



محسن عباس نیا^۱
تقی طاوسی^۲
سیما پورهاشمی^۳

تحلیل و پیش بینی آماری دوره‌های توفانی کوتاه مدت سبزوار با استفاده از زنجیره مارکف

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۲۵

چکیده

رخداد حدود ۹۰ درصد از بلایای طبیعی جهان، در ارتباط با عوامل اقلیمی است و در میان آن‌ها، توفان بعد از سیل حدود ۳۰ درصد از سهم این بلایا را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین با توجه به اهمیت این پدیده‌ی اقلیمی، در این مقاله سعی شده است که با استفاده از روش زنجیره مارکف دو حالت، به تحلیل و پیش‌بینی روزهای توفانی شهرستان سبزوار پرداخته شود. برای این منظور ابتدا آمار روزانه باد ایستگاه سبزوار طی دوره آماری (۱۳۹۰-۱۳۵۰) تهیه گردید و سپس روزهای سال به دو گروه توفانی (کد ۱) و آرام (کد ۰) تقسیم‌بندی شد. نتایج حاصل از پردازش داده‌ها نشان داد که حداکثر فراوانی روزهای توفانی در سال ۱۳۸۵ به ۷۹ روز می‌رسد که طی دوره آماری مورد مطالعه، ماه فروردین با ۱۱۳ روز توفانی، بیش‌ترین فراوانی و بالعکس، ماه آبان با ۱۹ روز توفانی، کم‌ترین فراوانی را داشته‌اند. به عبارتی در سبزوار، بهار توفانی‌ترین و پاییز آرام‌ترین فصل سال محسوب می‌شود. ارزیابی فصلی

Email: Am_abbasnia@pgs.usb.ac.ir

Email: t.tavousi@pgs.usb.ac.ir

E-mail: s_pourhashemi@yahoo.com

۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۲- دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۳- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

ماتریس احتمالات مارکف نیز نشان داد که وقوع P_{11} یا دو روز توفانی پشت سرهم برای تمام فصول سال بیش‌تر از ۲۰ درصد نیست. به‌طوری‌که کمینه آن به میزان ۱۰ درصد در فصل پاییز و بیشینه آن به میزان ۱۹ درصد در فصل بهار رخ داده است. درحالی‌که احتمال وقوع P_{00} یا دو روز غیرتوفانی پشت سرهم برای تمام فصول سال کم‌تر از ۹۰ درصد نیست. در ادامه مشخص شد کوتاه‌ترین سیکل هوایی با طول مدت تقریبی ۱۶ روز، متعلق به فصل بهار و بزرگ‌ترین آن نیز با طول مدت تقریبی ۴۵ روز، مربوط به فصل پاییز است. همچنین در طی دوره مورد مطالعه تداوم توالی‌های توفانی یک روزه و دو روزه بیش‌ترین فراوانی را داشته است.

کلید واژه‌ها: سبزوار، مدل زنجیره مارکف، دوره‌های توفانی کوتاه مدت.

مقدمه

در سراسر جهان بلایا و مخاطراتی است که همواره جان و مال بشر را در معرض خطر قرار می‌دهد. در میان این بلایا، توفان یکی از مخاطره‌آمیزترین آن‌ها می‌باشد و در ردیف بلایایی قرار دارد که منشا آب‌وهوایی دارند (قائم‌ی و عدل، ۱۳۷۱: ۷). توفان به‌عنوان یک پدیده‌ی اقلیمی، نقش بسیار موثری در زندگی انسان و برنامه‌ریزی‌های حال و آینده داشته و همواره یکی از پایه‌های مطالعاتی برنامه‌ریزی محیطی می‌باشد. یکی از معضلات مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود توفان‌های شن یا وجود بادهای شدید می‌باشد. این مسئله سبب شده است تا برای ساکنان این‌گونه مناطق مشکلات عدیده‌ای را به وجود می‌آورد. در بیابان‌ها و مناطق خشک، تغییر سریع درجه حرارت هوا، موجب ایجاد گرادیان فشار در نقاط مختلف آن و تشکیل بادهای قوی و دائمی می‌شود (صدقت، ۱۳۵۸: ۸۱). از آن جایی که در اطراف شهرستان سبزوار، تپه‌های ماسه‌ای تثبیت نشده‌ای وجود دارند و منبع اصلی تغذیه‌ی گردوغباری بادهای شدید آن محسوب می‌شوند، لذا در سال‌های اخیر در این شهرستان، وزش مکرر توفان‌های همراه با گردوغبار بسیار شدید را شاهد هستیم (مهرشاه و نکونام، ۱۳۸۸: ۸۶). از جمله شدیدترین آن‌ها توفان گرد و غباری است که در تاریخ ۹ خردادماه ۱۳۸۷ این شهرستان را درنوردید و خسارات فراوانی برجای گذاشت. تعداد مصدومین این حادثه و برآورد خسارات مالی ناشی از این توفان همراه با گردوغبار قابل توجه بود (نکونام، ۱۳۸۷: ۱۶۵-۱۶۷). بنابراین درک درست از پدیده‌ی توفان و شناسایی و پیش‌بینی دوره‌های توفانی و آرام، منجر به پیشگیری و تقابل منطقی و درست با آن خواهد شد. به عبارت دیگر به کمینه رساندن خطرات ناشی از رخداد توفان، با انتخاب راهکارهای موثر، ممکن خواهد بود. به‌منظور تعیین سهم دوره‌های توفانی و آرام یک منطقه، دانستن ویژگی‌های باد منطقه در طول شبانه‌روز ضروری بوده و توزیع فراوانی سرعت باد در هر منطقه از دیدگاه‌های مختلف حایز اهمیت

است (استیوارت و اسونجر^۴، ۱۹۸۷: ۶۳۳). به عنوان نمونه سینگ و پاریدا^۵ (۲۰۱۲) وضعیت کنونی جهت‌گیری‌های آینده‌ی استفاده از سرعت و انرژی باد را در هند مورد بررسی قرار دادند. طی پژوهشی مشابه در نیجریه، ویژگی‌های سرعت باد، شناسایی مناطق مستعد وزش بادهای شدید و پر سرعت و ارزیابی انرژی باد برای تولید برق، در سراسر شمال غرب و شمال شرق نیجریه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعه‌ی ایشان ظرفیت‌های توربین‌های بادی در مکان‌های انتخاب شده برای تولید برق را مورد ارزیابی قرار داد.

