

کاربرد داده‌های ضخامت نوری سنجنده مادیس در برآورد غلظت ذرات معلق (مطالعه موردی: شهر تهران)

سمیه رفعتی^{*}، مجتبی رفعتی

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران
۲- کارشناسی ارشد آلودگی محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات

دریافت: ۹۸/۱۰/۷ پذیرش: ۹۹/۱۰/۵

چکیده

در این پژوهش سعی شد با کاربرد مدل رگرسیون و براساس متغیرهای ضخامت نوری هواویزها و پارامترهای هواشناسی، میزان ذرات معلق برآورد و دقت آن ارزیابی شود. برای این منظور داده‌های غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر، داده‌های دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، دید افقی و ابرناکی، ارتفاع لایه مرزی، ضخامت نوری هواویزها حاصل الگوریتم‌های ادغامی دیپ‌بلو و دارک‌تارگت ۰/۵۵۰ نانومتر به‌کار گرفته شد.

نتایج نشان داد میزان نوسانات ذرات معلق که توسط مدل قابل توجیه است تصادفی نیست (در سطح اطمینان ۹۹ درصد)، هرچند که تغییرات توجیه‌شده توسط مدل‌ها کم (۱۶ درصد در فصل گرم و ۲۰ درصد در فصل سرد) است و خطاهای محاسبه‌شده در بخش ارزیابی روشن نمود که مدل‌های ارائه شده، دقت زیادی ندارند. همچنین مشخص شد در فصل گرم متغیر سرعت باد می‌تواند نتایج حاصل از مدل رگرسیون رابطه ضخامت نوری هواویزها و غلظت ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر را بهبود ببخشد و در فصل سرد نیز وجود متغیرهای ارتفاع لایه مرزی و دما در مدل رگرسیون به‌لحاظ آماری قابل قبول است و باعث بهبود نتایج مدل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ذرات معلق، ضخامت نوری هواویزها، مدل رگرسیون، پارامترهای هواشناسی، تهران.



۱- مقدمه

ذرات معلق به تمامی اجزای ریز مایع یا جامدی (به جز آب خالص) گفته می‌شود که در جو زمین پراکنده هستند و اندازه میکروسکوپی یا زیرمیکروسکوپی اما بزرگ‌تر از ابعاد مولکولی دارند. ذرات معلق علاوه بر تأثیرات مخرب زیست‌محیطی، سلامت افراد را به مخاطره انداخته و سبب بروز و تشدید بیماری‌های تنفسی، قلبی و حتی مرگ زودرس می‌شود (موسیوند و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۹۸). برای درک بهتر تأثیرات این ریزذرات لازم است غلظت و توزیع اندازه آن‌ها به صورت منظم پایش شود. روش معمول و مستقیم کسب اطلاعات در مورد ذرات معلق، استفاده از ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی است. اما تعداد این ایستگاه‌ها بسیار کم است. علاوه بر این ذرات هواویزها ممکن است با صعود به طبقات بالای جو از دسترس پایش توسط ایستگاه‌های مذکور خارج شوند. مشاهدات ماهواره‌ای با توجه به قدرت تفکیک زمانی و مکانی قابل قبول می‌توانند این محدودیت‌ها را برطرف نموده و به عنوان مکمل ایستگاه‌های زمینی به کار گرفته شود (رنگزن و همکاران، ۱۳۹۳: ۳۹).

ضخامت نوری هواویزها (AOD)^۱ هواویزهای موجود در ستون جو را نشان می‌دهد و انتگرالی از ضریب کاهش هواویز در یک ستون جوی از سطح زمین تا سطوح بالای اتمسفر است. در حال حاضر داده‌های AOD، توسط الگوریتم‌هایی از تصاویر ماهواره‌ای این سنجنده با کیفیت بالا تولید و در اختیار کاربران قرار می‌گیرند. AOD محیط از طریق الگوریتم هواویز مادیس روی اقیانوس (Tanr & et al., 1997) و روی سطوح خشکی (Kaufman, 1997; Levy & et al., 2010) به دست می‌آید. مقایسه محصولات AOD مادیس با AOD اندازه‌گیری شده در سطح زمین نشان داده است که این داده‌ها، کاملاً دقیق هستند (Chu & et al., 2002; Remer & et al., 2005; Levy & et al., 2007; Remer & et al., 2008; Yu & et al., 2010; Segura & et al., 2015).

الگوریتم بازبایی اطلاعات در مورد هواویزها بر میزان بازتابندگی سطح و بازتابندگی رسیده به سنجنده استوار است (Retalis & et al., 2010: 423). این الگوریتم‌ها از سه الگوریتم مجزا تشکیل شده‌اند، هر کدام به فرضیات مجزایی درباره سطح زمین و نوع هواویزهای مورد انتظار در بالای این سطوح نیاز دارند. الگوریتم‌های دارک تارگت قبل پرتاب ماهواره برای سطوح خشکی دارای پوشش گیاهی (Kaufman, 1997) و نواحی اقیانوسی (Tanr & et al., 1997) توسعه یافتند. این الگوریتم‌ها روی نواحی که در طول موج‌های مرئی بازتاب کمی دارند، بهتر عمل می‌کنند. الگوریتم سوم پس از پرتاب توسعه یافت و به الگوریتم دیپ‌بلو (Gupta & Christopher,)

