



بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق جو با استفاده از شاخص عمق اپتیکی آئروسولها در جنوب شرق ایران

مریم میراکبری، زهره ابراهیمی خوسفی

دریافت: ۴ مهر ۱۳۹۸ / پذیرش: ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۳ شهریور ۱۳۹۹

چکیده

درواقع اطلاع از تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق می‌تواند در ارائه راهکارهای مناسب جهت کاهش خسارات ناشی از این ذرات مفید باشد. در این مطالعه به دلیل کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی ذرات معلق، مشخصه عمق اپتیکی آئروسولها براساس محصول عمق اپتیکی آئروسول (AOD) سنجنده مودیس طی دوره آماری ۱۸ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۷) جهت پایش و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی غلظت آئروسولها در نواحی جنوب شرق ایران مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات زمانی AOD در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه، بر اساس آزمون روند من-کنندال پیش سفید شده تعیین گردید.

مواد و روش‌ها برای انجام تحقیق حاضر از داده‌های روزانه AOD متعلق به سطح ۴ سنجنده مودیس استفاده شده است. با توجه به اینکه دوره زمانی موردبررسی ۱۸ ساله است (۱۳۸۰-۱۳۹۷)، در مجموع ۶۵۷۰ فریم از محصولات روزانه AOD سنجنده مودیس برای بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ به فرمت NetCDF از آرشیو USGS دریافت شد. داده‌های اخذ شده AOD با کدنویسی در محیط برنامه Matlab برای ۱۳ ایستگاه سینوپتیک موجود در منطقه مطالعاتی استخراج شدند. جهت اعتبارسنجی داده‌های AOD سنجنده مودیس، از داده‌های غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر (PM10) که در ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها به ثبت می‌رسد، استفاده شد. در مرحله بعد، به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت

پیشینه و هدف شاخص عمق اپتیکی آئروسول یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها جهت بررسی وضعیت آلودگی هوای مناطق مختلف به‌ویژه مناطق خشک و بیابانی است. مناطق خشک و نیمه‌خشک از منابع اصلی ذرات گردوغبار معلق در جو هستند. ایران به دلیل قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک در طول سال با توفان‌های گردوغبار متعددی مواجه است، که خسارات زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی جبران‌ناپذیری را به مناطق مختلفی از کشور وارد کرده است. یکی از این مناطق، منطقه جنوب شرق کشور است که به دلیل وزش بادهای ۱۲۰ روزه در نیمی از سال (اوایل بهار تا اواخر تابستان) تحت تأثیر توفان‌های گردوغبار قرار می‌گیرند و هر ساله حجم زیادی از ذرات شن و گردوغبار از این طریق، وارد جو می‌شود. لذا بررسی و پایش تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق موجود در جو که گردوغبار نیز بخش عمده‌ای از ذرات معلق در این مناطق است، در این منطقه از کشور حائز اهمیت است.

مریم میراکبری (✉)^۱، زهره ابراهیمی خوسفی^۲

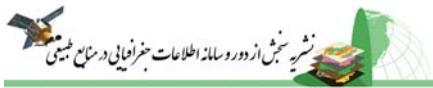
۱. دانش‌آموخته دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج،

ایران

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

جیرفت، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: maryammirakbari@ut.ac.ir



در منطقه مطالعاتی می‌باشند. روند ماهانه AOD نیز حاکی از تغییرات کاهشی غلظت مواد معلق طی دوره آماری است. به‌طوری‌که در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، آبان و اسفند طی دوره آماری در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی غلظت مواد معلق روند کاهشی داشته است. نتایج بررسی روند تغییرات فصلی AOD نیز حاکی از روند کاهشی غلظت مواد معلق جو به‌ویژه در فصول تابستان و بهار است. در فصل پائیز فقط برای ایستگاه کرمان، تغییرات AOD دارای روند افزایشی بوده است.

نتیجه‌گیری یکی از منابع اطلاعاتی موجود برای دسترسی به عمق اپتیکی آئروسول‌ها، سنجنده مودیس است. براساس نتایج تحقیق حاضر رابطه قابل قبولی میان محصول AOD سنجنده مودیس و داده‌های PM10 اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی برقرار است. نتایج تحقیق نشان داد میانگین AOD در مقیاس سالانه بین ۰/۱۴ تا ۰/۵۳ متغیر است که بالاترین مقدار AOD در سال ۱۳۸۲ و حداقل مقدار آن در سال ۱۳۹۵ اتفاق افتاده است. بررسی روند سالانه AOD نشان داد در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی غلظت مواد معلق سیر نزولی دارد. سیر نزولی میزان ذرات معلق جو می‌تواند به دلیل کاهش وقایع گردوغبار ناشی از افزایش سطح پوشش گیاهی در منطقه باشد. مقادیر میانگین ماهانه و فصلی AOD نشان داد غلظت ذرات معلق طی پائیز و زمستان در ماه‌های آبان، آذر، دی و بهمن دارای حداقل مقدار و تابستان و بهار در ماه‌های تیر، خرداد و اردیبهشت دارای حداکثر مقدار است. این در حالی است که روند تغییرات زمانی AOD در مقیاس فصلی و ماهانه نیز در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی طی دوره آماری، کاهشی است. به‌طورکلی نتایج تحقیق حاضر نشان داد ناحیه غربی منطقه مطالعاتی که در استان کرمان واقع شده است با غلظت کمتری از ذرات معلق نسبت به نواحی شرقی واقع در استان سیستان بلوچستان، طی دوره آماری مواجهه بوده است. به‌طورکلی، کاهش مقادیر مربوط به غلظت آئروسول‌ها در برخی از مناطق موردبررسی در این پژوهش می‌تواند بیانگر بهبود کیفیت هوای این مناطق باشد. به نظر می‌رسد اعمال روش‌های اجرایی و مدیریتی مناسب در این منطقه از کشور که در سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری از مدیران و تصمیم‌گیرندگان بوده است، توانسته نقش بسزایی در کاهش آلودگی غلظت هواویزها در این منطقه از کشور داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: سنجنده‌ازدور، تخریب اراضی، آزمون من-کندال، مناطق خشک، آلودگی هوا

آئروسول‌ها، نقشه‌های پهنه‌بندی شده AOD با استفاده از میانگین مقادیر استخراج‌شده طی دوره آماری، به روش وزن دهی فاصله معکوس (IDW) تهیه شدند. در این روش هر ایستگاه یا نقطه اندازه‌گیری دارای تأثیر محلی است که با افزایش فاصله کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که مکان‌های نزدیک به نقطه اندازه‌گیری وزن بیشتری خواهند داشت. در گام بعدی، روند تغییرات زمانی آن‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از روش من-کندال پیش سفید شده موردبررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث نتایج حاصل از اعتبارسنجی AOD حاکی از وجود ارتباط قوی و معنی‌دار، بین عمق اپتیکی ذرات معلق سنجنده مودیس (AOD) و غلظت ذرات معلق (PM10) در سطح اطمینان ۹۵ درصد آماری است. لذا می‌توان این‌گونه استنباط کرد که داده‌های AOD از دقت قابل قبولی برای بررسی و تحلیل تغییرات ذرات معلق جو در منطقه مطالعاتی برخوردار هستند. توزیع مکانی AOD در سطح منطقه مطالعاتی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ نشان داد نواحی غربی و مرکزی (ایستگاه‌های کرمان، بافت، سیرجان، رفسنجان) کمترین میزان AOD را به خود اختصاص داده‌اند. این در حالی است که نواحی شمال شرقی، شرق و جنوبی (استان سیستان بلوچستان) تحت تأثیر غلظت بالاتری از ذرات معلق قرار گرفته‌اند. میزان AOD در دوره آماری بین ۰/۱۴ تا ۰/۵۳ متغیر بوده است که به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۸۲ وقوع یافته است. بررسی تغییرات زمانی AOD در مقیاس سالانه نشان داد میزان مواد معلق جو در سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸، ۱۳۹۱ در منطقه مطالعاتی به بالاترین مقدار رسیده است که ایستگاه‌های زابل، زهک، زاهدان، خاش و ایرانشهر به ترتیب بیشترین مقدار AOD را در دوره آماری دارا می‌باشند. مقادیر میانگین AOD فصلی نشان داد که در تابستان و بهار، غلظت مواد معلق به بیشترین حد رسیده درحالی‌که در پائیز و زمستان این مقدار به حداقل رسیده است. همچنین تغییرات افزایشی ذرات معلق جو از فروردین‌ماه شروع شده در تیر به حداکثر مقدار رسیده و سپس از مرداد تغییرات کاهشی دارد. روند تغییرات میزان AOD در مقیاس سالانه براساس آزمون من-کندال نشان داد در اکثر ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی به‌استثنای رفسنجان دارای روند کاهشی بوده، که تنها در ایستگاه‌های زاهدان، زهک، زابل، سراوان و بم در سطح ۵ درصد کاهشی و معنی‌دار بوده است. مقادیر آماره آزمون من-کندال AOD در مقیاس ماهانه نشان داد ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مهر به ترتیب دارای بیشترین فراوانی روند معنی‌دار طی دوره آماری

مقدمه

ذرات معلق موجود در جو از ذرات جامد و مایع تشکیل شده‌اند که ابعاد آن‌ها از چندین نانومتر تا چندین ده میکرون متغیر است. این ذرات ناشی از فعالیت‌های طبیعی و انسانی می‌باشند. ذرات حاصل از فعالیت‌های طبیعی که به جو اضافه می‌شوند، شامل گردوغبار معدنی ناشی از توفان‌ها، خاکسترهای آتشفشانی، ذرات حاصل از سوختن جنگل‌ها، گرده گیاهان، نمک دریا و ... می‌باشند. فعالیت‌های انسانی نیز باعث افزایش ذرات حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی و دود ناشی از سوختن بیوماس می‌شوند (۲۶). این ذرات نقش مهمی در تحلیل و پیش‌بینی مطالعات اقلیمی دارند. با توجه به پیامدهای نامطلوب اقلیمی ناشی از وجود ذرات معلق در جو، تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است. ذرات معلق متغیر اصلی سیستم‌های اقلیمی هستند که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر اقلیم منطقه تأثیر می‌گذارند، به‌طوری‌که بر اساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ذرات معلق موجود در جو سبب افزایش دما در دهه‌های اخیر شده است (۱۰). این ذرات با جذب یا پراکندگی تابش خورشیدی، به‌طور مستقیم بر تعادل تابش زمین اثرگذار هستند. همچنین با تغییر خصوصیات میکروفیزیکی ابرها و افزایش آلودگی و طول عمر ابرها، به‌طور غیرمستقیم بر ویژگی‌های اقلیمی منطقه تأثیر دارند (۲۵).

