تحلیل زمانی و مکانی غبارآلودگی ناشی از رخدادهای فرسایش بادی در استان فارس

زهره ابراهیمی‌خوسفی*: *استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، کرمان، ایران*

محسن ابراهیمی‌خوسفی: *استادیار سنجش از دور و GIS، گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۳۱)

DOR: 20.1001.1.22517812.1400.11.3.5.7

چکیده

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب زمین در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است که آلودگی ناشی از آن، اثرات نامطلوبی را بر کیفیت هوای این مناطق برجاگذاشته است. بنابراین، بررسی مداوم این پدیده و کشف روند تغییرات آن می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش خطرات زیست محیطی رخدادهای فرسایش بادی و توفان‌های گردوغبار باشد. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی آلودگی ناشی از این رخدادها در استان فارس است. بدین منظور، برای محاسبهٔ شاخص آلودگی توفان گردوغبار (PDSI) از داده‌های ساعتی مربوط به کد رخدادهای گردوغبار و دید افقی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷ استفاده شد. روند تغییرات زمانی PDSI، با استفاده از آزمون من ـــ کندال و الگوی پراکنش مکانی غبارآلودگی هوا، با استفاده از نقشه‌های تهیه شده از روش وزن‌دهی فاصلهٔ معکوس تحلیل شد. نتایج نشان داد که مقدار متوسط غبارآلودگی هوا در دورهٔ مطالعاتی برای ایستگاه‌های آباده، اقلید، ایزدخواست، داراب، درودزن، زرقان، شیراز، فسا، لار، لامرد و نیریز به ترتیب ۴۶/۸، ۱۵/۱، ۱۷، ۱۳۳/۲، ۱۲/۹، ۴۹/۳، ۲۱۷/۵، ۲۶۶/۶، ۱۷۱/۹ و ۱۴۰/۹ بوده‌است. بر اساس آمارهٔ من-کندال، روند تغییرات افزایشی معنی‌دار (z>+۱/۹۶) برای اغلب ایستگاه‌ها در فروردین ماه و روند کاهشی معنی‌دار (z<-۱/۹۶) اغلب در مهرماه مشاهده شد. روند تغییرات فصلی و سالانهٔ آلودگی ناشی از توفان‌های گردوغبار در بیش از ۷۰ ٪ ایستگاه‌های مطالعاتی، افزایشی بود. همچنین نتایج نشان داد که ایستگاه‌های داراب و لار، روند تغییرات کاهشی معنی‌داری را در سال‌های اخیر تجربه کرده‌اند. از نظر مکانی، بیشترین الگوی توزیع ذرات گردوغبار در نواحی مرکزی، جنوب غربی و جنوب شرقی استان فارس (PDSI>۱۲۰) مشاهده شد. نتایج این مطالعه می‌تواند برای شناسایی مناطق حساس به فرسایش بادی و اجرای اقدامات مناسب برای کاهش خطرات ناشی از غبارآلودگی هوا مفید باشد.

واژگان کلیدی: بیابان‌زایی، شاخص آلودگی توفان گردوغبار، روند تغییرات، من - کندال.

* نویسنده مسئول: Zohreebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

۱ـ مقدمه

یکی از بحران‌های زیست محیطی که نگرانی‌های زیادی را در سال‌های اخیر به وجود آورده‌است، آلودگی ایجاد شده در اثر رخدادهای فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان و به ویژه ایران است (Beyranvand et al, 2019). اخیراً گزارش شده‌است که حدود ۲۶٪ از تغییرات غلظت گردوغبار ناشی از توفان‌های گردوغبار، در مناطق خشک ایران رخ داده که این امر به دلیل تغییرات شاخص خشکی ـــ که خود نتیجه‌ای از تغییرات بارندگی به تبخیر و تعرق است ـــ می‌باشد (Ebrahimi-Khusfi et al, 2021). افزایش غلظت آلاینده‌های جوی و به ویژه ذرات گردوغبار، پیامدهای نامطلوب زیادی در پی داشته‌است که می‌توان به اثرات منفی آن بر تولیدات کشاورزی، سلامت انسان‌ها و محیط زیست اشاره کرد. بنابراین، علاوه بر شناسایی و پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش بادی ـــ که در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده‌است (Gholami et al, 2020 & Gholami et al, 2021) ـ تحلیل زمانی و پایش مداوم این رخدادها در مناطق مختلف و به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک اهمیت زیادی دارد.

در مطالعات متعدد، پژوهشگران از شاخص‌ها و معیارهای مختلفی برای تحلیل زمانی رخدادهای گردوغبار در مناطق مختلف استفاده کرده‌اند. فراوانی رخدادهای گردوغبار (Park et al, 2021)، تعداد روزهای غبارآلود (Ebrahimi-Khusfi et al, 2021)، غلظت گردوغبار محاسبه شده بر اساس میدان دید افقی (Camino et al, 2015)، عمق اپتیکی آئروسل‌ها (Saeeidifar et al, 2020) و شاخص توفان گردوغبار (O'Loingsigh et al, 2014)، از جمله معیارهایی است که برای بررسی اهداف مختلف به ویژه برای بررسی وقایع گردوغبار، همچنین بررسی تغییرات این وقایع در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و تحلیل روابط این وقایع با پارامترهای اقلیمی و زمینی استفاده شده‌است. نتایج این بررسی‌ها، دستاوردهای متعدد و ارزشمند زیادی داشته‌است؛ به عنوان مثال، Saeeidifar و همکاران (۲۰۲۰) از داده‌های عمق اپتیکی آئروسل‌ها (AOD)[1] و مدل گردوغبار (NMMB/BSC) برای بررسی منشأ و نحوهٔ گسترش مکانی غلظت‌های بالای گردوغبار و تحلیل همدیدی آن در حوضهٔ گاوخونی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که منشأ وقوع گردوغبار در حوضه گاوخونی، کانون‌های تولید گردوغبار خوزستان و عراق، کویر مرکزی و بخش‌های کوچکی از مرکز حوضه و اطراف تالاب گاوخونی بود. Ebrahimi-Khusfi و همکاران (۲۰۲۰) ارتباط بین شاخص توفان گردوغبار (DSI)[2]، پارامترهای اقلیمی و شاخص پوشش گیاهی فصل بهار را در مناطق خشک ایران مرکزی با استفاده از رگرسیون ریج و برای دو بازهٔ زمانی مختلف بررسیکردند. نتایج این بررسی نشان داد که ۲۷٪ از تغییرات شاخص توفان گردوغبار در بازهٔ زمانی اول (۲۰۰۷-۲۰۰۰)، به دلیل نوسانات دمایی و حدود ۸۰٪ از تغییرات این شاخص در بازهٔ زمانی دوم (۲۰۱۴-۲۰۰۸)، به دلیل تغییرات بارندگی و سرعت باد در فصل بهار بوده‌است. Mirakbari و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از آزمون من ـ کندال، تغییرات زمانی ذرات معلق جو را بر مبنای شاخص عمق اپتیکی آئروسل‌ها در جنوب شرق ایران برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که سیر روند تغییرات AOD در برخی از ایستگاه‌های سینوپتیک، کاهشی و در برخی دیگر،

