

مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هفتم، شماره ۱۸، زمستان ۱۳۹۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۲

صفحات: ۲۰۴ - ۱۸۹

## بر آورد احتمال وقوع توفانهای تندری بهاره با استفاده از مدل زنجیره مارکف مطالعه موردی: تبریز

محمد رضا عزیززاده<sup>۱</sup>، خدیجه جوان<sup>۲\*</sup>، علی اکبر رسولی<sup>۳</sup>، الناز استادی<sup>۴</sup>

### چکیده

توفان‌های تندری یکی از پدیده‌های آب و هوایی هستند که به دلیل همراهی با رعد و برق، باد شدید، تگرگ و بارش‌های شدید موجب آسیب‌های فراوانی در نقاط مختلف دنیا می‌شوند. در این پژوهش احتمال وقوع روزهای همراه با توفان تندری در تبریز در فصل بهار با به‌کارگیری قوانین احتمالاتی و با استفاده از تکنیک زنجیره مارکف مورد تحلیل قرار گرفته است. بدین منظور از داده‌های روزانه مربوط به توفان‌های تندری (کدهای ۹۵ تا ۹۹) در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۵۱ استفاده گردید. ابتدا روزها به دو دسته روزهای عادی با کد صفر و روزهای همراه با توفان تندری با کد ۱ تقسیم شده و تعداد حالت‌های انتقال شرطی در ماه‌های مورد مطالعه شمارش شد. سپس ماتریس احتمال تغییر وضعیت بر اساس روش درست‌نمایی بیشینه محاسبه گردید. برخی از خصوصیات مهم دیگر مرتبط با دوره‌های عادی و همراه با توفان تندری، مانند احتمالات ساده تجربی و احتمال تعادل دوره‌ها، فراوانی وقوع روزهای عادی و همراه با توفان تندری، طول هر یک از این دوره‌ها و سیکل هوایی نیز تعیین شد و در نهایت با محاسبه فراوانی دوره‌های همراه با توفان تندری، احتمال وقوع این دوره‌ها و دوره بازگشت آن‌ها مشخص گردید. نتایج نشان می‌دهد که کوتاه‌ترین سیکل هوایی مربوط به ماه می است که بیش‌ترین فراوانی توفان تندری را دارد و بالعکس طولانی‌ترین سیکل هوایی مربوط به ماه آوریل است که فراوانی کم‌تری دارد. دوره بازگشت دوره‌های همراه با توفان تندری یک‌روزه و دو روزه به طور متوسط ۱/۵ و ۵ روز می‌باشد. بررسی ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده دوره‌های n روزه همراه با توفان تندری، نشان می‌دهد که میزان دقت و اطمینان مورد نظر برای همه ماه‌ها، بالاتر از ۰/۹۹ بوده است.

واژگان کلیدی: توفان تندری، زنجیره مارکف، ماتریس احتمال، دوره بازگشت، تبریز.

<sup>۱</sup>- مری، گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران

<sup>۲</sup>- استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه، ارومیه (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup>- استاد آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز

<sup>۴</sup>- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز

m\_azizzadeh@pnu.ac.ir

kh.javan@urmia.ac.ir

rasouli@tabrizu.ac.ir

ostadi.elnaz@yahoo.com

## مقدمه

مخاطره را می‌توان پدیده یا واقعه‌ای دانست که رخداد آن برای فرد، جامعه و محیط زیان جدی داشته باشد؛ ویژگی یک مخاطره از طریق برد مکانی، اندازه، فراوانی، احتمال وقوع و همچنین جمعیتی که تحت تأثیر قرار می‌دهد، تشخیص داده می‌شود (مقیم، ۱۳۹۳). توفان‌های تندری از جمله مخاطرات جوی هستند. این توفان‌ها با وجود اینکه مقیاس محلی دارند ولی گونه‌های شدید رخداد این پدیده همراه با بارش سنگین، تگرگ، تندبادهای شدید و رعد و برق هستند که می‌توانند منجر به خسارات قابل توجهی در بخش کشاورزی، دامداری، سازه‌ها و تسهیلات زیرساختی و غیره شوند؛ بنابراین شناخت این پدیده‌ها و احتمال وقوع آنها از اهمیت زیادی برخوردار است.

بنا بر تعریف، یک توفان تندری ماشین ترمودینامیکی محسوب می‌گردد که در آن انرژی پتانسیل از گرمای نهان حاصل از تراکم در شرایط رطوبتی یا ناپایداری جابجایی قائم هوا به سرعت به انرژی جنبشی از جریانات شدید قائم هوا تبدیل می‌شود (جعفرپور، ۱۳۸۵). توفان‌های تندری معمولاً یا بر اثر گرم شدن سطح زمین و صعود سریع توده‌های هوای بالای آن و یا در امتداد و به همراه جبهه‌های هوا، به ویژه در جبهه سرد، ظهور می‌کنند (کاوایانی و علیجانی، ۱۳۷۵). تمام خصوصیات بارز یک توفان تندری مانند: رویت برق، صدای رعد، وزش باد شدید، نزول تگرگ و بارش‌های رگباری خفیف تا بسیار شدید تماماً حاصل تولید و چرخه حیات سلول‌های همرفتی کوچک و بزرگ در جو زمین است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۰).

بررسی وضعیت اقلیمی جهان در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که یکی از اثرات تغییر اقلیم، افزایش رخدادهای حدی اقلیمی از جمله توفان‌های تندری است (بلاندن و آرنت<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶). همچنین برآوردها نشان می‌دهد که روزانه بیش از ۵۰ هزار توفان تندری و سالانه بیش از ۱۸ میلیون توفان تندری در سطح کره زمین به وقوع می‌پیوندد. وجود هوای گرم و مرطوب در منطقه استوا سبب شده از هر سه روز، یک روز همراه با توفان تندری باشد (آرنز<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲).

از آنجا که پدیده‌های اقلیمی از جمله توفان‌های رعد و برق به عنوان پدیده‌های تصادفی به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیستند، می‌توان با مشاهده پیاپی آنها اطلاعات مفیدی به دست آورد که این امر از طریق قوانین احتمالات امکان‌پذیر است. مدل زنجیره مارکف یک روش رایج جهت مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی می‌باشد (ویلکز<sup>۳</sup>، ۲۰۰۶). این مدل یکی از مدل‌های آماری است که به بررسی ارتباط زمانی پدیده‌های گوناگون اقلیمی می‌پردازد 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، ۱۳۸۹). تئوری زنجیره‌ی مارکف حل بسیاری از مسائل احتمالات را ساده کرد. از این مدل در علوم مختلف نظیر هواشناسی، کشاورزی، آب و هواشناسی، منابع طبیعی، هیدرولوژی و ... استفاده زیادی شده است.

