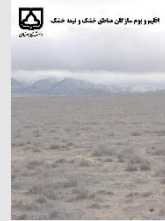




Semnan University

Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions

<https://ceasr.semnan.ac.ir>



Research Article

Applying Markov model in studying the changes in the length of dry periods in Semnan province

Hamid Kheyroodin^{a,*}

^aAssistant Professor, Department of Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received :20 August 2025

Revised: 29 December 2025

Accepted: 30 December 2025

Keywords:

Climatology,
Markov model,
Zoning maps,
Semnan province,
Synoptic station.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Climatic characteristics (average weather) of Semnan province due to its proximity to the central desert of Iran and southern slopes of Alborz have great variety, so that with decreasing altitude from north to south, the temperature increases and the amount of precipitation decreases. Knowledge of the distribution of the probability of precipitation provides a suitable basis for planning water and soil resources, as well as flood control and erosion management.

Materials and Methods: Competence of Markov chain model for estimating changes in dry days and probabilistic zoning (classification of land based on land use) has been studied and evaluated in many provinces of Iran. In this article, the behavioral pattern of the length of dry periods was investigated using daily precipitation data (1985-2017) for all synoptic stations in the Semnan province and a number of selected climatological and rain gauge stations using the Markov chain empirical distribution model.

Results: Results showed that the highest frequency of long-term dry periods (30 days and more) in Semnan province was related to the Hosseinian station in the south of Damghan city. The lowest frequency was related to the stations on the border of Semnan province with Mazandaran and Golestan provinces, such as Rezvan and Mojen stations in the northeast of the province. Markov probability distribution was used to evaluate the continuity, sequence, and recurrence of dry periods and the probability of their recurrence. The results indicate that Markov method is a powerful and capable method in investigating and predicting dry times and has provided results very close to the time of occurrence.

Conclusion: Based on the fact that in recent decades, the climate of Semnan province, following the climate of Iran, has been reported to be increasing in temperature, decreasing in precipitation, and increasing in drought. However, the variables and results indicate that the decrease in precipitation and increase in the number of dry days are quite evident in most areas of Semnan province, and minimum and maximum daily air temperatures will also increase significantly in the northeast of this province.

Cite this article: kheyroodin H. (2025). Applying Markov model in studying the changes in the length of dry periods in Semnan province. *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 2(2), 130-144.

© 2025 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.37148.1042>

*Corresponding author: Hamid.kheyroodin@semnan.ac.ir

کاربرد مدل مارکوف در بررسی تغییرات طول دوره‌های خشک در استان سمنان

حمید خیرالدین^{*۱}

۱- استادیار، گروه بیابانزدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*: نویسنده مسئول، Hamid.kheyroodin@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: مشخصات اقلیمی (میانگین آب و هوا) استان سمنان به علت همجواری با کویر مرکزی ایران و دامنه جنوبی البرز دارای تنوع آب و هوایی زیادی است؛ به‌طوری که با کاهش ارتفاع از شمال به سمت جنوب، دما افزایش و مقدار بارندگی کاهش می‌یابد. آگاهی از توزیع احتمال وقوع بارندگی، زمینه مناسبی را برای برنامه‌ریزی منابع آب و خاک و همچنین کنترل سیلاب و مدیریت فرسایش فراهم می‌آورد.
مقاله کامل علمی- پژوهشی	مواد و روش‌ها: صلاحیت الگوی زنجیره مارکوف برای برآورد تغییرات روزهای خشک و پهنه‌بندی احتمالاتی (دسته‌بندی اراضی بر اساس کاربری) در بسیاری از استان‌های ایران مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، برای بررسی الگوی رفتاری طول دوره‌های خشک، از داده‌های بارش روزانه (۱۹۸۵-۲۰۱۷) برای کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک استان سمنان و تعدادی از ایستگاه‌های منتخب اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی، با کاربرد مدل توزیع تجربی زنجیره مارکوف استفاده شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹	یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی دوره‌های خشک بلندمدت (۳۰ روز و بیشتر) در استان سمنان مربوط به ایستگاه حسینیان واقع در جنوب شهرستان دامغان بوده است. البته، کمترین فراوانی مربوط به ایستگاه‌های واقع در مرز استان سمنان با استان‌های مازندران و گلستان، همچون ایستگاه‌های رضوان و مجن در شمال غربی استان سمنان، مشاهده شد. در این مطالعه، از زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی دوره‌های خشک و تحلیل ویژگی‌های آماری آنها مانند تداوم، توالی، و احتمال تکرارپذیری استفاده شد. این روش با در نظر گرفتن وابستگی بین حالت‌های متوالی خشکسالی، امکان ارزیابی دقیق‌تر رفتار تصادفی و پیش‌بینی الگوهای بازگشت خشکسالی را فراهم می‌کند. نتایج حاصله نشان دهنده آن است که روش مارکوف، روشی نیرومند و توانمند در بررسی و پیش‌بینی زمان‌های خشک بوده و نتایج بسیار نزدیکی به زمان رخداد ارائه نموده است.
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸	نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش حاکی از آن است که استان سمنان، همسو با تغییرات اقلیمی ایران، با روند افزایشی دما و کاهش بارش‌ها مواجه بوده که این امر منجر به تشدید شرایط خشکسالی شده است. تحلیل آماری متغیرهای اقلیمی نشان‌دهنده کاهش معنادار بارندگی و افزایش فراوانی روزهای خشک در مقیاس زمانی بلندمدت است. همچنین، مشاهدات حاکی از روند صعودی دماهای حدی (کمینه و بیشینه)، به‌ویژه در بخش‌های شمال شرقی استان، است که می‌تواند پیامدهای جدی برای منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی منطقه داشته باشد. این یافته‌ها با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های اقلیمی مورد تأیید قرار گرفته و ضرورت برنامه‌ریزی‌های سازگاری با تغییرات آب‌وهوایی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹	
واژه‌های کلیدی:	
اقلیم‌شناسی،	
مدل مارکوف،	
نقشه‌های پهنه‌بندی،	
استان سمنان،	
ایستگاه سینوپتیک.	

استناد: خیرالدین، ح. (۱۴۰۴). کاربرد مدل مارکوف در بررسی تغییرات طول دوره های خشک در استان سمنان. *اقلیم و بوم سازگان مناطق خشک و نیمه خشک*، ۲ (۲)، ۱۳۰-۱۴۴.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.37148.1042>