امروزه بررسی سرعت باد و مخاطرات مربوط به آن، توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف داشته است. در میان روش‌های تحلیل آماری، مدل زنجیره مارکف برای بررسی علمی و دقیق پدیده‌های اقلیمی، طی سال‌های اخیر مورد توجه جدی دانشمندان علوم مختلف جوی قرار گرفته است. زنجیره مارکف یک فرآیند تصادفی بدون حافظه است، بدین معنی که توزیع احتمال شرطی حالت بعد تنها، به حالت فعلی بستگی دارد و به وقایع قبل از آن وابسته نیست. در این مدل احتمال وقوع یک حالت اقلیمی در زمان (t) براساس وضعیت آن در زمان قبل (t-1) پیش‌بینی می‌شود (طاوسی و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۴). زنجیره مارکف در مدل‌سازی دنیای واقعی کاربردهای زیادی دارد. استفاده از روش زنجیره‌ی مارکف به دلیل توانمندی‌های آن در محاسبه‌ی دوره‌های وقوع یا عدم وقوع پدیده‌های مختلف اقلیمی و همچنین ساده کردن حل بسیاری از مسائل احتمالات مزبور به فرآیندهای وابسته، دارای سابقه‌ی طولانی و کاربردی است. معمولاً از این مدل در علوم مختلف نظیر هواشناسی، کشاورزی، اقلیم‌شناسی، منابع طبیعی و غیره استفاده‌ی زیادی به عمل آمده است. پژوهشگران زیادی در خارج از کشور از مدل زنجیره مارکف برای تحلیل و پیش‌بینی رفتارهای اقلیمی گوناگون استفاده کرده‌اند؛ برای نمونه گابریل و نیومن^۶ (۱۹۶۲) برای پیش‌بینی روزهای بارش تل‌آویو، ویکتور و ساستری^۷ (۱۹۷۹) برای محاسبه‌ی احتمالات دوره‌های خشک زمان رشد محصول در دهلی نو، سابرامانیام و سانجیوا^۸ (۱۹۸۶) در بررسی تغییرات بارندگی سواحل آندرای هندوستان، جانسون^۹ (۲۰۰۰) برای پیش‌بینی بی‌نظمی‌های درجه حرارت سطح اقیانوس غیرتوفانی استوایی، درتون و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۳) برای بررسی تورنادوها و همچنین چین و یوان^{۱۱} (۲۰۰۴) برای پیش‌بینی فصلی سطح یخ قطب جنوب از آن استفاده کرده‌اند. در ایران نیز با استفاده از مدل زنجیره‌ی مارکف بررسی‌هایی هر چند اندک بر روی پدیده‌های گوناگون اقلیمی صورت

4- Stewart & Essenwanger

5- Singh & Parida

6- Gabriel & Neumann

7- Victor & Sastry

8- Subramaniam & Sanjeeva

9- Johnson et al

10- Drton et al

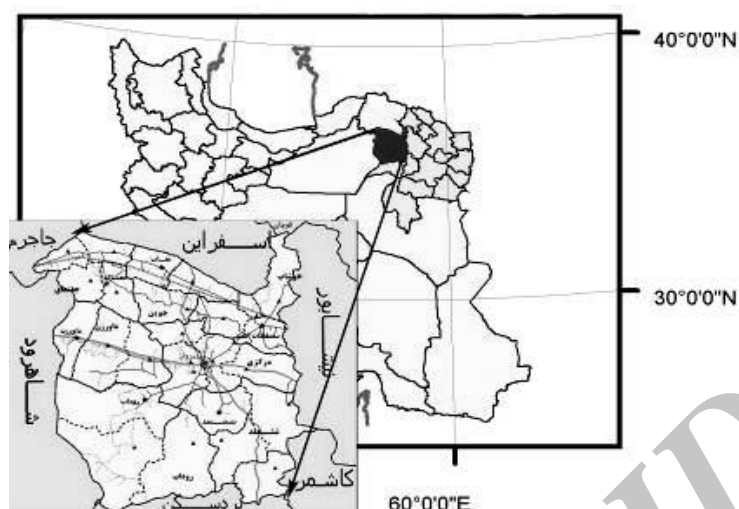
11- Chen, & Yuan

گرفته، در حالی که تاکنون از این روش به صورت علمی و تخصصی، پژوهشی بر روی پدیده‌ی مخاطره‌آمیز توفان صورت نگرفته است. به عنوان نمونه مشکانی (۱۳۶۳) طی پژوهشی با استفاده از مدل زنجیره مارکف احتمال تواتر دوره‌های خشک و تر بابلسر را محاسبه کرد. همچنین در پژوهشی مشابه عساکره و مازینی (۱۳۸۹) با استفاده از این مدل و تحلیل داده‌های بارش روزانه ۵۱ ایستگاه همدید اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی طی دوره آماری ۲۰ ساله، احتمال وقوع روزهای خشک استان گلستان را تعیین نمودند. سلیقه و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل مارکف به تحلیل فضایی بارش فصل مرطوب در استان اردبیل پرداختند. نتایج بررسی ایشان نشان داد که فراوانی توالی‌های خشک در دوره مورد مطالعه، بسیار زیاد بوده و هم چنین دوره‌های خشک و مرطوب کوتاه‌مدت بیش‌تر از دوره‌های خشک و مرطوب بلندمدت اتفاق افتاده است.

امروزه همان‌طور که می‌دانیم، باد یکی از منابع پاک، تمام‌نشدنی و رایگان انرژی است. هم‌چنین باد هنگامی که سرعتش از یک آستانه‌ی مشخص بیش‌تر شود، فعالیت تخریبی آن آغاز شده و منجر به وقوع توفان می‌گردد (هانجن^{۱۲}، ۱۹۷۶: ۱۰۷). بنابراین برای استفاده مناسب و کارا از سرعت باد، آگاهی از ویژگی‌های آماری، تداوم و تغییرات شبانه‌روزی و همچنین مقدار پیش‌بینی‌شده سرعت باد ضروری است. محققانی چون رحیم‌زاده و همکاران (۱۳۸۸)، فرج‌زاده و رازی (۱۳۹۰)، رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از سایر روش‌های آماری وجود روند، فراوانی و تغییرات سرعت باد را مطالعه نموده‌اند. تاکنون بررسی جامع و کاملی بر روی توفان سبزوار، که یکی از مناطق مستعد این پدیده‌ی مخرب اقلیمی است، (علی‌آبادی و دادرسی، ۱۳۸۴؛ مهرشاهی و نکونام، ۱۳۸۸) انجام نشده و از طرف دیگر زنجیره‌ی مارکف، مدل بسیار مناسبی برای بررسی و پیش‌بینی توالی‌های کوتاه مدت توفانی است، بنابراین این ضرورت ایجاد شد که در این تحقیق ضمن شناسایی و تحلیل وضعیت کنونی دوره‌های توفانی شهرستان سبزوار، سعی گردد که فراوانی دوره‌های توفانی آینده‌ی محدودی مورد مطالعه با استفاده از مدل زنجیره‌ی مارکف پیش‌بینی شود.

مواد و روش‌ها

شهرستان سبزوار منطقه‌ای نیمه‌خشک و توفان‌خیز است و از لحاظ موقعیت جغرافیایی در شمال‌غرب استان خراسان رضوی (شکل ۱) و حاشیه‌ی دشت کویر واقع شده است (پروانه و دهقانی، ۱۳۸۸: ۱۸). همچنین به لحاظ اقلیمی منطقه‌ی سبزوار در میان ارتفاعات شمالی و جنوبی محصور است و به‌همین علت این مناطق دارای آب و هوایی کوهستانی و معتدل می‌باشد و در قسمت جلگه‌ای خود دارای آب و هوای خشک و معتدل است.