1 - Blunden &amp; Arndt

2 - Ahrens

3 - Wilks

داسگوپتا و دی<sup>۱</sup> (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 مورد تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که احتمال وقوع رعد و برق در کلکته در این فصل، کم و در حدود ۰/۲۶ می‌باشد. کولکاری و همکاران<sup>۲</sup> (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>۳</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. موهی و میلر<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) به شناسایی ویژگی‌های اقلیمی توفان‌های تندری در ایالات متحده پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که حداکثر فعالیت توفان تندری در خردادماه و تیرماه در بعد از ظهر و اوایل صبح می‌باشد. چاتوپدهای و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) احتمال وقوع روزهای همراه با رعد و برق را در ناحیه اوریسسا<sup>۶</sup> در هند در فصل پیش از مونسون بررسی کردند. آنها از زنجیره مارکف مرتبه اول دو حالتی استفاده نمودند 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<sup>۷</sup> (۲۰۱۳) به مطالعه تغییرات درازمدت روزهای همراه با رعد و برق در جنوب‌شرق برزیل در طول یک قرن گذشته پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که همزمان با افزایش دمای سطحی زمین، افزایش قابل توجهی در فعالیت رعد و برق در این منطقه دیده می‌شود. گال و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۴) به تحلیل زمانی مکانی شدت و فراوانی وقوع توفان‌های تندری سوئیس پرداختند. نتایج حاصل از به‌کارگیری آزمون ناپارامتری من-کندال بر روی سری زمانی فراوانی وقوع توفان‌های تندری نشان داد که در ۲۰ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی، روند افزایشی معناداری در طی ۳۰ سال گذشته مشاهده می‌شود. سونادرا<sup>۹</sup> (۲۰۱۵) به بررسی تغییرات زمانی-مکانی روزهای همراه با رعد و برق در سریلانکا پرداخته و به این نتیجه رسید که افزایش یا کاهش قابل ملاحظه‌ای در فراوانی رعد و برق در سریلانکا وجود ندارد همچنین فعالیت توفان‌های تندری در مناطق مرطوب (جنوب غربی) بیشتر از مناطق خشک است.

در ایران رسولی (۱۳۸۴) توزیع زمانی بارش‌های رعد و برقی را در محدوده شهر تبریز مورد بررسی قرار داده و احتمال وقوع این نوع بارش‌ها را در فصول بهار و تابستان به اثبات رسانده است. رسولی و همکاران (۱۳۸۶) تغییرات زمانی-مکانی و توزیع بارش‌های تندری را در شمال غرب ایران مورد مطالعه قرار داده و نشان داده‌اند که بارش‌های تندری در بهار و تابستان بیشتر بوده و عمدتاً در جنوب غرب منطقه و کوهستان‌ها فعال بوده و در نواحی پست کمتر رخ می‌دهد. خوشحال و قویدل (۱۳۸۶) پدیده توفان‌های تندری را به عنوان بخشی از ماهیت اقلیم تبریز و کل شمال غرب ایران

1 - Dasgupta &amp; De

2 - Kulkarni et al

3 - Pune

4 - Mohee &amp; Miller

5 - Chattopadhyay et al

6 - Orissa

7 - Pinto et al

8 - Gaal et al

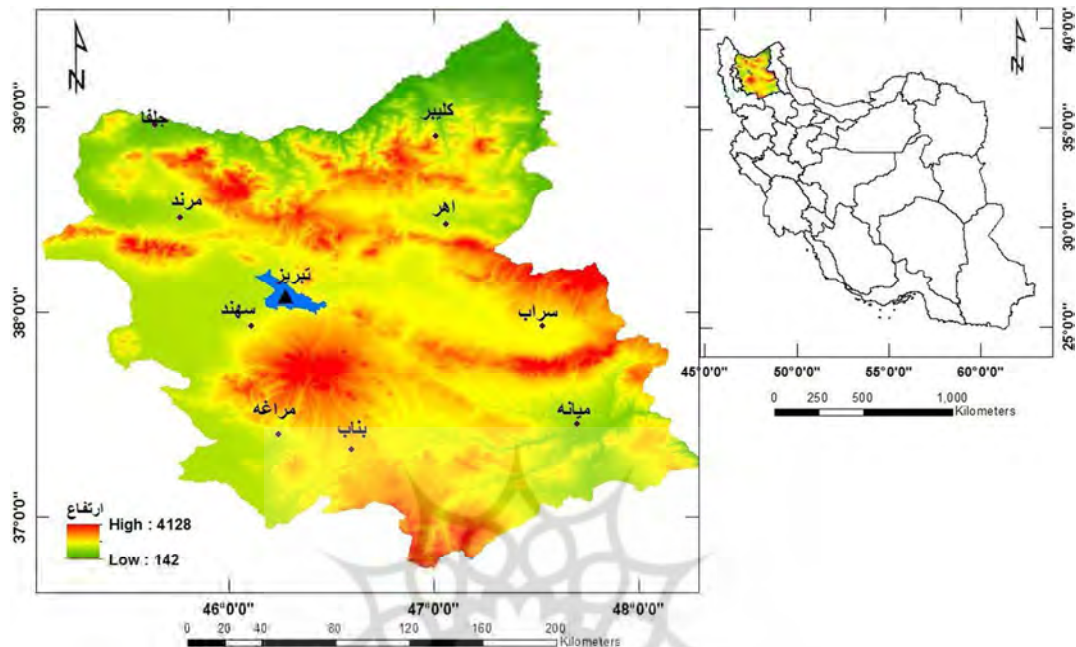
9 - Sonadara

معرفی کرده‌اند. همچنین به کمک روش تحلیل خوشه‌ای مشخص کرده‌اند که ماه می (اردیبهشت) و فصل بهار دارای بیشترین فراوانی رخداد توفان‌های تندری هستند. صلاحی (۱۳۸۹) نیز به بررسی ویژگی‌های آماری و همدید توفان‌های تندری در استان اردبیل پرداخته است. نتایج نشان داد که بیشترین رخداد توفان‌های تندری متعلق به ماه می (اردیبهشت) می‌باشد. 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 نبوده و مشاهدات در مقیاس سالانه از شمال به سمت جنوب کاهش می‌یابد. لشکری و آقاسی (۱۳۹۲) به تحلیل سینوپتیکی توفان‌های تندری تبریز در فاصله زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۹۹۵ پرداختند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که تمام شرایط لازم برای ایجاد توفان تندری در این محدوده زمانی و مکانی کاملاً مهیاست. دارند و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی روند تغییرات فراوانی وقوع توفان‌های تندری در ایران با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده روند افزایشی معنادار اغلب ایستگاه‌های واقع در شمال‌غرب، غرب، شمال و شمال‌شرق کشور ایران می‌باشد. عباس‌نیا و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل و پیش‌بینی روزهای توفانی شهرستان سبزواری با استفاده از روش زنجیره مارکف دو حالت پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در طی دوره مورد مطالعه تداوم توالی‌های توفانی یک روزه و دو روزه بیش‌ترین فراوانی را داشته است. جوان (۱۳۹۵) به بررسی احتمال تواتر و تداوم روزهای بارانی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل زنجیره مارکف پرداخته و به این نتیجه رسید میانگین تداوم روزهای بارانی در حوضه در حدود دو روز بوده و احتمال تعادل حالت خشک بیشتر از حالت بارانی می‌باشد. طاوسی و ریگی (۱۳۹۶) به بررسی تداوم روزهای توفانی شهر زاهدان بر پایه زنجیره مارکف پرداختند. بررسی دوره‌های توفانی یک تا هفت روزه در زاهدان نشان داد که بیشینه تداوم دوره‌های توفانی در اواخر زمستان و اوایل بهار و کمینه آن در اواسط پاییز رخ می‌دهد.

