

## مدل‌سازی فضایی-زمانی احتمال وقوع روزهای همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران

خدیدجه جوان\* - استادیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه  
محمدرضا عزیززاده - مربی گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۳

### چکیده

توفان‌های تندری از فراوان‌ترین و شدیدترین مخاطرات آب و هوایی هستند که به دلیل همراهی با رعد و برق، باد شدید، و تگرگ و بارش‌های شدید موجب خسارات زیادی در سراسر دنیا می‌شوند؛ بنابراین، شناخت فراوانی، احتمال وقوع، و دوره بازگشت این توفان‌ها می‌تواند کمک فراوانی در جهت کاهش خسارات کند. هدف از این پژوهش مدل‌سازی فضایی-زمانی احتمال وقوع روزهای همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه با استفاده از مدل زنجیره مارکف است. بدین منظور، از گداهای مربوط به توفان تندری (۹۵-۹۹) در ۱۹ ایستگاه سینوپتیک منطقه در دوره آماری شانزده‌ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۵) استفاده شد. ماتریس فراوانی، ماتریس احتمال انتقال، و ماتریس پایا محاسبه شد و در نهایت توزیع فضایی احتمال وقوع و دوره بازگشت رعد و برق‌ها ترسیم شد. نتایج نشان می‌دهد احتمال وقوع رعد و برق‌های دو و سه‌روزه در شمال شرقی و جنوب منطقه مورد مطالعه کم است؛ ولی در بخش‌های مرکزی و شمال غربی بیشتر است. به ازای افزایش طول دوره رعد و برقی، دوره بازگشت آن به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. توزیع فضایی ماتریس پایا نیز نشان می‌دهد که احتمال وقوع رعد و برق در مناطق جنوبی و شمال شرقی کمتر است و مناطق مرکزی، شمالی، و شمال غربی بیشترین احتمال وقوع رعد و برق در بلندمدت را دارند.

کلیدواژه‌ها: احتمال وقوع، دوره بازگشت، روز همراه با رعد و برق، زنجیره مارکف، شمال غرب ایران.

### مقدمه

در سراسر جهان بلایا و مخاطراتی روی می‌دهد که همواره جان و مال بشر را در معرض خطر قرار می‌دهد. کشور ایران نیز در یکی از مناطق حادثه‌خیز کره زمین قرار گرفته است؛ به طوری که از ۴۰ نوع بلایای طبیعی در جهان بیش از ۳۰ مورد آن در ایران رخ می‌دهد (محمدی، ۱۳۸۷: ۳۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که حدود ۹۰ درصد از بلایای طبیعی جهان در ارتباط با عوامل اقلیمی است؛ سیل ۳۵ درصد و توفان‌ها ۳۰ درصد از سهم این بلایا را به خود اختصاص می‌دهند (سازمان هواشناسی، ۱۳۸۵: ۱۸). در برخی مناطق، پس از سیل و توفان، توفان‌های تندری سهم زیادی در خسارات ناشی از بلایای طبیعی دارند (چانگنون، ۲۰۰۱: ۱۹۲۵). این توفان‌ها یا بر اثر گرم‌شدن زیاد سطح زمین در داخل توده‌های هوا یا در جبهه‌های هوا، به ویژه در جبهه سرد، به وجود می‌آیند (کاوایانی و علیجانی، ۱۳۷۵: ۳۱۰). همه خصوصیات بارز یک توفان تندری مانند باد شدید، تگرگ، رعد و برق، و وقوع رگبار بسیار شدید تماماً حاصل ایجاد یک سلول همرفتی بزرگ در جو است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۰: ۱۴۵). توفان‌های تندری جزو پدیده‌های مخرب اقلیمی به‌شمار می‌روند که همه‌ساله خسارات جبران‌ناپذیری به صورت تگرگ، بارش‌های سیل‌آسا، و رعد و برق به تأسیسات، مزارع، و منازل وارد می‌کنند؛ بنابراین، شناخت این پدیده‌ها و احتمال وقوع آن‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

از آنجا که پدیده‌های اقلیمی از جمله توفان‌های رعد و برق به عنوان پدیده‌های تصادفی به طور دقیق پیش‌بینی‌شدنی نیستند، می‌توان با مشاهده پیاپی آن‌ها اطلاعات مفیدی به دست آورد که این امر از طریق قوانین احتمالات امکان‌پذیر است. مدل زنجیره مارکف روشی رایج برای مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی است (ویلکز، ۲۰۰۶: ۳۳۹). این مدل یکی از مدل‌های آماری است که در آن به بررسی ارتباط زمانی پدیده‌های گوناگون اقلیمی پرداخته می‌شود و متداول‌ترین روش برای بررسی فراوانی توالی‌های پدیده‌های آب و هوایی است. در این روش، احتمال وقوع یک حالت اقلیمی در زمان  $t$  بر اساس وضعیت آن در زمان قبل ( $t-1$ ) پیش‌بینی می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۷: ۲۸۰). تئوری زنجیره مارکف حل بسیاری از مسائل احتمالات را ساده کرد. این مدل در علوم مختلف از جمله علوم مرتبط با جو کاربرد وسیعی یافته است. در چند دهه اخیر، محققان در زمینه‌های مختلف آب و هوایی مانند بارش (مون و همکاران، ۱۹۹۴؛ گارگ و سینگ، ۲۰۱۰؛ حسین و آنام، ۲۰۱۲؛ یوسف و همکاران، ۲۰۱۴)، خشک‌سالی (پائولو و همکاران، ۲۰۰۷؛ لازری و همکاران، ۲۰۱۵؛ رحمت و همکاران، ۲۰۱۶)، سرعت باد (سپین و سن، ۲۰۰۱؛ کانتز و همکاران، ۲۰۰۴؛ سونگ و همکاران، ۲۰۱۱)، و تابش خورشیدی (پوگی و همکاران، ۲۰۰۰؛ وارتسوس و همکاران، ۲۰۰۷) از این مدل استفاده کرده‌اند.

رعد و برق، به عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های جوی، به علت عملکردهای بارز اقلیمی و تحمیل اثرهای فاجعه‌بار محیطی و انسانی، مورد توجه بسیاری از اندیشمندان و محققان در شاخه‌های مختلف علوم از جمله علوم جوی است. داسگوپتا و دی (۲۰۰۱) احتمال روزهای همراه با رعد و برق در کلکته در فصل پیش از مونسون (مارس تا ژوئن) را با استفاده از مدل زنجیره مارکف محاسبه و تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که احتمال وقوع رعد و برق در کلکته در این فصل کم و در حدود ۰/۲۶ است. کولکارنی و همکاران (۲۰۰۲) سری‌های زمانی روزهای همراه با رعد و برق را با استفاده از مدل زنجیره مارکف دو حالتی مرتبه اول، مرتبه دوم و مرتبه سوم در منطقه پون<sup>۱</sup> در هند تحلیل کردند. نتایج پژوهش نشان داد که احتمال وقوع تعداد روزهای همراه با رعد و برق با مدل مارکف مرتبه اول برازش خوبی دارد. تافرتر و همکاران (۲۰۰۸) رشد و گسترش توفان‌های رعد و برق در حوضه آبریز بالای دانوب را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تکوین سریع این توفان‌ها در محل تشکیل تأثیر زیادی در بارش‌های سنگین و سرعت بالای بادها در اروپای مرکزی دارد. باساک و همکاران (۲۰۱۲) کاربرد شبکه‌های عصبی را در مدل‌سازی روزهای همراه با رعد و برق در کلکته در فصل پیش از مونسون با استفاده از داده‌های روزانه شامل فشار هوا، دما، سرعت باد، دمای نقطه شبنم، و داده‌های رادیو سوند در طول دوازده سال (۱۹۸۵-۱۹۹۶) بررسی کردند و روزهای همراه با رعد و برق را برای سه سال آینده پیش‌بینی کردند. چاتوپدهای و همکاران (۲۰۱۲) احتمال وقوع روزهای همراه با رعد و برق را در ناحیه اوريسا<sup>۲</sup> در هند در فصل پیش از مونسون بررسی کردند. آن‌ها از زنجیره مارکف مرتبه اول دو حالتی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که، بدون بررسی خودهمبستگی سری‌های زمانی رعد و برق، مدل مارکف نمی‌تواند به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی رعد و برق مورد استفاده قرار گیرد. پینتو و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه تغییرات درازمدت روزهای همراه با رعد و برق در جنوب شرق برزیل در طول یک قرن گذشته پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که، هم‌زمان با افزایش سطحی زمین، افزایش قابل توجهی در فعالیت رعد و برق در این منطقه دیده می‌شود. سونادرا (۲۰۱۶) به بررسی تغییرات زمانی- مکانی روزهای همراه با رعد و برق در سریلانکا پرداخت و به این نتیجه رسید که افزایش یا کاهش قابل ملاحظه‌ای در

1. Pune  
2. Orissa

فراوانی رعد و برق در سریلانکا وجود ندارد. همچنین، فعالیت توفان‌های تندری در مناطق مرطوب (جنوب‌غربی) بیشتر از مناطق خشک است.

