

ارزیابی تغییرات طول دوره‌های خشک فصلی با روش ارزیابی گام‌به‌گام سوارا (SWARA) در ایران

سید کرامت هاشمی^۱؛ استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱

چکیده

به منظور بررسی رفتار فصلی طول دوره‌های خشک پایگاهی از داده‌های بارش روزانه ۴۴ ایستگاه سینوپتیک ایران در دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۸) استفاده شد. بعد از یکپارچه‌سازی آماری داده‌ها، دوره‌های خشک بلندمدت با تداوم بیش از ۲۰ روز مبنای مطالعه قرار گرفتند. در گام بعدی برای تعیین وزن فصلی دوره‌ها از روش ارزیابی گام‌به‌گام منطق فازی-عددی سوارا (SWARA) استفاده شد. در چهار گام اساسی اهمیت نسبی دوره‌های پرتکرار، وزن اولیه، وزن نهایی و نرمال شده دوره‌ها مشخص شد. اثرگذاری و وزن هرکدام از معیارها با روش سوارا در محیط فازی نشان داد که در مناطق غربی و شمالی کشور، بیشترین وزن اولیه در تبیین دوره‌ها را فصل زمستان و بهار و معیارهایی مانند برگشت‌پذیری و درصد احتمال رخداد دارا هستند. در تبیین نهایی این دو فصل وزن بالایی داشتند. این دو فصل بیش از ۶۵ درصد وزن دوره‌ها در این مناطق را تبیین نمودند. در مناطق جنوبی و بخش‌هایی از مرکز (اصفهان، شرق فارس و غرب کرمان)، فصل زمستان و پاییز بیش از ۷۱ درصد وزن دوره‌ها را تبیین می‌کنند. در بین معیارهای تبیین‌کننده وزن دوره‌ها نیز معیار برگشت‌پذیری و احتمال رخداد بیش از ۵۵ درصد وزن را به خود اختصاص داده است. تغییرپذیری معیارها در مناطق شمالی و مرطوب کشور از برگشت‌پذیری، تداوم و احتمال رخداد بیشتری برخوردار است. بنظر می‌رسد که رفتار دوره‌های خشک بلندمدت بیشتر تابعی از دو معیار برگشت‌پذیری و احتمال رخداد آن‌هاست.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، وزن دهی، بارش، خشکسالی، روش سوارا.

مقدمه

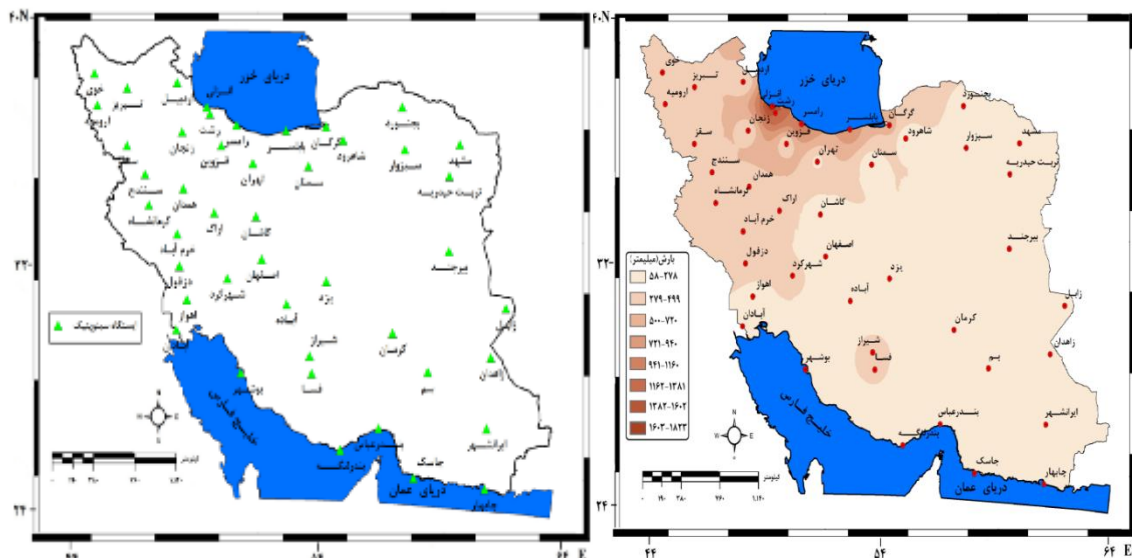
تغییرپذیری و نوسان بارش در گستره ایران بیش از سایر متغیرهای حدی اقلیم است و توزیع زمانی و مکانی آن بسیار نایک‌نواخت است. رفتار پیچیده مکانی- زمانی بارش در مناطق مختلف متفاوت است (Sánchez et al., ۲۰۱۱). اگر دوره‌های خشک با روزهای بدون رخداده بارش توصیف شود، بنابراین این نایک‌نواختی تا حدودی نظم‌پذیری رخداده دوره‌های خشک بلندمدت را با چالش روبرو می‌کند (Thoithi, ۲۰۲۱). به عبارتی تغییر در ماهیت دوره‌های خشک همبستگی خاصی با آشوبمندی رفتار بارش دارد (هاشمی‌عنا، ۱۴۰۰). در عصر کنونی یکی از راه‌های اثرگذاری و تشدید پدیده تغییر اقلیم، تغییر در آستانه‌های بارشی و پیامد آن بهم خوردن نظم دوره‌های خشک و تر است. پیامد این تغییرات تهدید بالقوه وضعیت منابع آب کشور است (مسعودیان، ۱۳۹۵، ۱۲۵). یادگو و همکاران (Yihdego et al., ۲۰۱۹) معتقدند که تداوم دوره‌های خشک می‌تواند منجر به بحران‌هایی از قبیل خشک‌سالی شود. اسکالندر و همکاران (Escalante et al., ۲۰۱۷) در پژوهشی جامع به این نتیجه رسیدند که در پهنه‌های خشک و نیمه‌خشک کره‌ی زمین که به‌طور بالذات با کمبود بارش و نوسان دوره‌های خشک روبرو هستند لزوم مطالعه دقیق جهت طبقه‌بندی و استخراج دوره‌ها، فراوانی رخداده و برآورد فصلی طول دوره‌های خشک کمک‌شایانی به مدیریت اطلاعات در بخش‌های مهمی مانند منابع آب می‌نماید. در مطالعات اخیر، برای بررسی تغییرات رفتاری دوره‌های خشک اغلب از روش‌های آماری استفاده بیشتری شده و مبنای انجام بسیاری از مطالعات شده است (Sanchi, ۲۰۱۸; Kendon et al., ۲۰۱۹). در ایران پایش دوره‌های خشک در مقیاس محدود و اغلب مبتنی بر مطالعه و پهنه‌بندی دوره‌های خشک انجام شده است (محمودی، ۱۳۹۷؛ صادقی‌نیا، ۱۳۹۱؛ ذوالفقاری و میرزائی، ۱۳۹۷؛ انصاری و کامران، ۱۳۸۶؛ محمودی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مفیدی و همکاران، ۱۳۹۳). در مطالعات جدیدتر امروزی اقلیم‌شناسانی مانند، اسکالت و نونز (Escalante and Nunez, ۲۰۱۷) آدان (Adan, ۲۰۲۰) و انصاری (۲۰۱۸) برای توصیف و پایش دقیق دوره‌های خشک از مفاهیم مختلفی همچون: روزهای متوالی بدون بارش، روزهای متوالی با بارش اندک، یا بارش اندک در طول یک دوره خاص از زمان استفاده می‌کنند. از طرفی برای توصیف دقیق توالی چرخه‌های خشک‌سالی لازم است مکانیسم رفتاری دوره‌های خشک با دورنمای آینده نیز در مطالعات جدید لحاظ شود. استفاده از مدل‌های آماری پیش‌یابی اقلیم در بررسی رفتار دوره‌های خشک باب جدیدی در مطالعات بازنموده است. در جدیدترین مطالعه توسط هاشمی‌عنا (۱۴۰۰)، ماهیت رفتاری دوره‌های خشک وابسته به بارش در گستره‌ی ایران و اثرات تغییرات اقلیم ناشی از آن به کمک مدل‌های اقلیمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین حساسیت دوره‌های خشک نسبت به نوسانات بارش در شمال‌غرب و پهنه شمالی کشور است، به طوری‌که در دهه ۲۰۵۰ درصد تغییرات دوره‌های خشک در پهنه‌های مرطوب کشور به بیش از ۱۵ درصد در جهت افزایش دوره‌ها پیش می‌رود. زهانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۲۲) و تیچاوسکی و همکاران (Tichavský et al., ۲۰۱۹) مطالعات و پژوهش‌های جدیدی با نگرش ارتباط تغییرات اقلیمی و دوره‌های خشک بلندمدت در مقیاس فصلی انجام شده است. فنگ و همکاران (Feng et al., ۲۰۲۱)، حداکثر طول دوره‌های خشک در جنوب شرق چین را با استفاده از مدل منطقه‌ای کوردکس (CORDEX)، مورد بررسی قرار داده است و مشخص شد که اغلب مدل‌های آماری وابستگی شدیدی به شرایط توپوگرافی و میزان بارش دریافتی محل دارند و مدل کوردکس مناسب ارزیابی است (Breinl and Van, ۲۰۱۸; Wilks, ۲۰۱۸).