هدف پژوهش حاضر، تعیین احتمال رخداد روزهای توفان‌های تندری در ایستگاه تبریز در فصل بهار (آوریل، می و ژوئن) با استفاده از مدل زنجیره مارکف می‌باشد. شناخت توفان‌های تندری و بررسی احتمال وقوع آن‌ها در هر منطقه می‌تواند امری راهگشا در برنامه‌ریزی و مدیریت بحران بلایای طبیعی باشد.

## داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش برای بررسی احتمال وقوع روزهای همراه با توفان‌های تندری در ایستگاه تبریز، داده‌های مربوط به پدیده‌های خاص در دوره آماری ۶۵ ساله (۲۰۱۵-۱۹۵۱) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده و کدهای مربوط به توفان تندری (۹۵-۹۹) استخراج گردید (جدول ۱). تمرکز این مطالعه بر توفان‌های تندری بهاره است، چرا که بخش قابل توجهی از توفان‌های تندری در شمال‌غرب ایران و بویژه ایستگاه تبریز طی فصل بهار (آوریل، می و ژوئن) اتفاق می‌افتد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک تبریز در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه  
منبع: (نگارندگان)

جدول ۱: کدهای مربوط به پدیده توفان تندری

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

مدل زنجیره مارکف، از جمله فرایندهای تصادفی هستند که در شبیه سازی و مدل سازی سری های زمانی گسسته کاربرد گسترده ای دارند. وابستگی متغیرهای تصادفی به زمان در سری های زمانی از طریق ضریب خودهمبستگی یا ماتریس های احتمال انتقال بیان می شوند (آشگرطوسی و همکاران، ۱۳۸۲). ماتریس احتمال انتقال، ماتریس مربعی است که بسته به تعداد حالت های آن، تعداد  $n$  ترکیب ممکن از احتمال انتقال از حالتی به حالت دیگر را در بر می گیرد. مدل زنجیره مارکف بر اساس تعداد حالت ها و احتمال های انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$  ( $P_{ij}$ ) شناخته می شود. احتمال انتقال بیانگر احتمال قرار گرفتن سیستم در یکی از حالت های ممکن در گام زمانی آینده می باشد. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول، اصلی ترین شکل مدل زنجیره مارکف به حساب می آید. زنجیره مارکف مرتبه اول عبارت

است از یک سری زمانی گسسته که در آن، رفتار سری در گام زمانی آینده تنها به حال بستگی دارد نه به گام‌های زمانی گذشته. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول به شکل زیر بیان می‌گردد (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۶):

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

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

تعداد متغیرها در زنجیره مارکف می‌تواند از دو تا  $N$  حالت تغییر یابد. در اقلیم شناسی و هیدرولوژی، زنجیره مارکف دو یا سه حالت بیشترین کاربرد را دارد (ویلکز، ۲۰۰۶). اگر حالت‌های ممکن برای سری زمانی روزهای همراه با توفان تندی در این مطالعه، روزهای عادی (0) و روزهای همراه با توفان تندی (1) در نظر گرفته شود، وضعیت محیط در گام بعدی می‌تواند با درصدی از احتمال، هر یک از حالت‌های 0 و 1 باشد. با مشخص شدن عناصر ماتریس، احتمال انتقال برخی از ویژگی‌های مهم سری داده‌ها به صورت زیر محاسبه شد:

**الف:** فراوانی وقوع هر یک از حالت‌های دوگانه (روزهای همراه با توفان تندی و عادی) و تغییر حالت‌ها نسبت به هم محاسبه شد و ماتریس فراوانی انتقال به صورت زیر از روی سری داده‌های گسسته تعیین شد:

$$N = \begin{bmatrix} N_{00} & N_{01} \\ N_{10} & N_{11} \end{bmatrix}$$

در این ماتریس،  $N_{00}$  تغییر وضعیت از روز عادی به روز عادی،  $N_{01}$  تغییر وضعیت از روز عادی به روز همراه با توفان تندی،  $N_{10}$  تغییر وضعیت از روز همراه با توفان تندی به روز عادی و  $N_{11}$  تغییر وضعیت از روز همراه با توفان تندی به روز همراه با توفان تندی را نشان می‌دهد.

**ب:** ماتریس احتمال انتقال سری به روش درست نمایی بیشینه محاسبه شد:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}$$

روابط استفاده شده برای محاسبه احتمال انتقال ۴ حالت شرطی به شرح زیر است:

$$P_{00} = \frac{N_{00}}{N_{00} + N_{01}} \quad (2)$$

$$P_{01} = \frac{N_{01}}{N_{00} + N_{01}} \quad (3)$$

$$P_{10} = \frac{N_{10}}{N_{11} + N_{10}} \quad (4)$$

$$P_{11} = \frac{N_{11}}{N_{11} + N_{10}} \quad (5)$$

روابط بالا به ترتیب احتمال انتقال از حالت روز عادی به روز عادی  $P_{dd}$ ، روز عادی به روز همراه با توفان تندی  $P_{dw}$ ، روز همراه با توفان تندی به روز عادی  $P_{wd}$  و روز همراه با توفان تندی به روز همراه با توفان تندی  $P_{ww}$  را نشان می‌دهند.

**ج:** پس از تعیین ماتریس احتمال انتقال لازم است برازش مدل زنجیره مارکف را بر سری داده‌ها بررسی نمود. برای این منظور از آزمون کای دو ( $\chi^2$ ) استفاده می‌شود. 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) داده‌ها است. به عبارت دیگر بایستی آزمون نمود که آیا بین داده‌های متوالی همبستگی معنی داری وجود دارد یا خیر. آماره این آزمون به صورت زیر است:

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(n_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (۶)$$

که در آن  $n_{ij}$  و  $e_{ij}$  به ترتیب فراوانی‌های انتقال مشاهده شده و مورد انتظار در گذر از حالت  $i$  به حالت  $j$  است.  $\chi^2$  محاسبه شده از فرمول فوق با  $\chi^2$  جدول با درجه آزادی  $df = (r-1)(c-1)$  و سطح معنی داری مقایسه می‌شود. اگر  $\chi^2$  محاسبه شده از  $\chi^2$  جدول بزرگتر باشد فرضیه صفر ( $H_0$ ) رد می‌شود (عساکره، ۱۳۸۷).

۵: احتمال ساده (تجربی) وقوع هر یک از حالت‌های همراه با توفان تندری و عادی در هر ماه از تقسیم تعداد روزهای تندری (T) یا عادی (C) هر ماه بر تعداد روزهای همان ماه (N) به دست آمد.

