

## تحلیل اثر پارامترهای اقلیمی و خشکسالی‌های هواشناسی بر رخدادهای گردوغبار داخلی (مطالعه موردی: شهرستان قزوین)

سمیرا زندی‌فر<sup>۱\*</sup>، زهره ابراهیمی خوسفی<sup>۲</sup>، محمد خسروشاهی<sup>۱</sup> و مریم نعیمی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۶)

### چکیده

وقوع پدیده فرسایش بادی و انتشار ذرات گردوغبار یکی از عوامل مهم و تهدید کننده محیط زیست به‌شمار می‌رود. تغییر اقلیم و تناوب وقوع خشکسالی‌ها، نقش مهمی بر تشدید و یا تضعیف این رخدادها داشته است. هدف اولیه پژوهش حاضر، بررسی روند تغییر چهار عنصر مهم اقلیمی (بارندگی، دما، سرعت باد و رطوبت نسبی) و شاخص توفان گردوغبار (DSI) در شهرستان قزوین با استفاده از آزمون من کندال پیش سفید شده و تعیین ارتباط بین آنها بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه است. ارزیابی وضعیت خشکسالی‌های هواشناسی بر اساس دو شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده و تحلیل اثر آنها بر میزان فعالیت رخدادهای گردوغبار هدف بعدی این پژوهش، در منطقه مطالعاتی است. بدین منظور پس از تهیه و پردازش داده‌های اقلیمی و محاسبه شاخص توفان گردوغبار، نسبت به بررسی روند تغییرات و ارتباط پارامترهای اقلیمی و رخدادهای گردوغبار اقدام شد. نتایج حاصل نشان داد که روند تغییرات سالانه بارندگی و رطوبت نسبی در شهرستان قزوین، افزایشی و روند تغییرات سالانه سرعت باد و دمای متوسط هوا، کاهش یافته است. همچنین بررسی روند تغییرات ماهانه رخدادهای گردوغبار نشان داد که تنها در ماه ژوئیه روند کاهش شدیدی در وقوع پدیده فرسایش بادی و انتشار ذرات گردوغبار داخلی، رخ داده است. در مقیاس فصلی به استثنای فصل زمستان که بدون روند گزارش شده است، در سایر فصول، از شدت وقوع این رویدادها به میزان قابل توجهی کاسته شده است. اثر خشکسالی هواشناسی بر رخداد فرسایش بادی در سطح اطمینان ۹۹ درصد، ۱۱ درصد برآورد شد. به‌طور کلی، این یافته‌ها بیانگر سیر کاهش تخریب اراضی و بیابان‌زایی ناشی از فرسایش بادی در شهرستان قزوین است.

واژه‌های کلیدی: فرسایش بادی، شاخص توفان گردوغبار، تغییر اقلیم، رگرسیون خطی، قزوین

۱. بخش بیابان، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

\*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zandifar@riff-ac.ir

## مقدمه

توفان‌های گردوغبار و شن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی محسوب می‌شوند که بیشتر در مناطق خشک و نیمه خشک جهان به‌وقوع می‌پیوندند. این رویدادها صدمات زیادی را به زیرساختارها، محصولات کشاورزی و محیط زیست وارد می‌کنند (۱۲، ۲۵، ۲۹ و ۳۰) و حتی می‌توانند سلامت انسان‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهند (۱۱ و ۱۸). یکی از منابع مهم تولید گردوغبار در جهان، مناطق خشک واقع در کشورهای غرب آسیا از جمله ایران، عراق و سوریه هستند (۳، ۴ و ۵). افزایش نگرانی از تبعات زیست‌محیطی این گونه رویدادها منجر به تشکیل جلسات متعدد و همچنین تحقیقات و همکاری‌های بین‌المللی برای مقابله با توفان‌های ماسه و گردوغبار در میان این کشورها شده است. کشور ایران به‌دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌طور مداوم در معرض سیستم‌های گردوغبار محلی و سینوپتیکی متعدد است (۲۳) و علاوه بر وجود مناطق بیابانی گسترده، در مجاورت کانون‌های مهم تولید گردوغبار که از مهم‌ترین آنها بیابان‌ها و صحاری آفریقا، اردن و عربستان است، واقع شده است. گرچه چرخه انتشار، انتقال و رسوب ذرات گردوغبار به میزان قابل توجهی به گردش‌های جوی و پدیده‌های دینامیک آب‌وهوایی مربوط می‌شود (۱۴) اما خشکسالی‌های اخیر (۱)، برداشت بی‌رویه از آب‌های سطحی و زیرزمینی و خشکیدگی تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی (۸ و ۲۳) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر افزایش پدیده گردوغبار در برخی از مناطق ایران شناسایی شده‌اند. در سال‌های اخیر، شاخص توفان گردوغبار نیز به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین شاخص‌های اقلیمی برای سنجش میزان فعالیت توفان‌های گردوغبار داخلی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. زیرا در محاسبه این شاخص، تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی، متوسط و شدید بر اساس میدان دید افقی ناشی از پدیده گردوغبار لحاظ شده است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، محتوای رطوبتی خاک و پوشش گیاهی سطح زمین به‌شدت وابسته به مقدار نزولات جوی است به‌طوری که یک تغییر کوچک در بارندگی این مناطق می‌تواند

منجر به تغییرات قابل توجهی در پوشش گیاهی سطح زمین، به ویژه در فصل رشد شود (۷). افزایش درجه حرارت هوا منجر به افزایش تبخیر محتوای رطوبتی خاک و تشدید فرسایش در یک منطقه می‌شود. از طرف دیگر، تغییر زیاد درجه حرارت سطح زمین می‌تواند منجر به فرسوده شدن سنگ‌ها و حمل ذرات تولید شده به‌وسیله باد شود. تأثیر سرعت وزش بادها بر میزان تولید گردوغبار در یک منطقه تابعی از سرعت آستانه فرسایش بادی در آن منطقه است که خود تابعی از ویژگی‌های سطح زمین است. هرگاه سرعت وزش باد بیشتر از سرعت آستانه فرسایش بادی شود، فرسایش بادی اتفاق می‌افتد و بسته به قدرت وزش باد و اندازه و شکل ذرات، ذرات گردوغبار تولید شده می‌توانند به فواصل خیلی دور حمل شوند و سایر اکوسیستم‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهند (۶).

تاکنون محققان زیادی (۶ و ۹) الگوهای رفتاری متغیرهای اقلیمی را روی پدیده گردوغبار در مقیاس‌های مختلف محلی، منطقه‌ای و یا ملی بر اساس رویکردهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. هر یک از این پژوهشگران، عوامل مختلفی را در افزایش و یا کاهش فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار در مناطق مختلف دنیا مؤثر دانسته‌اند.

به‌عنوان مثال، ارتباط بین شدت وقوع توفان‌های گردوغبار با دما و بارندگی در شمال چین برای بازه زمانی (۲۰۰۷-۱۹۵۴) توسط گیو و همکاران (۱۳) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی آنها نشان داد که در این مدت شدت وقوع رخداد‌های گردوغبار کاهش یافته است. در این بررسی ارتباط بین بارندگی و فراوانی وقوع رخداد‌های گردوغبار، معکوس و معنی‌دار اما ارتباط بین دما و رخداد‌های گردوغبار معکوس و با سطح معنی‌داری پایین تشخیص داده شد. همچنین آنها با استفاده از یک مدل جهانی اقلیمی نشان دادند که افزایش بار آتروسول‌های جذب‌کننده نور، به‌ویژه کربن سیاه، علت اصلی افزایش بارندگی، کاهش درجه حرارت و کاهش فراوانی و شدت رخداد‌های گردوغبار در منطقه مطالعاتی آنها بوده است. اولانگ‌سای و همکاران (۲۰)، از شاخص توفان گردوغبار

