۰ ساله بر اساس شاخص RDI در مقیاس‌های مختلف ماهانه، فصلی و سالانه، نشان‌دهنده وجود شکست در همه‌ی ایستگاه‌ها در سطح ۹۵٪ در سری زمانی مقادیر شاخص می‌باشد که نشان دهنده ناهمگنی و تغییر شرایط کلی خشکسالی می‌باشد. علت اصلی این موضوع را می‌توان در ارتباط با موضوع گرمایش جهانی و تغییر اقلیم دانست (مساعدی و همکاران، ۱۳۹۵). بیشترین همبستگی شاخص SPEI با شاخص‌های SPI و RDI مربوط به ایستگاه‌های واقع در نواحی مرطوب ساحلی می‌باشد و با کم شدن مقدار رطوبت، همبستگی آن‌ها با یکدیگر کاهش می‌یابد. همچنین نتایج مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI نشان می‌دهد که شاخص SPI ضمن داشتن نتایج مناسب در مناطق مرطوب، در مناطق خشک دقت کمتری دارد (قبائی‌سوق و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به کاربرد فراوان شاخص RDI، این شاخص به منظور بهبود قابلیت ارزیابی این شاخص در خشکسالی‌ها به‌خصوص خشکسالی‌های کشاورزی اصلاح شد. از این رو، شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI) معرفی شد که در آن جایگزینی مقادیر مجموع بارش با بارش مؤثر و انتخاب مقیاس‌های زمانی مناسب پیشنهاد شده است (Tigkas و همکاران، ۲۰۱۷). وابستگی زنجیره مارکوف برای شاخص‌های SPI و RDI با تمام سری‌های زمانی مورد بررسی از مرتبه اول می‌باشند. همچنین این وابستگی برای شاخص SPEI با سری‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه برای تمام شرایط آب و هوایی، از مرتبه دوم می‌باشند (بنی‌مهد و خلیلی، ۱۳۹۱). بررسی و پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف خشکسالی از روش مدل زنجیره مارکوف و چهار روش میان‌یابی، نشان می‌دهد که با افزایش مقیاس زمانی، مقادیر مثبت و منفی از نظر فراوانی کاهش و از نظر تداوم افزایش یافته است. همچنین با توجه به نتایج ماتریس احتمال انتقال، حالت تقریباً نرمال غالب است و کم‌ترین دوره بازگشت مربوط به حالت تقریباً نرمال و پس از آن، حالات ترسالی ملایم و خشکسالی ملایم می‌باشد (مقصود و همکاران، ۱۳۹۵). پیش‌بینی و گسترش خشکسالی در سطح استان خوزستان با استفاده از سری‌های زمانی حاصل از SPI و زنجیره مارکوف، نشان داد که احتمال ماندگاری از یک حالت معین به همان حالت در زمان‌های متوالی بسیار بالا است و در عوض احتمال گذر از حالت خشک به تر و یا برعکس بسیار پایین می‌باشد (شکری کوچک و بهنیا، ۱۳۹۲). خصوصیات احتمالی خشکسالی از قبیل احتمال مانایی وقوع خشکسالی، خاتمه خشکسالی و میانگین دوره تناوب در هر گروه خشکسالی

با به‌کارگیری شاخص SPI اصلاح شده (با سری‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه) و زنجیره ماركف، در استان مازندران توسط بنی‌مه‌د و خلیلی (۱۳۹۳) مورد بررسی گرفت. بنابر نتایج با افزایش سری زمانی (از ۳ به ۱۲ ماهه) زمان خاتمه خشکسالی و میانگین دوره تناوب گروه‌های مختلف خشکسالی به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.

