

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۴ سی و چهارم، تابستان ۱۳۹۹

صص ۱۱۷-۱۰۱

DOI: <https://dx.doi.org/10.22067/geo.v9i2.83319>

مقاله پژوهشی

ارزیابی خصوصیات آماری خشکسالی بر مبنای مدل زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال در مناطق مختلف آب و هوایی کشور

منصوره غزنوی- دانشجوی آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

ابوالفضل مساعدی^۱- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمد قبائی سوقی- دکتری علوم و مهندسی آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۸

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های جدایی ناپذیر نوسانات اقلیمی است که سالانه خسارات زیادی را به بخش‌های مختلف وارد می‌کند. یکی از روش‌های مفید در رابطه با پیش‌بینی خشکسالی، استفاده از زنجیره مارکف است. از این رو، هدف اصلی این پژوهش بررسی خصوصیات خشکسالی بر مبنای مدل زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال شامل آسیب‌پذیری، اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و ماندگاری سه وضعیت ترسالی، نرمال و خشکسالی در مناطق مختلف جغرافیایی کشور است. بدین منظور با انتخاب ۱۸ ایستگاه سینوپتیک در گستره شش ناحیه اقلیمی کشور، وضعیت خشکسالی و خصوصیات آماری آن در دو مقیاس زمانی سال آبی و دوره رشد بر مبنای شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) و شاخص شناسایی خشکسالی مؤثر (eRDI) مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده، میانگین مقادیر آسیب‌پذیری نواحی آب و هوایی مختلف در شاخص‌های مورد بررسی در دامنه ۱۲ تا ۲۲ درصد تغییر می‌کند و بالاترین مقادیر آسیب‌پذیری به شاخص SPEI تعلق دارند. علاوه بر این دامنه تغییرات میانگین مشخصه برگشت‌پذیری نیز بین ۵۱ تا ۱۰۰ درصد نوسان دارد که کمترین مقادیر آن در دوره سالانه به شاخص SPEI در مناطق بیابانی و نیمه بیابانی مربوط است. حساسیت بیشتر شاخص SPEI به تغییرات تبخیر و تعرق می‌تواند سبب این موضوع باشد. نتایج حاصل از ماتریس احتمال انتقال نیز نشان می‌دهد که

در اکثر موارد احتمال ماندگاری وضعیت مورد نظر بیشتر از حالت‌های دیگر می‌باشد و احتمال ماندگاری وضعیت نرمال نیز نسبت به دو وضعیت ترسالی و خشکسالی بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که در تحلیل خصوصیات خشکسالی حتماً ویژگی‌های آن‌ها از قبیل، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری با توجه به نوع اقلیم منطقه مورد بررسی قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: شاخص‌های خشکسالی، زنجیره مارکف، مشخصه‌های خشکسالی، ماتریس احتمال انتقال، ایران.

۱- مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های جدایی‌ناپذیر نوسانات اقلیمی است که به علت ساختار پیچیده و گسترده‌ی اثرات، فاقد یک تعریف جهانی پذیرفته شده می‌باشد. خشکسالی نسبت به سایر مخاطرات طبیعی متفاوت است، زیرا به صورت تدریجی رخ می‌دهد و با گذشت زمان تشدید می‌شود و فعالیت‌های بشر می‌تواند باعث تشدید اثرات این پدیده شود (ویل‌هایت^۱، ۲۰۰۰). کمبود بارندگی و نوسان دیگر پارامترهای آب و هوایی بر انواع خشکسالی و توسعه زمانی وقوع آن‌ها مؤثر است. با افزایش تبخیر و تعرق و کم شدن رطوبت خاک، در اثر تنش‌های وارده به گیاهان زراعی و باغی خشکسالی کشاورزی به وقوع می‌پیوندد. تداوم این وضعیت به مدت طولانی‌تر سبب کاهش آب‌های سطحی، جریان آب درون مخازن، دریاچه‌ها و تالاب‌ها و در نتیجه خشکسالی هیدرولوژیکی می‌گردد. در هر مرحله از گسترش خشکسالی، خسارت‌های فراوانی به بخش‌های مختلف اکوسیستم‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی وارد می‌گردد (مرکز ملی خسارات خشکسالی آمریکا^۲، ۲۰۰۶). شاخص‌های خشکسالی به منظور پایش دیدهبانی وضعیت خشکسالی و بررسی اثرات کمی ناشی از آن توسعه یافته‌اند. پرکاربردترین متغیر در پایش خشکسالی هواشناسی، مقدار بارش بوده که در شاخص‌های اولیه تنها پارامتر تعیین‌کننده نیز بوده است. در سال‌های بعد با توجه به نقش دما و روند افزایشی آن در وقوع پدیده خشکسالی هواشناسی، شاخص‌های شناسایی خشکسالی RDI^۳، (ساکریس^۴ و همکاران، ۲۰۰۷) و بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده^۵ (SPEI)، ویسنت هسرانو و همکاران، ۲۰۱۰) بر پایه مفاهیم شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۶ توسعه داده شدند. این شاخص‌ها، با توجه به شرایط هر منطقه شاخص‌هایی مناسب و کارا به منظور پایش خشکسالی هواشناسی گزارش شده‌اند (خلیلی و همکاران، ۲۰۱۱؛ اسدی زارچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ قبائی سوق و همکاران، ۱۳۹۵؛ اقتدارنژاد و همکاران، ۱۳۹۶؛ اکبری