راتان و ونگوپال (Ratan and Venugopal, ۲۰۱۳)، بارش‌های حاره‌ای و گرمسیری را عامل تعیین کننده در توصیف دوره‌های خشک بلندمدت می‌داند به طوری که در نوار ۲۵ درجه عرض شمالی شیب تغییرات دوره‌ها بشدت افزایشی است. با شرحی که گذشت، بررسی رفتار دوره‌های خشک در مقیاس ماهانه و فصلی نیاز به استفاده از مدل‌های آماری دقیق، جهت وزن دهی و ارزیابی معیارهای اثرگذار خواهد بود. در این پژوهش با رویکرد نوین آماری با استفاده از روش ارزیابی وزن دهی گام‌به‌گام (SWARA^۱) اقدام به تحلیل معیارهای فصلی تغییرات طول دوره‌های خشک شد. نوآوری این پژوهش نسبت به مطالعات انجام شده پیشین مشخص شدن وزن فصلی دوره‌های خشک جهت مقایسه آن با رژیم بارشی ایران بود. با شناخت دقیق رخداد دوره‌های خشک بلندمدت می‌توان برنامه‌ریزی دقیقی در بخش‌های مختلفی مانند؛ منابع آب، کشاورزی، سلامت، حمل نقل، گردشگری، منابع طبیعی و محیط‌زیست همساز با اقلیم انجام داد. امید است این پژوهش و مطالعات همسو با آن گام مثبتی در جهت شناخت دقیق تر اقلیم و رفتار آن در فصول مختلف سال شود.

داده ها و روش کار

پایگاه اصلی داده‌ها برای انجام و تحلیل این پژوهش، مقدار و توزیع بارش روزانه ۴۴ ایستگاه سینوپتیک برای ۳ دهه آماری گذشته از (۲۰۱۸-۱۹۸۸) است (شکل ۱ و ۲). توزیع فضایی بارش سالانه در پهنه ایران با روش میانبایی (Idw) ترسیم گردید. برای آشکارسازی بهتر رفتار دوره‌های خشک، داده‌های بارش بعد از صحت‌سنجی و یکپارچه‌سازی زمانی، به مقیاس فصلی تبدیل شدند. ملاک انتخاب یک روز خشک آستانه‌ی ۱ میلی‌متر و بیشتر بود چرا که بیش از ۸۷ درصد وزن آستانه‌ها مربوط به این دامنه بود. در مرحله بعد نیاز بود تا دوره‌های خشک با تداوم‌های مختلف استخراج و دوره‌های بلندمدت بیشتر از ۲۰ روز به دلیل فراوانی رخداد و وزن بالایی که در بین تداوم‌ها داشتند و مهم‌تر اینکه در پهنه‌های مرطوب و پربارش برآورد خوبی از رفتار بارش دارد. و اثرگذاری بیشتر برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. در گام بعدی احتمال انتقال رخداد‌های تر و خشک با الگوریتم تجربی مارکوف مرتبه دوم برازش و محاسبه شوند تا فصل‌های آسیب‌پذیر در برابر رخداد‌های خشک مشخص شود. در مرحله نهایی وزن و اثرگذاری هر کدام از فصول در رخداد دوره‌های خشک طی چهار گام اساسی بر اساس روش سوارا (SWARA)، تعیین گردید. الگوریتم این مراحل در ادامه شرح داده شده است.

۱. Step wise Weight Assessment Ratio Analysis



شکل ۱. توزیع فضایی میانگین سالانه بارش در ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۸)

شکل ۲. توزیع فضایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران

• پیش‌بایی و احتمال رخداد دوره‌های تر و خشک در فصول مختلف سال

زنجیره مارکوف مرتبه دوم در برآورد احتمال شرطی رفتار دوره‌های تر و خشک از حساسیت و عملکرد خوبی برخوردار است. ضرورت داشت جهت برگشت‌پذیری و تداوم دوره‌ها از الگوریتم توزیع تجربی بر مبنای نکویی برازش مرتبه دوم زنجیره مارکوف استفاده شود. در واقع این الگوریتم، تصویر و شناخت درستی از ناحیه بندی دوره‌های خشک ایران ارائه می‌دهد. توابع تجربی روزهای تر و خشک با مجموعه‌ای از دنباله‌های عددی با قرارداد X و Y (وضعیت تر و خشک) و زیرمجموعه این توابع با قرارداد $(X$ و $Y)$ ، (رخداد روزهای تر و خشک) نشان داده می‌شوند (رابطه ۱). ممکن است احتمال رخداد قراردادهای تر و خشک در مواردی یکسان باشد بنابراین از رابطه تابع احتمال توأم (رابطه ۲) استفاده شد. برای رخداد یک قرارداد به شرط عدم رخداد قرارداد دیگر روابط ۱ و ۲ به رابطه ۳ ادغام گردید تا احتمال شرطی انتقال و چرخش دوره‌ها با دقت بیشتری استخراج شود.

$$P(X=x|Y=y)=P(X=x), P(X=x, Y=y)=P(X=x)P(Y=y) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$p(x,y)=P(X=x, Y=y) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$f_{L^{(\ell)}} = \begin{cases} P(W | WD) & \ell = 1 \\ P(D | WD)P^{\ell-2}(D | DD)P(W | DD) & \ell \geq 2 \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

$f_{L^{(\ell)}}$ تابع احتمال انتقال دوره‌ها $-W$ احتمال روزهای تر یا بارانی $-D$ احتمال رخداد روزهای خشک با تبدیل رابطه ۳ به فرمت ماتریس می‌توان رابطه ۴ را برای حالت‌های گذار یا انتقال دوره‌ها در نظر گرفت (Selvaraj and Selvis, 2010).

