

تحلیل تغییرات عمق اپتیکی هواویزهای غبار و فراوانی وقوع آن‌ها در مناطق مختلف حوزه جازموریان با استفاده از فناوری دورسنجی

زهره ابراهیمی خوسفی،^{۱*} قباد جلالی،^۲ مهدیه عباسی،^۳ ساره زواری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

چکیده

هدف از این مطالعه، تحلیل روند تغییرات بلندمدت عمق اپتیکی هواویزها و فراوانی وقوع گردوغبار در ۱۵ زیرحوزه واقع در حوزه آبریز جازموریان است. برای این منظور، از داده‌های شاخص عمق اپتیکی هواویزهای بزرگ‌تر از ۰/۵ میکرومتر محصول MCD19A2 در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. روند تغییرات بلندمدت در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون من-کندال تحلیل شد. نتایج نشان داد که در مقیاس ماهانه، کمترین و بیشترین فراوانی رخدادهای گردوغبار به ترتیب در ماه‌های اکتبر و نوامبر و ژوئیه رخ داده است. حداقل و حداکثر عمق اپتیکی هواویزها نیز به ترتیب در ماه‌های اکتبر و ژانویه و دسامبر ثبت شده است. در مقیاس فصلی، حداکثر عمق اپتیکی هواویزها و فراوانی وقوع گردوغبار مربوط به فصول تابستان و بهار، و حداقل آن مربوط به فصل پاییز بوده است. حداقل غلظت هواویزها در سال ۲۰۰۲ و حداکثر آن در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۲ رخ داده است. هر دو پارامتر مورد بررسی در ماه ژوئن، تغییرات کاهشی را نشان دادند که این تغییرات برای مقادیر غلظت در نواحی جنوب شرقی حوزه آبریز جازموریان معنی‌دار بوده است. در سایر ماه‌های سال، اکثر زیرحوزه‌ها روند تغییرات افزایشی را نشان دادند. در مقیاس سالانه، بیش از ۵۰ درصد زیرحوزه‌ها روند افزایشی را تجربه کردند. در مقیاس فصلی نیز تغییرات گردوغبار روند صعودی داشته است؛ به طوری که حداکثر تغییرات افزایشی فراوانی رخدادهای گردوغبار مربوط به فصول زمستان و بهار و حداکثر تغییرات افزایشی در عمق هواویزها مربوط به فصول زمستان و تابستان بوده است.

کلیدواژه‌ها: عمق اپتیکی هواویزها، فرسایش بادی، طوفان گردوغبار، تخریب اراضی، کیفیت هوا.

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران، نویسنده مسئول، Zohreebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران، Gh.jalali@ujiroft.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران، mahdieh2abbasi@gmail.com

۴. گروه علوم و مهندسی شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران، sarehzavari@gmail.com

مقدمه

پدیده گردوغبار به معنای افزایش ذرات جامد معلق موجود در جو است که به عنوان یکی از زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سال‌های اخیر، جنبه‌های مختلف زندگی مردم این نواحی را تحت‌تأثیر گذاشته است. این مناطق به عنوان منابع اصلی تولید ذرات گردوغبار معلق در جو شناخته می‌شوند، که به دلیل کمبود رطوبت، پوشش گیاهی محدود و شرایط جوی خاص، مستعد ایجاد طوفان‌های گردوغبار هستند (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). کشور ایران به واسطه موقعیت جغرافیایی خود در نواحی خشک و نیمه‌خشک در طول سال با طوفان‌های گردوغبار متعددی روبه‌روست. این طوفان‌ها معمولاً ناشی از ترکیب عواملی چون خشکسالی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی هستند. طوفان‌های گردوغبار بسته به خصوصیات ذاتی ذرات اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی متعددی بر سیستم‌های مختلف می‌گذارند. از منظر زیست‌محیطی طوفان‌های گردوغبار سبب آلودگی هوا، آسیب به اکوسیستم و کاهش کیفیت خاک می‌شوند. از جنبه اقتصادی، خسارات ناشی از گردوغبار می‌تواند شامل کاهش تولید کشاورزی، افزایش هزینه‌های درمان و کاهش کیفیت زندگی باشد (داورپناه و همکاران، ۲۰۲۴؛ حیدریان و همکاران، ۲۰۱۸). در یک منطقه فراوانی وقایع گردوغبار به عواملی همانند سرعت باد بالا، فقدان رطوبت نسبی جو، خاک بدون پوشش گیاهی، خشکی سطح خاک، سیستم هوای محلی و بیرونی، بارندگی کوتاه‌مدت، وسعت تخریب اراضی، خشکسالی‌های طولانی‌مدت، تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد (جهانبخش و همکاران، ۲۰۱۴). ذرات معلق جو، به عنوان عناصر کلیدی در سیستم‌های آب‌وهوایی، تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم گسترده‌ای بر شرایط اقلیمی مناطق مختلف دارند. طبق گزارش‌های بین‌الدول تغییر اقلیم، وجود این ذرات معلق در اتمسفر، یکی از عوامل مؤثر در افزایش دمای جهانی در دهه‌های اخیر بوده است. این ذرات از طریق مکانیسم‌های مختلف، تعادل تابشی زمین را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند و به‌طور

غیرمستقیم بر الگوهای آب‌وهوایی منطقه تأثیر دارند (راماناتان و کروتزن^۲، ۲۰۰۳؛ هایوود و بوچر^۳، ۲۰۰۰؛ منون^۴ و همکاران، ۲۰۰۲).

عمق اپتیکی هواویزها (AOD) یکی از پارامترهای کلیدی در سنجش کیفیت هوا و بررسی آلودگی ناشی از ذرات معلق مانند گردوغبار است. این پارامتر نشان‌دهنده مقدار نور جذب یا پخش شده توسط ذرات معلق در جو است که می‌تواند به‌طور مستقیم با غلظت گردوغبار در جو ارتباط داشته باشد. افزایش AOD معمولاً نشان‌دهنده افزایش غلظت ذرات معلق، از جمله گردوغبار است؛ به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که گردوغبار به عنوان یک عامل اصلی آلودگی هوا شناخته می‌شود، AOD می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای نظارت بر شرایط جوی و پیش‌بینی وضعیت کیفیت هوا مورد استفاده قرار گیرد. شاخص AOD به دو بخش ذرات گردوغبار با اندازه کوچک‌تر از ۴۷ میکرون و بزرگ‌تر از ۵۵ میکرون تقسیم می‌شود (بیگام و همکاران، ۲۰۱۸؛ دیپ^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). چندین عامل بر مقادیر عمق اپتیکی هواویزها تأثیر دارند که می‌توان به وضعیت آب‌وهوا، نوع ذرات و منبع آلودگی اشاره کرد؛ به‌طوری‌که رطوبت، دما و فشار جو بر نحوه پخش نور توسط ذرات معلق تأثیرگذارند. در رطوبت‌های بالا جذب نور توسط ذرات افزایش می‌یابد. نوع و اندازه ذرات معلق نیز بر میزان AOD تأثیر دارد. ذرات بزرگ‌تر معمولاً نور را بیشتر پخش می‌کنند، درحالی‌که ذرات کوچک‌تر ممکن است بیشتر نور را جذب کنند. همچنین منابع مختلف آلودگی مانند ترافیک، صنایع و فعالیت‌های کشاورزی نیز می‌توانند بر میزان AOD تأثیرگذار باشند (Ur Rehman et al., 2024).

بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد استفاده از داده‌های AOD به منظور مطالعه پدیده گردوغبار و غلظت ذرات معلق در جو در سطح جهان و ایران گسترش یافته است. برای نمونه در مطالعه‌ای تغییرات غلظت ریزگردها در حوزه نفوذ دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ توسط محصول

2. Ramanathan and Crutzen

3. Haywood and Boucher

4. Menon

5. Beegum

6. Deep

1. Zhang

AOD سنجنده MODIS ارزیابی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد ارزیابی روند تغییرات مقادیر AOD در مقیاس ماهانه نشان داد به‌رغم نوسانات سالانه، غلظت ریزگردها دارای روند افزایش کلی طی بازه زمانی مورد بررسی است. همچنین روند افزایشی در اواخر فصل گرم و اوایل فصل سرد مشهودتر است. نقشه‌های میانگین سالانه مقادیر AOD نشان داد روند افزایشی غلظت ریزگردها از سال ۲۰۰۹ شروع شده است (ولی‌زاده و نامداری، ۲۰۲۰). سعیدی‌فر و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های عمق اپتیکی هواویزها و مدل گردوغبار NMMB/BSC به بررسی منشأ و نحوه گسترش مکانی غلظت بالای گردوغبار و تحلیل همدیدی آن در حوزه گاوخونی پرداختند. نتایج نشان داده که منشأ وقوع گردوغبار نواحی خوزستان، عراق، کویر مرکزی و بخش‌های کوچی از مرکز حوزه و اطراف تالاب گاوخونی بوده است. سلیمانی و همکاران (۲۰۲۱) عمق اپتیکی هواویزها را توسط الگوریتم داده‌کاوی MP5 در محدوده شهرستان اهواز طی بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ پیش‌بینی کردند. در این مطالعه داده‌های ماهواره‌ای دما، بارندگی، رطوبت نسبی، سرعت باد و AOD به‌عنوان ورودی مدل MP5 در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از این مطالعه تهیه چهار مدل خطی بود که براساس آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون، MAE، و RMSE اعتبارسنجی شدند. مقادیر آماره‌های مذکور نتایج قابل قبول مقادیر پیش‌بینی‌شده AOD را در این مطالعه نشان داد. غفاریان و همکاران (۲۰۲۳) روند تغییرات زمانی-مکانی میزان گردوغبار در استان خوزستان را براساس تصاویر سستیل-۵ و محصول AOD سنجنده MODIS بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد همبستگی مثبت بالایی میان تصاویر هر دو سنجنده در تشخیص گردوغبار وجود دارد. در مطالعه‌ای، تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های شهر کرمانشاه توسط مدل مسیریابی HYSPLIT و محصول AOD سنجنده MODIS طی بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. مسیریابی در ۴۸ ساعت قبل از وقوع پدیده گردوغبار انجام شد که نتایج حاصل مسیر شمال غرب-جنوب شرق به‌عنوان مسیر کلی انتقال گردوغبار شناسایی شد. همچنین نقشه‌های مستخرج از