۶: احتمال تعادل برای هر یک از حالت‌های همراه با توفان تندری و عادی با استفاده از مقادیر احتمال انتقال شرطی محاسبه گردید (حجازی‌زاده و شیرخانی، ۱۳۸۴):

$$P_0 = \frac{P_{10}}{P_{10} + P_{01}} \quad (۷)$$

$$P_1 = \frac{P_{01}}{P_{10} + P_{01}} \quad (۸)$$

$P_0$  احتمال تعادل حالت عادی،  $P_1$  احتمال تعادل حالت توفان تندری،  $P_{10}$  و  $P_{01}$  عناصر ماتریس احتمال انتقال می‌باشد.

۷: امید ریاضی یا میانگین تداوم روزهای عادی و همراه با توفان تندری مشخص شد (مون و همکاران، ۱۹۹۴):

$$E_0 = \frac{1}{1 - P_{00}} \quad (۹)$$

$$E_1 = \frac{1}{1 - P_{11}} \quad (۱۰)$$

در این روابط  $E_0$  گویای میانگین تداوم روزهای عادی و  $E_1$  نشان‌دهنده میانگین تداوم روزهای همراه با توفان تندری است.

۸: مجموع طول دو دوره پیاپی همراه با توفان تندری و عادی را یک سیکل هوایی گویند. هر سیکل هوایی ( $E_c$ ) نشان‌دهنده یک دوره همراه با توفان تندری با یک دوره عادی است که پشت سر هم قرار می‌گیرند (مون و همکاران، ۱۹۹۴):

$$E_c = E_0 + E_1 \quad (۱۱)$$

۹: فراوانی وقوع دوره‌های یک تا ده روزه دوره‌های همراه با توفان تندری با استفاده از فرمول زیر برآورد شد (حجازی‌زاده و شیرخانی، ۱۳۸۴):

$$W_n = 1 + \frac{(N-n)p_{10} \cdot p_{01} (1-p_{10})^{n-1}}{p_{10} + p_{01}} \quad (۱۲)$$

$W_n$ : تعداد دوره‌های  $n$  روزه همراه با توفان تندری در یک دوره معین،  $N$ : تعداد کل روزهای دوره آماری،  $n$ : طول دوره روزهای همراه با توفان تندری (۱ روزه، ۲ روزه، ۳ روزه و ...)،  $P_{01}$  و  $P_{10}$  عناصر ماتریس احتمال انتقالی زنجیره مارکف.

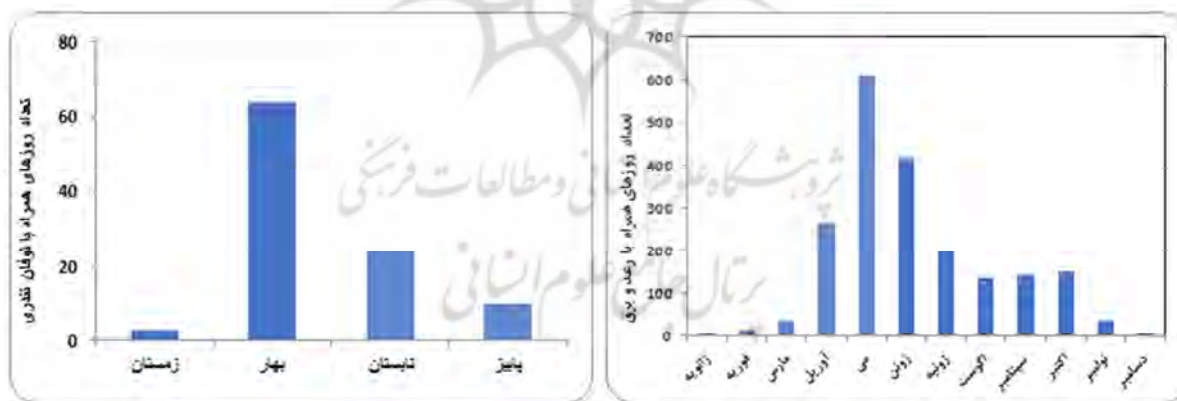
ط: دوره بازگشت  $n$  روزه دوره‌های روزهای همراه با توفان تندری از رابطه زیر به دست آمد (عساکره، ۱۳۸۷):

$$T_n = \frac{1}{pn-1(1-p)} \quad (۱۳)$$

در اینجا  $T_n$  دوره بازگشت روزهای همراه با توفان تندری  $n$  روزه،  $P$  احتمال تعادل روز همراه با توفان تندری و  $n$  دوره همراه با توفان تندری مورد نظر طی  $n$  روز است.

## نتایج و بحث

با توجه به شرایط اقلیمی ایستگاه تبریز و نتایج به دست آمده از پردازش فراوانی روزهای همراه با توفان تندری در این ایستگاه مشخص شد که کل فراوانی روزهای همراه با توفان تندری طی دوره ۶۵ ساله اخیر، ۲۰۲۷ روز بوده است. بیشترین روزهای همراه با توفان تندری در ماه می با مجموع ۶۰۹ روز مشاهده می‌شود و ماه‌های آوریل، می و ژوئن بازه زمانی است که بیشترین روزهای همراه با توفان تندری را در برمی‌گیرد (شکل ۲). از نظر فصلی، در فصل بهار در دوره آماری مورد مطالعه، فراوانی روزهای همراه با توفان تندری به بیشترین حد (۶۴ درصد) می‌رسد (شکل ۳).



شکل ۲: توزیع ماهانه توفانهای تندری در ایستگاه تبریز شکل ۳: توزیع فصلی توفانهای تندری در ایستگاه تبریز

برای بررسی تداوم و تواتر رخداد روزهای همراه با توفان تندری در ایستگاه تبریز، ابتدا فراوانی روزهای همراه با توفان تندری در ماه‌های آوریل، می و ژوئن محاسبه گردید. با توجه به اینکه در تبریز، بیشترین فراوانی توالی روزهای همراه با توفان تندری مربوط به توالی‌های کوتاه‌مدت یک روزه و دو روزه است لذا در این پژوهش، برای افزایش دقت برآورد احتمالات از زنجیره مارکف مرتبه اول (احتمال انتقال خصوصیت مارکفی برای امروز و فردا) استفاده گردید. بر مبنای دو حالت روز عادی و روز توفان تندری، تعداد حالت‌های انتقال شرطی برای سری‌های زمانی توفان‌های تندری در ماه‌های مورد مطالعه شمارش شد. ماتریس فراوانی انتقال مشاهده شده در سمت راست جدول ۲ آورده شده است.



جهت ارزیابی ماتریس تغییر حالت مارکوفی از آزمون  $\chi^2$  استفاده شده است. نتایج برازش مدل زنجیره مارکف مرتبه اول دو حالت بر داده‌های روزهای همراه با توفان تندری ایستگاه تبریز در سمت چپ جدول ۲ آورده شده است. بررسی جدول مذکور نشان می‌دهد که در ماه‌های مورد مطالعه، آزمون کای مربع، برازش مدل مارکف مرتبه اول را بر داده‌ها با سطح اطمینان ۹۹٪ تایید می‌کند؛ زیرا مقدار  $\chi^2$  محاسبه شده بسیار بزرگ‌تر از سطح بحرانی برازش آزمون در سطح اطمینان ۹۹٪ است. این بدان معنی است که فراوانی حالات از زنجیره مارکف دو حالتی پیروی می‌کند. بنابراین بررسی و تحلیل دوره‌های توفان تندری ایستگاه تبریز با استفاده از مدل مارکف مرتبه اول مورد توجه قرار گرفت.

