

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Analysis of Drought Dynamics Using the SPEI Index and the Markov Chain Model (Case Study: Mashhad Synoptic Weather Station)

تحلیل پویایی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI و مدل زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی همدید مشهد)

H. Jahangiri^{1*}, M. Jabbari Nooghabi², N. Seyednejad Gol Khatmi³

حسین جهانگیری^۱، مهدی جباری نوقایی^۲، نفیسه سیدنژاد گل خطمی^۳

1- M.Sc. Student in Water Science and Engineering, Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب - گرایش منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

2- Associate Professor, Department of Statistics, Faculty of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

۲- دانشیار، گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

3- Ph.D. Graduate in Water Science and Engineering, Agricultural Meteorology, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

۳- دانش آموخته دکتری رشته علوم و مهندسی آب، گرایش هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* Corresponding, Author Email: hosein.jahangiri@mail.um.ac.ir

* رایانامه نویسنده مسئول: hosein.jahangiri@mail.um.ac.ir

Received 26-09-2025

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

Revised 29-10-2025

تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

Accepted 20-11-2025

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۸/۲۹

Available online 16-03-2026

تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

Abstract

چکیده

Drought, as a natural and creeping phenomenon, is considered one of the most important climate challenges in arid and semi-arid regions, including Iran. Given the context of climate change and the increased severity of drought events, a dynamical analysis is crucial for effective water resource management. This study aimed to investigate the probabilistic behavior and drought dynamics within the Mashhad Plain. To achieve this, the Markov Chain model was applied to a 127-year time series of precipitation and mean temperature data. The core innovation lies in employing the Twelve-Fold Hydrologic Time Series method. By analyzing the data across twelve annual time scales, this approach facilitated a more comprehensive and precise characterization of drought features, effectively revealing long-duration events often masked in conventional annual analyses. The results derived from the transition probability matrix indicated that extreme climatic states (severe drought and extreme wet periods) exhibit significant persistence, whereas intermediate states (moderate drought and moderate wet periods) are inherently more transient. Furthermore, the calculation of the steady-state distribution provided a clear perspective on the long-term behavior of the climatic system. The findings reveal that, in the long run, the combined probability of residing in drought states (severe and moderate), totaling 42%, is higher than the probability of residing in wet states (38%). These results yield invaluable insights for strategic, long-term planning in water resource management and facilitate effective adaptation strategies against future climatic conditions in arid and semi-arid regions.

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی و خزنده، یکی از مهم‌ترین چالش‌های اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، محسوب می‌شود. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش شدت خشکسالی‌ها، تحلیل پویایی‌های آن برای مدیریت مؤثر منابع آب امری ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی رفتار احتمالاتی و پویایی خشکسالی در دشت مشهد، از مدل زنجیره مارکوف بر روی یک سری زمانی ۱۲۷ ساله از داده‌های بارش و دمای میانگین استفاده کرده است. نوآوری اصلی این مطالعه در به‌کارگیری روش سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه است که با تحلیل داده‌ها بر اساس دوازده سری زمانی با مقیاس سالانه به درک جامع‌تر و دقیق‌تری از ویژگی‌های خشکسالی دست یافت و رویدادهای طولانی‌مدتی را که ممکن بود در تحلیل مرسوم سالانه پنهان بمانند، آشکار ساخت. نتایج تحلیل ماتریس احتمال انتقال نشان داد که وضعیت‌های اقلیمی شدید (خشکسالی و ترسالی شدید) پایداری قابل‌توجهی دارند، در حالی که وضعیت‌های میانی (خشکسالی و ترسالی متوسط) بیشتر گذرا هستند. همچنین، محاسبه توزیع مانای وضعیت‌های اقلیمی، تصویر روشنی از رفتار بلندمدت سیستم اقلیمی ارائه داد. یافته‌ها حاکی از آن است که در درازمدت، احتمال حضور در وضعیت‌های خشکسالی شدید و متوسط، با مجموع ۴۲ درصد، از احتمال حضور در وضعیت‌های ترسالی (۳۸ درصد) بیشتر است. این نتایج بینش‌های ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استراتژیک در مدیریت منابع آب و سازگاری با شرایط اقلیمی آینده در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، توزیع مانا، ماتریس احتمال انتقال، شاخص SPEI، زنجیره مارکوف.

Keywords: Drought, Stationary Distribution, Transition Probability Matrix, SPEI Index, Markov Chain.

How to cite this article:

Jahangiri, H., Jabbari Nooghabi, M., & Seyednejad Gol Khatmi, N. (2026). Analysis of Drought Dynamics Using the SPEI Index and the Markov Chain Model (Case Study: Mashhad Synoptic Weather Station). Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 177-189. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2509-1459>

خشکسالی هواشناسی پدیده‌ای طبیعی، موقتی و بازگشت‌پذیر است که در تمامی اقلیم‌ها رخ می‌دهد و به کاهش چشمگیر دسترسی به منابع آب منجر می‌شود. این پدیده که با کمبود بارش و افزایش دما آغاز می‌شود، برخلاف سایر بلایای طبیعی، ماهیتی خزنده و طولانی‌مدت دارد و می‌تواند از چند هفته تا چندین سال ادامه یابد. پیامدهای گسترده اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی خشکسالی، شامل آسیب به کشاورزی، قحطی و مهاجرت اهمیت بررسی علمی و مدیریت مؤثر آن را برجسته می‌سازد. ایران نیز به عنوان کشوری در منطقه خشک و نیمه‌خشک، همواره با چالش خشکسالی‌های مکرر و شدید مواجه بوده است.

نوسانات اقلیمی و تغییرات آب‌وهوایی جهانی، تشکیل جزیره حرارتی در کلانشهرها، تغییر کاربری اراضی، به ویژه افزایش دمای ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، به طور فزاینده‌ای به تشدید خشکسالی‌ها از نظر سرعت، شدت و تداوم دامن زده است (Trenberth و همکاران، ۲۰۱۴؛ Wood و Sheffield، ۲۰۰۸). شواهد حاکی از آن است که این روند جهانی به سمت وقوع خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر سوق پیدا می‌کند (Yan-Jun و همکاران، ۲۰۱۲؛ Spinoni و همکاران، ۲۰۱۷). در ایران نیز، قربانی و همکاران (۱۳۹۷) با تحلیل روند تغییرات شدت خشکسالی هواشناسی به وضوح مشاهده کردند که تغییرات اقلیمی باعث شده تا کشور در سال‌های اخیر به سمت دوره‌های خشک‌تر متمایل شود. این روند صعودی در فراوانی و شدت خشکسالی‌ها، اهمیت بررسی و تحلیل پویایی‌های زمانی خشکسالی‌ها را دو چندان می‌کند.

مطالعات متعددی در ایران و در کشورهای دیگر به ارزیابی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی پرداخته‌اند تا کارایی آن‌ها را در اقلیم‌های مختلف بررسی کنند. این مطالعات نشان داده است که برای تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر خشکسالی، نیاز است که شاخص‌هایی به کار گرفته شوند که تبخیر و تعرق را نیز در نظر بگیرند، زیرا دما تأثیر قابل‌توجهی بر تبخیر و تعرق دارد (مصطفی‌زاده و ذبیحی، ۱۳۹۵؛ بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به اهمیت تأثیر دما بر میزان تبخیر و تعرق، در این مقاله از شاخص SPEI به منظور کمی‌سازی پدیده خشکسالی استفاده شده است.

مدل‌های زنجیره مارکوف در میان روش‌های آماری و احتمالاتی، به دلیل توانایی در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی بین وضعیت‌های مختلف پدیده‌ها، به‌ویژه در تحلیل خشکسالی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای مثال، Azimi و همکاران (۲۰۲۰) از یک مدل زنجیره مارکوف وضعیت پایدار برای پیش‌بینی احتمال بلندمدت خشکسالی در ایران استفاده کردند و به درون‌یابی فضایی احتمالات وضعیت پایدار خشکسالی پرداختند. همچنین، Zarei (۲۰۱۸) و مقیمی و همکاران

(۱۳۹۷) نیز با بهره‌گیری از زنجیره مارکوف، به ترتیب در مناطق جنوب و استان فارس ایران، وقایع خشکسالی را پایش و پیش‌بینی نموده و نتایج مثبتی در تخمین فراوانی طبقات خشکسالی به دست آوردند. Alam و همکاران (۲۰۱۷) و سلاجقه و همکاران (۱۳۸۸) نیز از زنجیره مارکوف برای پایش خشکسالی در هند و ایران استفاده کرده و احتمال انتقال بین وضعیت‌های خشکسالی و مرطوب را بررسی کردند. علاوه بر این، Avilés و همکاران (۲۰۱۶) به مقایسه زنجیره مارکوف با شبکه‌های بیزین برای پیش‌بینی خشکسالی‌های ماهانه پرداختند و نشان دادند که مدل‌های زنجیره مارکوف در پیش‌بینی دوره‌های مرطوب و خشک عملکرد بهتری دارند. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای با تمرکز بر تحلیل پویایی گذار از وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در شهر مشهد که نماینده مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است، صورت نگرفته است. مزیت اصلی این رویکرد، در قابلیت آن برای استخراج آماره‌های مهم مدیریت ریسک مانند احتمالات شرطی رخداد و متوسط دوره‌های بازگشت خشکسالی‌های با شدت‌های مختلف است که ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی منابع آب فراهم می‌آورد. به منظور محاسبه ماتریس احتمال انتقال، از یک روش نوآورانه در این پژوهش استفاده شده است که مبتنی بر سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه است. منظور از این رویکرد، بررسی داده‌ها بر اساس دوازده سری زمانی سالانه متفاوت است که هر کدام از یکی از ماه‌های فروردین تا اسفند آغاز می‌شود و تأثیر ماه شروع سال بر خصوصیات خشکسالی را به صورت جامع ارزیابی می‌کند.