مقادیر AOD همبستگی بالای نقشه مسیریابی را نشان داد (شیخ قادری و همکاران، ۲۰۲۳). در مطالعه‌ای که توسط جبالبارزی و همکاران (۲۰۲۳) صورت گرفت، با به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای و زمینی به بررسی تغییرات زمانی-مکانی طوفان‌های گردوغبار در تالاب جازموریان طی بازه زمانی ۱۳۷۹-۱۳۹۹ پرداخته‌اند. نتایج این بررسی نشان داد که بیشترین AOD در قسمت‌های مرکزی تالاب و کمترین میزان پوشش گیاهی، بارندگی و رطوبت در همین مناطق مشاهده شده است. همچنین، روند تغییرات سالانه داده‌ها حاکی از افزایشی بودن بارندگی و دما و کاهش رطوبت نسبی بوده است. محمدی و همکاران (۱۴۰۳) تغییرات زمانی-مکانی عمق نوری هواویزها را در حوزه بلوچستان جنوبی طی بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ براساس محصول MOD 04 L2 سنجنده MODIS بررسی کردند. الگوهای زمانی و مکانی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی ارزیابی شد. الگوی تغییرات زمانی نشان داد ذرات معلق جو در فصل گرم از غلظت بالاتری نسبت به فصل سرد برخوردار است، به‌طوری‌که میانگین عمق نوری هواویز در دوره گرم به ۰/۶۹ می‌رسد. از لحاظ مکانی نیز حوزه به سه پهنه با غلظت غباری کم (کوهستانی)، غلظت متوسط (پایکوهی) و غلظت بالای آئورسل (پست جلگه‌ای) تقسیم می‌شود، به‌طوری‌که میانگین غلظت در منطقه پست جلگه‌ای ۰/۶۲ است. همچنین بالا بودن مقدار عمق اپتیکی هواویز در این حوزه علاوه بر مؤلفه‌های محلی به مؤلفه‌های منطقه‌ای، به‌خصوص در فصل گرم سال وابسته است. در مطالعه‌ای، تغییرات مکانی و زمانی عمق اپتیکی هواویزهای غبار مناطق مختلف استان کرمان در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است. محققان دریافتند که استان کرمان در تیر و فروردین بدترین شرایط را از نظر حضور هواویزهای جوی داشته، زیرا عمق اپتیکی آن‌ها در بیش از ۸۷ درصد مناطق استان به بیش از ۰/۵ رسیده است. در مقیاس فصلی، حدود ۷۰ درصد استان در فصول بهار و پاییز و بیش از ۹۵ درصد استان در فصول تابستان و زمستان با روند تغییرات افزایشی هواویزهای غبار ناشی از وقوع پدیده گردوغبار مواجه بوده‌اند. در مقیاس سالانه، همه مناطق استان کرمان، روند افزایشی هواویزها را در دوره آماری

AOD سنجنده MODIS ارزیابی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد ارزیابی روند تغییرات مقادیر AOD در مقیاس ماهانه نشان داد به‌رغم نوسانات سالانه، غلظت ریزگردها دارای روند افزایش کلی طی بازه زمانی مورد بررسی است. همچنین روند افزایشی در اواخر فصل گرم و اوایل فصل سرد مشهودتر است. نقشه‌های میانگین سالانه مقادیر AOD نشان داد روند افزایشی غلظت ریزگردها از سال ۲۰۰۹ شروع شده است (ولی‌زاده و نامداری، ۲۰۲۰). سعیدی‌فر و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های عمق اپتیکی هواویزها و مدل گردوغبار NMMB/BSC به بررسی منشأ و نحوه گسترش مکانی غلظت بالای گردوغبار و تحلیل همدیدی آن در حوزه گاوخونی پرداختند. نتایج نشان داده که منشأ وقوع گردوغبار نواحی خوزستان، عراق، کویر مرکزی و بخش‌های کوچی از مرکز حوزه و اطراف تالاب گاوخونی بوده است. سلیمانی و همکاران (۲۰۲۱) عمق اپتیکی هواویزها را توسط الگوریتم داده‌کاوی MP5 در محدوده شهرستان اهواز طی بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ پیش‌بینی کردند. در این مطالعه داده‌های ماهواره‌ای دما، بارندگی، رطوبت نسبی، سرعت باد و AOD به‌عنوان ورودی مدل MP5 در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از این مطالعه تهیه چهار مدل خطی بود که براساس آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون، MAE، و RMSE اعتبارسنجی شدند. مقادیر آماره‌های مذکور نتایج قابل قبول مقادیر پیش‌بینی‌شده AOD را در این مطالعه نشان داد. غفاریان و همکاران (۲۰۲۳) روند تغییرات زمانی-مکانی میزان گردوغبار در استان خوزستان را براساس تصاویر سستیل-۵ و محصول AOD سنجنده MODIS بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد همبستگی مثبت بالایی میان تصاویر هر دو سنجنده در تشخیص گردوغبار وجود دارد. در مطالعه‌ای، تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های شهر کرمانشاه توسط مدل مسیریابی HYSPLIT و محصول AOD سنجنده MODIS طی بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. مسیریابی در ۴۸ ساعت قبل از وقوع پدیده گردوغبار انجام شد که نتایج حاصل مسیر شمال غرب-جنوب شرق به‌عنوان مسیر کلی انتقال گردوغبار شناسایی شد. همچنین نقشه‌های مستخرج از

حاصل از سنجنده MODIS در چهار منطقه در دشت‌های شمالی هند طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ بررسی شدند. تغییرات زمانی و فصلی این پارامترها ارزیابی شد. بررسی‌ها نشان داد در طول سال‌های مورد مطالعه فصل زمستان بیشترین غلظت ذرات معلق مشاهده شده است. آنالیز مشخصه‌های آئرس‌ها حاکی از نقش سوختن بیوماس در غلظت ذرات معلق جو بوده، و سپس گردوغبار بیابانی نقش بسزایی داشته است.

به‌طور کلی، تحلیل روند تغییرات بلندمدت عمق اپتیکی هواویزها و فراوانی وقوع هواویزهای غبار یکی از گام‌های اصلی برای شناسایی مناطق بحرانی برای ارائه راهکارهای مناسب به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب ناشی از روند افزایشی آن‌هاست. بدین منظور می‌توان از داده‌های گردوغبار ثبت‌شده در ایستگاه‌های همدید استفاده کرد. با توجه به فقدان و یا عدم پراکنش مناسب این ایستگاه‌ها در حوزه جازموریان، استفاده از فناوری دورسنجی و محصولات ماهواره‌ای می‌تواند برای بررسی اهداف مذکور مفید باشد. بر این اساس هدف اصلی مطالعه حاضر تحلیل روند تغییرات بلندمدت (۲۰۰۱-۲۰۲۲) عمق اپتیکی هواویزهای غبار و فراوانی وقوع آن‌ها در زیرحوزه‌های واقع در حوزه جازموریان با استفاده از محصول MCD19A2 سنجنده مودیس است که با استفاده از آزمون من-کندال در سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه مورد بررسی قرار گرفت.

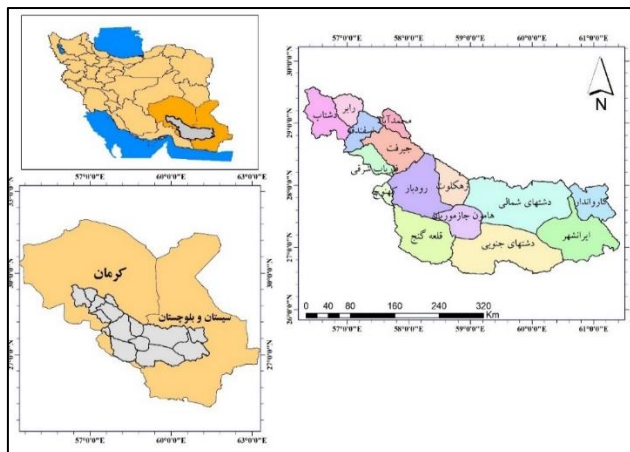
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه جازموریان یک حوزه آبریز بسته در جنوب شرقی ایران با مساحت تقریباً ۶۹۷۷۷ کیلومتر مربع است. ارتفاع از سطح دریا در این حوزه بین ۳۵۵ در نواحی مرکزی تا ۴۲۴۵ متر در ارتفاعات شمال غربی حوزه متغیر است. میزان بارندگی سالانه در ارتفاعات شمالی حوزه بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر متغیر است؛ درحالی‌که در نواحی وسیعی از بخش پست جنوبی حوزه بارندگی از حدود ۱۰۰ میلی‌متر و کمتر است (جبالبارزی و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده نادرست از منابع آب زیرزمینی، احداث سد بر روی رودخانه‌های ورودی به حوزه، وضعیت اقلیمی و خشکسالی‌ها سبب شده است این حوزه به یکی از قانون‌های اصلی تولید گردوغبار در جنوب شرق ایران تبدیل