[1] AOD: Aerosols Optical Depth
[2] DSI: Dust Storm Index

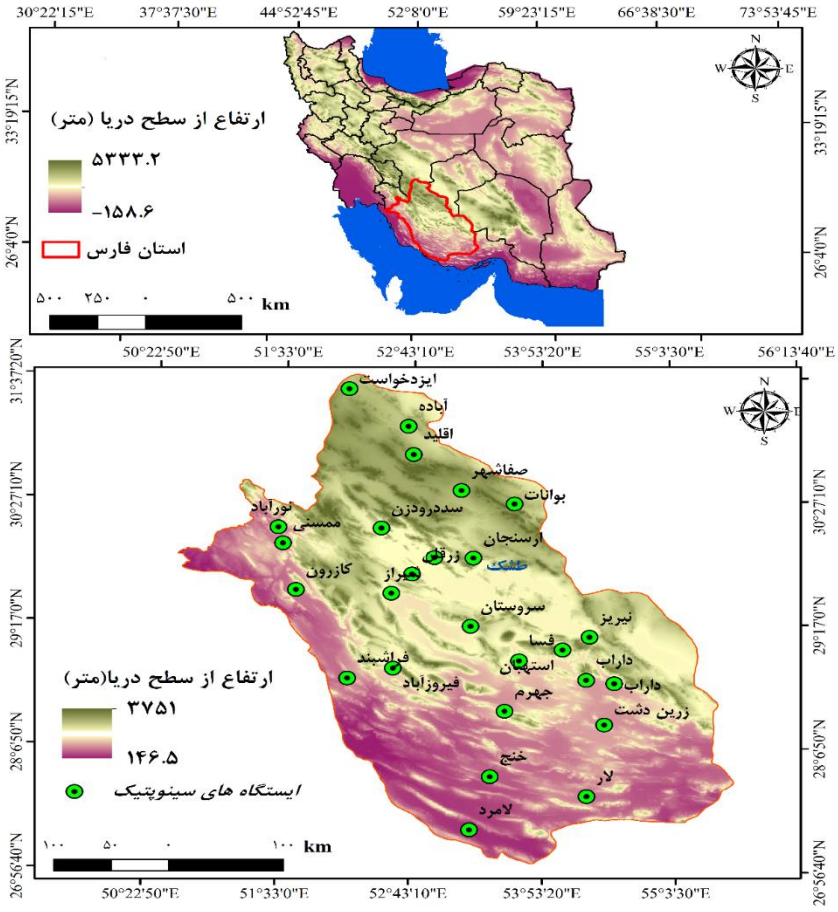
افزایشی است. نتایج تحلیل فراوانی رخدادهای گردوغبار در ایران مرکزی نیز نشان داد که در دوره بازگشت‌های ۵، ۲۵ و ۵۰ ساله، استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، اصفهان و جنوب استان سمنان، بیشترین فراوانی روزهای همراه با گردوغبار را در آینده خواهند داشت (Soleimani Sardoo et al, 2020). Khusfi و همکاران (۲۰۲۰)، تغییرات زمانی و مکانی رخدادهای گردوغبار مناطق نیمه خشک ایران و ارتباط آن با شرایط اتمسفری و پوشش گیاهی را برای بازه‌های زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ بررسی کردند. یافته‌های آنها، روند افزایشی وقایع گردوغبار را در هر دو دورهٔ مطالعاتی به اثبات رساند. همچنین در این بررسی بین تغییرات شاخص توفان گردوغبار با تغییرات سرعت بادهای سطحی در تابستان و بارندگی زمستانهٔ دورهٔ اول ارتباط معنی‌داری مشاهده شد؛ در حالی که در دورهٔ زمانی دوم، تغییرات سرعت بادهای سطحی در فصول بهار، تابستان و پاییز و تخریب پوشش گیاهی، به عنوان عامل اصلی افزایش رخدادهای گردوغبار شناخته شد. Khajeh و همکاران (۲۰۱۵)، روند تغییرات زمانی پدیدهٔ گردوغبار شهر بندرعباس را با استفاده از آزمون من ــ کندال برای بازه زمانی ۲۰۱۰-۱۹۸۵ بررسی کردند و دریافتند که روند تغییرات تعداد روزهای غبارآلود در ماه‌های ژانویه و سپتامبر، تابع الگویی منظم بوده و در دیگر ماه‌های سال، روندی نامنظم داشته‌است. Kang و همکاران (۲۰۱۶)، روند تغییرات بلندمدت پدیدهٔ گردوغبار فلات تبت را در بازه زمانی ۲۰۱۰-۱۹۶۱ بررسی کردند. روند کاهشی وقوع این پدیده در بازه زمانی مذکور، همراه با یک افزایش ناگهانی در سال ۱۹۹۰ با استفاده از روش من ــ کندال به اثبات رسید. همبستگی مثبت بین تعداد روزهای گردوغبار با سرعت بادهای سطحی و همبستگی منفی با شاخص پوشش گیاهی، حاکی از کاهش سرعت بادهای سطحی و افزایش پوشش گیاهی به عنوان عوامل مؤثر در کاهش روند تغییرات وقوع پدیدهٔ گردوغبار در این منطقه از جهان است.

اخیراً شاخصی به نام شاخص آلودگی توفان گردوغبار (PDSI)[1] به منظور پایش آلودگی ناشی از وقوع پدیدهٔ فرسایش بادی توسط Jebali و همکارانش (۲۰۲۱) ارائه شد که صورت توسعه‌یافتهٔ شاخص توفان گردوغبار (DSI) مطرح شده توسط اولانگ سای در سال ۲۰۱۴ است. آنها از هر دو شاخص DSI و PDSI برای پایش رخدادهای گردوغبار در استان یزد استفاده کردند و نشان دادند که PDSI، با غلظت ذرات گردوغبار با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر همبستگی قوی‌تری دارد. مزیت این شاخص نسبت به DSI این است که بر اساس فراوانی سه ساعتهٔ رخدادهای گردوغبار محلی و خارجی محاسبه می‌شود؛ این در حالی است که شاخص DSI بر اساس حداکثر کدهای پدیدهٔ گردوغبار و در مقیاس روزانه محاسبه می‌شود. نظر به اینکه تاکنون از این شاخص برای بررسی آلودگی ایجاد شده در اثر رخدادهای فرسایش بادی در سایر مناطق ایران استفاده نشده‌است، در پژوهش حاضر از این شاخص برای تحلیل زمانی و مکانی غبارآلودگی هوا در استان فارس ــــ که یکی از استان‌های با پتانسیل بالای گردوغبار است ــ استفاده شد. بر این اساس، هدف اصلی تحقیق حاضر عبارت است از تحلیل روند تغییرات غبارآلودگی ایجاد شده توسط پدیدهٔ فرسایش بادی در مقیاس‌های زمانی مختلف و بررسی نحوهٔ پراکنش مکانی ذرات گردوغبار در سطح استان فارس طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷ به منظور شناسایی بهتر مناطق در معرض خطر ناشی از آلودگی هوا.

[1] PDSI Pollution of Dust Storm Index

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

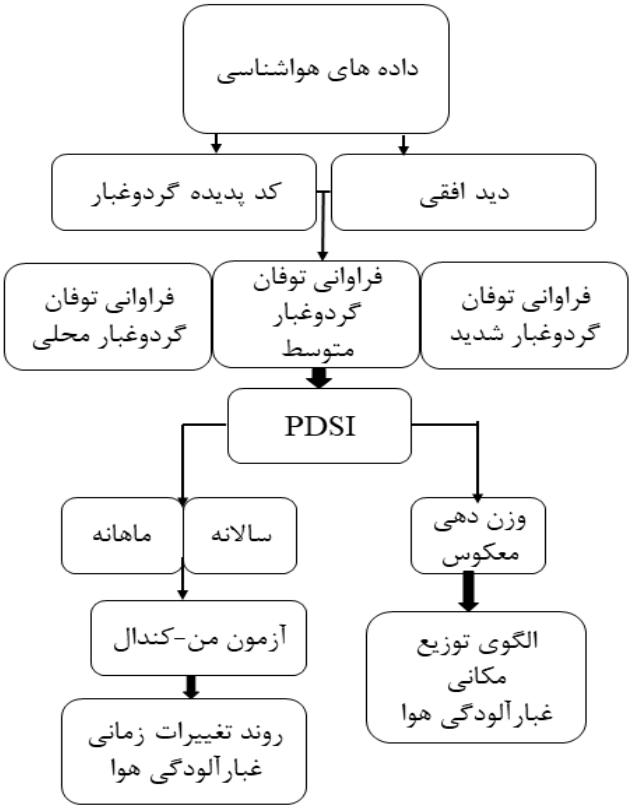
استان فارس با مساحت ۱۲۲۶۰۸ کیلومتر مربع در جنوب غرب ایران واقع شده‌است. بر اساس شاخص خشکی یونپ، نواحی شرقی این استان در اقلیم خشک و نواحی غربی آن در اقلیم نیمه خشک قرار دارد. ارتفاع متوسط استان از سطح دریا، ۱۳۵۰ متر است. بر اساس آمار طولانی‌مدت ایستگاه شیراز (۲۰۱۷-۱۹۵۱) ـــــ که در مرکز استان واقع شده است ـــــ متوسط دما، بارندگی و سرعت باد به ترتیب ۱۸/۱ درجهٔ سانتی‌گراد، ۳۲۹/۳ میلی‌متر و ۲/۲ متر بر ثانیه است. همچنین جهت وزش بادهای غالب، در مرکز استان از سمت شمال غرب به جنوب شرق است. موقعیت منطقهٔ مطالعاتی و پراکنش مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در آن، در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مطالعاتی در ایران و ایستگاه‌های سینوپتیک در استان فارس

۳ـ مواد و روش

مراحل کلی پژوهش حاضر، در شکل ۲ و توضیحات مربوط به آن در ادامه ارائه شده‌است.