هدف اصلی این مقاله، تحلیل پویایی خشکسالی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و ماتریس احتمال انتقال است. در نهایت، با محاسبه توزیع مانای وضعیت‌های مختلف آب‌وهوایی شامل ترسالی، نرمال و خشکسالی، احتمال رخداد هر وضعیت در درازمدت برای منطقه خشک و نیمه‌خشک مشهد مشخص شده است.

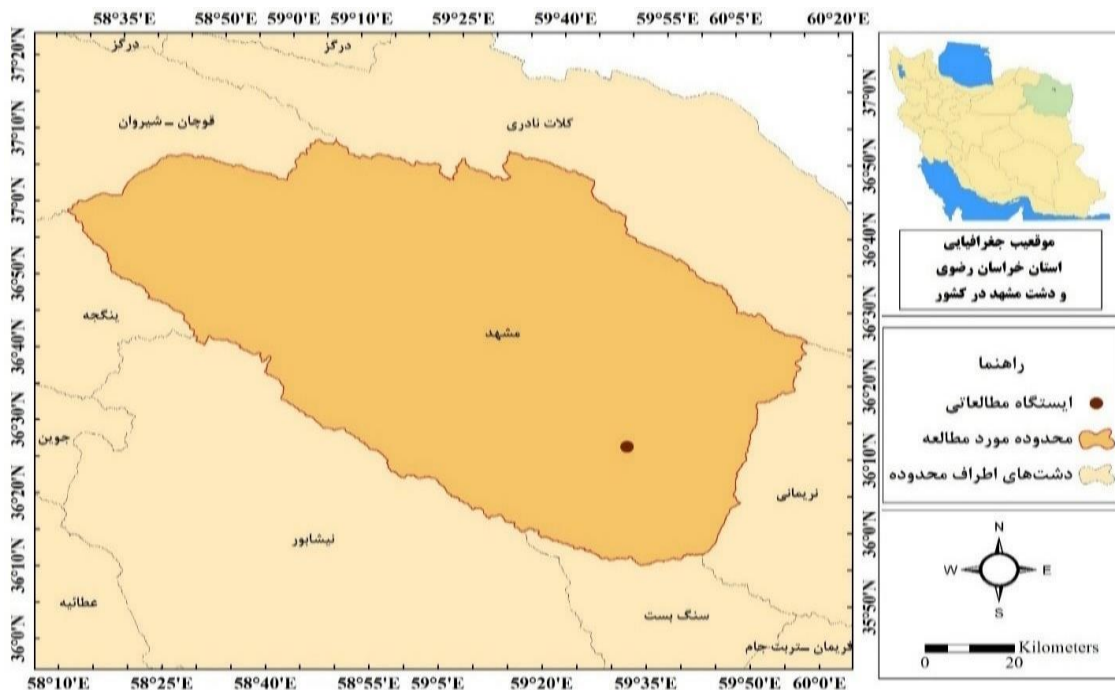
مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و داده‌های مورد مطالعه

پژوهش حاضر براساس داده‌های ایستگاه همدید شهر مشهد، واقع در شمال شرق ایران، انجام شده است. این شهر به دلیل قرارگیری در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک، همواره با پدیده خشکسالی‌های متناوب روبرو است. دشت مشهد با مساحت تقریبی ۳۴۴۸ کیلومترمربع، دارای میانگین دمای سالانه ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه ۲۴۷/۵ میلی‌متر است (فرزندی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرزندی و رضائی‌پزند، ۱۴۰۰). موقعیت مکانی ایستگاه در استان خراسان رضوی و ایران در شکل (۱) نمایش داده شده است. داده‌های به‌کاررفته در این پژوهش شامل ۱۲۷ سال اطلاعات (۱۴۰۰-

۱۲۷۳ شمسی) دمای میانگین و بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی همدید مشهد (کد ۴۰۷۴۵) است. این ایستگاه در شرق مشهد، مجاور فرودگاه شهید هاشمی نژاد، در موقعیت جغرافیایی ۵۹ درجه ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی، با ارتفاع ۹۹۹ متر از سطح دریا قرار دارد. ایستگاه سینوپتیک مشهد در سال ۱۹۵۱ افتتاح شده است و قبل از آن سفارت امریکا واقع در مشهد از سال ۱۸۹۰ میلادی

(۱۲۶۸ هجری شمسی، دوره سلطنت ناصرالدین شاه) آمار دما و بارش ماهانه مشهد را اندازه‌گیری کرده است. این اطلاعات و چند شهر دیگر در کتب World Weather Record ثبت شده است. [فرزندی و همکاران](#) (۱۳۹۸) و [فرزندی و رضایی‌پژند](#) (۱۴۰۰) این اطلاعات را جمع‌آوری و بازسازی نمودند. با توجه به همگنی دو سری داده می‌توان آن‌ها را به عنوان یک سری زمانی تحلیل نمود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه مورد مطالعه

روش‌ها

این پژوهش با هدف تحلیل پویایی خشکسالی‌ها و محاسبه توزیع پایدار خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت شامل مراحل: آزمون‌های آماری پایه، شاخص خشکسالی بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده، خصوصیات خشکسالی براساس تئوری گشت، زنجیره مارکف (محاسبه ماتریس احتمال انتقال) و در نهایت محاسبه توزیع پایدار خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت است که شرح مختصر هر بخش در ادامه آورده شده است.

آزمون‌های پایه آماری

پیش از تحلیل‌های آماری بر روی داده‌ها به عنوان متغیر تصادفی، اطمینان از صحت، کفایت و مرتبط بودن داده‌ها ضروری است. متغیر تصادفی از نظر آماری باید ویژگی‌های اصلی شامل تصادفی بودن، استقلال، همگنی و ایستایی را داشته باشند تا بتوان توابع چگالی را بر آن‌ها برازش داد. پژوهش حاضر به منظور بررسی همگنی داده‌ها از آزمون من-وینتی (یا ویلکاکسون)، تصادفی بودن داده‌ها از آزمون گشت‌ها (یا آزمون تغییرات حول میانگین)، استقلال داده‌ها از آزمون

والد-ولفویتز و بررسی روند داده‌ها از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده می‌کند ([فرزندی و همکاران](#)، ۱۳۹۸؛ [فرزندی و رضایی‌پژند](#)، ۱۴۰۰؛ [Wald و Wolfowitz](#)، ۱۹۴۰؛ [Mondal و همکاران](#)، ۲۰۱۲؛ [Vivekanandan](#)، ۲۰۲۴).

شاخص خشکسالی بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص‌های متعددی برای ارزیابی پدیده خشکسالی توسعه یافته‌اند. انتخاب شاخص مناسب به نوع خشکسالی، ویژگی‌های منطقه‌ای و داده‌های در دسترس بستگی دارد. شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) به دلیل جامعیت و در نظر گرفتن هم‌زمان بارش و تبخیر و تعرق، برای پایش خشکسالی در این پژوهش، استفاده شد. شاخص SPEI، یک شاخص چندمتغیره است که داده‌های بارش و دما را ترکیب می‌کند. به دلیل عدم دسترسی به تمامی داده‌های لازم (مانند ساعات آفتابی، تابش و رطوبت نسبی) برای روش‌های دقیق‌تر (مانند فائو-پنمن-مانتیت) در دوره آماری مورد بررسی (۱۲۷۳-۱۴۰۰ هجری شمسی)، معادله تجربی تورنت‌وایت برای برآورد PET انتخاب شد. تحقیقات نشان داده که تفاوت معناداری بین روش‌های ساده و پیچیده برای

برآورد PET وجود ندارد (Vicente-Serrano و همکاران، ۲۰۱۰).