در این ماتریس n_{00} تعداد روزهای خشک به دنبال یک روز خشک دیگر، n_{01} تعداد روزهایی که یک روز بارانی بعد از یک روز خشک ظاهر می‌شود، n_{10} تعداد روزهایی که یک روز خشک بعد از یک روز بارانی ظاهر می‌شود و n_{11} تعداد روزهایی را نشان می‌دهد که یک روز بارانی به دنبال یک روز بارانی دیگر اتفاق افتاده است. در این ماتریس درصد احتمال انتقال چرخش روزهای بارانی و خشک محاسبه و مشخص گردید.

• وضعیت تداوم و برگشت‌پذیری دوره‌های خشک

تداوم و تکرار جزئی از ماهیت رخداد‌های تر و خشک هواشناسی است. در این میان تکرار تداوم دوره‌های خشک میان مدت و بلندمدت (بیشتر از ۲۰ روز) به دلیل توزیع ناهمگن مکانی و زمانی بارش و خشکی ذاتی بیشتر نواحی ایران در فصول مختلف سال محتمل‌تر است. با توجه به اینکه در تمامی فصول بیشترین تداوم‌ها مربوط به رخداد دوره‌های خشک بیشتر از ۲۰ روز بود، بنابراین این تداوم زمانی، مبنای مطالعه در این پژوهش قرار گرفت. در واقع ویژگی دوره‌های خشک در تمایل به ادامه یافتن تا انتقال به دور بعدی، بیانگر تداوم آن‌هاست. بعد از محاسبه تابع احتمالاتی انتقال دوره‌ها (با استفاده از روابط ۴-۱) تداوم و ماندگاری دوره‌ها از رابطه زیر را محاسبه می‌گردد. (Grace and Eagleson, ۱۹۶۶).

$$T = E(L_D) + E(L_W) = 2 + [P(D | WD) / P(W | DD)] + [P(W | DW) / P(D | WW)] \quad \text{رابطه ۵}$$

$E(L_D)$ ؛ متوسط تداوم دوره‌های خشک، $E(L_W)$ ؛ متوسط تداوم دوره‌های بارانی (تر)، $P(D | WD)$ ؛ احتمال رخداد یک دوره خشک به شرط رخداد حالت‌های تر و خشک، $P(W | DD)$ ؛ احتمال رخداد یک دوره تر به شرط رخداد دو دوره خشک متوالی است. در واقع تداوم تکرار از نسبت حاصل جمع درصد احتمال رخدادها در حالت‌های تر و خشک وابسته به هم به دست خواهد آمد.

بعد از شناخت تداوم و رفتار پیشین دوره‌ها، لازم بود که برگشت‌پذیری و تکرار آن‌ها نیز محاسبه شود (رابطه ۶). این امر تصویر درستی از مرزبندی فصل‌ها ارائه می‌دهد (Selvaraj and Selvis, ۲۰۱۰).

$$T(\ell) = N / N_L = T / fL \quad \text{رابطه ۶}$$

$T(\ell)$ ؛ برگشت‌پذیری روزهای بارانی و خشک، N ؛ مجموع رخداد‌های تر و خشک، N_L ؛ تعداد رخداد‌های مورد انتظار دوره‌ها، fL ؛ طول دوره‌های مورد انتظار و T ؛ مجموع دوره‌های برگشت‌پذیر و تکرارشونده.

• وزن دهی و تعیین اثرگذاری فصلی دوره‌های خشک بر اساس روش سوارا (SWARA)

جهت بررسی ویژگی‌های متغیر حدی مانند بارش و تعیین وزن آن در یک سری زمانی از روش‌های آماری تصمیم‌گیری بر پایه‌ی معیار وزن دهی استفاده می‌شود. در بین روش‌های آماری تعیین وزن، روش سوارا به دلیل داشتن مزایایی نظیر؛ قابلیت بالا در برآورد و ارزیابی زمانی دقیق دوره‌ها، وزن دهی مناسب، آنالیز دقیق در خصوص رابطه درون معیاری، حذف دوره‌های بسیار کوتاه و کم اثر و مهم‌تر اینکه از منطبق عددی فازی برای حذف ابهامات و عدم قطعیت‌ها در محاسبات به‌درستی استفاده می‌شود. برای اعتماد و کارایی نتایج دریافتی بایستی در ابتدا اقدام به تعیین وزن معیارهای فصلی در فرآیند پژوهش نمود. در واقع وزن دهی دوره‌های خشک مشخص خواهد کرد که اثرگذاری کدام دوره در نتایج بیشتر است. انجام این فرایند مهم در ۴ مرحله پیوسته با بهره‌گیری از روش کرسولین و همکاران (Keršulienė, ۲۰۱۰) انجام

شد: در گام اول سری دوره‌های خشک با استناد به رابطه ۷ معیارها (همان دوره‌ها) با توجه به اهمیت نسبی آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین مقدار در رتبه اول، کمترین مقدار در رتبه آخر و سایر ارزش‌ها بر اساس اهمیت نسبی در بازه میانی این دو قرار می‌گیرند. هر چه قدر طول دوره‌ها طولانی‌تر باشد وزن آن‌ها در طبقه‌بندی بیشتر و پراهمیت‌تر است.

$$K_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ S_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه K_j رتبه دوره‌های خشک و S_j پراکنش یا واریانس دوره‌هاست. در گام دوم لازم بود وزن اولیه هر دوره محاسبه گردد (طولانی‌ترین و پرتکرارترین دوره وزن ۱ را دریافت می‌کند). نیاز بود تمامی دوره‌ها در فرایند وزن دهی مشارکت داشته باشند، بنابراین از رابطه ۸ برای این مهم استفاده شد.

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{q_j - 1}{K_j} & j > 1 \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه q_j - بیانگر وزن اولیه و ارزش ذاتی (رفتار فصلی دوره‌ها) دوره‌ها در سری زمانی مورد مطالعه است. در گام سوم برای تبیین و اثرگذاری دوره‌ها در رژیم‌های فصلی، نیاز بود که وزن نهایی هر رخداد مشخص شود. مجموع وزن‌ها برای هر دوره در حالتی که تبیین (رفتار) مشخصی را ارائه دهد برابر با یک خواهد بود (درجه تبیین برای دوره‌های پرتکرار و برگشت پذیر از وزن بیشتری برخوردار است).