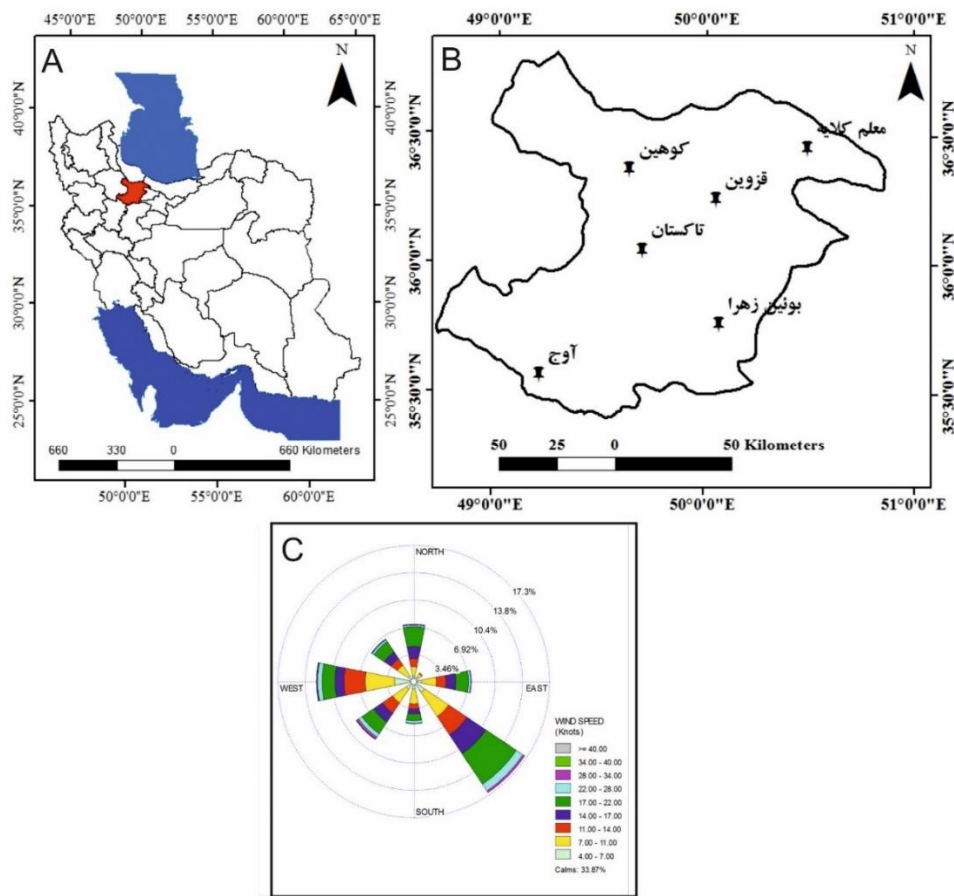
گردوغبار متعلق به ماه‌های می و ژوئن گزارش شده است. بررسی ارتباط میان خشکسالی و فراوانی روزهای همراه با گردوغبار نشان داد که در ایستگاه کرج هیچ‌گونه همبستگی معنی‌داری بین این دو پدیده وجود نداشته اما در ایستگاه قزوین، این ارتباط در سطح ۱۰ درصد آماری معنی‌دار نشان داده شده است. اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک در منطقه ایران مرکزی واقع شده‌اند که تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر روند تغییرات غبارآلودگی در آنها به صورت جداگانه و دقیق می‌تواند گام مؤثرتری در شناسایی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر وقوع این پدیده، شناسایی نواحی مستعد به فرسایش بادی و کنترل و یا مهار این پدیده مخرب زیست‌محیطی در هر یک از این مناطق باشد. یکی از این نواحی، شهرستان قزوین در شمال غربی ناحیه ایران مرکزی است که با توجه به وجود روند افزایشی غبارآلودگی هوا در بیشتر مناطق ایران، فرض بر این است که در گذر زمان از گزند این پدیده مخرب زیست‌محیطی در امان نبوده است و تشدید فعالیت این رخدادها به‌ویژه در سالیان اخیر، مورد انتظار است. با در نظر گرفتن این فرضیات، پژوهش حاضر با هدف بررسی روند تغییرات طولانی شاخص توفان گردوغبار و ارتباط آن با تغییرات بارندگی، دمای متوسط هوا، سرعت متوسط وزش بادهای، رطوبت نسبی و خشکسالی‌های هواشناسی در این شهرستان برای بازه زمانی ۵۸ ساله (۲۰۱۶-۱۹۵۹) انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در این مطالعه، شهرستان قزوین واقع در استان قزوین است که با وسعتی معادل ۶۴/۱۳ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۰ دقیقه درازای خاوری و ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه پهنای شمالی واقع شده است. بر اساس آمار مربوط به بازه زمانی مورد بررسی (۲۰۱۶-۱۹۵۹)، میانگین دما، بارندگی و رطوبت نسبی در این منطقه به ترتیب ۱۴/۲۴ درجه سانتی‌گراد، ۳۱۸/۵

(DSI) به‌منظور ارزیابی فرسایش بادی در استرالیا برای فاصله زمانی ۱۹۶۵ تا ۲۰۰۰ استفاده کردند و نقاط با شدت فرسایش بالا را با توجه به نقشه‌های تهیه شده معرفی کردند. آنها همچنین همبستگی بین DSI و گردوغبار جمع شده در ۱۱۰ ایستگاه هواشناسی را بیش از ۹۳ درصد تشخیص دادند. آنها در مطالعه‌ای دیگر، فرسایش بادی را در دو خشکسالی از بزرگ‌ترین خشکسالی‌ها در طول تاریخ استرالیا بررسی کردند: خشکسالی جنگ جهانی دوم (۱۹۴۵-۱۹۳۷) و خشکسالی (۲۰۰۹-۲۰۰۱). بدین منظور آنها با استفاده از داده‌های هواشناسی استرالیا، تعداد روزهای گردوغبار (DED) و شاخص توفان گردوغبار (DSI) را محاسبه کردند و نشان دادند که میزان فرسایش بادی در جنگ جهانی دوم ۴/۶ برابر بیشتر از خشکسالی هزاره بوده است (۲۱). نامداری و همکاران (۱۹) از شاخص اپتیکی آئروسول‌ها (AOD) برای سنجش میزان فعالیت توفان‌های گردوغبار در بیابان‌های خاورمیانه استفاده کردند و ارتباط بین AOD، دما و بارندگی را در فصل بهار مورد بررسی قرار دادند. بر اساس یافته‌های حاصل از تحقیق آنها، افزایش دما و کاهش بارندگی از علل اصلی تشدید رویدادهای گردوغبار در خاورمیانه بوده است. راشکی و همکاران (۲۴) به تحلیل آماری رخدادهای گردوغبار در جنوب غربی آسیا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین فراوانی رخدادهای گردوغبار از لحاظ مکانی در حوضه سیستان ایران و بیابان‌های جنوب افغانستان و از نظر زمانی در ماه‌های ژوئن و ژولای بوده است. علی‌پور و همکاران (۲) تحلیل سینوپتیکی وقایع گردوغبار و ارتباط آن با خشکسالی را بر اساس شاخص SPI در استان‌های قزوین و البرز برای بازه زمانی (۲۰۱۴-۲۰۰۰) مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی آنها نشان داد که در ایستگاه کرج در سال ۲۰۱۳ خشکسالی شدید و در استان قزوین در سال ۲۰۰۸ خشکسالی بسیار شدید رخ داده است. همچنین نتایج بررسی سالانه نشان داد که گردوغبارهای با منشأ خارجی (کد ۰۶) و داخلی (کد ۰۷) بیشترین فراوانی را در این دو ایستگاه داشته‌اند. در مقیاس ماهانه بیشترین فراوانی رخدادهای



شکل ۱. الف) موقعیت شهرستان قزوین در ایران، ب) پراکنش مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در استان قزوین و ج) گلگبار ایستگاه قزوین بر اساس داده‌های طولانی مدت (۲۰۱۶-۱۹۵۹)

### مواد و روش‌ها

مراحل مختلف مربوط به روش تحقیق حاضر و توضیحات مربوط به هر مرحله در ادامه ارائه شده است.

### اخذ و پردازش داده‌های اقلیمی

داده‌های مورد نیاز این مطالعه شامل داده‌های ماهیانه مربوط به چهار پارامتر اقلیمی (بارندگی، دمای متوسط، سرعت متوسط وزش بادها و رطوبت نسبی) و داده‌های ساعتی مربوط به کد هوای حاضر ایستگاه قزوین است که از سازمان هواشناسی ایران اخذ شده است. از ۱۰۰ کد هواشناسی که توسط سازمان جهانی هواشناسی تعریف شده است، کد ۰۰ به کم اهمیت ترین رخداد و کد ۹۹ به پراهمیت ترین رخداد هواشناسی اختصاص

میلی متر و ۵۱/۴ درصد بوده است. حداکثر سرعت وزش بادها در این منطقه متعلق به سال ۲۰۰۷ و با سرعت ۳۹ متر بر ثانیه است. ضریب خشکی این منطقه به روش دومارتن برابر با ۱۳/۴ و دارای اقلیم نیمه خشک است. ۹ ایستگاه سینوپتیک در این استان وجود دارد که موقعیت آنها در استان قزوین در شکل (۱) و مشخصات مربوط به آنها در جدول (۱) نشان داده شده است.