شکل ۲: فلوچارت روش کار پژوهش حاضر

داده‌های تحقیق

به منظور اجرای پژوهش حاضر، داده‌های ساعتی مربوط به کد رخدادهای فرسایش بادی، سرعت باد و دید افقی مربوط به یازده ایستگاه سینوپتیک واقع در استان فارس برای بازه زمانی ۱۹ ساله (۱۳۹۷-۱۳۷۹)، از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. کدهای ثبت شده برای رخدادهای فرسایش‌بادی، کدهای ۶تا ۹، ۳۰تا ۳۵ و ۹۸ است که مشخصه‌های عمومی این کدها در جدول ۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱: کدهای تعریف شده توسط سازمان جهانی هواشناسی برای شناسایی وقایع فرسایش بادی (O'Loingsigh et al, 2014)

کد هواشناسی	نام علمی	توضیحات
۰۶	گرد و غبار معلق	گرد و غبار معلق در هوا که مسافت زیادی را پوشانده‌است.
۰۷	گرد و خاک	گرد و غبار یا ماسه‌ای که در محل ایستگاه بلند شده‌است.
۰۸	گردباد	گردبادهای تکامل‌یافته 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 داشته‌است.
۳۰	توفان گرد و غبار یا ماسهٔ ملایم	طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده‌است با دید افقی ۱۰۰۰-۲۰۰ متر
۳۱	توفان گرد وغبار یا ماسهٔ ملایم	طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده‌است با دید افقی ۱۰۰۰-۲۰۰ متر
۳۲	توفان گرد وغبار یا ماسهٔ ملایم	طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده‌است با دید افقی ۲۰۰- ۱۰۰۰ متر
۳۳	توفان گرد وغبار یا ماسهٔ شدید	طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده‌است با دید افقی کمتر از ۲۰۰متر
۳۴	توفان گرد وغبار یا ماسهٔ شدید	طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده‌است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۳۵	توفان گرد وغبار یا ماسهٔ شدید	طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده‌است با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر
۹۸	توفان گرد و غبار یا ماسهٔ خیلی شدید یا تندر	توفان‌هایی که در محل ایستگاه یا اطراف آن بلند شده‌اند با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر

محاسبهٔ شاخص آلودگی توفان گردوغبار (PDSI)

در این مطالعه با بهره‌گیری از شاخص PDSI، میزان غبارآلودگی ناشی از رخدادهای فرسایش بادی محاسبه شد. بدین منظور، ابتدا داده‌های ساعتی مربوط به یازده ایستگاه سینوپتیک واقع در منطقهٔ مطالعاتی برای بازه زمانی ۱۹ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۷) از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. سپس فراوانی رخدادهای محلی بر اساس کدهای ۷ و ۸ و فراوانی رخدادهای شدید، بر مبنای فراوانی کدهای ۳۳ تا ۳۵ محاسبه شد. همچنین با درنظرگرفتن فراوانی کدهای ۹، ۹۸ ، ۳۰ تا ۳۲ و ۶، فراونی توفان‌های متوسط نیز محاسبه شد. در نهایت با استفاده از رابطهٔ ۱، میزان غبارآلودگی ناشی از وقایع فرسایش بادی در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه برای هر ایستگاه به طور جداگانه محاسبه شد (Jebali et al, 2021).

رابطهٔ ۱

$$PDSI = \sum_{i=1}^{n} (5 \times SDS) + MDS + (0.05 \times LDS)$$

در رابطه‌ی ذکر شده، PDSI بیانگر شاخص آلودگی توفان گردوغبار، SDS توفان شدید گردوغبار، MDS توفان گردوغبار متوسط و LDS توفان گردوغبار محلی است که این عوامل بر اساس فراوانی کدهای ذکر شده در بالا و با در نظر گرفتن میدان‌های دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر برای رخدادهای شدید، تا ۱۰ کیلومتر برای رخدادهای محلی محاسبه می‌شود.

تحلیل روند تغییرات زمانی غبارآلودگی هوای استان فارس

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای بررسی روند تغییرات زمانی، آزمون من ـ کندال است (Mann 1994). از مزایای مهم این روش، می‌توان به عدم پیروی آن از یک توزیع آماری خاص و فقدان تأثیرپذیری از رخدادهای حدّی اقلیمی اشاره کرد؛ به همین دلایل، در بسیاری از مطالعات گذشته برای بررسی روند تغییرات متغیرهای هواشناسی از این آماره استفاده شد (Mallick et al, 2021 & Araghinejad et al, 2019 & Yarmoradi et al, 2020). فرض صفر و یک این آزمون، به ترتیب بر عدم وجود روند و وجود آن در سری زمانی مورد بررسی دلالت دارد. با در نظر گرفتن یک سری زمانی به‌صورت $x_1, x_n, \ldots, x$، آمارهٔ آزمون من ـــ کندال (Z) با استفاده از روابط ۲ تا ۵ محاسبه می‌شود (Mann 1994):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j + x_k)$$ رابطهٔ ۲

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$ رابطهٔ ۳

درصورتی‌که اختلاف S با صفر معنی‌دار نباشد، بر فقدان روند در سری زمانی مطالعاتی دلالت دارد؛ این در حالی است که معنی‌دار بودن این اختلاف بیانگر وجود روند افزایشی یا کاهشی متغیر مورد بررسی در دورهٔ آماری مورد مطالعه است. برای آزمون معنی‌دار بودن روند، از متغیر Z نرمال استاندارد طبق رابطه‌ی ۳ استفاده می‌شود. فرض صفر (H_0) در آزمون من ـ کندال، عدم وجود روند و فرض H_1، وجود روند است.

رابطهٔ ۴

$$\begin{cases} Z = \dfrac{S-1}{(\operatorname{var}(S))^{\frac{1}{2}}} & if \quad S > 0 \\ 0 & if \quad S = 0 \\ \dfrac{S+1}{(\operatorname{var}(S))^{\frac{1}{2}}} & if \quad S < 0 \end{cases}$$

$$Var(S) = \{n(n-1)(2n+5)\}$$ رابطهٔ ۵

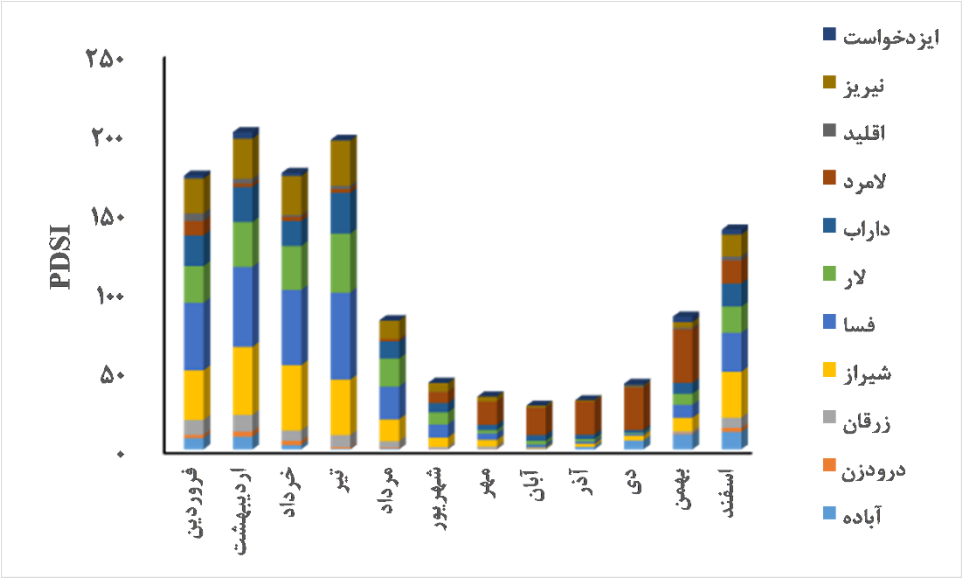
توزیع مکانی غبارآلودگی هوا در استان فارس

در این مرحله از تحقیق حاضر به منظور درک بهتر از الگوی پراکنش مکانی وقایع گردوغبار در استان فارس، به ترسیم نقشه‌های سالانهٔ غبارآلودگی هوا بر اساس شاخص PDSI پرداخته شد. بدین منظور، از روش درون‌یابی فاصلهٔ معکوس (IDW)[1] ـــــ که با موفقیت در بسیاری از مطالعات مربوط به توفان‌های گردوغبار و فرسایش بادی به‌کار گرفته شده‌است (Ansari et al, 2020) ـــــ استفاده شد. ذکر این امر لازم است که این نقشه‌ها برای دورهٔ زمانی مشترک بین ایستگاه‌های مطالعاتی تهیه شده‌است. نتایج حاصل از این مرحله می‌تواند درک ما را از مناطق مستعد تولید گردوغبار و شناسایی بهتر مناطق پرخطر از نظر تولید گردوغبار افزایش دهد.

۴ـ نتایج

روند تغییرات ماهانه، فصلی و سالانهٔ غبارآلودگی هوا در استان فارس

مقادیر متوسط مربوط به تغییرات ماهانه و فصلی شاخص PDSI در دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌است.



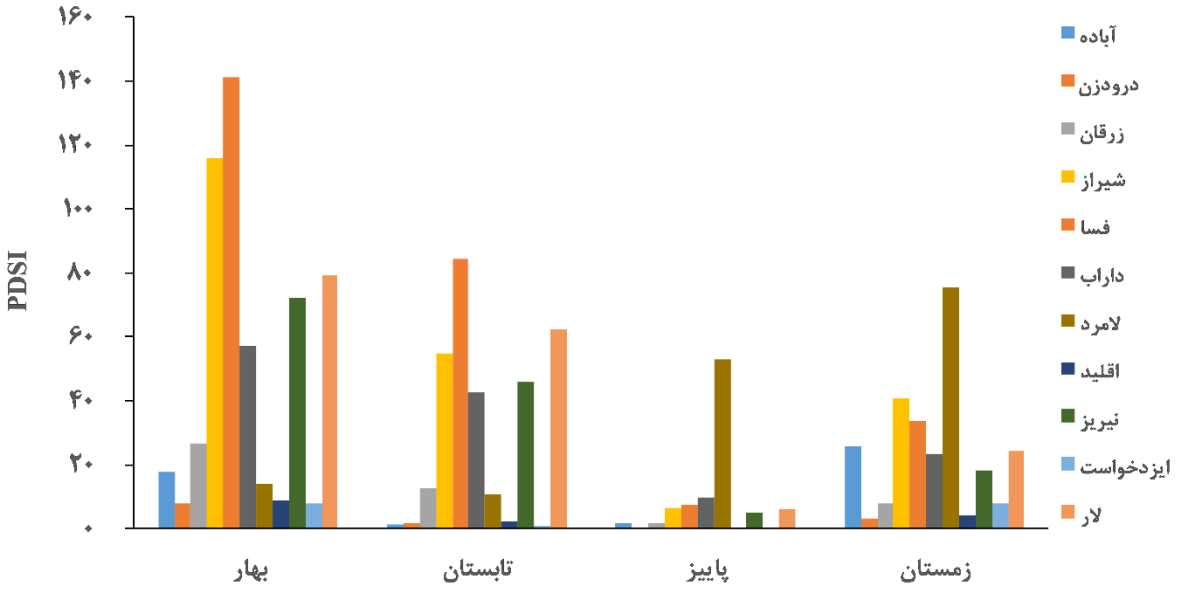
شکل۳: مقادیر متوسط ماهانهٔ PDSI در ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس طی بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷

نتایج ارائه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار غبارآلودگی هوا در بازه زمانی مورد بررسی در ایستگاه‌های فسا، شیراز و لار و به ترتیب در ماه‌های تیر (PDSI=۵۵)، اردیبهشت (PDSI=۴۲/۹) و تیر (PDSI=۳۷/۳) بوده‌است. در مقابل، حداقل مقدار آلودگی ناشی از رخدادهای فرسایش بادی با ارزش PDSI=۰ ، در ماه‌های آبان و آذر و برای ایستگاه ایزدخواست تخمین زده شد. برای سایر ایستگاه‌های مطالعاتی، دامنه‌ی تغییرات شاخص غبارآلودگی هوا بین مقادیر ذکر شده در ماه‌های مختلف نوسان داشته‌است؛ به طوری که بیشترین تغییرات ماهانه‌ی این شاخص در ایستگاه فسا و کمترین آن، در ایستگاه‌های ایزدخواست و درودزن مشاهده می‌شود (شکل ۳). اختلاف

[1] IDW Inverse Distance-Weighted

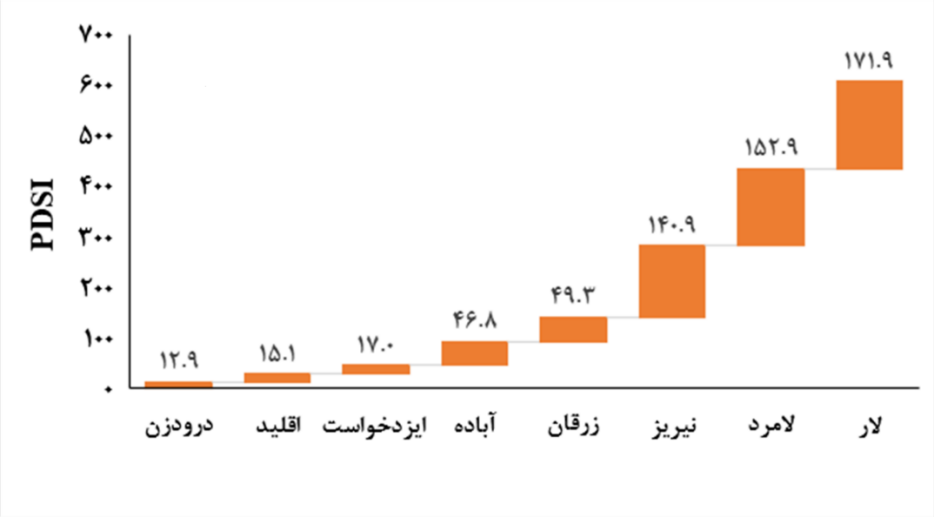
مقادیر شاخص غبارآلودگی هوا که بیانگر تغییر در شدت فعالیت توفان‌های گردوغبار است، می‌تواند به دلیل اختلاف در شرایط اقلیمی و زمینی مناطق مختلف در مقیاس‌های زمانی مختلف باشد (Khusfi et al, 2020).

تغییر مقادیر متوسط فصلی شاخص PDSI (شکل ۴) نشان می‌دهد که در اغلب ایستگاه‌های مورد بررسی، حداکثر مقدار غبارآلودگی هوا در فصل بهار و حداقل آن، در فصل پاییز رخ داده‌است. همانند تغییرات ماهانه، حداکثر مقدار تغییرات فصلی غبارآلودگی ناشی از فعالیت توفان‌های گردوغبار در ایستگاه‌های فسا، شیراز و لار و حداقل تغییرات فصلی آن، در ایستگاه‌های درودزن و ایزدخواست برآورد شده‌است. دامنهٔ تغییرات PDSI در ایستگاه فسا بین ۷/۶ تا ۱۴۱، در ایستگاه شیراز بین ۶/۵ تا ۱۱۵ و در ایستگاه لامرد بین ۵/۹ تا ۷۹/۳ متغیر بوده‌است. دامنهٔ تغییرات ۸/۱-۰/۰۲ و ۷/۸ – ۰/۳ نیز به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های ایزدخواست و درودزن است.



شکل۴: مقادیر متوسط فصلی PDSI در ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس طی بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷

میانگین طولانی مدت PDSI برای ایستگاه‌های آباده، اقلید، ایزدخواست، داراب، درودزن، زرقان، شیراز، فسا، لار، لامرد و نیریز به ترتیب به میزان ۴۶/۸، ۱۵/۱، ۱۷، ۱۳۳/۲، ۱۲/۹، ۴۹/۳، ۲۱۷/۵، ۲۶۶/۶، ۱۷۱/۹ و ۱۴۰/۹ برآورد شد (شکل ۵).



شکل ۵: مقادیر متوسط طولانی‌مدت PDSI در ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس طی بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷

همان گونه که در جدول ۲ نشان داده شد، ایستگاه‌های زرقان و داراب بیشترین تجربهٔ غبارآلودگی هوا را در مقیاس سالانه در مقایسه با مقدار متوسط طولانی مدت‌شان داشته‌اند. مقدار متوسط طولانی‌مدت PDSI برای این دو ایستگاه به ترتیب ۴۹/۳ و ۱۳۳/۲ محاسبه شده که در مقایسه با این مقادیر، ایستگاه‌های مذکور در ۱۰ سال از ۱۹ سال مطالعاتی، مقادیر غبارآلودگی بالاتر از متوسط طولانی‌مدت را تجربه کرده‌اند. این در حالی است که در ایستگاه‌هایی مانند اقلید و ایزدخواست، مقدار غبارآلودگی هوا در ۶ تا ۷ سال از سال‌های مطالعاتی بیش از مقدار متوسط طولانی مدت غبارآلودگی در این شهرستان‌ها بوده‌است. همچنین نتایج ارائه شده در این جدول حاکی از آن است که بیشترین مقدار آلودگی سالانهٔ هوا در اثر پدیده‌ی فرسایش بادی، برای ایستگاه‌های مختلف متفاوت بوده‌است؛ به عنوان مثال، حداکثر غبارآلودگی هوا در شهرستان آباده در سال ۱۳۹۰ به میزان ۱۴۲/۵ بوده، این در حالی است که درودزن، شیراز، فسا و لار حداکثر غبارآلودگی هوا را در سال ۱۳۸۷ تجربه کرده‌اند. برای این شهرستان‌ها، مقدار PDSI به ترتیب ۶۴، ۴۳۶/۲، ۵۸۲/۹ و ۳۹۴/۱ برآورد شده‌است. ایستگاه لامرد در سال ۱۳۹۷ و ایستگاه اقلید در سال ۱۳۹۴ نیز غبارآلودترین شرایط را داشته‌اند.

جدول۲: مقادیر سالانهٔ **PDSI** در ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس در بازه زمانی ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷

	ایزدخواست	نیریز	اقلید	لامرد	داراب	لار	فسا	شیراز	زرقان	درودزن	آباده
۱۳۷۹	۲/۴۵	۹/۱	۱/۳	۶۵/۳	۱۴۳/۹	۳۱۰/۷	۰/۳	۱۲۶/۷	۱۰/۱	۱	۰/۴۵
۱۳۸۰	۵/۴۵	۰./۱	۰/۱۵	۱۲۲/۷	۱۹۸/۴	۲۵۳/۳	۵۶/۵	۲۱	۳	۰	۱۴/۸
۱۳۸۱	۱/۳۵	۱۵/۲	۰	۱۵/۳	۲۳۳/۶	۸۳/۵	۳۰/۲	۷۵/۹	۱۴/۲	۰	۸/۷
۱۳۸۲	۶/۱	۱۷۸	۱	۵۸/۱	۱۸۲/۷	۲۳۵/۷	۲۰۵/۸	۲۸۴	۴	۱	۱/۴
۱۳۸۳	۱/۴	۸۸/۹	۰/۰۵	۱۲۱/۴	۳۳/۵	۲۶۴/۵	۶۳/۷	۱۰۷/۹	۱/۰۵	۰	۲۲/۴
۱۳۸۴	۲/۲	۱۵۸/۲	۲/۱	۱۳۷/۶	۱۰۱/۳	۱۶۳/۱	۱۹۵/۵	۱۷۷	۳۰/۴	۰	۱۰/۶
۱۳۸۵	۷/۱	۹۶/۲	۰	۱۳۰/۷	۱۵۶/۳	۲۲۹/۵	۱۰۳/۲	۹۱/۴	۲۲/۱	۰	۱۴/۴
۱۳۸۶	۰/۴	۴۱۹/۵	۰	۲۴۳/۸	۲۳۸/۴	۲۳۵/۵	۵۳۶/۴	۲۸۱/۸	۵۳/۱	۷	۱۴۰/۳
۱۳۸۷	۸۰/۲	۳۳۱/۵	۵۳/۳	۱۸۸/۴	۱۸۲/۴	۳۹۴/۱	۵۸۲/۹	۴۳۶/۲	۱۴۲/۷	۶۴	۱۳۱/۸
۱۳۸۸	۴۴/۸	۲۴۴	۹	۲۴۶/۶	۲۲۴/۸	۲۸۸/۴	۵۸۰	۴۱۳/۸	۱۶۲/۲	۲۹	۵۶/۲
۱۳۸۹	۲۹/۵	۱۶۶/۴	۱۷	۲۱۱/۹	۱۸۲/۴	۱۲۲/۳	۴۷۶	۲۶۵/۶	۵۱/۳	۱۸	۴۷/۷
۱۳۹۰	۲۲/۷	۲۰۵/۸	۲	۱۰۶/۹	۹۲/۷	۱۳۷/۷	۴۰۲/۴	۲۸۸/۹	۳۷/۳	۳۴	۱۴۲/۵
۱۳۹۱	۴۴	۲۱۹/۴	۴۲/۲	۱۷۹/۱	۱۸۲/۶	۲۰۰/۳	۳۸۵/۴	۳۶۲/۳	۹۸/۲	۴۳	۶۰/۶
۱۳۹۲	۴/۰۵	۱۰۱/۵	۱۸	۱۴۷/۶	۴۸/۳	۷۰/۲	۲۷۹/۴	۲۴۹/۷	۵۲/۴	۱۲	۲۷/۸
۱۳۹۳	۵/۴	۵۶/۶	۳	۱۲۴/۲	۲۳/۵	۱۴/۵	۵۲/۱	۶۰/۹	۲/۶	۱	۹۹/۵
۱۳۹۴	۳۱/۱	۱۳۰	۹۲	۱۴۸/۴	۱۲۱/۳	۱۳۲/۴	۳۶۷/۴	۳۲۴/۱	۶-۸۵	۹	۲۷/۸
۱۳۹۵	۱۸/۴	۵۹/۴	۷	۸۹/۷	۳۱/۲	۴۳	۲۶۱/۲	۱۵۹/۵	۵۱/۸	۳	۳۰/۲
۱۳۹۶	۱۶	۸۸/۴	۲۷	۲۵۱/۹	۷۳	۲۲/۳	۲۴۷	۱۹۶/۲	۶۴/۲	۱۶	۴۴/۲
۱۳۹۷	۰	۱۰۸/۳	۱۲	۲۹۸	۷۹/۴	۸۲/۱	۲۴۰/۱	۲۰۹/۹	۵۰/۲	۸	۸/۲

* در این جدول، مقادیر PDSI کوچک‌تر و بزرگ‌تر از متوسط طولانی‌مدت این شاخص به ترتیب با رنگ فیروزه‌ای و صورتی مشخص شده‌اند.

اگرچه بررسی مقادیر شاخص PDSI در بازه‌های زمانی مختلف می‌تواند زمینه‌ی ایجاد یک نگرش کلی را در مورد رفتار زمانی پدیدهٔ فرسایش بادی در ماه‌ها، فصل‌ها و سال‌های مختلف فراهم کند، درک روند تغییرات زمانی این وقایع نیازمند تحلیل‌های آماری قوی‌تری است که در مطالعهٔ حاضر با استفاده از روش من ـ کندال بررسی شد. نتایج به‌دست آمده بر اساس آزمون من ـــ کندال، برای مقیاس‌های ماهانه در جدول ۳ و برای مقیاس‌های فصلی و سالانه به ترتیب در جدول ۴ و شکل ۶ نشان داده شده‌است.

جدول ۳: مقادیر آمارۀ من ـ کندال مربوط به تغییرات ماهانه PDSI در شهرستان‌های استان فارس

ایستگاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
آباده	۰/۶۷	۱/۴۱	-۰/۲۹	۱/۹۹	۱/۹۹	۱	۰/۵۹	۰/۷۳	۱/۱۴	۱/۲۸	۲/۰۱	۰/۷۴
درودزن	۲/۱۶	۱/۴۱	۱/۴۹	۱	۱/۰۹	-۰/۱۱	۰/۷۲	-۰/۰۹	۰	۰/۶۴	۰/۵۰	۱/۳۷
زرقان	۲/۲۴	۲/۳۰	۱/۲۶	۰/۲۲	-۰/۰۴	۱/۲۰	۰/۷۸	۰/۴۵	۱/۱۱	۱/۶۸	۲/۴۸	۱/۵۳
شیراز	۲/۱۰	۰/۲۸	۰/۲۸	-۰/۹۵	-۱/۰۹	-۰/۴۲	۰/۵۰	-۱/۴۲	۱/۴۱	۰/۲۰	۱/۹۶	۱/۵۸
فسا	۲/۴۵	۱/۳۷	۰/۰۷	۰/۷۷	۰/۷۷	۱/۷	۲/۰۹	۰/۴۳	۱/۰۹	۲/۸۲	۲/۸۸	۲
لار	-۰/۶۷	-۲/۶۶	-۲/۹	-۲/۸۰	-۲/۶۷	-۳/۸۲	-۳/۳۵	-۰/۶۳	-۱/۲۲	-۱/۰۷	-۰/۱۴	۰/۱۸
داراب	۰/۰۷	-۰/۴۲	-۱/۱۶	-۲/۸۴	-۳/۵	-۲/۵	-۱/۹۳	-۲/۱۲	۰/۱۷	-۱/۰۳	-۰/۶۷	-۰/۷۴
لامرد	۱/۹۸	۲/۵۰	-۰/۲۵	۲/۰۵	۰	۰/۶۴	۱/۸۹	۱/۱۲	-۰/۷۰	۰/۲۵	۱/۴۴	۱/۳۷
اقلید	۲/۰۴	۱/۱۰	-۰/۳۳	۱/۰۵	۰	۱	-۱/۳۷	۱/۸۶	-۰/۰۹	۱/۸۶	۰/۵۵	۱/۶۸
نیریز	۱/۸	۰/۶۷	۰	-۰/۷۴	-۰/۳۹	۰/۶۱	۱/۳۹	-۱/۰۶	-۰/۲۵	-۰/۰۹	۰/۴۳	۱/۳۰
ایزدخواست	-۰/۳۶	۰/۳۴	-۱/۲۷	۰/۶۸	۰	-۰/۷۲	۰	۰/۷۳	۰	۱/۸۴	۱/۳۵	۰/۸۹

نتایج به دست آمده از تحلیل آزمون من ـــــ کندال برای تغییرات ماهانۀ غبارآلودگی هوا در ایستگاه‌های مطالعاتی استان فارس نشان داد که در فروردین ماه، روند معنی‌دار و افزایشی غبارآلودگی هوا در ایستگاه‌های درودزن، زرقان، شیراز، فسا، لامرد، اقلید و نیریز رخ داده‌است و در اردیبهشت ماه، در ایستگاه‌های لامرد و زرقان (Z>+1.96). روند تغییرات معنی‌دار و منفی PDSI در ایستگاه لار، علاوه بر این ماه در ماه‌های خرداد تا مهر نیز مشاهده شده‌است (Z<-1.96). در تیرماه، ایستگاه داراب نیز این چنین تغییراتی را در دوره آماری مورد مطالعه تجربه کرده‌است؛ این در حالی است که در ایستگاه‌های آباده و لامرد، میزان غبارآلودگی هوا روندی مثبت و معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ داشته‌است. شهرستان‌های آباده و داراب نیز تغییرات افزایشی را در مرداد ماه به ترتیب در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ نشان داده‌اند. روند معنی‌دار افزایشی در شهریور ماه، برای ایستگاه فسا و روند کاهشی آن برای ایستگاه‌های داراب و لار مشاهده شد. یافته‌های این پژوهش همچنین نشان داد که در اولین ماه فصل پاییز، شهرستان‌های فسا و لامرد با تغییرات صعودی معنی‌دار و لار و داراب، با تغییرات نزولی و معنی‌دار آلودگی ناشی از وقایع گردوغبار مواجه بوده‌اند. داراب و اقلید نیز در دومین ماه پاییز، به ترتیب با تغییرات کاهشی و افزایشی آلودگی هوا مواجه بوده‌اند. در ماه آذر، روند تغییرات PDSI در همۀ ایستگاه‌های مطالعاتی غیرمعنی‌دار بود. اگرچه در ماه‌های فصل زمستان، تغییرات کاهشی غیرمعنی‌داری در برخی از ایستگاه‌ها از جمله لار و داراب مشاهده شد، در ایستگاه‌های فسا، شیراز، زرقان و آباده روند تغییرات افزایشی وقایع گردوغبار در این ماه‌ها مشاهده شد.