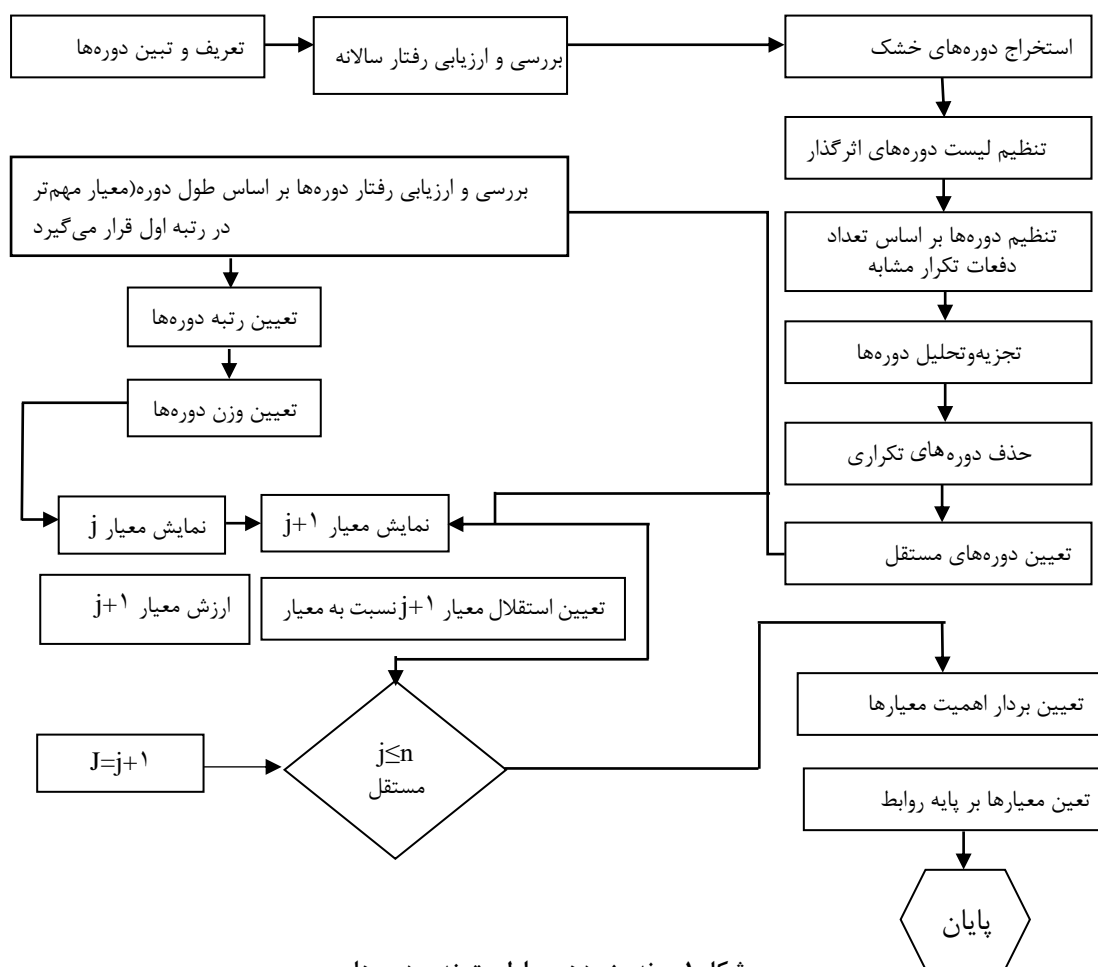
$$W_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^m q_k} \quad \text{رابطه (۹)}$$

از نظر نگارنده از آنجایی که در سری زمانی مورد مطالعه، دوره برگشت بسیاری از دوره‌های خشک به‌ویژه در پهنه‌های مرطوب از رخداد نامنظم، آشوبمند و غیرواقعی برخوردار بودند، لازم بود با استفاده از منطق عددی فازی این رخدادها نیز در تبیین وزن نهایی مشارکت داده شوند. اگرچه می‌توانستیم این معیارهای خشک غیرواقعی را حذف نماییم اما به دلیل پیوستگی دوره‌ها و اثرگذاری برخی از آن‌ها در وزن دهی فصلی انجام این مهم ضرورت داشت.

$$W_{crisp} = \frac{(w_j^m - w_j^i) + (w_j^u - w_j^l)}{3} + w_j^i \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

w_j^m و w_j^u به ترتیب وزن اولیه و نهایی دوره‌ها، w_j^i ؛ وزن کل دوره‌های کوتاه و بلند استخراج شده بدون حذف دوره‌های کم اثر (Wilks, ۲۰۱۸).

شماتیک فرایند وزن دهی و اولویت‌بندی دوره‌ها با استفاده از روش سوارا در چارت ۱ نمایش داده شده است.