ناشر: دانشگاه سمنان

۱- مقدمه

خشکسالی به طور کلی به عنوان کمبود بارندگی برای مدت زمان طولانی تعریف می شود که منجر به کمبود آب برای برخی از گروه ها، بخش ها یا فعالیت ها می گردد. یکی از ویژگی های طبیعی یک اقلیم، خشکسالی است که به مفهوم کمبود منابع آب نسبت به مقدار نرمال آن است. خشکسالی، انحراف منفی مستمر از میانگین بارش بلندمدت تعریف می شود که منجر به عدم تعادل هیدرولوژیکی و کمبود آب می گردد. این پدیده، برخلاف سایر بلایای طبیعی، به تدریج رخ داده و آثار آن در بلندمدت نمایان می شود. ارزیابی خشکسالی مستلزم به کارگیری شاخص های کمی (مانند SPI، PDSI و SEI) است که قابلیت تحلیل ابعاد مختلف خشکسالی (هواشناختی، کشاورزی و هیدرولوژیکی) را دارند (Hejazizadeh et al., 2014). شاخص SPI براساس داده های بارندگی طولانی مدت است که می تواند طبق مقیاس های زمانی مختلف محاسبه شود. مدیریت خشکسالی نیز نیازمند رویکردی یکپارچه با در نظر گرفتن مؤلفه های اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی است تا از تشدید بحران های ناشی از آن جلوگیری شود. خشکسالی می تواند در یک منطقه باعث ایجاد صدمات جبرانناپذیری در نوسعه گردد. تأمین آب منوط به تصمیمات اجتماعی، سیاسی و اقتصادی و چگونگی استفاده و توزیع آن است. بارش کمتر از حد انتظار و تقاضا برای تأمین آب و فعالیت های انسانی می تواند اثرات خشکسالی را تشدید کند. پایش و ارزیابی علمی خشکسالی مستلزم به کارگیری مجموعه ای از شاخص های کمی دقیق است که توانایی سنجش ابعاد مختلف خشکسالی (هواشناختی، کشاورزی و هیدرولوژیکی) را دارند. این شاخص ها با تبدیل داده های خام به اطلاعات تحلیلی، امکان ارزیابی شدت، مدت و گستره مکانی خشکسالی را فراهم می کنند. تاکنون شاخص های متعددی برای پایش خشکسالی توسعه یافته اند که عمدتاً بر پایه متغیرهای هواشناسی (مانند بارش، دما و تبخیر) طراحی شده اند. برخی از این شاخص ها عبارتند از: شاخص پالمر (Alley, 1985)، شاخص بالم و مولی (Bhalme and Mooley, 1980) و شاخص محصول ویژه (Dahale, 1994).

تحلیل بارش های ماهانه و فصلی در مقیاس روزانه، به دلیل میانگین گیری زمانی، قادر به شناسایی دقیق دوره های خشک کوتاه مدت نیست. این محدودیت موجب شده بسیاری از پژوهشگران در مطالعات خشکسالی، رویکرد تحلیل طول دوره های خشک را ترجیح دهند. روش مذکور با بررسی توالی روزهای بدون بارش، امکان شناسایی تنش های آبی زودگذر و تأثیرات آن بر سیستم های طبیعی و انسانی را فراهم می کند. تحلیل دوره های خشک از مزایای متعددی برخوردار است که از جمله می توان به حساسیت زیاد به تغییرات کوتاه مدت، تناسب بهتر با نیازهای آبی گیاهان و قابلیت به کارگیری روش های آماری پیشرفته اشاره کرد. این روش، به ویژه در ارزیابی خشکسالی های کشاورزی، مدیریت منابع آب و پیش بینی خشکسالی های آینده کاربرد دارد. تلفیق این روش با شاخص های متعارف خشکسالی مانند SPI می تواند دقت پایش و ارزیابی خشکسالی را به ویژه در مناطق نیمه خشک افزایش دهد. به طور کلی، رویدادهای خشکسالی در سراسر جهان به چهار گروه هواشناسی، رطوبت خاک (کشاورزی)، هیدرولوژیکی و اجتماعی- اقتصادی طبقه بندی می شوند. در سال های اخیر، افزایش فعالیت های انسانی و گرم شدن اقلیم منجر به تغییر در الگوی توزیع مکانی خشکسالی شده است (McNeeley et al., 2016). همچنین McNeeley و

همکاران (۲۰۲۲) توزیع مکانی و زمانی خشکسالی و رطوبت در چین را بر اساس شاخص خشکسالی (PDI (Pedj بررسی کردند.

بر اساس مطالعه Torabinezhad و همکاران (۲۰۲۳)، انواع خشکسالی و ویژگی‌های آن در ایران با استفاده از شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، پژوهش Mirzaei-Hassanlu و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه، بیشترین میزان بارندگی در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۴ رخ داده است. این مطالعه بیان می‌کند که از سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳، بارندگی روند کاهشی و دما روند صعودی معناداری داشته است. یافته‌های این مطالعات حاکی از تغییرات اقلیمی محسوس در منطقه است. این روند می‌تواند پیامدهای قابل توجهی بر منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی در حوضه دریاچه ارومیه داشته باشد.

شاخص خشکسالی SPI یکی از رایج‌ترین شاخص‌های خشکسالی است. McKee و همکاران (۱۹۹۳)، SPI را برای شناسایی و پایش رویدادهای خشکسالی با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه توسعه دادند. تعیین شروع و پایان خشکسالی دشوار است. بنابراین برای ارزیابی کمی و کیفی پدیده خشکسالی، مانند شدت، مدت، بزرگی و وسعت مکانی از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌گردد (Eslahi et al., 2014). از طرفی، تحقیقات نشان می‌دهند که فشار و دمای شدید بین مرکز کم فشار موسمی هند و پرفشار دریای خزر، منجر به ایجاد طوفان‌های شدید می‌گردد (Alijani and Raeispor, 2011).

برای تعریف و تشریح دوره‌های خشک در مطالعات اقلیمی، از معیارهای متنوعی استفاده می‌شود. از جمله این معیارها می‌توان به روزهای متوالی بدون بارندگی، روزهای همراه با بارش کم، و بارش اندک تجمعی در یک بازه زمانی مشخص اشاره کرد. در خصوص تعریف بارش کم و اندک، اختلاف نظرهایی میان اقلیم‌شناسان مشاهده می‌شود. برخی از پژوهشگران، بارش روزانه کمتر از ۲ میلی‌متر را به عنوان آستانه بارش کم در نظر می‌گیرند؛ در حالی که برخی دیگر، معیار ۵ میلی‌متر در روز را ملاک قرار می‌دهند. این تفاوت در آستانه‌ها عمدتاً متأثر از شرایط اقلیمی منطقه، اهداف پژوهشی، و استانداردهای مورد استفاده در مطالعات هواشناسی و هیدرولوژی است. به طور کلی، انتخاب هر یک از این معیارها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ارزیابی شدت و تداوم دوره‌های خشک، پایش خشکسالی، و تحلیل‌های مرتبط با مدیریت منابع آب و کشاورزی داشته باشد. بنابراین، در پژوهش‌های علمی، ضروری است که آستانه مورد استفاده به صورت شفاف تعریف و توجیه گردد تا از یکنواختی و قابلیت مقایسه‌پذیری نتایج اطمینان حاصل شود. همچنین، معنی بدون بارش، بارش روزانه کمتر از ۰/۱ میلی‌متر در نظر بوده، زیرا اثر بسیار کم و اندکی بر اکوسیستم‌ها دارد. هواشناسان، روزهای سکانس و متوالی یک دوره بیشتر از ۱۵ روز خشکی متواتر را استفاده می‌کنند. عده‌ای دیگر، از یک پریود زمانی ۲۵ روزه بهره می‌جویند. علاوه بر این‌ها، استفاده از آستانه‌های بارشی دیگری همچون بیشتر یا مساوی ۰/۱ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۱۰ میلی‌متر و غیره را برای تحلیل فراوانی دوره‌های خشک استفاده کرده‌اند (Mahmoudi, 2013). با توجه به این که طول دوره‌های خشک به جهت استفاده از داده‌های بارش روزانه یک متغیر کمی گسسته به شمار می‌آید، از این‌رو روش‌های تصادفی زیادی جهت توصیف فراوانی قابل انتظار دوره‌های خشک استفاده شده‌اند. در این بین، بیشترین روشی که بارها مورد استفاده قرار گرفته است، مرتبه‌های مختلف زنجیره مارکوف است. در کشور ایران، مطالعات و پژوهش‌های متفاوتی در خصوص شناسایی رفتار روزهای مرطوب یا تر و خشک با استفاده از روش‌های زنجیره مارکوف انجام شده، اما پژوهشی که فقط طول دوره‌های خشک، و نه رفتار روزهای تر و خشک، را مورد توجه قرار داده باشد بسیار نادر است. Mahmoudi و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه رفتار طول دوره‌های خشک در ایران، با رویکرد تغییرات دما و بارندگی دهه‌های اخیر، پرداخته‌اند به طوری که منطقه شمال غرب ایران جزو مناطق خشک پهنه‌بندی شده است. در این مطالعه، پهنه‌بندی ایران بر اساس طول