خصوصیات خشکسالی براساس تئوری گشت

تئوری گشت یک روش آماری برای شناسایی و توصیف دوره‌های پیوسته از مقادیر پایین‌تر یا بالاتر از یک آستانه خاص در سری‌های زمانی است. یک دوره خشکسالی (گشت منفی) زمانی آغاز می‌شود که مقدار شاخص SPEI از حد آستانه (معمولاً صفر یا یک مقدار منفی مشخص) پایین‌تر رود و تا زمانی که به بالای این حد بازگردد، ادامه می‌یابد. ویژگی‌های کلیدی خشکسالی بر اساس این تئوری شامل: مدت خشکسالی (DL)^۲، شدت خشکسالی (DS)^۳، بزرگی خشکسالی (DM)^۴ و فراوانی خشکسالی (DN)^۵ بررسی شده‌اند (Wang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Ansori و همکاران، ۲۰۲۴).

روش زنجیره مارکوف (MC)

زنجیره مارکوف، یک مفهوم بنیادین با کاربردهای وسیع در علوم مختلف می‌باشد. زنجیره مارکوف که توسط آندری مارکوف (۱۹۰۶) معرفی شد، مدلی ریاضی برای توصیف دنباله‌ای از رویدادها است؛ زنجیره مارکوف یک فرایند تصادفی بدون حافظه است، بدین معنی که توزیع احتمال شرطی وضعیت بعد تنها به وضعیت فعلی بستگی دارد و مستقل از گذشته آن است. این خاصیت به این معناست که احتمال وقوع وضعیت اقلیمی بعدی (مانند گذار به وضعیت خشکسالی شدید) تنها به وضعیت کنونی سیستم (مثلاً خشکسالی متوسط سال قبل) وابسته است و کاملاً مستقل از تاریخچه گذشته می‌باشد. به عنوان مثال، در مدل مارکوف مرتبه یک (Order 1) که در این پژوهش استفاده شده، احتمال اینکه امسال وضعیت "نرمال" به "خشکسالی متوسط" منتقل شود، صرفاً به وضعیت سال قبل بستگی دارد. اگر میزان حافظه زنجیره مارکوف به m مرحله یا زمان قبل محدود شود، به آن زنجیره مارکوف با مرتبه m گفته می‌شود. در این حالت، احتمال وقوع وضعیت بعدی (مانند ورود به خشکسالی) وابسته به m وضعیت اخیر خواهد بود.

مدل‌های زنجیره مارکوف در میان روش‌های آماری و احتمالاتی، به دلیل توانایی در مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی بین وضعیت‌های مختلف پدیده‌ها، به‌ویژه در تحلیل خشکسالی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مدل با بررسی احتمالات گذار از یک وضعیت اقلیمی (مانند خشکسالی) به وضعیت دیگر، پویایی‌های سیستم را در طول زمان تحلیل می‌کند. نتیجه این تحلیل، ماتریس احتمال انتقال است که ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی رفتارهای آینده و بررسی احتمال وقوع شرایط خاص در درازمدت به شمار می‌آید (Peres و Levin، ۲۰۱۷).

ماتریس احتمال انتقال

زنجیره مارکوف مرتبه یک ابزاری برای تحلیل رفتارهای احتمالی فرایندهای تصادفی است که در آن، احتمال وقوع هر رویداد در وضعیت بعد تنها به وضعیت فعلی سیستم وابسته است (خاصیت مارکوف) (Grimmett و Stirzaker، ۲۰۲۰). ماتریس احتمال انتقال^۶ ابزار اصلی در بررسی زنجیره‌های مارکوف است که نحوه تغییر وضعیت یک سیستم از یک حالت به حالت دیگر را در طول زمان نشان می‌دهد (Norris، ۱۹۹۸). هر عنصر (i,j) در این ماتریس، نشان‌دهنده احتمال شرطی حرکت سیستم از حالت i به حالت j در یک گام زمانی معین است، یعنی $P(X_{t+1} = j | X_t = i)$. ویژگی‌های اصلی ماتریس احتمال انتقال در منابع ذکر شده آمده است (Levin و Peres، ۲۰۱۷).

مطالعه حاضر، از ماتریس احتمال انتقال یک مرحله‌ای زنجیره مارکوف برای تحلیل وضعیت رطوبتی استفاده می‌کند. این ماتریس اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار سیستم در طول زمان ارائه می‌دهد. تعداد سطرها و ستون‌های ماتریس در این پژوهش پنج عدد است که متناسب با پنج کلاس وضعیت رطوبتی طبقه‌بندی شده‌اند. برای اطمینان از عدم صفر بودن درایه‌های ماتریس احتمال انتقال و به دلیل محدودیت داده‌های آماری، طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPEI به ۵ دسته هم‌احتمال (جدول ۱) صورت گرفت، تا احتمال انتقال از هر حالت به حالت دیگر وجود داشته باشد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی براساس شاخص SPEI به کاررفته در این پژوهش

طبقه‌بندی	علامت اختصاری	مقادیر SPEI
ترسالی شدید	VW^1	۰/۸۶ یا بیشتر
ترسالی متوسط	MW^2	۰/۲۶ تا ۰/۸۶
نرمال	N^3	۰/۲۶ تا -۰/۲۶
خشکسالی متوسط	MD^{11}	-۰/۲۶ تا -۰/۸۶
خشکسالی شدید	SD^{12}	-۰/۸۶ یا کمتر

احتمال ماندگاری سیستم در همان وضعیت در گام زمانی بعدی، به عنوان شاخصی از پایداری آن وضعیت بررسی شده‌اند. در مقابل، عناصر خارج از قطر اصلی (p_{ij}) ، احتمال

تحلیل ماتریس احتمال انتقال برای درک رفتار و پایداری وضعیت‌های مختلف خشکسالی، ترسالی و نرمال در طول زمان انجام شد. عناصر قطر اصلی (p_{ii}) ، در این تحلیل، بیانگر

تغییر وضعیت از i به j را نشان می‌دهد که به کشف الگوهای غالب انتقال کمک می‌کند. علاوه بر این، بررسی هر سطر از ماتریس، توزیع احتمالی وضعیت‌های بعدی را از یک وضعیت معین مشخص می‌کند.

ماتریس احتمال انتقال، علاوه بر نمایش احتمالات شرطی انتقال بین وضعیت‌های اقلیمی، اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار بلندمدت سیستم را فراهم می‌کند. یکی از این اطلاعات، مفهوم توزیع مانا یا پایدار است. بر اساس نظریه زنجیره مارکوف، در صورتی که ماتریس احتمال انتقال دارای ویژگی‌های ارگودیک باشد، با توان‌رساندن آن به سمت بی‌نهایت، به یک بردار احتمال ثابت همگرا می‌شود. این بردار، توزیع مانا نامیده می‌شود و نشان‌دهنده احتمال بلندمدت حضور سیستم در هر یک از وضعیت‌های مختلف، مستقل از وضعیت اولیه آن است (Levin و Peres, ۲۰۱۷).

به منظور محاسبه ماتریس احتمال انتقال، سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه که هر سری با ماه متفاوتی (فروردین تا اسفند) شروع می‌شد در نظر گرفته شد و شاخص خشکسالی SPEI سالانه برای هر ۱۲ سری محاسبه و فراوانی انتقالات در تمام این ۱۲ سری در نظر گرفته شد. تمام این انتقالات در ماتریس فراوانی انتقالات نهایی تجمیع و سپس ماتریس احتمال انتقال نهایی محاسبه شد. هدف از این تجمیع، در نظر گرفتن این واقعیت است که شروع سال یک امر قراردادی است و پدیده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی

لزوماً با یک تاریخ ثابت در تقویم هماهنگ نیستند. هر یک از ۱۲ سری، به عنوان یک سناریوی محتمل از نحوه وقوع انتقالات در سیستم اقلیمی در نظر گرفته شد. با تجمیع فراوانی انتقالات در تمام ۱۲ سری زمانی، ماتریس فراوانی انتقال نهایی، شمارش کلی دفعات انتقال از هر وضعیت پایه به سایر وضعیت‌ها را در طول دوره آماری و با در نظر گرفتن تمام تعاریف ممکن برای سال هیدرولوژیک، ارائه می‌دهد. این ماتریس تجمیع‌شده، مبنایی قوی‌تر و جامع‌تر برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال نهایی فراهم می‌کند، زیرا تمام الگوهای انتقالی که با در نظر گرفتن ماه شروع سال‌های مختلف آشکار شده بود را در بر می‌گیرد.