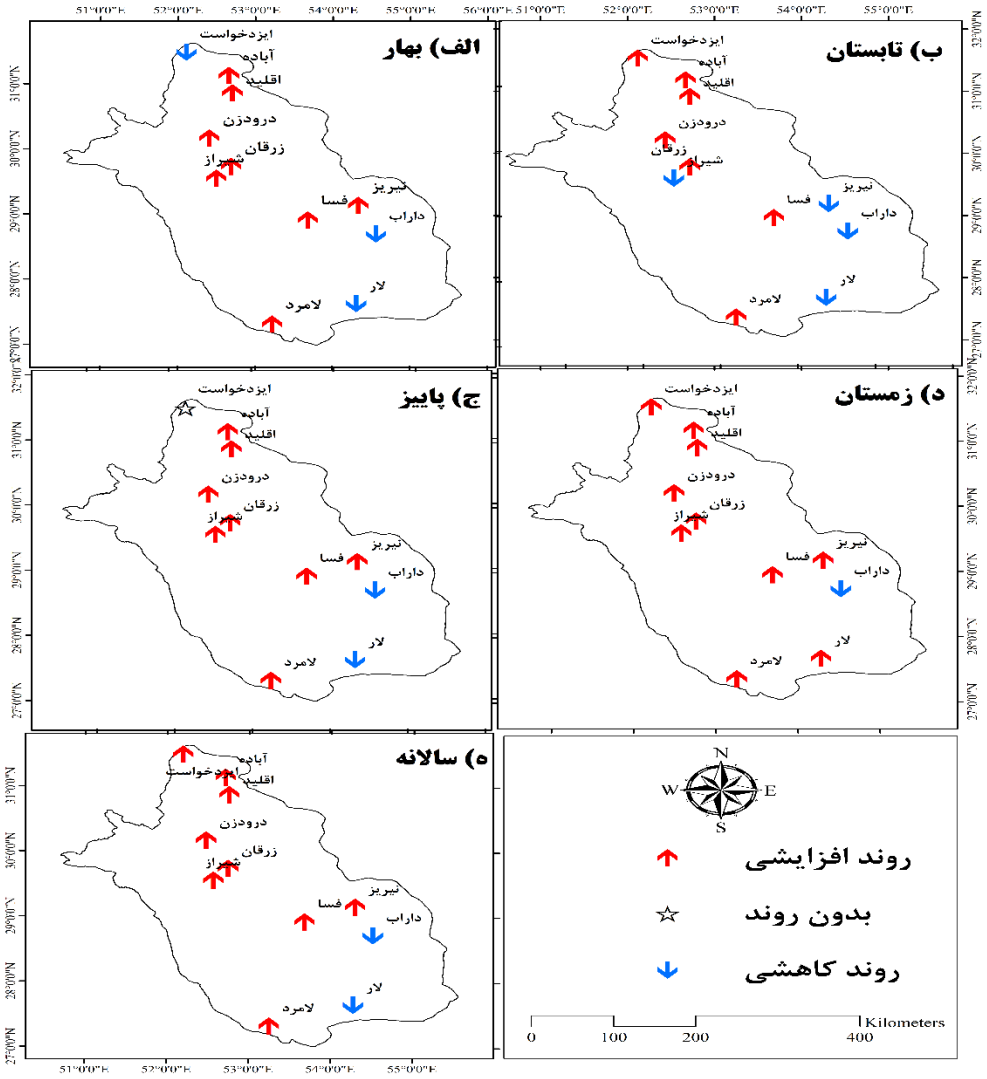
جدول ۴: مقادیر آمارهٔ من کندال مربوط به تغییرات فصلی و سالانهٔ PDSI در شهرستان‌های استان فارس

ایستگاه	بهار		تابستان		پاییز		زمستان		سالانه	
	امارهٔ من کندال	سطح معنی داری	امارهٔ من کندال	سطح معنی داری	امارهٔ من کندال	سطح معنی داری	امارهٔ من کندال	سطح معنی داری	امارهٔ من کندال	سطح معنی- داری
آباده	۰/۸۴		۲/۴۵	*	۱/۳۸		۱/۳۷		۱/۵۸	
اقلید	۲/۲۶	*	۱/۰۵		۰/۶۹		۱/۹۷	*	۲/۶۳	**
ایزدخواست	-۰/۲۱		۰/۲۲		۰		۱/۶۱		۰/۸۴	
داراب	-۰/۱۴		-۲/۹۴	**	-۰/۳۹		-۰/۹۱		-۲/۱۰	*
درودزن	۱/۷۶	+	۱/۱۸		۰/۶۰		۱/۷۶	+	۱/۸۸	+
زرقان	۲/۵	*	۰/۳۲		۰/۶۴		۱/۹۶	+	۲/۰۳	*
شیراز	۰/۹۱		-۰/۹۸		۱/۳۷		۲/۱۷	*	۱/۰۵	
فسا	۱/۴۰		۰/۸۴		۲/۰۳	*	۲/۷۷	**	۱/۱۲	
لار	-۲/۳۱	*	-۳/۷	***	-۱/۸۴	+	۰/۳۵		-۲/۸۷	**
لامرد	۲/۳۸	*	۱/۸	+	۱/۰۵		۱/۴۰		۲/۲۴	*
نیریز	۰/۹۱		-۰/۴۲		۱/۳۰		۱/۳۷		۰/۴۹	

در این جدول، * و ** به ترتیب بیانگر معنی‌دار بودن آمارهٔ من-کندال در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد است.

در مقیاس فصلی، ایستگاه‌های اقلید، درودزن، زرقان و لامرد در فصل بهار، ایستگاه‌های آباده و لامرد در فصل تابستان، ایستگاه فسا در فصل پاییز و ایستگاه‌های اقلید، شیراز و فسا در فصل زمستان با تغییرات افزایشی معنی‌دار (Z>+۱/۹۶) در آلودگی ایجاد شده از رخدادهای فرسایش بادی مواجه بوده‌اند؛ این در حالی است که تغییرات کاهشی معنی‌دار (Z<-۱/۹۶) در ایستگاه لار در فصول بهار و پاییز و در ایستگاه‌های لار و داراب در فصل تابستان رخ داده‌است (جدول۴ و شکل ۶).

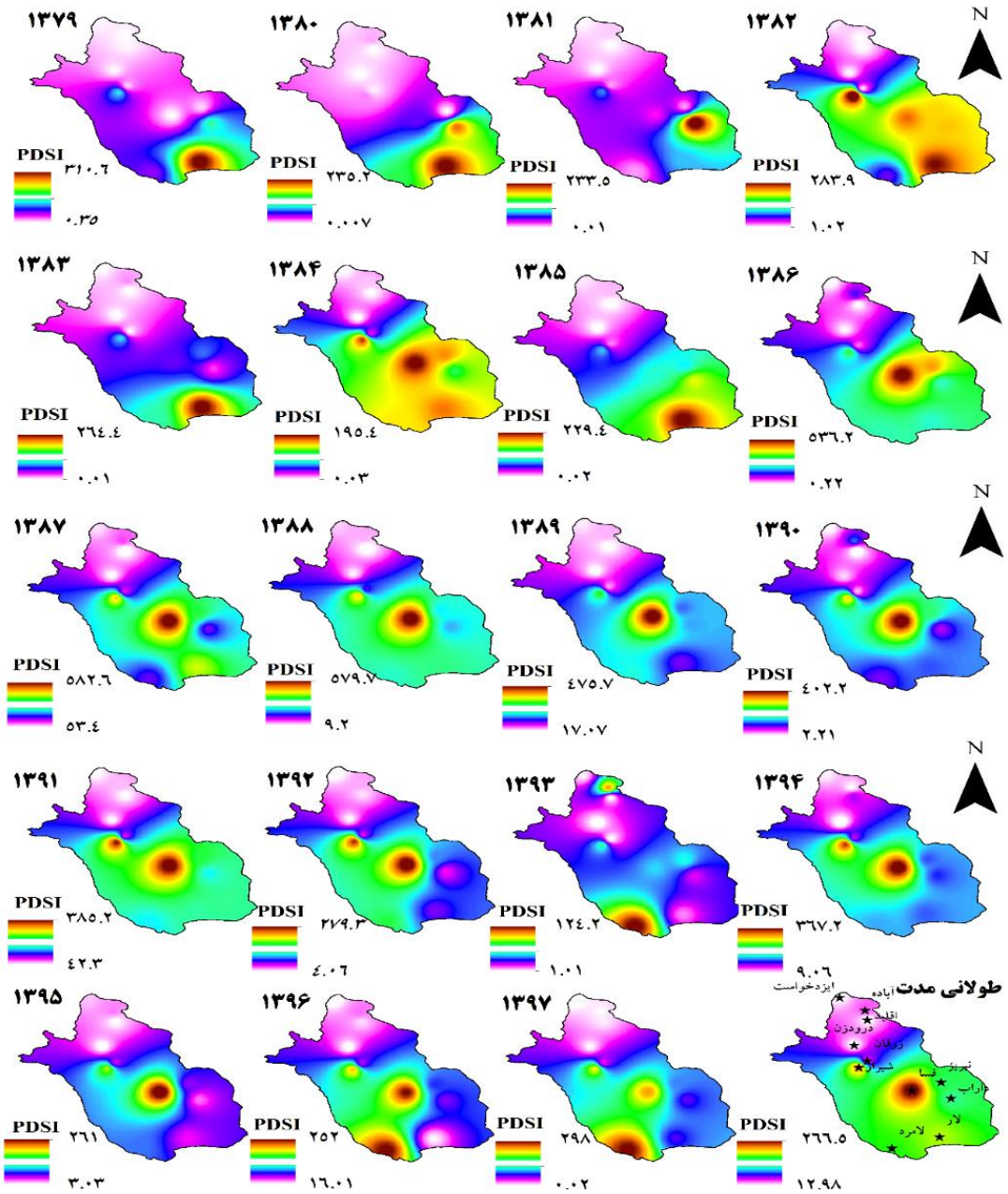
به طور کلی در مقیاس سالانه، تغییرات افزایشی PDSI در ایستگاه‌های اقلید، زرقان و لامرد و تغییرات کاهشی آن در ایستگاه‌های لار و داراب معنی‌دار بوده‌است. مقادیر آمارهٔ من ـــ کندال برای ایستگاه‌های مذکور به ترتیب، ۲/۶۳+، ۲/۰۳+ و ۱/۸۸+ ، ۲/۱۰- و ۲/۸۷- برآورد شد.