عمق اپتیکی آئروسول (AOD) یکی از شاخص‌های پرکاربرد جهت تحلیل و پایش ذرات معلق موجود در جو است که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. AOD (Aerosol Optical Depth) عبارت است از توزیع ذرات معلق موجود در ستون عمودی جو به‌طوری‌که میزان بالای AOD حاکی از تراکم زیاد ذرات معلق، همچون گردوغبار در جو هست (۲۲). به‌عبارت‌دیگر، AOD بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از ذرات معلق جو در مسیر عبوری نور است. طبق مطالعات کین و همکاران (۲۰) دامنه تغییرات AOD بین ۰/۱ تا ۰/۲ برای هوای صاف قاره‌ای و ۰/۰۵ تا ۰/۱ برای هوای صاف بحری تغییر می‌کند. اطلاع از میزان AOD در درک تأثیر ریزگردهای موجود در جو بر تغییرات اقلیمی و چرخه

بیوژئوشیمیایی بسیار مهم و حیاتی است. اطلاعات ذرات معلق جو از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی، ماهواره‌ای و مدل‌سازی قابل‌دسترس هستند (۱۳). روش مستقیم اندازه‌گیری خصوصیات ذرات معلق جو استفاده از روش سنجش زمینی است که به علت پیچیدگی فرایند اندازه‌گیری این ذرات، هزینه‌های نگهداری تجهیزات مربوطه زیاد است و به همین دلیل تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری اندک می‌باشند. همچنین تجهیزات موجود که به‌صورت نقطه‌ای اطلاعات ذرات معلق را برداشت می‌کنند، قابلیت تعیین غلظت ذرات معلق در مقیاس جهانی و ناحیه‌ای را ندارند. محققان برای تحلیل و بررسی خصوصیات ذرات معلق جو مدل‌هایی را طراحی کرده‌اند که این مدل‌ها منطقه‌ای بوده و در سطح جهانی قابل استفاده نمی‌باشند. درحالی‌که داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای این محدودیت‌ها را برطرف نموده و به دلیل قابلیت زیاد تکرار می‌توانند به‌عنوان مکمل داده‌های حاصل از ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند (۱۹). با توجه به اینکه میزان جذب و پراکنش نور از کاهش شدت نور خورشید قابل تشخیص است، لذا عمق اپتیکی ذرات معلق نیز با اندازه‌گیری مستقیم تابش نور به کمک دستگاه نوریسنجی زمینی و یا توسط بازتاب تابش سطحی دریافتی از سنجنده‌های ماهواره‌ای محاسبه می‌شود (۵). عمق اپتیکی ذرات معلق از اختلاف بین بازتابندگی سطح و بازتابندگی رسیده به سنجنده به دست می‌آید (۱۴). یکی از سنجنده‌های موجود برای استخراج این اطلاعات، مودیس است (MODIS) است (۲۶). مودیس توسط ناسا در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ به‌وسیله دو ماهواره EOS (Earth Observing System) به فضا پرتاب شد. استخراج مشخصه‌های ذرات معلق جو از تصاویر ماهواره‌ای از سال ۱۹۷۹ شروع شد که اولین بار برای پایش ذرات گردوغبار بر روی اقیانوس به‌کاربرده شد (۱۴).

بررسی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های AOD در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی در سطح جهان توسعه چشمگیری داشته است (۶). به‌عنوان مثال، مباحثی و همکاران (۱۴) گزارش کردند بین پارامتر عمق اپتیکی حاصل

گردوغبار (مرداد ۹۰، اسفند ۹۰، خرداد ۹۱) در شهرستان بوشهر توسط تکنیک‌های زمین‌آمار و روش کریجینگ گسسته توسط طباطبایی و همکاران (۲۸) بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد منشأ غلظت این عناصر بیرونی است. محمدپور و همکاران (۱۵) به واکاوی و مقایسه محصولات ماهواره‌ای AOD به منظور تحلیل گردوغبارهای غرب کشور پرداختند. توزیع سالانه AOD نشان داد غلظت ذرات گردوغبار در محدوده مورد مطالعه دارای دو دوره فعال (۲۰۰۰-۲۰۱۰) و غیرفعال (۲۰۱۰-۲۰۱۸) است. همچنین براساس توزیع ماهانه AOD، منطقه مورد مطالعه در ماه‌های آوریل تا آگوست دارای بالاترین غلظت گردوغبار است. مطالعات متعددی نیز در سطح جهانی در این زمینه انجام شده است که در ادامه به چندین مورد اشاره می‌شود. هسو و همکاران (۸) روند تغییرات عمق اپتیکی ذرات معلق جو را در سطح منطقه‌ای و جهانی با استفاده از داده‌های WiFS طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ بررسی کردند. براساس نتایج این مطالعه، ذرات معلق در مناطق شبه‌جزیره عربستان، چین و هند روند افزایشی و در بیابان صحرا، آمریکای شرقی و اروپا دارای روند کاهش یافته است. نامداری و همکاران (۱۸) توسط داده‌های AOD ماهانه توفان‌های گردوغبار را در نواحی غربی ایران و مناطق تحت تأثیر در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ تجزیه و تحلیل کردند. نتایج این بررسی نشان داد ماه تیر بالاترین مقدار AOD را دارا است. ریواستاوا و ساران (۲۷) روند تغییرات زمانی AOD در دوره آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۵ توسط آزمون‌های آماری من-کندال، همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن، پیرسون، رگرسیون خطی و شیب‌خط سن در هند بررسی کردند. نتایج نشان داد میزان ذرات معلق در هر سال بین ۰/۰۳۵ تا ۰/۱۵۴ افزایش یافته است. راشکی و همکاران (۲۳) تغییرات زمانی و مکانی عمق اپتیکی ذرات معلق را در چین طی دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ بررسی کردند. در این مطالعه از اطلاعات AOD سنجنده مودیس و پایگاه داده MERRA-2 استفاده کردند. نتایج تحلیل روند تغییرات AOD نشان داد میزان ذرات معلق در نواحی جنوبی چین در حال افزایش بوده، در حالی که برای مناطق

از سنجنده مودیس و غلظت ذرات معلق حاصل از داده‌های زمینی رابطه خطی معنی‌داری وجود دارد. نتایج مطالعه خوش‌سیما و همکاران (۱۰) نشان داد داده‌های عمق اپتیکی حاصل از سنجنده مودیس دارای دقت قابل قبولی هستند. به طوری که همبستگی بین داده‌های مودیس و مقادیر دید افقی، مقدار قابل قبولی گزارش شده است. برتینا و همکاران (۵) داده‌های سطح سه سنجنده مودیس را برای استخراج AOD در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ در غرب کشور استفاده کردند. نتایج نشان داد تغییرات AOD در غرب کشور (اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی، قزوین، گیلان، مرکزی) دارای روند کاهشی بوده در حالی که در استان‌های خوزستان، کردستان، بوشهر، شهرکرد، زنجان و لرستان، روند افزایشی نشان داده است. سلیمانی و همکاران (۲۶) برای برآورد عمق اپتیکی ذرات معلق در منطقه خلیج فارس از داده‌های سنجنده مودیس و داده‌های زمینی AERONET و غلظت ذرات PM10 استفاده کردند. نتایج نشان داد سنجنده مودیس از دقت قابل قبولی در مقایسه با داده‌های زمینی برخوردار است و ضریب همبستگی بین AOD با داده‌های AERONET و PM10 قابل توجه بوده است. ارجمند و همکاران (۴) شاخص‌های گردوغبار سنجنده‌های TOMS، OMI، MISR و مودیس را جهت بررسی پدیده گردوغبار در حوزه جازموریان واقع در جنوب شرقی کشور مورد استفاده قرار دادند. براساس یافته‌های حاصل از این مطالعه، زابل، جازموریان، مرز ایران و پاکستان، سواحل مکران به عنوان کانون‌های اصلی تولید گردوغبار در این منطقه از کشور شناسایی شدند. احمدی و همکاران (۳) محصول سطح ۶ سنجنده مودیس را برای ارزیابی مقادیر AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI و EVI) در مقیاس زمانی فصلی طی دوره آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در ایران استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مناطق جنوب غرب، شرق و سواحل خلیج فارس بالاترین، و نواحی شمال غرب و زاگرس دارای کمترین مقدار AOD می‌باشند. تغییرات مکانی میانگین غلظت ذرات معلق سنگین (آرسنیک، کادمیم، کبالت، آهن، نیکل، سرب، وانادیوم) طی سه دوره وقوع

غلظت آئروسول‌ها در نواحی جنوب شرق ایران مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات زمانی AOD در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه، بر اساس آزمون روند من- کندال پیش سفید شده تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان در جنوب شرق ایران در مختصات جغرافیایی $00^{\circ} 57'$ تا $00^{\circ} 63'$ طول شرقی و $00^{\circ} 27'$ تا $00^{\circ} 30'$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). نواحی جنوب شرقی کشور از یک طرف تحت تأثیر جریان‌های جوی متعدد مانند جریان بادی شبه‌قاره و از طرف دیگر تحت تأثیر پرفشار جنب حاره، شدت بری بودن و جابجایی مسیر سیستم‌های کم‌فشار باران‌زای عرض‌های میانی قرار دارد که گرمای شدید و بارندگی اندک در بخش اعظم این مناطق از مهم‌ترین مشخصه‌های آن است (۷). همچنین بادهای شدید موسمی ۱۲۰ روزه و توفان شن از پدیده‌های غالب در استان سیستان و بلوچستان می‌باشند. به طوری که این پدیده‌ها غلظت ذرات معلق موجود در جو را تحت تأثیر قرار می‌دهند. استان کرمان نیز به واسطه شرایط خاص اقلیمی، واقع شدن در فلات مرکزی و هم‌جواری با کویر لوت سطح اراضی بیابانی قسمت قابل‌ملاحظه‌ای از منطقه را در برمی‌گیرد. از ویژگی‌های اقلیمی خاص نواحی جنوب شرق کشور دمای بالا، بارندگی اندک با پراکنش نامنظم و تبخیر بالا است. به طوری که متوسط بارندگی در استان سیستان و بلوچستان و کرمان به ترتیب ۱۱۰ و ۱۴۳/۸ میلی‌متر است، که بیشترین مقدار بارش در فصل پائیز و زمستان وقوع می‌یابد. میانگین دمای حداکثر به ترتیب ۵۰ و ۲۹ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل ۷ درجه سانتی‌گراد است. قابل ذکر است حوضه آبریز جازموریان یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های جنوب شرقی ایران، بخش وسیعی از استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان را در بر گرفته که در تالاب