با توجه به منابع ذکر شده به نظر می‌رسد که شاخص‌های مختلف پایش خشکسالی هواشناسی در مناطق مختلف همیشه رفتار یکسانی را از خود در پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی نشان نمی‌دهند. بنابراین، در این پژوهش به پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی براساس شاخص‌های مذکور و بررسی تشابه رفتاری این شاخص‌ها (در بازه‌های زمانی دوره رشد و سالانه) در مناطق مختلف کشور با وضعیت‌های متفاوت آب و هوایی پرداخته می‌شود. همچنین از شاخص eRDI به عنوان یک شاخص جدید استفاده گردیده است. ضمن آنکه بررسی شرایط اقلیمی بر میزان ماندگاری وضعیت خشکسالی به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم این پدیده از اهداف دیگر این پژوهش می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت جغرافیائی و آب و هوایی ایستگاه‌های مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

علیجان و همکاران (۲۰۰۸) کشور ایران را به شش اقلیم شامل مرطوب ساحلی، کوهستانی، نیمه‌کوهستانی، نیمه‌بیابانی، بیابان ساحلی و بیابانی براساس تحلیل عاملی تقسیم بندی نمودند. در این پژوهش سعی شده است که از هر اقلیم با توجه به این نوع تقسیم بندی یک ایستگاه سینوپتیک انتخاب و برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. مشخصات آب و هوایی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. به منظور انجام این پژوهش از آمار ماهانه متغیرهای هواشناسی شامل بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد شش ایستگاه سینوپتیک با طول دوره آماری ۵۹ سال (از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۵ میلادی) استفاده گردید. پس از اخذ داده‌ها، از آزمون‌های اولیه آماری از قبیل آزمون همگنی داده‌ها و آزمون داده پرت استفاده شد. بررسی وضعیت همگنی داده‌های بارش که متغیر اساسی این پژوهش می‌باشد، با استفاده از ۴ آزمون نرمال استاندارد شده (SNH)، دامنه‌ی بیشاند (BHR)، پیت (PET) و نسبت ون - نیومن (VON) به صورت ترکیبی به تفکیک هر ایستگاه انجام شد. علاوه بر این برای یافتن داده‌های پرت از آزمون گروپز- بک (G-B) استفاده شد. از روش فائوئوپنمن-مونتیث جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در برآورد خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPEI، RDI و eRDI استفاده گردید.

جدول ۱- برخی از خصوصیات جغرافیایی و آب و هوایی ایستگاه‌ها و شهرهای مورد مطالعه

نام ایستگاه	عرض جغرافیائی		طول جغرافیائی	ارتفاع	متوسط دما		وضعیت اقلیمی
	دقیقه	درجه			سالانه	متوسط بارش سالانه	
رامسر	۹۳	۳۶	۶۱	۵۰	۱۶/۰	۱۲۰۵/۸	مرطوب ساحلی
همدان	۲۳	۳۵	۷۱	۴۸	۱۰/۷	۳۵۹/۷	کوهستانی
خرم آباد	۴۳	۳۳	۲۸	۴۸	۱۷/۱	۵۰۲/۴	نیمه‌کوهستانی
سبزوار	۲۳	۳۶	۷۱	۵۷	۱۷/۵	۱۸۶/۶	نیمه بیابانی
بندرعباس	۱۳	۲۷	۲۲	۵۶	۲۶/۹	۱۵۱/۸	بیابان ساحلی
یزد	۹۳	۳۱	۲۸	۵۴	۱۹/۲	۵۷/۵	بیابانی

### ۲-۲- شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی

شاخص بارش استاندارد شده (SPI): شاخص SPI یکی از شاخص‌های پرکاربرد طی دهه‌های اخیر به منظور پایش خشکسالی در سراسر جهان می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر این شاخص در دوره‌های زمانی موردنظر، با برآزش تابع توزیع گامای دوپارامتری بر داده‌های بارندگی و تبدیل آن به توزیع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف از معیار یک، بدست آمده است. روابط استفاده شده برای این تبدیل براساس روابط ارائه شده توسط Saunders و Lloyd-Hughes (۲۰۰۲) می‌باشد. براساس این شاخص، دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی

پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد.

شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI): شاخص SPEI یک شاخص چند متغیره براساس داده های هواشناسی است که برای شناسایی شروع، مدت و شدت خشکسالی در شرایط نرمال سیستم های مدیریت شده و طبیعی مانند کشاورزی، اکوسیستم‌ها، رودخانه‌ها و منابع آب استفاده می‌شود. این شاخص با ترکیب حساسیت شاخص PDSI به تغییرات تقاضای تبخیر، ساده‌سازی محاسبات و قابلیت محاسبه در مقیاس‌های مختلف زمانی شاخص SPEI توسط Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰) توسعه یافته است. برای محاسبه‌ی شاخص SPEI در گام نخست باید مقدار تبخیر و تعرق در هر ماه برآورد گردد، سپس از طریق یک مدل ساده‌ی بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی (P) و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) برای ماه  $i$ ،  $(D_i = P_i - PET_i)$  محاسبه و همانند روش ارائه شده برای محاسبه‌ی شاخص SPEI، مقادیر احتمال تجمعی  $D_i$  از طریق برازش توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) به جای توزیع لوگ‌لوجستیک و تبدیل آن به نرمال استاندارد شده برآورد می‌گردد. در توسعه شاخص SPEI، از مفاهیم شاخص SPEI استفاده شده است. بنابراین، مقادیر طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی در آنها مشابه با طبقه‌های ارائه شده توسط McKee و Edwards برای شاخص SPI است. شاخص SPEI در مقایسه با شاخص SPI دما را نیز در ارزیابی خشکسالی در نظر می‌گیرد که می‌تواند شرایط واقعی تر و منطقی‌تری از خشکسالی منطقه مطالعه شده را نمایش دهد (Zhang et al., 2017).

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI): شاخص RDI توسط Tsakiris (۲۰۰۴) ارائه گردید. چندی بعد اطلاعات جامع و بیشتری از این شاخص به همراه نحوه‌ی محاسبه‌ی آن، توسط Tsakiris و Vangelis (۲۰۰۵)، و ساکریس و همکاران (۲۰۰۷) انتشار یافت. شاخص RDI از برازش تابع توزیع لوگ‌نرمال بر مقادیر تجمعی نسبت بارش به تبخیر و تعرق پتانسیل (ET<sub>0</sub>) و استاندارد نمودن آن مطابق مفاهیم شاخص SPI بدست می‌آید.

شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI): این شاخص توسط Tigkas و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شده است. در این شاخص که اصلاح شده شاخص RDI می‌باشد، بارش مؤثر جایگزین کل بارندگی (که همه آن نمی‌تواند مورد استفاده گیاه قرار گیرد) می‌شود. این شاخص مزایای شاخص RDI، مانند حفظ کاربرد جهانی آن، ساختار ساده و نیازهای داده‌ای که به راحتی قابل دستیابی می‌باشد را حفظ می‌کند. به منظور برآورد مقدار بارش مؤثر از روش‌های تجربی استفاده می‌گردد و در این تحقیق از روش USBR که این روش مناسب مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد، استفاده شده است. مطابق این روش برای برآورد بارش مؤثر از رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$P_e = P \times \frac{125 - 0.2 \times P}{125} \quad P \leq 250mm$$
$$P_e = 0.1 \times P + 125 \quad P > 250mm \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $P$  بارندگی سالانه ایستگاه مورد نظر و  $P_e$  بارش مؤثر ماهانه می‌باشد.

### ۳-۲- زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال

زنجیره مارکف یک روش ریاضی جهت مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی است که توالی مشاهدات را در طول زمان نشان می‌دهد. وابستگی این زنجیره به زمان، یا از طریق ضرایب همبستگی سری و یا با استفاده از ماتریس‌های احتمال انتقال بیان می‌شود. زنجیره مارکف در هیدرولوژی، جهت مدل‌سازی فرآیندهایی چون بارندگی، جریان رودخانه و ... کاربرد دارد. آنچه در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاربرد ماتریس احتمال انتقال برای بیان وقوع و تحلیل پدیده‌های خشک‌سالی و یا ترسالی می‌باشد.