شکل ۱: موقعیت نسبی و ریاضی منطقه مورد مطالعه

ابتدا جهت بررسی ویژگی‌های توفانی شهرستان سبزوار، داده‌های روزانه بادسنجی ایستگاه سینوپتیک سبزوار طی دوره آماری (۱۳۹۰-۱۳۵۰) تهیه گردید. از آنجا که در مطالعات سازمان هواشناسی جهانی، بادهایی با سرعت بیش از ۱۵ متر بر ثانیه (۳۰ نات) به عنوان توفان شناخته می‌شود. بر این اساس در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS روزهای سال به دو گروه روزهای توفانی، به عنوان کد یک (سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه) و روزهای غیرتوفانی (سرعت باد کم‌تر از ۱۵ متر بر ثانیه)، به عنوان کد صفر تعیین گردیدند. در ادامه تمام ماه‌ها و فصول سال با استفاده از مدل زنجیره مارکف مرتبه اول (دو حالت) مورد بررسی قرار گرفت. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول، اصلی‌ترین شکل زنجیره مارکف به شمار می‌رود (رضیعی و همکاران، ۱۳۸۶: ۲۷). زنجیره مارکف مرتبه اول به یک سری زمانی گسسته گفته می‌شود که در آن، رفتار سری زمانی در گام زمانی آینده تنها به زمان حال بستگی دارد و مستقل از شرایط اقلیمی روزهای گذشته است (ویلکس، ۱۹۹۵: ۱۲۸). شکل کلی مدل زنجیره مارکف دو حالت مرتبه اول به شرح زیر بیان می‌شود (مون و همکاران، ۱۹۹۴: ۱۰۱۲):

$$Pr\{x_{t+1} | x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}\} = p_{ij} \{x_{t+1} = j | x_t = i\} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق: P = نشاندهنده ماتریس احتمال انتقال مرتبه اول بین دو حالت پیاپی رخداد «روزهای توفانی» با کد (۱- j) و «روزهای غیر توفانی» با کد (۰- i) است.

x_{t-n} بیانگر دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی است که دارای خاصیت مارکف هستند، که در آن t برابر با زمان وقوع (امروز، فردا...) و $(\pi = 1, 2, 3, \dots)$ برابر با گام زمانی که در تعیین شمار و مرتبه‌ی ماتریس‌های احتمال انتقال نقش دارند. برای نمونه اگر در این فرایند $(x_t = i)$ باشد، گویای حالت (i) در زمان (t) خواهد بود.

پس از تهیه و مرتب‌سازی داده‌ها، برازش مدل مارکف بر داده‌ها در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ و با استفاده از آزمون کی‌دو (chi-square) انجام شد. در مرحله‌ی بعد، پس از بررسی و برازش اولیه‌ی داده‌ها، ماتریس احتمالی - انتقالی زنجیره مارکف، برآورد گردید:

در این مرحله نخستین گام مشخص کردن مقدار احتمال از یک حالت به کلیه‌ی حالت‌های ممکن است. به عبارتی در این مرحله ماتریس‌های احتمالات انتقالی مرتبه اول دو حالت زنجیره مارکف، مشخص و فراوانی هر یک از این زنجیره‌ها به صورت جداگانه تعیین شد. ماتریس احتمالی زنجیره مارکف (p) را برای مرتبه اول دو حالت می‌توان به صورت زیر نوشت. که برای استفاده از این ماتریس در محاسبات بعدی نمادهای p و q به شرح زیر جایگزین شده‌اند:

$$\begin{bmatrix} 1-p & p \\ q & 1-q \end{bmatrix} p = p_{01} \quad q = p_{10} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این ماتریس روز غیرتوفانی (0) و روز توفانی (1) نشان داده شده است. جمله P_{11} احتمال یک روز توفانی بعد از یک روز توفانی و P_{00} احتمال یک روز غیرتوفانی بعد از یک روز غیرتوفانی است. همچنین P_{10} احتمال وقوع یک روز غیرتوفانی بعد از یک روز توفانی و جمله P_{01} احتمال وقوع یک روز توفانی بعد از یک روز غیرتوفانی است. با مشخص شدن عناصر ماتریس، احتمال انتقال برخی از خصوصیات مهم سری مشاهدات همچون احتمالات اقلیمی توفانی و غیرتوفانی مورد انتظار در هر ماه و هر فصل و نیز به صورت سالانه و همچنین احتمالات تجربی توفانی و غیرتوفانی، طول دوره‌های توفانی و غیرتوفانی به دست آمد که نحوه محاسبه این خصوصیات به شرح زیر است:

۱. احتمالات ساده تجربی وقوع روزهای توفانی و غیرتوفانی در هر دوره‌ی زمانی که از تقسیم روزهای توفانی (w) و غیرتوفانی (c) در هر دوره‌ی زمانی، بر تعداد روزهای همان دوره‌ی زمانی (W) به دست می‌آید.

$$w/W \quad \text{رابطه (۳)} = w \quad \text{احتمالات مشاهده‌شده‌ی وقوع روزهای توفانی}$$

$$c/W \quad \text{رابطه (۴)} = c \quad \text{احتمالات مشاهده‌شده‌ی وقوع روزهای آرام یا غیر توفانی}$$

۲. احتمالات اقلیمی مورد انتظار که نشان می‌دهد چند درصد از دوره‌های مورد مطالعه توفانی و چند درصد غیرتوفانی است از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۵) $P_1 =$ احتمالات مورد انتظار وقوع روزهای توفانی

$$P_1 = \frac{P}{p+q}$$

رابطه (۶) $P_0 =$ احتمالات مورد انتظار وقوع روزهای آرام

$$P_0 = 1 - p_1$$

۳. میانگین طول دوره‌های توفانی و غیرتوفانی که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

رابطه (۷) $E_0 =$ طول دوره غیرتوفانی مورد انتظار در هر دوره‌ی زمانی

$$E_0 = \frac{1}{p}$$

رابطه (۸) $E_1 =$ طول دوره توفانی مورد انتظار در هر دوره‌ی زمانی

$$E_1 = \frac{1}{q}$$

۴. بعد از مشخص شدن طول دوره‌های توفانی و غیرتوفانی می‌توان مقدار سیکل هوایی را از جمع این دو دوره (E_0 و E_1) به دست آورد. بنابراین سیکل هوایی نشان‌دهنده یک موسم توفانی و یک موسم غیرتوفانی متوالی است.

رابطه (۹) $E_c =$ سیکل هوایی در هر دوره‌ی زمانی

$$E_c = E_0 + E_1$$

۵. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های قابل محاسبه با این روش، تعیین متوسط فراوانی وقوع روزهای توفانی و غیرتوفانی

در هر دوره‌ی زمانی است. مثلاً به طور متوسط در هر ماه، چند روز توفانی یا غیرتوفانی داریم که با استفاده از روابط

۶ و ۷ مشخص می‌شود:

رابطه (۱۰) $R_0 =$ فراوانی وقوع یا متوسط تعداد روزهای غیرتوفانی در هر دوره‌ی زمانی

$$R_0 = n + \pi_0$$

رابطه (۱۱) $R_1 =$ فراوانی وقوع یا متوسط تعداد روزهای توفانی در همان دوره‌ی زمانی

$$R_1 = n - R_0$$

۶. در پایان با استفاده از رابطه‌ی زیر، احتمال وقوع فراوانی ماهانه توالی دوره‌های توفانی مشاهده شده n روزه، در

طول دوره‌ی مورد مطالعه محاسبه شد:

رابطه (۱۲) دوره‌های توفانی n روزه

$$S_n = 1 + \frac{(N-n)pq(1-p)^{n-1}}{p+q}$$

$S_n =$ تعداد دوره‌های توفانی n روزه در یک دوره معین $n =$ طول

دوره توفانی

$N =$ تعداد کل روزهای دوره آماری p و $q =$ عناصر ماتریس احتمالی انتقالی

یافته‌ها و بحث

فراوانی روزهای توفانی

با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و نتایج به دست آمده از پردازش فراوانی داده‌های توفانی سالانه ایستگاه سبزواری

مشخص شد که کل فراوانی روزهای توفانی طی دوره‌ی ۴۱ ساله‌ی اخیر، ۷۷۷ روز بوده است. بیشینه فراوانی

روزهای توفانی ماهانه، به‌طور میانگین با ۲/۷۵ روز، مربوط به فروردین است که فراوانی روزهای توفانی به ۱۱۳ روز می‌رسد و کمینه فراوانی روزهای توفانی ماهانه، به طور میانگین با ۰/۴۶ روز مربوط به آذر است که فراوانی روزهای توفانی ۱۹ روز بوده است. در فصل بهار طی دوره آماری مورد مطالعه، فراوانی روزهای توفانی به بیش‌ترین تعداد یعنی ۳۰۵ روز می‌رسد به‌عبارتی در سبزواری، بهار توفانی‌ترین فصل محسوب می‌شود. از طرف دیگر فراوانی روزهای توفانی در پاییز به کم‌ترین تعداد روزها یعنی ۹۶ روز می‌رسد که نشان از آرام‌ترین فصل سال دارد (جدول ۱).