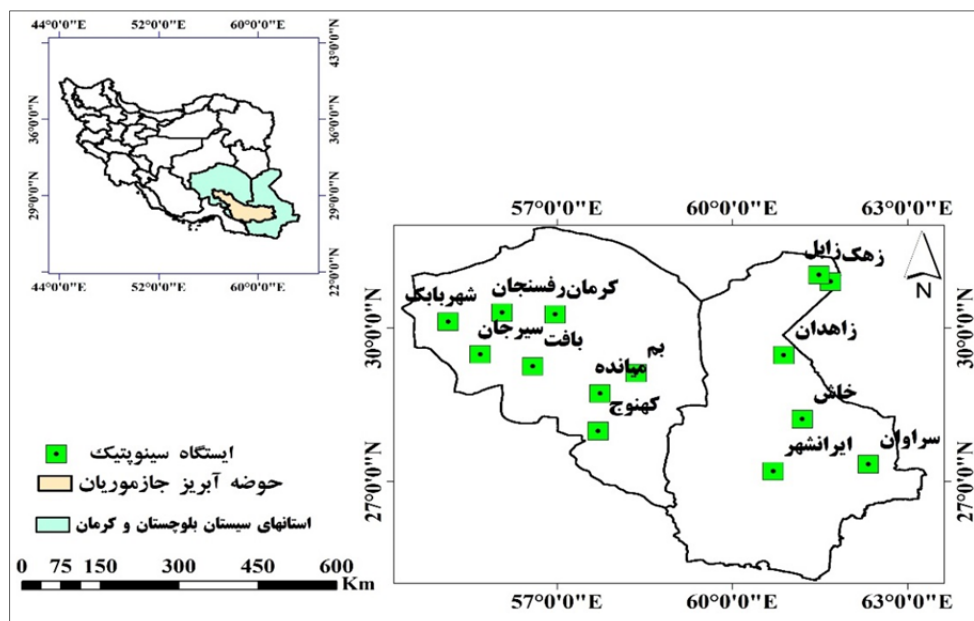
شمالی روند کاهشی گزارش شده است. نبوی و همکاران (۱۷) غلظت ذرات معلق PM2.5 را توسط داده‌های AOD و چهار الگوریتم ماشین یادگیری (Machine Learning) در شهر تهران ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد همبستگی بالایی مابین داده‌های PM2.5 و داده‌های نرمال شده AOD وجود دارد. همچنین الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان بهترین الگوریتم با ضریب تبیین ۰/۶۸ برای پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در منطقه مطالعاتی شناسایی شد. در مطالعه‌ای روند تغییرات بلندمدت عمق نوری ذرات معلق در سرتاسر ایران طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۱۸ توسط داده‌های AOD سنجنده مودیس بررسی شد (۳۰). نتایج این مطالعه نشان داد روند تغییرات عمق نوری ذرات معلق در جنوب غربی کشور مثبت و در مناطق شمالی منفی است.

مناطق خشک و نیمه‌خشک از منابع اصلی ذرات گردوغبار معلق در جو هستند (۱۱). ایران به دلیل قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک در طول سال با توفان‌های گردوغبار متعددی مواجه است، که خسارات زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی جبران‌ناپذیری را به مناطق مختلفی از کشور وارد کرده است. یکی از این مناطق، منطقه جنوب شرق کشور است که به دلیل وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان در نیمی از سال (اوایل بهار تا اواخر تابستان) تحت تأثیر توفان‌های گردوغبار قرار می‌گیرند و هرساله حجم زیادی از ذرات شن و گردوغبار از این طریق، وارد جو می‌شود. لذا بررسی و پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق موجود در جو که گردوغبار نیز بخش عمده‌ای از ذرات معلق در این مناطق است، در این منطقه از کشور حائز اهمیت است. در واقع اطلاع از تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق می‌تواند در ارائه راهکارهای مناسب جهت کاهش خسارات ناشی از این ذرات مفید باشد.

در این مطالعه به دلیل کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی ذرات معلق، مشخصه عمق اپتیکی آئروسول‌ها توسط محصول AOD سنجنده مودیس طی دوره آماری ۱۸ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۷) جهت پیش‌بینی و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی

توفان‌های گردوغبار در جنوب شرق کشور باشد. در این مطالعه ۱۳ ایستگاه سینوپتیک واقع در استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان برای بررسی تغییرات ذرات معلق موجود در جو انتخاب شدند (شکل ۱).

بین‌المللی جازموریان دران واقع شده است. ویژگی‌های مورفولوژیکی و اقلیمی، و همچنین مشخصه‌های رسوب‌شناسی محدوده تالاب، احداث سد بر روی رودخانه‌های ورودی تالاب (۴) باعث شده روند خشکیدگی تالاب تسریع پیدا کند، به‌طوری‌که این محدوده می‌تواند به‌عنوان منشأ رسوبات بادی و



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران و ایستگاه‌های سینوپتیک

Fig. 1. Location of study area and synoptic stations in Iran

روش تحقیق

برای انجام تحقیق حاضر از داده‌های روزانه AOD متعلق به سطح ۴ سنجنده مودیس استفاده شده است. با توجه به اینکه دوره زمانی مورد بررسی ۱۸ ساله است (۱۳۸۰-۱۳۹۷)، در مجموع ۶۵۷۰ فریم از محصولات روزانه AOD سنجنده مودیس برای بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ به فرمت NetCDF از آرشیو USGS دریافت شد. داده‌های اخذ شده AOD با کدنویسی در محیط برنامه Matlab برای ۱۳ ایستگاه سینوپتیک موجود در منطقه مطالعاتی استخراج شدند. با توجه به اینکه داده‌ها در مقیاس زمانی روزانه برای هر ایستگاه در دسترس بودند، به‌منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی AOD در محیط Matlab، این داده‌ها به‌صورت سری‌های زمانی ماهانه،

فصلی و سالانه آماده شدند. جهت اعتبارسنجی داده‌های AOD سنجنده مودیس، از داده‌های غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر (PM10) که در ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها به ثبت می‌رسد، استفاده شد. منبع تأمین این داده‌ها، سازمان حفاظت محیط‌زیست استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان است. شایان‌ذکر است که ایستگاه‌های ثبت غلظت آلاینده‌ها در استان‌های مذکور به ترتیب در شهرستان‌های کرمان و زابل واقع شده‌اند و به همین دلیل از آمار روزانه PM10 مربوط به این ایستگاه‌ها، جهت اعتبارسنجی عمق اپتیکی آئروسول‌ها در منطقه مطالعاتی استفاده گردید. دوره آماری ثبت شده برای داده‌های زمینی ایستگاه کرمان از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ و برای ایستگاه زابل از ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۷ موجود است. لذا اعتبارسنجی داده‌های AOD بر اساس مقادیر متوسط ماهیانه PM10 در

استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید. در این رابطه j و k مرتبه مشاهدات هستند و تابع علامت $\text{sgn}(x)$ به صورت رابطه ۲ تعریف می شود.

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

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

بر اساس این آزمون در صورتی که مقدار S اختلاف معنی داری با صفر نداشته باشد روند وجود ندارد و در غیر این صورت روند، صعودی و یا نزولی خواهد بود. برای آزمون معنی دار بودن روند، از متغیر Z نرمال استاندارد طبق رابطه ۳ استفاده می شود (۱۲). فرض صفر (H_0) در آزمون من-کنندال عدم وجود روند و فرض H_1 وجود روند است.

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

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

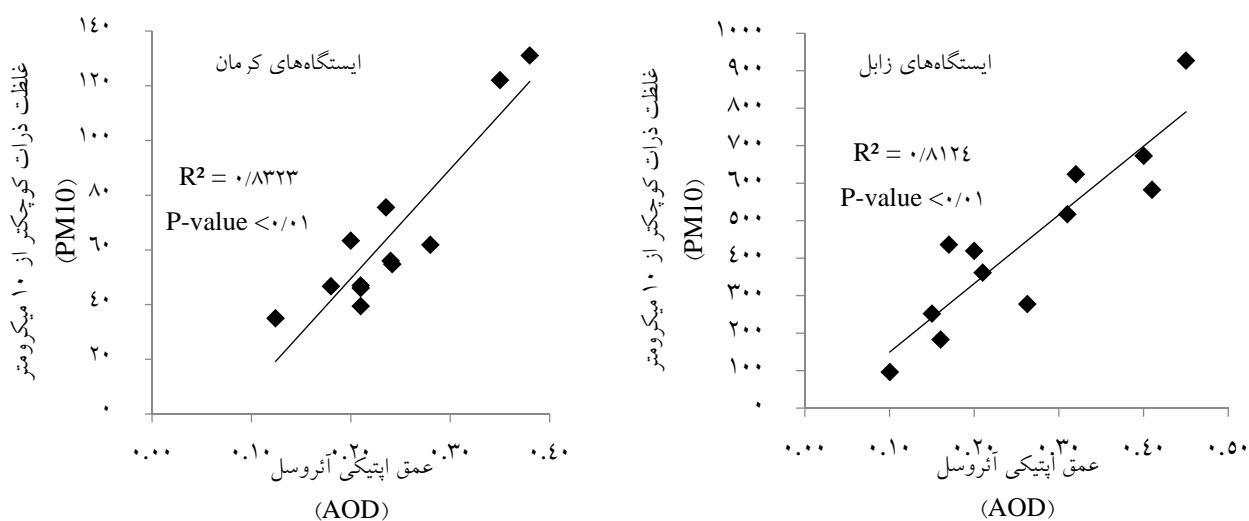
نتایج

اعتبارسنجی داده های عمق اپتیکی آئروسول

نتایج حاصل از اعتبارسنجی عمق اپتیکی آئروسول AOD بر اساس غلظت ذرات PM_{10} ثبت شده در ایستگاه های زاہل و کرمان در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از وجود ارتباط قوی و معنی دار، بین عمق اپتیکی ذرات معلق سنجنده مودیس (AOD) و داده های اندازه گیری زمینی ذرات معلق (PM_{10}) در سطح اطمینان ۹۵ درصد آماری است. لذا می توان این گونه استنباط کرد که داده های AOD از دقت قابل قبولی برای بررسی و تحلیل تغییرات ذرات معلق جو در منطقه مطالعاتی برخوردار هستند.