اگر فرض شود که  $X(t)$  یک فرآیند با مقدار گسسته است که در زمان صفر شروع شده و در طول زمان ادامه می‌یابد، آنگاه مقادیر  $X(t)$  را به صورت  $(x_t, t=0,1,\dots)$  می‌توان نشان داد.

$$P\{X(t) = x_t | X(0) = x_0, X(1) = x_1, \dots, X(t-1) = x_{t-1}\} \quad (2)$$

اکثر زنجیره‌های مارکف که در زمینه پیش‌بینی‌های خشک‌سالی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مرتبه اول هستند (آشگر طوسی و همکاران، ۱۳۸۳). مدل زنجیره مارکف مرتبه اول، اصلی‌ترین شکل مدل زنجیره مارکف ببه شمار می‌رود. زنجیره مارکف مرتبه اول عبارت است از یک سری زمانی گسسته که احتمال شرطی برای حالت  $Z$  در زمان  $n+1$  تنها به حالت قبلی از آن یعنی  $i$  در زمان  $n$  بستگی دارد. این فرآیند زنجیره مارکف مرتبه اول به صورت زیر بیان می‌شود (استینمن، ۲۰۰۳).

$$P_{ij} = \Pr\{J_{n+1} = j | J_n = i\} \quad (3)$$

محاسبه احتمال از رابطه ۴ صورت می‌گیرد.

$$\hat{P}_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_j m_{ij}} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, s \quad (4)$$

در این رابطه، صورت کسر تعداد دفعات انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$  و مخرج کسر مجموع تعداد دفعات انتقال از حالت  $i$  به هر حالت دیگر است.  $P=P_{ij}$  ماتریس احتمال تغییر وضعیت را برای زنجیره مارکف مرتبه اول چند حالتی نشان می‌دهد. برای زنجیره مارکف  $S$  حالتی ماتریس انتقال، یک ماتریس  $S \times S$  خواهد بود که مجموع درایه‌های هر سطر آن باید معادل یک شود (استینمن، ۲۰۰۳). احتمال ماندگاری  $\varepsilon_k$ ، یعنی احتمال باقی ماندن در همان وضعیت رطوبتی دوره زمانی قبل. این احتمال از طریق معادله ۵ محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_k = P_{ij} \quad k = i, j \quad (5)$$

در رابطه ۵، مقادیر  $\varepsilon_k$ ، (یعنی عناصر واقع در قطر ماتریس احتمال انتقال)، مشخص کننده احتمال ماندگاری وضعیت رطوبتی در دوره بعدی است (استینمن، ۲۰۰۳).

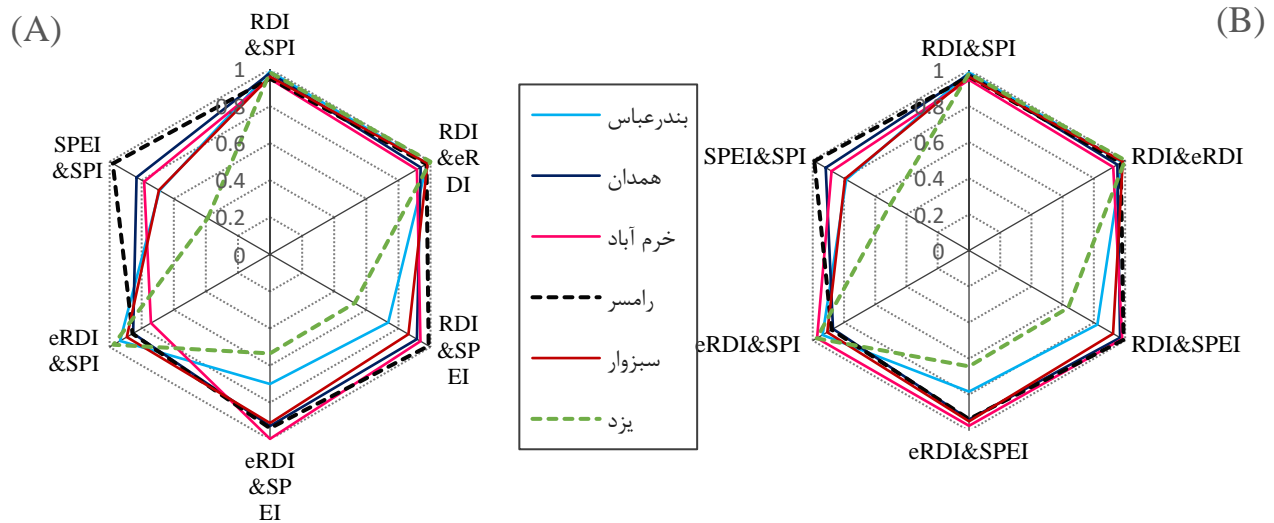
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ضریب همبستگی شاخص‌های مختلف