از بین ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در استان قزوین، ایستگاه سینوپتیک قزوین دارای کامل ترین و طولانی ترین آمار اقلیمی است که در پژوهش حاضر، برای پایش اقلیمی توفان‌های ماسه و گردوغبار مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول دوره آماری
قزوین	۵۰ ۰۳	۳۶ ۱۵	۱۲۷۹/۲	۱۹۵۹-۲۰۱۶
آوج	۴۹ ۱۳	۳۵ ۳۴	۲۰۳۴/۹	۱۹۹۷-۲۰۱۶
معلم کلایه	۵۰ ۲۹	۳۶ ۲۷	۱۶۲۹/۲	۲۰۰۱-۲۰۱۶
تاکستان	۴۹ ۴۲	۳۶ ۰۳	۱۲۸۳/۴	۲۰۰۴-۲۰۱۶
بوئین زهرا	۵۰ ۰۴	۳۵ ۴۶	۱۲۲۵	۲۰۰۶-۲۰۱۶
کوهین	۴۹ ۳۸	۳۶ ۲۲	۱۵۳۹	۲۰۰۹-۲۰۱۶
سیردان	۴۹ ۱۱	۳۶ ۳۹	۱۲۵۷	۲۰۱۴-۲۰۱۶
آبیک	۵۰ ۳۰	۳۶ ۰۱	۱۲۳۴	۲۰۱۴-۲۰۱۶
رازمیان	۵۰ ۱۲	۳۶ ۳۲	۹۹۴	۲۰۱۴-۲۰۱۶

و استخراج رخدادهای گردوغبار، شاخص توفان گردوغبار با استفاده از رابطه (۱) برای سه مقیاس زمانی ماهیانه، فصلی و سالیانه محاسبه شد (۲۰):

$$DSI_s = \sum_{i=1}^n [(5 \times SDS) + MDS + (\frac{LDE}{20})]_i \quad (1)$$

که در آن  $DSI$  شاخص گردوغبار در  $n$  ایستگاه است درحالی که  $i$  برابر است با  $i$  امین ایستگاه از  $n$  ایستگاه مطالعاتی،  $SDS$  تعداد روزهای گردوغبار شدید (حداکثر کد گردوغبار روزانه ۳۳-۳۵)،  $MDS$  تعداد روزها با گردوغبار متوسط (حداکثر کد گردوغبار روزانه ۳۰-۳۲ و ۹۸) و  $LDE$  وقایع گردوغبار محلی (حداکثر کد گردوغبار برابر با ۰۷-۰۹) است. گفتنی است که از کد ۰۶ در محاسبه شاخص توفان گردوغبار استفاده نمی‌شود، زیرا بیانگر گردوغبارهای معلق است که منشأ محلی ندارند و از خارج ایستگاه به ایستگاه سینوپتیک مورد نظر منتقل شده‌اند.

#### بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی و رخدادهای گردوغبار

در تحقیق حاضر، ابتدا خودهمبستگی بین پارامترهای مورد بررسی با استفاده از روش پیش‌سفید کردن (Pre-Whitening) حذف شد. پس از حصول اطمینان از وجود نداشتن

داده می‌شود؛ ۱۱ کد از این کدها در ارتباط با رخدادهای فرسایش بادی یا گردوغبار هستند که توضیحات مربوط به آنها در جدول (۲) نمایش داده شده است. این کدها در چهار گروه قرار می‌گیرند: توفان‌های گردوغبار شدید ( $SDS$ )، متوسط ( $MDS$ )، محلی ( $LDE$ ) و خارجی که به ترتیب با کدهای ۳۳-۳۵، ۳۰ تا ۳۲ و ۹۸، ۰۹-۰۷ و ۰۶ نمایش داده می‌شوند.

#### محاسبه شاخص توفان گردوغبار ( $DSI$ : Dust Storm Index)

شاخص توفان گردوغبار شاخصی مناسب برای مطالعه فراوانی و شدت فرسایش بادی توسط داده‌های هواشناسی است. این شاخص ترکیبی از روزهای با گردوغبار شدید، گردوغبار متوسط و گردوغبار محلی است و بر اساس توان تولید رسوب وزن داده می‌شود.  $DSI$  شاخصی بدون بعد است و بدون محدودیت مکانی و زمانی با دقت مناسبی قابل استفاده است. وزن‌های داده شده در معادله شاخص  $DSI$ ، بر اساس رابطه تجربی بین دید افقی در ایستگاه هواشناسی میدورا در شمال غرب ویکتوریا در استرالیا و وزن رسوب جمع شده در برونگا در شمال غرب نیووالس جنوبی به دست آمده است (۲۰).

با استفاده از داده‌های اخذ شده از ایستگاه هواشناسی کشور

جدول ۲. کدهای هواشناسی تعریف شده برای بیان پدیده گردوغبار و فرسایش بادی (۲۹)

کد هواشناسی	نام علمی	توضیحات
۰۶	گردوغبار معلق	گردوغبار معلق در هوا که مسافت زیادی را پوشانده است.
۰۷	گرد و خاک	گردوغبار یا ماسه‌ای که در محل ایستگاه بلند شده است.
۰۸	گردباد	گردبادهای تکامل یافته در خود ایستگاه یا اطراف آن
۰۹	توفان	گرد و خاک در ساعت دیده‌بانی در اطراف ایستگاه وجود دارد یا در طی ساعت گذشته در خود ایستگاه وجود داشته است.
۳۰	توفان گردوغبار یا ماسه ملایم	طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است با دید افقی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر
۳۱	توفان گردوغبار یا ماسه ملایم	طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده است با دید افقی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر
۳۲	توفان گردوغبار یا ماسه ملایم	طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده است با دید افقی ۲۰۰-۱۰۰۰ متر
۳۳	توفان گردوغبار یا ماسه شدید	طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۳۴	توفان گردوغبار یا ماسه شدید	طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۳۵	توفان گردوغبار یا ماسه شدید	طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۹۸	توفان گردوغبار یا ماسه خیلی شدید یا تندر	توفان‌هایی که در محل ایستگاه یا اطراف آن بلند شده‌اند با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر

رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$S = \sum_{K=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j + x_k) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

بر اساس این آزمون در صورتی که مقدار S اختلاف معنی‌داری با صفر نداشته باشد روند وجود ندارد و در غیر این صورت روند، صعودی و یا نزولی خواهد بود. برای آزمون معنی‌دار بودن روند، از متغیر Z نرمال استاندارد طبق رابطه (۴) استفاده می‌شود (۱۶). فرض صفر (H0) در آزمون من کندال عدم وجود روند و فرض H1 وجود روند است:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\frac{1}{\text{var}(S)}}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\frac{1}{\text{var}(S)}}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \{n(n-1)(2n+5)\} \quad (5)$$

خودهمبستگی بین داده‌ها با استفاده از آزمون فیلیپس پرون (۲۲) ( $p\text{value} < 0.05$ )، آزمون من-کندال روی مقادیر بدون روند اعمال شد. این آزمون ابتدا توسط من (۱۶) ارائه و سپس توسط کندال (۱۵) بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه داده شده است. این روش به‌طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به‌کار گرفته شده است. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره کرد. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌شود نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است (۲۷). فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها است. در روش من کندال فرض بر این است که یک سری زمانی به صورت  $x_1, x_2, \dots, x_n$  وجود دارد. آماره آزمون من کندال با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود که در این رابطه Z و k شماره مشاهدات هستند و تابع علامت  $\text{sgn}(x)$  به‌صورت

جدول ۳. مقیاس طبقه‌بندی شدت ترسالی و خشکسالی بر اساس شاخص SPI (۱۵)

SPI	وضعیت رخداد
بیشتر از ۲	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی معمولی
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	سال نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی معمولی
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
کمتر از -۲	خشکسالی بسیار شدید

در رابطه مذکور،  $y$ : متغیر وابسته،  $x_1$  تا  $x_n$ : متغیرهای مستقل،  $\beta_0$ : عرض از مبدأ و  $\beta_1$  تا  $\beta_n$ : ضرایب ثابت مربوط به متغیرهای مستقل مورد بررسی هستند.

#### محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی

##### شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI توسط مک‌کی و همکاران (۱۷) ارائه شد. این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص عنصر بارندگی است. این شاخص را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد. به منظور بررسی سال‌های خشک و مرطوب در این روش، مقدار شاخص استاندارد بارش سالانه با استفاده از رابطه (۹) تعیین می‌شود (۱۷):

$$SPI = \frac{P - \bar{P}}{SD} \times 100 \quad (9)$$

که در آن  $P$ : مقدار بارندگی سالانه،  $\bar{P}$ : میانگین بارندگی در طول دوره آماری،  $SD$ : انحراف معیار مقادیر بارندگی سالانه و  $SPI$ : شاخص استاندارد بارش سالانه است. در نهایت، به منظور تعیین شدت خشکسالی و یا ترسالی‌ها از جدول ۳ استفاده می‌شود.