بازه های زمانی مذکور برای هر یک از ایستگاه های کرمان و زاہل به طور جداگانه انجام گرفت. در مرحله بعد، به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی غلظت آئروسول ها، نقشه های پهنه بندی شده AOD با استفاده از میانگین مقادیر استخراج شده طی دوره آماری مورد بررسی برای هر ایستگاه، به روش وزن دهی فاصله معکوس (IDW) تهیه شدند. روش IDW به عنوان یکی از مناسب ترین روش ها جهت درون یابی و تهیه نقشه غلظت ذرات معلق در مطالعات پیشین ذکر شده است (۲۴). در این روش هر ایستگاه یا نقطه اندازه گیری دارای تأثیر محلی است که با افزایش فاصله کاهش می یابد، به طوری که مکان های نزدیک به نقطه اندازه گیری وزن بیشتری خواهند داشت. در گام بعدی، روند تغییرات زمانی آن ها در مقیاس های زمانی مختلف با استفاده از روش من-کنندال پیش سفید شده مورد بررسی قرار گرفت.

در تحقیق حاضر، ابتدا خودهمبستگی بین داده های AOD با استفاده از روش پیش سفید کردن (Pre-Whitening) که توسط وان استوج (۲۹) ارائه شده است، حذف گردید. پس از حصول اطمینان از عدم وجود خودهمبستگی بین داده ها با استفاده از آزمون فیلیپس پرون (Phillips-perron) ($p\text{-value} < 0.05$)، آزمون من-کنندال بر روی مقادیر AOD بدون روند اعمال گردید. آزمون من-کنندال یک روش غیر پارامتری محسوب می شود که به طور متداول و گسترده ای در تحلیل روند سری های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار گرفته شده است (۹ و ۱۲). از نقاط قوت این روش می توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی کنند، اشاره نمود (۲۷). اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری های زمانی مشاهده می گردد نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری زمانی داده ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده ها است. در روش من-کنندال فرض بر این است که یک سری زمانی به صورت x_1, x_2, \dots, x_n وجود دارد. آماره آزمون من-کنندال با

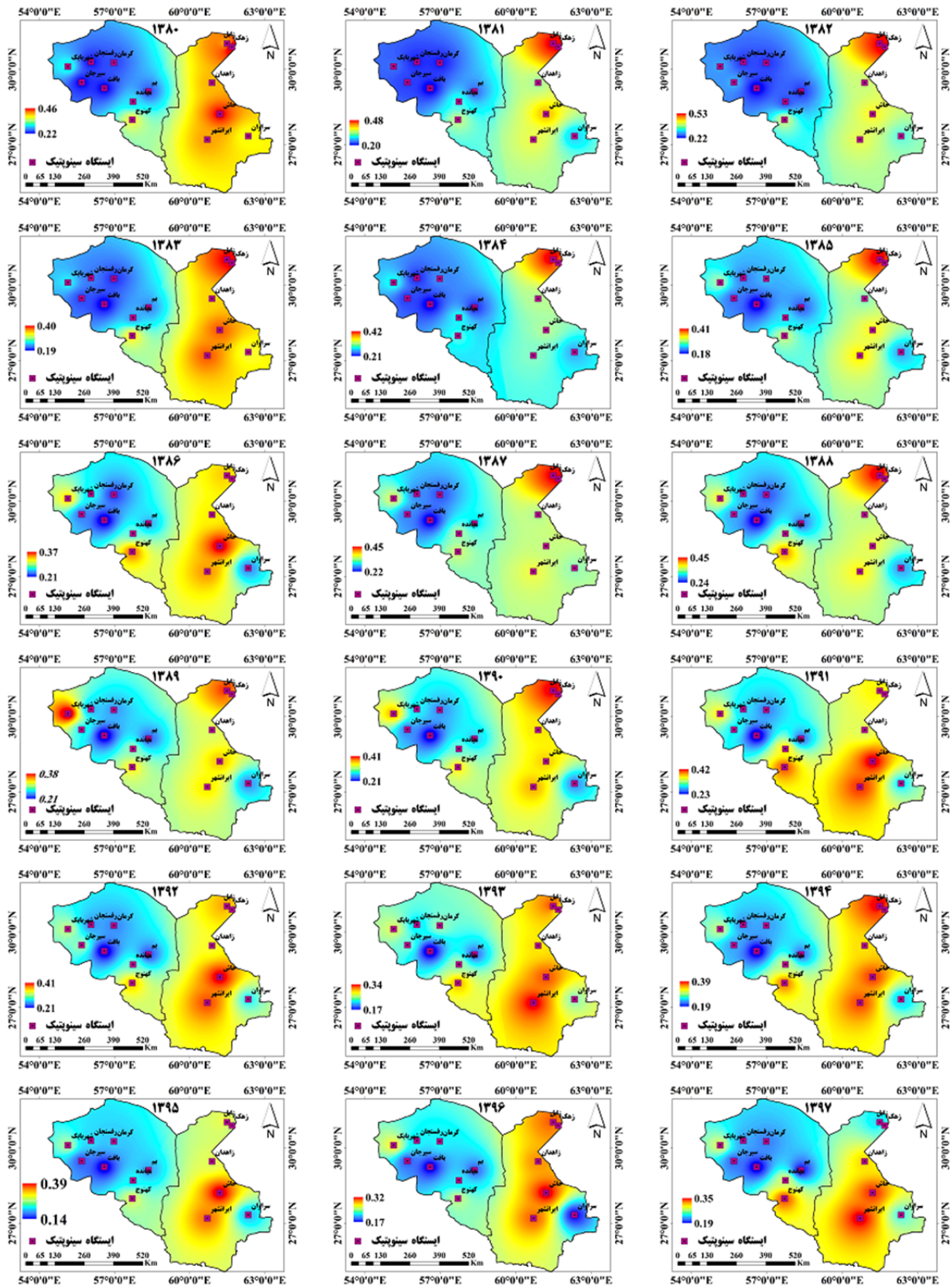


شکل ۲. ضرایب تبیین بین مقادیر متوسط عمق اپتیکی آئروسول‌ها (AOD) و غلظت ذرات معلق (PM10) در ایستگاه‌های مورد مطالعه
 Fig. 2. Determination coefficients of averaged aerosol optical depth (AOD) and PM10 concentration in the stations of study area

در طول دوره آماری از نظر غلظت مواد معلق در وضعیت بحرانی‌تر نسبت به دیگر نواحی قرار دارند. نقشه پراکنش مکانی AOD همچنین نشان می‌دهد که در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۷ سطح بیشتری از منطقه مطالعاتی تحت تأثیر ذرات معلق بوده است، در حالی که در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۴، ۱۳۸۵، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ سطح کمتری از منطقه مطالعاتی در معرض غبار آلودگی ناشی از این ذرات بوده است. به طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد استان سیستان بلوچستان به دلیل شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی نسبت به استان کرمان سهم بیشتری در ایجاد ذرات معلق جو در منطقه دارد. به بیان دیگر بخش شرقی محدوده مطالعاتی و همچنین نواحی اطراف این ناحیه، تأثیری بیشتری در افزایش ذرات معلق جو دارند.

تغییرات مکانی AOD در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

توزیع مکانی AOD در سطح منطقه مطالعاتی با استفاده از روش IDW طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، نواحی غربی و مرکزی که شامل ایستگاه‌های کرمان، بافت، سیرجان و رفسنجان است کمترین میزان AOD را به خود اختصاص داده‌اند. این در حالی است که نواحی شمال شرقی، شرق و جنوبی در استان سیستان بلوچستان، تحت تأثیر غلظت بالاتری از ذرات معلق قرار گرفته‌اند. میزان AOD در دوره آماری بین ۰/۱۴ تا ۰/۵۳ متغیر بوده است که به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۸۲ وقوع یافته است. بررسی مقادیر سالانه AOD در سطح منطقه نشان داد، ایستگاه‌های زابل و زهک واقع در شمال شرق منطقه مطالعاتی در مرز ایران و افغانستان،



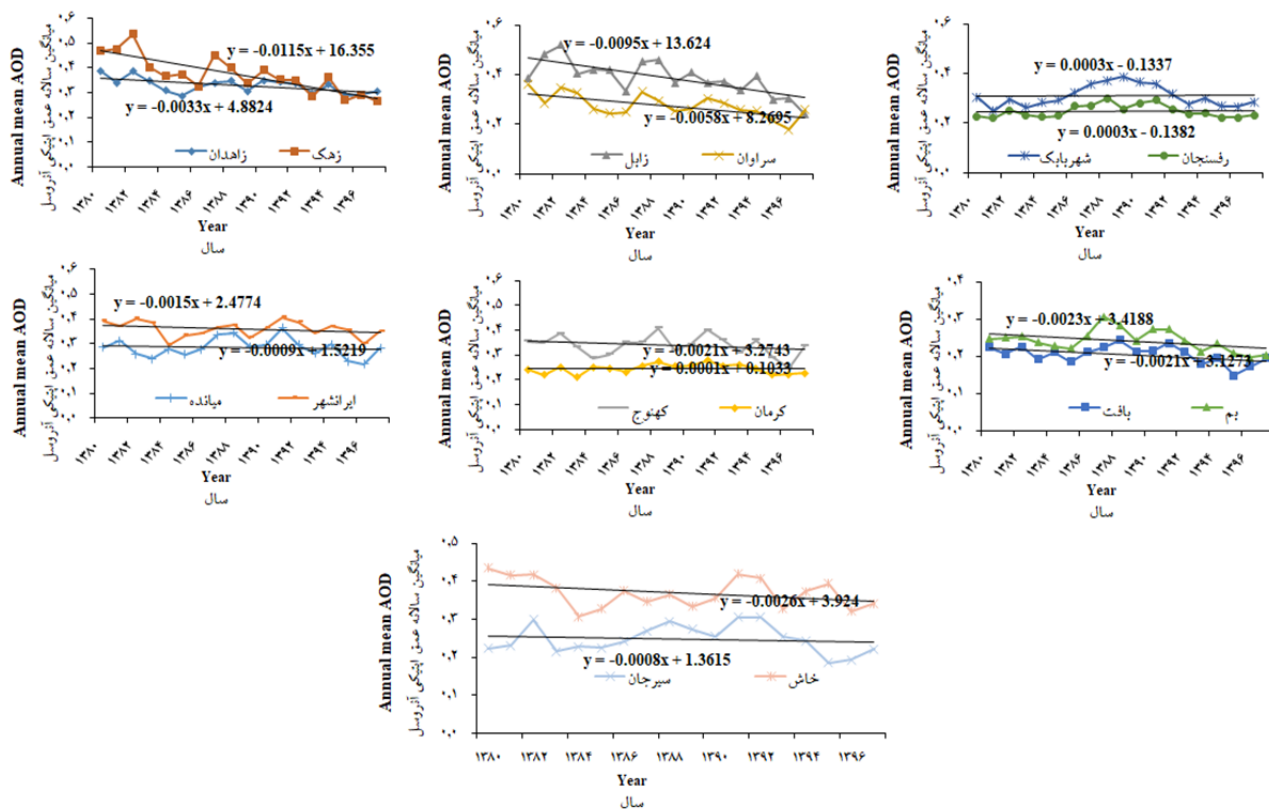
شکل ۳. توزیع مکانی عمق اپتیکی آئروسل در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ در منطقه مطالعاتی