مطابق آنچه در بخش مواد و روش‌ها آورده شد وضعیت خشکسالی در بازه زمانی سالانه و دوره رشد بر اساس شاخص‌های SPI، RDI، eRDI و SPEI در هر ایستگاه و بر اساس هر یک از شاخص‌ها تعیین شد. به منظور تعیین چگونگی ارتباط شاخص‌ها با یکدیگر، مقدار ضریب همبستگی شاخص‌های مختلف به صورت دو به دو محاسبه و در قالب نمودارهای راداری برای مقیاس‌های سالانه و دوره رشد نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۱، همبستگی قوی بین شاخص‌های SPI با شاخص‌های RDI و eRDI در مقیاس‌های دوره رشد و سالانه وجود دارد. که با نتایج پژوهش شکوهی (۱۳۹۱) که ذکر می‌کند تفاوت معنی‌داری میان دو شاخص SPI و RDI وجود ندارد ولی شاخص RDI در مورد خشکسالی‌های بسیار شدید از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشد، مطابقت دارد. هم چنین به علت اینکه شاخص eRDI اصلاح شده‌ی شاخص RDI می‌باشد و در این شاخص به جای بارش از بارش موثر استفاده شده است، به تبع همبستگی قوی نیز بین این دو شاخص وجود دارد. بیشترین همبستگی بین شاخص SPEI با دیگر شاخص‌ها مربوط به رامسر واقع در اقلیم مرطوب ساحلی می‌باشد و با کم شدن مقدار بارش همبستگی آن‌ها با یکدیگر کاهش می‌یابد. به طوری که کم‌ترین میزان همبستگی مربوط به یزد واقع در اقلیم بیابانی می‌باشد. این نتیجه نیز با پژوهش قبائی سوق و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. هم چنین با توجه به اینکه دوره رشد، تمامی دوره سال آبی منهای فصل تابستان را شامل می‌شود، همبستگی شاخص‌ها از قوت بیشتری برخوردار می‌باشد زیرا فصل تابستان در اکثر مناطق کشور فاقد بارش (و یا دارای بارشی ناچیز) می‌باشد. بنا بر این، حذف سه ماه تابستان از مقیاس زمانی مورد بررسی منجر به افزایش تشابه عملکردی این شاخص‌ها شده است.

#### ۳-۲- بررسی وضعیت ماندگاری (مانایی)

پس از تعیین مقادیر ماتریس احتمال انتقال سالانه و دوره رشد در ایستگاه‌های مورد بررسی، با توجه به اینکه عناصر واقع در قطر اصلی این ماتریس، احتمال ماندگاری (در همان وضعیت قبلی) را نشان می‌دهد، احتمال ماندگاری در سه وضعیت ترسالی (WW)، نرمال (NN) و خشکسالی (DD) تعیین گردید که نتایج آن برای مقیاس‌های دوره رشد و سالانه به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. براساس چهار شاخص مورد نظر، در تمامی بازه‌های زمانی و ایستگاه‌های مورد بررسی، به طور متوسط احتمال ماندگاری وضعیت نرمال نسبت به دو وضعیت خشکسالی و ترسالی بیش تر می‌باشد که با نتایج مساعدی و عیوضی (۱۳۸۷) و Steinman (۲۰۰۵) و مقصود و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. هم چنین احتمال ماندگاری از یک حالت معین به همان حالت در زمان‌های متوالی بسیار بالا است و در عوض احتمال گذر از حالت خشک به تر و یا برعکس بسیار پایین می‌باشد (شکری کوچک و بهنیا، ۱۳۹۲).