جدول ۲: آزمون  $\chi^2$  برای ارزیابی برازش مدل زنجیره مارکف مرتبه اول بر داده‌های توفان‌های تندری ایستگاه تبریز

| $\chi^2$ نظری | $\chi^2$ محاسبه شده | ماتریس فراوانی انتقال مورد انتظار |          |          |          | ماتریس فراوانی انتقال مشاهده شده |          |          |          | ماه‌ها |
|---------------|---------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------------------------------|----------|----------|----------|--------|
|               |                     | $E_{11}$                          | $E_{10}$ | $E_{01}$ | $E_{00}$ | $N_{11}$                         | $N_{10}$ | $N_{01}$ | $N_{00}$ |        |
| ۶/۶           | ۱۰۰/۳               | ۳۶                                | ۲۲۹      | ۲۲۹      | ۱۴۵۴     | ۸۸                               | ۱۷۷      | ۱۷۷      | ۱۵۰۶     | آوریل  |
| ۶/۶           | ۹۷/۶                | ۱۸۳/۵                             | ۴۲۴/۵    | ۴۲۴/۵    | ۹۸۱/۵    | ۲۷۷                              | ۳۳۱      | ۳۳۱      | ۱۰۷۵     | می     |
| ۶/۶           | ۲۵۰                 | ۸۹/۵                              | ۳۲۸/۵    | ۳۲۷/۵    | ۱۲۰۲/۵   | ۲۰۷                              | ۲۱۱      | ۲۱۰      | ۱۳۲۰     | ژوئن   |

جدول ۴ ماتریس احتمال انتقال سری‌های زمانی توفان‌های تندری را نشان می‌دهد. اعداد هر کدام از سلول‌های این جدول، بیانگر احتمال وقوع حالات مختلف توفانی و غیرتوفانی در دوره مورد بررسی است. به طور نمونه در ماه می که بیشترین فراوانی توفان‌های تندری مشاهده می‌شود، احتمال وقوع یک روز همراه با توفان تندری بعد از یک روز توفانی دیگر ۴۶ درصد است؛ در صورتی که احتمال وقوع یک روز عادی (غیرتوفانی) بعد از یک روز عادی دیگر ۷۶ درصد است. در ماه می کم‌ترین میزان احتمال به‌دست آمده مربوط به وقوع یک روز همراه با توفان تندری بعد از یک روز عادی (غیرتوفانی) است که با احتمال ۲۴ درصد به وقوع می‌پیوندد.

نتایج ماتریس‌ها نشان می‌دهد مقادیر  $P_{00}$  که بیانگر دو روز عادی متوالی است در تمام ماه‌ها بیشتر از ۷۵ درصد می‌باشد، در عوض احتمال گذر از حالت عادی به توفان تندری ( $P_{01}$ ) بسیار کم و در حدود ۱۱ تا ۲۴ درصد می‌باشد. همچنین احتمال  $P_{11}$  که بیانگر دو روز همراه با توفان تندری متوالی می‌باشد کمتر از ۵۰ درصد است. مقایسه حالت  $P_{00}$  با  $P_{11}$  بیانگر برتری نسبی حالت عادی نسبت به حالت توفان تندری است. مقدار  $P_{00}$  در تمام ماه‌ها بیشتر از مقدار  $P_{11}$  می‌باشد.

جدول ۳: ماتریس احتمال حالت‌های انتقال شرطی

| ایستگاه | $P_{00}$ | $P_{01}$ | $P_{10}$ | $P_{11}$ |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| آوریل   | ۰/۸۹     | ۰/۱۱     | ۰/۶۷     | ۰/۳۳     |
| می      | ۰/۷۶     | ۰/۲۴     | ۰/۵۴     | ۰/۴۶     |
| ژوئن    | ۰/۸۶     | ۰/۱۴     | ۰/۵۰     | ۰/۵۰     |

برخی از خصوصیات مهم دیگر مرتبط با دوره‌های عادی و همراه با توفان تندری تبریز، با استفاده از ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکف محاسبه شد (جدول ۴). این ویژگی‌ها شامل احتمالات ساده تجربی و احتمال تعادل دوره‌ها، فراوانی وقوع روزهای عادی و همراه با توفان تندری، طول هر یک از این دوره‌ها و سیکل ترکیبی آن‌ها می‌باشد. بررسی مقادیر احتمال تجربی و احتمال اقلیمی (تعادل) به دست آمده برای هر ماه، بیانگر مقایسه درصد احتمالات مشاهده شده و مورد انتظار وقوع روزهای همراه با توفان تندری و روزهای عادی در تبریز است. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود اختلاف بسیار ناچیزی بین این احتمالات وجود دارد؛ به طوری که این اختلاف به ندرت به یک درصد می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روابط مورد استفاده در مدل زنجیره مارکف از دقت کافی برای تعیین احتمال وقوع روزهای همراه با توفان تندری در تبریز برخوردار بوده و می‌توان از آن‌ها با اطمینان در بررسی‌های مورد نظر استفاده کرد.

بررسی فراوانی وقوع روزهای همراه با توفان تندری و روزهای عادی در ماه‌های آوریل، می و ژوئن نشان داد که متوسط وقوع روزهای همراه با توفان تندری در این ماه‌ها به ترتیب ۴، ۹ و ۶ روز در هر ماه می‌باشد. مطالعه میانگین طول دوره‌های همراه با توفان تندری در تبریز طی دوره آماری ۶۵ ساله، بیانگر این است که طول این دوره‌ها در تبریز در ماه‌های مورد مطالعه به بیش از دو روز نرسیده است.

مجموع دوره‌های پی‌درپی غیر توفانی (عادی) و همراه با توفان تندری که با عنوان سیکل هوایی نامیده می‌شود در ستون آخر جدول ۴ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، کوتاه‌ترین سیکل هوایی مربوط به ماه می است که بیش‌ترین فراوانی توفان تندری را داشته است و بالعکس طولانی‌ترین سیکل هوایی مربوط به ماه آوریل است که از روزهای همراه با توفان تندری کم‌تری برخوردار بوده است. به عنوان مثال در ماه می هر ۶ روز یکبار، شاهد یک سیکل هوایی ترکیبی شامل یک دوره عادی غیر توفانی ۴ روزه و یک دوره همراه با توفان تندری ۲ روزه خواهیم بود؛ در حالی که در ماه آوریل این سیکل هوایی ۱۱ روزه خواهد بود.