مورد مطالعه تجربه کرده‌اند که این تغییرات در شهرستان‌های غربی بیشتر از سایر شهرستان‌های استان گزارش شده است (ابراهیمی خوسفی و رنجبر، ۲۰۲۴). در مطالعه‌ای پس از اثبات انطباق خوب داده‌های AOD و رویدادهای گردوغبار در جنوب غرب ایران، از این داده‌ها به‌منظور بررسی و تحلیل گردوغبار در بازه زمانی ۱۹۶۶-۲۰۱۶ استفاده شد و گزارش داده شد که پس از سال ۲۰۰۰، تعداد روزهای غبارآلود در این منطقه افزایش یافته است (انصافی‌مقدم و همکاران، ۲۰۲۱). خان‌سالاری و همکاران (۲۰۲۳) تغییرات زمانی و مکانی استان گلستان با استفاده از عمق نوری هواویزها بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ (به‌جز سال ۲۰۰۳) و همچنین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ این استان شرایط مطلوب‌تری در مقایسه با سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ داشته است. همچنین بیابان‌های بالکان ترکمنستان به‌عنوان منشأ اصلی و عمده گردوغبار در این مطالعه شناسایی شد. روند تغییرات AOD زمستانه در سرتاسر ایران توسط یوسفی و همکاران (۲۰۲۳) بررسی شد و نتایج بررسی‌ها نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ روند تغییرات این شاخص، افزایشی و در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ کاهشی بوده است. شاهین و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های طولانی‌مدت عمق اپتیکی ذرات معلق در فصل گردوغبار در منطقه شرق خاورمیانه طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به بررسی تغییرات زمانی-مکانی رخداد‌های گردوغبار و همچنین عوامل مؤثر بر آن پرداختند. نتایج نشان داد عمق اپتیکی ذرات معلق در طول سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ روند صعودی معناداری در منطقه داشته است و بعد از آن، طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ روند تغییرات کاهشی معنادار بوده و طی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ نیز روند تغییرات پایدار بوده است. همچنین تغییرپذیری غلظت ذرات معلق در مناطق مستعد تولید گردوغبار نیز با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه با پارامترهای اقلیمی بررسی شد. نتایج این مدل نشان داد تغییرات پارامترهای اقلیمی بر روی روند غلظت ذرات معلق تأثیر قابل توجهی دارد. در مطالعه‌ای که توسط سینگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد، مقادیر عمق اپتیکی هواویزها و انگسترم

شود (قادری نسب و رهنما، ۲۰۱۸). در این مطالعه، ۱۵ زیرحوزه ذرات معلق جو در نظر گرفته شده که در شکل (۱) موقعیت جازموریان به عنوان مناطق مطالعاتی برای پایش تغییرات غلظت حوزه به همراه زیرحوزه‌ها نشان داده شده است.



شکل (۱): موقعیت زیرحوزه‌های واقع در حوزه آبریز جازموریان

Figure (1): Location Sub-basins located in the Jazmorian watershed

روش پژوهش

روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردد نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و فقدان روند در سری زمانی داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. 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 (۱) محاسبه می‌شود که در این رابطه j و k مرتبه مشاهدات هستند و تابع علامت $sgn(x)$ به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

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

$$sgn(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

براساس 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 (۳) استفاده می‌شود. فرض صفر (H_0) در آزمون من-کندال عدم وجود روند و فرض H_1 وجود روند است.

در پژوهش حاضر، محصول عمق اپتیکی هواویزهای سنجنده مودیس (MCD19A2) برای پایش مستمر تغییرات عمق هواویزهای غبار در ۱۵ زیرحوزه جازموریان استفاده شد. مقادیر عمق اپتیکی بزرگ‌تر از ۰/۵ به دلیل دارا بودن همبستگی قابل قبول با پارامترهای متعدد سنجنش فعالیت گردوغبار در نظر گرفته شد (انصافی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱؛ خان‌سالاری و همکاران، ۲۰۲۳). داده‌های مربوط به محصول ماهواره‌ای MCD19A2 که دارای قدرت تفکیک زمانی روزانه و قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر است، از طریق برنامه‌نویسی در محیط گوگل ارث انجین برای تمامی زیرحوزه‌ها به‌طور جداگانه در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ دانلود شد. پس از استخراج رخدادهای با $AOD > 0.5$ ، مقادیر میانگین AOD در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه محاسبه گردید. آزمون من-کندال به منظور تحلیل روند تغییرات زمانی عمق اپتیکی هواویزهای غبار به کار برده شد. آزمون من-کندال یک روش غیرپارامتری محسوب می‌شود که به‌طور گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های زمانی هواشناسی به کار 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 نمود (من، ۱۹۴۵^۱؛ کندال، ۱۹۷۵^۲). اثرپذیری ناچیز این

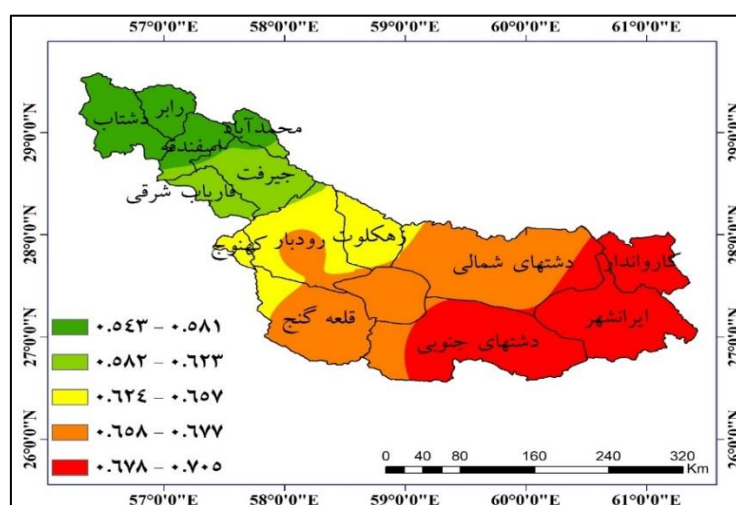
یافته‌ها

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب میانگین سالانه عمق اپتیکی هوایزها و تعداد رخدادها با مقادیر بیشتر از ۰/۵ را در سطح حوزه جازموریان نشان می‌دهد. نتایج بیانگر افزایش فعالیت رخدادها در گردوغبار به سمت نواحی جنوب و جنوب شرقی حوزه است؛ به طوری که غلظت گردوغبار در این نواحی بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۰، و فراوانی این رخدادها بین ۱۰۱۰ تا ۱۶۷۰ در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ تغییر کرده است.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{(\text{var}(S))^{\frac{1}{2}}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{(\text{var}(S))^{\frac{1}{2}}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

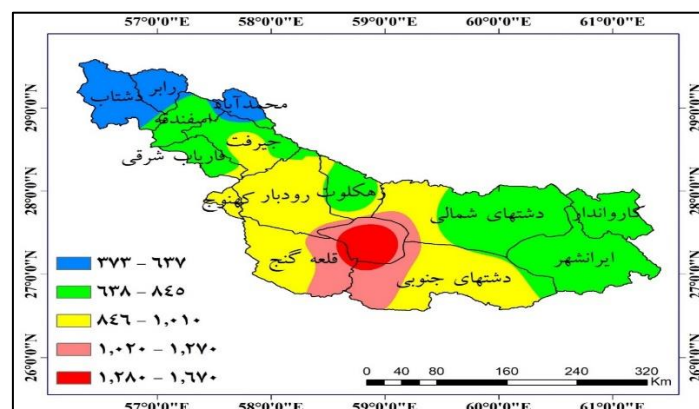
$$\text{Var}(S) = \{n(n-1)(2n+5)\} \quad (4)$$

که در روابط فوق Z مقدار آماره من کندال می‌باشد که مقادیر منفی Z بیانگر روند کاهشی و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده روند افزایشی در سری داده‌هاست. با توجه به سطح معنی‌دار ۹۵ درصد اگر $|Z| > 1/96$ باشد، فرض صفر رد شده و سری زمانی پارامتر مورد مطالعه دارای روندی معنی‌دار و در غیر این صورت فاقد روند است.



شکل (۲): متوسط عمق اپتیکی آئروسول‌های غبار در حوزه جازموریان طی بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

Figure (2): Mean Depth Optical depth of dust aerosols in the Jazmurian basin during the period 2001-2022



شکل (۳): فراوانی وقوع رخدادها با عمق اپتیکی بیشتر از ۰/۵ در حوزه جازموریان طی بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲

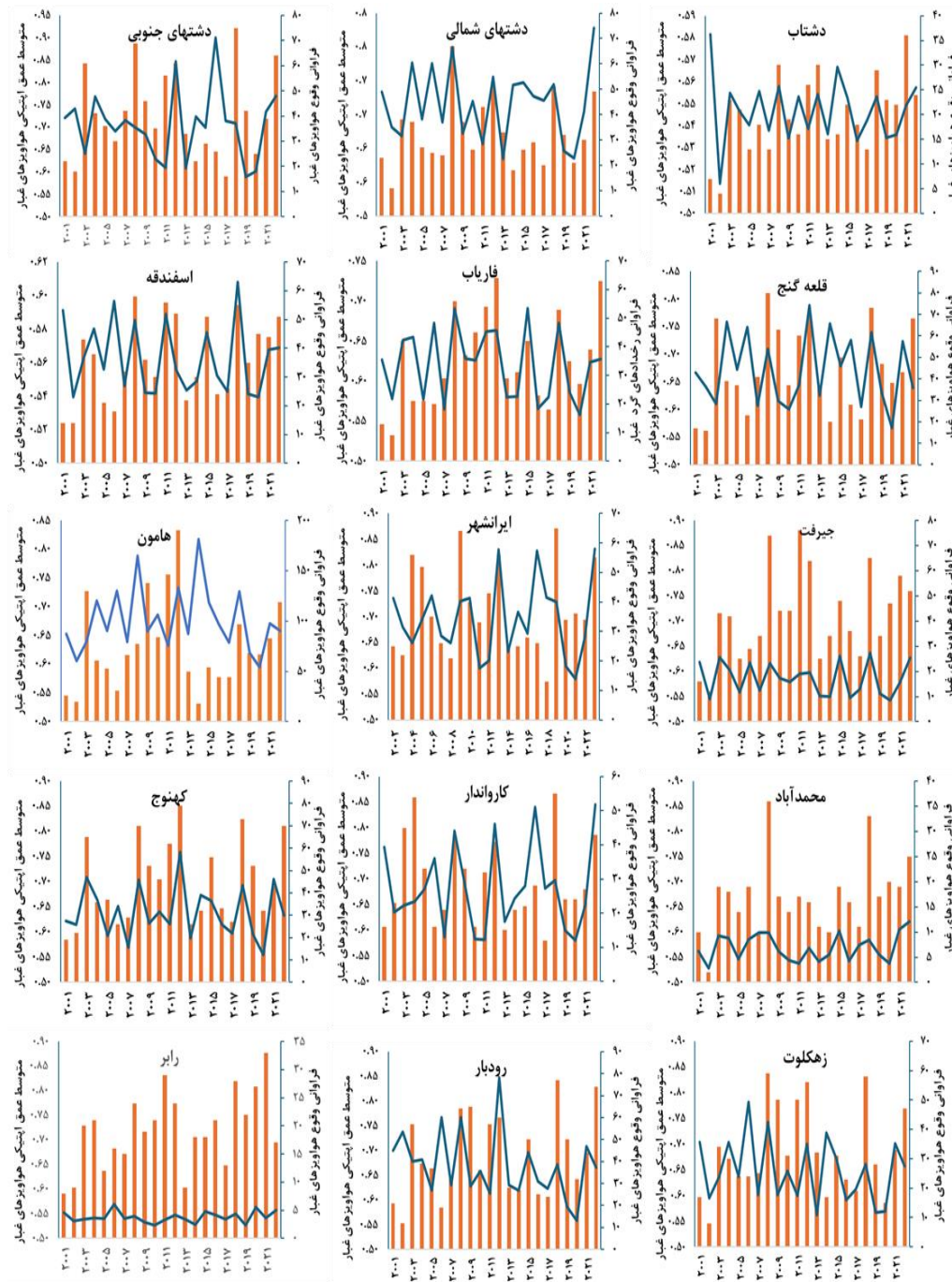
Figure (3): Frequency Occurrence of events with an optical depth greater than 0.5 in the Jazmurian basin during the period 2001-2022