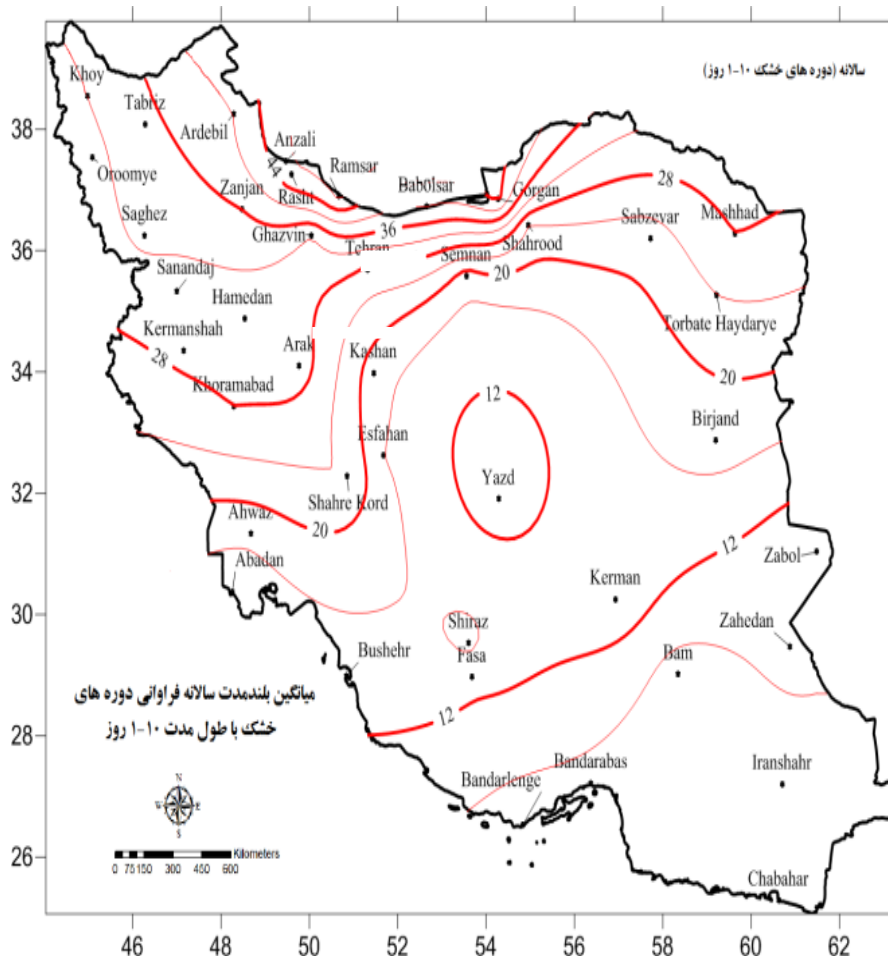


شکل ۱. روند وزنی و اولویت‌بندی دوره‌ها

شرح و تفسیر نتایج

• تحلیل پهنه‌ای دوره‌ها

توزیع فضایی رخداد دوره‌های خشک و تهیه نقشه‌های هم‌چند آن در مقیاس فصلی، ویژگی‌های فصلی این دوره‌ها را به خوبی نشان می‌دهند. نظر به اهمیت و اهداف پژوهش و توجه به اینکه بیشترین رخداد اثرگذار مربوط به دوره‌های خشک کمتر از ۲۵ روز بود بنابراین میانگین رخداد مربوط به این دوره‌ها برای تمام فصول سال استخراج شد. قبل از تفکیک فصلی دوره‌ها، میانگین بلندمدت فراوانی سالانه دوره‌های خشک (از نسبت مجموع تعداد دوره‌های خشک به تعداد سال‌های مورد مطالعه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۸) به دست می‌آید نشان داد که، بیشترین فراوانی رخداد با ۷۳ مورد در سواحل چابهار و زاهدان و کمترین رخداد با ۱۳ مورد در سواحل غربی و شمالی خزر (رشت، انزلی و رامسر) مشاهده شدند (شکل ۳). این نتایج با تحقیقات محمودی، ۱۳۹۲ و هاشمی‌عنا، ۱۴۰۰ مشابهت دارد. روند افزایشی مقادیر فراوانی رخداد دوره‌ها از شمال به جنوب کاملاً محسوس است و دامنه تغییرات آن نسبتاً بالاست. در واقع با استناد به یافته‌های پیشین و مطالعه کنونی نگارنده پیرامون رفتار دوره‌های خشک به نظر می‌رسد دوره‌های خشک میان‌مدت و بلندمدت (بیشتر از ۲۰ روز)، نسبت به دوره‌های کوتاه‌مدت شاخص بهتری برای ارزیابی رفتار فصلی دوره‌ها باشد. چراکه دوره‌های خشک بلندمدت در تمامی گستره ایران رخ داده‌اند.



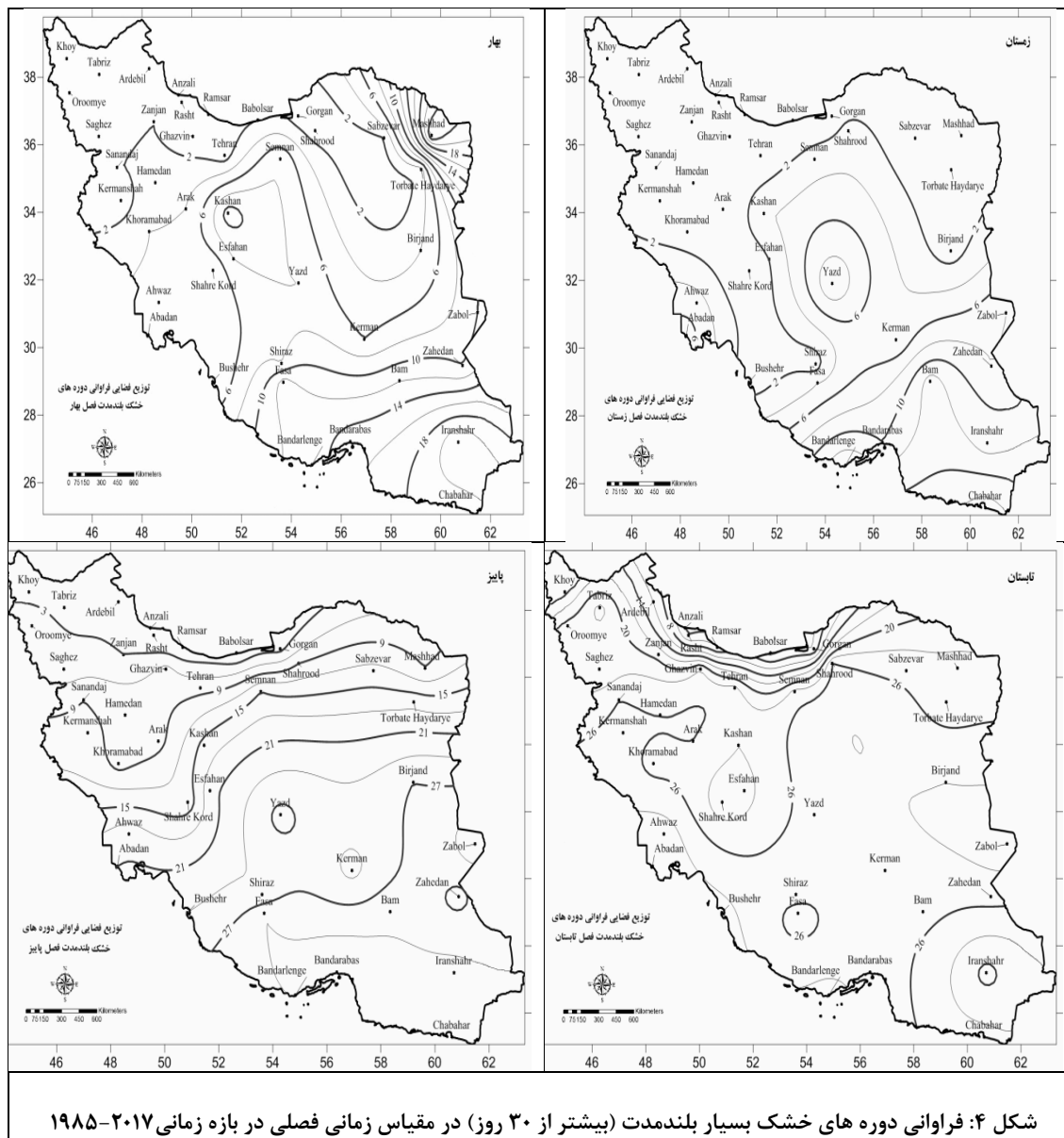
شکل ۳. میانگین بلندمدت فراوانی دوره‌های خشک
در مقیاس سالانه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۸)

• تحلیل فصلی دوره‌ها

توزیع فضایی رخداد دوره‌ها در مقیاس فصلی دارای نتایج متفاوت تری است. نتایج نشان داد که پهنه‌های پربارش کشور مانند غرب، شمال غرب، سواحل جنوبی دریای خزر که بارش آن‌ها از رژیم زمستانه تبعیت می‌کند تمام رخداد‌های فصل زمستان تداوم‌های کوتاه و میان‌مدت (کمتر از ۲۵ روز) است. در این فصل تداوم‌های بلندمدت بیش از ۲۵ روز در هیچ پهنه‌ای مشاهده نشده است (شکل ۴). رخداد دوره‌ها در فصل بهار الگوی توزیع فضایی متفاوت تری دارد. در این فصل پهنه‌های شمال شرق رخداد‌های بیشتری را تجربه می‌کنند (مشهد، سبزوار و تربت‌حیدریه). در پهنه‌ی شمال غرب به دلیل وجود بارش‌های بهاره، دوره‌ها از فراوانی رخداد کمتری برخوردار هستند. مناطق جنوب و جنوب شرقی مانند فصل زمستان بیشترین رخداد دوره‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. (شکل ۴).