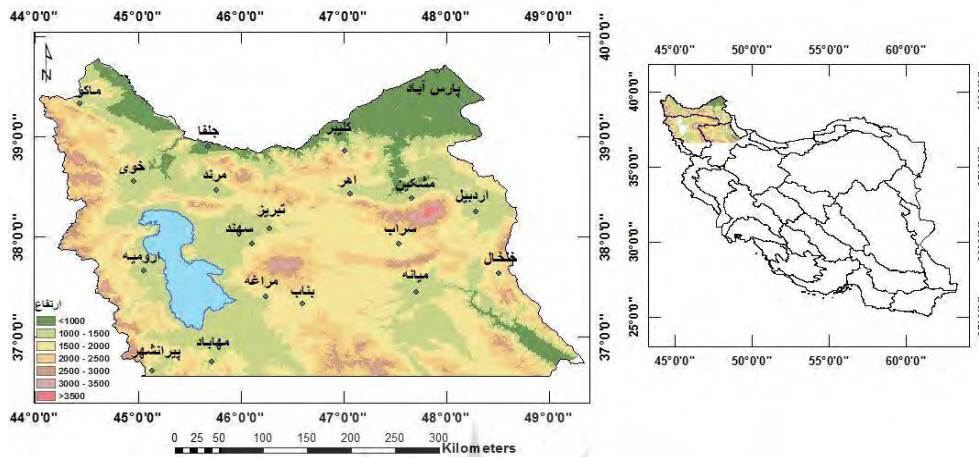
رسولی (۱۳۸۴) توزیع زمانی بارش‌های رعد و برقی را در محدوده شهر تبریز بررسی کرد و احتمال وقوع این نوع بارش‌ها را در فصول بهار و تابستان به اثبات رساند. رسولی و همکاران (۱۳۸۶) تغییرات زمانی- مکانی و توزیع بارش‌های تندری را در شمال‌غرب ایران مطالعه کردند و نشان دادند که بارش‌های تندری در بهار و تابستان بیشتر است و عمدتاً در جنوب‌غرب منطقه و کوهستان‌ها فعال است و در نواحی پست کمتر رخ می‌دهد. صلاحی (۱۳۸۹) به بررسی ویژگی‌های آماری و هم‌مدید توفان‌های تندری در استان اردبیل پرداخت و به این نتیجه رسید که بیشترین رخداد توفان‌های تندری متعلق به ماه می (اردیبهشت) است. رسولی و جوان (۱۳۹۱) به تحلیل روند وقوع رعد و برق در نیمه غربی ایران با استفاده از دو آزمون ناپارامتری من- کندال و سنس استیمیتور پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نیمه غربی ایران، از لحاظ تعداد وقوع روزهای همراه با رعد و برق، منطقه همگنی نیست و مشاهدات در مقیاس سالانه از شمال به سمت جنوب کاهش می‌یابد. همچنین، بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس‌های فصلی و سالانه دارای روند افزایشی‌اند. لشکری و آقاسی (۱۳۹۲) به تحلیل سینوپتیکی توفان‌های تندری تبریز در فاصله زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۹۹۵ پرداختند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که همه شرایط لازم برای ایجاد توفان تندری در این محدوده زمانی و مکانی کاملاً مهیاست. فلاح قاهره‌ری و شاکری (۱۳۹۴) به بررسی روند تغییرات فراوانی وقوع توفان‌های تندری در ایران با استفاده از آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده تمرکز حداکثر فراوانی وقوع این توفان‌ها در بخش‌های غربی و شمال‌غربی ایران است.

با توجه به اینکه بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته در ایران در زمینه رعد و برق مربوط به علل سینوپتیکی توفان‌های تندری، بارش‌های ناشی از آن، و تحلیل روند روزهای همراه با رعد و برق است، ضروری است تا مطالعه‌ای در زمینه تداوم و تواتر روزهای همراه با رعد و برق و تحلیل فضایی آن‌ها صورت گیرد. همچنین، بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی رعد و برق در ایران در منطقه شمال‌غرب و در ماه‌های گرم سال اتفاق می‌افتد (رسولی و همکاران، ۱۳۸۶؛ رسولی و جوان، ۱۳۹۱؛ فلاح قاهره‌ری و شاکری، ۱۳۹۴)؛ بنابراین، این منطقه به عنوان واحد مطالعاتی این پژوهش انتخاب شده است. هدف از پژوهش حاضر تعیین احتمال رخداد روزهای همراه با رعد و برق در شمال‌غرب ایران در ماه‌های گرم سال (آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه) با استفاده از مدل زنجیره مارکف است.

## مواد و روش‌ها

طبق تعریف سازمان جهانی هواشناسی، تندر هنگامی اتفاق می‌افتد که تخلیه الکتریکی به طور ناگهانی ظاهر شود و نور آذرخش مشاهده و صدای رعد شنیده شود. روز همراه با رعد و برق روزی است که رعد و آذرخش توأم مشاهده شود. در این پژوهش برای مدل‌سازی فضایی- زمانی احتمال وقوع روزهای همراه با رعد و برق در شمال‌غرب ایران، داده‌های مربوط به پدیده‌های خاص ۱۹ ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری شانزده‌ساله (۲۰۱۵-۲۰۰۰) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد و گداهای مربوط به توفان تندری (۹۵-۹۹) استخراج شد. با توجه به اینکه در شمال‌غرب کشور فراوانی روزهای همراه با رعد و برق در بهار و اوایل تابستان بیشتر است (رسولی و همکاران، ۱۳۸۶؛ معصوم‌پور سماکوش و فجاد، ۱۳۹۴: ۲۴۴)، در این مطالعه احتمال وقوع رعد و برق در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه بررسی می‌شود. برای ترسیم نقشه‌های توزیع فضایی از روش اسپلاین استفاده می‌شود. ویژگی اساسی اسپلاین این است که در سطح، تغییرات

ناگهانی وجود ندارد. این روش در تهیه منحنی‌های هم‌ارزش اقلیمی که سطح معینی از تعمیم در آن مورد نظر باشد مفید است (فرجی سبکبار و عزیززی، ۱۳۸۵: ۵). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های منتخب

جدول ۱. کدهای مربوط به پدیده توفان تندی

کد	پدیده هوای حاضر
۹۵	توفان تندی ملایم و آرام و بدون تگرگ اما در بعضی اوقات همراه با برف و باران
۹۶	توفان تندی ملایم و آرام و همراه با تگرگ
۹۷	توفان تندی متلاطم و بدون تگرگ اما همراه با برف و باران
۹۸	توفان تندی ترکیبی از شن و گرد و غبار
۹۹	توفان تندی سنگین و همراه با تگرگ

مدل‌های زنجیره مارکف از جمله فرایندهای تصادفی هستند که در شبیه‌سازی و مدل‌سازی سری‌های زمانی گسسته کاربرد گسترده‌ای دارند. وابستگی متغیرهای تصادفی به زمان در سری‌های زمانی از طریق ضریب خودهمبستگی یا ماتریس‌های احتمال انتقال بیان می‌شوند (آشگر طوسی و همکاران، ۱۳۸۲: ۸۴). ماتریس احتمال انتقال ماتریس مربعی است که بسته به تعداد حالت‌های آن تعداد  $n$  ترکیب ممکن از احتمال انتقال از حالتی به حالت دیگر را در بر می‌گیرد. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول اصلی‌ترین شکل مدل زنجیره مارکف به‌شمار می‌آید. زنجیره مارکف مرتبه اول عبارت است از یک سری زمانی گسسته که در آن رفتار سری در گام زمانی آینده فقط به حال بستگی دارد نه به گام‌های زمانی گذشته. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول به شکل زیر بیان می‌شود (رضیعی و همکاران، ۱۳۸۶: ۸۲):

$$P\{X_{t+1} | X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-n}\} = p\{X_{t+1} | X_t\} \quad (1)$$

که در آن  $p$ ، احتمال وقوع حالت  $X_{t+1}$  به شرط وقوع حالت  $X_t$ ،  $X$  متغیر حالت، و  $t$  گام زمان است.