1 Wilhite

2 National Drought Mitigation Center (<http://www.drought.unl.edu/>)

3 Reconnaissance Drought Index (RDI)

4 Tsakiris

5 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

6 Standardized Precipitation Index (SPI)

و همکاران، ۲۰۱۶؛ فرانسیس^۱، ۲۰۱۷؛ توماس^۲ و همکاران، ۲۰۱۶؛ محمودی و همکاران، ۲۰۱۹؛ عدنان^۳ و همکاران، ۲۰۱۸؛ تیگاس^۴ و همکاران، ۲۰۱۷). در کنار اهمیت پایش خشکسالی، پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند به عنوان یکی از شیوه‌های مواجهه با این پدیده و کاهش خسارات ناشی از آن باشد. یکی از روش‌های مفید در رابطه با پیش‌بینی خشکسالی، استفاده از زنجیره مارکف است. مدل زنجیره مارکف یک فرآیند تصادفی برای توصیف یک توالی از رویدادهای احتمالی است که در آن احتمال هر رویداد فقط به حالت رویداد قبلی بستگی دارد. زنجیره مارکف در مطالعه خشکسالی در برآورد درصد زمانی، احتمال وقوع و زمان ماندگاری هریک از طبقات خشکسالی به کار می‌رود. زنجیره مارکف با استفاده از ماتریس احتمال انتقال می‌تواند برای پیش‌بینی خشکسالی نیز بکار رود (اسلامیان و جهادی، ۲۰۱۹). زارعی (۱۳۹۸) تأثیر مرتبه‌های زنجیره مارکف بر دقت پیش‌بینی خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI را در ۵ ایستگاه سینوپتیک با شرایط مختلف آب و هوایی بررسی و نشان دادند که مارکف مرتبه ۳، دارای بهترین نتایج پیش‌بینی است. مقیمی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شاخص RDI و زنجیره مارکف نشان دادند که احتمال تعادل وضعیت رطوبتی دوره نرمال در دوره‌های پایه و پیش‌بینی، بیش‌ترین درصد را به خود اختصاص داده است. مقصود و همکاران (۱۳۹۵) از شاخص SPI و مدل زنجیره مارکف برای پایش ویژگی‌های مختلف خشکسالی استفاده نمودند. با توجه به نتایج ماتریس احتمال انتقال، حالت تقریباً نرمال غالب بوده و کمترین دوره بازگشت مربوط به حالت تقریباً نرمال و پس از آن، حالات ترسالی ملایم و خشکسالی ملایم می‌باشد. هاتفی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از زنجیره مارکف و بررسی خصوصیات خشکسالی شامل آسیب‌پذیری، اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و ماندگاری وضعیت‌های رطوبتی در شهر زاهدان نشان دادند که تغییر حالت از مرطوب به خشکسالی نسبت به تغییر حالت از خشکسالی به مرطوب در تمامی بازه‌های زمانی از نوسانات بیشتری برخوردار است. همچنین، احتمال ماندگاری وضعیت نرمال بیش از وضعیت خشکسالی و وضعیت خشکسالی بیش از وضعیت مرطوب است. بنی‌مهد و خلیلی (۱۳۹۳) خصوصیات خشکسالی را با به‌کارگیری شاخص SPI اصلاح‌شده و زنجیره مارکف، در استان مازندران مورد بررسی قرار دادند. بنابر نتایج آن‌ها با افزایش مقیاس زمانی از ۳ به ۱۲ ماهه، زمان خاتمه خشکسالی و میانگین دوره تناوب گروه‌های مختلف خشکسالی به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. آلم^۵ و همکاران (۲۰۱۷) با پایش خشکسالی در هند بر مبنای شاخص SPEI و زنجیره مارکف نشان دادند که احتمال انتقال از وضعیت خشک به مرطوب، بیشتر از احتمال انتقال از وضعیت مرطوب به خشک می‌باشد. آسیب‌پذیری^۶

1 Francis

2 Thomas

3 Adnan

4 Tigkas

5 Alam

6 Vulnerability

اطمینان‌پذیری^۱، برگشت‌پذیری^۲ معیارهای بسیار پرکاربردی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب می‌باشند که در پژوهش‌های مختلفی با موضوع خشکسالی نیز مورد استفاده قرار گرفتند که در ادامه تعریف کلی مربوط به آن‌ها آورده شده‌اند. آسیب‌پذیری، نشان‌دهنده بزرگی شکست‌های سیستم است. برای اندازه‌گیری آسیب‌پذیری، شاخص شدت خسارت باید تعریف شود (هاشمیتو و همکاران، ۱۹۸۲). به‌عنوان مثال هنگامی که شرایط مطلوب، وقوع وضعیت نرمال و ترسالی باشد، شاخص شدت می‌تواند به عنوان احتمال وضعیت خشکسالی هر بازه زمانی تعریف شود. به عبارت دیگر مجموع احتمال وقوع خشکسالی‌ها، براساس شاخص‌های به دست آمده همان آسیب‌پذیری می‌شود. برگشت‌پذیری نشان‌دهنده احتمال بازگشت سیستم شرایط آب و هوایی به حالت مطلوب پس از یک دوره خشکسالی است. اطمینان‌پذیری یعنی احتمال این‌که خشکسالی در طی یک دوره زمانی مشخص رخ ندهد. بر مبنای این تعریف، اطمینان‌پذیری نقطه مقابل مفهوم ریسک می‌باشد که احتمال شکست سیستم در یک مدت زمان مشخص است. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان برابر با حاصل جمع احتمال وقوع حالات نرمال و مرطوب می‌باشد. منظور از ماندگاری نیز احتمال باقی ماندن شرایط آب و هوایی در همان وضعیت رطوبتی دوره زمانی قبل می‌باشد (هاتفی و همکاران، ۱۳۹۴). با توجه به موارد ذکر شده، هدف اصلی این پژوهش بررسی خصوصیات خشکسالی شامل آسیب‌پذیری، اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و ماندگاری در سه وضعیت ترسالی، نرمال و خشکسالی در محدوده هجده ایستگاه سینوپتیک کشور که در موقعیت‌های مختلف جغرافیایی و آب و هوایی قرار دارند، می‌باشد. خصوصیات مذکور بر اساس چهار شاخص خشکسالی شامل شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و eRDI و در مقیاس‌های زمانی سال آبی و دوره رشد گیاهی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ایستگاه‌های مورد بررسی و داده‌های مورد استفاده

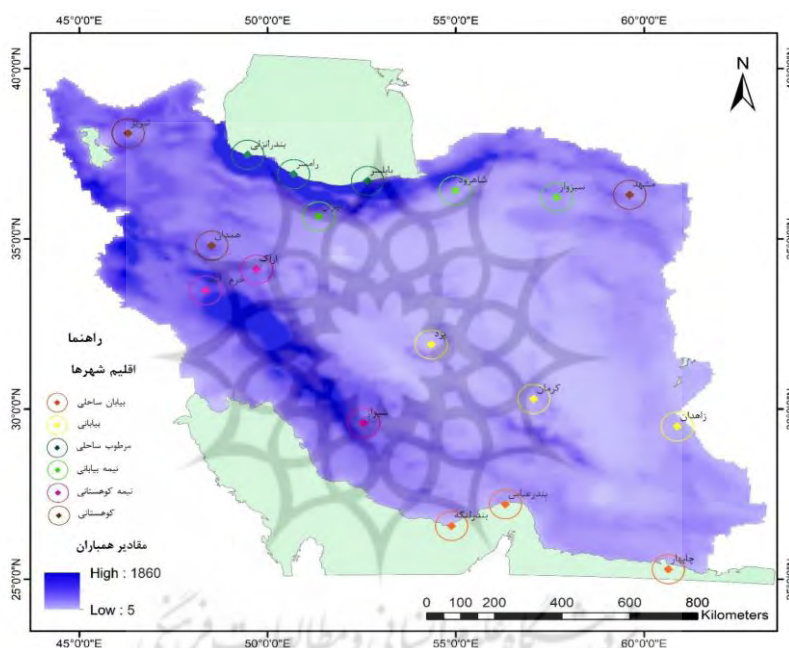
کشور ایران با مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع در محدوده تقریبی عرض‌های شمالی ۲۵ تا ۴۰ درجه و طول‌های شرقی ۴۴ تا ۶۴ درجه واقع شده است و از نظر اقلیمی، با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده است. علیجانی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از ۱۶۰ متغیر هواشناسی بر پایه تحلیل عاملی، کشور ایران را به ۶ ناحیه اقلیمی شامل: مرطوب ساحلی، کوهستانی، نیمه‌کوهستانی، نیمه بیابانی، بیابانی و ساحلی بیابانی طبقه‌بندی نمودند. در این پژوهش از هر ناحیه اقلیمی سه ایستگاه و در مجموع ۱۸ ایستگاه سینوپتیک شامل: بندرانزلی، رامسر و بابلسر واقع در اقلیم مرطوب ساحلی؛ همدان، تبریز و مشهد واقع در اقلیم کوهستانی؛ خرم‌آباد، اراک و شیراز واقع در اقلیم نیمه‌کوهستانی؛ تهران، سبزوار و شاهرود واقع در اقلیم نیمه بیابانی؛

1 Reliabilty

2 Resilince

بندرعباس، بندرلنگه و چابهار واقع در اقلیم بیابان ساحلی؛ و کرمان، زاهدان و یزد واقع در اقلیم بیابانی مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح کشور آورده شده‌اند.