این رویکرد ابتکاری، با در نظر گرفتن تعاریف متفاوت سال هیدرولوژیک با شروع از ماه‌های مختلف و پوشش کامل تغییرات احتمالی در الگوهای خشکسالی سالانه، امکان بررسی انتقالات بین وضعیت‌های مختلف خشکسالی (شامل خشکسالی شدید، متوسط، نرمال، ترسالی متوسط و شدید) را در طول سال‌های متوالی فراهم آورد. این رویکرد اطمینان حاصل کرد که رویدادهای شدید و بلندمدت خشکسالی که ممکن بود در یک تعریف خاص از سری زمانی هیدرولوژیک بهتر نمایان شوند، در تحلیل‌ها لحاظ گردند. توضیحات تکمیلی راجع به این سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه

عنوان سری زمانی	ماه شروع سال	ماه خاتمه سال
سری زمانی فروردین	فروردین	اسفند
سری زمانی اردیبهشت	اردیبهشت	فروردین
سری زمانی خرداد	خرداد	اردیبهشت
سری زمانی تیر	تیر	خرداد
سری زمانی مرداد	مرداد	تیر
سری زمانی شهریور	شهریور	مرداد
سری زمانی مهر	مهر	شهریور
سری زمانی آبان	آبان	مهر
سری زمانی آذر	آذر	آبان
سری زمانی دی	دی	آذر
سری زمانی بهمن	بهمن	دی
سری زمانی اسفند	اسفند	بهمن

فرزندگی و رضایی‌پژند (۱۴۰۰) جمع آوری و به صورت ماهانه و با روش‌های صحیح آماری و ریاضی بازسازی شده است. طول دوره ۱۲۷ ساله این مجموعه داده، برای تحلیل بلندمدت خشکسالی کفایت لازم را دارد؛ زیرا داده‌ها با طول دوره آماری بلندتر امکان شناسایی الگوهای اقلیمی با دوره تناوب طولانی و برآورد دقیق‌تر پارامترهای توزیع‌های آماری را فراهم می‌آورد (فرزندگی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرزندگی و رضایی‌پژند، ۱۴۰۰).

نتایج و بحث

پژوهش حاضر از سری زمانی ۱۲۷ ساله (۱۴۰۰-۱۲۷۳ شمسی)^{۱۳} بارش و دمای میانگین ماهانه ایستگاه همدید مشهد استفاده کرده است. این سری دارای داده‌های گمشده عمدتاً در طول جنگ جهانی دوم (۱۹۴۱-۱۹۴۹) و به‌طور پراکنده در طول دوره آماری است. این داده‌ها توسط **فرزندگی و همکاران** (۱۳۹۸) و

نتایج آزمون‌های پایه آماری

آزمون‌های پایه آماری به منظور بررسی همگنی، تصادفی بودن، استقلال و ایستایی (روند) داده‌ها در این بخش پیاده‌سازی شدند. معیار پذیرش یا رد فرضیه‌ها، بر اساس مقایسه P -Value با سطح معنی‌داری (α) آزمون بود؛ در صورتی که P -Value کمتر از α باشد، فرضیه صفر رد شده و فرضیه مقابل پذیرفته می‌شود. نتایج آزمون‌های من-ویتنی، گشت، والد-ولفوویتز و من-کندال که برای بررسی همگنی، تصادفی بودن،

استقلال و تشخیص روند داده‌های بارش ایستگاه مشهد انجام شدند، نشان دادند که مقادیر P -Value در تمامی آزمون‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ بود (جدول ۳). این موضوع به معنای پذیرش فرضیه صفر و در نتیجه، تأیید همگنی، تصادفی، مستقل و ایستا بودن داده‌های بارش طی دوره ۱۲۷ ساله مورد مطالعه است. این آزمون‌ها برای داده‌های دمای ایستگاه مشهد توسط **فرزندی و همکاران** (۱۳۹۸) پیاده‌سازی شده که نتایج آن بیانگر همگنی، استقلال و تصادفی بودن این داده‌ها است.

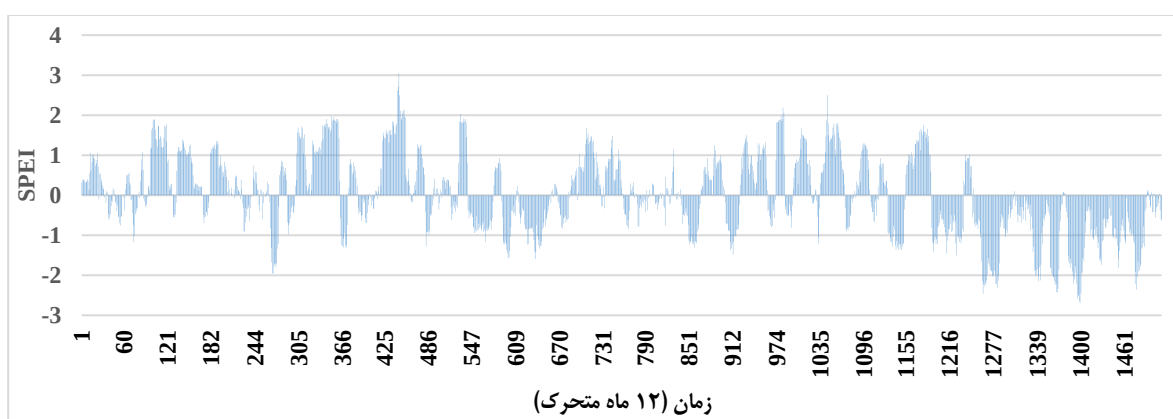
جدول ۳- نتایج آزمون‌های آماری پایه بر روی داده‌های بارش ایستگاه مشهد

آزمون آماری	P_Value	آماره آزمون	فرضیه صفر (H_0)
آزمون من - ویتنی	۰/۴۸۵۸	۰/۹۸۹	پذیرش همگنی داده‌ها
آزمون گشت	۰/۲۸۲۶	۱/۱۶۶۴	پذیرش تصادفی بودن داده‌ها
آزمون والد - ولفوویتز	۰/۶۸۳۵	۰/۴۰۷۶	پذیرش استقلال داده‌ها
آزمون من - کندال	۰/۶۲۳۵	۰/۴۹۰۸	پذیرش ایستایی داده‌ها

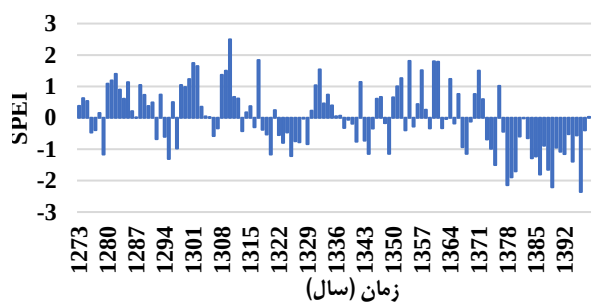
شاخص خشکسالی بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

پس از اطمینان از اینکه نمونه اخذ شده یعنی داده‌های بارش و دما خصوصیات لازم برای تعمیم به جامعه را دارد، شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در مقیاس سالانه محاسبه شد. روش تورنت‌وایت برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) تعیین شد. ابتدا، نتایج SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه (پنجره متحرک) به صورت یک سری زمانی در شکل (۲) ارائه شد که نوسانات خشکسالی و ترسالی را در طول دوره آماری (۱۴۰۰-۱۲۷۳ شمسی) نشان داد. برای تحلیل جامع‌تر وضعیت خشکسالی در مقیاس سالانه و با هدف آماده‌سازی بستر برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌ها، شاخص SPEI در سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با

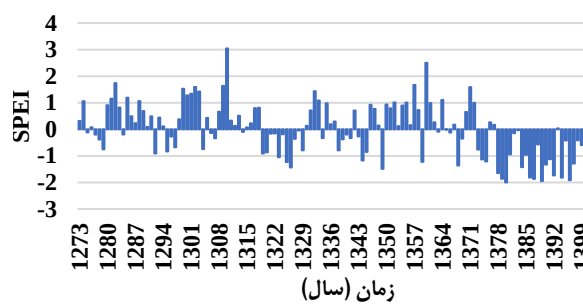
مقیاس سالانه محاسبه شد. به عنوان نمونه، سری زمانی SPEI سالانه با شروع از فروردین (شکل ۳)، که شامل ۱۲۷ سال داده بود، مبنای تحلیل‌های آتی قرار گرفت و نوسانات وضعیت رطوبتی در طول دوره آماری را نشان داد. سایر وضعیت‌های SPEI سالانه با شروع از ماه‌های بعدی نیز (ارائه شده در شکل ۳ و شامل ۱۲۶ سال داده) محاسبه شدند (دو مورد به عنوان نمونه آورده شده است) و نتایج آن‌ها در محاسبه ماتریس احتمال انتقال که در بخش‌های آتی به آن پرداخته خواهد شد به کار گرفته شدند. این رویکرد چندگانه در تعریف سال هیدرولوژیک، با ارائه دیدگاهی جامع‌تر از تغییرات وضعیت خشکسالی، به درک بهتر احتمال وقوع و تداوم خشکسالی‌ها کمک شایانی کرد.