جدول ۱- فراوانی و متوسط روزهای توفانی سبزواری طی دوره ۴۱ ساله (۱۳۹۰-۱۳۵۰)

ماهها	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	جمع کل
فراوانی	۱۱۳	۹۰	۱۰۲	۹۶	۶۶	۳۷	۵۳	۲۴	۱۹	۲۷	۶۱	۸۹	۷۷۷
میانگین	۲/۷۵	۲/۱۹	۲/۴۸	۲/۳۴	۱/۶	۰/۹	۱/۲۹	۰/۵۸	۰/۴۶	۰/۶۵	۱/۴۸	۲/۱۷	۱۸/۹

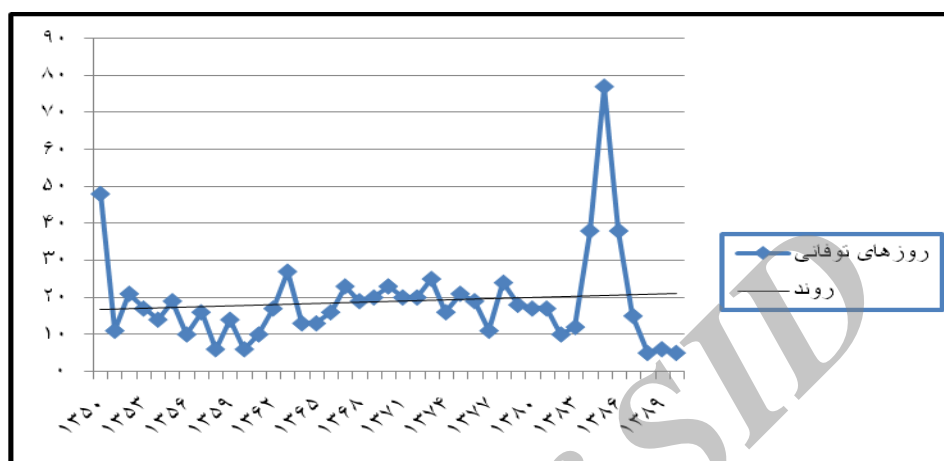
طبق نتایج به‌دست آمده، از اواخر فصل زمستان بر شدت تندبادهای سبزواری افزوده شده و در طی فصل بهار تا ابتدای فصل تابستان ادامه دارد و به تدریج از اواسط فصل تابستان، شدت توفان کاسته شده و در فصل پاییز به کمینه خود می‌رسد، به‌عبارتی پرتوفان‌ترین ماه‌های سال با شدیدترین توفان‌ها منطبق است (جدول ۲). طبق نتایج جدول (۲) از ابتدای فروردین تا مرداد ماه، متوسط سرعت باد به بیش از ۶ متر بر ثانیه می‌رسد، درحالی‌که متوسط سالانه سرعت باد ۵/۴۳ متر بر ثانیه است. بیشینه ماهانه سرعت توفان با ۳۵ متر بر ثانیه در خرداد ماه و سپس با ۳۴ متر بر ثانیه در تیرماه اتفاق افتاده است.

جدول ۲- متوسط و حداکثر شدت توفان سبزواری

ماهها	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
میانگین	۶/۶۰	۶/۵۶	۶/۴۳	۶/۹۹	۶/۳۹	۴/۹۷	۴/۶۷	۴/۰۸	۳/۴۴	۳/۷۷	۵/۱۹	۵/۸۸	۵/۴۳
حداکثر	۲۹	۲۷	۳۵	۳۴	۲۷	۲۷	۲۸	۲۵	۲۷	۲۳	۳۳	۲۹	۳۵

شکل (۲) تغییرات سال به سال فراوانی روزهای توفانی را طی دوره ۴۱ ساله‌ی مورد بررسی نشان می‌دهد، که با رسم خط روند آن مشخص شد، یک روند صعودی دارد. همان‌طور که مشخص است فراوانی روزهای توفانی از سال ۱۳۵۲ تا ۱۳۸۴ یک روند مناسبی را داشته است ولی از سال ۱۳۸۴ به طور جهشی بر تعداد روزهای توفانی افزوده شده، به طوری‌که فراوانی روزهای توفانی در ۱۳۸۵ با ۷۹ روز به بیشینه خود رسیده است. به‌عبارتی در سال

۱۳۸۵، ۲۲ درصد روزهای سال توفانی بوده است. سپس از سال ۱۳۸۶ نمودار فراوانی سالانه توفان روند نزولی به خود می‌گیرد، چنان‌که سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ با فراوانی سالانه ۵ روز، کم‌ترین روزهای توفانی را داشته‌اند.



شکل ۲: تغییرات سالانه فراوانی توفان‌های سبزوار

ویژگی دوره‌های توفانی

باتوجه به این‌که در سبزوار، بیش‌ترین فراوانی توفالی روزهای توفانی، مربوط به توفالی‌های کوتاه‌مدت یک روزه و دو روزه است لذا در این پژوهش، برای افزایش دقت برآورد احتمالات از زنجیره مارکف مرتبه‌ی اول (احتمال انتقال خصوصیت مارکفی برای امروز و فردا) استفاده گردید. پس از تهیه و مرتب‌سازی داده‌ها، برازش مدل مارکف بر داده‌ها، در سطح معنی‌داری $\alpha = 0/05$ و با استفاده از آزمون کی دو (chi-square) انجام شد. آزمون کی دو یا کای اسکوار به شکل زیر می‌باشد، که در آن f_o و f_e به ترتیب مجموع فراوانی مشاهده شده و فراوانی مورد انتظار می‌باشد. K نیز تعداد طبقاتمان است که در مدل مارکف مرتبه اول برابر با ۴ حالت یا طبقه می‌باشد.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_e - f_o)^2}{f_e}$$

بدین ترتیب برای کل دوره آماری مورد بررسی، مجموع فراوانی‌های مشاهده شده و فراوانی‌های مورد انتظار روزهای توفانی (۱) و روزهای غیر توفانی (۰) محاسبه گردید (جدول ۳). نتایج حاصل از آزمون نشان داد که در تمام دوره‌های آماری ماهانه و فصلی، مقادیر قدر مطلق آزمون کای اسکوار محاسباتی از سطح بحرانی برازش آزمون بالاتر است، که معنی‌دار بودن ضریب همبستگی و یا انطباق سری زمانی داده‌ها با مدل مارکف مرتبه‌ی اول بر اساس آزمون کی دو در سطح بالاتر از $\alpha = 0/05$ تایید گردید. به جز در ماه‌های آذر و دی که معنی‌داری و صحت‌سنجی داده‌ها در آزمون به ترتیب در سطح ۸۰ و ۹۰ درصد تایید شد.