زیرحوزه‌های فاریاب شرقی، هامون و قلعه گنج اتفاق افتاده است؛ درحالی‌که بیشترین فراوانی وقوع رخدادها با عمق اپتیکی بیشتر از ۰/۵ بین ۵۶ در زیرحوزه هامون تا ۲۸ و ۲۹ در زیرحوزه‌های ایرانشهر، دشت‌های جنوبی و شمالی متغیر بوده

سری زمانی مربوط به تغییرات ماهانه مقادیر غلظت و فراوانی رخدادها در گردوغبار با عمق اپتیکی بیشتر از ۰/۵ در زیرحوزه‌های جازموریان طی بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۲ حاکی از آن است حداکثر غلظت گردوغبار بین ۳/۹ تا ۴ در

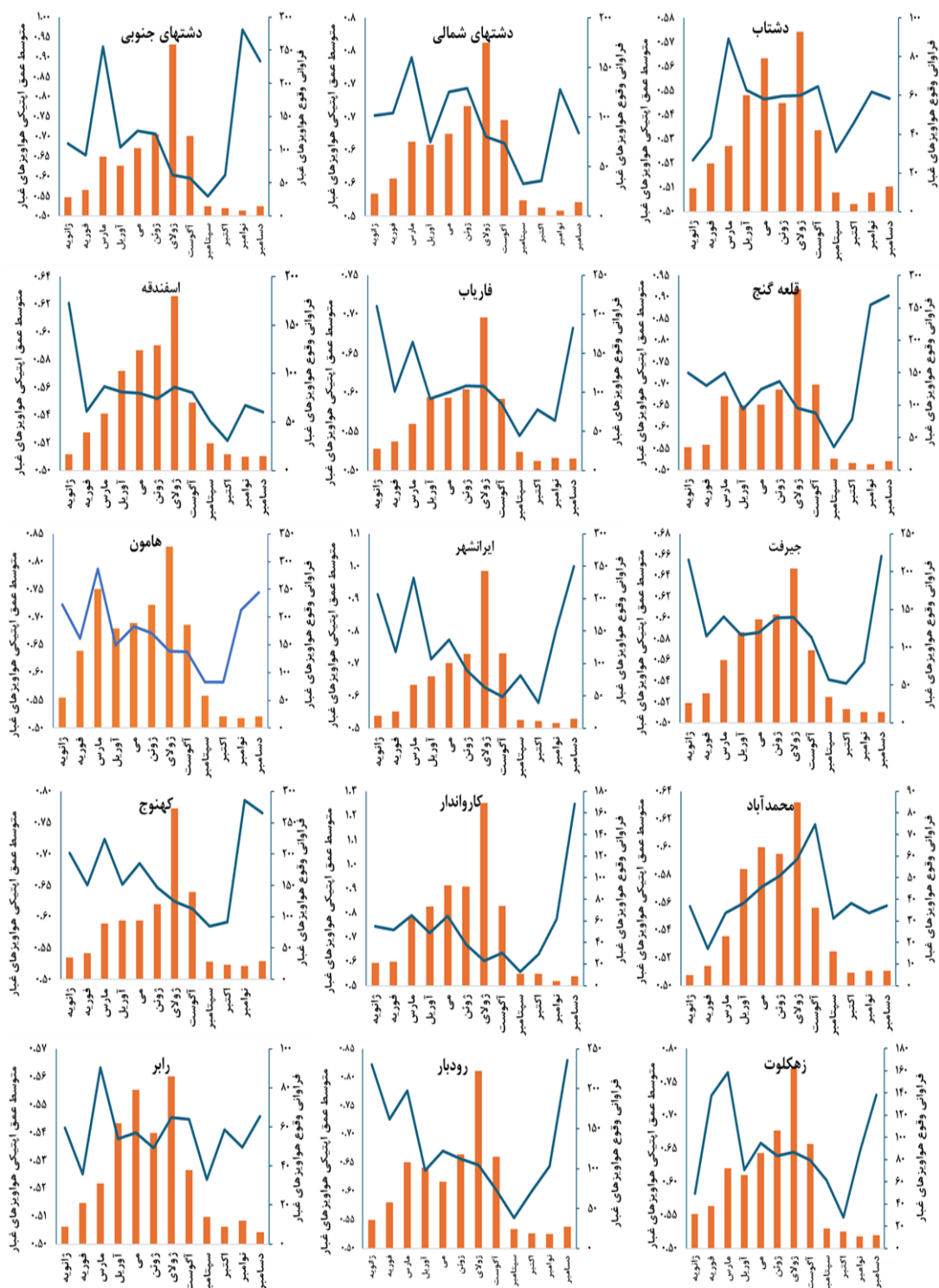
است. شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر متوسط عمق اپتیکی هواویزها را در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه در هریک از زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد. در مقیاس ماهانه کمترین و بیشترین فراوانی‌ها به ترتیب در ماه‌های اکتبر، نوامبر (۴) رخداد در زیرحوضه کهنوج و ژوئیه (۳۲۷) رخداد در زیرحوضه محمدآباد اتفاق افتاده است. همچنین حداقل و حداکثر غلظت گردوغبار نیز به ترتیب مربوط به ماه‌های اکتبر، ژانویه (۰/۵۲)،

زیرحوضه‌های دشتاب و اسفندقه) و دسامبر (۱/۲۴)، زیرحوضه کارواندار) بوده است. در مقیاس سالانه، حداقل فراوانی رخدادهای گردوغبار متعلق به سال ۲۰۰۲ (۲) رخداد در زیرحوضه محمدآباد) و مقادیر حداکثر آن مربوط به سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ (۱۴۶ و ۱۹۰ رخداد در زیرحوضه هامون) بوده است. کمترین غلظت گردوغبار در سال ۲۰۰۲ و بیشترین غلظت در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۲ اتفاق افتاده است.



شکل (۴): تغییرات سالانه عمق اپتیکی هواویزهای غبار و فراوانی وقوع آن‌ها در زیرحوضه‌های واقع در حوزه جازموریان (۲۰۰۱-۲۰۲۲)

Figure (4): Annual variations in the optical depth of dust aerosols and frequency of their occurrence in the sub-basins located in the Jazmurian watershed (2001-2022)



شکل (۵): تغییرات ماهانه عمق اپتیکی هواویزهای غبار و فراوانی وقوع آن‌ها در زیرحوزه‌های واقع در حوزه جازموریان (۲۰۰۱-۲۰۲۲)

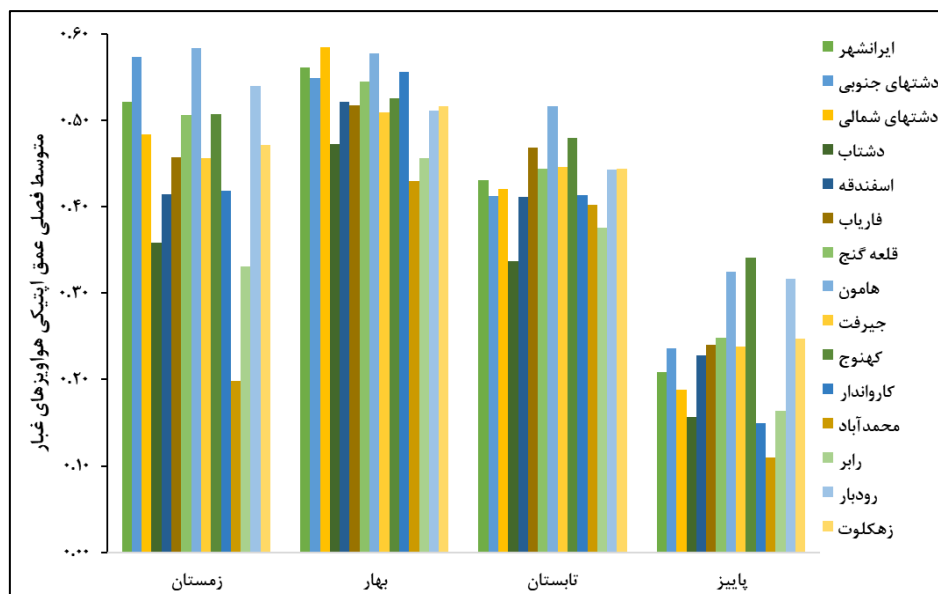
Figure (5): Monthly variations in optical depth of dust aerosols and frequency of their occurrence in the sub-basins located in the Jazmurian watershed (2001-2022)

است. همچنین بیشترین رخدادهای گردوغبار در تابستان و سپس بهار وقوع یافته است؛ درحالی‌که فصل پاییز با کمترین وقوع رخدادهای گردوغبار در این بازه زمانی (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲) مواجه بوده است.