دوره های خشک انجام گرفته است. یافته های تحقیق نشان می دهد که بخش قابل توجهی از کشور، به ویژه مناطق جنوب شرقی، با طولانی ترین دوره های خشک مواجه هستند. در این پژوهش، برازش زنجیره های مارکوف با مرتبه های مختلف بر داده های دوره های خشک (با آستانه ۰/۱ میلی متر) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در ایستگاه هایی با تنوع کم در حالت های بارش و عدم بارش (مناطق با دوره های خشک طولانی)، مدل های مارکوف با مرتبه پایین (مانند مرتبه اول یا دوم) بهترین عملکرد را دارند. در مقابل، در ایستگاه هایی با دوره های خشک کوتاه تر و تنوع بیشتر در الگوهای بارش (مناطق با تغییرپذیری بیشتر)، مدل های مارکوف با مرتبه های بالاتر (مانند مرتبه سوم یا چهارم) نتایج بهتری ارائه می دهند. همچنین، مطابق با مطالعات Jalali (۲۰۱۱) مدل سازی زمانی- مکانی بارش های فصلی نشان داده است که بارش در ایران از ساختار فضایی مشخصی برخوردار بوده و الگوی خوشه ای^۱ را دنبال می کند. به نظر می رسد که توزیع بارش در سطح کشور تصادفی نبوده و تحت تأثیر عوامل جوی و توپوگرافی، به صورت ناهمگن توزیع می شود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه پژوهش

ویژگی های اقلیمی استان سمنان به علت همجواری با کویر مرکزی ایران و دامنه جنوبی البرز دارای تنوع آب و هوایی زیادی است به طوری که با کاهش ارتفاع از شمال به جنوب در سطح استان، دما افزایش و بارش کاهش می یابد. با توجه به موقعیت عمومی استان می توان بیان نمود که شدید

ترین تضاد آب و هوایی در محور شمالی- جنوبی یعنی اقلیم نیمه مرطوب و مرطوب در شمال و در مقابل، اقلیم خشک و نیمه- خشک در جنوب استان دیده می شود. در شمالی ترین نقطه استان مناطقی با اقلیم خشک سرد نیز مشاهده می گردد، که به تدریج به مناطقی با اقلیم های متنوع در باریکه های کوهستانی تبدیل می گردد.

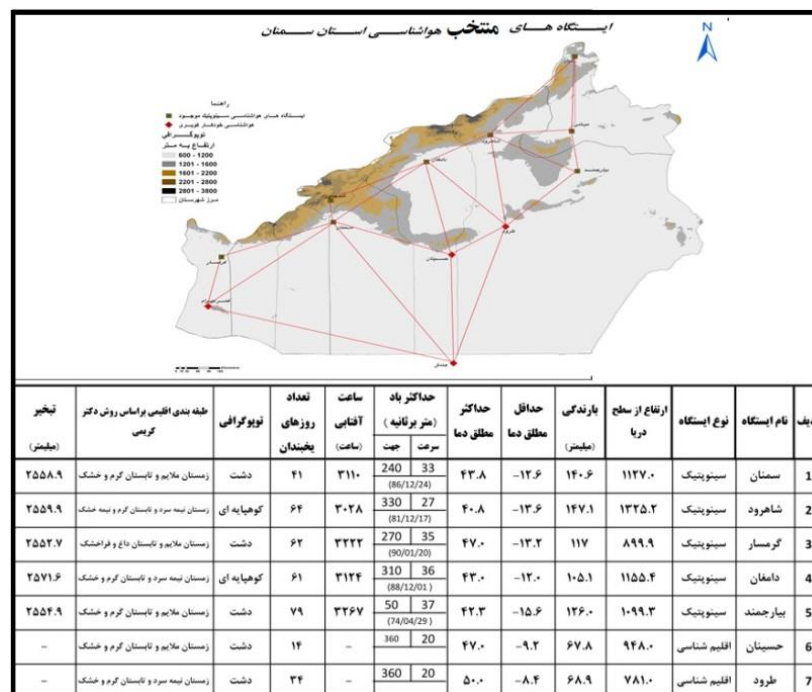
در این پژوهش، به منظور مدل سازی و پهنه بندی تغییرات طول دوره های خشک در استان سمنان و تعیین الگوریتم بهینه، داده های بارندگی روزانه ایستگاه های سینوپتیک طی دوره ۳۲ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۷) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. داده ها پس از کنترل کیفیت و پر کردن شکاف های آماری، بر اساس تقویم هواشناسی به چهار فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه)، بهار (مارس، آوریل و مه)، تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) و پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) طبقه بندی شدند. نتایج نشان می دهد، که ایستگاه های مورد مطالعه از پراکنش مناسبی در سطح استان برخوردارند (شکل ۱)، به طوری که توزیع فضایی آنها امکان انجام مطالعات پهنه بندی را فراهم می سازد. تمامی پردازش ها با استفاده از نرم افزارهای تخصصی انجام شد و دوره مطالعاتی انتخاب شده مطابق با استانداردهای سازمان جهانی هواشناسی (WMO) بود. یافته های مقدماتی حاکی از کیفیت مناسب داده ها برای انجام تحلیل های آماری پیشرفته و شناسایی الگوهای خشکسالی در منطقه مورد مطالعه می باشد.

۲-۲- روش تحقیق

بعد از تهیه داده ها و ایجاد مجموعه اطلاعاتی آنها، تعریفی از دوره ها و روزهای خشک جهت استخراج طول دوره های خشک عملی به نظر می رسد (Mahmoudi, 2013). در این پژوهش، آستانه ۰/۱ میلی متر بارش روزانه به عنوان معیار تعیین دوره های خشک انتخاب شد. نتایج نشان داد که میانگین طول این دوره ها در ایران از تغییرات مکانی چشمگیری برخوردار است، به طوری

¹. Clustering

که در مناطق شمالی بین ۲ تا ۶ روز و در سواحل جنوب شرقی به ۳۴ تا ۳۸ روز می‌رسد. بررسی تغییرات در امتداد نصف‌النهار ۵۶ درجه شرقی نشان دهنده کاهش ۶ برابری از ۳۰ روز در بندرلنگه به ۵ روز در گرگان است. این یافته‌ها به وضوح الگوی افزایشی طول دوره‌های خشک از شمال به جنوب کشور را تأیید می‌کند که با ویژگی‌های اقلیمی ایران مطابقت کامل دارد. مطالعه حاضر با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته، این تغییرات مکانی را به صورت کمی سنجش و تحلیل نموده است. به منظور مطالعه توزیع فضایی دوره‌های خشک در ایستگاه‌های سینوپتیک استان سمنان، دوره‌های خشک به زیرگروه‌های کوچکتری به شرح زیر طبقه‌بندی شدند: کوتاه‌مدت (۱-۱۰ روزه)، میان‌مدت (۱۱-۲۱ روزه)، بلندمدت (۲۱-۳۰ روزه) و دوره‌های بسیار درازمدت: بیشتر از ۳۰ روز. جهت بررسی نوع و تعیین ردیف توزیع دوره‌های خشک از الگوریتم داده‌ها و محاسباتی مدل آماری زنجیره مارکوف مرتبه دوم استفاده گردید. این روش اجازه می‌دهد تا احتمال وقوع یک دوره خشک دقیقاً n روزه که معادل $n = 1, 2, \dots, 30$ است محاسبه شود. با توجه به وضعیت توزیع زمانی و مکانی بارش در ایران، آستانه 0.1 میلی متر به عنوان معیاری برای به‌دست آوردن طول، توالی، دوره بازگشت خشکی و انتقال دوره‌های تر و خشک انتخاب شد.