جدول ۳- فراوانی‌های مشاهده شده و مورد انتظار روزهای توفانی و غیر توفانی طی دوره آماری مورد بررسی

ماتریس جدول توافقی سری زمانی مجموع داده‌ها			فردا		مجموع فراوانی‌ها
			۰	۱	
امروز	۰	f_o	۱۳۵۷۷	۶۴۳	۱۴۲۲۰
		f_e	۱۳۴۸۳	۷۳۶/۳	۱۴۲۲۰
	۱	f_o	۶۴۳	۱۳۴	۷۷۷
		f_e	۷۳۶/۷	۴۰/۳	۷۷۷
مجموع فراوانی‌ها		f_o	۱۴۲۲۰	۷۷۷	۱۴۹۹۷
		f_e	۱۴۲۲۰	۷۷۷	۱۴۹۹۷

بنابراین بررسی و تحلیل ویژگی دوره‌های توفانی ایستگاه سبزوار با استفاده از روش مارکف مرتبه‌ی اول، به صورت ماهانه و فصلی مورد توجه قرار گرفت:

ابتدا احتمالات شرطی مرتبه اول دوره‌های توفانی و غیرتوفانی ایستگاه سبزوار محاسبه گردید (جدول ۴). اعداد هر کدام از سلول‌های این جدول همانند مدل زنجیره مارکف مرتبه اول دو حالت نوشته شده است و بیانگر درصد وقوع حالات مختلف توفانی و غیرتوفانی در دوره مورد بررسی است. به طور نمونه در خرداد که توفانی‌ترین ماه سبزوار است، احتمال وقوع یک روز توفانی بعد از یک روز توفانی دیگر ۲۸ درصد است، در صورتی که احتمال وقوع یک روز غیرتوفانی بعد از یک روز غیرتوفانی دیگر حدوداً ۹۴ درصد است. در ماه خرداد کم‌ترین میزان احتمال به دست آمده مربوط به وقوع یک روز توفانی بعد از یک روز غیرتوفانی است که با احتمال ۶ درصد به وقوع می‌پیوندد. هم چنین احتمال وقوع یک روز غیرتوفانی بعد از یک روز توفانی در این ماه ۷۱ درصد است.

نتایج ماتریس‌ها نشان می‌دهد، مقادیر P_{00} که بیانگر دو روز غیرتوفانی پشت سرهم می‌باشد بین ۹۱ تا ۹۸ درصد نوسان دارد. کمینه وقوع P_{00} ، ۹۱ درصد در ماه فروردین و بیشینه آن با ۹۸ درصد نیز در ماه‌های آبان، آذر و دی اتفاق افتاده است. همچنین احتمال P_{11} که بیانگر دو روز توفانی پشت سرهم است بین ۵ تا ۲۸ درصد نوسان دارد. کمینه احتمال وقوع P_{11} به میزان ۵ درصد در ماه آذر و بیشینه آن با ۲۸ درصد در ماه خرداد رخ داده است.

سپس احتمال‌های شرطی مرتبه اول به صورت میانگین سه ماهانه برای فصول مختلف سال نیز، جداگانه محاسبه شد. طبق نتایج به دست آمده، احتمال وقوع P_{11} یا دو روز توفانی پشت سرهم برای تمام فصول سال بیش‌تر از ۲۰ درصد نیست. چنان‌که کمینه آن به میزان ۱۰ درصد در فصل پاییز و بیشینه آن به میزان ۱۹ درصد در فصل بهار روی

داده است. احتمال وقوع P_{00} یا دو روز غیرتوفانی پشت سرهم برای تمام فصول سال کم‌تر از ۹۰ درصد نیست. چنان‌که کمینه آن به میزان ۹۳ درصد در فصل بهار و بیشینه آن به میزان ۹۷ درصد در فصل پاییز روی داده است. برخی از خصوصیات مهم دیگر مرتبط با دوره‌های توفانی و غیرتوفانی سبزوار، با استفاده از ماتریس‌های احتمال زنجیره مارکف محاسبه شد (جدول ۵). این ویژگی‌ها شامل احتمالات تجربی (دیده بانی شده) و احتمالات اقلیمی (پیش‌بینی شده) دوره‌های توفانی و غیر توفانی، فراوانی وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی، طول هر یک از این دوره‌ها و سیکل ترکیبی دوره‌ها است که در این بخش به بیان هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود:

جدول ۴- ماتریس‌های احتمالی شرطی مرتبه اول دوره‌های توفانی و غیر توفانی ماهانه و فصلی سبزوار

دوره زمانی	ایستگاه سبزوار		دوره زمانی	ایستگاه سبزوار	
فروردین	۰/۹۱۷	۰/۰۸۳	مهر	۰/۹۶۲	۰/۰۳۸
	۰/۸۳۷	۰/۱۶۳		۰/۸۶۸	۰/۱۳۲
اردیبهشت	۰/۹۳۵	۰/۰۶۵	آبان	۰/۹۸۲	۰/۰۱۸
	۰/۸۶۴	۰/۱۳۶		۰/۹۱۴	۰/۰۸۶
خرداد	۰/۹۳۹	۰/۰۶۱	آذر	۰/۹۸۵	۰/۰۱۵
	۰/۷۱۸	۰/۲۸۲		۰/۹۴۸	۰/۰۵۲
تیر	۰/۹۳۳	۰/۰۶۷	دی	۰/۹۸	۰/۰۲۰
	۰/۸	۰/۲		۰/۹۲۶	۰/۰۷۴
مرداد	۰/۹۵۶	۰/۰۴۴	بهمن	۰/۹۵۷	۰/۰۴۳
	۰/۸۱۶	۰/۱۸۴		۰/۸۱۱	۰/۱۸۹
شهریور	۰/۹۷۴	۰/۰۲۶	اسفند	۰/۹۳۴	۰/۰۶۶
	۰/۸۶۵	۰/۱۳۵		۰/۸۴	۰/۱۶۰
بهار	۰/۹۳۲	۰/۰۶۸	پاییز	۰/۹۷۷	۰/۰۲۳
	۰/۸۰۷	۰/۱۹۳		۰/۸۹۵	۰/۱۰۵
تابستان	۰/۹۵۵	۰/۰۴۵	زمستان	۰/۹۵۸	۰/۰۴۲
	۰/۸۱۴	۰/۱۸۶		۰/۸۴	۰/۱۶
سالانه	۹۵	۰/۰۵	نمونه ماتریس احتمالات	P_{00}	P_{01}
	۰/۸۳	۰/۱۷		P_{10}	P_{11}

احتمالات تجربی و احتمالات اقلیمی

بررسی مقادیر احتمالات تجربی و احتمالات اقلیمی به دست آمده برای هر دوره‌ی زمانی، بیانگر مقایسه‌ی درصد احتمالات مشاهده‌شده و مورد انتظار وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی است. همان‌طور که نتایج ارائه شده در

جدول ۵ نشان می‌دهد، برای دوره‌ی زمانی ماهانه اختلاف بسیار جزئی و ناچیزی بین این احتمالات وجود دارد، به طوری که این میزان اختلاف، از یک درصد هم تجاوز نمی‌کند. همچنین این وضعیت با مقایسه‌ی احتمالات تجربی و احتمالات اقلیمی وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی برای دوره‌های فصلی و سالانه نیز از چند درصد متجاوز نیست. بنابراین با توجه به این‌که تفاوت بین مقادیر احتمالات تجربی و اقلیمی بسیار جزئی بوده لذا می‌توان نتیجه گرفت که روابط مورد استفاده از مدل زنجیره مارکف برای تعیین احتمالات وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی از دقت کافی برخوردار بوده و می‌توان از آن‌ها با اطمینان در بررسی‌های مورد نظر استفاده کرد.