شکل ۲- نمودار مقادیر شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) ۱۲ ماهه به صورت پنجره لغزنده



ب- سری زمانی اردبیهشت

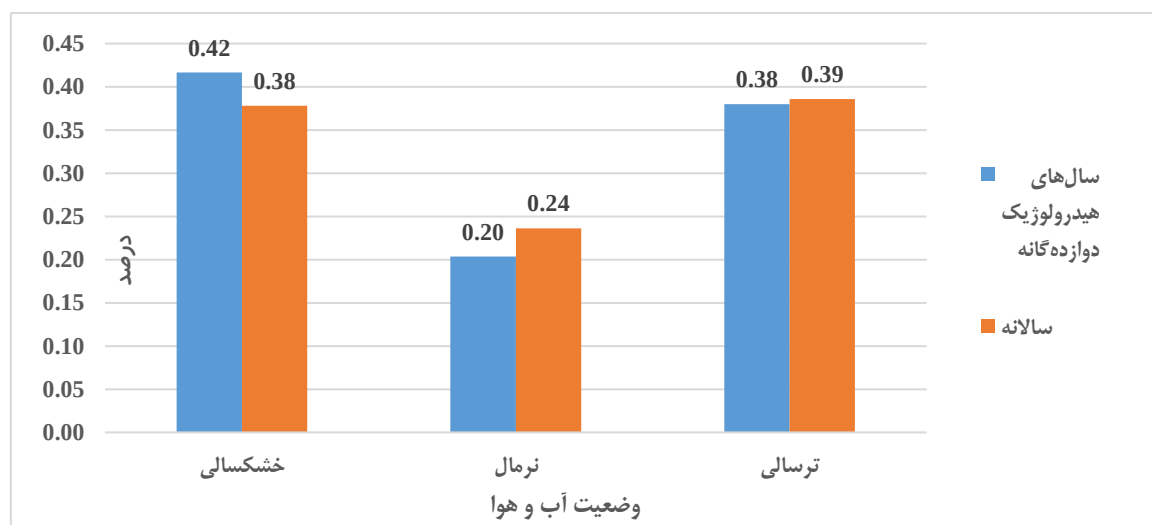


الف- سری زمانی فروردین

شکل ۳- نمودار مقادیر شاخص بارش و تبخیر و تعرق (SPEI) سالانه (الف و ب)

احتمال پنهان شدن شدت و مدت واقعی خشکسالی‌های در حال وقوع توسط دوره‌های کوتاه ترسالی یا بارش‌های فصلی وجود دارد. بررسی خشکسالی به صورت سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، این امکان را فراهم آورد تا خشکسالی‌هایی با مدت زمان طولانی‌تر و شدت بیشتر به صورت کامل‌تری نمایان شوند. این روش، حساسیت بیشتری به دوره‌های کمبود مستمر بارش در طول سال نشان داد و توانست آغاز، اوج و پایان خشکسالی‌ها را با دقت بیشتری مشخص کند.

مقایسه فراوانی وقوع طبقات مختلف اقلیمی، شامل خشکسالی، ترسالی و نرمال در دو مقیاس زمانی متفاوت در شکل (۴) آمده است؛ حالت سالانه (بر اساس سال شمسی) و حالت پنجره متحرک ۱۲ ماهه. حالت پنجره متحرک، که نماینده سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه با شروع از ماه‌های مختلف سال است، امکان بررسی تغییرات اقلیمی را با جزئیات بیشتری در طول چرخه‌های سالانه فراهم آورد. نتایج نشان داد که خشکسالی‌ها در سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه نسبت به حالت سالانه، نمود بارزتر و مشخص‌تری داشتند. در مقیاس سالانه،



شکل ۴- نمودار مقایسه درصد وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال به صورت سالانه و سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه با شروع از ماه‌های متفاوت

ارائه شدند (دو مورد به عنوان نمونه آورده شده است). برخی از آماره‌های مهم شدت، مدت و بزرگی خشکسالی نیز در جدول (۵) آورده شدند. نتایج نشان داد سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه خصوصیات آماری متفاوتی دارند (جدول ۵). با وجود اشتراک ۱۱ ماه در حالت‌های متوالی، تفاوت‌های چشمگیری در خصوصیات خشکسالی بین آن‌ها وجود داشت. این رویکرد امکان نمایان ساختن بدترین وضعیت‌های ممکن خشکسالی را فراهم آورد. به عنوان مثال،

خصوصیات خشکسالی با استفاده از تئوری گشت (مدت، شدت، بزرگی و فراوانی)

پس از محاسبه شاخص خشکسالی SPEI، خصوصیات خشکسالی شامل شدت، مدت، بزرگی و فراوانی با استفاده از تئوری گشت محاسبه شد. حد شروع و خاتمه خشکسالی برای شاخص SPEI برابر با -0.26 در نظر گرفته شد. متغیرهای خشکسالی شامل شدت، مدت، بزرگی و فراوانی برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه در جدول (۴)

در سری‌های زمانی مربوط به شروع از ماه‌های آبان، بهمن و اسفند، خشکسالی با تداوم ۸ سال شناسایی شد که بیشترین تداوم در میان سایر حالات بود. این تفاوت‌ها اهمیت در نظر گرفتن پویایی‌های زمانی در طول سال را نشان می‌دهند و بیانگر آن هستند که تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، دیدگاهی جامع‌تر از بررسی سالانه ارائه می‌دهد و امکان بررسی حساسیت خصوصیات خشکسالی به تغییرات

فصلی را فراهم می‌آورد. به عنوان مثال، فراوانی دوره‌های خشکسالی در سری زمانی با شروع از ماه‌هایی مانند مرداد، آذر و دی بیشتر بود که احتمالاً ناشی از حساسیت این تنظیمات به نوسانات کوتاه‌مدت بارش است. همچنین، شدت و بزرگی خشکسالی نیز بسته به شروع سال تغییر کرد، به طوری که شروع از فروردین و آبان به طور متوسط خشکسالی‌های شدیدتری را نشان دادند.

جدول ۴- خصوصیات خشکسالی برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه برای داده‌های تاریخی (شروع سال از ماه‌های فروردین و اردیبهشت)

شروع سال	مدت	میانگین شدت	میانگین بزرگی	فراوانی	شروع سال	مدت	میانگین شدت	میانگین بزرگی	فراوانی
۱	۱	-۰/۸۰۱	-۰/۷۰۱	۱۵	۱	۱	-۰/۷۰۱	-۰/۷۰۱	۱۵
۲	۲	-۱/۴۵۰	-۲/۰۰۴	۴	۲	۲	-۱/۴۵۰	-۲/۰۰۴	۴
۳	۳	-۲/۵۵۱	-۳/۳۵۶	۴	۳	۳	-۲/۵۵۱	-۳/۳۵۶	۴
۴	۴	-۶/۲۲۰	-۳/۴۱۹	۳	۴	۴	-۶/۲۲۰	-۳/۴۱۹	۳
۵	۵	-	-	-	۵	۵	-	-	-
۶	۶	-۶/۴۵۲	-۵/۸۱۰	۱	۶	۶	-۶/۴۵۲	-۵/۸۱۰	۱
۷	۷	-	-	-	۷	۷	-	-	-
۸	۸	-	-	-	۸	۸	-	-	-

شناسایی خشکسالی ۸ ساله در سری‌های زمانی با شروع از آبان، بهمن و اسفند یافته مهمی است که برتری رویکرد سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه را در شناسایی رویدادهای طولانی‌مدت خشکسالی نشان می‌دهد. رویدادی که ممکن بود در تحلیل سالانه به طور کامل آشکار نشود. بررسی آماره‌های SPEI سالانه (جدول ۵) نیز این تفاوت‌ها را تأیید کرد و نشان داد که تغییر شروع سال می‌تواند بر میانگین، انحراف معیار و چولگی SPEI و در نتیجه بر خصوصیات خشکسالی تأثیر بگذارد. این تنوع در خصوصیات خشکسالی در سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، داده‌های ارزشمندتری را برای مرحله بعد، یعنی محاسبه دقیق‌تر ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌های خشکسالی فراهم کرد و به درک بهتر پویایی‌های فصلی و احتمالات تغییر وضعیت، کمک شایانی نمود. در نهایت، رویکرد سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه امکان درک جامع‌تری از رفتار خشکسالی در منطقه مورد مطالعه را فراهم ساخت و از محدودیت‌های روش سالانه کاست.