در این پژوهش از آمار ماهانه متغیرهای هواشناسی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد ایستگاه‌های مورد بررسی طی دوره آماری ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۶ میلادی (۵۹ سال) و برای ایستگاه چابهار از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۶ (۳۲ سال) استفاده شد که این آمار از سازمان هواشناسی کشور دریافت شدند. پس از اخذ داده‌ها، آزمون‌های اولیه آماری شامل آزمون همگنی داده‌ها و آزمون داده پرت روی داده‌ها اعمال شدند. ضمن آنکه به منظور بازسازی داده‌های ناقص برای مقادیر بارش و دما از روش نسبت‌ها استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح کشور

۲-۲- شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی

۲-۲-۱- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI یکی از شاخص‌های پرکاربرد در دهه‌های اخیر به منظور پایش خشکسالی در سراسر جهان می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (ژیدیگو^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). محاسبه این شاخص، مستلزم برازش توزیع احتمالاتی مناسب به سری طولانی مدت داده‌های بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در هر ایستگاه است. با فرض پیروی مقدار بارش از توزیع گاما، گام بعدی در محاسبه شاخص SPI، انتقال

احتمال تجمعی به دست آمده از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف از معیار یک می‌باشد. در واقع شاخص SPI عبارتست از متغیری از تابع توزیع نرمال استاندارد که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر مورد نظر از توزیع گامای بدست آمده، مساوی باشد (لوید هوگوس و ساندرس، ۲۰۰۲).

۲-۲-۲- شاخص بارش-تبخیر و تفرق استاندارد شده (SPEI)

ویسنته‌سرانو و همکاران (۲۰۱۰) شاخص بارش-تبخیر و تفرق استاندارد شده (SPEI) را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تفرق پیشنهاد دادند. این شاخص با ترکیب حساسیت شاخص PDSI از طریق تغییرات تقاضای تبخیر و بر پایه مفاهیم قابلیت محاسبه در مقیاس‌های مختلف شاخص SPI توسعه یافته است. برای محاسبه شاخص SPEI در گام نخست باید مقدار تبخیر و تفرق در هر ماه برآورد شود سپس از طریق یک مدل ساده بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی (P) و مقدار تبخیر و تفرق پتانسیل (PET) برای ماه i از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

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

محاسبه این شاخص همانند روش ارائه شده برای محاسبه شاخص SPI نیازمند برآورد مقادیر احتمال تجمعی مقادیر D_i از طریق برازش یک تابع چگالی احتمال می‌باشد. استیجز و همکاران (۲۰۱۶) تابع سه پارامتری مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) را دارای بهترین برازش بر مقادیر D_i تشخیص دادند که فرم کلی تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \exp \left(-(1+kz)^{\frac{-1}{k}} \right) (1+kz)^{\frac{-1}{(k-1)}} \frac{1}{\sigma} \exp \exp(-z - \exp \exp(-z)) \quad (2)$$

$$k = 0 \quad k \neq 0 \quad z = \frac{x-\mu}{\sigma}$$

که در آن پارامترهای σ ، μ و k به ترتیب پارامترهای مکان، مقیاس و شکل برای مقادیر D_i در دامنه $-\infty$ تا $+\infty$ می‌باشند. در ادامه مقادیر احتمال تجمعی برای مقادیر D_i مطابق روش استفاده شده در شاخص SPI (لوید هوگوس و ساندرس، ۲۰۰۲) به تابع نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف معیار ۱ تبدیل می‌شوند که برابر مقادیر شاخص SPEI می‌باشند.

۲-۲-۳- شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

ساکریس و همکاران (۲۰۰۷) با بیان این که خشکسالی‌های منطقه مدیترانه با افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر و تفرق همراه هستند و شاخص‌های مبتنی بر بارش به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر خصوصیات خشکسالی در این مناطق باشند، شاخص RDI را بر پایه مفاهیم شاخص SPI و نسبت بارش به تبخیر و تفرق برای پایش خشکسالی و در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی پیشنهاد دادند. با در نظر گرفتن مقیاس سالانه با استفاده از نسبت بارش به تبخیر و تفرق پتانسیل، مقادیر اولیه a_k^i برای هر بازه زمانی دلخواه یا سال‌های مختلف مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$a_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad (3)$$

در این رابطه P و PET به ترتیب، مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در ژامین ماه از سال i هستند. مقدار i از یک تا n (تعداد سال‌هایی است که آمار آن در دسترس است) تغییر خواهد کرد. فرض اولیه در شاخص RDI آن است که مقادیر نسبت بارش به تبخیر و تعرق از تابع چگالی لوگ نرمال پیروی می‌کند. مطابق نتایج برخی پژوهش‌های اخیر، تابع توزیع گاما برازش بهتری بر مقادیر α_k دارد (ساکریس و همکاران، ۲۰۰۸). از این رو در این پژوهش با برازش توزیع گاما و یافتن مقادیر احتمال تجمعی آن مقادیر شاخص RDI بر پایه مفاهیم شاخص SPI محاسبه شدند.

۲-۲-۴- شاخص شناسایی مؤثر خشکسالی (eRDI)

شاخص شناسایی مؤثر خشکسالی (eRDI)^۱ به منظور بهبود نتایج حاصل از ارزیابی خشکسالی به ویژه خشکسالی کشاورزی در شاخص RDI توسط تیگاس و همکاران (۲۰۱۷) ارائه گردید. شاخص eRDI مشابه شاخص RDI می‌باشد و تنها به جای استفاده از مقادیر ماهانه بارش ثبت شده از مقادیر بارش مؤثر (P_e) استفاده می‌گردد. در این پژوهش به منظور برآورد مقادیر بارش مؤثر از روش USDA-SCS که مناسب مناطق خشک و نیمه‌خشک است و اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه در این مناطق اقلیمی قرار دارند، استفاده شده است. مقدار بارش مؤثر در این شاخص از رابطه ۴، محاسبه می‌شود.

$$P_e = \begin{cases} P(125 - 0.2P)/125, & P \leq 250mm \\ 0.1P + 125, & P > 250mm \end{cases} \quad (4)$$

در این رابطه P_e بارش مؤثر ماهانه و P بارش کل ماهانه می‌باشد. محاسبه شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی نیازمند برآورد مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشند. در شاخص‌های اولیه، روش تورنت وایت برای محاسبه تبخیر و تعرق، پیشنهاد شده است که تنها نیاز به داده‌های ورودی درجه حرارت دارد. این روش در مناطق خشک مقدار تبخیر و تعرق را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (ونگلیس^۲ و همکاران، ۲۰۱۳) ولی در مناطق مرطوب استوایی آمازون بیش برآورد دارد (کامارگو و همکاران، ۱۹۹۹). نتایج پژوهش‌های مقایسه‌ای معادلات برآورد تبخیر و تعرق در مناطق مختلف جهان، بیانگر دقت بالای روش

1 Reconnaissance Drought Index Effective (eRDI)

2 Vangelis

فائوپنمن مونیتث در مقایسه با سایر روش‌های تجربی می‌باشد (جانسون^۱ و همکاران، ۱۹۹۰). از این رو در این پژوهش از این روش جهت برآورد مقدار تبخیر و تعرق در شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی استفاده شده است.