جدول ۵- ویژگی دوره‌های توفانی و آرام ماهانه و فصلی ایستگاه سبزوار

سیکل هوایی	میانگین طول دوره‌های توفانی و غیر توفانی		احتمالات اقلیمی به درصد		فراوانی وقوع روزها		احتمالات تجربی به درصد		خصوصیات مارکفی
	E_0	E_1	P_0	P_1	R_0	R_1	c/W	w/W	
ماه‌ها									
فروردین	۱۲	۱/۱۸	۰/۹۱	۰/۰۹	۲۸/۲	۲/۷۹	۰/۹۱	۰/۰۸	ماه‌ها
اردیبهشت	۱۵/۳	۱/۱۵	۰/۹۳	۰/۰۶	۲۸/۸	۲/۱۳	۰/۹۲	۰/۰۷	فروردین
خرداد	۱۶/۳	۱/۳۹	۰/۹۲	۰/۰۷	۲۸/۵	۲/۴۱	۰/۹۱	۰/۰۸	اردیبهشت
تیر	۱۴/۹	۱/۲۵	۰/۹۲	۰/۰۷	۲۸/۶	۲/۳۸	۰/۹۲	۰/۰۷	خرداد
مرداد	۲۲/۷	۱/۲۲	۰/۹۴	۰/۰۵	۲۹/۴	۱/۵۸	۰/۹۴	۰/۰۵	تیر
شهریور	۳۸/۴	۱/۱۵	۰/۹۷	۰/۰۲	۳۰/۱	۰/۸۹	۰/۹۷	۰/۰۲	مرداد
مهر	۲۶/۳	۱/۱۵	۰/۹۵	۰/۰۴	۳۸/۷	۱/۲۵	۰/۹۵	۰/۰۴	شهریور
آبان	۵۵/۵	۱/۰۹	۰/۹۸	۰/۰۱	۲۹/۴	۰/۵۷	۰/۹۸	۰/۰۱	مهر
آذر	۶۶/۶	۱/۰۵	۰/۹۸	۰/۰۱	۲۹/۵	۰/۴۵	۰/۹۸	۰/۰۱	آبان
دی	۵۰	۱/۰۷	۰/۹۷	۰/۰۲	۲۹/۳	۰/۶۳	۰/۹۷	۰/۰۲	آذر
بهمن	۲۳/۲	۱/۲۳	۰/۹۵	۰/۰۵	۲۸/۵	۱/۵	۰/۹۵	۰/۰۴	دی
اسفند	۱۵/۱	۱/۱۹	۰/۹۲	۰/۰۷	۲۷/۸	۲/۱۶	۰/۹۲	۰/۰۷	بهمن
بهار	۱۴/۷	۱/۲	۰/۹۲	۰/۰۸	۸۲/۸	۷/۲	۰/۹۲	۰/۰۸	اسفند
تابستان	۲۲/۲	۱/۲	۰/۹۵	۰/۰۵	۸۵/۵	۴/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	بهار
پاییز	۴۳/۴	۱/۱۱	۰/۹۷	۰/۰۳	۸۷/۳	۲/۷	۰/۹۷	۰/۰۳	تابستان
زمستان	۲۳/۸	۱/۲	۰/۹۵	۰/۰۵	۸۵/۵	۴/۵	۰/۹۵	۰/۰۵	پاییز
سالانه	۲۰	۱/۲	۰/۹۴	۰/۰۶	۳۴۳	۲۲	۰/۹۴	۰/۰۶	زمستان

فراوانی وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی در هر دوره‌ی زمانی

ابتدا در دوره زمانی ۴۱ ساله‌ی برای ایستگاه سبزوار، فراوانی وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی به صورت ماهانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مورد مطالعه نشان داد که در فروردین حداکثر فراوانی روزهای توفانی را شاهدیم به طوری که متوسط وقوع تعداد روزهای توفانی در این ماه ۳ روز است. همچنین کمترین فراوانی وقوع روزهای توفانی مربوط به ماه آذر است که میانگین تعداد روزهای توفانی در این ماه ۰/۴۵ روز بوده که حتی به یک روز هم نمی‌رسد. در ادامه نیز، فراوانی وقوع روزهای توفانی به صورت فصلی مورد بررسی قرار داده شد. بررسی‌ها نشان داد، در فصل پاییز فراوانی وقوع روزهای توفانی کم‌تر از ۳ روز بوده در حالی که بیشترین فراوانی وقوع روزهای توفانی فصلی با بیش از ۷ روز، مربوط به فصل بهار است. همچنین متوسط سالانه فراوانی وقوع روزهای توفانی ۲۲ روز به دست آمد (جدول ۵).

میانگین طول دوره‌ها

مطابق جدول (۵) میانگین طول دوره‌های توفانی و غیر توفانی ایستگاه سبزوار طی دوره‌ی آماری ۴۱ ساله مورد مطالعه، در مقیاس زمانی ماهانه و فصلی مورد بررسی قرار داده شد، نتایج نشان داد که طول دوره‌های توفانی در مقیاس ماهانه و فصلی برای هیچ زمانی به بیش از ۲ روز نرسیده است. همچنین طولانی‌ترین دوره‌ی توفانی ماهانه‌ی مورد انتظار، با ۱/۳۹ روز پیوسته، مربوط به خرداد و بالعکس طولانی‌ترین دوره‌ی غیر توفانی ماهانه‌ی مورد انتظار، با ۶۶/۶ روز پشت سرهم، مربوط به آذر است. در مقیاس فصلی نیز طولانی‌ترین دوره‌ی توفانی مورد انتظار در بهار و طولانی‌ترین دوره‌ی غیر توفانی مورد انتظار در پاییز مشاهده شده است.

سیکل هوایی

ابتدا از حاصل جمع دوره‌های توفانی و غیر توفانی سیکل هوایی به دست آمد، به عبارتی در یک چرخه یا سیکل هوایی، می‌توان یک دوره توفانی و یک دوره غیر توفانی (آرام) را باهم دید. در طی دوره آماری مورد مطالعه‌ی ایستگاه سبزوار، بیشینه چرخه هوایی دوره‌های توفانی و غیر توفانی ماهانه به ترتیب با طول مدت ۶۷/۶ و ۵۶/۵ روز، مربوط به آذر و آبان بوده است. از طرفی کوچک‌ترین چرخه هوایی ماهانه به ترتیب با طول مدت ۱۳/۱ و ۱۶/۲ روز، مربوط به فروردین و اسفند می‌باشد (جدول ۵).