شکل ۱. نقشه و جدول موقعیت و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک و اقلیم شناسی استان سمنان (هاشمی عنا، ۱۴۰۰)

Fig.1. Map and table of the location and distribution of synoptic and climatological stations in Semnan Province (Hashemi Ena, 2021/1400 AH).

۲-۳- رفتار دوره‌های خشک بر اساس مدل زنجیره مارکوف مرتبه دوم

در پژوهش حاضر، برای بهبود دقت تحلیل و غلبه بر محدودیت‌های روش‌های مرسوم، از مدل پیشرفته زنجیره مارکوف مرتبه دوم بهره گرفته شده است. این رویکرد تحلیلی، با در نظر گرفتن وابستگی‌های زمانی دو مرحله‌ای (Second-order dependencies)، از قابلیت بالاتری در شناسایی الگوهای پیچیده تناوب و تداوم روزهای خشک و بارانی برخوردار است. مطالعات مقایسه‌ای نشان می‌دهد که این روش در محیط‌های ناهمگن اقلیمی مانند ایران، با تغییرات مکانی چشمگیر، از دقت

پارامترسازی (Parameterization accuracy) بالاتری نسبت به مدل های مرسوم برخوردار است. ماتریس انتقال دو مرحله ای (Two-step transition matrix) در این مدل، امکان محاسبه دقیق تر احتمال تغییر وضعیت های جوی (P_{ij}) و برآورد قابل اعتمادتر شاخص های خشکسالی را فراهم می کند. تابع احتمال تجمعی طول دوره خشک $f_L(\ell)$ که از رابطه (۱) استخراج می شود، مبنای محاسبات دوره بازگشت (Return period) قرار گرفته است. این روش شناسی پیشرفته، با ترکیب تحلیل های احتمالاتی (Probabilistic analyses) و زمین آماری (Geostatistical approaches)، امکان مدل سازی فضایی-زمانی (Spatiotemporal modeling) دقیق تری از رفتار دوره های خشک در مقیاس کشوری را فراهم آورده است. نتایج این مطالعه می تواند مبنای علمی معتبری برای سیستم های هشدار خشکسالی و مدیریت ریسک اقلیمی ارائه نماید.

۲-۴- احتمال انتقال دوره ها

برازش داده های اقلیمی بر اساس الگوریتم زنجیره مارکوف انجام شده که در آن احتمالات انتقال (Transition probabilities) بین دوره های تر و خشک با دقت محاسبه گردید. برای ارزیابی میزان برازش مدل مارکوف مرتبه دوم (Second-order Markov chain) با توزیع نظری طول دوره های خشک، از آزمون ناپارامتریک کای-دو (χ^2 Goodness-of-fit test) استفاده شد. نتایج این آزمون نشان داد که مدل مذکور قادر به بازتولید مناسب توزیع تجربی (Empirical distribution) طول دوره های خشک در ایستگاه های مطالعاتی می باشد. مقدار بحرانی توزیع χ^2 در سطح معناداری ۰.۰۵ ($p\text{-value} < 0.05$) به عنوان معیار سنجش برازش مدل انتخاب گردید. این رویکرد تحلیلی، تصویر دقیق تری از ساختار تناوب دوره های خشک و تر ارائه نموده و امکان تقسیم بندی فضایی قابل اطمینان تری از الگوهای خشکسالی در منطقه مورد مطالعه فراهم می سازد. یافته ها حاکی از آن است که مدل مارکوف مرتبه دوم از قابلیت بالایی در شبیه سازی رفتار پیچیده دوره های خشک برخوردار است. در این مطالعه، تابع چگالی احتمال طول دوره های خشک ($f_L(\ell)$) با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه دوم به صورت دقیق مدل سازی شده است. این تابع به صورت زیر تعریف می شود:

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

که $f_L(\ell)$ تابع احتمال انتقال دوره ها، W احتمال روزهای تر یا بارانی و D احتمال رخداد روزهای خشک است. با تبدیل رابطه (۱) به ماتریس می توان رابطه (۲) را برای حالت های گذار یا انتقال دوره ها در نظر گرفت. ماتریس انتقال مارکوف به شکل رابطه (۲) به صورت ساختارمند احتمالات انتقال بین حالت های اقلیمی را کمی سازی می نماید. این ماتریس به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{matrix} D & W \\ W & \begin{pmatrix} n_{00} & n_{01} \\ n_{10} & n_{11} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

در این ماتریس، n_{00} نشان دهنده فراوانی روزهای خشک متوالی (تعداد روزهایی که پس از یک روز خشک، روز خشک دیگری اتفاق افتاده است)، n_{01} تعداد روزهای از یک روز خشک در پی یک روز خشک دیگر، n_{10} نشان دهنده فراوانی انتقال از تر به خشک (تعداد روزهای خشک پس از یک روز بارانی)، مجموع روزهایی که یک روز بارانی بعد از یک روز خشک ظاهر می شود و n_{11} بیانگر فراوانی روزهای بارانی متوالی (تعداد روزهایی که پس از یک روز بارانی، روز بارانی دیگری اتفاق افتاده) است.

۲-۵- تداوم و بازگشت توالی‌ها

مفهوم تداوم (Persistence) و بازگشت‌پذیری (Recurrence) توالی‌های اقلیمی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که Grace و Eagleson (۱۹۶۶) اشاره کرده‌اند، مشاهدات اقلیمی معمولاً مستقل نبوده و تمایل به تداوم زمانی دارند. برای تحلیل این ویژگی، تابع احتمالات انتقال دوره‌های بارشی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده و سپس دوره بازگشت (Return period) از رابطه (۳) استخراج می‌گردد:

$$T(\ell) = N/N_L = T/fL \quad (۳)$$

در این رابطه، $T(\ell)$ عبارت است از دوره بازگشت روزهای بارانی و خشک، N کل دوره رخداد، N_L تعداد مورد انتظار رخداد، f_L بعد زمانی مورد انتظار و T مجموع دوره‌های بازگشت‌پذیر. توزیع هندسی دوره‌های بازگشت خشک و بارانی از رابطه (۴) به دست می‌آید. برای مدل‌سازی توزیع دوره‌های بازگشت از توزیع هندسی استفاده شده است. این توزیع، به دلیل ماهیت گسسته و توانایی در مدل‌سازی تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای اولین موفقیت، برای تحلیل توالی‌های خشک و تر بسیار مناسب است.