۲-۴- زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال

در بسیاری از مدل‌های منابع آب و هیدرولوژی، برآوردها در یک زمان، تحت تأثیر برآوردها در زمان‌های دیگر می‌باشد که این فرآیند از نوع مارکف است. زنجیره مارکف مرتبه اول عبارت است از یک سری زمانی گسسته که احتمال شرطی برای حالت j در زمان $t+n$ تنها به حالت قبل از آن یعنی i در زمان t بستگی دارد (استینمن^۲، ۲۰۰۳). بیشتر پژوهشگران برای پیش‌بینی خشکسالی، تغییر وضعیت یک مرحله‌ای زنجیره مارکف را مورد استفاده قرار داده‌اند. طبیعی است در این حالت، احتمال وقوع پدیده به شرط وقوع پدیده خاص در یک زمان قبل از خودش است. احتمالات مدل زنجیره مارکف می‌توانند در قالب ماتریس نیز ارائه شوند که به ماتریس تغییر وضعیت زنجیره مارکف (ماتریس احتمال انتقال) مشهور هستند. در مطالعه حاضر، تعداد سطر و ستون‌های ماتریس‌ها، متناسب با سه کلاس وضعیت رطوبتی شامل خشکسالی، نرمال و مرطوب می‌باشد. سپس معیارهای آماری مشخصه‌های خشکسالی ماندگاری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری نیز از طریق مقادیر ماتریس‌ها مطابق تعاریف ارائه شده در مقدمه تعیین گردید. پس از تعیین مقادیر شاخص‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های مورد نظر و در مقیاس‌های زمانی ذکر شده، معیارهای آسیب‌پذیری و قابلیت اطمینان به دست آمد. سپس عناصر ماتریس احتمال تغییر وضعیت در تمامی ایستگاه‌ها، با شمارش تعداد دفعاتی که شاخص‌های مذکور، از حالت i به حالت j انتقال پیدا کرده است، محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر ماتریس احتمال انتقال در مقیاس‌های زمانی مورد نظر، در این ایستگاه‌ها، با توجه به اینکه عناصر واقع در قطر اصلی این ماتریس، احتمال ماندگاری را نشان می‌دهد، احتمال ماندگاری در سه وضعیت مرطوب، نرمال و خشکسالی و همچنین برگشت‌پذیری تعیین گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مشخصه‌های آماری برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری خشکسالی در مقیاس سالانه

با محاسبه مشخصه‌های آماری خشکسالی شامل برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری در شاخص‌های مورد بررسی، نتایج مشخصه‌های آماری در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. مطابق نتایج ارائه شده، احتمال برگشت‌پذیری در مقیاس سالانه در تمامی ایستگاه‌ها و شاخص‌های مورد بررسی دارای میانگین $0/۸۳$ می‌باشد که نشان‌دهنده این است که به‌طور متوسط احتمال وقوع خشکسالی در دو سال متوالی

1 Jensen

2 Steinman

حدود ۰/۱۷ می‌باشد. در جدول در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار این مشخصه برابر عدد یک می‌باشد، که نشان‌دهنده عدم وقوع دو سال متوالی خشکسالی در این ایستگاه‌ها براساس شاخص‌های موردنظر و در طول دوره آماری می‌باشد. نتایج مشخصه اطمینان‌پذیری در مقیاس سالانه نیز نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها و شاخص‌ها مقدار آن بین ۰/۷۸ تا ۰/۹۲ متغیر می‌باشد. کمترین مقدار این مشخصه مربوط به ایستگاه‌های سبزوآر، خرم‌آباد و تبریز براساس شاخص SPEI و بیشترین آن مربوط به ایستگاه همدان براساس شاخص eRDI می‌باشد. شاخص SPEI مقادیر کمتری از احتمال اطمینان‌پذیری را نسبت به شاخص‌های دیگر نشان می‌دهد. در رابطه با آسیب‌پذیری، در مقیاس سالانه در تمامی ایستگاه‌ها و شاخص‌ها احتمال آسیب‌پذیری بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۲ متغیر می‌باشد. بیش‌ترین این مقدار مربوط به ایستگاه‌های بندرلنگه، سبزوآر، خرم‌آباد و تبریز براساس شاخص SPEI و کمترین آن مربوط به ایستگاه همدان طبق شاخص eRDI می‌باشد. با توجه به این‌که آسیب‌پذیری عکس اطمینان‌پذیری می‌باشد بدیهی است که نتایج مقادیر آسیب‌پذیری نیز عکس مقادیر اطمینان‌پذیری باشد به صورتی که کمترین مقدار اطمینان‌پذیری در مواردی رخ داده است که بالاترین مقادیر آسیب‌پذیری را دارد. به‌طورکلی شاخص SPEI مقادیر بالاتری از احتمال آسیب‌پذیری خشکسالی را نسبت به شاخص‌های دیگر در این مقیاس نشان می‌دهد.

۳-۲- نتایج مشخصه‌های آماری برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری خشکسالی در مقیاس دوره رشد

نتایج برآورد مشخصه‌های آماری خشکسالی در دوره رشد به ازای شاخص‌های مورد بررسی در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. مطابق نتایج جدول مذکور، مشخصه برگشت‌پذیری در دوره رشد در تمامی ایستگاه‌ها و شاخص‌ها بین ۰/۴۶ تا ۱ متغیر می‌باشد که کمترین مقدار مربوط به ایستگاه سبزوآر براساس شاخص SPEI و بیشترین آن مربوط به ایستگاه‌های اقلیم بیابان ساحلی و یزد براساس سه شاخص SPI، RDI و eRDI، ایستگاه تبریز براساس شاخص‌های SPI و eRDI و شیراز براساس شاخص‌های RDI و eRDI می‌باشد. هم‌چنین با توجه به جدول ۲ مشخصه اطمینان‌پذیری نیز بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۲ متغیر می‌باشد و کمترین مقدار آن مربوط به ایستگاه شاهرود براساس شاخص SPEI و بیشترین آن مربوط به ایستگاه زاهدان براساس شاخص‌های RDI و eRDI می‌باشد. در این مقیاس زمانی شاخص eRDI مقادیر بالاتری از احتمال اطمینان‌پذیری و مقادیر کمتری از احتمال آسیب‌پذیری را نسبت به شاخص RDI در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد، این نتیجه در مورد مقیاس زمانی سالانه نیز صدق می‌کند. در رابطه با آسیب‌پذیری نیز این مشخصه بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۵ متغیر است که کمترین این مقدار مربوط به ایستگاه زاهدان براساس شاخص‌های RDI و eRDI می‌باشد و بیشترین آن مربوط به ایستگاه شاهرود براساس شاخص SPEI می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر برگشت پذیری، اطمینان پذیری و آسیب پذیری خشکسالی (درصد) براساس شاخص های مورد بررسی در مقیاس سالانه در ایستگاه های مورد بررسی