شکل ۶: روند تغییرات فصلی و سالانهٔ غبارآلودگی هوا در ایستگاه‌های سینوپتیک استان فارس طی بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۳۷۹

تحلیل تغییرات مکانی غبارآلودگی هوای استان فارس در اثر پدیدهٔ فرسایش بادی

در این مطالعه علاوه بر تحلیل تغییرات زمانی غبارآلودگی هوای ناشی از توفان‌های گردوغبار، تغییرات مکانی PDSI نیز برای سال‌های آماری مختلف در سطح استان فارس بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۷: الگوی پراکنش مکانی غبارآلودگی ناشی از پدیدهٔ فرسایش بادی در استان فارس (۲۰۱۸-۲۰۰۰)

بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل، بیشترین شدت غبارآلودگی هوا در سال‌های ابتدایی بازه زمانی مورد بررسی (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۱)، عمدتاً در نواحی جنوب شرقی استان فارس و در محدودهٔ شهرستان‌های لار، لامرد و داراب رخ داده‌است. پس از آن، وسعت مناطق تحت‌تأثیر پدیدهٔ فرسایش بادی افزایش یافته و به سمت نواحی مرکزی استان، گسترش داشته‌است. این نوع پراکنش مکانی در سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ و سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ به وضوح دیده می‌شود. در سال‌های پایانی (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) نیز میزان آلودگی هوا از نواحی مرکزی به سمت نواحی جنوب غربی افزایش یافته‌است. در مقیاس طولانی‌مدت، نیمهٔ جنوبی استان فارس با وقایع گردوغبار بیشتری مواجه بوده و ساکنان این مناطق در مقایسه با ساکنان نیمهٔ شمالی استان، بیشتر در معرض خطر آلودگی ناشی از این پدیده بوده‌اند.

۵ ـ بحث و نتیجه‌گیری

روند رو به رشد انتشار ذرات گردوغبار ناشی از پدیدهٔ فرسایش بادی در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های عمده‌ای را در سطوح مختلف منطقه‌ای، ملی و جهانی ایجاد کرده‌است (Sarkar et al, 2019 & Rashki et al, 2021). بنابراین، درک روند تغییرات زمانی و مکانی آلودگی‌های ایجاد شـــده از این رخدادها ـ به منظور کاهش پیامدهای ـ نامطلوب آنها در مناطق مختلف ضـروری اسـت. در این پژوهش، نتایج حاصـل از تحلیل روند تغییرات ماهانهٔ شـاخص غبارآلودگی هوا (PDSI) نشان داد که بیشترین تغییرات افزایشی و معنی‌دار این غبارآلودگی در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و بهمن و در ایسـتگاه‌های فسـا، شـیراز، درودزن و زرقان رخ داده؛ این در حالی اسـت که روند تغییرات کاهشـی و معنی‌دار PDSI، عمدتاً در ایستگاه‌های لار و داراب و در ماه‌های اردیبهشت تا مهر رخ داده‌است. نتایج حاصل از روند تغییرات فصلی نشان داد که صرف‌نظر از سطح اطمینان مورد بررسی، بیش از ۷۰٪ ایستگاه‌های مطالعاتی، روند افزایشی را در فصـول بهار، تابسـتان و پاییز تجربه کرده‌اند. در زمسـتان نیز تمام ایسـتگاه‌ها به اسـتثنای ایسـتگاه داراب، با تغییرات افزایشـی در غبارآلودگی هوا مواجه بوده‌اند. یکی از علل افزایش تعداد روزهای غبارآلود در فصـول بهار و تابسـتان، استقرار سامانه‌های مختلف جوی در جنوب استان فارس است (Omidi and Omidvar, 2020). در مقیاس سالانه، روند تغییرات کاهشی فقط در ایستگاه‌های داراب و لار مشاهده شد؛ در حالی که روند تغییرات در سایر مناطق استان فارس نیز افزایشی بود. نظر به اینکه PDSI بر اساس فراوانی رخدادهای محلی تا شدید محاسبه می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که فراوانی وقوع رخداد فرسـایش بادی و آلودگی ایجاد شـده به دنبال آن، در اغلب شـهرسـتان‌های اسـتان فارس سـیر صـعودی داشـته؛ به عبارت دیگر، این یافته‌ها بیانگر تشـدید رخدادهای گردوغبار و آلودگی ایجاد شـده از آن در این اسـتان اسـت. Vali و Roustaei (۲۰۱۸)، روند تغییرات سالانهٔ شاخص DSI را در بسیاری از ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در ایران مرکزی، روندی صعودی دانسته‌اند. با توجه به اینکه بخشی از استان فارس و به ویژه مناطق شرقی آن در محدودهٔ مطالعاتی این پژوهشگران واقع شده‌است، می‌توان گفت که این یافته‌ها، نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. اخیراً Ebrahimi-Khusfi و همکاران (۲۰۲۰) نیز به روند رو به رشـــد وقوع رخدادهای گردوغبار در فصـــول مختلف اشاره کرده‌اند که دلیل دیگری بر صحت یافته‌های پژوهش حاضر است.

الگوی پراکنش مکانی ذرات گردوغبار در اسـتان فارس نشـان داد که در سـال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴، بیش از دو سـوم استان فارس و عمدتاً نواحی مرکزی تا جنوب شرقی با غلظت‌های بالای گردوغبار مواجه بوده‌اند. در سال‌های پایانی و به ویژه سـال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷، نحوهٔ توزیع ذرات گردوغبار تغییر کرد؛ به طوری که در سـال‌های اخیر عمدتاً سـاکنان نواحی مرکزی تا جنوب غربی ـــ که یک سوم سطح استان را شامل می‌شود ـــ از افزایش غلظت ذرات گردوغبار رنج برده‌اند. این یافته‌ها، حساس‌تر شدن مناطق جنوب غربی استان فارس را نسبت به فرسایش بادی در سال‌های اخیر نشان می‌دهد. همچنین یافته‌های ما نشـان داد که در طولانی‌مدت، نیمه‌ی‌جنوبی اسـتان فارس در مقایسـه با نیمه‌ی شـمالی آن حساسیت بیشتری نسبت به وقایع گردوغبار داشته و در نتیجه، نقش عمده‌ای در تولید گردوغبار استان ایفا کرده‌است. یکی از علل آن، خشک شدن بخشی از بستر تالاب‌های بختگان ـــ طشک، مهارلو و پریشان است که در نیمه‌ی جنوبی اسـتان واقع شـده‌اند و در سـال‌های اخیر به عنوان منابع مولد گردوغبار در این اسـتان عمل کرده‌اند (Karimzadeh et al, 2019 & Kazemi et al, 2019 & Karami et al, 2021). یافته‌های این مرحله از تحقیق حاضـــر با یافته‌های

Shokoohi و Sanaei-Nejad (۲۰۱۵) ـــــ که بیان کرده‌اند فراوانی وقوع رخدادهای گردوغبار از نواحی شـمالی به جنوبی اسـتان فارس، دارای روند افزایشـی اسـت ـــــ مطابقت دارد. به طور کلی، نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و اجرایی در راستای مبارزه با خطر بیابان‌زایی و کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از توفان‌های گردوغبار در مناطق غبارآلود کمک کند.