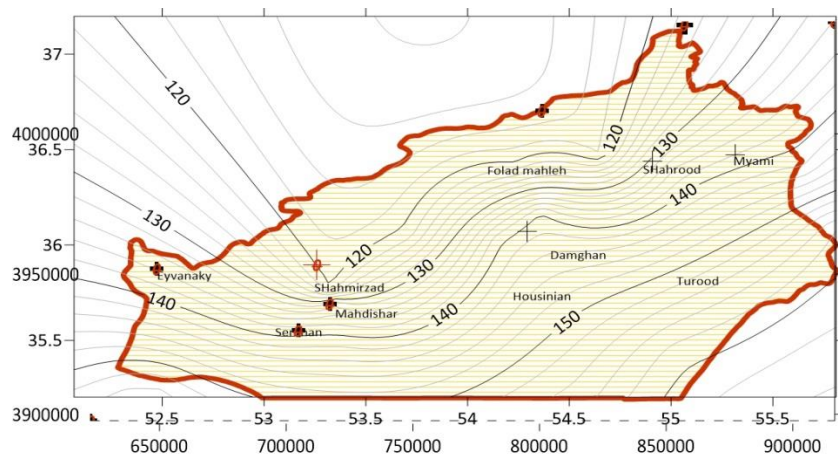
$$T = E(L_D) + E(L_W) = 2 + [P(D | WD)/P(W | DD)] + [P(W | DW)/P(D | WW)] \quad (۴)$$

در مدل ریاضی بالا، $E(L_D)$ متوسط زمان دوره‌های خشک، $E(L_W)$ میانگین دوره‌های بارانی، $P(D | WD)$ درصد احتمال یک دوره خشک وابسته به حاصل ضرب تر و خشک، $P(W | DD)$ درصد احتمال یک دوره بارانی وابسته به مجموع حاصل ضرب دو دوره خشک پی در پی و متوالی است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توالی‌های بسیار بلندمدت

طولانی‌ترین طول دوره‌های خشکی با آستانه پیش‌فرض در توالی زمانی پژوهش در طول دوره خشک در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر در ناحیه بیارجمند در جنوب شرق استان با بیش از ۱۵۰ روز ثبت شده است (شکل ۲).



شکل ۲. طولانی‌ترین طول دوره‌های خشک سالانه با آستانه بارشی ۰/۱ میلی‌متر در دوره زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۷

Fig.2. The longest annual dry spell lengths with a precipitation threshold of 0.1 mm during the period 1985–2017

مطالعه دوره های خشک بسیار بلندمدت در مقیاس زمانی سالانه نیز نشان داد که حداکثر فراوانی این دوره ها با آستانه ۰/۱ میلی متر متعلق به ایستگاه حسینیان در جنوب شهرستان دامغان با ۷۰ مورد بوده است. قابل ذکر است که با توجه به تمرکز پراکنش ایستگاه ها در قسمت های نیمه شمالی استان، درون یابی برای بخش های جنوبی و کویری فاقد ایستگاه، بر اساس روش کریجینگ در نرم افزار سورفر انجام شده است. این مورد بدین معنا است که در طول ۳۰ سال در ایستگاه مورد مطالعه، روزهای خشک بیشتر از ۳۰ روز بوده است. کمترین فراوانی نیز مربوط به ایستگاه های بین استان سمنان با مازندران و گلستان در شمال غربی استان بوده است (شکل ۳).

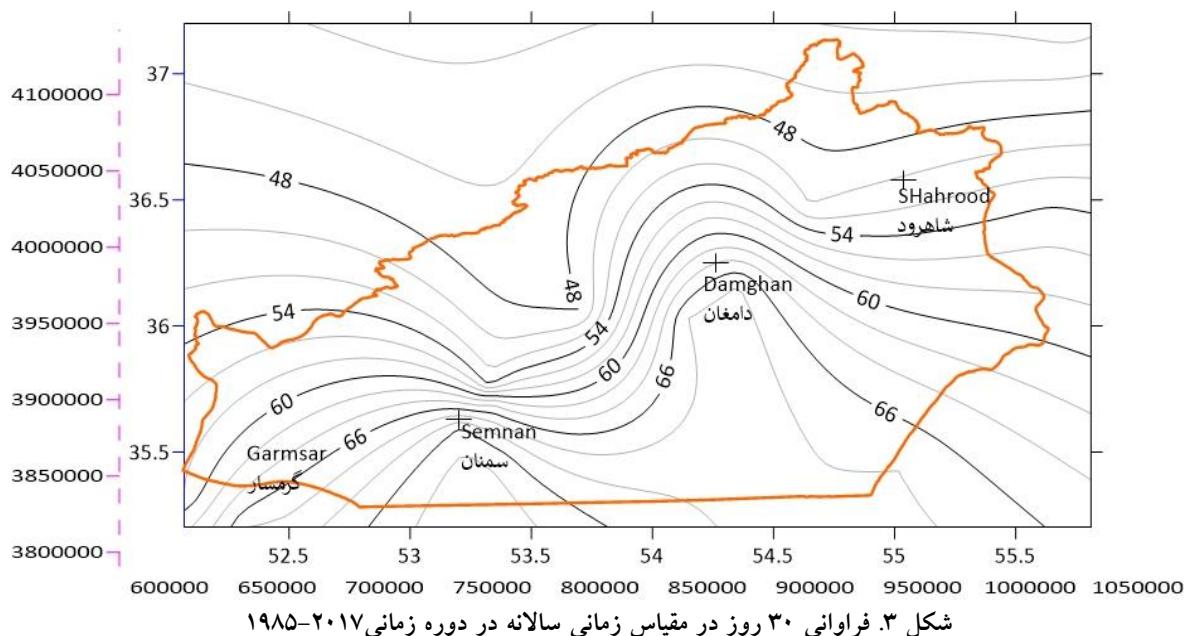


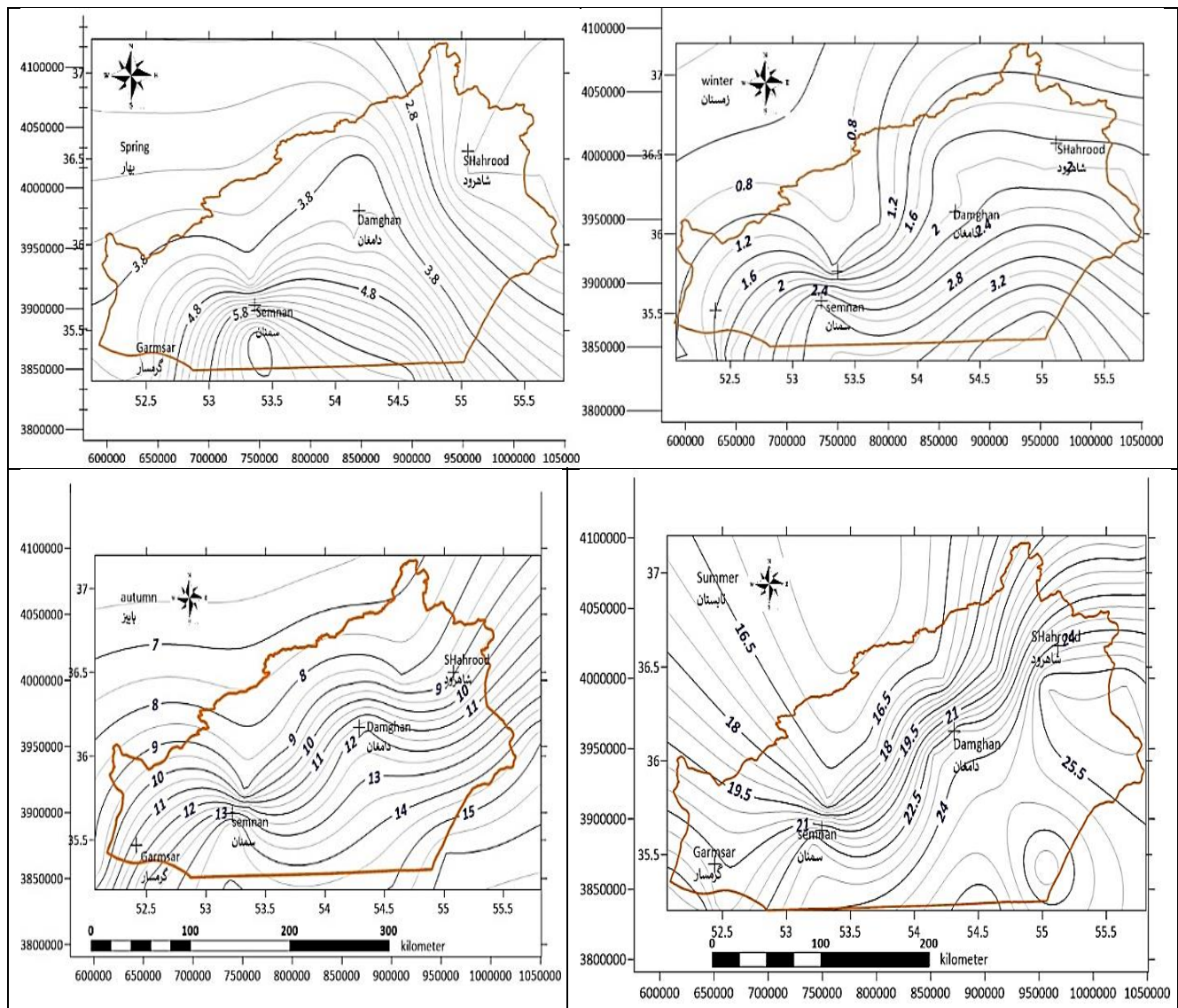
Fig.3. The frequency of 30-day dry spells on an annual timescale during the period 1985–2017.