الگوی توزیع فضایی در فصل پاییز در سه جبهه قابل بررسی است؛ جبهه شمال و شمال غرب با رخداد بسیار کم (با میانگین رخداد ۶ روز). جبهه دوم نیمه مرکزی و محور مرکزی زاگرس با رخداد متوسط (میانگین ۱۰ روز) و نهایتاً نیمه جنوب و جنوب شرق با فراوانی رخداد بالا (میانگین رخداد ۲۴ روز). در واقع طول دوره‌ها و فراوانی رخداد آن‌ها از رژیم پاییزه بارش‌های ایران تبعیت می‌کند. الگوی رفتاری دوره‌های خشک در فصل تابستان مشابه با الگوی سالانه این

دوره‌هاست است. بیشترین فراوانی رخداد مربوط به نواحی شمالی استان سیستان و بلوچستان و پهنه‌های شمالی خلیج فارس و دریای عمان است. به دلیل خشکی ذاتی اقلیم ایران در فصل تابستان است. دامنه تغییرات دوره‌ها در شمال و جنوب چندان زیاد نیست (۶ رخداد در فصل (شکل ۴)).



• تحلیل ماتریس فصلی حالت‌های انتقال دوره‌ها

قبل از استخراج تداوم و بازگشت دوره‌ها، بایستی ماتریس فراوانی و حالت‌های انتقال بر مبنای الگوریتم زنجیره مارکوفی مرتبه دوم استخراج کرد. (این مرتبه طبق آزمون مربع کای (χ^2) دقت و برازندگی زیادی در برآوردهای مورد انتظار دارد و از طرفی گردش و تغییر وضعیت دوره‌های تر و خشک را با دقت بیشتری محاسبه می‌نماید). پیش‌تر نگارنده در پژوهشی دلایل استفاده از این مدل آماری را بیان کرده است (هاشمی‌عنا، ۱۴۰۰). در پژوهشی در این مورد محمودی (۱۳۹۲)، نیز توزیع تجربی دوره‌ها را بر پایه مرتبه دوم محتمل‌تر می‌داند. اعتبار سنجی زنجیره مارکوف جهت برآورد دقیق

احتمال انتقال دوره‌ها با آزمون آماری مربع گای نشان داد که بیش از ۸۷ درصد مساحت کشور از رفتار مارکوفی تبعیت می‌کند. با استناد به روابط (۱ تا ۴) در بخش پیشین توابع انتقال دو وضعیت (بارانی و خشک) مشخص شد که تغییر وضعیت (انتقال) از روزهای خشک به روز خشک بعدی در فصل تابستان و پاییز در طول دوره آماری به ترتیب با ۲۰۳۰ روز (احتمال رخداد ۸۲٪) و ۱۴۳۰ روز (احتمال رخداد ۵۲٪) بیشترین فراوانی را دارا هستند. این وضعیت در فصول زمستان و بهار به ترتیب ۸۲۰ روز (احتمال رخداد ۳۶٪) و ۱۶۵۰ روز (احتمال رخداد ۵۶٪) است. نتایج بررسی حالت دوم یعنی تغییر وضعیت از روز خشک به روز بارانی بعدی نشان داد که در فصل زمستان با ۱۵۶۰ روز و ۷۳ درصد احتمال انتقال بیشترین فراوانی تغییر وضعیت و فصل تابستان با ۵۹۳ روز و (احتمال رخداد ۲۸٪) کمترین فراوانی تغییر وضعیت را دارا هستند. تغییر وضعیت از روز بارانی به روز بارانی بعدی در فصل زمستان با ۱۰۸۹ روز (احتمال رخداد ۳۹٪) محتمل‌تر است. در نهایت تغییر حالت بارانی به خشک در فصول پاییز و بهار با ۱۴۹۰ و ۱۵۹۶ روز محتمل‌تر است. درصد احتمال انتقال در این دو فصل به ترتیب ۷۱ و ۷۳ درصد است (جدول ۱). نتایج همه این حالت‌ها نشان داد که درجه نوسان خشکی یک پهنه در طول سال تابعی از آرایش ماتریس تغییر حالت دوره‌هاست. این تغییر حالت در ایستگاه‌های خشک و فصل گرم سال فراوانی بیشتری دارند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., ۲۰۲۲) معتقد است که احتمال رخدادهای تر و خشک تاحدودی وابسته به رژیم بارش است.

به‌طور کلی در غالب پهنه ایران به‌غیر از چند ایستگاه مرطوب سواحل خزر (گرگان، رشت و انزلی) در اغلب فصول احتمال رخداد یک روز خشک بعد از یک رویداد خشک و یا بارانی با درصد بالایی وجود دارد (ماتریس حالت های انتقال به تفکیک ایستگاهها به دلیل طولانی بودن ذکر نشد).

جدول ۱. نتایج ماتریس فراوانی انتقال و درصد احتمال در حالت‌های مختلف در مقیاس فصلی

فصل سال	حالت‌ها	خشک - خشک	بارانی - بارانی	خشک - بارانی	بارانی - خشک
زمستان	فراوانی انتقال	۸۲۰	۱۰۸۹	۱۵۶۰	۱۷۲۰
	درصد احتمال	۳۶	۳۹	۷۳	۷۷
پاییز	فراوانی انتقال	۱۴۳۰	۸۹۶	۱۳۶۷	۱۴۹۰
	درصد احتمال	۵۲	۳۵	۶۶	۷۱
بهار	فراوانی انتقال	۱۶۵۰	۷۵۶	۱۰۲۰	۱۵۹۶
	درصد احتمال	۵۶	۲۳	۵۲	۷۳
تابستان	فراوانی انتقال	۲۰۳۰	۴۹۵	۵۹۳	۲۳۱۱
	درصد احتمال	۸۲	۲۱	۲۸	۸۴