Fig. 3. Spatial distribution of Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018 at the study area

تغییرات زمانی AOD طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

سری‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه با محاسبه میانگین حسابی مقادیر AOD روزانه در تمام ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مطالعاتی طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ به دست آمدند. شکل ۴ مقادیر میانگین سالانه AOD را در تمام ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی برای دوره آماری مذکور نشان می‌دهد. همان‌طور که مقادیر سری زمانی سالانه AOD در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد تغییرات مشخصی در دوره آماری موردبررسی وجود ندارد. به‌طوری‌که از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲

تقریباً در تمام ایستگاه‌ها میزان ذرات معلق جو روند افزایشی داشته است. درحالی‌که در بازه زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ و ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ نسبت به سال‌های ماقبل مقدار AOD کاهش‌یافته است. همچنین نتایج این بررسی نشان داد میزان مواد معلق جو در سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۸۲، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱ در منطقه مطالعاتی به بالاترین مقدار رسیده است که ایستگاه‌های زابل، زهک، زاهدان، خاش و ایرانشهر به ترتیب بیشترین مقدار AOD را در دوره آماری دارا می‌باشند.

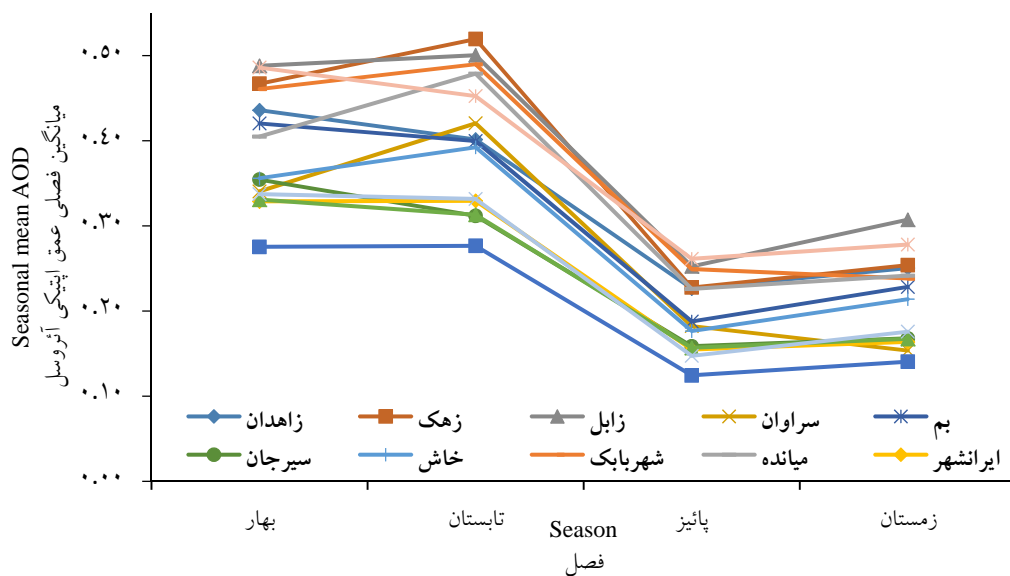


شکل ۴. روند تغییرات عمق اپتیکی آئروسول در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Fig. 4. Trend Changes of Aerosol Optical Depth (AOD) during the period of 2001-2018 at the study stations

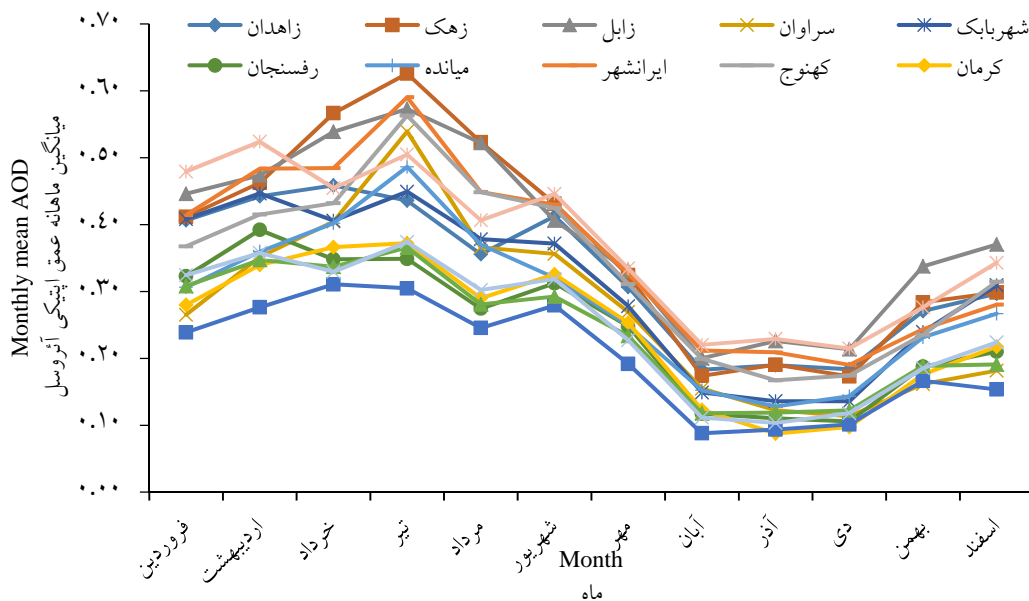
مطالعاتی نشان داد (شکل ۶) روند افزایشی ذرات معلق جو از فروردین‌ماه شروع شده، در تیرماه این مقدار به حداکثر رسیده و سپس از مرداد روند کاهشی داشته است. همچنین حداکثر مقادیر AOD به ترتیب برای ماه‌های تیر، اردیبهشت و خرداد تخمین زده شده است.

میانگین طولانی مدت فصلی و ماهانه AOD در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. مقادیر میانگین AOD فصلی (شکل ۵) نشان می‌دهد که در تابستان و بهار، غلظت مواد معلق به بیشترین حد رسیده درحالی‌که در پائیز و زمستان این مقدار به حداقل رسیده است. میانگین AOD ماهانه در تمام ایستگاه‌های



شکل ۵. مقادیر عمق اپتیکی آئروسول فصلی در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Fig. 5. Values of seasonal Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018



شکل ۶. مقادیر عمق اپتیکی آئروسول ماهانه در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Fig. 6. Values of monthly Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018

در اکثر ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی به‌استثنای رفسنجان دارای روند کاهشی بوده، که تنها در ایستگاه‌های زاهدان، زهک، زابل، سراوان و بم در سطح ۵ درصد کاهشی و معنی‌دار بوده است (جدول ۱). بررسی مقادیر میانگین سالانه AOD

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات با استفاده از آزمون من-کندال در مقیاس‌های زمانی سالانه، ماهانه و فصلی به ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۱، غلظت ذرات معلق جو در مقیاس سالانه

حاکمی از آن است که غلظت ذرات معلق در ایستگاه‌های شهر بابک، میانده، ایرانشهر، کهنوج، بافت، بم و سیرجان طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ روند افزایشی داشته و از سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ از مقدار ذرات معلق جو کاسته شده است. در حالی که میزان ذرات معلق جو در ایستگاه‌های زاهدان، زابل و زهک به‌عنوان مناطقی که دارای بالاترین مقدار AOD در منطقه مطالعاتی می‌باشند، روند کاهشی منظمی را در بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهند.

جدول ۱. نتایج آزمون روند من- کندال عمق اپتیکی آئروسول سالانه در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Table 1. Results of mann- kendall trend test for annual Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018

ایستگاه	آماره من- کندال	سطح معنی داری	ایستگاه	آماره من- کندال	سطح معنی داری
Station	Z- value	P value	Station	Z- value	P value
زاهدان Zahedan	-۲/۱۹	۰/۰۲	کهنوج Kahnoj	-۰/۸۳	۰/۴۱
زهک Zahak	-۳/۷۱	۰	کرمان Kerman	۰/۵۳	۰/۵۹
زابل Zabol	-۳/۰۳	۰/۰۰۲	کنارک Konarak	-۱/۵۹	۰/۱۱
سراوان Saravan	-۲/۶۵	۰/۰۰۸	بافت Baft	-۱/۵۱	۰/۱۳
شهر بابک Shahr Babak	۰	۱	بم Bam	-۱/۹۷	۰/۰۴۹
رفسنجان Rafsanjan	۰/۳	۰/۷۶	سیرجان Sirjan	۰	۱
میانده Myandeh	-۰/۰۷۶	۰/۹۴	خاش Khash	-۱/۴۴	۰/۱۵
ایرانشهر Iranshahr	-۱/۰۶	۰/۲۸			

مقادیر آماره آزمون من- کندال AOD در مقیاس ماهانه نشان داد ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مهر به ترتیب دارای بیشترین فراوانی روند معنی دار طی دوره آماری در منطقه مطالعاتی می‌باشند. روند ماهانه AOD نیز حاکی از تغییرات کاهشی غلظت مواد معلق طی دوره آماری است. به طوری که در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، آبان و اسفند طی دوره آماری در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی غلظت مواد معلق روند کاهشی داشته است. باین حال ماه‌های فروردین، دی، بهمن، مهر و شهریور فراوانی روند افزایشی غلظت ذرات معلق در ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی نسبت به دیگر ماه‌های سال بیشتر است. همچنین غلظت مواد معلق جو در ایستگاه‌های زابل و زهک در تمام ماه‌های سال و در ایستگاه‌های زاهدان، سراوان، ایرانشهر، کهنوج، بافت، بم و خاش در بیش از ۵۰ درصد سال، سیر نزولی داشته است. در حالی که در ایستگاه‌های رفسنجان، میانده، شهر بابک، کرمان و سیرجان روند افزایشی غلظت مواد معلق در ۶ ماه از سال اتفاق افتاده است.