جدول ۴: ویژگی‌های دوره‌های همراه با توفان تندری و دوره‌های عادی در ایستگاه تبریز

| سیکل هوایی | طول میانگین دوره‌ها |       | فراوانی روزها |       | احتمال تعادل |       | احتمال تجربی |       | خصوصیات مارکفی |
|------------|---------------------|-------|---------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|----------------|
|            | $E_1$               | $E_0$ | $R_1$         | $R_0$ | $P_1$        | $P_0$ | C/N          | T/N   | ماه            |
| ۱۱         | ۱/۵                 | ۹/۵   | ۴/۱           | ۲۵/۹  | ۰/۱۳۶        | ۰/۸۶۴ | ۰/۱۳۶        | ۰/۸۶۴ | آوریل          |
| ۶          | ۱/۸                 | ۴/۲   | ۹/۴           | ۲۱/۶  | ۰/۳۰۲        | ۰/۶۹۸ | ۰/۳۰۲        | ۰/۶۹۸ | می             |
| ۹          | ۲                   | ۷     | ۶/۴           | ۲۳/۶  | ۰/۲۱۴        | ۰/۷۸۶ | ۰/۲۱۵        | ۰/۷۸۵ | ژوئن           |

یکی از اهداف این تحقیق برآورد توالی دوره‌های همراه با توفان تندری در ایستگاه تبریز است. توالی دوره‌های توفان تندری به توالی روزهایی اطلاق می‌شود که در آن روزها حداقل یک مورد توفان تندری اتفاق افتاده است و ابتدا و انتهای این دوره‌ها به روزهای عادی و غیرتوفانی محدود می‌شود. جدول ۴ مقایسه دوره‌های همراه با توفان تندری

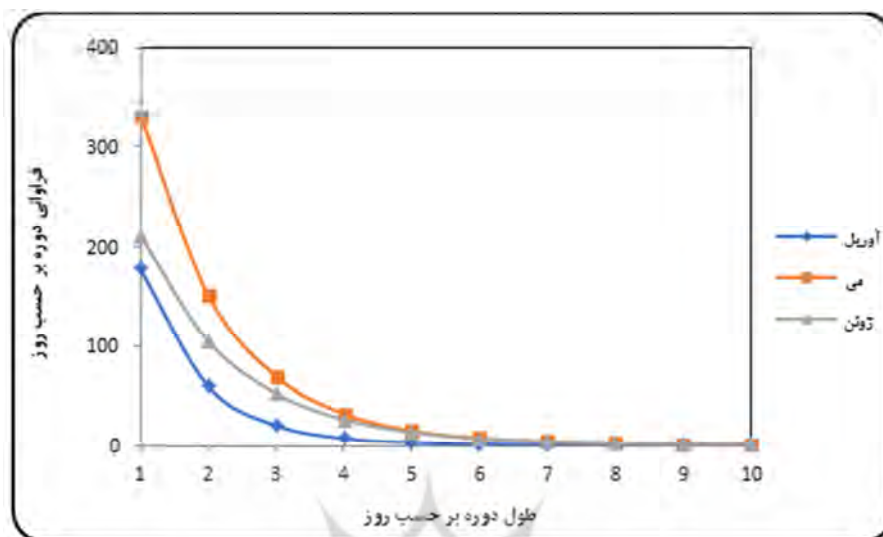
مشاهده شده و دوره‌های برآورد شده توسط مدل زنجیره مارکف را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در طی دوره آماری ۶۵ ساله، توالی دوره‌های توفانی یک‌روزه و دو روزه بیش‌ترین فراوانی را داشته است و به تدریج برای توالی‌های طولانی‌تر، از فراوانی دوره‌های همراه با توفان تندری کاسته می‌شود. بررسی نتایج حاصل از ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده دوره‌های همراه با توفان تندری در ایستگاه تبریز نشان می‌دهد که میزان دقت مدل زنجیره مارکف در برآورد دوره‌های توفانی در ماه‌های آوریل، می و ژوئن بالاتر از ۰/۹۹ می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴: فراوانی مشاهده شده و برآورد شده دوره‌های همراه با توفان تندری n روزه در تبریز

| ماه<br>توالی | آوریل  |        | می     |        | ژوئن   |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | مشاهده | برآورد | مشاهده | برآورد | مشاهده | برآورد |
| روزه ۱       | ۱۱۸    | ۱۷۸    | ۱۸۰    | ۳۳۲    | ۱۱۴    | ۲۱۱    |
| روزه ۲       | ۴۵     | ۶۰     | ۸۶     | ۱۵۲    | ۵۱     | ۱۰۵    |
| روزه ۳       | ۷      | ۲۱     | ۳۲     | ۷۰     | ۲۱     | ۵۳     |
| روزه ۴       | ۶      | ۷      | ۱۵     | ۳۲     | ۱۰     | ۲۷     |
| روزه ۵       | ۲      | ۳      | ۶      | ۱۵     | ۴      | ۱۴     |
| روزه ۶       | ۲      | ۲      | ۹      | ۷      | ۴      | ۷      |
| روزه ۷       | ۰      | ۱      | ۱      | ۴      | ۱      | ۴      |
| روزه ۸       | ۰      | ۱      | ۱      | ۲      | ۲      | ۳      |
| روزه ۹       | ۰      | ۱      | ۱      | ۲      | ۱      | ۲      |
| روزه ۱۰      | ۰      | ۱      | ۰      | ۱      | ۰      | ۱      |
| <b>R*</b>    | ۰/۹۹   |        | ۰/۹۹   |        | ۰/۹۹   |        |

R\*: ضریب همبستگی بین فراوانی‌های مشاهده شده و برآورد شده

شکل ۴ گویای این مطلب است که با افزایش طول دوره‌ها، از فراوانی روزهای همراه با توفان تندری کاسته می‌شود. به عنوان مثال در طی دوره ۶۵ ساله در ماه می، فراوانی دوره یک روزه همراه با توفان تندری ۳۳۲ روز برآورد شده است؛ در حالی که فراوانی پنج روزه به ۱۰ روز و فراوانی ده‌روزه همراه با توفان تندری به یک روز کاهش یافته است. این بدان معنی است که توفان‌های تندری اتفاق افتاده تداوم زیادی ندارند. احتمال وقوع دوره‌های همراه با توفان تندری یک تا ده روزه نیز در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول نیز مشاهده می‌شود با افزایش طول دوره‌های توفانی، احتمال وقوع آنها کاهش می‌یابد.