##### شاخص بارش - تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI)

با استفاده از  $S$  آزمون من کندال، مقدار  $\tau$  کندال با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید. آزمون معنی‌داری بر اساس این آماره جدید، همانند آماره  $S$  روش من کندال است:

$$\tau = \frac{S}{\frac{1}{2}(n(n-1))} \quad (6)$$

در صورتی که وجود روند در سری‌های متغیر مورد نظر بر اساس آزمون من کندال و یا کندال معنی‌دار باشد، جزء روند باید از سری حذف شود که استفاده از تفاضل در این سری‌ها، باعث حذف جزء روند در سری خواهد شد.

$$U_t = X_t - X_{t-\omega} \quad (7)$$

در این رابطه  $X$  سری زمانی برای پارامتر مورد نظر و  $X_{t-\omega}$  نشانگر تأخیر زمانی در تفاضل است. برای رسیدن به ایستایی، تفاضلات می‌تواند چندین بار تکرار شود.

##### بررسی ارتباط بین عوامل اقلیمی و رخداد‌های گردوغبار

به منظور تعیین میزان همبستگی و نوع ارتباط منطقی بین متغیرهای مستقل (پارامترهای اقلیمی) و وابسته ( $DSI$ ) از تحلیل رگرسیون چندگانه استفاده شد. زیرا روشی مفید برای تخمین ارتباط بین دو یا چند متغیر است که با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (8)$$

(۲)، (۳) و (۴) نشان داده شده است.

تحلیل ماهانه و فصلی توفان‌های گردوغبار شهرستان قزوین برای بازه زمانی ۵۸ ساله (شکل ۲ و ۳) حاکی از آن است که بیشترین فعالیت رخداد‌های گردوغبار در منطقه مطالعاتی، در ماه‌های آوریل تا سپتامبر و در فصول بهار و تابستان به وقوع پیوسته است و زمان پیک این رخدادها در ماه می بوده است (DSI=0.16). در این بازه زمانی، کمترین فعالیت رخداد‌های گردوغبار متعلق به ماه‌های فوریه و نوامبر بوده است. تشدید وقوع پدیده فرسایش بادی و افزایش انتشار ذرات گردوغبار بهار و تابستانه در بسیاری از کشورهای آسیایی از جمله در ایران مرکزی توسط پژوهشگران متعددی (۲ و ۲۸) به اثبات رسیده است که می‌تواند مؤید نتایج این مرحله از تحقیق حاضر باشد.

نتایج کلی حاصل از بررسی مقادیر مربوط به تغییرات شاخص سالانه توفان گردوغبار (شکل ۴) حاکی از آن است که بیشترین فعالیت رخداد‌های گردوغبار در مقیاس زمانی سالیانه متعلق به سال‌های ابتدایی بازه زمانی مورد بررسی و به‌ویژه متعلق به سال‌های ۱۹۶۷ (DSI=7.5) و ۱۹۶۲ (DSI=6.3) بوده است، این در حالی است که شدت فرسایش بادی و تولید گردوغبار در منطقه مطالعاتی در سال‌های پایانی بازه زمانی مورد بررسی، کاهش چشمگیری داشته و به کمتر از حد متوسط شاخص توفان گردوغبار ۵۸ ساله (DSI<sub>mean</sub>=0.85) رسیده است. اگرچه تعداد رخداد‌های محلی (LDE) و متوسط (MDS) در سال‌های اولیه بیشتر از سایر سال‌های مورد بررسی است (شکل ۵)، اما یکی از علل اصلی افزایش قابل توجه مقادیر شاخص DSI مربوط به سال‌های ۱۹۶۲ و ۱۹۶۷، وقوع رخداد‌های شدید توفان شن (SDS؛ شکل ۵) و پنج برابر بودن ضریب تأثیر آن در رابطه ارائه شده اولانگ سای (۲۰) است. به تازگی برای مناطق اقلیمی مشابه با منطقه مطالعاتی روند تغییرات افزایشی در رخداد‌های گردوغبار برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ و روند تغییرات کاهشی برای بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴

شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) توسط ویسته-سرانو (۲۸)، به عنوان یک شاخص اقلیمی معرفی شد. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. معادله ترازمندی آب اقلیمی به صورت زیر تعریف شده است:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (10)$$

که  $P$ ،  $PET$  و  $D_i$  به ترتیب مقادیر بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل و اختلاف آنها در ماه مورد نظر است. معادلات مختلفی برای محاسبه  $PET$  وجود دارد که در تحقیق حاضر از روش تورنت وایت برای محاسبه  $PET$  استفاده شده است. پس از محاسبه مقادیر  $D_i$ ، از رهیافتی همانند شاخص بارش استاندارد (SPI) برای محاسبه SPEI استفاده می‌شود. دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که مقادیر حاصل از این شاخص‌ها، به طور مستمر منفی و به مقدار  $-1$  یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مثبت شود. طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد همانند طبقه‌بندی ارائه شده برای SPI است.

### بررسی ارتباط بین رخداد‌های خشکسالی و گردوغبار

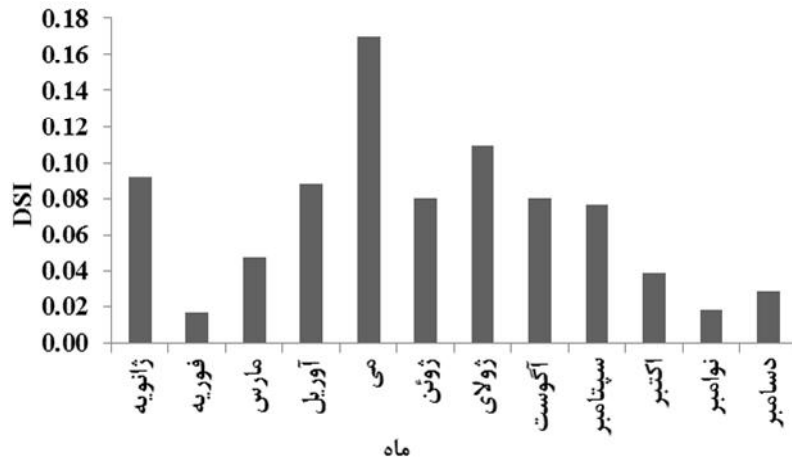
در نهایت به منظور تحلیل اثر خشکسالی هواشناسی بر تغییر رخداد‌های گردوغبار از روش رگرسیون دو متغیره استفاده شد. همچنین به منظور تحلیل میزان تغییرپذیری شاخص توفان گردوغبار بر اثر تغییر پارامترهای اقلیمی و وقایع خشکسالی از ضریب تعیین ( $R^2$ ) حاصل از برازش متغیرهای وابسته و مستقل استفاده شد. زیرا این ضریب، بیانگر آن است که چند درصد تغییرات متغیر وابسته تابعی از تغییرات متغیر یا متغیرهای مستقل بوده است.

### نتایج و بحث

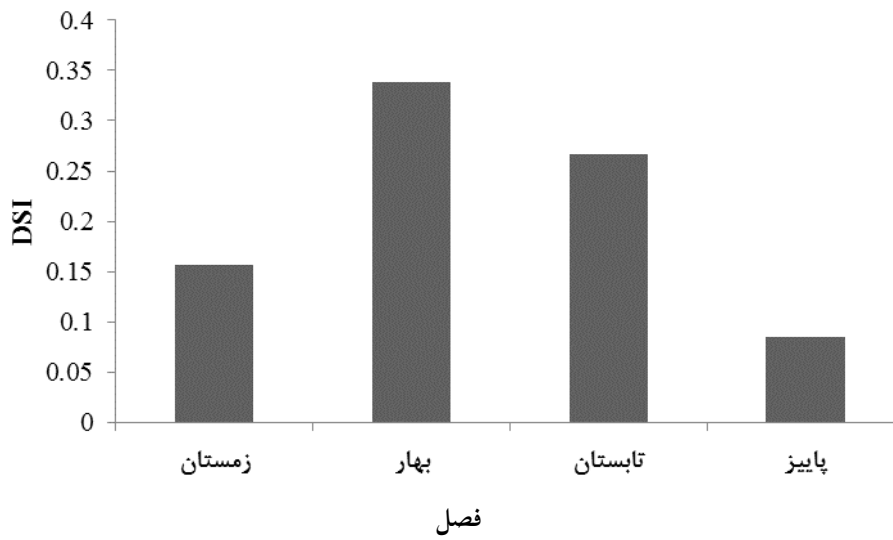
#### تحلیل زمانی رخداد‌های گردوغبار

مقادیر متوسط ماهیانه، فصلی و سالیانه شاخص توفان گردوغبار شهرستان قزوین در بازه زمانی ۵۸ ساله به ترتیب در شکل‌های