منابع

1. Araghinejad, S.; Ansari Ghojghar, M.; PourGholam Amigi, M.; Liaghat, A.; & J. Bazrafshan, 2019. The Effect of Climate Fluctuation on Frequency of Dust Storms in Iran, *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(21), 13-32.
2. Beyranvand, A.; Azizi, G.; Alizadeh-Choobari, O.; & A. D. Boloorani, 2019. Spatial and temporal variations in the incidence of dust events over Iran, *Natural Hazards*, 97(1), 229-241.
3. Ebrahimi-Khusfi, Z.; Nafarzadegan, A. R.; & F. Dargahian, 2021. Predicting the number of dusty days around the desert wetlands in southeastern Iran using feature selection and machine learning techniques, *Ecological Indicators*, 125, 107499.
4. Ebrahimi Khusfi, Z.; Roustaei, F.; Ebrahimi Khusfi, M.; & S. Naghavi, 2020. 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*, 34(3), 239-263.
5. Gholami, H.; Mohammadifar, A.; Bui, D. T.; & A. L. Collins, 2020. Mapping wind erosion hazard with regression-based machine learning algorithms, *Scientific Reports*, 10(1), 1-16.
6. Gholami, H.; Mohammadifar, A.; Golzari, S.; Kaskaoutis, D. G.; & A. L. Collins, 2021. Using the Boruta algorithm and deep learning models for mapping land susceptibility to atmospheric dust emissions in Iran, *Aeolian Research*, 50, 100682.
7. Jebali, A.; Zare, M.; Ekhtesasi, M. R.; & R. Jafari, 2021. Detection of areas prone to wind erosion and air pollution using DSI and PDSI indices, *Natural Hazards*, 1-15.
8. Karami, E.; Zehtabian, G.; Khosravi, H.; Mesbahzadeh, T.; Zareh, S.; & M. Behrang Manesh, 2021. Determination of lake sediments susceptibility to wind erosion and its role in dust formation (Parishan lake, Fars province), *Researches in Earth Sciences*, 12(1), 114-130.
9. Karimzadeh, S., & M. M. Taghizadeh., (2019). Potential of dust emission resources using small wind tunnel and GIS: case study of Bakhtegan playa, Iran. *Applied Water Science*. 9(8), 1-8.
10. Kang, L.; Huang, J.; Chen, S.; & X. Wang, 2016. Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010, *Atmospheric Environment*, 125, 188-198.
11. Kazemi, M.; Feiznia, S.; Khosravi, H.; & H. Mesbah, 2019. Investigating of Susceptibility of Maharloo Lake Sediments to Wind Erosion and Determination of Dust Movement Direction, *Desert Management*, 6(12), 49-60.
12. Khajeh, M.; Kheyrandish, H.; & S. Pishdad, 2015. Review the phenomenon of dust and study of effective winds on it (Case Study: Bandar Abbas, Hormozgan province), *Environmental Erosion Research Journal*, 4(16), 37-48.
13. Khusfi, Z. E.; Khosroshahi, M.; Roustaei, F.; & 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.
14. Mallick, J.; Talukdar, S.; Alsubih, M.; Salam, R.; Ahmed, M.; Kahla, N. B.; & M. Shamimuzzaman, 2021. Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis, *Theoretical and Applied Climatology*, 143(1), 823-841.

15. Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
16. Mirakbari, M., & Z. Ebrahimi-Khusfi., (2020). Investigation of Spatial and Temporal Changes in Atmospheric Aerosol Using Aerosol Optical Depth in Southeastern Iran, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(3), 87-105.
17. O'Loingsigh, T.; McTainsh, G.; Tews, E.; Strong, C.; Leys, J.; Shinkfield, P.; & N. Tapper, 2014. The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records, *Aeolian Research*, 12, 29-40.
18. Park, S.-B.; Cho, J.-A.; Park, S. S.; Koo, J.-H.; & Y. G. Lee, 2021. A Possible Linkage between Dust Frequency and the Siberian High in March over Northeast Asia, *Atmosphere*, 12(2), 176.
19. Rashki, A.; Middleton, N.; & A. Goudie, 2021. Dust storms in Iran–Distribution, causes, frequencies and impacts, *Aeolian Research*, 48, 100655.
20. Saieedifar, Z.; Khosro Shahi, M.; Gohardust, A.; Ebrahimi Khusfi, Z.; Lotfi Nasab Asl, S.; & F. Dargahian, 2020. Investigation of the origin and spatial distribution of high dust concentrations and its synoptical analysis in Gavkhooni basin, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(4), 47-64. (In persian)
21. Sarkar, S.; Chauhan, A.; Kumar, R.; & R. P. Singh, 2019. Impact of deadly dust storms (May 2018) on air quality, meteorological, and atmospheric parameters over the northern parts of India, *GeoHealth*, 3(3), 67-80.
22. Shaheen, A.; Wu, R.; & M. Aldabash, 2020. Long-term AOD trend assessment over the Eastern Mediterranean region: A comparative study including a new merged aerosol product, *Atmospheric Environment*, 238, 117736.
23. Soleimani Sardoo, F.; MesbahZadeh, T.; & S. Nateghi, 2020. Frequency analysis of spatial variations of dust storms in the central plateau of Iran, *Environmental Erosion Research Journal*, 10(3), 56-73. (In persian)
24. Vali, A., & F. Roustaei., (2018). Investigation of the wind erosion trend in central Iran using dust storm index in the last fifty years, *JWSS-Isfahan University of Technology*, 21(4), 189-200. (In persian)
25. Yarmoradi, Z.; Nasiri, B.; Mohammadi, G. H.; & M. Karampour, 2020. Long-term characteristics of the observed dusty days and its relationship with climatic parameters in East Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 13(6), 1-11.

Temporal and spatial analysis of dust pollution caused by wind erosion events in Fars province

Zohre Ebrahimi-Khusfi[1]: *Assistant Professor, Department of Ecological Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Kerman, Iran.*
Mohsen Ebrahimi-Khusfi: *Assistant Professor in Remote Sensing and GIS, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.*

Article History (Received: 2021/05/24 Accepted: 2021/07/22)

Extended abstract

1- Introduction

One of the environmental crises that have caused a lot of concern in recent years is the pollution caused by wind erosion in arid and semi-arid regions, especially in Iran. Recently, it has been reported that about 26% of changes in atmospheric dust concentrations occurred due to changes in the drought index resulting from changes in precipitation to evapotranspiration. Increasing air pollutants concentrations, especially dust particles, had negative effects on agricultural production, human health, and the environment. Therefore, temporal and spatial analysis and continuous monitoring of these events in different regions, especially in arid and semi-arid regions, are of great importance. Accordingly, the main purpose of this study is to analyze the trend of dust pollution caused by wind erosion at different time scales and to investigate the spatial distribution of dust particles in Fars province, southwestern Iran, during the years 2000 to 2018.

2- Methodology

In this study, using the pollution of dust storm index (PDSI), the pollution caused by wind erosion events in eleven synoptic stations located in Fars province was calculated. The frequency of local, moderate, and severe dust events was used to calculate this index. Then, the Mann-Kendall test was used to analyze the trend of monthly, seasonal, and annual changes. The trend of changes was calculated separately for the study stations. Furthermore, the map of spatial changes of air pollution in Fars province from 2000 to 2018 was prepared using the reverse distance weighting method. Finally, areas more sensitive to wind erosion were identified based on the generated maps using this method.

3- Results

Analyzing the trend of monthly changes in PDSI using the Mann-Kendall test showed that the most incremental and significant changes in dust pollution occurred in April, May, and February in Fasa, Shiraz, Dorodzan, and Zarghan stations. Meanwhile, the trend of decreasing and significant changes in PDSI has occurred mainly in Lar and Darab stations and from May to October. The results of the seasonal change trend showed that regardless of the confidence level, more than 70% of the study stations have experienced an upward trend in spring, summer, and autumn. In winter, all stations except Darab station have experienced increasing changes in air pollution. On an annual scale, the trend of decreasing changes was observed only in Darab and Lar stations, while the trend of changes in other stations of Fars province was increasing. The pattern of the spatial distribution of dust particles in Fars province showed that in 2003 and 2005, more than two-thirds of Fars province and mainly the central to southeast areas were faced with high dust concentrations. In recent years, and especially in 2017 and 2018, the distribution of dust particles has changed. In recent years, residents of the central to southwestern Fars province have suffered more from reduced air quality due to increased concentrations of atmospheric dust particles.

4- Discussion & Conclusions

The growing trend of dust pollution caused by wind erosion events in recent decades has raised major concerns at various regional, national and global levels. Therefore, it is necessary to understand the trend of temporal and spatial changes of pollution caused by these events to reduce their adverse consequences in different regions. Based on the findings of this study, the trend of temporal changes in dust events

[1] **Corresponding Author: Zohreebrahimi2018@ujiroft.ac.ir**

and the pattern of dust particle distribution in the southern half of Fars province is also worrying because, in most cities of Fars province, an increasing trend in air pollution was observed. In addition, according to PDSI maps, a large part of the province is exposed to the dangers of dust storms and air pollution. Considering that PDSI is calculated based on the frequency of local to severe events, it can be concluded that the frequency of wind erosion events has increased in most cities of Fars province. In other words, these findings indicate the intensification of dust events and pollution caused by it in this province. Our results also showed that in the long-term (2000-2018), the southern half of Fars province, compared to the northern half, was more sensitive to dust events and, as a result, played a major role in dust production across the province. One of the reasons is drying the bed of Bakhtegan-Tashk, Maharloo, and Parishan wetlands, located in the southern half of the province, and have acted as dust generating sources, especially in recent years. As a whole, the results of this study can help managers and planners to prioritize managerial and executive measures to combat the risk of desertification and reduce the adverse impacts of dust storms in dusty areas.

Key Words: Desertification, Pollution of Dust Storm Index, Changes trend, Mann-Kendall.