مقادیر آماره آزمون من- کندال AOD در مقیاس ماهانه نشان داد ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مهر به ترتیب دارای بیشترین فراوانی روند معنی دار طی دوره آماری در منطقه مطالعاتی می‌باشند. روند ماهانه AOD نیز حاکی از تغییرات کاهشی غلظت مواد معلق طی دوره آماری است. به طوری که در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، آبان و اسفند طی دوره آماری در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی غلظت مواد معلق روند کاهشی داشته است. باین حال ماه‌های فروردین، دی،

جدول ۲. نتایج آزمون روند من- کندال عمق اپتیکی آئروسول ماهانه در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Table 2. Results of mann- kendall trend test for monthly Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018

ایستگاه Station	فروردین Apr	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر Jul	مرداد Aug	شهریور Sep	مهر Oct	آبان Nov	آذر Dec	دی Jan	بهمن Feb	اسفند Mar
زاهدان Zahedan	۰/۹۱	-۲/۳۴	-۱/۹	-۱/۳	-۱/۹	-۱/۷۴	-۰/۹۱	-۱/۶	-۰/۳	۰/۷۵	۰/۵۳	-۰/۴
زهاک Zahak	-۰/۶۸	-۳/۱	-۲/۶	-۳/۴	-۱/۴۳	-۳/۳	-۲/۲	-۱/۴۳	-۱/۰۶	-۱/۱	-۱/۳۶	-۱/۱۳
زابل Zabol	-۱/۵۱	-۲/۸۷	-۲/۷۸	-۳/۱	-۱/۲۱	-۱/۵۹	-۰/۹۸	-۱/۲۸	-۱/۶۶	-۱/۱۳	-۰/۹۸	-۱/۱۳
سراوان Saravan	-۱/۰۶	-۲/۳۴	-۱/۶۶	-۰/۴۵	-۱/۱۳	-۲/۸	۰/۳	-۰/۲۲	۰/۳۸	-۰/۲۲	۰/۰۷۶	-۲/۴۲
شهربابک ShahrBabak	۱/۵۹	۰/۶۱	-۰/۶۸	-۰/۹۱	-۰/۲۲	۱/۲۱	۰/۲۲	۰	۱/۲۱	۲/۵	-۰/۳۸	-۰/۳
رفسنجان Rafsanjan	۱/۱۳	-۰/۳	-۰/۹۱	-۱/۲۱	-۰/۶۸	۱/۰۶	۱/۹	-۰/۱۵	-۰/۲۲	۱/۵۱	۱/۰۶	۰
میاندو Myandeh	۲/۴۲	۱/۳۶	-۱/۴۳	-۱/۰۶	-۲/۴۲	۱/۰۶	۰/۹۱	-۱/۵۹	۰/۰۷۶	۰/۴۵	-۰/۰۷	-۱/۰۶
ایرانشهر Iranshahr	۱/۵۱	-۰/۲۲	-۱/۷۴	-۱/۴۴	-۱/۶۶	-۱/۵۹	۰/۴۵	-۰/۳۷	-۰/۰۷	۱/۰۶	۱/۵۱	-۰/۳
کهنوج Kahnoj	۰/۶۸	-۰/۱۵	-۱/۲۱	۰/۰۷۶	-۰/۱۵	-۱/۵۱	-۰/۳۰	-۱/۷۴	-۰/۹۱	۱/۵۱	-۰/۱۵	-۰/۶۸
کرمان Kerman	۱/۶۶	۰	-۱/۱۳	-۰/۶۸	-۰/۳۸	۱/۱۳	۲/۶۵	۰	۰/۲۲	-۰/۴۵	-۰/۱۵	۰/۶
بافت Baft	۱/۰۶	-۱/۵۱	-۱/۷۴	-۱/۶۶	-۱/۳۶	-۱/۲۸	-۱/۲۱	-۲/۶۵	-۰/۵۳	۱/۰۶	۰/۴۵	-۱/۶۶
بم Bam	۰/۳۸	۰/۳۱	-۱/۸۹	-۱/۷۴	-۱/۸۱	-۰/۲۲	-۰/۲۲	-۲/۲۷	-۰/۷۵	۰/۹۸	۰/۲۶	-۱/۱۳
سیرجان Sirjan	۱/۰۶	-۰/۷۵	-۱/۰۶	-۰/۴۵	-۰/۳۱	۱/۳۶	۰/۶۸	-۰/۹۸	-۱/۲۱	-۰/۳	۰/۴۵	۰/۲۲
خاش Khash	-۰/۱۵	-۱/۲۱	-۱/۴۳	-۱/۱۳	-۱/۵۱	۰/۷۶	-۰/۰۷	-۰/۳۱	۰	۱/۹۵	۰	-۰/۱۵

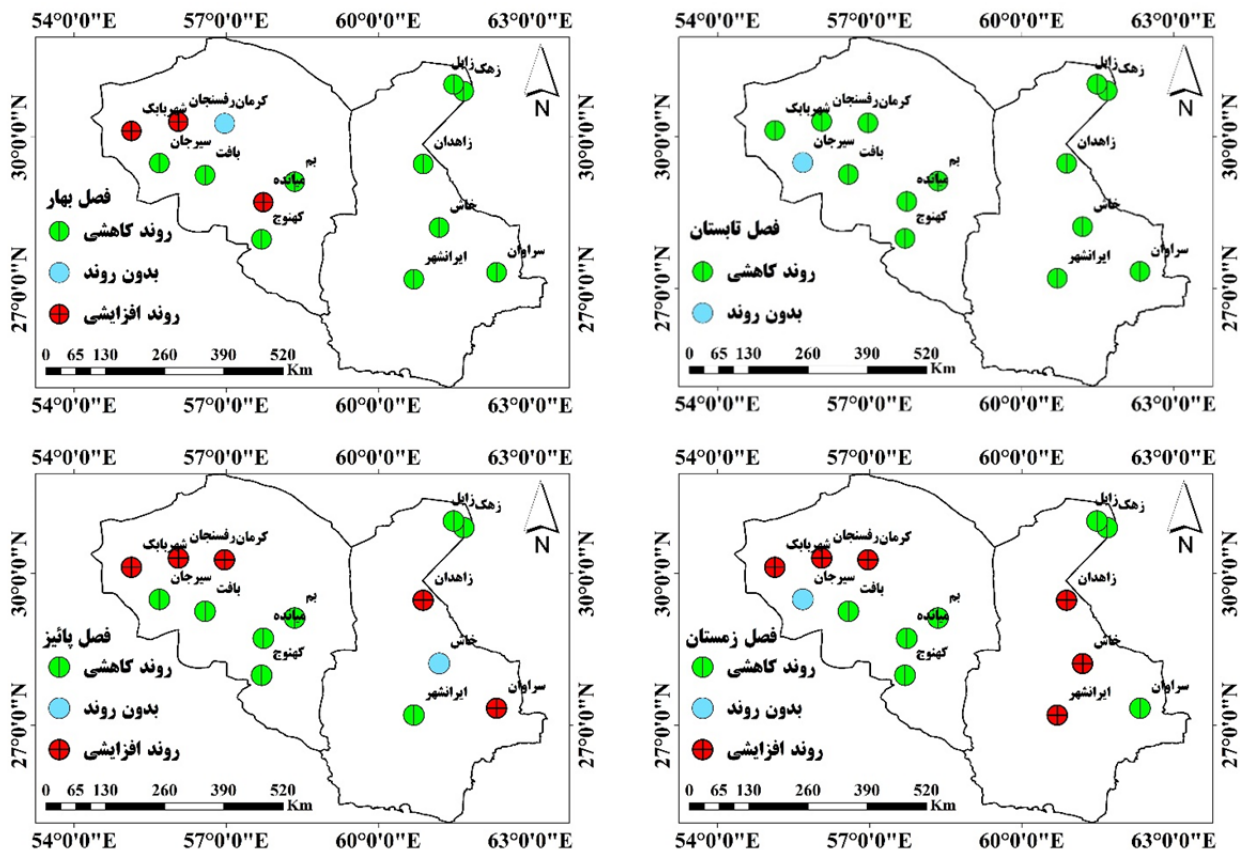
بوده است. شکل ۷ روند فصلی شاخص AOD را در سطح منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است روند کاهشی غلظت ذرات معلق جو در مقیاس فصلی طی دوره آماری درصد بالاتری را در سطح منطقه نسبت به روند افزایشی نشان می‌دهد.