از طرفی، بارش مناطقی از استان سمنان از یک رژیم زمستانه پیروی می کند (شکل ۴). در فصل بهار، الگوی توزیع فضایی فراوانی طول دوره های خشک بسیار بلندمدت مقداری متفاوت تر می باشد. حداکثر فراوانی طول دوره های خشک بسیار طولانی مدت در این فصل مربوط به مناطق جنوبی و کویری استان بوده است که از روند خطوط با آرایش مکانی مشخص وابسته به عرض جغرافیایی کشور نیز تبعیت می کند (شکل ۴). نتایج این پژوهش نشان می دهد که توزیع مکانی دوره های خشک بلندمدت (Extended dry spells) در فصل تابستان از همبستگی فضایی معنی داری با الگوی کلان مقیاس اقلیمی ایران برخوردار است ($p < 0.01$). این همخوانی ساختاری ناشی از استقرار پایدار سامانه پرفشار جنب حاره ای (Subtropical high pressure) و حاکمیت رژیم تابستانه خشک (Summer dry regime) بر پهنه فلات ایران می باشد. آنالیزهای آماری حاکی از آن است که در فصل تابستان، بیشینه فراوانی دوره های خشک با تداوم بیش از ۳۰ روز (Extreme dry periods) در ایستگاه های جنوبی استان سمنان شامل تروند و معلمان (با میانگین $4/2 \pm 3/5$ دوره) رخ داده است که این امر بیانگر تأثیرپذیری شدید این مناطق از سامانه های خشک زای کویر مرکزی (Central desert dry systems) می باشد. در مقابل، ایستگاه های شمالی استان شامل کلاته و فولادمحله با میانگین $1/1 \pm 5/2$ دوره خشک بلندمدت، کمترین آسیب پذیری را از این سامانه نشان می دهند. در فصل پاییز، گرادیان اقلیمی محسوسی در امتداد عرض جغرافیایی مشاهده می شود. به طوری که ایستگاه های واقع در مرز اقلیمی

مازندران-سمنان (با میانگین $3/1 \pm 2/8$ دوره) تحت تأثیر نفوذ توده‌های هوای مرطوب خزری (Caspian moisture advection) قرار داشته‌اند. در حالی که ایستگاه‌های جنوبی استان (با میانگین $6/3 \pm 32/5$ دوره) همچنان تحت سیطره سامانه‌های خشک قاره‌ای باقی مانده‌اند. این یافته‌ها به‌وضوح دلالت بر وجود ناهمگنی فضایی-زمانی در توزیع دوره‌های خشک استان دارد که باید در مدل‌های پیش‌آگاهی خشکسالی و برنامه‌ریزی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی مورد توجه قرار گیرد. در حالی که ایستگاه‌های نیمه‌جنوبی استان بیش از ۳۰ مورد را تجربه کرده‌اند (شکل ۴).

تحلیل آماری داده‌های اقلیمی استان سمنان نشان می‌دهد که توزیع مکانی دوره‌های خشک کوتاه‌مدت (۱-۱۰ روزه) از الگوی فضایی مشخصی تبعیت می‌کند، به‌طوری که بیشینه فراوانی (بیش از ۳۰ مورد) در نوار گذار اقلیمی بین منطقه خزری و کوهستانی استان و کمینه فراوانی (کمتر از ۱۹ مورد) در جنوبی‌ترین بخش‌ها مشاهده می‌شود ($p < 0.05$). این الگو از گرادیان کاهشی معناداری از شمال به جنوب برخوردار است که عمدتاً ناشی از نقش تعدیل‌کنندگی رطوبتی دریای خزر و تأثیر توپوگرافی کوهستانی می‌باشد. در مورد دوره‌های خشک میان‌مدت (۱۱-۲۰ روزه)، اگرچه الگوی فضایی مشابهی مشاهده می‌شود، اما مقادیر فراوانی به میزان ۳۵-۴۰ درصد کاهش یافته و شیب گرادیان شمالی-جنوبی نیز کمتر می‌شود. این یافته‌ها که به‌خوبی در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. اهمیت توجه به تغییرات درون‌استانی در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب و تدوین راهبردهای مقابله با خشکسالی برجسته می‌شود و لزوم در نظر گرفتن این الگوها در مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی منطقه‌ای تأکید می‌گردد (شکل ۵). برای دوره‌های میان‌مدت (۲۰-۱۱ روز) نیز می‌توان الگویی تقریباً مشابه با توالی‌های کوتاه‌مدت، اما با فراوانی‌های بسیار کمتر، را تشخیص داد.

بررسی جامع الگوهای خشکسالی بلندمدت در استان سمنان نشان‌دهنده تفاوت‌های چشمگیر فصلی و جغرافیایی است. با توجه به اهداف پژوهش و به دلیل اهمیت دوره‌های خشک بلندمدت (۳۰-۲۱ روز) به استخراج و تحلیل توالی‌های بلندمدت پرداخته شد. البته فراوانی دوره‌های خشک (۳۰-۲۱ روز) بسیار کم هستند. برای فصل زمستان و بهار هیچ کدام از ایستگاه‌ها به طور میانگین یک مورد را نیز نشان نداده‌اند (شکل ۶). در فصل تابستان، الگوی متفاوتی نسبت به دیگر الگوهای این دسته از طول دوره‌های خشک مشاهده می‌شود. نتایج تحلیلی در باره دوره‌های خشک بلندمدت (۲۱ تا ۳۰ روزه) در استان سمنان حاکی از وجود الگوهای متفاوت در فصول مختلف سال بود. این پژوهش که با هدف بررسی دقیق توالی‌های خشک بلندمدت انجام شده، نشان می‌دهد که فراوانی این دوره‌ها در استان سمنان به‌طور کلی کم بوده، اما توزیع زمانی و مکانی خاصی دارد.