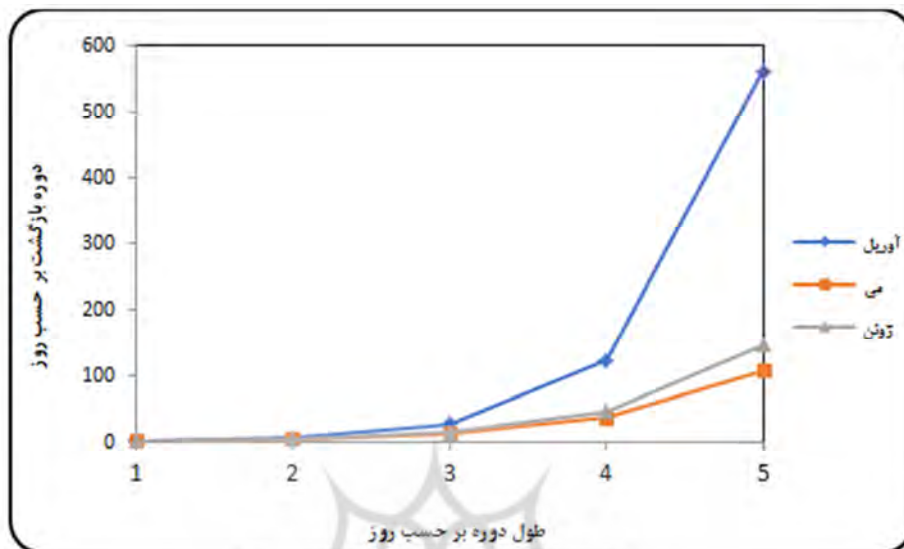


شکل ۴: نمودار فراوانی برآورد شده تعداد دوره‌های n روزه همراه با توفان تندری در ایستگاه تبریز

جدول ۵: احتمال وقوع دوره‌های n روزه همراه با توفان تندری در ایستگاه تبریز

| تداوم | آوریل | می    | ژوئن  |
|-------|-------|-------|-------|
| ۱     | ۰/۷۸۱ | ۰/۶۵۴ | ۰/۶۸۴ |
| ۲     | ۰/۱۷۱ | ۰/۲۲۶ | ۰/۲۱۶ |
| ۳     | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۶۸ |
| ۴     | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۲۲ |
| ۵     | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۰۷ |
| ۶     | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ |
| ۷     | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ |
| ۸     | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ |
| ۹     | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ |
| ۱۰    | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ |

دوره بازگشت دوره‌های همراه با توفان تندری یک تا ۵ روزه برای ماه‌های مورد مطالعه محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به ازای افزایش طول دوره همراه با توفان تندری، دوره بازگشت آن به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد یعنی زمان زیادی طول می‌کشد تا یک دوره پنج روزه همراه با توفان تندری دوباره اتفاق بیفتد. به عنوان مثال در ماه می دوره بازگشت یک دوره یک‌روزه همراه با توفان تندری ۲ روز است اما دوره بازگشت یک دوره سه‌روزه ۱۳ روز طول می‌باشد.



شکل ۵: دوره بازگشت دوره‌های همراه با توفان تندری یک تا ۵ روزه در تبریز

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش احتمال رخداد توفان‌های تندری بهاره در ایستگاه تبریز با استفاده از مدل زنجیره‌ی مارکف مرتبه اول دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از داده‌های روزانه مربوط به توفان‌های تندری (کدهای ۹۵ تا ۹۹) در یک دوره آماری ۶۵ ساله (۲۰۱۵-۱۹۵۱) در ماه‌های آوریل، می و ژوئن استفاده گردید. انطباق زنجیره مارکف مرتبه اول دو حالت با داده‌های مورد مطالعه با استفاده از آزمون کای دو با سطح اطمینان ۹۹ درصد تایید شد. نتایج ماتریس احتمال شرطی نشان داد مقادیر  $P_{00}$  در تمام ماه‌ها بیشتر از ۷۵ درصد و مقادیر  $P_{11}$  کمتر از ۵۰ درصد است. مقایسه حالت  $P_{00}$  با  $P_{11}$  بیانگر برتری نسبی حالت عادی نسبت به حالت توفان تندری است. مقایسه مقادیر احتمال تجربی و احتمال اقلیمی وقوع روزهای توفانی تندری و روزهای عادی به دست آمده برای هر ماه، بیانگر اختلافات بسیار جزئی بین آنهاست، به طوری که این اختلاف به ندرت به یک درصد می‌رسد. بررسی فراوانی وقوع روزهای همراه با توفان تندری و روزهای عادی در ماه‌های آوریل، می و ژوئن نشان داد که متوسط وقوع روزهای توفانی در این ماه‌ها به ترتیب ۴، ۹ و ۶ روز در هر ماه می‌باشد. همچنین بررسی سیکل هوایی نشان داد که کوتاه‌ترین سیکل هوایی مربوط به ماه می است که بیش‌ترین فراوانی توفان تندری را دارد و بالعکس طولانی‌ترین سیکل هوایی مربوط به ماه آوریل است که فراوانی کم‌تری دارد.

برآورد تداوم‌های یک تا ده روزه دوره‌های همراه با توفان تندری و احتمال وقوع آنها نشان داد که در طی دوره آماری ۶۵ ساله، توالی دوره‌های توفانی یک‌روزه و دو روزه بیش‌ترین فراوانی را داشته است. بررسی ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده دوره‌های  $n$  روزه همراه با توفان تندری نشان داد که میزان دقت و اطمینان مورد نظر برای همه ماه‌ها، بالاتر از ۰/۹۹ است. همچنین به ازای افزایش طول دوره‌های همراه با توفان تندری، دوره

بازگشت آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. دوره بازگشت دوره‌های همراه با توفان تندری یک‌روزه و دو روزه به طور متوسط ۱/۵ و ۵ روز می‌باشد.