همچنین به صورت فصلی در منطقه‌ی سبزوار، کوچک‌ترین چرخه هوایی با طول مدت ۱۵/۹ روز، متعلق به فصل بهار است. به عبارتی به طور تقریبی هر ۱۶ روزه در بهار، ما شاهد یک سیکل هوایی ترکیبی شامل: یک دوره‌ی آرام ۱۵ روزه و یک دوره‌ی توفانی یک روزه خواهیم بود. در صورتی که بزرگ‌ترین چرخه هوایی در مقیاس فصلی نیز با طول مدت ۴۴/۵۱ روز، مربوط به فصل پاییز است. به عبارتی در فصل پاییز برای رخداد تقریبی هر یک روز توفانی،

۴۳ روز دوره‌ی آرام سپری می‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده طولانی‌ترین سیکل‌های هوایی مربوط به ماه‌ها و فصولی است که کم‌ترین روزهای توفانی را داشته‌اند و بالعکس کوتاه‌ترین این سیکل‌ها، مربوطه به ماه‌ها و فصولی است که از روزهای توفانی بیش‌تری برخوردار بوده‌اند (جدول ۵).

توالی دوره‌های توفانی n روزه

در این پژوهش توالی دوره‌های توفانی، به توالی روزهایی اطلاق می‌شود که سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه بوده و ابتدا و انتهای این دوره‌ی توفانی به‌روزهای آرام و غیر توفانی محدود شود. در این پژوهش برای منطقه‌ی مورد مطالعه، سعی گردید که فراوانی توالی دوره‌های توفانی یک تا چهار روزه محاسبه شود. در ادامه مشخص شد که طی دوره‌ی آماری ۴۱ ساله‌ی مورد مطالعه، تداوم توالی دوره‌های توفانی یک روزه و دو روزه در ماه‌های مختلف سال بیش‌ترین فراوانی را داشته است و به تدریج برای توالی‌های طولانی‌تر از فراوانی‌های مربوطه کاسته می‌شود. بنابراین از فراوانی توالی دوره‌های توفانی ۳ و ۴ روزه در همه ماه‌های سال به شدت کاسته شده، به طوری که حتی فراوانی تداوم توالی‌های چهار روزه به بالاتر در همه‌ی ماه‌های سال به صفر می‌رسد. به‌عبارتی توالی دوره‌های توفانی ۴ روزه، فقط یک‌بار در ماه‌های خرداد و تیر به وقوع پیوسته است. همچنین بیش‌ترین فراوانی توالی‌های یک روزه، در چهار ماه ابتدای سال مشاهده گردیده است (جدول ۶).

جدول ۶- فراوانی ماهانه توالی روزهای توفانی مشاهده شده

توالی‌ها ماه‌ها	یک روزه	دوروزه	سه روزه	چهار روزه
فروردین	۷۴	۱۶	۲	۰
اردیبهشت	۶۳	۱۰	۰	۰
خرداد	۵۰	۱۱	۵	۱
تیر	۶۲	۱۱	۲	۱
مرداد	۴۲	۶	۳	۰
شهریور	۲۷	۵	۰	۰
مهر	۳۸	۵	۱	۰
آبان	۱۹	۲	۰	۰
آذر	۱۷	۱	۰	۰
دی	۲۳	۰	۱	۰
بهمن	۳۷	۷	۲	۰
اسفند	۶۱	۸	۲	۰

نتیجه‌گیری

سبزوار با توجه به قرارگیری در حاشیه‌ی دشت کویر، دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. بنابراین یکی از نمودهای آب و هوایی آن، بسامد رخداد روزهای توفانی است. تحلیل بسامدهای روزهای توفانی با روش‌های متعدد و متنوعی قابل انجام است. بررسی آماری فراوانی و توزیع زمانی و مکانی توفان‌ها و بادهای شدید و یا بررسی سینوپتیکی علت‌های وقوع توفان‌ها بر روی قسمت‌های گوناگون ایران مورد تحلیل و پهنه‌بندی قرار گرفته است. بر روی منطقه‌ی مورد مطالعه نیز، پژوهشی توصیفی در زمینه‌ی راهکارهای مقابله با خسارات و معضلات ناشی از وزش بادهای شدید و همچنین پژوهشی آماری بر روی پدیده‌ی گردوغبار و تحلیل الگوها و جهت وزش بادهای شدید گرد و غبارزا انجام گرفته است. در این پژوهش‌ها فراوانی زمانی و مکانی، جهت وزش بادهای گرد و غبارزا و دانش بومی سازگار با شرایط اقلیم گرد و غباری سبزوار مورد تاکید قرار گرفته در حالی که جامعیت و شناخت تداوم دوره‌های توفانی سبزوار نیز مورد نیاز بوده است. یکی از روش‌های مناسب و پرکاربرد آماری برای بررسی دقیق پدیده‌های گوناگون اقلیمی و شناسایی احتمالات آینده‌ی وقوع آن‌ها، روش موسوم به زنجیره مارکف است. این پژوهش با به کارگیری الگوی زنجیره مارکف، صلاحیت الگوی مذکور در برآورد روزهای توفانی و احتمالات اقلیمی و مشاهده شده را مورد ارزیابی قرار داده است. بدین ترتیب الگوهای مذکور و واقعیت‌های رخ داده مورد مقایسه قرار گرفت. جهت بررسی و شناخت آماری وضعیت کلی توفان‌های حاکم بر منطقه‌ی سبزوار، شرایط ایستگاه سبزوار از لحاظ شدت و فراوانی روزهای توفانی طی بازه‌ی زمانی (۱۳۹۰-۱۳۵۰) مشخص گردید و نتایج زیر حاصل شد:

در فصل بهار طی دوره آماری مورد مطالعه، فراوانی روزهای توفانی به بیش‌ترین تعداد یعنی ۳۰۵ روز می‌رسد به عبارتی بهار توفانی‌ترین فصل سبزوار محسوب می‌شود. از طرف دیگر فراوانی روزهای توفانی در پاییز به کم‌ترین تعداد یعنی ۹۶ روز می‌رسد که نشان از آرام‌ترین فصل سال دارد. طبق نتایج، از اواخر فصل زمستان بر شدت تندبادهای سبزوار افزوده شده و تا ابتدای فصل تابستان ادامه دارد و دوباره به تدریج از شدت توفان کاسته شده و در فصل پاییز به حداقل شدت خود می‌رسد. با رسم نمودار روند تغییرات سال به سال فراوانی توفان‌های سبزوار طی دوره مورد مطالعه، مشخص شد فراوانی روزهای توفانی روند صعودی را در پی خواهد داشت.

پس از بررسی‌های آماری اولیه‌ی، نتایج استفاده از به‌کارگیری روش زنجیره‌ی مارکف مرتبه اول بر روی داده‌های توفان منطقه‌ی سبزوار و ارزیابی احتمالات روزهای متوالی توفانی و غیر توفانی برای فصول مختلف سال، نشان داد که احتمال وقوع P_{11} یا دو روز توفانی پشت سرهم برای تمام فصول سال بیش‌تر از ۲۰ درصد نیست. چنان‌که کمینه آن به میزان ۱۰ درصد در فصل پاییز و بیشینه آن به میزان ۱۹ درصد در فصل بهار روی داده است. همچنین احتمال

وقوع P_{00} یا دو روز غیرتوفانی پشت سرهم برای تمام فصول سال بیش‌تر از ۹۰ درصد است، چرا که کمینه آن به میزان ۹۳ درصد در بهار و بیشینه آن به میزان ۹۷ درصد در پاییز رخ داده است. مقایسه مقادیر احتمالات تجربی وقوع روزهای توفانی و غیر توفانی در هر ماه و هر فصل سال، با احتمالات اقلیمی همان دوره‌ی زمانی، نشان از اختلافات بسیار جزئی بین آنها است که در اکثر موارد از یک درصد هم متجاوز نیست.