شکل‌های (۶) و (۷) مقادیر فصلی عمق اپتیکی هواویزهای غبار و فراوانی وقوع آن‌ها را در زیرحوزه‌های مطالعاتی نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است در اغلب زیرحوزه‌ها، فصل پاییز کمترین غلظت و فصل بهار بالاترین غلظت را دارا بوده

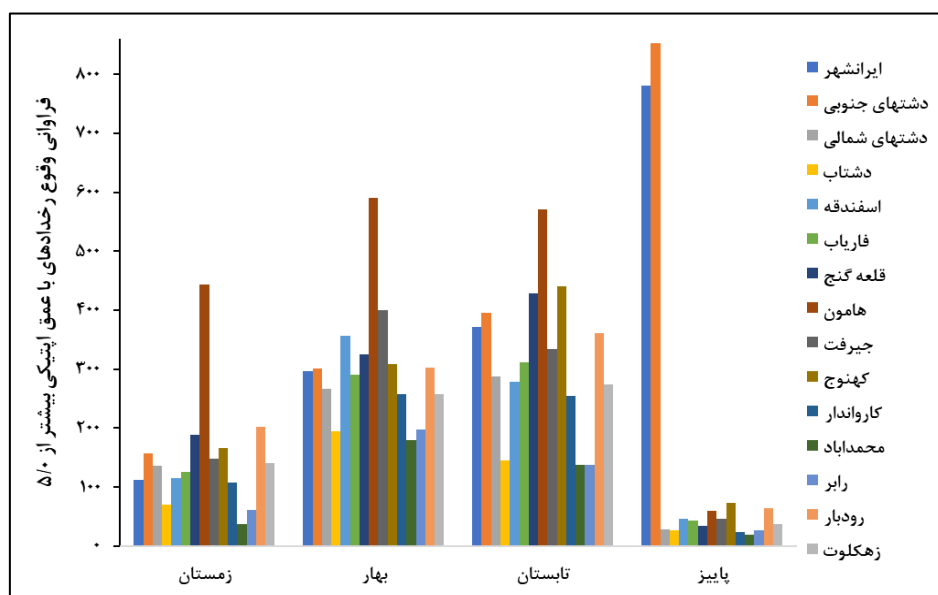
نتایج تحلیل روند تغییرات بلندمدت عمق هواویزهای غبار و فراوانی وقوع آن‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند. نتایج نشان داد در ماه ژانویه ۸۶ درصد زیرحوزه‌ها دارای روند تغییرات افزایشی بوده‌اند. این در حالی است که در زیرحوزه‌های دشتاب و اسفندقه روند منفی بوده است. تغییرات افزایشی در زیرحوزه‌های قلعه‌گنج، رودبار، کهنوج، و زهکلوت در سطح ۵ و ۱ درصد معنادار بوده است. در ماه فوریه بیش از ۵۰ درصد زیرحوزه‌ها روند تغییرات کاهشی غیرمعنادار را تجربه کرده‌اند. روند تغییرات عمق اپتیکی هواویزهای غبار در ماه مارس در بیش از ۷۰ درصد زیرحوزه‌ها افزایشی بوده است. تغییرات کاهشی در زیرحوزه‌های جیرفت، رودبار، زهکلوت اتفاق افتاده اما این تغییرات معنادار نبوده است. در ماه آوریل نیز تغییرات افزایشی در ۸۶ درصد و کاهشی در ۱۳ درصد از زیرحوزه‌ها (کهنوج و رودبار) مشاهده شد. روند صعودی تنها در زیرحوزه‌های دشت‌های شمالی و جنوبی معنی‌دار بوده است. تغییرات عمق اپتیکی هواویزها در ماه می در ۴۰ درصد زیرحوزه‌ها مثبت غیرمعنی‌دار و ۵۳ درصد زیرحوزه‌ها، منفی غیرمعنی‌دار بوده است. در ماه ژوئن روند تغییرات در کل حوزه کاهشی بوده است که این تغییرات در ۳۳ درصد زیرحوزه‌ها شامل دشت‌های جنوبی، دشت‌های شمالی، زهکلوت، کارواندار و ایرانشهر معنی‌دار بوده است. حدود ۶۶ درصد زیرحوزه‌ها در ماه ژوئیه افزایش غلظت گردوغبار را تجربه کرده‌اند، که تنها زیرحوزه کهنوج تغییرات معنادار را تجربه کرده است. این

درحالی است که در ماه آگوست تغییرات عمق اپتیکی هواویزها در ۶۶ درصد زیرحوزه‌ها کاهشی و غیرمعنی‌دار بوده است. در ماه‌های سپتامبر و اکتبر در کل حوزه جازموریان تغییرات افزایشی بوده که ۴۰ درصد تغییرات ماه سپتامبر در زیرحوزه‌های جیرفت، فاریاب، هامون، رودبار و دشت‌های شمالی معنی‌دار بوده است. روند تغییرات در ماه‌های نوامبر و دسامبر نیز تقریباً در بیش از ۵۰ درصد حوزه افزایشی بوده که تنها زیرحوزه دشتاب در نوامبر با تغییرات معنادار مواجه بوده است. در مقیاس فصلی، در بهار تقریباً ۴۶ درصد تغییرات افزایشی غیرمعنی‌دار و ۴۶ درصد کاهشی غیرمعنی‌دار بوده است. تنها زیرحوزه اسفندقه فاقد روند بوده است. تابستان و پاییز نیز بیش از ۵۰ درصد زیرحوزه‌ها دارای تغییرات افزایشی بوده و تنها زیرحوزه‌های ایرانشهر، کارواندار، دشت‌های جنوبی و قلعه‌گنج با روند تغییرات منفی مواجه بوده‌اند. در زیرحوزه‌های جیرفت، اسفندقه، فاریاب و کهنوج در فصل تابستان، و زیرحوزه‌های اسفندقه و دشتاب در پاییز تغییرات افزایشی معنادار بوده است. این درحالی است که فصل زمستان کل حوزه جازموریان، گردوغبار روند افزایشی داشته که این تغییرات در زیرحوزه‌های قلعه‌گنج، کهنوج و فاریاب معنادار بوده است. در مقیاس سالانه نیز تغییرات افزایشی و کاهشی غلظت گردوغبار به ترتیب در ۶۶ و ۳۳ درصد حوزه اتفاق افتاده است که تنها افزایش گردوغبار در زیرحوزه‌های اسفندقه و فاریاب معنادار بوده است (جدول ۱).



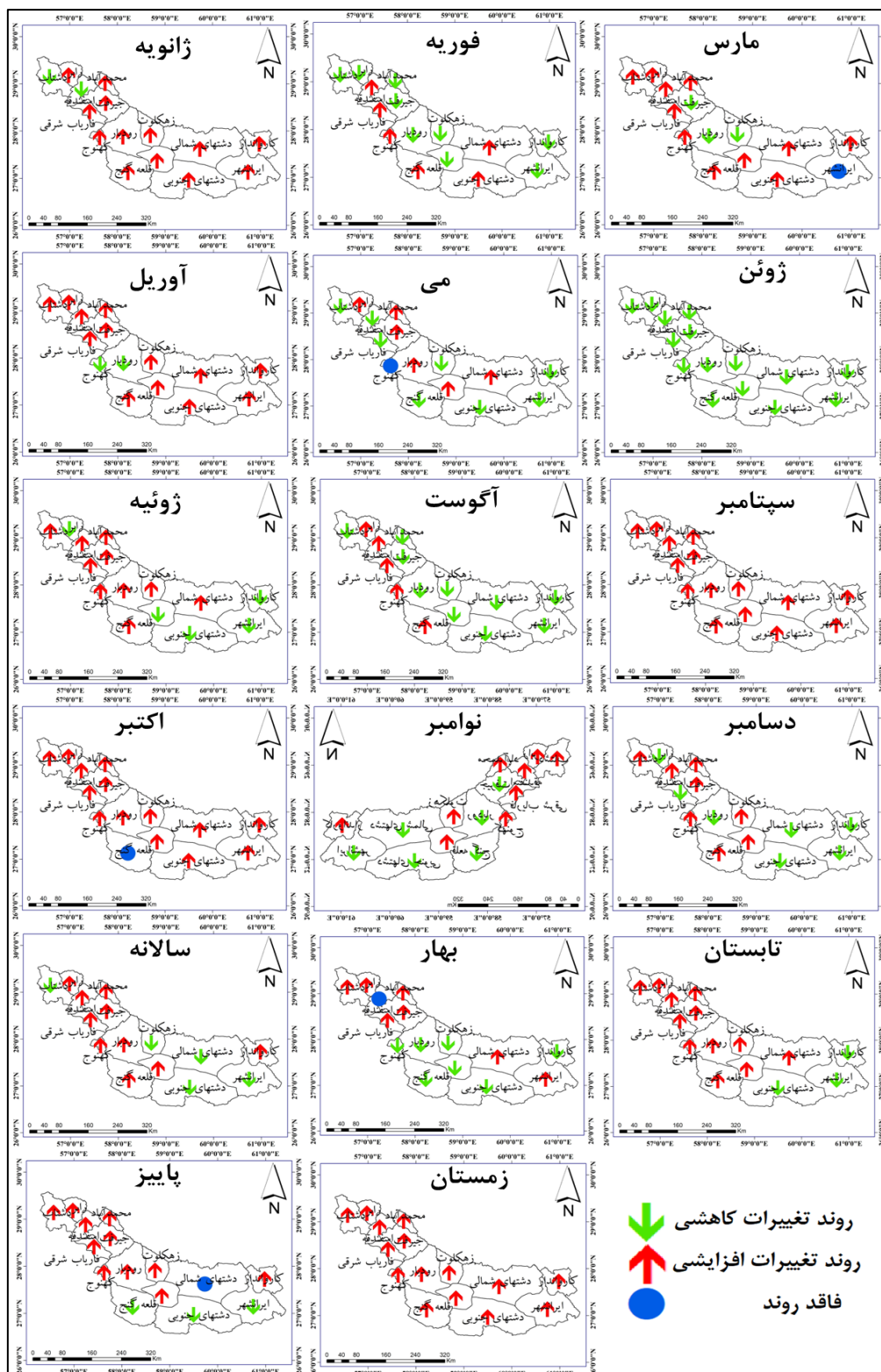
شکل (۶): میانگین فصلی عمق اپتیکی هواویزهای غبار در زیرحوزه‌های واقع در حوزه جازموریان (۲۰۰۱-۲۰۲۲)