نتایج بررسی روند تغییرات فصلی AOD نیز حاکی از روند کاهشی غلظت مواد معلق جو به‌ویژه در فصول تابستان و بهار است (جدول ۳). به‌طوری‌که در تابستان تمام ایستگاه‌ها به‌استثنای سیرجان دارای روند کاهشی بوده‌اند. در فصل پاییز فقط برای ایستگاه کرمان، تغییرات AOD دارای روند افزایشی

جدول ۳. نتایج آزمون روند من- کندال عمق اپتیکی آئروسول فصلی در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Table 3. Results of mann- kendall trend test for seasonal Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018

ایستگاه Station	بهار Spring		تابستان Summer		پائیز Autumn		زمستان Winter	
	آماره من- کندال Z value	سطح معنی داری P value	آماره من- کندال Z value	سطح معنی داری P value	آماره من- کندال Z value	آماره من- کندال Z value	سطح معنی داری P value	آماره من- کندال Z value
	زاهدان Zahedan	-۲/۲۷	۰/۰۲	-۱/۸۱	۰/۰۶	۰/۹	۰/۳۶	۰/۳۷
زهک Zahak	-۲/۹۵	۰/۰۰۳	-۳/۴۹	۰/۰۰۱	-۲/۸۷	۰/۰۰۴	-۱/۹۷	۰/۰۴۹
زابل Zabol	-۳/۱۸	۰/۰۰۱	-۲/۱۲	۰/۰۳	-۲/۴۲	۰/۰۱	-۱/۱۲	۰/۲۲
سراوان Saravan	-۲/۳۴	۰/۰۱۹	-۲/۵۷	۰/۰۱۵	۰/۰۷۶	۰/۹۴	-۱/۱۳	۰/۲۵
شهر بابک ShahrBabak	۰/۶۸	۰/۴۹	-۰/۳	۰/۷۶	۰/۲۲	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۴۴
رفسنجان Rafsanjan	۰/۱۵	۰/۸۸	-۰/۶	۰/۵۴	۱/۲۸	۰/۱۹	۰/۹۸	۰/۳۲
میانده Myandeh	۰/۸۳	۰/۴	-۱/۱۳	۰/۲۵	-۰/۶۸	۰/۴۹	-۰/۳۸	۰/۷۱
ایرانشهر Iranshahr	-۰/۷۵	۰/۴۴	-۲/۱۹	۰/۰۲۱	-۰/۰۷	۰/۹۴	۱/۵۹	۰/۱۱
کهنوج Kahnoj	-۰/۲۲	۰/۸۲	-۰/۹۸	۰/۳۲	-۱/۷۴	۰/۰۸	-۰/۴۵	۰/۶۴
کرمان Kerman	۰	۱	-۰/۶۸	۰/۹۴	۱/۹۷	۰/۰۴	۰/۰۷۶	۰/۹۴
بافت Baft	-۱/۴۳	۰/۱۵	-۱/۷۴	۰/۰۸	-۲/۵	۰/۰۱۲	-۰/۶۱	۰/۵۴
بم Bam	-۰/۹۱	۰/۳۶	-۲/۲۷	۰/۰۲	-۲/۲	۰/۰۲	-۰/۵۳	۰/۵۹
سیرجان Sirjan	-۰/۱۵	۰/۸۸	۰	۱	-۰/۲۲	۰/۸۸	۰	۱
خاش Khash	-۱/۲۸	۰/۱۹	-۲/۰۴	۰/۰۴	۰	۱	۰/۶۸	۰/۴۹



شکل ۷. روند تغییرات فصلی عمق اپتیکی آئروسول در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷

Fig. 7. Seasonal trend changes of Aerosol Optical Depth (AOD) in the period of 2001- 2018

AOD و PM10 به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۶ به دست آمده است. نتایج تحقیق نشان داد میانگین AOD در مقیاس سالانه بین ۰/۱۴ تا ۰/۵۳ متغیر است که بالاترین مقدار AOD در سال ۱۳۸۲ و حداقل مقدار آن در سال ۱۳۹۵ اتفاق افتاده است. بررسی روند سالانه AOD نشان داد در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی غلظت مواد معلق سیر نزولی دارد. سیر نزولی میزان ذرات معلق جو می‌تواند به دلیل کاهش وقایع گردوغبار به دلیل افزایش سطح پوشش گیاهی در منطقه باشد (۱، ۱۵ و ۱۶). روند کاهشی در ایستگاه‌های زابل، زهک و زاهدان با وجود اینکه دارای بالاترین مقدار AOD طی دوره آماری در سطح منطقه بودند، از ابتدای دوره (سال ۱۳۸۰) اتفاق افتاده است. در حالی که تغییرات AOD در ایستگاه‌های شهربابک، میانه، ایرانشهر، کهنوج، بافت، بم و سیرجان از ابتدای دوره

بحث و نتیجه‌گیری

داده‌های AOD به دلیل گستره زمانی و مکانی، امکان پایش تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق را فراهم می‌کنند. یکی از منابع اطلاعاتی موجود برای دسترسی به این داده‌ها، سنجنده مودیس است. براساس نتایج تحقیق حاضر رابطه قابل قبولی میان محصول AOD سنجنده مودیس و داده‌های PM10 اندازه‌گیری شده در منطقه مطالعاتی برقرار است. مطالعات پیشین نیز دقت داده‌های AOD سنجنده مودیس را برای بررسی تغییرات ذرات معلق تأیید کرده‌اند (۵، ۱۷ و ۲۱). به‌عنوان نمونه رجبلو و همکاران (۲۱) وجود همبستگی قابل قبول میان داده‌های AOD و PM10 را به‌منظور تحلیل کیفی هوای شهر تهران تأیید کردند. در این مطالعه ضریب تبیین و مجذور مربعات خطای حاصل از تطابق بین داده‌های

در سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری از مدیران و تصمیم‌گیرندگان بوده است، توانسته نقش بسزایی در کاهش آلودگی غلظت هواویزها در این منطقه از کشور داشته باشد. برای مناطقی که به‌ویژه در فصول پاییز و زمستان روند افزایشی از غلظت ذرات معلق را تجربه کرده‌اند نیز پیشنهاد می‌شود که عوامل مؤثر بر این تغییرات به‌دقت در پژوهش‌های آتی موردبررسی قرار گیرد و راهکارهای مناسب برای کاهش خطرات ناشی از افزایش غلظت ذرات معلق ارائه شود.

References

1. Aloysius M, Mohan M, Suresh Babu S, Parameswaran K, Krishna Moorthy K. 2009. Validation of MODIS derived aerosol optical depth and an investigation on aerosol transport over the South East Arabian Sea during ARMEX-II. In: *Annales Geophysicae*, vol 6. Copernicus GmbH, pp 2285-2296. www.ann-geophys.net/2227/2285/2009/.
2. Amanollahi J, Kaboodvandpour S, Abdullah AM, Ramli MF. 2011. Accuracy assessment of moderate resolution image spectroradiometer products for dust storms in semiarid environment. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8(2): 373-380. doi:<https://doi.org/10.1007/BF03326224>.
3. Ahmadi M, Shakiba A, Dadashi A. 2019. Investigating the role of vegetation indices and geographic components on seasonal aerosol optical depth over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(1): 211- 233. (In Persian)
4. Arjmand M, Rashki A, Sargazi H. 2018. Monitoring of spatial and temporal variability of desert dust over the Hamoun e Jazmuriyan, Southeast of Iran based on the Satellite Data. *Geographical Information*, 27(106): 153- 168. (In Persian)
5. Bartina H, Sayyad Gh, Matinfar H, Hojati S. 2014. Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosols in western part of Iran based on MODIS spectral data. *Water and Soil Conservation*, 21(4): 119- 137. (In Persian)
6. Chen B, Yamada M, Iwasaka Y, Zhang D, Wang H, Wang Z, Lei H, Shi G. 2015. Origin of non-spherical particles in the boundary layer over Beijing, China: based on balloon-borne observations. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(5): 791-800. doi:<https://doi.org/10.1007/s10653-014-9668-6>.
7. Ghaderi Nasab F, Rahnema MB. 2018. Detection of Dust Storms in Jazmoriyan Drainage Basin Using Multispectral Techniques and MODIS Image. *Physical Geography Research Quarterly*, 50(105): 545- 562. (In Persian)

آمار، سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ افزایشی بوده و از اواسط دوره، سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۷ سیر نزولی یافته است. روند افزایشی AOD طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ در این مناطق می‌تواند به دلیل وقوع خشک‌سالی‌های شدید در اوایل این دوره (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳) باشد. مقادیر میانگین ماهانه و فصلی AOD نشان داد غلظت ذرات معلق طی پائیز و زمستان در ماه‌های آبان، آذر و دی و بهمن دارای حداقل مقدار و تابستان و بهار در ماه‌های تیر، خرداد و اردیبهشت دارای حداکثر مقدار است. همان‌طور که محمدپور و همکاران (۱۵) نیز در مطالعه خود غلظت بالای AOD را در ماه‌های تیر، خرداد و اردیبهشت در تحلیل گردوغبارهای غرب کشور تأیید کردند. این در حالی است که روند تغییرات زمانی AOD در مقیاس فصلی و ماهانه نیز در اکثر ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی طی دوره آماری، کاهش است. نتایج این بخش از تحقیق حاضر با یافته‌های سلیمانی و همکاران (۲۶) و نامداری و همکاران (۱۸) مطابقت دارد. نتایج این مطالعات نشان داد غلظت مواد معلق در فصل تابستان به دلیل خشک شدن فصلی دریاچه هامون و همچنین وزش بادهای لوار در منطقه سیستان نسبت به دیگر فصول بالاتر است. به‌طورکلی نتایج تحقیق حاضر نشان داد ناحیه غربی منطقه مطالعاتی که در استان کرمان واقع شده است با غلظت کمتری از ذرات معلق نسبت به نواحی شرقی واقع در استان سیستان بلوچستان، طی دوره آماری مواجهه بوده است. درواقع متفاوت بودن شرایط اقلیمی بخش شرقی، موقعیت جغرافیایی منطقه، توپوگرافی مسیر حرکت توده گردوغبار و همچنین وزش بادهای ۱۲۰ روزه در این نواحی می‌تواند یکی از دلایل بالاتر بودن غلظت مواد معلق در این ناحیه باشد (۲). همان‌طور که آلویسیوس و همکاران (۱) در مطالعات خود ذکر کردند تغییرات AOD به منشأ و مسیر حرکت توده ذرات معلق همانند گردوغبار بیابان، نمک دریا، آلودگی‌های صنعتی وابسته است. به‌طورکلی، کاهش مقادیر مربوط به غلظت آئروسول‌ها در برخی از مناطق موردبررسی در این پژوهش می‌تواند بیانگر بهبود کیفیت هوای این مناطق باشد. به نظر می‌رسد اعمال روش‌های اجرائی و مدیریتی مناسب در این منطقه از کشور که