طی بررسی‌های فصلی صورت گرفته بر روی داده‌های توفان، در پاییز فراوانی وقوع روزهای توفانی کم‌تر از ۳ روز بوده درحالی‌که بیش‌ترین فراوانی وقوع روزهای توفانی با بیش از ۷ روز، مربوط به فصل بهار بوده است. همچنین طول دوره‌های توفانی سبزواری، در مقیاس ماهانه و حتی فصلی برای هیچ زمانی به بیش از ۲ روز نرسیده است. در مقیاس فصلی طولانی‌ترین دوره‌ی توفانی مورد انتظار در بهار بوده درحالی‌که طولانی‌ترین دوره‌ی غیر توفانی مورد انتظار در پاییز مشاهده شده است. در ادامه نتایج بررسی چرخه‌های فصلی هوا در منطقه‌ی سبزواری نشان داد که کوتاه‌ترین چرخه هوایی با طول مدت تقریبی ۱۶ روز، متعلق به بهار است، در صورتی‌که بزرگ‌ترین چرخه هوایی با طول مدت تقریبی ۴۵ روز، مربوط به پاییز است.

طی دوره‌ی آماری مورد مطالعه در تمام ماه‌های سال نیز تداوم توالی دوره‌های توفانی یک روزه و دو روزه بیش‌ترین فراوانی را داشته‌اند و به تدریج برای توالی‌های طولانی‌تر از فراوانی‌های مربوطه کاسته شده است. در انتها لازم به ذکر است که با توجه به نتایج بررسی‌ها و جداول مربوط به فراوانی دوره‌های توفانی و غیر توفانی، صحت و دقت بالای مدل زنجیره مارکف، برای مطالعات تداوم روزهای توفانی بر روی منطقه‌ی مورد مطالعه اثبات گردید.

منابع

- پروانه، ا؛ دهقانی، م (۱۳۸۸)، «نقش نوع پوشش گیاهی در مقایسه‌ی میزان بیوماس سوسماران به‌عنوان شاخصی از کارایی اکولوژیکی اکوسیستم»، *فصلنامه زیست‌شناسی جانوری*، شماره ۳، صص ۱۷-۲۲.
- رحیم زاده، ف؛ پدرام، م؛ صداقت کردار، ع؛ کمالی، غ (۱۳۸۸)، «انرژی باد در ایستگاه‌های همدید استان اصفهان»، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، شماره ۳۵، صص ۱۷۲-۱۵۵.
- رضایی بنفشه، م؛ جوان، خ؛ زینالی، ب (۱۳۹۰)، «بررسی روند تغییرات سرعت باد در شمال غرب ایران»، *فصلنامه جغرافیای طبیعی لار*، شماره ۱۳، صص ۲۷-۳۶.
- رضیئی، ط؛ دانش آراسته، پ؛ اختری، ر؛ تقفیان، ب (۱۳۸۶)، «بررسی خشک‌سالی‌های هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه و مدل زنجیره مارکف»، *تحقیقات منابع آب ایران*، شماره ۳، صص ۲۵-۳۵.
- سلیقه، م؛ علیجانی، ب؛ دل آرا؛ قدیر (۱۳۹۰)، «تحلیل فضایی بارش فصول مرطوب سال با استفاده از مدل زنجیره مارکف (مطالعه موردی اردبیل)»، تهران: *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، شماره ۲۳، صص ۲۵-۴۴.
- صداقت، م (۱۳۵۸)، «*فرآیندهای بیرونی تشکیل دهنده زمین*»، تهران، مرکز تولید دانشگاه آزاد ایران.
- طاوسی، ت؛ خسروی، م؛ قادری زه، خ (۱۳۸۹)، «بررسی خشک‌سالی و تحلیل روند دوره‌های خشک کوتاه مدت ایران‌شهر با استفاده از مدل زنجیره مارکف در دوره آماری ۱۳۸۵-۱۳۵۹»، *نشریه علوم محیطی*، شماره ۴، صص ۴۴-۳۱.
- عساکره، ح؛ مازینی، ف (۱۳۸۹)، «بررسی احتمال وقوع روزهای خشک در استان گلستان»، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، شماره ۱۷، صص ۴۴-۲۹.
- علی‌آبادی، ع؛ دادرسی سبزوار، ا (۱۳۸۴)، دانش بومی شیوه‌های سازگاری انسان در محیط‌های طوفان‌خیز (مطالعه موردی: شهرستان سبزوار)، اولین همایش ملی فرسایش بادی، بهمن ۱۳۸۴، صص ۴۸-۴۲.
- فرج زاده، م؛ رازی، م (۱۳۹۰)، «بررسی توزیع زمانی و مکانی توفان‌ها و بادهای شدید در ایران»، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، *پژوهش و آبخیزداری*، شماره ۹۱، صص ۳۲-۲۲.
- قائمی، ه؛ عدل، م (۱۳۷۱)، «ناپایداری و طوفان‌های رعد و برق»، تهران، سازمان هواشناسی کشور.
- مشکانی، م (۱۳۶۳)، «بررسی احتمال تواتر روزهای خشک بابلسر از دیدگاه بیز تجربی»، *مجله علوم آب*، شماره ۳، صص ۴۹-۳۷.

- مهرشاهی، د؛ نکونام، ز (۱۳۸۸)، «بررسی آماری پدیده گردوغبار و تحلیل الگوی وزش بادهای گردوغبارزا در شهرستان سبزوار»، *نشریه انجمن جغرافیای ایران*، شماره ۲۲، صص ۱۰۴-۸۳.
- نکونام، ز (۱۳۸۷)، «بررسی و تحلیل توفان‌های گردوغبار در شهرستان سبزوار»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد.
- Chen, D., Xiaojun, Y., (2004), "A Markov, Model for Sea Ice", *J. Climate*, 17: 3156-3168.
- Drton, M.C., Marzban, P.G., Schaefer, J.T., (2003), "A Markov chain model of tornadic activity", *Mon. Wea. Rev.*, 131: 2941-2953.
- Gabriel, K.R., Neumann, J., (1962), "A Markov chain model for daily rainfall occurrences at Tel Aviv", *Quart. J. Roy. Soc.*, 88: 90-95.
- Hagen, L.J., (1967), "A wind erosion prediction system to meet user needs", *J. Soil Water Conserve*, 46: 106-110.
- Johnson, S.D., (2000), "Seasonality in an empirically derived Markov model of tropical Pacific sea surface temperature anomalies", *J. Climate*, (in press).
- Moon, S.E., Ryoo, S.B., Kwon, J.G., (1994), "A Markov Chain Model for Daily Precipitation Occurrence in South Korea", *International Journal of Climatology*, 14: 1009-1016.
- Stewart, D.A., Essenwanger, O.M., (1987), "Frequency distribution of wind speed near the surface", *J. Appl. Meteor*, 17:623-642.
- Subramaniam, A., Sanjeeva, P., (1986), "Dry spell sequences in south coastal Andhra", *Mausam*, 40: 57-60.
- Singh A.k., parida s.k., (2012), "Evaluation of current status and future directions of wind energy in India", *Clean Techn Environ Policy*, 15: 643-655
- Victor, U.S., Sastry, S., (1979), "Dry speel probability by Markov chain model and its application to crop development stages", *Mausam*, 3 (4): 479-484.
- Wilks, D.S., (1995), *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, San Diego, California, USA, 457 pp.