تعداد متغیرها در زنجیره مارکف می‌تواند از دو تا  $N$  حالت تغییر یابد. در اقلیم‌شناسی و هیدرولوژی، زنجیره مارکف دو یا سه‌حاله بیشترین کاربرد را دارد (ویلیکز، ۲۰۰۶: ۳۳۹). اگر حالت‌های ممکن برای سری زمانی روزهای همراه با رعد و برق در این مطالعه، روزهای عادی ۰ و روزهای همراه با رعد و برق ۱ در نظر گرفته شود، وضعیت محیط در گام بعدی

می‌تواند با درصدی از احتمال هر یک از حالت‌های 0 و 1 باشد. در این تحقیق، نخست ماتریس فراوانی انتقال هر یک از حالت‌های دوگانه (روزهای همراه با رعد و برق و عادی) محاسبه شد و برازش مدل زنجیره مارکف بر سری داده‌ها با استفاده از آزمون کای دو ( $\chi^2$ ) بررسی شد. فرضیه صفر ( $H_0$ ) این آزمون دال بر استقلال داده‌ها و فرضیه مخالف ( $H_1$ ) حاکی از وابستگی زمانی متوالی (یا تبعیت از زنجیره مارکف مرتبه نخست) داده‌هاست. اگر  $\chi^2$  محاسبه شده از  $\chi^2$  بحرانی بزرگ‌تر باشد، فرضیه صفر ( $H_0$ ) رد می‌شود (عساکره، ۱۳۸۷: ۵۲).

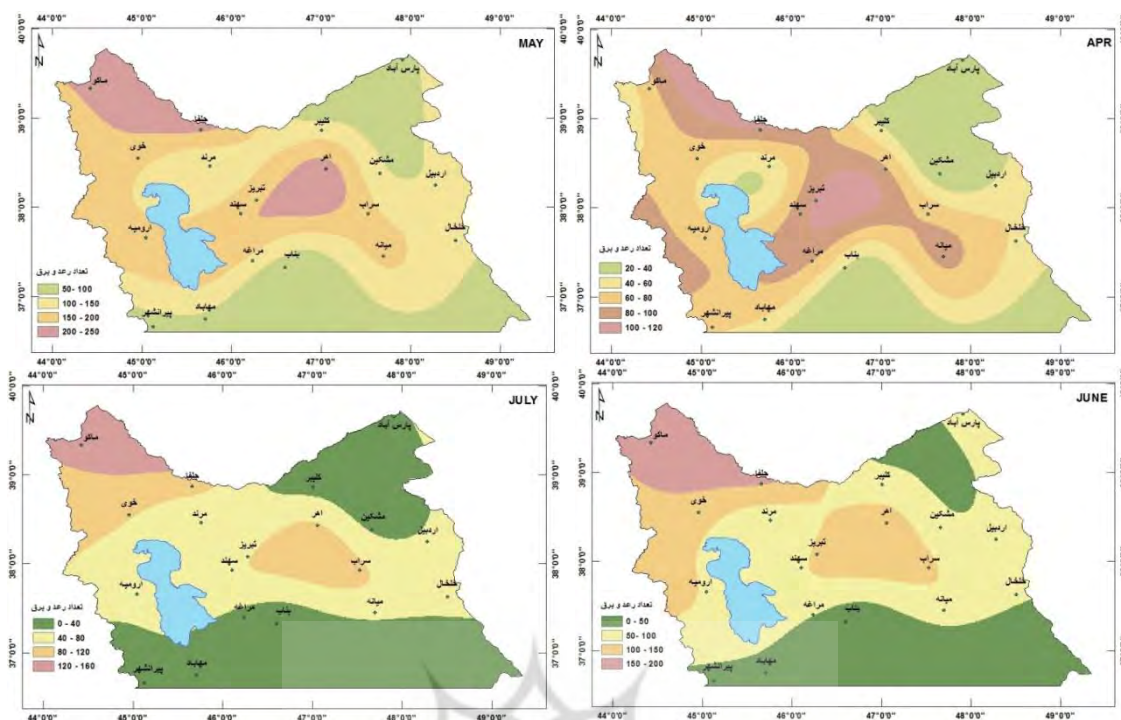
سپس، ماتریس احتمال انتقال شرطی به روش درست‌نمایی بیشینه محاسبه شد و ماتریس پایا (احتمال تعادل) نیز برای هر یک از حالت‌ها با استفاده از مقادیر احتمال انتقال شرطی محاسبه شد. احتمال وقوع دوره‌های یک تا ده روزه دوره‌های همراه با رعد و برق پیش‌بینی شد. یکی از قابلیت‌های مدل زنجیره مارکف این است که می‌تواند دوره‌های  $n$  روزه حالت‌های گوناگون را برآورد کند. در نهایت، فراوانی وقوع و دوره بازگشت  $n$  روزه دوره‌های همراه با رعد و برق نیز محاسبه شد. برای مطالعه روابط مورد استفاده و مطالب بیشتر می‌توان به منابع زیر مراجعه کرد (رضیعی و همکاران، ۱۳۸۶؛ حجازی‌زاده و شیرخانی، ۱۳۸۴؛ عساکره، ۱۳۸۷).