Figure (6): Mean Seasonal optical depth of dust aerosols in the sub-basins located in the Jazmurian watershed (2001-2021)



شکل (۷): مقادیر فراوانی فصلی رخدادهای با عمق اپتیکی بیشتر از ۰/۵ در زیرحوزه‌های واقع در حوزه جازموریان (۲۰۰۱-۲۰۲۲)

Figure (7): Values of Seasonal frequency of events with an optical depth greater than 0.5 in the sub-basins located in the Jazmurian watershed (2001-2021)



شکل (۸): روند تغییرات بلندمدت ماهانه، فصلی و سالانه عمق اپتیکی هواویزهای غبار در زیرحوزه‌های واقع در حوزه جازموریان

Figure (8): Trend of long-term monthly, seasonal, and annual changes in the optical depth of dust aerosols in the sub-basins located in the Jazmurian watershed

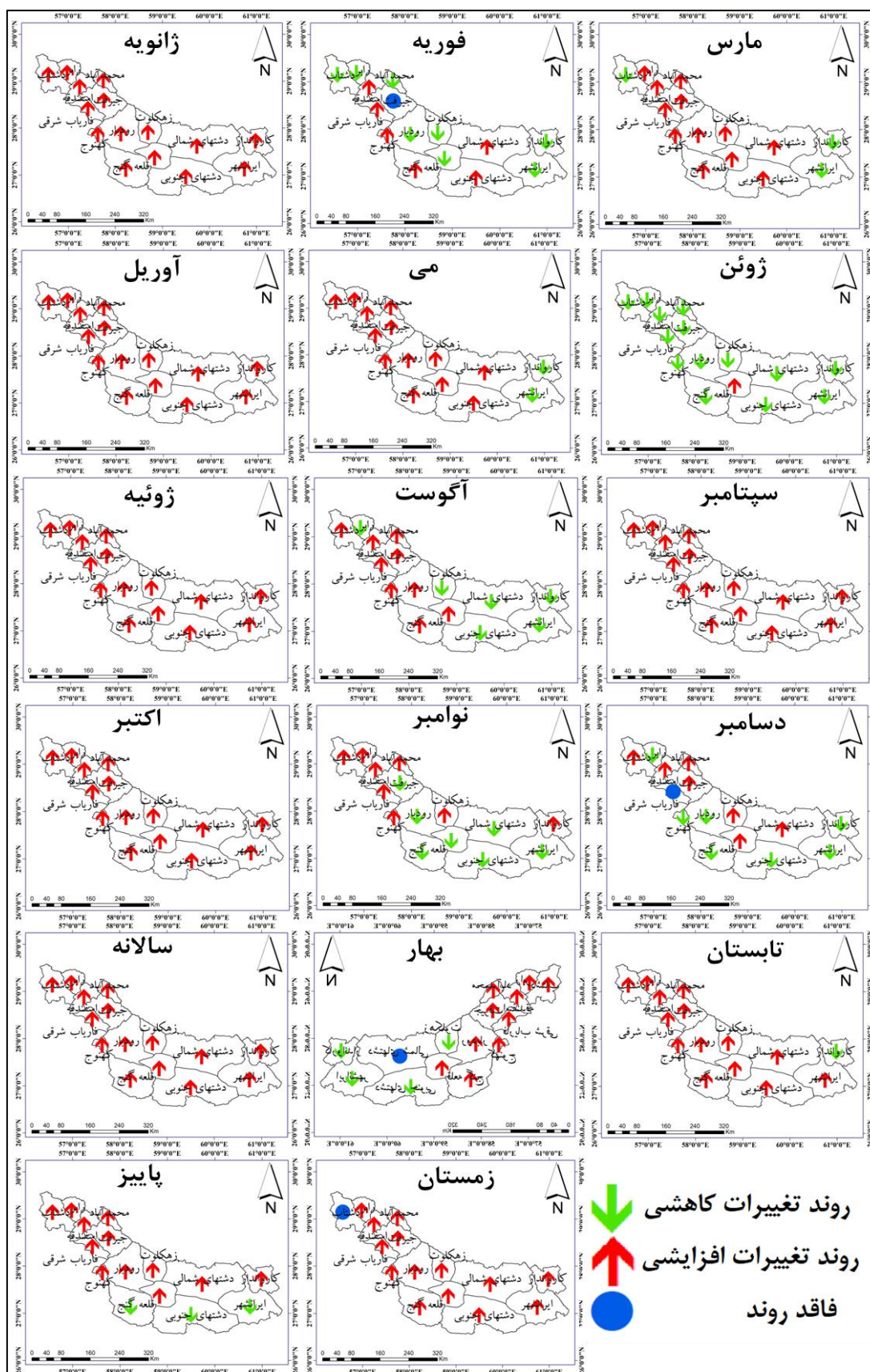
جدول (۱): درصد روند تغییرات عمق اپتیکی هواویزهای غبار در زیرحوزه‌های واقع در حوزه جازموریان (۲۰۰۱-۲۰۱۱)

Table (1): Percentage trend Changes in the optical depth of dust aerosols in the sub-basins located in the Jazmuriyan watershed (2001-2011)

مقیاس زمانی	روند منفی	روند مثبت	فاقد روند	روند منفی معنی‌دار	روند مثبت معنی‌دار
ژانویه	۱۳/۳	۸۶/۷	۰	-	۲۶/۶
فوریه	۶۰	۴۰	۰	-	-
مارس	۲۰	۷۳/۳	۶/۷	-	-
آوریل	۱۳/۳	۸۶/۷	۰	-	۱۳/۳
می	۵۳/۳	۴۰	۶/۶۶	-	-
ژوئن	۱۰۰	۰	۰	۳۳/۳	-
ژوئیه	۳۳/۳	۶۶/۷	۰	-	۶/۶
آگوست	۶۶/۷	۳۳/۳	۰	-	-
سپتامبر	۰	۱۰۰	۰	-	۴۰
اکتبر	۰	۹۳/۳	۶/۷	-	-
نوامبر	۴۰	۶۰	۰	۶/۶	۶/۶
دسامبر	۴۶/۷	۵۳/۳	۰	-	-
زمستان	۰	۱۰۰	۰	-	۲۰
بهار	۴۶/۷	۴۶/۷	۶/۷	-	-
تابستان	۲۰	۸۰	۰	-	۲۶/۶
پاییز	۲۰	۷۳/۳	۶/۷	-	۱۳/۳
سالانه	۳۳/۳	۶۶/۷	۰	-	۱۴/۳

تغییرات منفی معنی‌دار در کارواندار (فوریه) و ایرانشهر (نوامبر) اتفاق افتاده است. تغییرات افزایشی رخدادهای گردوغبار در اکثر زیرحوزه‌ها در ماه‌های مارس و می افزایشی بوده که تنها در زیرحوزه محمدآباد (مارس - می) و دشتاب (می) دارای روند معنی‌دار هستند. در تابستان روند افزایشی رخدادهای گردوغبار در تمامی زیرحوزه‌ها به‌استثنای کارواندار اتفاق افتاده است. در زمستان تنها در زیرحوزه کهنوج، و تابستان در فاریاب، دشتاب، اسفندقه، رابر، جیرفت، و رودبار افزایش رخدادها معنادار بوده است. در فصل بهار و پاییز نیز اکثر زیرحوزه‌ها با تغییرات افزایشی گردوغبار مواجه بودند که این تغییرات فقط در فصل پاییز و در زیرحوزه‌های رابر، جیرفت، محمدآباد و دشتاب معنی‌دار بوده است. در مقیاس سالانه نیز آزمون روند حاکی از افزایش فراوانی وقوع رخدادهای حاوی هواویزهای غبار در تمامی زیرحوزه‌هاست (شکل ۹، جدول ۲).

نتایج ارزیابی روند تغییرات بلندمدت فراوانی رخدادهای با عمق اپتیکی بیشتر از ۰/۵ طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ نشان داد در ماه‌های ژانویه، آوریل، ژوئیه، سپتامبر و اکتبر کل حوزه جازموریان تغییرات افزایشی اتفاق افتاده است. در ماه ژانویه زیرحوزه‌های کهنوج، قلعه گنج و زهک‌لوت، در آوریل جیرفت، هامون و جیرفت، در ژوئیه جیرفت، اسفندقه، فاریاب، دشتاب و رابر، در سپتامبر جیرفت، اسفندقه، زهک‌لوت، فاریاب، محمدآباد و فاریاب، و زیرحوزه‌های جیرفت، اسفندقه، زهک‌لوت و هامون در ماه اکتبر تغییرات افزایشی معنی‌دار بوده است. این درحالی است که تغییرات کاهشی غیرمعنی‌دار در ماه ژوئن، در تمامی زیرحوزه‌ها به‌استثنای هامون اتفاق افتاده است. تغییرات فراوانی رخدادهای گردوغبار در ماه‌های فوریه، آگوست، نوامبر و دسامبر برای تقریباً ۵۰ درصد زیرحوزه‌ها مثبت و مابقی زیرحوزه‌ها منفی بوده است. تغییرات افزایشی معنی‌دار در زیرحوزه‌های اسفندقه (فوریه)، دشتاب و رابر (دسامبر)، و



شکل (۹): نتایج آزمون روند تغییرات مقادیر ماهانه، فصلی و سالانه فراوانی گردوغبار در زیرحوزه‌های جازموریان

Figure (9): Results of Trend analysis of monthly, seasonal, and annual dust event frequency in the sub-basins of Jazmorian

جدول (۲): درصد روند تغییرات فراوانی وقوع رخداد‌های با عمق اپتیکی بیشتر از ۰/۵ در زیرحوزه‌های واقع در جازموریان

Table (2): Percentage trend of changes in the frequency of occurrence of events with an optical depth greater than 0.5 in the sub-basins located in Jazmorian