شکل ۱- نتایج ضریب همبستگی پیروسون شاخص‌های  $RDI$ ،  $eRDI$ ،  $SPEI$ ،  $SPI$  و  $RDI$  با یکدیگر در مقیاس سالانه (A) و در مقیاس دوره رشد (B) در ایستگاه‌های مورد بررسی

### ۳-۲-۱- بررسی وضعیت ماندگاری در مقیاس نه ماهه دوره رشد (نه ماه منتهی به خرداد)

با توجه به جدول ۲، بیشترین ماندگاری‌ها در شاخص‌ها و در ایستگاه‌های مختلف مربوط به وضعیت نرمال بوده است و بیشترین ماندگاری مربوط به وضعیت نرمال شهر همدان (اقلیم کوهستانی) در شاخص  $eRDI$  با احتمال ۰/۷۵ می‌باشد. با توجه به شاخص‌های  $eRDI$  بیشترین احتمال ماندگاری وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی به ترتیب مربوط به شهرهای سبزوار و رامسر می‌باشد و در مورد شاخص  $RDI$  به ترتیب مربوط به شهرهای سبزوار و همدان می‌باشد. براساس شاخص  $SPEI$  بیشترین ماندگاری در وضعیت‌های ترسالی و نرمال و خشکسالی به ترتیب در شهرهای یزد، خرم‌آباد و سبزوار و در رابطه با شاخص  $SPI$  به ترتیب در شهرهای رامسر، خرم‌آباد و همدان مشاهده شد.

جدول ۲- مقادیر احتمال ماندگاری بر اساس شاخص‌های  $RDI$ ،  $eRDI$ ،  $SPEI$  و  $SPI$  در مقیاس دوره رشد در ایستگاه‌های مورد بررسی

شاخص خشکسالی			شاخص خشکسالی			شاخص خشکسالی			شاخص خشکسالی			ایستگاه
وضعیت خشکسالی			وضعیت خشکسالی			وضعیت خشکسالی			وضعیت خشکسالی			
SPI	SPEI	RDI	eRDI	SPI	SPEI	RDI	eRDI	SPI	SPEI	RDI	eRDI	
DD	NN	WW	DD	NN	WW	DD	NN	WW	DD	NN	WW	
۰/۰۰	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۰۰	۰/۵۹	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۶۶	۰/۱۳	بندرعباس
۰/۲۲	۰/۶۹	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۶۲	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۷۵	۰/۱۳	همدان
۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۶۶	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۷۱	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۶۵	۰/۲۲	خرم‌آباد
۰/۰۹	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۵۶	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۶۸	۰/۲۲	رامسر
۰/۰۰	۰/۶۵	۰/۱۷	۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۱۴	۰/۶۲	۰/۲۹	۰/۱۳	۰/۶۲	۰/۳۸	سبزوار
۰/۰۰	۰/۶۲	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۶۵	۰/۵۰	۰/۰۰	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۰۰	۰/۶۴	۰/۲۷	یزد

### ۳-۲-۲- بررسی وضعیت ماندگاری در مقیاس سالانه

با توجه به جدول ۳ همانگونه که انتظار می‌رود، بیشترین ماندگاری‌ها در شاخص‌ها و در ایستگاه‌های مختلف، مربوط به وضعیت نرمال بوده است و بیشترین ماندگاری مربوط به وضعیت نرمال شهر همدان (اقلیم کوهستانی) در شاخص  $eRDI$  با مقدار ۰/۷۶ می‌باشد. با توجه به شاخص‌های  $RDI$  و  $eRDI$  بیشترین احتمال ماندگاری وضعیت‌های ترسالی و خشکسالی مربوط به شهر سبزوار می‌باشد و در مورد وضعیت نرمال بیشترین احتمال ماندگاری در مورد شاخص  $RDI$  مربوط به شهر خرم‌آباد می‌باشد. براساس شاخص  $SPEI$  بیشترین ماندگاری در وضعیت‌های ترسالی و نرمال مربوط به شهر بندرعباس و در وضعیت خشکسالی مربوط به شهر سبزوار

می‌باشد. در رابطه با شاخص SPI بیشترین ماندگاری در وضعیت ترسالی در شهرهای همدان و رامسر و در مورد وضعیت نرمال و خشکسالی به ترتیب در شهرهای خرم‌آباد و همدان مشاهده شد.