در مرحله قبل بعد از تعیین حالت‌های انتقال، دوره بازگشت تداوم (بالتر از ۲۰ روز) با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه شدند. در واقع تمایل دوره‌های خشک به ادامه یافتن به دوره بعدی، بیانگر تداوم آن‌هاست. بررسی توالی بیشتر از ۲۰ روز نشان داد که فصل تابستان بیشترین احتمال رخداد و کوتاه‌ترین دوره بازگشت را دارند (۸۲ درصد - ۶۹ روز) این شرایط را دارد (جدول ۲). ایستگاه‌های شمالی مانند رشت، انزلی و اردبیل از این قاعده مستثنا هستند. در فصل زمستان در غالب پهنه‌های ایران به‌استثنای چند مکان مانند ایستگاه‌های مرکزی و شرقی (یزد، شیراز، اصفهان، زابل، زاهدان)، از

الگوی این تداوم تبعیت می‌کنند (به‌طور متوسط ۴۷۰ روز در طول دوره). نکته قابل توجه اینکه در فصول پاییز و بهار الگوی تداوم و برگشت پذیری، در انطباق با رژیم فصلی بارش است و تا حدودی منطبق با آن است (فصل پاییز با میانگین ۲۲۰ روز و بهار با میانگین ۸۰ روز). به‌طور کلی دوره بازگشت تداوم‌های بلندمدت (بیشتر از ۲۰ روز) در فصول گرم سال و مناطق کم‌بارش برگشت پذیری کوتاه و در فصل سرد و مناطق مرطوب‌تر شمالی دوره بازگشت طولانی‌تری دارند.

جدول ۲. دوره بازگشت تداوم‌های فصلی در گستره‌ی ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۸)

فصل ←	تابستان			پاییز			زمستان			بهار		
	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
دوره برگشت ←	۱۶	۲۲	۳۱	۳۲۱	۲۶۲	۱۲۷	۲۷۶	۱۹۶	۱۴۹	۶۹	۱۳۹	۷۵

• تحلیل فازی - عددی وزن فصلی دوره‌ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، شناخت شاخص‌های رفتاری دوره‌های خشک مانند؛ برگشت‌پذیری، احتمال رخداد و انتقال دوره‌های خشک بلندمدت، به‌تنهایی نمی‌تواند تفسیر درستی از مکانیسم رفتاری دوره‌ها داشته باشد. بنابراین وزن‌دهی این شاخص‌ها در فصول مختلف سال برطرف‌کننده این نقص خواهد بود. نتایج، روش سوارا در محیط فازی نشان داد که فصول زمستان و بهار در مناطق غربی و شمالی که درصد احتمال رخداد و همچنین برگشت‌پذیری دوره‌های خشک در آن‌ها بیشتر است تبیین‌کننده وزن بیشتری هستند. به عبارتی این دو فصل بیش از ۶۵ درصد وزن دوره‌های خشک در این مناطق را تبیین می‌کنند (جدول ۳). از طرفی در مناطق جنوبی و بخش‌هایی از مرکز (اصفهان، شرق فارس و غرب کرمان)، فصل زمستان و پاییز بیش از ۷۱ درصد وزن دوره‌ها را تبیین می‌کنند.

در بین معیارهای تبیین‌کننده وزن دوره‌ها نیز معیار برگشت‌پذیری و احتمال رخداد بیش از ۵۵ درصد وزن را به خود اختصاص داده است. این وضعیت نشان‌دهنده این موضوع است که رفتار دوره‌های خشک بلندمدت بیشتر تابعی از دو معیار برگشت‌پذیری و احتمال رخداد آن‌هاست (جدول ۴). اگرچه وزن معیارهایی مانند احتمال رخداد در فصول گرم سال وزن بیشتری دارند اما این وضعیت فقط در مناطق خشک و نیمه‌خشک صدق می‌کند. معیاری مانند چرخش یا حالت انتقال دوره‌ها نیز در فصول زمستان و پاییز بیشترین وزن را در بین معیارها دارند. به نظر می‌رسد تغییرپذیری رفتار بارش به‌عنوان یک متغیر سرکش در دوره سرد سال علت اساسی این چرخش‌ها باشد. به‌طور کلی وزن‌دهی آماری بیانگر این موضوع است که برای شناخت بهتر رفتار دوره‌های خشک بایستی رخدادهای فصلی دوره‌ها مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

جدول ۳. وزن فصلی دوره‌ها به تفکیک معیارهای اثرگذار (مجموع وزن هر معیار در تمام فصول برابر با ۱۰۰ خواهد بود)

فصل	معیار	وزن	فصل	معیار	وزن
زمستان	برگشت‌پذیری	۳۲.۴	پاییز	برگشت‌پذیری	۲۶.۴
	تداوم	۱۵.۶		تداوم	۲۵
	احتمال رخداد	۱۵.۵		احتمال رخداد	۲۱.۹
	حالت‌های انتقال	۳۶.۵		حالت‌های انتقال	۲۶.۷

۱۶.۲	برگشت‌پذیری	تابستان	۲۴.۳	برگشت‌پذیری	بهار
۳۳.۲	تداوم		۲۴.۷	تداوم	
۳۳.۶	احتمال رخداد		۲۶.۴	احتمال رخداد	
۱۶	حالت‌های انتقال		۲۴.۶	حالت‌های انتقال	

جدول ۴. وزن نهایی دوره‌ها به تفکیک معیارهای اثرگذار (روش اجرا: فازی)

معیار	رتبه معیارها بر پایه ارزش (Kj)	وزن غیر فازی معیارها (%-WJ)	وزن فازی <i>Wcrisp</i>	فراوانی ماتریس گویه - معیار
برگشت‌پذیری	۱	۳۵.۲	۳۴.۶	۶۲۱*۱
تداوم	۳	۲۰.۳	۲۱.۵	۴۶۵*۱
احتمال رخداد	۲	۲۵.۶۴	۲۷.۹	۵۳۰*۱
حالت‌های انتقال	۴	۱۸.۸۶	۱۶	۲۸۶*۱

نتیجه‌گیری

مکانیسم رفتارشناسی طول دوره‌های خشک وابسته به بارش در مکان‌های مختلف کمک شایانی به وضعیت اقلیمی این مکان‌ها خواهد کرد. توجه به این اصل که بارش و رژیم وابسته به آن در ایران به‌عنوان یک متغیر سرکش (آشوبمند) مطرح است، بنابراین دوره‌های خشک و معیارهای وابسته به آن نیز به‌شدت در حال تغییر است. نتایج نشان داد که طول دوره‌های خشک بلند مدت مخصوصاً در مناطق خشک مرکزی و شرقی تابعی از رژیم فصلی بارش و نوسانات رفتاری آن است. مناطق شمالی و مرطوب کشور، معیارهای از دوره‌ها مانند؛ برگشت‌پذیری، تداوم و احتمال رخداد نمود بیشتری دارد و این امر حاکی از این امر است که مرز مناطق خشک در آینده اقلیم ایران به سمت مناطق شمالی جابه‌جا می‌شود. پژوهشی که پیش‌تر توسط نگارنده انجام و به چاپ رسیده است بیانگر تأیید این موضوع است (هاشمی‌عنا، ۱۴۰۰). وزن‌دهی معیارهای اثرگذار بر دوره‌های خشک نشان داد که دوره‌برگشت و تداوم دوره‌ها در دوره سرد سال در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب رفتار نامنظم‌تری دارد و از وزن بیشتری در تبیین دوره‌ها برخوردار است. به‌طور کلی با شناخت رفتار طول دوره‌های خشک در مقیاس فصلی می‌توان در تخصیص و مدیریت بهینه منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق اقلیمی مختلف برنامه‌های خوبی برای سازگاری با خشکی و خشکسالی در این مناطق داشته باشیم.