### یافته‌های تحقیق

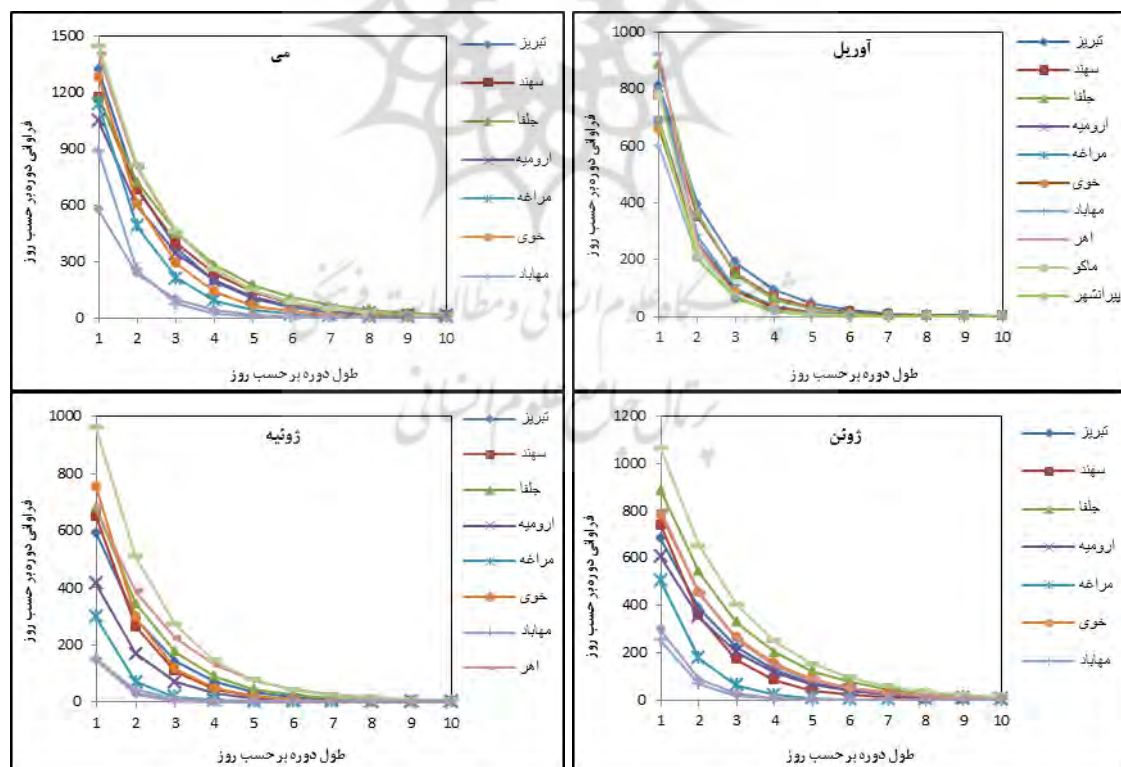
برای مطالعه و بررسی احتمال وقوع روزهای همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران، نخست فراوانی روزهای عادی و روزهای همراه با رعد و برق برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۰۰ محاسبه شد. شکل ۲ توزیع فضایی فراوانی روزهای همراه با رعد و برق را در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه نشان می‌دهد. بررسی اشکال نشان می‌دهد که در ماه آوریل بیشترین فراوانی روزهای همراه با رعد و برق در بخش‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. در ماه می بخش‌های شمال‌غربی و مرکزی بیشترین فراوانی را دارند و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه بیشترین فراوانی در شمال‌غربی و در اطراف ایستگاه ماکو دیده می‌شود. کمترین فراوانی روزهای رعد و برقی نیز در بخش‌های جنوبی منطقه مشاهده می‌شود.

ماتریس فراوانی و ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکف برای سری زمانی روزهای همراه با رعد و برق ایستگاه‌های شمال‌غرب ایران در ماه‌های آوریل تا ژوئیه محاسبه شد. در ادامه با آزمون  $\chi^2$  امکان برازش مدل زنجیره مارکف مرتبه اول دوحالت بر داده‌های تعداد روزهای همراه با رعد و برق بررسی شد و نتیجه به دست آمده بیانگر این بود که فراوانی حالات از زنجیره مارکف دوحالت پیروی می‌کند.

به منظور پیش‌بینی دوره‌های رعد و برقی، نخست فراوانی نظری تعداد دوره‌های  $n$  روزه همراه با رعد و برق در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه برای تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از این پیش‌بینی برای تداوم‌های یک تا ده‌روزه در شکل ۳ آورده شده است. به دلیل رعایت اختصار و گویاشدن نمودار، فقط نتایج ایستگاه‌هایی با احتمال وقوع رعد و برق بالاتر از ۰/۲ در این شکل آورده شده است. شکل گویای این مطلب است که، با افزایش طول دوره‌ها، از تعداد فراوانی روزهای همراه با رعد و برق کاسته می‌شود. مثلاً، در ایستگاه تبریز در ماه آوریل در طول دوره مورد مطالعه فراوانی دوره رعد و برق یک‌روزه ۸۰۹ روز برآورد شده است؛ درحالی‌که فراوانی دوره پنج‌روزه به ۴۶ روز و فراوانی دوره ۱۰ روزه به ۲ روز کاهش یافته است. بیشترین فراوانی روزهای همراه با رعد و برق در ماه می مشاهده می‌شود و در ماه‌های می، ژوئن، و ژوئیه فراوانی دوره‌های رعد و برق کوتاه‌مدت (یک تا چهارروزه) در ایستگاه‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه (پیرانشهر و مهاباد) کمتر از سایر ایستگاه‌هاست.



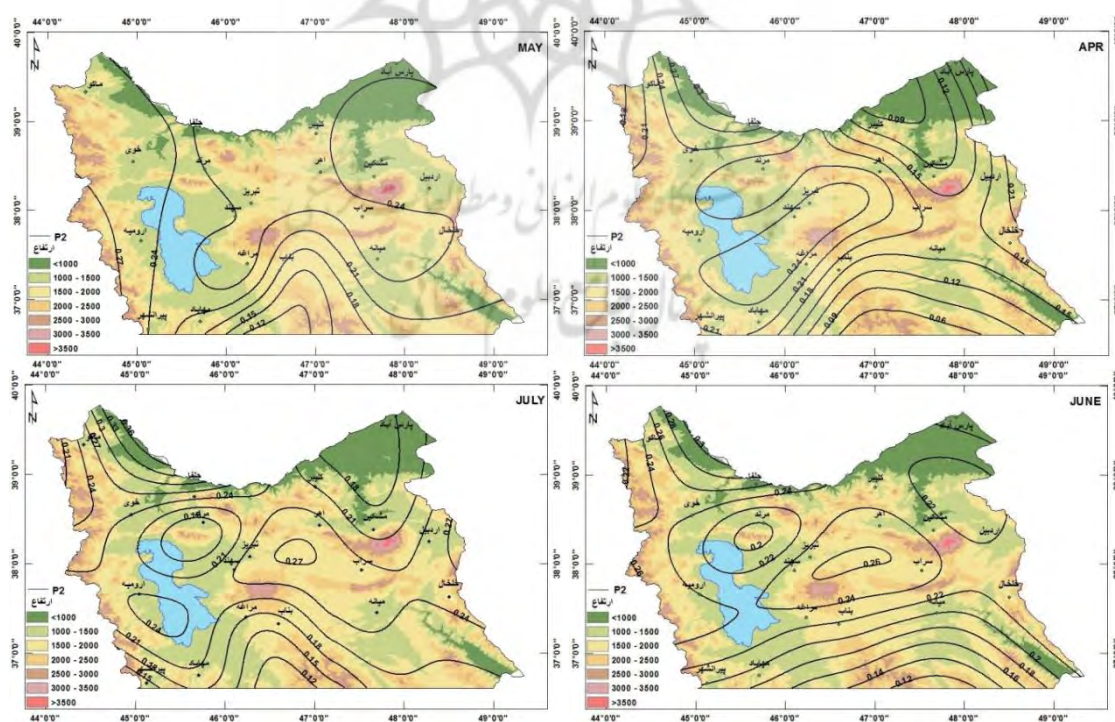
شکل ۲. توزیع فضایی فراوانی روزهای همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران



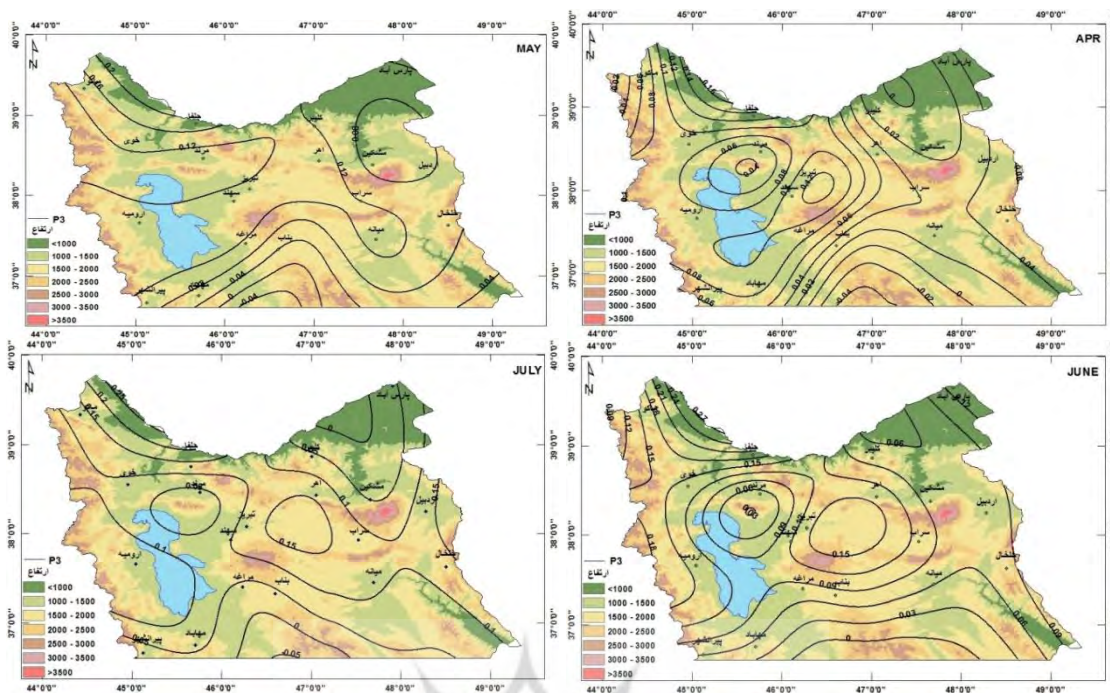
شکل ۳. نمودار فراوانی برآوردشده تعداد دوره‌های n روزه همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران

برآورد تداوم  $n$  روزه رعد و برق از توانایی‌های دیگر مدل زنجیره مارکوف است. منظور از تداوم رعد و برق، تعداد روزهای متوالی است که رعد و برق در آن رخ داده باشد؛ مثلاً، تداوم دوروزه رعد و برق به معنی وقوع رعد و برق در دو روز متوالی است؛ ولی قبل از روز اول و بعد از روز دوم رعد و برق وجود نداشته باشد. شکل ۴ و ۵ به ترتیب احتمال وقوع رعد و برق‌های دوروزه و سه‌روزه در شمال غرب ایران در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۴، در ماه آوریل احتمال وقوع رعد و برق‌های دوروزه در نیمه شرقی منطقه مورد مطالعه کم است؛ ولی در بخش‌های مرکزی و غربی احتمال وقوع آن بیشتر است. در این ماه احتمال رعد و برق دوروزه در ایستگاه‌های تبریز و سهند ۲۵ درصد و در ایستگاه کلیبر ۱۲ درصد است. در ماه می، که بیشترین فراوانی وقوع رعد و برق در منطقه وجود دارد، احتمال وقوع رعد و برق‌های دوروزه در بیشتر مناطق بالا و در حدود ۲۴ درصد است. در ماه ژوئن میانگین احتمال وقوع رعد و برق‌های دوروزه در منطقه ۲۳ درصد است. در ماه ژوئیه احتمال وقوع رعد و برق‌های دوروزه در بخش‌های شرقی افزایش می‌یابد و به ۲۵ درصد می‌رسد. در این ماه کمترین احتمال وقوع در بخش‌های جنوبی و شمال شرقی است.

احتمال وقوع رعد و برق‌های سه‌روزه، که توزیع فضایی آن‌ها در چهار ماه مورد مطالعه در شکل ۵ به تفکیک ترسیم شده است، نشان می‌دهد که در ماه آوریل احتمال وقوع رعد و برق‌های سه‌روزه به طور میانگین به ۶ درصد کاهش یافته و در بخش‌های شمال شرقی به ۲ درصد هم رسیده است. در ماه می و ژوئن این احتمال افزایش می‌یابد و به حدود ۱۰ درصد می‌رسد. در این ماه‌ها، احتمال وقوع رعد و برق‌های سه‌روزه در مناطق شمالی و شمال شرقی تا ۱۵ درصد نیز می‌رسد. در ماه ژوئیه احتمال وقوع رعد و برق سه‌روزه کاهش می‌یابد و در مناطق شمال شرقی و جنوبی به حدود ۴ درصد می‌رسد؛ هرچند در بخش‌های غربی هنوز تا ۱۴ درصد احتمال وقوع رعد و برق‌های سه‌روزه برآورد می‌شود.



شکل ۴. توزیع فضایی احتمال وقوع رعد و برق‌های دوروزه در شمال غرب ایران



شکل ۵. توزیع فضایی احتمال وقوع رعد و برق‌های سه‌روزه در شمال غرب ایران

دوره بازگشت رعد و برق‌هایی با تداوم ۱ تا ۵ روزه برای ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه محاسبه شد. دوره بازگشت رعد و برق‌های یک‌روزه در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دوره بازگشت یک‌روزه رعد و برق در همه ایستگاه‌های منطقه و در همه ماه‌ها به طور متوسط ۱/۵ روز است. این به این معنی است که هر ۱/۵ روز یک بار یک دوره یک‌روزه رعد و برق در شمال غرب خواهیم داشت. شکل ۶ و ۷ نیز به ترتیب توزیع فضایی دوره بازگشت رعد و برق‌های دوروزه و سه‌روزه را در شمال غرب ایران می‌دهد. در ماه آوریل کمترین دوره بازگشت رعد و برق دوروزه با پنج روز در ایستگاه تبریز است. کمترین دوره بازگشت رعد و برق سه‌روزه نیز طی همین ماه ۱۵ روز و در ایستگاه تبریز است. در حالی که در همین ماه بیشترین دوره بازگشت رعد و برق دوروزه و سه‌روزه به ترتیب با ۱۱ و ۱۰۵ روز در ایستگاه مشکین شهر است. به عبارتی، در ماه آوریل احتمال اینکه در مشکین شهر رعد و برقی در دو روز متوالی رخ دهد ۱۱ روز بعد از آخرین رخداد آن است؛ اما این مدت برای تبریز به نصف کاهش پیدا می‌کند. در ماه‌های می و ژوئن دوره بازگشت رعد و برق دوروزه پنج روز و در ژوئیه شش روز است. دوره بازگشت رعد و برق سه‌روزه در ماه‌های می، ژوئن، و ژوئیه به ترتیب ۱۶، ۲۳، و ۳۴ روز است. بررسی جدول و اشکال نشان می‌دهد که به ازای افزایش طول دوره رعد و برقی، دوره بازگشت آن نیز به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد؛ یعنی زمان زیادی طول می‌کشد تا یک دوره چهار یا پنج‌روزه رعد و برقی دوباره اتفاق بیفتد. با توجه به این امر از آوردن نتایج دوره بازگشت رعد و برق‌های چهارروزه و پنج‌روزه صرف‌نظر شده است.