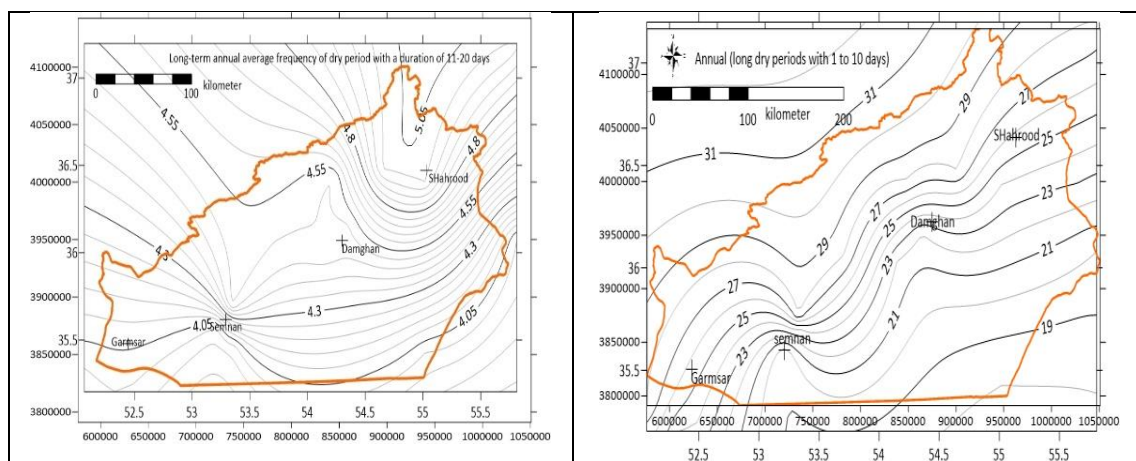
شکل ۴. فراوانی دوره های خشک بسیار بلندمدت (بیشتر از ۳۰ روز) در مقیاس زمانی فصلی در دوره زمانی ۱۹۸۵–۲۰۱۷

بالا سمت راست: فصل زمستان، بالا سمت چپ: فصل بهار، پایین سمت راست: فصل تابستان، پایین سمت چپ: فصل پاییز

(مطالعات برنامه آمایش استان سمنان، ۱۳۹۵)

Fig.4. The frequency of very long-term dry spells (greater than 30 days) on a seasonal timescale during the period 1985–2017.

Top right: Winter season, top left: Spring season, bottom right: Summer season, bottom left: Autumn season.



شکل ۵: توزیع فضایی میانگین سالانه فراوانی طبقات مختلف دوره‌های خشک مشاهده شده در استان سمنان

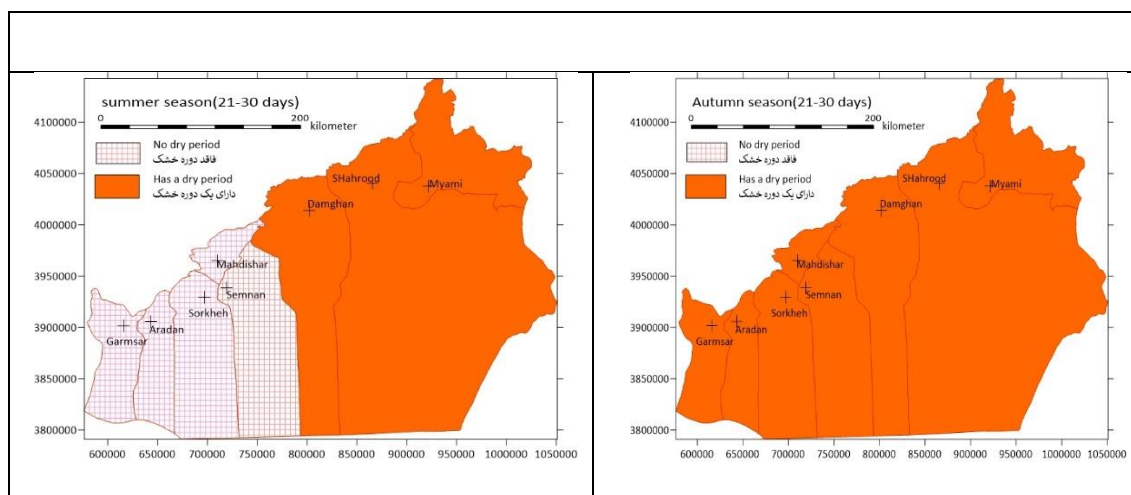
بالا سمت راست: دوره‌های خشک ۱۰-۱ روز، بالا سمت چپ: دوره‌های خشک ۲۰-۱۱ روز و پایین: دوره‌های خشک ۳۰-۲۱ روز

Fig.5. Spatial distribution of the annual mean frequency of different observed dry spell classes in Semnan Province.

در فصول زمستان و بهار، داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک استان نشان می‌دهد که به‌طور میانگین حتی یک مورد از این دوره-های خشک بلندمدت نیز ثبت نشده است. این وضعیت احتمالاً ناشی از سیستم‌های بارشی فعال و توزیع مناسب بارش‌ها در این فصول است. اما در فصل تابستان، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود. در حالی که ایستگاه‌های غربی استان شامل گرمسار، سمنان، سرخه، ایوانکی و شهمیرزاد هیچ موردی از خشکسالی بلندمدت را نشان نداده‌اند. ایستگاه‌های شرقی مانند شاهرود، بیارجمند، رضوان و میامی هر کدام حداقل یک دوره خشک بلندمدت را در این فصل تجربه کرده‌اند. این تفاوت آشکار می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری متفاوت این مناطق از سیستم‌های جوی و همچنین ویژگی‌های خاص جغرافیایی هر ناحیه باشد. جالب توجه‌ترین یافته مربوط به فصل پاییز است که در آن تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک استان حداقل یک دوره خشک بلندمدت را ثبت کرده‌اند. این امر نشان‌دهنده آسیب‌پذیری ویژه استان در این فصل و لزوم توجه خاص به مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی است. کارشناسان توصیه می‌کنند که برای درک بهتر این الگوها، مطالعات بیشتری در باره ارتباط این دوره‌های خشک با شاخص‌های اقلیمی جهانی و همچنین بررسی دقیق‌تر مکانیسم‌های تشکیل آنها در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر انجام شود. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر برای مقابله با خشکسالی و مدیریت بهینه منابع آب در استان کمک شایانی کند.

در فصل تابستان، یک الگوی متفاوت‌تری نسبت به دیگر الگوهای این دسته از طول دوره‌های خشک مشاهده می‌شود. در این فصل به جز چند ایستگاه گرمسار، سمنان، سرخه، ایوانکی و شهمیرزاد در غرب استان که هیچ دوره خشک بلندمدت را ثبت نکرده‌اند، در مقابل، ایستگاه‌های شاهرود، بیارجمند، رضوان و میامی در شرق استان سمنان یک دوره خشک بلندمدت را در این فصل داشته‌اند. خلاصه اینکه در فصل پاییز همه ایستگاه‌های سینوپتیک استان تجربه دوره خشک بلندمدت را داشته‌اند

(شکل ۶)



شکل ۶: توزیع مکانی میانگین فراوانی دوره های خشک با طول مدت ۲۱-۳۰ روز در مقیاس فصلی

Fig.6. Spatial distribution of the mean frequency of 21-30 day dry spells on a seasonal scale.

۴- نتیجه گیری

تنوع و گوناگونی الگوی رفتار اقلیمی در مساحت وسیعی از کشور ایران و استان پهناور سمنان به علت کاهش میزان بارندگی، افزایش آلودگی هوا و ریزگرد ها لزوم بررسی الگوی رفتاری دوره های خشک وابسته به بارش را ضروری می سازد. از طرفی، با استخراج تداوم های خشک وابسته به بارش و تعیین دوره بازگشت آنها شناخت درستی از الگوی رفتاری دوره های خشک منجر به خشکسالی بدست خواهیم آورد. برای تحقق این شناخت بایستی از مدل ها و ابزارهای آماری دقیق جهت شناخت الگو و رفتار دوره های خشک استفاده شود تا نتایج دقیق تری حاصل شود.