جدول ۳- مقادیر احتمال ماندگاری بر اساس شاخص‌های SPI، RDI، eRDI و SPEI در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های مورد بررسی

SPI			SPEI			RDI			eRDI			شاخص خشکسالی
												وضعیت خشکسالی
DD	NN	WW	DD	NN	WW	DD	NN	WW	DD	NN	WW	ایستگاه
۰/۰۰	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷۱	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۵۹	۰/۱۰	۰/۰	۰/۶۸	۰/۳۳	بندرعباس
۰/۲۲	۰/۶۸	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۶۲	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۶۸	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۷۶	۰/۱۳	همدان
۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۶۹	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۶۱	۰/۳۰	خرم‌آباد
۰/۰۰	۰/۴۰	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۴۷	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۵۵	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۶۶	۰/۱۳	رامسر
۰/۰۰	۰/۶۶	۰/۰۹	۰/۴۶	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۶۲	۰/۴۶	سبزوار
۰/۰۰	۰/۶۲	۰/۰۸	۰/۴۰	۰/۶۸	۰/۴۰	۰/۰۰	۰/۶۳	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۶۳	۰/۱۰	یزد

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

همانگونه که بیان شد، این تحقیق با هدف بررسی تاثیر شرایط اقلیمی بر ماندگاری وضعیت خشکسالی در محدوده شش ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور انجام شد. ایستگاه‌های مورد بررسی در شرایط متفاوت آب و هوایی قرار دارند و شاخص‌های مورد بررسی در پایش خشکسالی نیز متفاوت می‌باشند. با توجه به نتایج، در اقلیم‌های خشک مانند شهرهای بندرعباس، یزد و سبزوار احتمال ماندگاری خشکسالی در هر یک از وضعیت‌های قبلی بر اساس شاخص‌های SPEI و SPI بسیار متفاوت می‌باشد. شاخص‌های RDI و eRDI هم در اقلیم‌های خشک مانند یزد، سبزوار و بندرعباس رفتار مشابهی داشته و از همبستگی بالایی برخوردارند، در حالی که ماندگاری خشکسالی بر اساس شاخص‌های eRDI و SPEI نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که نوع شاخص مورد استفاده در پایش خشکسالی در مناطق خشک می‌تواند نتایج متفاوتی را از نظر ماندگاری شرایط خشکسالی نشان دهد. با توجه به متفاوت بودن نتایج وضعیت و ماندگاری خشکسالی بر اساس شاخص‌های متفاوت پایش خشکسالی و در مناطق مختلف، پیشنهاد می‌شود که در پایش خشکسالی و پیش‌بینی ماندگاری آن از شاخص‌هایی استفاده شود که بهتر بتوانند شرایط منطقه را با توجه به عوامل موثر بر وقوع خشکسالی پایش نمایند.

#### ۵- منابع

- بنی مهد، ا. و خلیلی، د. ۱۳۹۱. بررسی رفتار و تعیین مرتبه وابستگی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI، RDI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب کشور ایران با به‌کارگیری زنجیره مارکف. مجموعه مقالات سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، ۲۰ تا ۲۱ شهریور، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
- بنی مهد، ا. و خلیلی، د. ۱۳۹۳. تحلیل انتقال گروه‌های خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکف و روش خطی- لگاریتمی: راهکاری برای اعلام هشدار اولیه. نشریه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۸ (۲۴): ۳۷ تا ۴۶.
- سلیمانی، ک، رضائی، ن، احمدی، م. ض. و بیات، ف. ۱۳۸۴. بررسی روند خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در حوزه‌های آبخیز مازندران. پژوهش‌نامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر، ۳ (۱): ۱۳ تا ۲۸.
- شکری کوچک، س. و بهنیا، ع. ۱۳۹۲. پایش و پیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص خشکسالی SPI و زنجیره مارکف. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۶ (۳): ۱ تا ۱۲.
- شکوهی، ع. ۱۳۹۱. مقایسه شاخص‌های RDI و SPI برای تحلیل خشکسالی در مقیاس ایستگاهی با تکیه بر خشکسالی کشاورزی (مطالعه موردی: قزوین و تاکستان). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۳ (۹):
- قبائی سوق، م.، زارع ابیانه، ح. و مساعدی، ا. ۱۳۹۶. توسعه‌ی شاخص تجمعی خشکسالی (ADI) بر پایه‌ی تجزیه به مؤلفه‌های