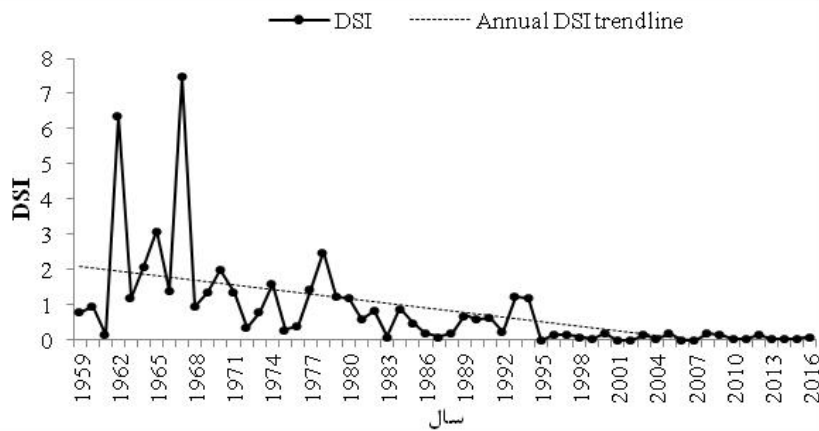




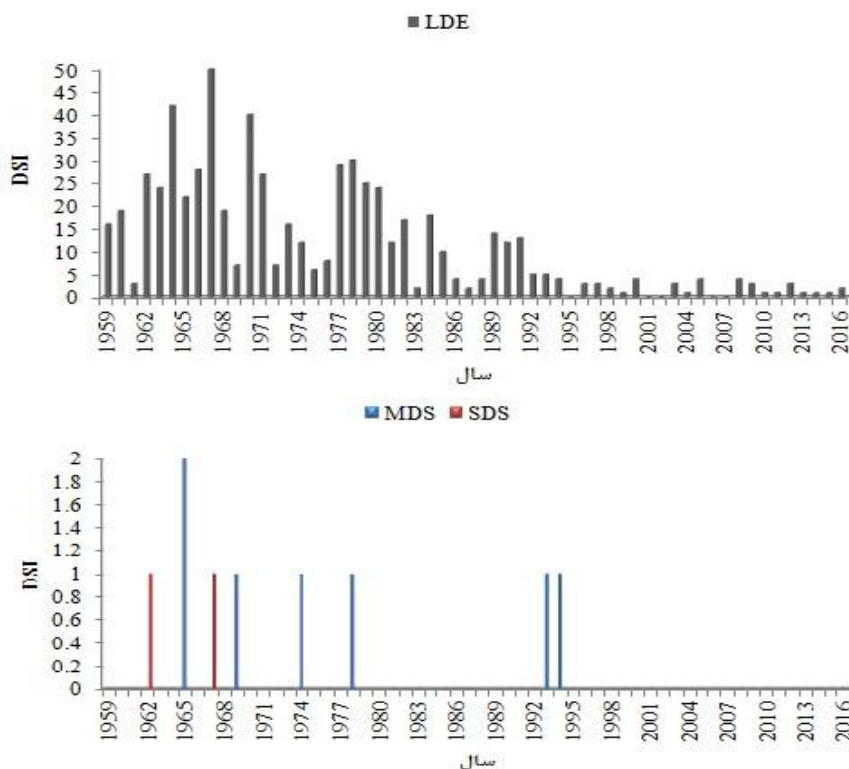
شکل ۲. مقادیر متوسط ماهیانه شاخص توفان گردوغبار شهرستان قزوین برای بازه زمانی (۱۹۵۹-۲۰۱۶)



شکل ۳. مقادیر متوسط فصلی شاخص توفان گردوغبار شهرستان قزوین برای بازه زمانی (۱۹۵۹-۲۰۱۶)



شکل ۴. مجموع مقادیر سالیانه شاخص توفان گردوغبار شهرستان قزوین در بازه زمانی مورد بررسی (۱۹۵۹-۲۰۱۶)



شکل ۵. تعداد رویدادهای محلی، متوسط و شدید در بازه زمانی مورد بررسی (۱۹۵۹-۲۰۱۶)

مطالعه در شکل (۶) و نتایج حاصل از بررسی آزمون من کندال در جدول (۴) نشان داده شده است.

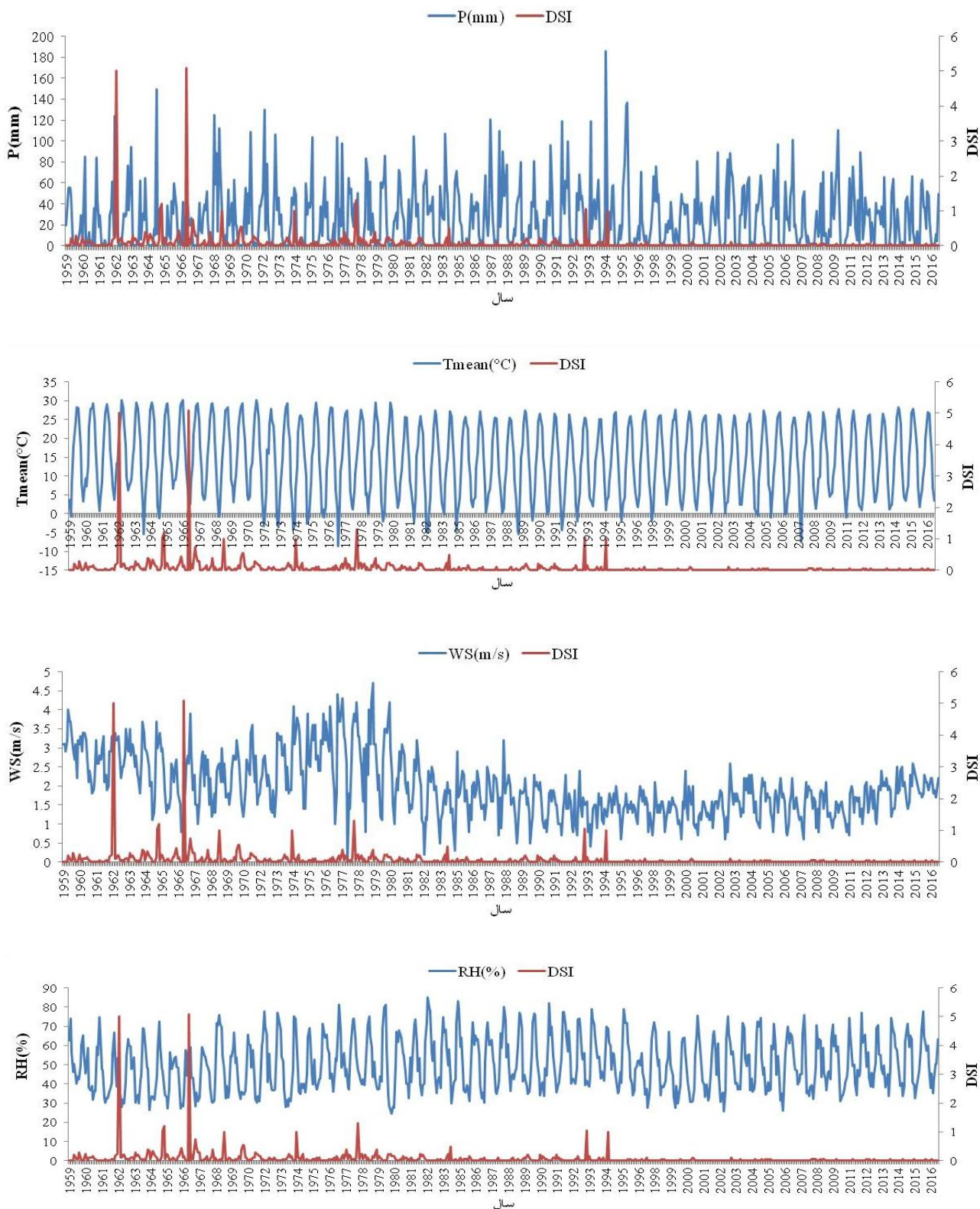
نتایج حاصل از بررسی روند تغییر این پارامترها در مقیاس‌های زمانی ماهیانه، فصلی و سالانه با استفاده از روش من کندال (جدول ۴) نشان می‌دهد که روند تغییرات بارندگی در فصول زمستان و بهار، کاهشی و در فصول پاییز و تابستان، افزایشی بوده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، روند افزایشی تغییرات بارندگی در تابستان مربوط به ماه ژولای و در فصل پاییز، بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به ماه‌های اکتبر و نوامبر و در سطح ۵ درصد آماری معنی‌دار نشان داده شده است. روند تغییرات سرعت باد در بازه زمانی مورد بررسی، همواره کاهشی بوده است درحالی که روند تغییرات رطوبت نسبی در بیشتر ایام سال به جز فصل‌های فصل زمستان، افزایشی بوده است. بر اساس آماره من کندال، بیشترین روند افزایشی رطوبت نسبی در فصل تابستان رخ داده

گزارش شده است (۱۱). برای مناطق خشک ایران مرکزی نیز تغییرات شاخص توفان گردوغبار روندی مشابه با مناطق نیمه‌خشک به‌ویژه در سال‌های اخیر داشته است (۱۰) که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

به‌طور کلی، علت یا علل چنین نوساناتی را می‌توان به روند تغییرات پارامترهای اقلیمی، ویژگی‌های سطح زمین و یا هر دو عامل و تأثیر این تغییرات بر تشدید یا تضعیف فرسایش بادی نسبت داد که در پژوهش حاضر، روند تغییرات پارامترهای اقلیمی و نقش آن در تغییر رخداد‌های گردوغبار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