منابع

- انصاری، حسین و کامران داوری. ۱۳۸۶. پهنه‌بندی دوره خشک با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده در محیط GIS مطالعه موردی: استان خراسان، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۹ (۸): ۱۲-۲۱.
- ذوالفقاری، حسن و حسن میرزایی. ۱۳۹۷. تحلیل فضایی و پهنه‌بندی دوره‌های خشک اقلیمی در ایران بر اساس شاخص DDSLR. مخاطرات محیط طبیعی، ۶ (۱۲): ۱-۱۸.
- صادقی نیا، علیرضا. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه دوره‌های تر و خشک در بخش‌های مختلف اقلیمی ایران. جغرافیای طبیعی لار، ۵ (۱۸): ۸۱-۹۱.
- محمودی، پیمان؛ نادر پروین و رضا جباری. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی ایران بر اساس طول دوره‌های خشک، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۴ (۱۳): ۸۵-۱۰۶.
- مسعودیان، سید ابوالفضل. ۱۳۹۰. آب‌وهوای ایران، انتشارات شریعه توس، چاپ اول.
- مفیدی، عباس؛ آذر زرین و میثم کارخانه. ۱۳۹۳. بررسی الگوی گردش جو در طول دوره‌های خشک و مرطوب در سواحل جنوبی دریای خزر، مجله ژئوفیزیک ایران، ۸ (۱): ۱۷۶-۱۴۰.
- هاشمی‌عنا، سید کرامت. ۱۴۰۰. طبقه‌بندی تغییرات طول دوره‌های خشک وابسته به بارش در ایران. مجله جغرافیای طبیعی لار، ۱۴ (۵۳): ۵۵-۳۹.
- هاشمی‌عنا، سید کرامت. ۱۳۹۷. دورنمای اقلیم ایران با تأکید بر دوره‌های خشک. چاپ اول، انتشارات مینو فر، مشهد.
- هاشمی‌عنا، سید کرامت. ۱۴۰۱. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در استان کهگیلویه و بویراحمد. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۳۵): ۳۵-۳۹.
- Adane, G. B., Hirpa, B. A., Lim, C. H., & Lee, W. K. ۲۰۲۰. Spatial and temporal analysis of dry and wet spells in upper Awash River Basin, Ethiopia. *Water*, ۱۲(۱۱): ۳۰۵۱.
- Ansari, A. H, and Sanaei-Nejad, S. H. ۲۰۱۸. Analyzing drought history using Fuzzy Integrated Drought Index (FIDI): a case study in the Neyshabour basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, ۱۱(۱۴): ۱-۱۰.
- Breinf K and Van Loon A F. ۲۰۱۸. Water shortages worsened by reservoir effects, *Nat. Sustain.* ۱:۲۲.
- Douguedroit, A. ۲۰۱۸. The variations of dry spells frequency and validaty in daily Rain', *J. Climatol.*, ۷: ۵۴۱-۵۵۵.
- Escalante-Sandoval, C., and Nunez-Garcia, P. ۲۰۱۷. Meteorological drought features in northern. and northwestern parts of Mexico under different climate change scenarios. *Journal of Arid Land*, ۶۵-۷۵(۱).
- Escalante-Sandoval, C., and Nunez-Garcia, P. ۲۰۱۷. Meteorological drought features in northern and northwestern parts of Mexico under different climate change scenarios. *Journal of Arid Land*, ۹(۱): ۶۵-۷۵.
- Feng, T., Tipton, Z., Xia, L., and Chang, Y. ۲۰۲۰. Evaluation of CORDEX regional climate models in simulating extreme dry spells in Southwest China. *Frontiers in Earth Science*, ۲: ۲۹۴.
- Grace RA, Eagleson PS. ۱۹۸۸. The synthesis of shorttime-increment precipitation sequences, Hydrodynamics Laboratory, *Massachusetts of Cambridge, USA*, ۹۱: Report, ۵۶.
- Kendon, E. J., Stratton, R. A., Tucker, S., Marsham, J. H., Berthou, S., Rowell, D. P., and Senior, C. A. ۲۰۱۹. Enhanced future changes in wet and dry extremes over Africa at convection-permitting scale. *Nature communications*, ۱۰(۱): ۱-۱۴.
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., and Turskis, Z. ۲۰۱۰. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management*, ۱۱(۲), ۲۴۳-۲۵۸.
- Ratan R and Venugopal. ۲۰۱۳. Wet and dry spell characteristics of global tropical rainfall *Water Resour. Res.* ۴۹ (۲): ۳۰-۴۰.
- Sánchez, E., Domínguez, M., Romera, R., de la Franca, N. L., Gaertner, M. A., Gallardo, C., & Castro, M. ۲۰۱۱. Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions. *Climatic change*, ۱۰۷(۳): ۶۲۵-۶۳۴.

- Sanchi, I. D. ۲۰۲۱. Critical Review of the Causes and Effects of Dry Spell in Rainy Season in Danko Wasagu Local Government, Kebbi State, Nigeria. *Cross Current Int J Agri Vet Sci*, ۳(۸): ۶۶-۷۵.
- Selvaraj RS, Selvis T . ۲۰۱۰. Stochastic modelling of daily precipitation at Aduthurai in india. *International journal of climatology*, ۱۱(۳): ۲۰-۲۹.
- Thoithi, W., Blamey, R. C., and Reason, C. J. ۲۰۲۱. Dry spells, wet days, and their trends across Southern Africa during the summer rainy season. *Geophysical Research Letters*, ۴۸(۵): ۲۰-۳۴.
- Tichavský, R., Ballesteros-Cánovas, J. A., Šilhán, K., Tolasz, R., and Stoffel, M. ۲۰۱۹. Dry Spells and extreme precipitation are the Main trigger of Landslides in central Europe. *Scientific reports*, ۹(۱): ۱۰.
- Wilks D S. ۲۰۱۸. “The stippling shows statistically significant grid points” how research results are routinely overstated and over interpreted, and what to do about it *Bull. Am. Meteorol. Soc.* ۹۷:۲۲
- Yihdego, Y., Vaheddoost, B., & Al-Weshah, R. A. ۲۰۱۹. Drought indices and indicators revisited. *Arabian Journal of Geosciences*, ۱۲: ۶۹.
- Zhang, C., Ren, Y., Cao, L., Wu, J., Zhang, S., Hu, C., and Zhujie, S. ۲۰۲۲. Characteristics of dry-wet climate change in China during the past ۶۰ years and its trends projection. *Atmosphere*, ۱۳(۲): ۲۷۵.