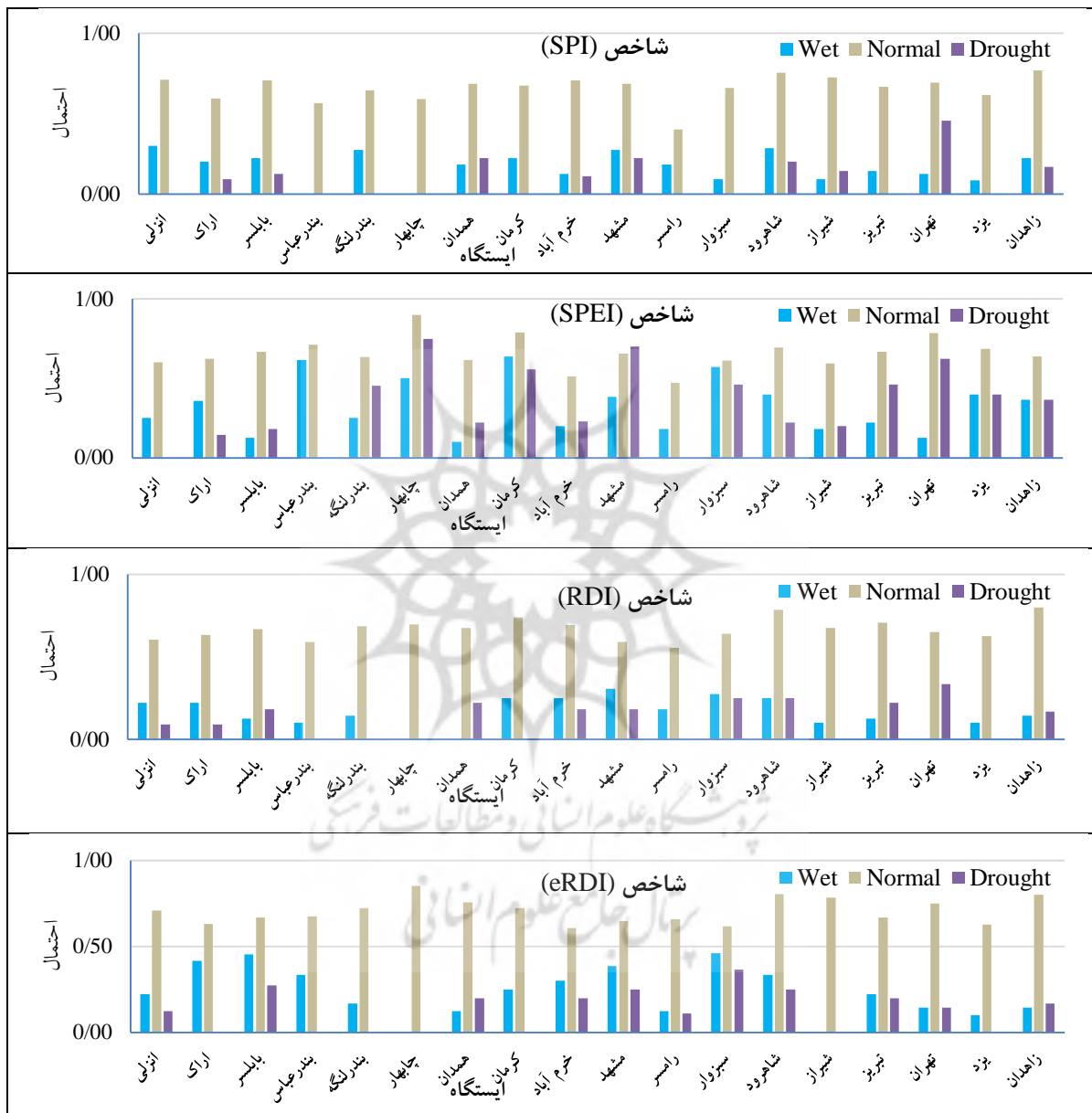
eRDI		RDI			SPEI			SPI			شاخص ایستگاه	
برگشت پذیری	آسیب پذیری	اطمینان پذیری	برگشت پذیری	آسیب پذیری	اطمینان پذیری	برگشت پذیری	آسیب پذیری	اطمینان پذیری	برگشت پذیری	آسیب پذیری		
۸۸	۱۴	۸۶	۹۱	۱۹	۸۱	۱۰۰	۱۹	۸۱	۱۰۰	۱۷	۸۳	بندر انزلی
۷۳	۱۹	۸۱	۸۲	۱۹	۸۱	۸۲	۱۹	۸۱	۸۸	۱۴	۸۶	بابلسر
۸۹	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۹	۸۱	۱۰۰	۲۰	۸۰	رامسر
۸۳	۱۶	۸۴	۹۱	۱۸	۸۲	۹۴	۱۹	۸۱	۹۶	۱۷	۸۳	میانگین اقلیم
۷۵	۱۴	۸۶	۸۲	۱۹	۸۱	۳۰	۱۹	۸۱	۷۸	۱۵	۸۵	مشهد
۸۰	۱۷	۸۳	۷۸	۱۵	۸۵	۵۴	۲۲	۷۸	۱۰۰	۱۵	۸۵	تبریز
۸۰	۰.۸	۹۲	۷۸	۱۵	۸۵	۷۸	۱۵	۸۵	۷۸	۱۵	۸۵	همدان
۷۸	۱۳	۸۷	۷۹	۱۶	۸۴	۵۴	۱۹	۸۱	۸۵	۱۵	۸۵	میانگین اقلیم
۸۰	۱۷	۸۳	۸۲	۱۹	۸۱	۷۷	۲۲	۷۸	۸۹	۱۵	۸۵	خرم آباد
۱۰۰	۱۴	۸۶	۹۱	۱۹	۸۱	۸۶	۱۴	۸۶	۹۱	۱۹	۸۱	اراک
۱۰۰	۱۴	۸۶	۱۰۰	۱۴	۸۶	۸۰	۱۷	۸۳	۸۶	۱۲	۸۸	شیراز
۹۳	۱۵	۸۵	۹۱	۱۷	۸۳	۸۱	۱۸	۸۲	۸۹	۱۵	۸۵	میانگین اقلیم
۶۴	۱۹	۸۱	۷۵	۱۴	۸۶	۵۴	۲۲	۷۸	۱۰۰	۱۰	۹۰	سبزوار
۷۵	۱۴	۸۶	۷۵	۱۴	۸۶	۷۸	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۷	۸۳	شاهرود
۸۶	۱۲	۸۸	۶۷	۱۵	۸۵	۳۸	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۹	۸۱	تهران
۷۵	۱۵	۸۵	۷۲	۱۴	۸۶	۵۷	۱۷	۸۳	۱۰۰	۱۵	۸۵	میانگین اقلیم
۱۰۰	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۵	۸۵	۶۰	۱۷	۸۳	۱۰۰	۱۴	۸۶	یزد
۸۳	۱۰	۹۰	۸۳	۱۰	۹۰	۶۴	۱۹	۸۱	۸۳	۱۰	۹۰	زاهدان
۱۰۰	۱۲	۸۸	۱۰۰	۱۴	۸۶	۴۴	۱۷	۸۳	۱۰۰	۱۵	۸۵	کرمان
۹۴	۱۲	۸۸	۱۰۰	۱۳	۸۷	۵۶	۱۸	۸۲	۹۴	۱۳	۸۷	میانگین اقلیم
۱۰۰	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۵	۸۵	۱۰۰	۱۲	۸۸	۱۰۰	۱۵	۸۵	بندرعباس
۱۰۰	۱۴	۸۶	۱۰۰	۱۴	۸۶	۱۰۰	۲۲	۷۸	۱۰۰	۱۴	۸۶	بندر لنگه
۱۰۰	۱۳	۸۸	۱۰۰	۱۳	۸۷	۱۰۰	۱۳	۸۷	۱۰۰	۱۶	۸۴	چابهار
۱۰۰	۱۴	۸۶	۱۰۰	۱۴	۸۶	۱۰۰	۱۶	۸۴	۱۰۰	۱۵	۸۵	میانگین اقلیم