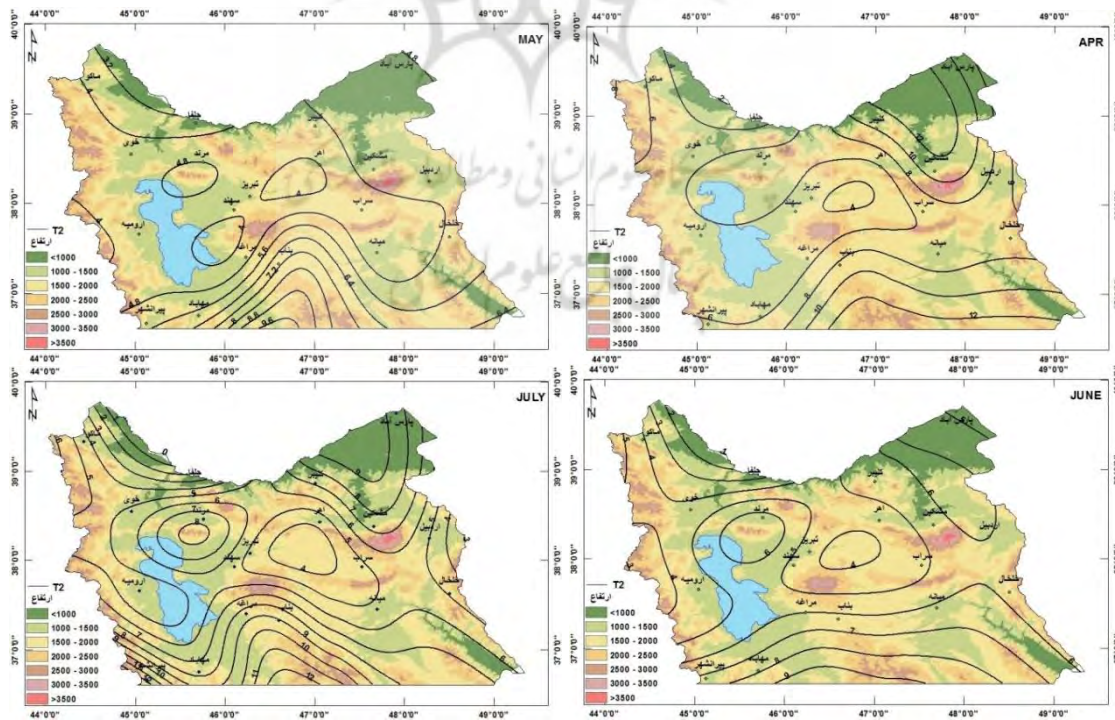
شکل ۸ احتمال وقوع رعد و برق در بلندمدت (ماتریس پایا) را در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه در شمال غرب ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در ماه آوریل کمترین احتمال وقوع رعد و برق همراه با رعد و برق در شمال شرقی منطقه مورد مطالعه (کمتر از ۰/۱۲) و بیشترین احتمال آن در مرکز و در ایستگاه‌های تبریز و سهند (۰/۳۰) قرار دارد. در ماه‌های می و ژوئن کمترین احتمال وقوع رعد و برق در بخش‌های جنوبی منطقه (کمتر از ۰/۱۵) و بیشترین احتمال نیز در مناطق شمالی و شمال‌غربی دیده می‌شود؛ با این تفاوت که احتمال وقوع رعد و برق در ماه می بیشتر از ماه ژوئن است. در ماه ژوئیه نیز کمترین احتمال وقوع در مناطق جنوبی و شمال شرقی و بیشترین احتمال در



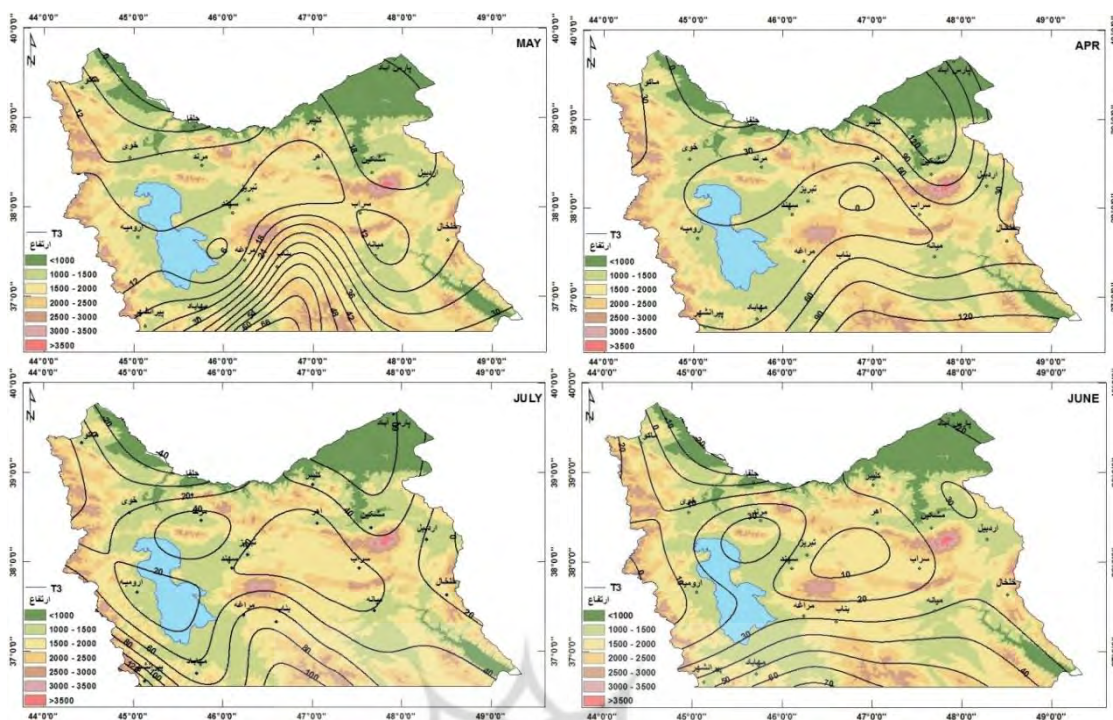
بخش‌های غربی و شمال‌غربی منطقه مورد مطالعه (۰/۳۵) دیده می‌شود. به‌طور کلی، احتمال وقوع روز همراه با رعد و برق در مناطق جنوبی و شمال‌شرقی کمتر از سایر مناطق است و مناطق مرکزی، شمالی، و شمال‌غربی بیشترین احتمال وقوع رعد و برق در بلندمدت را دارند.

جدول ۲. دوره بازگشت رعد و برق یک‌روزه در شمال غرب ایران

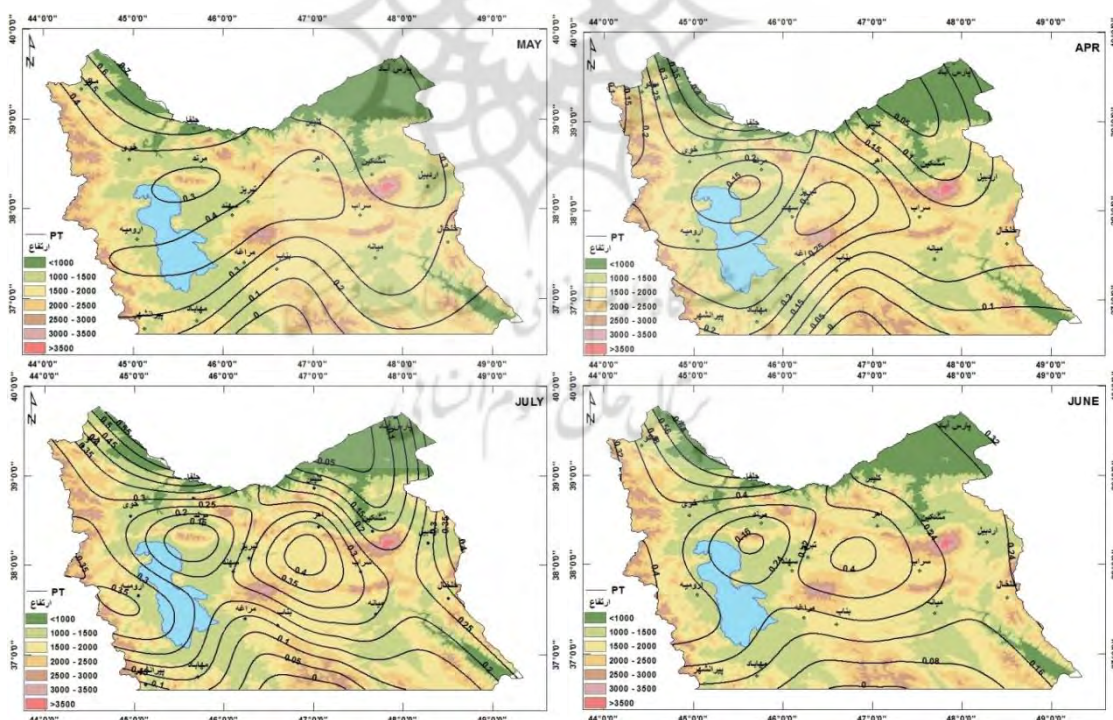
ایستگاه	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه
اردبیل	۱,۱۸	۱,۳۹	۱,۲۷	۱,۳۹
ارومیه	۱,۳۲	۱,۶۵	۱,۵۲	۱,۳
اهر	۱,۲۷	۱,۸۴	۱,۵۵	۱,۵۳
بناب	۱,۱۶	۱,۲۱	۱,۰۵	۱,۰۱
پارس آباد	۱,۱۴	۱,۳۹	۱,۴۲	۱,۱۶
پیرانشهر	۱,۲۵	۱,۳۳	۱,۲	۱,۱
تبریز	۱,۴۶	۱,۶۹	۱,۵۳	۱,۴۱
جلفا	۱,۳۹	۱,۸۱	۱,۶۴	۱,۴۵
خلخال	۱,۲۱	۱,۴۱	۱,۲۸	۱,۳۹
خوی	۱,۳۱	۱,۵۸	۱,۵۷	۱,۳۵
سراب	۱,۲۴	۱,۵۸	۱,۴۲	۱,۴۲
سهند	۱,۴۱	۱,۷۲	۱,۴۳	۱,۳۴
کلیبر	۱,۱۳	۱,۴۸	۱,۳۱	۱,۲
ماکو	۱,۲۶	۱,۸۵	۱,۷۳	۱,۵۵
مراغه	۱,۳۲	۱,۴۷	۱,۲۷	۱,۱۶
مرند	۱,۲	۱,۴۲	۱,۴۵	۱,۱۸
مشکین شهر	۱,۱۱	۱,۳۶	۱,۳	۱,۲
مهاباد	۱,۲۸	۱,۲۸	۱,۱۷	۱,۱۸
میانه	۱,۲۱	۱,۵۸	۱,۲۶	۱,۳۴