پیاده‌سازی روش زنجیره مارکف

محاسبه ماتریس احتمال انتقال

به منظور بررسی پویایی تغییر وضعیت خشکسالی در مقیاس سالانه، ماتریس فراوانی انتقالات برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه محاسبه شده است. این محاسبات

بر اساس داده‌های شاخص SPEI سالانه و با استفاده از تقسیم‌بندی طبقات خشکسالی که در جدول (۱) ارائه شده صورت گرفته است. هر یک از این ماتریس‌ها (شکل ۵ که دو مورد به عنوان نمونه آورده شده است) نشان‌دهنده تعداد دفعات انتقال از یک وضعیت پایه (سطر) به وضعیت دیگر (ستون) در طول دوره آماری است. برای تسهیل در تفسیر، از رنگ‌بندی استفاده شده است. رنگ قرمز نمایانگر انتقال سیستم به یکی از وضعیت‌های خشکسالی (شدید یا متوسط) است که نشان‌دهنده تشدید یا تداوم شرایط خشک است. رنگ آبی نشان‌دهنده انتقال به یکی از وضعیت‌های ترسالی (شدید یا متوسط) است که بیانگر بهبود شرایط رطوبتی است. رنگ خاکستری نیز نشان‌دهنده انتقال به وضعیت نرمال است. شدت رنگ هر درایه، فراوانی وقوع آن انتقال خاص را نشان می‌دهد؛ به این ترتیب که درایه‌های پررنگ‌تر بیانگر تعداد دفعات بیشتر و درایه‌های کم‌رنگ‌تر نشان‌دهنده تعداد دفعات کمتر انتقال هستند.

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، ماتریس‌های فراوانی انتقالات سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه محاسبه شد. برای ارائه یک دیدگاه کلی و جامع از فراوانی انتقالات بین وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در طول دوره آماری، فراوانی‌های به‌دست‌آمده از هر یک از این ۱۲ سری زمانی در یک ماتریس فراوانی انتقال نهایی (شکل ۶) تجمیع شد. این ماتریس بیانگر میانگین انتقالات در این ۱۲ سری زمانی است.

جدول ۵- برخی از آماره‌های مهم متغیرهای خشکسالی تاریخی برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه با مقیاس سالانه براساس زمان شروع دوره
(مدت خشکسالی برحسب سال می‌باشد)

شروع سال	متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	ضریب چولگی
فروردین	مدت	۱	۶	۲/۲۳۸	۱/۴۱۱	۰/۶۳۰	۱/۰۶۸
	شدت	-۰/۳۳۰	-۶/۴۵۴	-۲/۳۰۱	۲/۱۱۸	۰/۹۲۰	-۱/۲۴۴
	بزرگی	-۰/۳۳۰	-۱/۶۱۳	-۰/۹۱۷	۰/۳۹۶	۰/۴۳۳	-۰/۲۶۳
اردیبهشت	مدت	۱	۷	۲/۲۹۲	۱/۹۶۷	۰/۸۵۸	۱/۵۷۵
	شدت	-۰/۲۷۹	-۹/۷۲۷	-۲/۰۷۳	۲/۵۴۷	۱/۲۲۹	-۱/۹۴۵
	بزرگی	-۰/۲۷۹	-۱/۳۹۰	-۰/۷۴۷	۰/۳۵۳	۰/۴۷۳	-۰/۲۲۰
خرداد	مدت	۱	۷	۲/۰۳۸	۱/۸۲۲	۰/۸۹۴	۱/۷۴۵
	شدت	-۰/۳۰۵	-۱۰/۰۲۰	-۱/۸۸۷	۲/۲۹۹	۱/۲۱۸	-۲/۳۶۴
	بزرگی	-۰/۳۰۵	-۱/۶۷۱	-۰/۸۰۵	۰/۳۵۴	۰/۴۳۹	-۰/۵۷۰
تیر	مدت	۱	۶	۲/۰۳۷	۰/۴۶۳	۰/۲۲۷	۱/۷۲۴
	شدت	-۰/۳۴۹	-۶/۶۸۳	-۱/۰۷۳	۱/۸۴۴	۱/۷۱۸	-۱/۴۴۳
	بزرگی	-۰/۳۴۹	-۲/۱۰۹	-۰/۷۸۷	۰/۴۳۸	۰/۵۵۶	-۱/۶۷۴
مرداد	مدت	۱	۷	۲	۱/۷۲۱	۰/۸۶۱	۱/۹۲۴
	شدت	-۰/۲۶۷	-۸/۰۶۷	-۱/۷۶۱	۱/۹۷۴	۱/۱۲۱	-۱/۹۴۹
	بزرگی	-۰/۲۶۷	-۱/۹۷۰	-۰/۷۹۴	۰/۴۴۹	۰/۵۶۵	-۱/۲۸۶
شهریور	مدت	۱	۶	۲/۰۷۷	۱/۶۴۷	۰/۷۹۳	۱/۶۷۰
	شدت	-۰/۳۰۱	-۶/۴۱۹	-۱/۸۷۵	۱/۸۵۶	۰/۹۹۰	-۱/۳۱۵
	بزرگی	-۰/۳۰۱	-۲/۱۲۲	-۰/۸۲۷	۰/۴۵۷	۰/۵۵۳	-۱/۲۴۱
مهر	مدت	۱	۶	۲/۰۳۸	۱/۵۸۷	۰/۷۷۹	۱/۵۵۸
	شدت	-۰/۲۹۲	-۶/۵۶۶	-۱/۸۴۷	۱/۸۵۷	۱/۰۰۵	-۱/۴۳۰
	بزرگی	-۰/۲۹۲	-۱/۷۱۲	-۰/۸۱۲	۰/۳۸۹	۰/۴۸۰	-۰/۵۵۰
آبان	مدت	۱	۸	۲/۱۳۶	۱/۹۳۵	۰/۹۰۶	۱/۹۵۹
	شدت	-۰/۴۰۸	-۸/۹۰۳	-۲/۱۴۴	۲/۱۹۰	۱/۰۲۲	-۱/۸۴۹
	بزرگی	-۰/۴۰۸	-۲/۲۳۴	-۰/۹۶۲	۰/۴۹۸	۰/۵۱۷	-۱/۵۵۶
آذر	مدت	۱	۷	۱/۷۴۱	۱/۴۰۳	۰/۸۰۶	۲/۴۸۶
	شدت	-۰/۲۷۵	-۸/۸۷۱	-۱/۷۲۴	۱/۸۸۲	۱/۰۹۲	-۲/۵۶۳
	بزرگی	۰/۲۷۵	-۲/۲۱۵	-۰/۹۲۶	۰/۵۳۱	۰/۵۷۳	-۱/۰۶۱
دی	مدت	۱	۷	۱/۸۸۹	۱/۵۲۸	۰/۸۰۹	۲/۰۱۹
	شدت	-۰/۲۷۹	-۷/۳۲۱	-۱/۷۸۵	۱/۹۲۶	۱/۰۷۹	-۱/۶۲۵
	بزرگی	-۰/۲۷۹	-۲/۰۶۷	-۰/۸۲۹	۰/۴۷۱	۰/۵۶۹	-۰/۹۸۶
بهمن	مدت	۱	۸	۲	۱/۸۴۲	۰/۹۲۱	۲/۱۴۲
	شدت	-۰/۲۶۲	-۹/۹۵۹	-۱/۹۷۲	۲/۴۴۶	۱/۲۴۰	-۲/۱۵۷
	بزرگی	-۰/۲۶۲	-۱/۵۶۸	-۰/۸۳۳	۰/۴۱۶	۰/۵۰۰	-۰/۱۸۴
اسفند	مدت	۱	۸	۲/۱۹۰	۱/۷۷۸	۰/۸۱۲	۲/۰۴۲
	شدت	-۰/۲۶۶	-۱۰/۷۸۹	-۲/۲۴۵	۲/۴۵۱	۰/۹۲۰	-۲/۴۶۸
	بزرگی	-۰/۲۶۶	-۱/۳۹۴	-۰/۹۱۵	۰/۳۵۶	۰/۳۸۹	۰/۵۶۹

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۱۲	۶	۲	۲	۳	۲۵
MD	۹	۶	۸	۳	۵	۳۱
N	۲	۷	۴	۳	۳	۱۹
MW	۲	۶	۳	۸	۴	۲۳
VW	۰	۶	۳	۶	۱۲	۲۷

ب - شروع سال اردیبهشت

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۱۳	۶	۴	۲	۲	۲۷
MD	۴	۵	۳	۵	۳	۲۰
N	۷	۵	۸	۵	۵	۳۰
MW	۳	۲	۱۰	۱	۶	۲۲
VW	۰	۳	۵	۸	۱۱	۲۷

الف - شروع سال فروردین

شکل ۵- ماتریس فراوانی انتقالات برای سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه

با تجمیع فراوانی انتقالات در تمام ۱۲ سری زمانی، ماتریس فراوانی انتقال نهایی، شمارش کلی دفعات انتقال از هر وضعیت پایه به سایر وضعیت‌ها را در طول دوره آماری و با در نظر گرفتن سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه، ارائه داد.