جدول ۲- مقادیر برگشت پذیری، اطمینان پذیری و آسیب پذیری خشکسالی (درصد) بر اساس شاخص های مورد بررسی در مقیاس دوره رشد در ایستگاه های مورد بررسی

شاخص	ایستگاه	SPI			SPEI			RDI			eRDI		
		اطمینان پذیری	آسیب پذیری	برگشت پذیری	اطمینان پذیری	آسیب پذیری	برگشت پذیری	اطمینان پذیری	آسیب پذیری	برگشت پذیری	اطمینان پذیری	آسیب پذیری	
مناطق ساحلی	بندر انزلی	۸۸	۱۲	۸۶	۸۱	۱۹	۷۳	۸۳	۱۷	۷۰	۸۵	۱۵	۷۸
	بابل سر	۸۳	۱۷	۹۰	۸۰	۲۰	۸۳	۸۱	۱۹	۸۲	۸۱	۱۹	۷۳
	رامسر	۸۱	۱۹	۹۱	۷۸	۲۲	۸۵	۸۰	۲۰	۸۳	۸۵	۱۵	۷۸
کوهستانی	میانگین اقلیم	۸۴	۱۶	۸۹	۸۰	۲۰	۸۰	۸۱	۱۹	۷۸	۸۴	۱۶	۷۶
	مشهد	۸۵	۱۵	۷۸	۸۳	۱۷	۶۰	۸۵	۱۵	۸۹	۸۶	۱۴	۸۸
	تبریز	۸۵	۱۵	۱۰۰	۷۸	۲۲	۶۲	۸۵	۱۵	۸۹	۸۶	۱۴	۱۰۰
نیمه کوهستانی	همدان	۸۵	۱۵	۷۸	۸۳	۱۷	۷۰	۸۵	۱۵	۷۸	۹۰	۱۰	۸۳
	میانگین اقلیم	۸۵	۱۵	۸۵	۸۱	۱۹	۶۴	۸۵	۱۵	۸۵	۸۷	۱۳	۹۰
	خرم آباد	۸۵	۱۵	۸۹	۸۵	۱۵	۸۹	۸۳	۱۷	۹۰	۸۵	۱۵	۸۹
بیابانی	اراک	۸۳	۱۷	۹۰	۸۱	۱۹	۸۰	۸۵	۱۵	۸۹	۸۵	۱۵	۸۹
	شیراز	۸۸	۱۲	۸۶	۸۱	۱۹	۸۲	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۸	۱۲	۱۰۰
	میانگین اقلیم	۸۵	۱۵	۸۸	۸۲	۱۸	۸۴	۸۵	۱۵	۹۳	۸۶	۱۴	۹۳
بیابان ساحلی	سبزوار	۹۰	۱۰	۱۰۰	۷۸	۲۲	۴۶	۸۸	۱۲	۸۶	۸۶	۱۴	۸۸
	شاهرود	۸۳	۱۷	۷۰	۷۵	۲۵	۵۳	۸۳	۱۷	۸۰	۸۳	۱۷	۷۰
	تهران	۸۳	۱۷	۶۰	۸۰	۲۰	۵۵	۸۵	۱۵	۶۷	۸۸	۱۲	۸۶
بیابانی	میانگین اقلیم	۸۵	۱۵	۷۷	۷۸	۲۲	۵۱	۸۵	۱۵	۷۸	۸۶	۱۴	۸۱
	یزد	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۶	۱۴	۸۶	۸۵	۱۵	۱۰۰	۸۵	۱۵	۱۰۰
	زاهدان	۹۰	۱۰	۸۳	۸۱	۱۹	۶۴	۹۲	۰۸	۸۰	۹۲	۰۸	۸۰
بیابان ساحلی	کرمان	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۵	۱۵	۶۳	۸۷	۱۳	۱۰۰	۸۷	۱۳	۱۰۰
	میانگین اقلیم	۸۷	۱۳	۹۴	۸۴	۱۶	۷۱	۸۸	۱۲	۹۳	۸۸	۱۲	۹۳
	بندرعباس	۸۵	۱۵	۱۰۰	۸۳	۱۷	۸۰	۸۵	۱۵	۱۰۰	۸۵	۱۵	۱۰۰
بیابان ساحلی	بندر لنگه	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۰	۲۰	۶۷	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۶	۱۴	۱۰۰
	چابهار	۸۷	۱۳	۱۰۰	۸۴	۱۶	۸۰	۸۷	۱۳	۱۰۰	۸۷	۱۳	۱۰۰
	میانگین اقلیم	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۲	۱۸	۷۶	۸۶	۱۴	۱۰۰	۸۶	۱۴	۱۰۰

۳-۳- نتایج مشخصه ماندگاری وضعیت‌های رطوبتی در مقیاس سالانه

نتایج مشخصه ماندگاری برای هر یک از وضعیت‌های رطوبتی شامل خشکسالی، نرمال و ترسالی بر مبنای هر یک از ۴ شاخص مورد بررسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس سالانه محاسبه و نتایج آن در شکل ۲ آورده شده‌اند.