8. Hsu N, Gautam R, Sayer A, Bettenhausen C, Li C, Jeong M, Tsay S, Holben B. 2012. Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010. NASA Goddard Space Flight Center; Greenbelt, MD, United States, 34p. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120012819>.
9. Kendall M. 1975. Rank correlation methods (4th edn.) Charles Griffin. San Francisco, CA, 8. 325p.
10. Khoshsima M, Ali Akbari Bidokhti A, Givi F. 2013. Evaluation of aerosol optical depth using visibility and remote sensing data in urban and semi urban areas in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 39(1): 163- 174. (In Persian)
11. Li Z, Xia X, Cribb M, Mi W, Holben B, Wang P, Chen H, Tsay SC, Eck T, Zhao F. 2007. Aerosol optical properties and their radiative effects in northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D22). doi:<https://doi.org/10.1029/2006JD007382>.
12. Mann HB. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*: 245-259.
13. Meshkizadeh P, Orak N, Morshedi J. 2016. Assessment and compare the spatial-temporal distribution of aerosol optical depth (AOD) in the Khuzestan province, using remote sensing (RS). *Journal of Geography and Environmental Studies*, 5(17): 69- 78. (In Persian)
14. Mobasheri M, Ghorbani R, Rahimzadegan M. 2012. Assessment of the MODIS Data Ability in Quantitative and Qualitative Analysis of Air Quality in Urban Area. *Journal of Climate Research*, 1(3): 59- 72. (In Persian)
15. Mohammadpour K, Saligheh M, Darvishi Bloorani A, Raziei T. 2020. Analysis and comparing satellite products and simulated of AOD in west Iran (2000-2018). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazard*, 7(1): 15- 32.
16. Mishchenko MI, Geogdzhayev IV. 2007. Satellite remote sensing reveals regional tropospheric aerosol trends. *Optics express*, 15(12): 7423-7438.
17. Nabavi SO, Haimberger L, Abbasi E. 2019. Assessing PM_{2.5} concentrations in Tehran, Iran, from space using MAIAC, deep blue, and dark target AOD and machine learning algorithms. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3): 889- 903.
18. Namdari S, Valizade KK, Rasuly AA, Sari Sarraf B. 2016. Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 191. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-015-2029-7>.
19. Pineda-Martinez LF, Carbajal N, Campos-Ramos AA, Noyola-Medrano C, Aragón-Piña A. 2011. Numerical research of extreme wind-induced dust transport in a semi-arid human-impacted region of Mexico. *Atmospheric Environment*, 45(27): 4652-4660. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.056>.
20. Qin W, Liu Y, Wang L, Lin A, Xia X, Che H, Bilal M, Zhang M. 2018. Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over mainland China during 1980–2017. *Remote Sensing*, 10(7): 1064. <https://doi.org/10.3390/rs10071064>.
21. Rajablou A, Agha Mouhammadi H, Rahimzadegan M, Rajaei MA. 2020. Analysis and zonation map of Tehran air quality monitoring data using ground and Rs. *Journal of GIS & RS Application in Planning*, 9(4): 70- 82 (In Persian)
22. Ramanathan V, Crutzen PJ. 2003. New directions: Atmospheric brown clouds. *Atmospheric Environment* (1994), 37(28): 4033-4035.
23. Rashki A, Kaskaoutis DG, Eriksson PG, de W. Rautenbach CJ, Flamant C, Abdi Vishkaee F. 2014. Spatio-temporal variability of dust aerosols over the Sistan region in Iran based on satellite observations. *Natural Hazards*, 71(1): 563-585. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-013-0927-0>.
24. Sajjadi SA, Zolfaghari Gh, Adab H, Allahabadi A, Delsouz M. 2017. Measurement and modeling of particulate matter concentrations: applying spatial analysis and regression techniques to assess air quality. *MethodsX*, 4: 372-390. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2017.09.006>.
25. Sayer AM, Hsu N, Bettenhausen C, Jeong MJ. 2013. Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 “Deep Blue” aerosol data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14): 7864-7872. doi:<https://doi.org/10.1002/jgrd.50600>.
26. Soleimani A, Asgari M, Dadelahi A, Elmizadeh H, Khazaie H. 2016. Evaluation of optical depth from MODIS satellite imagery in the Persian Gulf. *Marine Science and Technology*, 14(4): 75- 83. (In Persian)
27. Srivastava A, Saran S. 2017. Comprehensive study on AOD trends over the Indian subcontinent: a statistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 38(18): 5127-5149. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1323284>.
28. Tabatabaei T, Karbassi AR, Moata F, Monavari SM. 2015. Multivariate geostatistical analysis in assessment of aerosols (Case study: Bushehr). *RS & GIS for Natural Resources*, 5(4): 35- 46 (In Persian).
29. Von Storch H. 1999. Misuses of Statistical Analysis in Climate Research. In, Berlin, Heidelberg, Analysis of Climate Variability. Springer Berlin Heidelberg, pp 11-26. https://doi.org/10.1007/1978-1003-1662-03744-03747_03742.
30. Yousefi R, Wang F, Ge Q, Shaheen A. 2020. Long-term aerosol optical depth trend over Iran and identification of dominant aerosol types. *Science of the Total Environment*, 722:137906. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137906>.



Investigation of spatial and temporal changes in atmospheric aerosol using aerosol optical depth in Southeastern Iran

Maryam Mirakbari, Zohre Ebrahimi Khusfi

Received: 26 September 2019 / Accepted: 14 May 2020
Available online 24 August 2020

Abstract

Background and Objective The Aerosol Optical Depth index is one of the most commonly used indicators for assessing air pollution in various regions, especially arid and semi-arid areas. The arid and semi-arid regions are the main sources of dust particles. Due to locating in the arid and semi-arid region, Iran faces dust storms several times over the year, which have caused irreparable environmental and socio-economic damages to different parts of the country. The southeastern of Iran is one of these regions that is affected by dust storms in the first half of the year (early spring to late summer) due to 120-day winds, and large amounts of sand and dust particles enter the atmosphere each year. Therefore, it is important to study the temporal and spatial changes of suspended particles in the atmosphere, of which dust is a major part of aerosols in these regions. In fact, knowing the temporal and spatial changes of suspended particles can be helpful in providing appropriate solutions to reduce the damages caused by these particles.

In this study, due to lack of ground-based aerosol gauge station, aerosol optical depth feature was considered based on the Aerosol Optical Depth (AOD) product of MODIS sensor to monitor and analyze spatial and temporal changes of aerosol concentrations in Iran during a period of 18 years. Annual, monthly and seasonal temporal changes of AOD were investigated using pre-whitening Mann-Kendall trend test.

Materials and Methods The daily MODIS level-4 AOD data have been used in this study. The AOD data were obtained from the earth explorer website USGS in 6570 frames for 2001- 2018 and these data were extracted in NetCDF format with programming in Matlab software as annual, seasonal and monthly time series for 13 synoptic stations in the study area. PM10 concentration data were used to validate the AOD product of MODIS. In order to investigate the temporal and spatial changes of aerosol concentrations. The AOD zoning maps were prepared using inverse distance weighted (IDW) interpolation method based on the mean values of AOD. Based on the IDW method, each point/ station has a local effect that decreases with increasing distance, places close to the measuring point will have more weight. Finally, the temporal trend changes of AOD data were determined using the Mann- Kendall trend test in the different time scales.

M. Mirakbari(✉)¹, Z. Ebrahimi Khusfi²

1. PhD. Graduated of Combating Desertification, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran
e-mail: maryammirakbari@ut.ac.ir

Results and Discussion The results obtained from the validation of AOD data indicated that there was a strong and acceptable relationship between aerosol optical depth and PM10 concentration data at 95% significant level. Therefore, it can be concluded that the AOD data have a good accuracy to investigate and analyze the changes in suspended particles in the atmosphere in the study area. The spatial distribution of AOD in the study area showed that the western and central regions (Kerman, Baft, Sirjan, Rafsanjan) had the lowest concentration of aerosol during the period of 2001- 2018. While, the northeastern, eastern and southern regions (Sistan and Baluchestan province) have been affected by higher concentrations of aerosol. The amounts of AOD have varied from 0.14 to 0.53 in the study period that occurred in the years of 2016 and 2003, respectively. The findings of temporal changes of annual AOD series indicated that the atmosphere suspended particles had the highest amount in the years of 2001, 2003, 2008, 2009 and 2012 at the Zabol, Zahak, Zahedan, Khash and Iranshahr regions, respectively. The seasonal mean AOD had the most concentration in the summer and spring seasons while the autumn and winter had the lowest aerosol concentration. The monthly AOD series showed that the increasing variations of atmosphere suspended particles starts in April and then increases in June and has decreasing changes in July. The results of Mann- Kendall trend test indicated that changes trend of annual aerosol optical depth was decreasing in the most regions except in the Rafsanjan station so that the AOD changes had significant downward trend a 5% level in the Zahedan, Zahak, Zabol, Saravan and Bam stations. The Mann- Kendall statistic of monthly AOD series showed the most frequency of significant trend occurred in May, June, July and October, respectively in the study region. The monthly trend of AOD indicated decreasing changes of aerosol during the study period. As in May, June, July, August, November and February, the concentration of aerosols had a downward trend in the

most study stations. The seasonal changes of AOD showed a decreasing trend in aerosols in the summer and spring, while there was an increasing trend in the autumn season.

Conclusion One of the available sources to access the aerosol optical depth data is the MODIS sensor. Based on our findings, there was an acceptable relationship between AOD product of MODIS and PM10 data obtained from ground-based aerosol gauge stations in the study region. The results of this study showed that the annual mean AOD varied from 0.14 to 0.53 which highest and lowest values occurred in the years of 2003 and 2016, respectively. Annual trend of AOD showed the concentration of aerosols was decreasing in most regions. The decreasing trend can be due to the decline of dust events resulted from an increase in vegetation cover in the study area. The monthly and seasonal mean AOD showed the concentration of aerosols had the lowest value during the autumn and winter in November, December, January and February, while in the summer and spring, the aerosols had the highest concentration in May, June and July. However, the temporal changes of monthly and seasonal AOD were decreasing in the most study regions. Generally, our findings showed the western part of the study area, located in Kerman province, had been faced the lower concentration of aerosols than the eastern part, located in Sistan province, during the study period. In general, the declining of aerosol concentrations in some of the study areas could indicate an improvement in air quality in these regions. It seems that the implementation of appropriate executive and management methods in this region, which has been considered by many managers and decision-makers in recent years, have had a significant effect on the reduction of air pollution.

Keywords: Remote sensing, Land degradation, Mann-Kendall test, Arid regions, Air pollution