شکل ۶. دوره بازگشت رعد و برق‌های دوروزه در شمال غرب ایران



شکل ۷. دوره بازگشت رعد و برق‌های سه‌روزه در شمال غرب ایران



شکل ۸. توزیع فضایی احتمال پایای روزهای همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران

### نتیجه‌گیری

یکی از پدیده‌های مؤثر در تولید رواناب و سیلاب در بیشتر عرض‌های جغرافیایی وقوع توفان‌های تندری در مقیاس محلی تا منطقه‌ای است. شمال غرب ایران از جمله مناطقی است که وقوع توفان‌های تندری شدید به همراه بارش

سنگین خسارات فراوانی به‌وجود می‌آورد. بنابراین، شناخت فراوانی، احتمال وقوع، و دوره بازگشت این توفان‌ها می‌تواند در جهت کاهش خسارات و افزایش سطح بهره‌وری محصولات کشاورزی کمک فراوانی کند. یکی از روش‌های مناسب و پُرکاربرد آماری برای بررسی دقیق پدیده‌های گوناگون اقلیمی و شناسایی احتمالات وقوع آن‌ها روش زنجیره مارکف است. در پژوهش حاضر، با به‌کارگیری مدل زنجیره مارکف، احتمال رخداد روزهای همراه با رعد و برق در شمال غرب ایران در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، و ژوئیه با استفاده از ۱۶ ایستگاه سینوپتیک در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ تحلیل شد. استفاده از آزمون‌های دو نشان داد که زنجیره مارکف مرتبه اول دو حالته روش مناسبی برای مطالعه تواتر توفان‌های رعد و برق در شمال غرب ایران است که با نتایج تحقیقات داسگوپتا و دی (۲۰۰۱)، کولکارنی و همکاران (۲۰۰۲) و چاتوپدهای و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی دارد. در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در هر چهار ماه مورد بررسی، درصد فراوانی روزهای عادی بیشتر از درصد فراوانی روزهای همراه با رعد و برق است. بیشترین فراوانی روزهای همراه با رعد و برق در ماه آوریل در بخش‌های مرکزی در ماه می در بخش‌های شمال غربی و مرکزی و در ماه‌های ژوئن و ژوئیه در شمال غربی و در اطراف ایستگاه ماکو دیده می‌شود. برآورد تداوم‌های یک تا ده‌روزه نشان داد که با افزایش طول دوره‌ها، از تعداد فراوانی روزهای همراه با رعد و برق کاسته می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد احتمال وقوع رعد و برق‌های دو و سه‌روزه در شمال شرقی و جنوب منطقه مورد مطالعه کم است؛ ولی در بخش‌های مرکزی و شمال غربی بیشتر است. دوره بازگشت یک‌روزه رعد و برق در همه ایستگاه‌های منطقه و در همه ماه‌ها به طور متوسط ۱/۵ روز است؛ ولی به ازای افزایش طول دوره رعد و برقی دوره بازگشت آن به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. توزیع فضایی ماتریس پایا نیز نشان می‌دهد که احتمال وقوع رعد و برق در مناطق جنوبی و شمال شرقی کمتر است و مناطق مرکزی، شمالی، و شمال غربی بیشترین احتمال وقوع رعد و برق در بلندمدت را دارند. به‌طور کلی، احتمال وقوع بسیار زیاد پدیده رعد و برق در شمال غربی کشور ضرورت شناخت این پدیده و توجه به آن را به منظور اجرای برنامه‌های پیشگیری و مدیریتی مقابله با این مخاطره در مناطق بحرانی روز به روز بیشتر می‌کند. همچنین، با توجه به اینکه این منطقه از مهم‌ترین مناطق کشاورزی کشور به‌شمار می‌رود، در برنامه‌ریزی‌های مربوط به کشاورزی نیز باید با راهکارهای مناسب، نظیر تغییر زمان کشت، در جهت کاهش خسارات این پدیده اقدام شود.

## منابع

- آشگر طوسی، ش.؛ علیزاده، الف. و جوانمرد، س. (۱۳۸۲). پیش‌بینی احتمال وقوع خشک‌سالی در استان خراسان، تحقیقات جغرافیایی، ۷۰: ۱۱۹-۱۲۸.
- حجازی‌زاده، ز. و شیرخانی، ع. (۱۳۸۴). تحلیل و پیش‌بینی آماری خشک‌سالی و دوره‌های خشک و تر کوتاه‌مدت در استان خراسان، پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۵۲.
- رسولی، ع. (۱۳۸۴). مدل‌سازی بارش‌های رعد و برقی محدوده شهر تبریز از دیدگاه ریسک وقوع سیلاب، کنفرانس بین‌المللی بلاای طبیعی ۵-۷ مهر، دانشگاه تبریز، ۱-۱۱۹.
- رسولی، ع.؛ بذاق جمالی، ج. و جلالی، الف. (۱۳۸۶). توزیع زمانی بارش‌های رعد و برقی منطقه شمال غرب ایران، مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان، ۲۲: ۱۵۶-۱۷۰.
- رسولی، ع. و جوان، خ. (۱۳۹۱). تحلیل روند وقوع توفان‌های رعد و برقی در نیمه غربی ایران با کاربرد آزمون‌های ناپارامتری، فضای جغرافیایی، ۱۲(۳۸): ۱۱۱-۱۲۶.
- رضیعی، ط.؛ دانش‌کار آراسته، پ.؛ اختری، ر. و ثقفیان، ب. (۱۳۸۶). بررسی خشک‌سالی‌های هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف، تحقیقات منابع آب ایران، ۳(۱): ۲۵-۳۵.
- سازمان هواشناسی کشور (۱۳۸۵). مرکز پژوهش مخاطرات اقلیمی، بولتن علمی، ۳: ۱۷-۲۶.
- صلاحی، ب. (۱۳۸۹). بررسی ویژگی‌های آماری و همدیدی توفان‌های تندری استان اردبیل، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۲: ۱۲۹-۱۴۱.
- عساکره، ح. (۱۳۸۷). بررسی احتمال تواتر و تداوم روزهای بارانی در شهر تبریز با استفاده از مدل زنجیره مارکف، تحقیقات منابع آب، ۴(۲): ۴۶-۵۶.
- علیزاده، الف. (۱۳۸۷). اصول هیدرولوژی کاربردی، چ ۱۹، مشهد: دانشگاه امام رضا.
- علیزاده، الف.؛ کمالی، غ.؛ موسوی، ف. و موسوی بایگی، م. (۱۳۸۰). هوا و اقلیم‌شناسی، چ ۲، مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- فرجی سبکبار، ح. و عزیززی، ق. (۱۳۸۵). ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد، پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۸: ۱-۱۵.
- فلاح قاهری، غ. و شاکری، ف. (۱۳۹۴). شناسایی روند تغییرات فراوانی وقوع توفان‌های تندری در ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۵(۳۸): ۹۷-۱۱۷.
- کاوایی، م. و علیجانی، ب. (۱۳۷۵). مبانی آب و هواشناسی، چ ۴، تهران: سمت.
- لشکری، ح. و آقاسی، ن. (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیکی توفان‌های تندری تبریز در فاصله زمانی (۱۹۹۶-۲۰۰۵)، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۷(۴۵): ۲۰۳-۲۳۴.
- محمدی، ح. (۱۳۸۷). مخاطرات جوی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- معصوم‌پور سماکوش، ج. و فجاد، الف. (۱۳۹۴). واکاوی آماری-ترمودینامیکی توفان‌های تندری در ایران، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۱۳(۲): ۲۲۷-۲۴۸.