با استناد به اینکه در دهه های آتی، اقلیم استان سمنان به تبع اقلیم ایران به سمت افزایش دما و کاهش بارش پیش می رود، متغیرهای مورد بررسی حاکی از این است که کاهش میزان بارش در اغلب نواحی استان کاملاً مشهود است و دمای کمینه و بیشینه نیز در سمت شرق و شمال این استان افزایش قابل توجهی خواهد داشت (Hejazizadeh et al., 2014). نتایج حاصله نشان دهنده آن است که روش مارکوف روشی قوی، دقیق و قدرتمند در برآورد پیش بینی طول و زمان وقوع دوره های خشک بوده و نتایج بسیار نزدیکی به واقعیت و زمان رخداد خشکی ارائه نموده است. به طور کلی، نتایج نقشه های پهنه بندی نشان دهنده اختلاف کمتر نتایج حاصله از مدل مارکوف با مشاهداتی در قسمت های شمالی استان بوده که به تدریج به سمت جنوب به این اختلافات افزوده می شود. لزوم برنامه ریزی منطقه ای، به صورت پهنه ای درحاشیه شمالی کویر مرکزی ایران و جنوب رشته کوه البرز از اهمیت خاصی برخوردار است؛ به خصوص در مناطق شرقی و شهرستان شاهرود و جنوبی استان مانند حوزه انارک و جندق که به صورت ذاتی دچار بحران و کمبود آب هستند. همچنین، نتایج تحقیق حاکی از پهنه گسترده مواجهه با روزهای بدون بارش یا کمتر از آستانه در مناطق شرقی و جنوبی استان سمنان می باشد. از طرفی، کمبود ایستگاه سینوپتیک هواشناسی در مناطق جنوبی و کویری مشهود است. بنابراین مدیریت منابع آب و خاک و مسئله یابی با شناخت دقیق از سازوکار رفتاری طول دوره های خشک محقق خواهد شد. خشک سالی یکی از مخاطرات و بحران های طبیعی است که در بیشتر نقاط دنیا اتفاق می افتد؛ ولی پدیداری آن در مناطق خشک و نیمه خشک بیشتر است. هدف از این پژوهش، شناسایی خشک سالی - ترسالی های شدید و فراگیر در نیمه شمال شرقی و به ویژه شرقی ایران و در استان سمنان است. البته مفید بودن و ساده بودن مدل های شاخص خشک سالی مارکوفی برای مطالعه دوره های خشک در بخش بزرگی از ایران

می‌باشد. سمت جریان باد در سطوح نزدیک به زمین در طی سال‌های خشک به دلیل نفوذ سامانه پرفشار سیبری شمالی بوده و با قرارگیری جریان‌ها روی شبه جزیره عربستان مانع از ایفای نقش دریا‌های جنوبی و غربی در فرارفت رطوبت می‌شود. اما در سال‌های مرطوب منتخب، با عقب‌نشینی پرفشار قدرتمند سیبری و نفوذ سامانه‌های کم فشار، سمت باد در سطح زمین و میانی، جنوبی و غربی شده و دریا‌های مجاور ایران، به ویژه جنوبی، همچون دریای عرب و خلیج فارس، نقش تأمین رطوبت را در زمان رخداد ناپایداری و ترسالی‌های فراگیر بر عهده دارند.

بررسی الگوهای خشکسالی در استان سمنان نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی، کاهش بارش‌ها و افزایش دما به‌ویژه در مناطق شرقی و جنوبی استان، چالش‌های جدی در مدیریت منابع آب ایجاد کرده است. مدل مارکوف به‌عنوان ابزاری دقیق، توانسته رفتار دوره‌های خشک را با دقت بالایی پیش‌بینی کند. اما کمبود ایستگاه‌های سینوپتیک در نواحی کویری نیازمند توجه ویژه است. نتایج حاکی از آن است که در سال‌های خشک، نفوذ پرفشار سیبری مانع از انتقال رطوبت می‌شود؛ در حالی که در سال‌های مرطوب، سامانه‌های کم‌فشار جنوبی و غربی نقش کلیدی در تأمین بارش دارند. برای مقابله با خشکسالی‌های بلندمدت، برنامه‌ریزی منطقه‌ای، مدیریت یکپارچه منابع آب و توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر ضروری است. این یافته‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران در کاهش اثرات خشکسالی و سازگاری با تغییرات اقلیمی کمک شایانی کند.

۵- تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید نویسنده است.

۶- مشارکت نویسندگان

کلیه مراحل تهیه و تجزیه و تحلیل داده‌ها و ویرایش توسط نویسنده مقاله انجام شده و هر گونه مسئولیت اخلاقی و حقوقی آن بر عهده نویسنده است.

۷- اصول اخلاقی نویسندگان

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت گردیده و این موضوع مورد تأیید نویسنده می‌باشد.

۸- حمایت مالی

این مقاله با حمایت مالی نویسنده به انجام رسیده است.

۹- مراجع

1. Alijane, B., & Raeispor, K. (2011). Statistical, Synoptical analysis of sand storms in SE Iran (Study case: Sistan region). *Arid Regions Geographic Studies*, 2(5), 107-130. [In Persian]
2. Alley, W. M. (1985). The Palmer drought severity index as a measure of hydrologic drought. *Journal of the American Water Resources Association*, 21(1), 105-114.
3. Asakereh, H., Masoudian, S. A., & Tarkarani, F. (2019). Revealing the long-term trend of annual rainfall in Iran in relation to the change in the frequency of daily rainfall events. *Geography and Environmental Hazards*, 36, 121-141. [In Persian]
4. Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108(8), 11197-1211.
5. Cancelliere, A., & Salas, J. D. (2010). Drought length probabilities for periodic-stochastic hydrologic data. *Water Resources Research*, 40(5), W02503.
6. Dahale, S. D., Panchawagh, N., Singh, S. V., & Ranatunge, E. R. (1994). Persistence in rainfall occurrence over Tropical South-East Asia and equatorial Pacific. *Theoretical and Applied Climatology*, 49(1), 2739.

7. Douguedroit, A. (1987). The variations of dry spells in Marseilles from 1865 to 1984. *Journal of Climatology*, 7, 541-551.
8. Eslahi, M., Sobhani, B., & Pourasghar, F. (2014). Studying and applying the standardized precipitation evapotranspiration index (Case study: Tabriz meteorological station). *Journal of Climate Change*, 19(5), 23-38. [In Persian]
9. Grace, R. A., & Eagleson, P. S. (1966). The synthesis of short-time-increment precipitation sequences. Hydrodynamics Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA (No. 91), Report 13.
10. Hejazizadeh, Z., Hosseini, S. M., & Karbalaee Dorei, A. (2014). The simulation of climate change in Semnan province with the scenario of general atmospheric circulation model. *Geography and Environmental Hazards*, 3(4), 1-24. [In Persian]
11. Jalali, M., Kargar, H., & Sultani, S. (2011). Investigating the probability of rainy days in Urmia using the Markov chain model. *Geographical Space Journal*, 11(35), 257-235. [In Persian]
12. Mahmoudi, P., Parveen, N., & Rezaei, J. (2013). Zoning of Iran based on the length of dry periods. *Journal of Geographical Studies of Dry Areas*, 13, 85-106. [In Persian]
13. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration time scales. In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, 17-22 January, American Meteorological Society, USA.
14. McNeeley, S. M., Beeton, T. A., & Ojima, D. S. (2016). Drought risk and adaptation in the interior United States: Understanding the importance of local context for resource management in times of drought. *Weather Climate and Society*, 8, 147-161.
15. Mirzaei Hassanlu, A., Abghari, H., & Erfanian, M. (2020). Evaluation of SPEI drought index and trend analysis using nonparametric methods in the selected stations of Urmia lake basin. *Journal of Watershed Management Research*, 11(22), 175-187. [In Persian]
16. Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2023). Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Water and Soil*, 37(3), 473-486. [In Persian]