این ماتریس تجمیع‌شده، مبنایی قوی‌تر و جامع‌تر برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال نهایی (شکل ۷) فراهم کرد، زیرا تمام الگوهای انتقالی که با در نظر گرفتن شروع سال‌های با ماه مختلف آشکار شده بود را در بر گرفت.

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۹۱	۸۵	۴۳	۴۰	۲۴	۲۸۳
MD	۹۷	۷۵	۶۰	۵۴	۵۴	۳۴۰
N	۳۴	۶۲	۹۸	۴۲	۶۷	۳۰۳
MW	۲۸	۶۲	۵۴	۳۹	۶۵	۲۴۸
VW	۳۳	۶۳	۵۲	۶۲	۱۱۷	۳۲۷

شکل ۶- ماتریس فراوانی انتقالات نهایی

وضعیت	SD	MD	N	MW	VW	مجموع
SD	۰/۳۲۲	۰/۳۰۰	۰/۱۵۲	۰/۱۴۱	۰/۰۸۵	۱
MD	۰/۲۸۵	۰/۲۲۱	۰/۱۷۶	۰/۱۵۹	۰/۱۵۹	۱
N	۰/۱۱۲	۰/۲۰۵	۰/۳۲۳	۰/۱۳۹	۰/۲۲۱	۱
MW	۰/۱۱۳	۰/۲۵۰	۰/۲۱۸	۰/۱۵۷	۰/۲۶۲	۱
VW	۰/۱۰۱	۰/۱۹۳	۰/۱۵۹	۰/۱۹۰	۰/۳۵۸	۱

شکل ۷- ماتریس احتمال انتقال نهایی

شکل (۷) مربوط به ماتریس احتمال انتقال نهایی و نشان‌دهنده احتمال انتقال از یک وضعیت خشکسالی یا ترسالی در یک سال به وضعیت دیگر در سال بعد، با در نظر گرفتن سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه است. سطرها نشان‌دهنده وضعیت فعلی (سال t) و ستون‌ها نشان‌دهنده وضعیت سال بعد ($t+1$) در این شکل هستند.

تحلیل ماتریس احتمال انتقال نهایی

تحلیل ماتریس احتمال انتقال، اطلاعات کلیدی در مورد پویایی و رفتارهای غالب سیستم اقلیمی را آشکار کرد. مهم‌ترین یافته‌ها به شرح زیر است:

- **پایداری وضعیت‌های شدید و نرمال:** نتایج نشان داد وضعیت‌های شدید اقلیمی، یعنی خشکسالی شدید (SD) با احتمال ۰/۳۲۲ و ترسالی شدید (VW) با احتمال ۰/۳۵۸، پایداری قابل‌توجهی دارند. این بدان معناست که در صورت وقوع یک سال شدید، احتمال زیادی وجود دارد که شرایط در سال بعد نیز به همان شکل باقی بماند. پایداری وضعیت نرمال (N) نیز با احتمال ۰/۳۲۳ بسیار بالا و نشان‌دهنده تمایل سیستم به ماندن در شرایط تعادلی است.

- **گذرا بودن وضعیت‌های میانی:** برخلاف وضعیت‌های شدید، وضعیت‌های میانی خشکسالی متوسط (MD) و ترسالی متوسط (MW) به عنوان وضعیت‌های گذرا عمل می‌کنند. احتمال پایداری در این وضعیت‌ها (به ترتیب ۰/۲۲۱ و ۰/۱۵۷) به طور محسوسی کمتر از احتمال خروج از آن‌ها به سمت وضعیت‌ها شدیدتر یا نرمال است. این یافته نشان می‌دهد که سیستم تمایل کمتری به توقف در شرایط میانی دارد و پس از ورود به این وضعیت‌ها، احتمالاً به سمت شرایط وخیم‌تر یا بهبود یافته حرکت می‌کند.
- **عدم تقارن در انتقال‌ها:** تحلیل دقیق‌تر نشان داد که الگوهای انتقال بین وضعیت‌ها خشکسالی و ترسالی کاملاً متقارن نیستند. برای مثال، احتمال انتقال از ترسالی شدید (VW) به خشکسالی متوسط (MD) با احتمال ۰/۱۹، بالاتر از احتمال انتقال از خشکسالی شدید (SD) به ترسالی متوسط (MW) با احتمال ۰/۱۴ است (۵ درصد تفاوت دارند).
- **کاربردها و محدودیت‌ها:** ماتریس احتمال انتقال، به عنوان یک ابزار ارزشمند برای تحلیل پویایی سیستم اقلیمی منطقه عمل می‌کند و می‌تواند برای پیش‌بینی احتمالی وضعیت‌های خشکسالی یا ترسالی در آینده

استفاده شود. با در نظر گرفتن وضعیت فعلی، می‌توان احتمال قرار گرفتن در هر یک از وضعیت‌ها را در سال‌های آتی تخمین زد که مفید برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و اتخاذ استراتژی‌های سازگاری است.

توزیع پایدار خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت

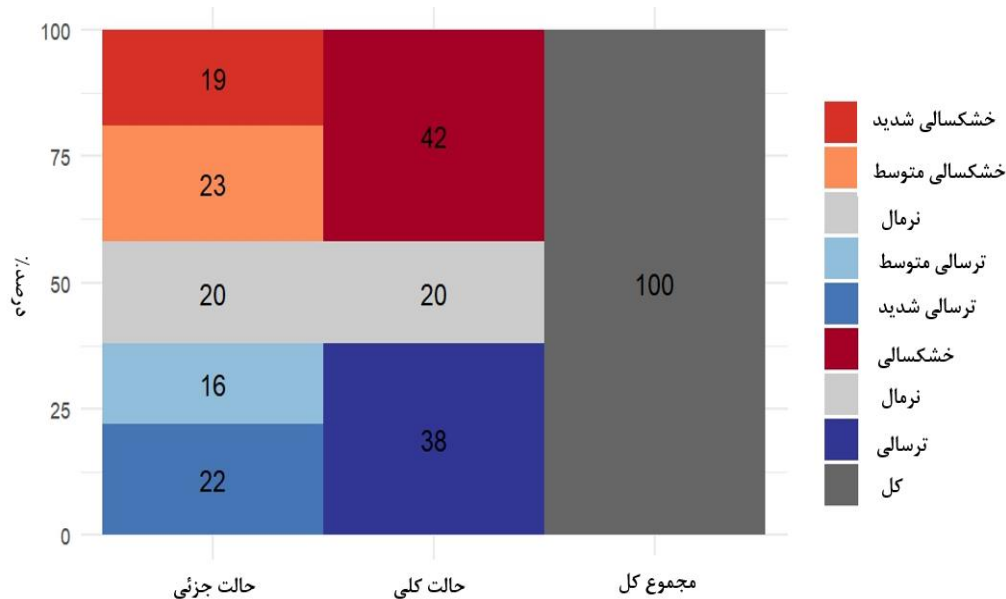
ماتریس احتمال انتقال، علاوه بر نمایش احتمالات شرطی انتقال بین وضعیت‌های اقلیمی، اطلاعات ارزشمندی را درباره رفتار بلندمدت سیستم فراهم می‌کند. یکی از این اطلاعات، مفهوم توزیع مانا یا پایدار است. بر اساس نظریه زنجیره مارکوف، در صورتی که ماتریس احتمال انتقال دارای ویژگی‌های ارگودیک (بنابر این خصوصیت ماتریس، سیستم می‌تواند از هر وضعیت به وضعیت دیگر در تعداد گام محدودی برسد) باشد، با توان رساندن آن به سمت بی‌نهایت، به یک بردار احتمال ثابت همگرا می‌شود. این بردار، توزیع مانا نامیده می‌شود و نشان‌دهنده احتمال بلندمدت حضور سیستم در هر یک از وضعیت‌های مختلف، مستقل از وضعیت اولیه آن است (Levin و Peres، ۲۰۱۷).

شکل (۸)، توزیع مانای محاسبه‌شده برای وضعیت‌های مختلف اقلیمی را نشان می‌دهد. بر اساس این توزیع، انتظار می‌رود که در درازمدت:

- حدود ۱۹٪ از سال‌ها در وضعیت خشکسالی شدید (SD) سپری شود.
- حدود ۲۳٪ از سال‌ها در وضعیت خشکسالی متوسط (MD) سپری شود.
- حدود ۲۰٪ از سال‌ها در وضعیت نرمال (N) سپری شود.
- حدود ۱۶٪ از سال‌ها در وضعیت ترسالی متوسط (MW) سپری شود.
- حدود ۲۲٪ از سال‌ها در وضعیت ترسالی شدید (VW) سپری شود.

این توزیع مانا، اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت سازگاری با خشکسالی و مدیریت منابع آب فراهم می‌کند. با آگاهی از احتمال بلندمدت حضور در هر یک از وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال، می‌توان برنامه‌های پیشگیرانه و سازگارانه‌تری را برای مواجهه با شرایط خشک و مرطوب در آینده تدوین کرد.