مقیاس زمانی	روند منفی	روند مثبت	فاقد روند	روند منفی معنی‌دار	روند مثبت معنی‌دار
ژانویه	۰	۱۰۰	-	-	۲۰
فوریه	۵۳/۳	۴۰	۶/۶۶	۶/۶۶	۶/۶۶
مارس	۲۰	۸۰	-	-	۶/۶۶
آوریل	۰	۱۰۰	-	-	۲۰
می	۱۳/۳	۸۶/۷	-	-	۱۳/۳
ژوئن	۹۳/۳	۶/۷	-	-	-
ژوئیه	۰	۱۰۰	-	-	۳۳/۳
آگوست	۴۰	۶۰	-	-	-
سپتامبر	۰	۱۰۰	-	-	۴۰
اکتبر	۰	۱۰۰	-	-	۶/۶
نوامبر	۴۶/۷	۵۳/۳	-	۶/۶	۱۳/۳
دسامبر	۴۶/۷	۴۶/۷	۶/۶۶	-	-
زمستان	۰	۱۰۰	۶/۶۶	-	۶/۶۶
بهار	۰	۹۳/۳	۶/۶۶	-	-
تابستان	۲۶/۷	۶۶/۷	-	-	۴۰
پاییز	۶/۷	۹۳/۳	-	-	۳۳/۳
سالانه	۲۰	۸۰	-	-	۳۳/۳

بحث و نتیجه‌گیری

سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ گردوغبار با بالاترین غلظت در منطقه اتفاق افتاده است. این درحالی است که در ماه ژوئیه و سال ۲۰۱۲ و ۲۰۱۸ بیشترین فراوانی رخداد‌های حاوی هواویزهای غبار به وقوع پیوسته است. بنابراین براساس هر دو پارامتر مورد بررسی، سال ۲۰۱۲ فعالیت پدیده فرسایش بادی در حوزه جازموریان از شدت بالایی برخوردار بوده است. نتایج آزمون کندال نشان داد روند افزایشی گردوغبار در اکثر مقیاس‌های زمانی مورد بررسی طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ وجود داشته است؛ به‌طوری‌که در مقیاس ماهانه برای مقادیر غلظت و فراوانی گردوغبار تقریباً نیمی از سال، در ماه‌های ژانویه، آوریل، ژوئیه، سپتامبر، اکتبر طی بازه زمانی مورد مطالعه تغییرات افزایشی بوده است. این درحالی است که تغییرات درصد تغییرات کاهشی در ماه ژوئن اتفاق افتاده است. در مقیاس فصلی نیز تغییرات افزایشی سهم بیشتری در منطقه داشته است، به‌طوری‌که زمستان از بالاترین درصد برخوردار بوده است. نتایج مطالعه ارجمند و همکاران (۲۰۱۸) نیز روند

پژوهش حاضر با هدف بررسی روند تغییرات بلندمدت عمق اپتیکی هواویزها و فراوانی وقوع آن‌ها در ۱۵ زیرحوزه جازموریان با به‌کارگیری فناوری دورسنجی و آزمون ناپارامتری من-کندال انجام شد. براساس یافته‌های این پژوهش مشخص شد که در ۲۲ سال مورد بررسی ضخامت هواویزهای غبار در زیرحوزه‌های کارواندار و ایرن شهر در جنوب شرقی حوزه و دشت‌های جنوبی از شدت بالاتری برخوردار بوده است. این درحالی است که عمق هواویزهای غبار در زیرحوزه‌های شمال غربی حوزه (رابر، دشتاب، اسفندقه، محمدآباد) کمتر از سایر زیرحوزه‌ها بوده است. از نظر فراوانی، زیرحوزه هامون در مرکز حوزه جازموریان با بیشترین رخداد حاوی هواویزهای غبار مواجه بوده است. این یافته‌ها حاکی از فعالیت بیشتر گردوغبار در نواحی جنوب شرقی، جنوب و مرکز حوزه جازموریان است. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه عمق اپتیکی هواویزها نشان داد در ماه‌های دسامبر، نوامبر، سپس مارس و

نادرست از منابع آبی زیرزمینی، عدم رعایت حقایق تالاب و فعالیت‌های انسانی می‌تواند سبب تشدید تأثیرات این پدیده گردد. بنابراین، توجه به راهکارهای مقابله با گردوغبار و بهبود مدیریت منابع طبیعی در این حوزه، ضروری است تا سلامت عمومی و کیفیت زندگی مردم حفظ شود. براساس یافته‌های حاصل از این مطالعه پیشنهاد می‌گردد عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و انسانی مؤثر بر روند افزایشی رخدادهای گردوغبار و غلظت هواویزها در سطح حوزه جازموریان شناسایی و ارزیابی گردد. با توجه به یافته‌های این مطالعه، پیشنهادهای زیر می‌تواند به درک بهتر از روندهای گردوغبار و نیز به ارتقای کیفیت زندگی در جوامع آسیب‌پذیر حوزه جازموریان کمک کند:

- تحلیل عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و انسانی مؤثر بر روند افزایشی رخدادهای گردوغبار و غلظت هواویزها.
- ارائه اطلاعات و آموزش به جوامع محلی درباره مزایای اقدامات پیشگیرانه برای کاهش اثرات گردوغبار و بهبود کیفیت هوا.
- اتخاذ سیاست‌های مؤثر در مدیریت منابع طبیعی به منظور کنترل و کاهش عوامل تأثیرگذار بر بروز گردوغبار، مانند توسعه پوشش گیاهی و اصلاح شیوه‌های کشاورزی.

افزایشی هواویزهای غبار ناشی از وقوع پدیده گردوغبار در استان کرمان را در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که حدود ۷۰ درصد از سطح استان کرمان در فصول بهار و پاییز، بیش از ۹۵ درصد در فصول تابستان و زمستان، و همچنین همه مناطق استان روند افزایشی هواویزها را در دوره آماری مورد مطالعه تجربه کرده‌اند که این تغییرات در شهرستان‌های غربی بیشتر از سایر شهرستان‌ها بوده است. دیگر مطالعات انجام‌شده بر روی روند تغییرات رخدادهای گردوغبار براساس شاخص عمق اپتیکی هواویزهای بالاتر از ۰/۵ در مناطق مختلف از جمله استان خوزستان (غفاریان و همکاران، ۲۰۲۳)، حوزه جازموریان (سلیمانی ساردو و همکاران، ۲۰۲۲)، جنوب غرب ایران (انصافی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱)، استان گلستان (خان‌سالاری و همکاران، ۲۰۲۳) نیز روند افزایشی غبارآلودگی هوا به اثبات رسیده که مؤید یافته‌های این پژوهش است. به‌طور کلی نتایج ارزیابی روند تغییرات مقادیر عمق اپتیکی هواویزهای غبار نشان داد حوزه جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۱ با روند افزایشی فعالیت پدیده گردوغبار مواجه بوده است که نه تنها نشان‌دهنده تشدید فرسایش بادی و تخریب کیفیت هوای این منطقه است، بلکه می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت ساکنان این حوزه به دنبال داشته باشد. عواملی همچون وقوع خشکسالی‌های طولانی‌مدت، برداشت

منابع

1. Arjmand, M., Rashki, A., & Sargazi, H. (2018). Monitoring of spatial and temporal variability of desert dust over the Hamoun e Jazmurian, Southeast of Iran based on the Satellite Data. *Research Quarterly of Geographical Data*, 27(106), 153-168. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.32339> [In persian].
2. Beegum, S. N., Gherboudj, I., Chaouch, N., Temimi, M., & Ghedira, H. (2018). Simulation and analysis of synoptic scale dust storms over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*, 199, 62-81. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.003>.
3. Deep, A., Pandey, C. P., Nandan, H., Singh, N., Yadav, G., Joshi, P. C., & Bhatt, S. C. (2021). Aerosols optical depth and Ångström exponent over different regions in Garhwal Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6), 324. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09048-4>
4. Davarpanah, M., Ahmadpour, M., Shahriari, M., Ghafari Moghadam, Z., & Mirshekari, S. (2024). Estimating the economic damages of the effects of dust on the beneficiaries of Hamon Wetland. *Environmental Science Studies*, 8(4), 7541-7556. Doi: 10.22034/jess.2023.379822.1946. [In persian].
5. Ebrahim Khusfi, Z., & Ranjbar, A. (2024). Analysis of the spatial and temporal changes of the dust aerosols optical depth across different regions of Kerman province in the last 23 years. *Environmental Erosion Research Journal*, 14(3), 102-122, doi: 10.61186/jeer.14.3.102. [In persian].
6. Ensafi Moghadam, T. (2021). Investigation of Aerosol Optical Depth Index (AOD) in dust events over Southwestern of Iran. *Iran Nature*, 5(6), 55-67. doi: 10.22092/irn.2021.123361 [In persian].