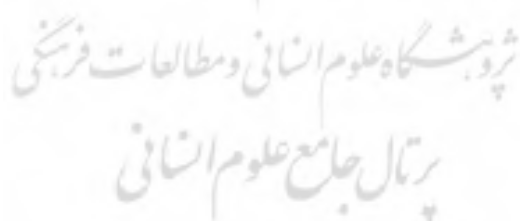
## منابع

- آشگرطوسی، شادی؛ علیزاده، امین و سهیلا جوانمرد (۱۳۸۲). پیش‌بینی احتمال وقوع خشکسالی در استان خراسان، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۰، صص ۱۲۸-۱۱۹.
- جعفرپور، ابراهیم (۱۳۸۵). مبانی اقلیم‌شناسی. انتشارات پیام نور. چاپ هفتم. ۲۰۴ صفحه.
- جوان، خدیجه (۱۳۹۵). بررسی تداوم روزهای بارانی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل زنجیره مارکف، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال شانزدهم، شماره ۴۳، صص ۱۹۳-۱۷۳.
- حجازی‌زاده، زهرا و علیرضا شیرخانی (۱۳۸۴). تحلیل و پیش‌بینی آماری خشکسالی و دوره‌های خشک و تر کوتاه‌مدت در استان خراسان، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۷، شماره ۵۲، صص ۳۱-۱۳.
- خوشحال، جواد و یوسف قویدل رحیمی (۱۳۸۶). شناسایی ویژگی‌های سوانح محیطی منطقه شمال‌غرب ایران: مورد مطالعاتی خطر توفان‌های تندری در تبریز، فصلنامه مدرس علوم انسانی، دوره ۱۱ (پیاپی ۵۳)، صص ۱۱۵-۱۰۱.
- دارند، محمد؛ نریمانی، مهتاب؛ شریعتی، ژیلا و شرمین نامداری (۱۳۹۴). تحلیل زمانی مکانی روند شمار روزهای توفان‌های تندری در ایران زمین، جغرافیا و مطالعات محیطی، دوره ۴، شماره ۱۵، صص ۴۸-۳۵.
- رسولی، علی‌اکبر (۱۳۸۴). مدل‌سازی بارش‌های رعد و برقی محدوده شهر تبریز از دیدگاه ریسک وقوع سیلاب، کنفرانس بین‌المللی بلایای طبیعی ۵-۷ مهر، ۱۳۸۴، دانشگاه تبریز، صص ۱۱۹-۱.
- رسولی، علی‌اکبر؛ بلاق جمالی، جواد و اروج جلالی (۱۳۸۶). توزیع زمانی بارش‌های رعد و برقی منطقه شمال‌غرب ایران، مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان، شماره ۲۲، صص ۱۷۰-۱۵۶.
- رسولی، علی‌اکبر و خدیجه جوان (۱۳۹۱). تحلیل روند وقوع توفان‌های رعد و برقی در نیمه غربی ایران با کاربرد آزمون‌های ناپارامتری، فضای جغرافیایی، سال دوازدهم، شماره ۳۸، صص ۱۲۶-۱۱۱.
- رضیعی، طیب؛ دانش‌کار آراسته، پیمان؛ اختری، روح‌انگیز و بهرام ثقفیان (۱۳۸۶). بررسی خشکسالی‌های هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف، تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره ۱، صص ۳۵-۲۵.
- صلاحی، برومند (۱۳۸۹). بررسی ویژگی‌های آماری و هم‌دیدگی توفان‌های تندری استان اردبیل، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، شماره ۷۲، صص ۱۴۱-۱۲۹.
- طاوسی، تقی و الله‌بخش ریگی (۱۳۹۶). تحلیل تداوم روزهای توفانی شهر زاهدان با استفاده از مدل زنجیره مارکف، فضای جغرافیایی، سال هفدهم، شماره ۵۸، صص ۱۴۸-۱۳۱.
- عباس‌نیا، عباس؛ طاوسی، تقی و سیما پورهایمی (۱۳۹۴). تحلیل و پیش‌بینی آماری دوره‌های توفانی کوتاه مدت سبزواری با استفاده از زنجیره مارکف، فضای جغرافیایی، سال پانزدهم، شماره ۵۰، صص ۲۵۰-۲۳۳.
- عساکره، حسین (۱۳۸۷). بررسی احتمال تواتر و تداوم روزهای بارانی در شهر تبریز با استفاده از مدل زنجیره مارکف، تحقیقات منابع آب، سال چهارم، شماره ۲، صص ۵۶-۴۶.
- علیزاده، امین (۱۳۸۹). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات آستان قدس رضوی. دانشگاه امام رضا. چاپ سی‌ام. ۴۳۲ صفحه.
- علیزاده، امین؛ کمالی، غلامعلی؛ موسوی، فرهاد؛ موسوی بایگی، محمد (۱۳۸۰). هوا و اقلیم‌شناسی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. چاپ دوم. صفحه ۳۹۲. صفحه.
- کاوایی، محمدرضا و بهلول علیجانی (۱۳۷۵). مبانی آب و هواشناسی. انتشارات سمت. چاپ چهارم. ۵۹۰ صفحه.

لشکری، حسن و نوشین آقاسی (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیکی توفانهای تندری تبریز در فاصله زمانی (۲۰۰۵-۱۹۹۶)، جغرافیا و برنامه ریزی، سال ۱۷، شماره ۴۵، صص ۲۳۴-۲۰۳.

مقیم، ابراهیم (۱۳۹۳). دانش مخاطرات برای زندگی با کیفیت بهتر و محیط پایدارتر. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۴۲ صفحه.

- Ahrens, C. D. (2012). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage Learning.
- Blunden, J., & Arndt, D. S. (2016). State of the Climate in 2015. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(8).
- Chattopadhyay, S., Acharya, N., Chattopadhyay, G., Prasad, S. K., & 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., & De, U. K. (2001). Markov chain models for pre-monsoon thunderstorm in Calcutta, India.
- Gaál, L., Molnar, P., & Szolgyai, J. (2014, May). Spatial analysis of intense thunderstorms in Switzerland and temporal trends in their occurrence. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 16, p. 11136).
- Kulkarni, M. K., Kandalgaonkar, S. S., Tinmaker, M. I. R., & Nath, A. (2002). Markov chain models for pre-monsoon season thunderstorms over Pune. *International journal of climatology*, 22(11), 1415-1420.
- Mohee, F. M., & Miller, C. (2010). Climatology of thunderstorms for North Dakota, 2002-06. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(9), 1881-1890.
- Moon, S. E., Ryo, S. B., & Kwon, J. G. (1994). A Markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea. *International journal of climatology*, 14(9), 1009-1016.
- Pinto, O., Pinto, I. R. C. A., & 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.
- Sonnadara, U. (2016). Spatial and temporal variations of thunderstorm activities over Sri Lanka. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4), 621-628.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (second edition). Academic Press, USA.



## Estimating the occurrence probability of Spring Thunderstorms using Markov chain, Case Study: Tabriz

Mohammadreza Azizzadeh<sup>1</sup>, Khadijeh Javan<sup>\*2</sup>, Ali Akbar Rasouli<sup>3</sup>, Elnaz Ostadi<sup>4</sup>

Received: 01-06-2017

Accepted: 02-06-2018

### Abstract

Thunderstorms are one of the climatic phenomena that cause numerous damages in different parts of the world, due to the accompaniment with thunder, high winds, hail and heavy precipitation. In this study, the probability of thunderstorm days in Tabriz in the spring is analyzed using probabilistic rules and Markov chain model. For this purpose, the daily data related to thunderstorms (codes 95 to 99) was used for 65 years (1951-2015). At first, the daily data is classified into the normal days (code 0) and thunderstorm days (code 1). Then the frequency matrix is formed and the probability matrix is created accordingly based on maximum likelihood method. The Markov chain properties such as empirical probability and equilibrium probability, Frequency of occurrence, mean time periods and weather cycle were investigated. Finally, Occurrence Probability and return period of these spells were determined. The results show that the shortest weather cycle is in May, which has the highest frequency of thunderstorms. Conversely, the longest weather cycle is in April, which has the lowest frequency of thunderstorms. Also, in 65 years period, the one-day and two-day stormy sequences have the highest frequency. And For longer sequences, the frequency of thunderstorm days is reduced. The return period of one-day and two-day stormy spells is 1.5 and 5 days. Regression relation between the observed and estimated values of n-step periods of thunderstorm days shows that the considered accuracy and reliability for all months is more than 99%.

**Keywords:** Thunderstorms, Markov chain, Probability matrix, Return period, Tabriz.

<sup>1</sup>- Department of Geography, Payam Noor University, Tehran, Iran.

<sup>2\*</sup>- Assistant Professor of Climatology, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>3</sup>- Professor of Climatology, Faculty of Geography and planning, Tabriz University, Tabriz, Iran

<sup>4</sup>- PhD Student of Climatology, Faculty of Geography and planning, Tabriz University, Tabriz, Iran

Email: kh.javan@urmia.ac.ir