#### روند تغییرات پارامترهای اقلیمی و DSI در مقیاس‌های زمانی مختلف

مقادیر متوسط سالیانه پارامترهای اقلیمی و شاخص توفان گردوغبار مربوط به شهرستان قزوین برای بازه زمانی مورد



شکل ۶. نمودار مقادیر متوسط پارامترهای اقلیمی و شاخص توفان گردوغبار شهرستان قزوین در بازه زمانی مورد بررسی (۱۹۵۹-۲۰۱۶)

جدول ۴. مقادیر آماره آزمون من کندال (Z) مربوط به پارامترهای اقلیمی و شاخص توفان گردوغبار در شهرستان قزوین

DSI	دمای متوسط	رطوبت نسبی	سرعت باد	بارندگی	مقیاس زمانی
	۰/۰۳	-۰/۶۷	-۴	-۰/۷۵	ژانویه
			***		Test Z
					Signific.
	۰/۴۸	-۰/۰۳	-۲/۳	-۰/۳۱	فوریه
			*		Test Z
					Signific.
	-۱/۰۹	۰/۲	-۴/۵	۰/۵۸	مارس
			***		Test Z
					Signific.
	-۱/۴۶	۱/۳۴	-۵/۲	-۰/۰۷	آوریل
			***		Test Z
					Signific.
	-۲/۵	۰/۸۵	-۵/۴	-۰/۸۱	می
	**		***		Test Z
					Signific.
	-۳/۲	۰/۹۱	-۵/۲	-۱/۲۳	ژوئن
	**		***		Test Z
					Signific.
-۴/۷۶	-۴/۲	۲/۹	-۴/۸	۲/۴	ژولای
***	***	**	***	*	Test Z
					Signific.
	-۳/۸	۲/۲	-۵/۵		آگوست
	***	*	***		Test Z
					Signific.
	-۴	۲/۷	-۴/۲		سپتامبر
	***	**	***		Test Z
					Signific.
	-۲/۱	۱/۶	-۴	۲/۰۷	اکتبر
	*		***	*	Test Z
					Signific.
	-۳/۷	۲/۷	-۳/۵	۲/۰۹	نوامبر
	***	**	***	*	Test Z
					Signific.
	-۱/۵	۱/۷	-۲/۲	۰/۳۲	دسامبر
		+	*		Test Z
					Signific.
	-۰/۰۷	۰/۰۴	-۴/۶	-۰/۶۷	زمستان
			***		Test Z
					Signific.
-۴/۸۴	-۳/۶	۱/۵	-۵/۳	-۰/۷۲	بهار
***	***		***		Test Z
					Signific.
-۵/۶۳	-۴/۲	۳/۱	-۵/۲	۱/۳۴	تابستان
***	***	**	***		Test Z
					Signific.
-۳/۶۳	-۲/۹۷	۲/۸	-۳/۵	۲/۰۷	پاییز
***	**	**	***	*	Test Z
					Signific.
-۵/۹۷	-۱/۹۷	۲/۲	-۵/۰۲	۰/۶۶	سالانه
***	*	*	***		Test Z
					Signific.

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه در مقیاس فصلی و سالانه

مقیاس زمانی	معادله	R <sup>2</sup>
-------------	--------	----------------

-	-	زمستان
0.15**	$DSI = (0.4 \times WS) - 0.67$	بهار
0.4**	$DSI = (0.13 \times Tmean) - 3.08$	تابستان
-	-	پاییز
0.22**	$DSI = (0.68 \times WS) + (0.29 \times Tmean) - 4.7$	سالانه

توفان گردوغبار به اندازه ۰/۴ واحد در فصل بهار کاهش یافته است. به‌طور مشابه، به‌ازای هر واحد کاهش دمای متوسط هوا در فصل تابستان، ۰/۱۳ واحد از تغییرات شاخص بیانگر رخدادهای گردوغبار در شهرستان قزوین کاسته شده است. در مقیاس زمانی سالانه، در اثر افت هر واحد سرعت باد و دمای هوا به‌ترتیب به میزان ۰/۶۸ و ۰/۲۹ واحد از شدت تغییرات شاخص گردوغبار کم شده است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) حاصل از این مدل‌ها به‌ترتیب تبیین‌کننده ۱۵ و ۴۰ درصد روند کاهشی انتشار ذرات گردوغبار در اثر تغییر دو پارامتر مهم سرعت باد و دمای هوا در فصل بهار و تابستان در بازه زمانی مورد مطالعه است. حدود ۴۵ درصد از تغییرات شاخص گردوغبار بهاره و تابستانه در مناطق نیمه‌خشک ایران مرکزی به‌دلیل تغییرات سرعت بادهای سطحی طی دوره آماری ۲۰۱۶-۲۰۰۰ بوده است (۱۱) درحالی‌که برای مناطق خشک، ۲۷ درصد از تغییرات شاخص گردوغبار به‌دلیل نوسانات دمایی در سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۰ و حدود ۵۰ درصد تغییرات به دلیل اثر معنی‌دار سرعت باد و بارندگی در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ بوده است (۱۰) که تقریباً با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. اختلافات اندک ارائه شده در نتایج این محققین با نتایج مطالعه حاضر به‌دلیل متفاوت بودن طول دوره آماری و مقیاس مکانی مورد بررسی است. به‌طور کلی، روند کاهشی و توأم پارامترهای اقلیمی مذکور منجر به افت شدید غبارآلودگی ناشی از وقوع پدیده فرسایش بادی در مقیاس زمانی سالانه شده است. بر اساس ضریب تعیین حاصل از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه، به‌طور متوسط ۲۲ درصد تغییرات شاخص توفان گردوغبار به‌دلیل تغییرات کاهشی این دو پارامتر مهم اقلیمی، قابل توجیه است.

است. در مقابل، کمترین تغییرات متعلق به زمستان بوده است. در دوره آماری مورد بررسی (۲۰۱۶-۱۹۵۹)، روند تغییرات دمای متوسط هوا در ماه‌های ژانویه و فوریه، افزایشی و در بقیه ماه‌ها و به ویژه ماه‌های فصل تابستان کاهشی بوده است. به‌طور کلی، روند تغییرات سالانه بارندگی و رطوبت نسبی در شهرستان قزوین، افزایشی و روند تغییرات سالانه سرعت باد و دمای متوسط هوا، کاهشی بوده است. بررسی روند تغییرات ماهانه رخدادهای گردوغبار بیانگر آن است که تنها در ماه ژوئیه روند کاهشی شدیدی در وقوع پدیده فرسایش بادی و انتشار ذرات گردوغبار داخلی، رخ داده است. در مقیاس فصلی به استثنای فصل زمستان که بدون روند گزارش شده است، در سایر فصول، از شدت وقوع این رویدادها به میزان قابل توجهی کاسته شده است.