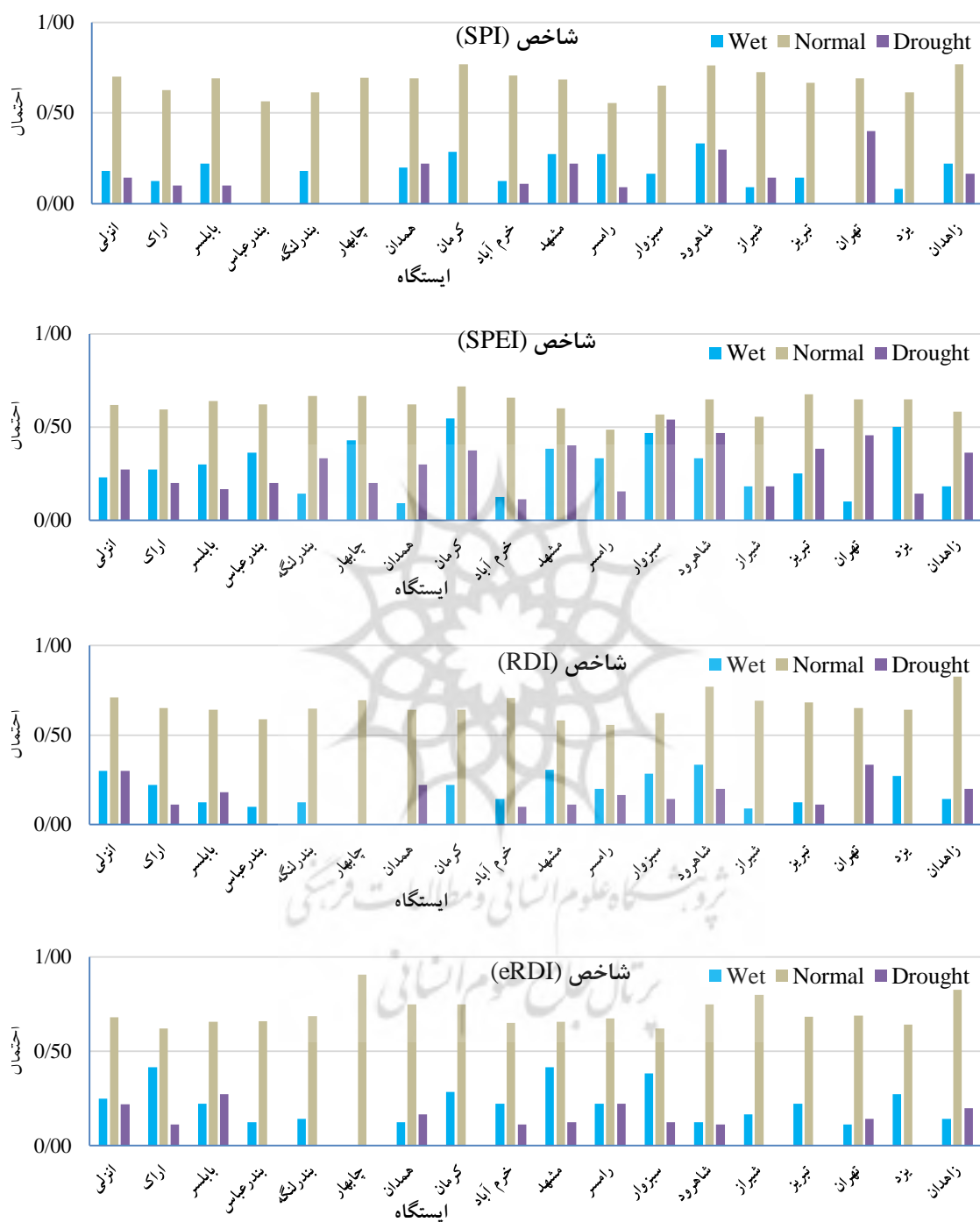


شکل ۲- احتمال ماندگاری سه وضعیت خشکسالی، نرمال و ترسالی براساس شاخص‌های مورد بررسی در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه

بر پایه نتایج بدست آمده، احتمال ماندگاری وضعیت نرمال در بین ایستگاه‌ها و شاخص‌های موردنظر در مقیاس سالانه بین ۰/۴ تا ۰/۹ متغیر و میانگین آن ۰/۶۷ می‌باشد و کمترین مقدار آن مربوط به ایستگاه رامسر براساس شاخص SPI (۰/۴) و بیشترین مربوط به ایستگاه چابهار (۰/۹) براساس شاخص SPEI می‌باشد. شاخص eRDI به‌طور متوسط مقادیر بالاتری از ماندگاری وضعیت نرمال را نشان می‌دهد و در بین اقلیم‌ها، اقلیم مرطوب ساحلی نیز کمترین احتمال ماندگاری این وضعیت را نشان می‌دهد. نتایج مقادیر احتمال ماندگاری وضعیت خشکسالی نیز در بین ایستگاه‌ها و شاخص‌های موردنظر در مقیاس سالانه بین صفر و ۰/۷۵ متغیر می‌باشد. شاخص SPEI به جزء در اقلیم مرطوب ساحلی در بقیه اقلیم‌ها مقدار بالاتری از احتمال ماندگاری شرایط خشکسالی را نسبت به سایر شاخص‌ها نشان داد و در اقلیم مرطوب ساحلی نیز شاخص eRDI مقادیر بالاتری از احتمال این وضعیت رطوبتی را نشان داد. اقلیم نیمه بیابانی نیز نسبت به سایر اقلیم‌ها، احتمال بالاتری از ماندگاری این شرایط را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ احتمال ماندگاری وضعیت ترسالی نیز در بین ایستگاه‌ها و شاخص‌های موردنظر در مقیاس سالانه بین صفر و ۰/۶۴ متغیر و میانگین آن ۰/۲۲ می‌باشد. کمترین مقدار احتمال ماندگاری این وضعیت مربوط به ایستگاه‌های شیراز براساس شاخص eRDI، تهران براساس شاخص RDI، بندرعباس براساس شاخص SPI و چابهار براساس شاخص‌های RDI، eRDI و SPI می‌باشد. در این وضعیت رطوبتی نیز شاخص SPEI به جزء در اقلیم مرطوب ساحلی در بقیه اقلیم‌ها مقدار بالاتری از احتمال ماندگاری شرایط خشکسالی را نسبت به سایر شاخص‌ها نشان داد و در اقلیم مرطوب ساحلی نیز شاخص eRDI مقادیر بالاتری از احتمال این وضعیت رطوبتی را نشان داد. شاخص eRDI نیز نسبت به شاخص RDI مقادیر بالاتری از احتمال ماندگاری شرایط ترسالی را نشان داد.

۳-۴- نتایج مشخصه ماندگاری وضعیت‌های رطوبتی در دوره رشد

نتایج مشخصه ماندگاری هریک از وضعیت‌های رطوبتی در مقیاس دوره رشد بر مبنای شاخص‌های مورد بررسی در ایستگاه‌های مختلف در شکل ۳ آورده شده است. براساس نتایج آن، مقدار احتمال ماندگاری در وضعیت نرمال در این مقیاس زمانی بین ۰/۴۸ تا ۰/۹۱ متغیر می‌باشد و میانگین آن نیز ۰/۶۷ می‌باشد. کمترین و بیشترین مقدار به ترتیب مربوط به ایستگاه رامسر براساس شاخص SPEI و ایستگاه چابهار براساس شاخص eRDI می‌باشد. بیشترین مقدار احتمال ماندگاری در این وضعیت در بین شاخص‌ها مربوط به شاخص eRDI و کمترین آن نیز مربوط به شاخص SPEI در همه اقلیم‌ها به جزء در اقلیم مرطوب ساحلی، که در آن اقلیم نیز شاخص SPI کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در بین اقلیم‌ها نیز کمترین و بیشترین مقدار به ترتیب مربوط به اقلیم‌های مرطوب ساحلی و بیابانی می‌باشد. همچنین احتمال ماندگاری در وضعیت خشکسالی در این مقیاس زمانی بین صفر تا ۰/۵۴ متغیر و میانگین آن نیز ۰/۱۶ است. کمترین آن مربوط به ایستگاه‌های یزد و کرمان و ایستگاه‌های واقع در اقلیم بیابان ساحلی براساس سه شاخص SPI، RDI و eRDI و بیشترین آن نیز مربوط به ایستگاه سبزوار براساس شاخص SPEI است.



شکل ۳- احتمال ماندگاری سه وضعیت خشکسالی، نرمال و ترسالی براساس شاخص‌های مورد بررسی در مقیاس دوره رشد در ایستگاه‌های مورد مطالعه

در بین شاخص‌ها، شاخص SPEI به جز در اقلیم مرطوب ساحلی و شاخص‌های SPI و eRDI به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار نسبت به شاخص‌های دیگر می‌باشند. در بین اقلیم‌های موردنظر نیز بیشترین و کمترین مقدار احتمال ماندگاری در این وضعیت به ترتیب مربوط به اقلیم‌های نیمه بیابانی در همه شاخص‌ها به جزء شاخص eRDI و بیابان ساحلی در همه شاخص‌ها به جزء شاخص SPEI می‌باشد. مقدار احتمال ماندگاری ترسالی در این مقیاس زمانی بین صفر تا ۰/۵۵ متغیر می‌باشد و میانگین آن نیز ۰/۲۱ می‌باشد. بیش‌ترین آن مربوط به ایستگاه کرمان براساس شاخص SPEI می‌باشد. در بین شاخص‌ها، شاخص SPEI به جزء در اقلیم نیمه‌کوهستانی و شاخص‌های SPI و RDI به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار نسبت به شاخص‌های دیگر می‌باشند. در بین اقلیم‌ها، کمترین مقدار احتمال ماندگاری در این وضعیت مربوط به اقلیم بیابان‌ساحلی در همه شاخص‌ها به جزء شاخص SPEI و در آن شاخص نیز اقلیم نیمه‌کوهستانی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از مدل زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال، می‌تواند ابزار مناسبی برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی باشد. در این پژوهش با بکارگیری مدل زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال سعی گردید مشخصه‌های خشکسالی شامل آسیب‌پذیری، اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و ماندگاری سه وضعیت ترسالی، نرمال و خشکسالی در ۱۸ ایستگاه سینوپتیک واقع در گستره شش ناحیه اقلیمی کشور بر مبنای شاخص‌های SPI، RDI، eRDI و SPEI در دو مقیاس سالانه و ماهانه مورد بررسی قرار گردد که مهم‌ترین نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