7. Ghafarian, H., Kiani, A., & Arabi AliAbAd, F. (2023). Investigation the potential of MODIS and Sentinel 5 sensors in estimating the amount of air aerosols (A Case Study: Khuzestan Province). 15(62), 59-72. <https://sanad.iau.ir/Journal/jopg/Article/982862> [In persian].
8. Jahanbakhsh, S., Zeinali, B., & Asghari, S. (2014). Analysis and Clustering of Dust Storm Frequency in Iran by Fuzzy Clustering (FCM). *Urban Ecology Researches*, 5(10), 85-98. doi: 20.1001.1.25383930.1393.5.10.5.5. [In persian].
9. Heidarian, P., Azhdari, A., Joudaki, M., Khatooni, J.D., & Firoozjaei, S.F. (2018). Integrating Remote Sensing, GIS, and Sedimentology Techniques for Identifying Dust Storm Sources: A Case Study in Khuzestan, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7), 1113-24. DOI: 10.1007/s12524-018-0774-2
10. Jebalbarez, B., Zehtabian, G.H., Khosravi, H., & Barkhori, S. (2023). Evaluation of Temporal-Spatial Changes of Climatic Elements Affecting the Occurrence of Dust Phenomenon in Arid and Semi-arid Regions (Case Study: Jazmurian Wetland). *Environmental Erosion Research*, 13(4), 109-129. doi: 10.61186/jeer.13.4.109. [In persian].
11. Khan Salari, S., Majidi Dashli, A., Nikzadfar, M., & Mollaraazi, A. (2023). Temporal and spatial changes of dust in Golestan province using AOD (Aerosol Optical Depth) and the affectability of this province from the deserts of Turkmenistan. *Earth and Space Physics*, 49(2), 517-540. doi: 10.22059/jesphys.2023.349946.1007462. [In persian].
12. Kendall, M. (1975). *Rank correlation measures*, Vol. 202. Charles Griffin, London, 15, 690.
13. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica. Econometric society*, 245-59. <https://www.jstor.org/stable/1907187>.
14. Mohammadi, P., Montazeri, M., & Masoodian, S. (2024). Evaluation of temporal-spatial changes of aerosol optical depth in the South Baluchestan basin. *Natural Environmental Hazards*, 13(40), 95-112. doi: 10.22111/jneh.2024.47074.1995 [In persian].
15. Qaderi Nasab, F., & Rahnema, M. (2018). Detection of Dust Storms in Jazmoriyan Drainage Basin Using Multispectral Techniques and MODIS Image. *Physical Geography Research*, 50(3), 545-562. doi: 10.22059/jphgr.2018.248345.1007159 [In persian].
16. Saieedifar, Z., Khosroshahie, M., Gohardoost, A., Ebrahimi Khusfi, Z., Lotfinasab, S., & Dargahian, F. (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*, 4(11), 47-67. Doi: 10.30495/girs.2020.676474 [In persian].
17. Shaheen, A., Wu, R., Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Jun Wang, K., Alpert, P., & Munawar, I. (2023). Spatio-temporal changes of spring-summer dust AOD over the Eastern Mediterranean and the Middle East: Reversal of dust trends and associated meteorological effects. *Atmospheric Research*, 28, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106509>.
18. Singh, K., Verma, P.K., Srivastav, A.L., Mohan, S.P., & Markandeya, D. (2024). *Exploring the association between long-term MODIS aerosol and air pollutants data across the Northern Great Plains through machine learning analysis. Science of The Total Environment*, 921, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171117>.
19. Soleimani Sardoo, F., Hosein Hamzeh, N., Karami, S., Nateghi, S., & Hashemi nezhad, M. (2022). Emission and transport of dust particles in Jazmourian basin (Case study: Dust storm 24 to 26 November 2016). *Climate Research*, 48, 41-54. https://clima.irimo.ir/article_147870.html [In persian].
20. Soleimani, M., A Argany, M, A Papi, R., & Amiri, F. (2021). Satellite aerosol optical depth prediction using data mining of climate parameters. *Physical Geography Research*, 53(3), 319-333. doi: 10.22059/jphgr.2021.318600.1007591 [In persian].
21. Sheikh Ghaderi, S., Alizadeh, T., Ziaeian Firoozabadi, P., & Sharifi, R. (2023). Temporal and spatial analysis of dust storms in Kermanshah. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 10(1), 71-90. Doi: 10.61186/jsaeh.10.1.71 [In persian].
22. Ur Rehman, Z., Tariq, S., Ul haq, Z., & Khan, M. (2024). Impact of meteorological parameters on aerosol optical depth and particulate matter in Lahore. *Acta Geophysica*, 72, 1377-1395. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01291-w>.
23. Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A., & Kaskaoutis, D.G. (2023). Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated meteorological effects. *Remote Sensing*, 15(4), 905. Doi: 10.3390/rs15040905.
24. Valizade Kamran, Kh., & Namdari, S. (2020). Temporal, Spatial Analysis of Aerosols Trend in the Zone of Influence Urmia Aerosols by Processing of Satellite Imageries in 2000, 2015 (Case Study: East Azerbaijan and West Azerbaijan). *Geography and Planning*, 24(72), 427-446. Doi: 10.22034/gp.2020.10826. [In persian].
25. Zhang, Y., Liu, Y., Kucera, P.A., Alharbi, B.H., Pan, L., & Ghulam, A. (2015). Dust modeling over Saudi Arabia using WRF-Chem: March 2009 severe dust case. *Atmospheric Environment*, 119, 118- 30. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.032

Analysis of Dust Aerosol Optical Depth Changes and Their Frequency in Different Areas of Jazmourian Basin Using Remote Sensing Technology

Zohre Ebrahimi-Khusfi,^{1*} Ghobad Jalali,² Mahdیه Abbasi,³ Sareh Zavari⁴

Received: 07/05/2025

Accepted: 15/06/2025

Extended Abstract

Introduction: In recent decades, dust phenomena have emerged as one of the most destructive natural hazards in arid and semi-arid regions, profoundly impacting various aspects of life. These regions, characterized by low humidity, sparse vegetation cover, and vulnerable ecosystems, are inherently prone to dust storms. Iran, owing to its geographical position, is no exception and frequently grapples with this phenomenon, primarily driven by factors such as drought, climatic variations, and human activities. Dust storms pose numerous adverse effects on both the environment and the economy, including air pollution, ecosystem degradation, diminished soil fertility, declining agricultural productivity, and escalating healthcare expenses. The occurrence and frequency of dust events in a given area are influenced by a range of factors, including high wind speeds, low relative humidity, exposed soil surfaces, dry land conditions, local and regional weather systems, short-term precipitation deficits, extensive land degradation, prolonged drought periods, land-use changes, and anthropogenic activities. Airborne particles, especially dust, play a vital role in the climate system, affecting both global temperatures and regional weather patterns. Aerosol Optical Depth (AOD) serves as a pivotal parameter for assessing air quality and investigating particulate pollution. It quantifies the extent to which particles in the atmosphere absorb or scatter sunlight, with higher values indicating increased concentrations of suspended particles, including dust. Particularly in arid and semi-arid zones where dust constitutes a major pollutant, AOD proves to be an effective tool for weather monitoring and air quality forecasting. Various methodologies are employed to measure AOD. Ground-based aerosol robotic networks offer precise spectral aerosol data at specific locations but lack comprehensive spatial coverage. Regional models of atmospheric particulate matter analysis are also in use. However, satellite data, with their high revisit frequency and broad spatial scope, facilitate extensive investigations of dust phenomena. Among these, the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensors aboard the Terra and Aqua satellites are extensively utilized. The MCD19A2 product, with a spatial resolution of 1 kilometer, is particularly valuable for studying aerosol properties. Its accuracy is enhanced through the combined use of the Deep Blue and Dark Target algorithms, which are specifically designed to measure optical depth and retrieve particulate matter concentrations. In general, analyzing long-term trends in aerosol optical depth and the frequency of dust aerosol events is crucial for identifying vulnerable areas and devising effective mitigation strategies. While data from synoptic stations can be useful for such analyses, their sparse distribution in the Jazmorian basin limits their effectiveness. Hence, remote sensing technologies and satellite-derived products prove instrumental for comprehensive assessments. Accordingly, the primary aim of this study is to analyze the long-term (2001–2022) trends in dust aerosol optical depth and their frequency within the sub-basins of the Jazmorian basin, utilizing the MODIS MCD19A2 product. The analysis will be conducted across monthly, seasonal, and annual timescales, employing the Mann-Kendall statistical test to identify significant trends and changes over the two-decade period.

1. *Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran, Corresponding Author; Email: Zohreebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran; Email: Gh.jalali@ujiroft.ac.ir

3. B.Sc. Student & Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran; Email: mahdiah2abbasi@gmail.com

4. B.Sc. Student Department of Fisheries Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran; Email: sarehzavari@gmail.com

Materials and Methods: In this study, 15 sub-basins of the Jazmurian basin were designated as study areas to monitor variations in air particulate matter concentrations. The aerosol optical depth (AOD) product from the MODIS sensor (MCD19A2) was employed for continuous assessment of dust aerosol depths across these sub-basins. Values of optical depth exceeding 0.5 were considered significant, given their strong correlation with numerous parameters related to dust activity measurement. Data for the MCD19A2 satellite product, with a daily temporal resolution and a spatial resolution of 1 kilometer, were separately downloaded for each sub-basin through the Google Earth Engine platform, covering the period from 2001 to 2022. After extracting events where $AOD > 0.5$, the average AOD values were calculated at monthly, seasonal, and annual scales. To analyze the trends in temporal variations of dust aerosol optical depth, the Mann-Kendall test was employed. This non-parametric statistical method is widely used in the analysis of meteorological time series. Its advantages include its suitability for data that do not follow a specific statistical distribution and its robustness against the influence of extreme values. The null hypothesis of the Mann-Kendall test indicates the presence of randomness and no trend in the data series, while acceptance of the alternative hypothesis suggests a significant trend exists.

Results and Discussion: The analysis revealed that, at the monthly scale, the lowest and highest frequencies of dust events occurred in October/November and July, respectively. The minimum aerosol optical depth (AOD) values were recorded in October, while the maximum AOD was observed in January/December. Seasonally, the highest aerosol optical depth and dust occurrence frequency were associated with summer and spring, whereas the autumn season exhibited the lowest values. On an annual basis, the lowest frequency of dust events was recorded in 2002 within the Mohammadabad sub-basin, while the highest occurred in 2011 and 2012 in the Hamoun sub-basin. The minimum aerosol concentration was observed in 2002, whereas the maximum levels appeared in 2012, 2016, and 2022. Additionally, it was found that both parameters—dust event frequency and aerosol concentration—showed a decreasing trend in June, which was statistically significant for concentration values in the southeastern regions of the Jazmurian basin. Conversely, most sub-basins exhibited an increasing trend during other months. At the annual scale, over 50% of the sub-basins demonstrated an increasing trend, with this trend being statistically significant in the Rabar, Jiroft, Faryab, Dashtab, and Esfandagheh sub-basins. Seasonally, dust activity also showed an upward trend. The maximum increase in dust event frequency was observed in winter and spring, while the greatest rise in aerosol depth occurred in winter and summer. Given these findings, implementing dust control strategies and adopting improved natural resource management practices are essential—particularly in sub-basins exhibiting significant upward trends—in order to mitigate serious threats to public health and enhance the quality of life for the local population.

Keywords: Aerosol Optical Depth, Wind Erosion, Dust Storm, Land Degradation, Air Quality.