- Alizadeh, A.; Kamali, Gh.; Mousavi, F. and Mousavi Bayegi, M. (2001). Weather and Climate, Ferdowsi University of Mashhad press, Mashhad. (In Persian).
- Asakereh, A. (2008). Analysis of the Frequency and the Spell of Rainy Days Using Markove Chain Model for City of Tabriz, Iran, *Iran-Water Resources Research*, 4 (2): 46-56. (In Persian).
- AshgarTousi, Sh.; Alizadeh, A. and Javanmard, S. (2003). Prediction of drought probability in Khorasan, *Geographical Research*, 70: 119-128. (In Persian).
- Basak, P.; Sarkar, D. and Mukhopadhyay, A.K. (2012). Estimation of Thunderstorm Days from the Radio-sonde Observations at Kolkata (22.53 N, 88.33 E), India during Pre-monsoon Season: an ANN Based Approach, *Earth Science India*, 5(4).
- Changnon, S.A. (2001). Thunderstorm rainfall in the conterminous United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9): 1925-1940.
- Chattopadhyay, S.; Acharya, N.; Chattopadhyay, G.; Prasad, S.K. and Mohanty, U.C. (2012). Markov chain model to study the occurrence of pre-monsoon thunderstorms over Bhubaneswar, India, *Comptes Rendus Geoscience*, 344(10): 473-482.
- Dasgupta, S. and De, U.K. (2001). Markov chain models for pre-monsoon thunderstorm in Calcutta, India.
- Falah, Gh. and Shakeri, F. (2016). Identification of variations trend of thunder storm Occurrence frequency in Iran, *Geographical sciences applied research*, 15(38): 97-117. (In Persian).
- Faraji Sabokbar, H.A. and Azizi, Gh. (2007). The Precision of Spatial Interpolation Methods, Case Study: Rainfall Modeling in Kardeh Basin of Mashhad, *Geographical Research Quarterly*, 58: 1-15.
- Garg, V.K. and Singh, J.B. (2010). Markov Chain Approach on the behavior of Rainfall, *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 6(1).
- Hejazizadeh, Z. and Shirkhani, A. (2005). Statistical analysis and forecasting of droughts and short-term dry and wet periods in Khorasan, *Geography Research Quarterly*, 37(52). (In Persian).
- Hossain, M.M. and Anam, S. (2012). Identifying the dependency pattern of daily rainfall of Dhaka station in Bangladesh using Markov chain and logistic regression model, *Agricultural Sciences*, 3(3): 385.
- IRAN Meteorological Organization (2006). Research Center of climate Hazards, *Scientific Bulletin*, 3: 17-26. (In Persian).
- Kantz, H.; Holstein, D.; Ragwitz, M. and Vitanov, N.K. (2004). Markov chain model for turbulent wind speed data, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 342(1): 315-321.
- Kaviani, M. and Alijani, B. (1996). *Fundamentals of Climatology*, Samt Press. (In Persian).
- Kulkarni, M.K.; Kandalgaonkar, S.S.; Tinmaker, M.I.R. and Nath, A. (2002). Markov chain models for pre-monsoon season thunderstorms over Pune, *International journal of climatology*, 22(11): 1415-1420.
- Lashkari, H., Aghasi, N. (2013). Synoptic analysis of thunderstorms in Tabriz (1996-2005), *Geography and Planning*, 17(45), 203-234 (In Persian).
- Lazri, M.; Ameer, S.; Brucker, J.M.; Lahdir, M. and Sehad, M. (2015). Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains, *Journal of Earth System Science*, 124(1): 61-70.
- Masoompour Samakosh, J. and Fajad, A. (2015). Thermodynamic-statistical Analysis of Thunderstorms in Iran, *Journal of Geography and Regional Development*, 13(2): 227-248. (In Persian).
- Mohammadi, H. (2008). *Atmospheric hazards*, University of Tehran Press. (In Persian).
- Moon, S.E.; Ryoo, S.B. and Kwon, J.G. (1994). A Markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea, *International journal of climatology*, 14(9): 1009-1016.

- Paulo, A.A. and Pereira, L.S. (2007). Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains, *Water resources management*, 21(10): 1813.
- Pinto, O.; Pinto, I.R.C.A. and Ferro, M.A.S. (2013). A study of the long-term variability of thunderstorm days in southeast Brazil, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11): 5231-5246.
- Poggi, P.; Notton, G.; Muselli, M. and Louche, A. (2000). Stochastic study of hourly total solar radiation in Corsica using a Markov model, *International journal of climatology*, 20(14): 1843-1860.
- Rahmat, S.N.; Jayasuriya, N. and Bhuiyan, M.A. (2016). Short-term droughts forecast using Markov chain model in Victoria, Australia, *Theoretical and Applied Climatology*, 1-13.
- Rasouli, A. (2005). Modeling of thunderstorm rainfalls in Tabriz from the flood risk perspective, *International Conference on Natural Disasters*, Tabriz University, 1-119 (In Persian).
- Rasouli, A.; Bodaghjamali, J. and Jalali, O. (2007). Temporal distribution of thunderstorm rainfalls in the northwest of IRAN, *Quarterly Research Bulletin of Isfahan University (Humanities)*, 27(1): 156-170 (In Persian).
- Rasouli, A. and Javan, Kh. (2012). Analyzing of thunderstorm occurrence trends in the western part of Iran applying non-parametric statistical tests, *Geographic Space*, 12(38): 111-126. (In Persian).
- Raziei, T.; Daneshkar Arasteh, P.; Akhtari, R. and Saghafian, B. (2007). Investigation of Meteorological Droughts in the Sistan and Balouchestan Province, Using the Standardized Precipitation Index and Markov Chain Model, *Iran-Water Resources Research*, 3(1): 25-35. (In Persian).
- Sahin, A.D. and Sen, Z. (2001). First-order Markov chain approach to wind speed modelling, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(3): 263-269.
- Salahi, B. (2010). Statistical and Synoptic Analysis of Characteristics of Thunderstorms in Ardabil Province, *Physical Geography Research Quarterly*, 42(72): 129-141. (In Persian).
- Song, Z.; Geng, X.; Kusiak, A. and Xu, C. (2011). Mining Markov chain transition matrix from wind speed time series data, *Expert Systems with Applications*, 38(8): 10229-10239.
- Sonnadara, U. (2016). Spatial and temporal variations of thunderstorm activities over Sri Lanka, *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4): 621-628.
- Tafferner, A.; Forster, C.; Hagen, M.; Keil, C.; Zinner, T. and Volkert, H. (2008). Development and propagation of severe thunderstorms in the Upper Danube catchment area: Towards an integrated nowcasting and forecasting system using real-time data and high-resolution simulations, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 101(3): 211-227.
- Varotsos, C.; Assimakopoulos, M.N. and Efstathiou, M. (2007). Technical note: long-term memory effect in the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration at Mauna Loa, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(3): 629-634.
- Wilks, D.S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (second edition). Academic press, USA.
- Yusuf, A.U.; Adamu, L. and Abdullahi, M. (2014). Markov chain model and its application to annual rainfall distribution for crop production, *Am. J. Theor Appl Stat*, 3(2): 39-43.