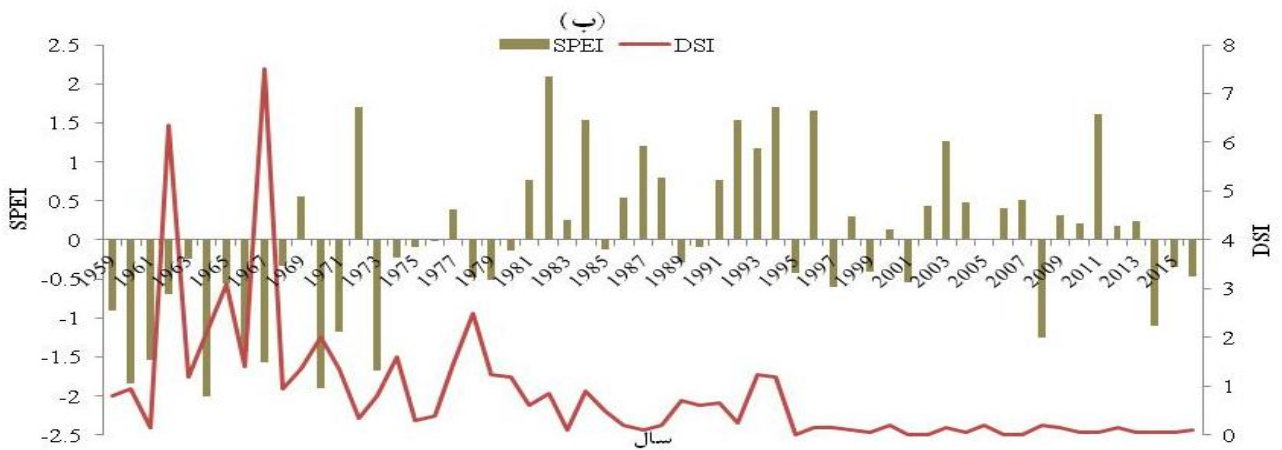
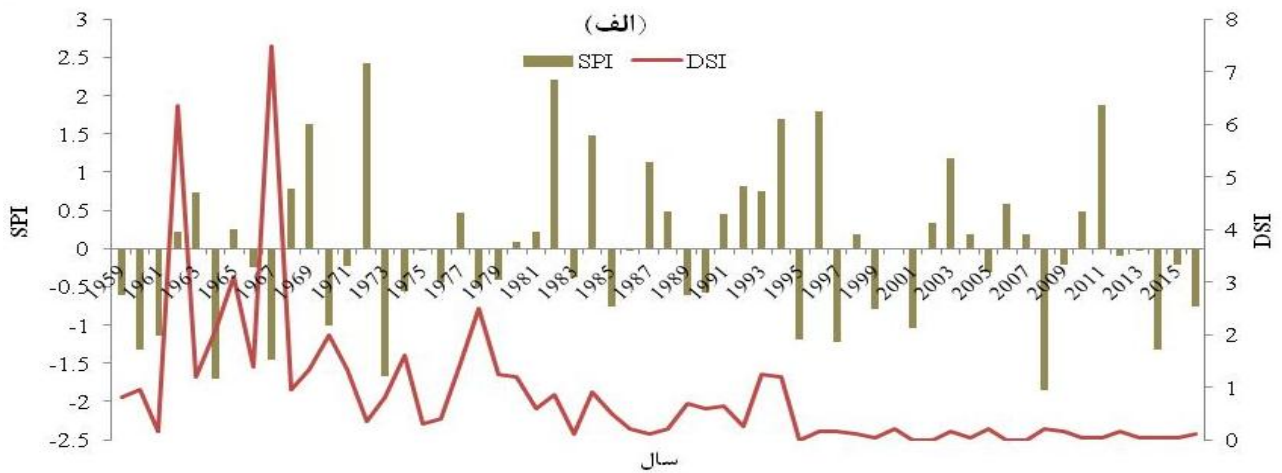
نتایج حاصل از برقراری روابط رگرسیون خطی بین شاخص معرف شدت فعالیت فرسایش بادی و پارامترهای اقلیمی مورد بررسی در این پژوهش نشان داد که روند تغییر پارامترهای اقلیمی تأثیری بر روند کاهشی رخدادهای گردوغبار در فصول زمستان و پاییز، نداشته است. این درحالی است که ارتباط مستقیم و معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد، بین سرعت باد و  $DSI$  در فصل بهار و بین دمای متوسط هوا و  $DSI$  در فصل تابستان برقرار شده است. در مقیاس زمانی سالانه نیز نتایج مشابهی به‌دست آمده است. به‌عبارت دیگر، کاهش قابل توجه دمای متوسط هوا در تابستان و همچنین سرعت باد در بهار، توانسته است بر تضعیف پدیده فرسایش بادی در شهرستان قزوین اثرگذار باشند. میزان تغییر حاصل بر اساس ضرایب مربوط به پارامترهای اقلیمی قابل تفسیر است. بر اساس نتایج مندرج در جدول (۵) این گونه استنباط می‌شود که به‌ازای هر واحد کاهش سرعت باد، شاخص

همبستگی بین SPEI و DSI، برابر با ۰/۳۳ و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار شده است ( $R^2=0.11$ ;  $P\text{-value}<0.01$ ). این یافته‌ها، همچنین بیانگر مناسب‌تر بودن شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI در آشکارسازی فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار در منطقه مطالعاتی است. زیرا مبنای محاسبه SPEI، بارندگی است که روند تغییرات آن در مقیاس سالانه غیرمعنی دار بوده است (جدول ۴)؛ در حالی که در محاسبه شاخص SPEI، دما هم در نظر گرفته می‌شود و از آنجایی که تغییرات دمای هوا در شهرستان قزوین، روند کاهشی معنی‌داری نشان داده، لذا توانسته است بهتر از شاخص SPI، تغییر رخدادهای گردوغبار را آشکار کند. به‌طور کلی، ضریب تبیین کننده میزان فعالیت فرسایش بادی متأثر از تغییر وضعیت خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در شهرستان قزوین، ۱۱ درصد است. گفتنی است که روند تغییرات شاخص SPI با تغییر فراوانی گردوغبارهای داخلی قزوین برای سال‌های (۲۰۱۴-۲۰۰۰) که توسط علی‌پور و همکاران (۲) انجام شده است، با نتایج به‌دست آمده بر اساس شاخص SPI برای بازه زمانی مذکور مطابقت دارد که نشان‌دهنده صحت نتایج به‌دست آمده از این مرحله تحقیق حاضر است.

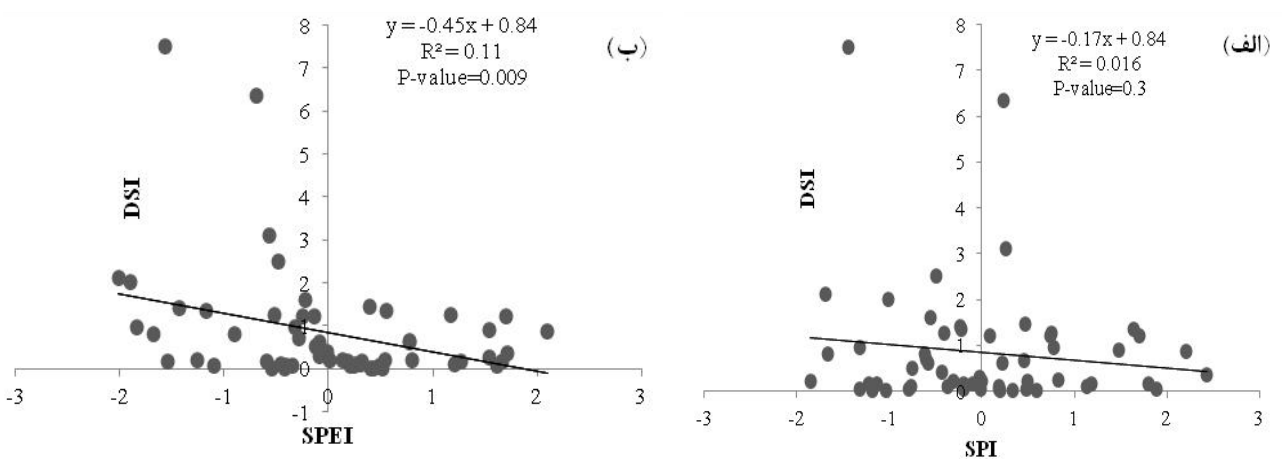
به‌طور خلاصه، نتایج حاصل از این پژوهش، نبودن روند افزایشی رخدادهای گردوغبار را در شهرستان قزوین به اثبات رساند که بر اساس تحلیل‌های آماری مشخص شد، ۲۲ درصد تغییرات کاهشی رخدادهای شن و گردوغبار به‌دلیل کاهش توأم دمای متوسط هوا و سرعت باد و ۱۱ درصد آن به‌دلیل کوتاه‌تر شدن دوره‌های خشکسالی و بهبود شرایط اقلیمی حاکم بر شهرستان قزوین بوده است. لذا بر اساس این نتایج فرض تحقیق حاضر مبنی بر تشدید پدیده فرسایش بادی و افزایش روند تولید و انتشار ذرات گردوغبار رد می‌شود. تیموری و همکاران (۲۶) گزارش کرده‌اند که سطح اراضی بایر، کشاورزی دیم و باغات از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۱ کاهش چشمگیری داشته است در حالی که بر وسعت اراضی مسکونی، صنعتی و کشاورزی آبی اطراف شهر

اگرچه در اغلب مطالعات گذشته، روند افزایشی فعالیت رخدادهای گردوغبار به‌ویژه برای مناطق خشک ایران گزارش شده است (۸ و ۲۳). اما سیر نزولی شدت وقوع رخدادهای گردوغبار به‌دلیل کاهش دمای هوا در مطالعه گیو و همکاران (۱۳) نیز به اثبات رسیده است که می‌تواند مؤید نتایج تحقیق حاضر باشد. با توجه به اینکه در برخی از پژوهش‌ها، اثر خشکسالی هواشناسی بر فراوانی رخدادهای گردوغبار نیز تأیید شده است (۱)، انتظار می‌رود که یکی دیگر از دلایل کاهش روند تغییر رخدادهای گردوغبار در شهرستان قزوین، بهتر شدن شرایط اقلیمی و به‌عبارت دیگر کوتاه شدن دوره‌های خشکسالی و افزایش تداوم ترسالی‌ها در این منطقه باشد. به‌همین دلیل این موضوع نیز با استفاده از متداول‌ترین شاخص‌های ارزیابی وضعیت خشکسالی‌ها و ترسالی (SPI و SPEI) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که شدیدترین خشکسالی هواشناسی بر اساس شاخص SPI و SPEI، به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۰۸ و ۱۹۶۴ به وقوع پیوسته است (شکل ۷ و ۸).