به عنوان مثال، احتمال بالای حضور در وضعیت‌های ترسالی شدید و متوسط در درازمدت، فرصت‌هایی را برای ذخیره‌سازی آب فراهم می‌کند، در حالی که احتمال وقوع خشکسالی‌های متوسط و شدید نیز ضرورت برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات منفی آن‌ها را گوشزد می‌کند.



شکل ۸- توزیع پایدار وضعیت‌های خشکسالی، ترسالی و نرمال در درازمدت

توانست خصوصیات خشکسالی را با دقت زیادی آشکار سازد. این رویکرد، محدودیت‌های تحلیل سالانه مرسوم را برطرف کرد و رویدادهای مهمی همچون خشکسالی ۸ ساله را که ممکن بود در روش‌های سنتی پنهان بماند، نمایان ساخت. نتایج تحلیل ماتریس احتمال انتقال نشان داد که سیستم اقلیمی مشهد پایدار بالایی در وضعیت‌های شدید (خشکسالی شدید و ترسالی شدید) دارد. این یافته بیانگر آن

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل پویایی‌های خشکسالی در منطقه مشهد با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، به درک عمیق‌تری از رفتار بلندمدت اقلیم این منطقه دست یافت. نوآوری اصلی این مطالعه در به‌کارگیری روش سری‌های زمانی هیدرولوژیک دوازده‌گانه بود که با تحلیل داده‌ها از ۱۲ مبدأ زمانی متفاوت،

است که در صورت ورود به یکی از این وضعیت‌ها، احتمال تداوم آن در سال بعد بسیار زیاد است. در مقابل، وضعیت‌های میانی (خشکسالی متوسط و ترسالی متوسط) به عنوان وضعیت‌های گذرا عمل می‌کنند و احتمال خروج از آن‌ها به سمت وضعیت‌های شدیدتر یا نرمال، بیشتر است. تحلیل توزیع مانای وضعیت‌های مختلف نیز مهم‌ترین نتیجه این پژوهش بود که تصویر روشنی از آینده اقلیمی منطقه ارائه می‌دهد. این نتایج نشان داد که در درازمدت، احتمال حضور در وضعیت‌های خشکسالی شدید و متوسط (با مجموع ۴۲٪) بیشتر از وضعیت‌های ترسالی شدید و متوسط (با مجموع ۳۸٪) است که بیانگر تمایل بلندمدت سیستم به سمت شرایط خشک‌تر است.

نتایج این پژوهش ابزاری ارزشمند برای مدیریت منابع آب در منطقه مشهد فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه توزیع مانای محاسبه‌شده، احتمال بلندمدت وقوع خشکسالی را با ۴۲ درصد بیشتر از ترسالی نشان می‌دهد، برنامه‌ریزی‌های کلان توسعه، به‌ویژه در بخش‌های کشاورزی، باید بر پایه سناریوهای خشکسالی تدوین شوند. علاوه بر این، ماتریس احتمال انتقال نشان می‌دهد که وضعیت‌های میانی (خشکسالی و ترسالی متوسط) گذرا هستند؛ بنابراین، مدیران باید آمادگی لازم برای واکنش سریع به تشدید یا بهبود وضعیت را داشته باشند. نتایج این پژوهش با نتایج [سلاجقه و همکاران \(۱۳۸۸\)](#) و [Spinoni و همکاران \(۲۰۱۷\)](#) مطابقت داشت.

منابع

بذرافشان، ام‌البین، محمودزاده، فوزیه، عسگری‌نژاد، امین، و بذرافشان، جواد. (۱۳۹۸). مقایسه تطبیقی شاخص‌های SPI، RDI و SPEI در تحلیل روند شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران. علوم مهندسی و آبیاری، ۴۲(۳)، ۱۱۷-۱۳۱. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585>

سلاجقه، علی، نجفی حاجی‌ور، منصور، و فتح‌آبادی، ابوالحسن. (۱۳۸۸). تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص SPI و زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. <https://sid.ir/paper/817138/fa>

فرزندی، محبوبه، ثنایی‌نژاد، سیدحسین، قهرمان، بیژن، و سرمد، مجید. (۱۳۹۸). ترمیم داده‌های مفقود هواشناسی با روش‌های تکاملی و یادگیری ماشین مطالعه موردی: بارش و دمای ماهانه درازمدت مشهد. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۳(۲)، ۳۶۱-۳۷۷. <https://doi.org/10.22067/jsw.v33i2.74125>

فرزندی، محبوبه، و رضایی‌پژند، حجت. (۱۴۰۰). معرفی روش MICE در ترمیم داده‌های گمشده هواشناسی و مقایسه با رگرسیون؛ مطالعه موردی: ۱۳۰ سال دمای ماهانه مشهد،

جاسک و بوشهر. آب و توسعه پایدار، ۸(۳)، ۳۱-۴۲. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i3.2104.1038>

قربانی، خلیل، ولی‌زاده، اسماعیل، و برارخان‌پور، صدیقه. (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی شاخص دومتغیره خشکسالی هواشناسی SPEI در ایران. مدیریت بیابان، ۶(۱۱)، ۲۵-۳۸. <https://doi.org/10.30488/ccr.2023.375498.1107>

مقیم، محمدمهدی، کوهی، امیر، و زارعی، عبدالرسول. (۱۳۹۷). پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکوف. فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۳)، ۱۶۵-۱۵۳.

مصطفی‌زاده، رئوف، و ذبیحی، محسن. (۱۳۹۵). تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۳۳-۶۴۳. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.57881>

Alam, N. M., Sharma, G. C., Moreira, E., Jana, C., Mishra, P. K., Sharma, N. K., & 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, Parts a/b/c, 100, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.008>

Ansori, A., Sulistiyono, H., & Yasa, I. W. (2024). Study of drought using the theory of run and hydrological drought index and its relationship to reservoir storage at the Batujai Dam and Pengga Dam. RESEARCH REVIEW International Journal of Multidisciplinary, 9(7), 116-127. <https://doi.org/10.31305/rrijm.2024.v09.n07.016>

Avilés, A., Céleri, R., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Probabilistic forecasting of drought events using Markov chain-and Bayesian network-based models: A case study of an Andean regulated river basin. Water, 8(2), 37. <https://doi.org/10.3390/w8020037>

Azimi, S., Hassannayebi, E., Boroun, M., & Tahmoures, M. (2020). Probabilistic analysis of long-term climate drought using steady-state Markov chain approach. Water Resources Management, 34(15), 4703-4724. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02683-5>

Grimmett, G., & Stirzaker, D. (2020). Probability and random processes. Oxford university press, NewYork, USA.

- Wald, A., & Wolfowitz, J. (1940). On a test whether two samples are from the same population. The Annals of Mathematical Statistics, 11(2), 147-162.
- Wang, L., Zhang, X., Wang, S., Salahou, M. K., & Fang, Y. (2020). Analysis and application of drought characteristics based on theory of runs and copulas in Yunnan, Southwest China International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(13), 4654. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134654>
- Yan-Jun, L. I., Xiao-dong, Z. H. E. N. G., Fan, L. U., & Jing, M. A. (2012). Analysis of drought evolvment characteristics based on standardized precipitation index in the Huaihe River basin. Procedia Engineering, 28, 434-437. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.746>
- Zarei, A. R. (2018). Evaluation of drought condition in arid and semi-arid regions, using RDI index. Water Resources Management, 32(5), 1689-1711. <https://doi.org/10.1007/s11269-017>
- Levin, D. A., & Peres, Y. (2017). Markov chains and mixing times (Vol. 107). USA. <https://doi.org/10.1090/mbk/107>
- Mondal, A., Kundu, S., & Mukhopadhyay, A. (2012). Rainfall trend analysis by Mann-Kendall test: A case study of north-eastern part of Cuttack district, Orissa. International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences, 2(1), 70-78. 13USGS.
- Norris, J. R. (1998). Markov chains (No. 2). Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810633>
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. Climate dynamics, 31(1), 79-105.
- Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. V. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. Global and Planetary Change, 148, 113-130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, 4(1), 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of climate, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vivekanandan, N. (2024). Trend analysis of rainfall data using mann-kendall test and sen's slope estimator. i-Manager's Journal on Civil Engineering, 14(2), 18. <https://doi.org/10.26634/jce.14.2.21074>

پی‌نوشت‌ها

- 1- Run Theory
- 2- Drought Length
- 3- Drought Severity
- 4- Drought Magnitude
- 5- Drought Number
- 6- Markov Chain
- 7- Transition Matrix
- 8- Very Wet
- 9- Moderate Wet
- 10- Normal
- 11- Moderate Drought
- 12- Severe Drought
- 13- 1895-2022 AD