- اصلی به منظور پایش خشکسالی کشاورزی در استان گلستان - ایران. نشریه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۲): ۷۳-۵۶.
- قبائی سوق، م.، زارع ابیانه، ح.، مساعدی، ا. و صمدی، س. ۱۳۹۵. پایش وضعیت‌های رطوبتی و روند آن‌ها بر مبنای شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در نواحی مختلف آب و هوایی ایران. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۵ (۳۰): ۱۷۰۰ تا ۱۷۱۷.
  - مساعدی، ا.، محمدی مقدم، س. و کواکبی، غ. ۱۳۹۵. تعیین خصوصیات خشکسالی براساس شاخص شناسایی (RDI) و بررسی تغییرات آن در مناطق و دوره های مختلف زمانی. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۶ (۲۳).
  - مساعدی، ا. و عیوضی، م. ۱۳۸۷. شناسایی و پیش‌بینی تعدادی از خصوصیات خشک‌سالی‌های هواشناسی در استان گلستان با استفاده از زنجیره مارکف. مجله پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی، ۸ (۱): ۸۹ تا ۹۹.
  - مقصود، ف.، ملکیان، ا.، محسنی‌ساروی، م. و بذرافشان، ا. ۱۳۹۵. پایش و پهنه‌بندی خصوصیات خشکسالی هواشناسی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و روش‌های زمین آمار (مطالعه موردی: استان قزوین). مجله منابع طبیعی ایران، ۶۹ (۴): ۱۰۷۵ تا ۱۰۹۹.
  - نصرتی، ک. ۱۳۹۳. ارزیابی شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران، فصلنامه علوم محیطی، ۱۲ (۴): ۶۳ تا ۷۴.
  - یوسفی، م.، انصاری، ح.، مساعدی، ا. و صمدی، س. ۱۳۹۵. ارزیابی همبستگی شاخص های RDI، SPI و SPEI با پارامترهای بارش و تبخیر و تعرق در چند منطقه آب و هوایی ایران. دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲ تا ۴ شهریور، دانشگاه صنعتی اصفهان.
  - Alijani, B., Ghohroudi, M., and Arabi, N. 2008. Developing a climate model for Iran using GIS. Theoretical and Applied Climatology, 92: 103-112.
  - Lloyd-Hughes, B. and Saunders, M.A. 2002. A drought climatology for Europe. International Journal of Climatology, 22: 1571-1592.
  - Potop V (2011) the Application a New Drought Index - Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in the Czech Republic. Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí 2(2010):4.2
  - Steinman, A. 2003. Drought Indicators and Triggers: A Stochastic Approach to Evaluation. Journal of the American Water Resources Association 39: 1217-1233.
  - Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G. 2017. An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought. Environmental Processes. (2017) 4 (Suppl 1): 137-148
  - Tsakiris, G. And Vangelis, H. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. European Water, 910: 1-9
  - Tsakiris, G. Pangalou, D. and Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management, 21: 821-833.
  - Tsakiris, G., and Vangelis, H. 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. Water Resources Management, 18: 1-12.
  - Vicente-Serrano SM, Beguería S and López-Moreno JI (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate 23(7):1696-1718
  - Zhang Q, Kong D, Singh VP, Shi P. 2017. Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. Global and Planetary Change, 2017 (152): 1-11.