بر اساس مقادیر به‌دست آمده از این شاخص‌ها، تداوم خشکسالی‌ها در سال‌های ابتدایی بازه زمانی مورد بررسی (۱۹۷۵-۱۹۵۹) و تداوم ترسالی‌ها در بازه زمانی (۱۹۹۶-۱۹۷۶)، بیشتر از سایر سال‌های آماری مورد بررسی بوده است. گرچه بر اساس شاخص توفان گردوغبار، زمان اوج فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار متعلق به سال‌های ابتدایی مورد مطالعه بوده است اما سال وقوع آنها دقیقاً منطبق با سال وقوع خشکسالی‌های شدید در منطقه نبوده است. به‌همین دلیل با وجود ارتباط معکوس بین شاخص‌های خشکسالی و شاخص توفان گردوغبار (شکل ۷-الف و ۷-ب)، که با نتایج پژوهش‌های گذشته همخوانی دارد، این ارتباط ضعیف ارزیابی شده است. به‌طوری که ضریب همبستگی بین شاخص SPI و DSI، برابر با ۰/۱ و در سطح اطمینان مورد بررسی (۹۵ درصد) غیرمعنی‌دار بوده است ( $R^2=0.01$ ;  $P\text{-value}>0.05$ ) و ضریب



شکل ۷. مقادیر شاخص‌های خشکسالی و توفان گردوغبار شهرستان قزوین برای دوره آماری ۵۸ ساله



شکل ۸. نمودار پراکندگی نقاط حاصل از برازش شاخص‌های: الف) DSI-SPI و ب) DSI-SPEI





- multiple environmental datasets. *Science of the Total Environment* 502: 224-235.
5. Zhiguo, C., F. Xu, W. Li, J. Sun, M. Shen, X. Su, J. Feng, G. Yu and A. Covaci. 2015. Seasonal and particle size-dependent variations of hexabromocyclododecanes in settled dust: implications for sampling. *Environmental Science & Technology* 49(18): 11151-11157.
  6. De Oro, L. A., and D. E. Buschiazzo. 2009. Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. *Land Degradation & Development* 20(1): 14-21.
  7. Djebou, D. C. S., V. P. Singh and O. W. Frauenfeld. 2015. Vegetation response to precipitation across the aridity gradient of the southwestern united states. *Journal of Arid Environments* 115: 35-43.
  8. Ebrahimi Khusfi, Z., A. A. Vali, M. Khosroshahi and R. Ghazavi. 2017. Investigation of the role of bed dried Gavkhooni wetland on the production of the internal dust using remote sensing and duststorms (Case study: Isfahan province). *Iranian Range and Desert Researches* 24(1): 152-164. (In Farsi).
  9. Ebrahimi Khusfi, Z., F. Roustaei, M. Ebrahimi Khusfi and S. Naghavi. 2019. Investigation of the relationship between dust storm index, climatic parameters, and normalized difference vegetation index using the ridge regression method in arid regions of Central Iran. *Arid Land Research and Management* 1-25.
  10. Ebrahimi Khusfi, Z., M. Khosroshahi, F. Roustaei and M. Mirakbari. 2020. Spatial and seasonal variations of sand-dust events and their relation to atmospheric conditions and vegetation cover in semi-arid regions of central Iran. *Geoderma* 365: 114225.
  11. Ghanavati, N., A. Nazarpour and B. De Vivo. 2019. Ecological and human health risk assessment of toxic metals in street dusts and surface soils in Ahvaz, Iran. *Environmental Geochemistry and Health* 41(2): 875-891.
  12. Goudie, A. S. 2014. Desert dust and human health disorders. *Environment International* 63: 101-113.
  13. Gu, Yu, K. N. Liou, W. Chen and H. Liao. 2010. Direct climate effect of black carbon in China and its impact on dust storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115: D7.
  14. Kaskaoutis, D. G., E. E. Houssos, A. Rashki, P. Francois, M. Legrand, D. Goto, A. Bartzokas, H. D. Kambezidis, and T. Takemura. 2016. The Caspian sea-hindu kush index (CasHKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia. *Global and Planetary Change* 137: 10-23.
  15. Kendall, M. G. 1975. Rank Correlation Methods, 4th ed, Charles Griffin: London.
  16. Mann, H. B. 1945. Non-parametric test against trend. *Econometrica* 13: 245-259.
  17. McKee, T. B. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Proceedings of 9th Conference on Applied Climatology, Boston, 15-20 January.
  18. Middleton, N. J. 2017. Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research* 24: 53-63.
  19. Namdari, S., N. Karimi, A. Sorooshian, Gh. Mohammadi and S. Sehatkashani. 2018. Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. *Atmospheric environment* 173: 265-276.
  20. O'Loingsigh, T., G. H. McTainsh, E. K. Tews, C. L. Strong, J. F. Leys, P. Shinkfield and N. J. Tapper. 2014b. The dust storm index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research* 12: 29-40.
  21. O'Loingsigh, T., R. M. Mitchell, S. K. Campbell, N. A. Drake, G. H. McTainsh, N. J. Tapper and D. L. Dunkerley. 2015. Correction of dust event frequency from MODIS Quick-Look imagery using in-situ aerosol measurements over the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment* 169: 222-231.
  22. Phillips, P. C. and P. Perron. 1988. Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika* 75(2): 335-346.
  23. Rashki, A., D. G. Kaskaoutis, A. S. Goudie and R. A. Kahn. 2013. Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of the Total Environment* 463: 552-564.
  24. Rashki, A., D. G. Kaskaoutis and A. Sepehr. 2018. Statistical evaluation of the dust events at selected stations in Southwest Asia: from the Caspian Sea to the Arabian Sea. *Catena* 165: 590-603.
  25. Sett, R. 2017. Responses in plants exposed to dust pollution. *Horticulture International Journal* 1(2): 10-18.
  26. Teimouri, A., V. Rabieifar, F. Hadavi and M. Hadavi. 2014. Evaluating and predicting horizontal expansion of the city of Qazvin emphasizing the land-use changes from 1986 to 2011. *Journal of Urban Economics and Management* 2(5):15-27.
  27. Turgay, P. and K. Ercan. 2005. Trend Analysis in Turkish Precipitation Data. Hydrological Processes Published Online in Wiley Interscience. (www.Interscience.Wiley.com).
  28. Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería and J. I. López-Moreno. 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Climate* 23(7): 1696-1718.
  29. WMO. 1974. Manual on Codes. WMO Publ. 306, Vol. 1, Available from World Meteorological Organization, Avenue Giuseppe-Motta 41, CP2300, 1211 Geneva 2, Switzerland.
  30. Yilbas, B. S., Gh. Hassan, H. Ali and N. Al-Aqeeli. 2017. Environmental dust effects on aluminum surfaces in humid air ambient. *Scientific Reports* 7: 45- 55.

## Analysis of the Effect of Climatic Parameters and Meteorological Droughts on the Variation of Internal Dust Events (A Case Study: Qazvin City)

S. Zandifar<sup>1\*</sup>, Z. Ebrahimikhusfi<sup>2</sup>, M. khosroshahi<sup>1</sup> and M. Naeimi<sup>1</sup>

(Received: July 22-2019; Accepted: April 25-2020)

### Abstract

The occurrence of wind erosion and the spread of dust particles can be regarded as one of the most important and threatening environmental factors. Climate change and the frequency of droughts have played an important role in exacerbating or weakening these events. The primary objective of the present study was to investigate the trend of changes in four important climatic elements (precipitation, temperature, wind speed and relative humidity) and dust storm index (DSI) in Qazvin city using the Mann-Kendall pre-whitened test and to determine the relationship between them based on the multiple linear regression method. Assessment of the meteorological drought status based on two standardized precipitation index and standardized precipitation, as well as the evapotranspiration index and analysis of their effect on activity level of dust events, was the other objective of this study in the study area. For this purpose, after preparing and processing the climatic data and calculating the dust storm index, the trend of changes and the relationship between climatic parameters and dust events were investigated. The results showed that the changes of trend in the annual precipitation and relative humidity in Qazvin city were increasing, while the trend of annual changes in the wind speed and the mean air temperature was a decreasing one. Investigation of the monthly changes in the dust events also showed that there was a sharp decrease in the occurrence of wind erosion and the spread of domestic dust particles only in July. On a seasonal scale, with the exception of winter that has been reported without trends, in other seasons, the intensity of these events was significantly reduced. The effect of the meteorological drought on wind erosion was estimated to be 11% at the confidence level of 99%. In general, these findings indicate a decreasing trend of land degradation and desertification caused by wind erosion in Qazvin.

**Keywords:** Wind Erosion, Dust Storm Index, Climate Change, Linear Regression, Qazvin.

1. Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

2. Department of Natural Science, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

\*: Corresponding author, Email: zandifar@rifr-ac.ir