به‌طور کلی شاخص SPEI مقادیر بالاتری از احتمال آسیب‌پذیری خشکسالی را نسبت به شاخص‌های دیگر نشان می‌دهد. حساسیت بیشتر شاخص SPEI به تغییرات تبخیر و تعرق سبب شده است که این شاخص تغییرپذیری بیشتری را در شرایط خشکسالی از خود نشان دهد. بر اساس نتایج این شاخص، تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها اطمینان‌پذیری کم‌تر ولی آسیب‌پذیری نسبت به خشکسالی در مقایسه با سایر شاخص‌ها بیشتر است.

براساس نتایج حاصل از ماتریس احتمال انتقال می‌توان بیان داشت که در اکثر موارد عناصر قطر اصلی هر یک از ماتریس‌ها نسبت به سایر عناصر ماتریس بزرگتر می‌باشند، که این امر بیانگر احتمال وقوع حالت مشابه به حالت فعلی یا به عبارتی همان ماندگاری آن وضعیت بیشتر از حالت‌های دیگر می‌باشد. علاوه بر این احتمال ماندگاری وضعیت نرمال نیز نسبت به دو وضعیت ترسالی و خشکسالی دارای مقادیر بسیار بالاتری (بیش از ۵۰ درصد) بود. با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که در تحلیل خصوصیات خشکسالی حتماً ویژگی‌های آن‌ها از قبیل، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری با توجه به نوع اقلیم منطقه مورد بررسی قرار گیرد.

کتابنامه

- اقتدارنژاد، مینا؛ بذرافشان، ام‌البین؛ بذرافشان، جواد؛ ۱۳۹۶. بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی براساس شاخص بارش - تبخیر تعرق استاندارد شده در ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۵ (۲): ۴۶ - ۳۵.
- بنی مهد، سید ادیب؛ خلیلی، داور؛ 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): ۴۶ - ۳۷.
- زارعی، عبدالرسول؛ ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیرگذاری مرتبه مارکف بر دقت پیش‌بینی خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI به‌وسیله زنجیره مارکف. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱ (۱): ۱۰۰ - ۸۸.
- شکری کوچک، سعید؛ به‌نیا، عبدالکریم؛ ۱۳۹۲. پایش و پیش‌بینی خشکسالی استان خوزستان با استفاده از شاخص خشکسالی SPI و زنجیره مارکف. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۶ (۳): ۱۲ - ۱.
- قباتی سوق، محمد؛ زارع ایبانه، حمید؛ مساعدی، ابوالفضل؛ صمدی، سیده زهرا؛ 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، ۵ (۳۰): ۱۷۱۷ - ۱۷۰۰.
- مقصود، فاطمه؛ ملکیان، آرش؛ محسنی ساروی، محسن؛ بذرافشان، ام‌البین؛ 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): ۱۰۹۹ - ۱۰۷۵.
- مقیم، محمد مهدی؛ کوهی، الهام؛ زارعی، عبدالرسول؛ ۱۳۹۷. پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکف. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۸ (۳۱): ۱۶۵ - ۱۵۳.
- هاتفی، عادل؛ مساعدی، ابوالفضل؛ جباری نوقابی، مهدی؛ ۱۳۹۴. نقش تبخیر و تعرق در پایش خشک‌سالی هواشناسی در چند ناحیه اقلیمی کشور. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲ (۲۳): ۲۱ - ۱.
- Adnan S, Ullah K, Shuanglin L, Gao S, Hayat Khan A, Mahmood R., 2018. Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Journal of Climate Dynamics* 51(5-6): 1885-1899.
- Alam NM, Sharma GC, Moreira E, Jana C, Mishra PK, Sharma NK, Mandal D., 2017. Evaluation of Drought Using SPEI Drought Class Transitions and Log-Linear Models for Different Agro-Ecological Regions of India, *Physics and Chemistry of the Earth*, 100: 31-43.
- Alijani B, Ghohroudi M, Arabi N., 2008. Developing a climate model for Iran using GIS. *Theoretical and Applied Climatology*, 92 (1-2): 103-112.
- Asadi Zarch M, Malekinezhad H, Mobin MH, Dastorani MT, Kousari MR., 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water resources management*, 25(13): 3485-3540.
- Eslamian S, Jahadi M., 2019. Monitoring and prediction of drought by Markov chain model based on SPI and new index in Isfahan. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 9(4): 355-65.

- Jensen ME, Burman RD, Allen RG., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices no. 70. American Society of Civil Engineers, NY.
- Khalili D, Farnoud T, Jamshidi H, Kamgar-Haghighi AA, Zand-Parsa S., 2011. Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water resources management*, 25(6):1737–1757.
- Kwarteng, F. Shwetha, G., Patil, R. 2016. Reconnaissance drought index as potential drought monitoring tool in a Deccan plateau, hot semi-arid climatic zone. *International Journal of Agriculture Sciences*, 51(8), 2183-2186
- Lloyd Hughes B, Saunders MA., 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13):1571-1592.
- Mahmoudi P, Rigi A, Kamak MM., 2019. A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 137(3-4): 3123–38.
- Stage JH, Tallaksen LM, Gudmundsson L, Van Loon AF, Stahl K., 2016. Response to comment on ‘Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)’. *International Journal of Climatology*, 36(4): 2132–2138.
- Steinman A., 2003. Drought Indicators and Triggers: A Stochastic Approach to Evaluation. *Journal of the American Water Resources Association* 39(5): 1217–1233.
- Thomas T, Jaiswal RK, Galkate RV, Nayak TR., 2016. Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand. *Journal of Procedia Technology*, 24: 23-30
- Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G., 2017. An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought. *Environmental Processes*. 4 (1):137–148.
- Tsakiris G, Nalbantis I, Pangalou D, Tigkas D, Vangelis H., 2008. Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). In *Proceedings of the 1st International Conference “Drought management: scientific and technological innovations”*. Zaragoza, Spain: option Méditerranéennes, series A (No. 80, p. 2008).
- Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water resources management*, 21(5), 821–833.
- Vangelis H., Tigkas D, Tsakiris G., 2013. The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *Journal of Arid Environments*, 88(1), 130-140.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI., 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 23 (7): 1696–1718.
- Wilhite DA., 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite, D. A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*, vol. 1. Routledge, New York, 1–18.
- Yihdego Y, Vaheddoost B, Al-Weshah RA., 2019. Drought indices and indicators revisited. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(3), 69-79.
- Zarei AR, Moghimi MM, Bahrami M., 2019. Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (ERDI) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management*, 5(3):1345–1356.
- Zarei AR., 2018. Evaluation of Drought Condition in Arid and Semi-Arid Regions, Using RDI Index. *Journal of Water Resources Management*, 32(5): 1689–1711