1. Aerosol Optical Depth

زیادتی دارند و روشن دیده می‌شوند، اما در طول موج فرابنفش (0.41 میکرومتر) بازتاب کمتری دارند و نسبتاً تیره دیده می‌شوند که بازتابی هواویزها را نسبت به طول موج بلندتر مرئی، بهبود می‌بخشد. تانر و همکاران (۱۹۹۶) برای افزایش نسبت سیگنال به نویز پیشنهاد کردند که برآورد هواویزهای مادیس باید در توان تفکیک پایین‌تری (مثل 10 کیلومتر در نادر) نسبت به داده‌های بازتاب طیفی اولیه (500 متر) انجام شود. اگر همه پیکسل‌ها (100 درصد) به‌عنوان آب طبقه بندی شوند، الگوریتم‌های اقیانوسی اجرا می‌شود. اگر پیکسلی (دست‌کم یک پیکسل) به‌عنوان خشکی طبقه‌بندی شود، الگوریتم خشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر چشم‌انداز هیچ پیکسل خشکی نداشته باشد، اما دست‌کم یک پیکسل دیگر (مثل ساحلی یا ساحل دریاچه) داشته باشد، هیچ برآوردی صورت نمی‌گیرد. همچنین مارتینز و همکاران (۲۰۰۲) فیلتر کردن پیکسل‌های ابری را توصیه نمودند.

مقدار AOD می‌تواند با استفاده از مدل‌های تجربی به جرم PM تبدیل شود. چو و همکاران (۲۰۰۳) رابطه همبستگی خطی مناسبی با ضریب رگرسیونی 0.82 بین متوسط روزانه PM10 و AOD محاسبه شده در ایستگاه‌های آنروت را در شمال ایتالیا گزارش کرده‌اند. گاپتا و همکاران (۲۰۰۴) در پنج شهر و ۲۶ ایستگاه اندازه‌گیری PM و سنجنده مادیس اقدام به بررسی رابطه تنگاتنگ بین میانگین AOD و PM2.5 بر مبنای استاندارد کیفیت هوای آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده نموده و رابطه خطی قوی بین این دو به‌دست آوردند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که عدم وجود پوشش ابری، ارتفاع پایین لایه مرزی و رطوبت نسبی پایین سبب افزایش ضریب همبستگی می‌شود. گاپتا و همکاران (۲۰۰۶) داده‌های عمق اپتیکی هواویزهای حاصل از ماهواره مادیس را برای بررسی کیفیت هوا در دو شهر بزرگ پاکستان مورد ارزیابی قرار دادند. لی و همکاران (۲۰۱۱) با کاربرد مدل‌های آماری و AOD غلظت PM2.5 را محاسبه نمودند. آن‌ها مدل‌هایی توسعه دادند که با ترکیب AOD و داده‌های پایش زمینی، غلظت PM2.5 را طی روزهای بدون اندازه‌گیری ماهواره‌ای مثل روزهای ابری نیز پیش‌بینی می‌کرد. مدل ارائه شده در این مطالعه PM2.5 سطحی را با R2 بالا (0.83) و میانگین خطای نسبی پایین ($3/5\%$) پیش‌بینی کرده است. گرگوریک و همکاران (۲۰۱۴) دقت تخمین PM10 را با استفاده از AOD سنجنده مادیس مورد بررسی قرار دادند که به نتیجه قابل قبولی در مورد رابطه AOD سنجنده مادیس و مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه نرسیدند. یو و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل غیرخطی تجربی برای پیش‌بینی PM10 سطح زمین توسعه دادند. مدل غیرخطی براساس داده‌های یک



دوره سه ساله (۲۰۱۱-۲۰۱۳) حاصل از ۱۳ ایستگاه پایش PM10 در منطقه، عمق ضخامت نوری (AOD) به دست آمده از سنجنده مادیس، داده‌های سطحی هواشناسی و داده‌های بازکاوی NCEP/NCAR بوده است. نتایج این مطالعه نشان داد کاربرد مدل غیرخطی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی، ضریب همبستگی را تا سه برابر بهبود می‌بخشد. همچنین با استفاده از این مدل غیرخطی RMSE از ۳۴/۴۲ به ۲۱/۳۳ میلی گرم در متر مکعب کاهش یافته است و رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در زمستان بهترین و در تابستان ضعیف‌ترین نتایج را در پی داشت.

حجازی و همکاران (۱۳۹۱) بین سهم بازتابندگی ناشی از پراکنش توسط هواویزها و غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر در شهر تهران رابطه خطی برقرار کردند و به این نتیجه رسیدند که مناطق مرکزی بیشترین آلودگی را دارند و در فصول با پوشش گیاهی مناسب (اواسط بهار، تابستان، اوایل پاییز) این ارتباط معنادارتر است. رنگزن و همکاران (۱۳۹۳) همبستگی بین AOD و میانگین روزانه و ساعتی PM10 را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که تغییرات زمانی AOD با تغییرات PM10 رابطه مستقیم دارد. پهلوان و همکاران (۱۳۹۳) دقت غلظت آلاینده های PM10 و PM2.5 حاصل از مقادیر نوری هواویزهای محصولات سنجنده مادیس را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که یک رابطه خطی بین عمق نوری هواویز و غلظت ذرات معلق اندازه گیری شده در ایستگاه زمینی وجود دارد. محمدی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) با کاربرد AOD حاصل از سنجنده مادیس و دید افقی حاصل از ایستگاه هواشناسی به مدل‌سازی مقادیر PM10 در دو مقیاس ساعتی و روزانه پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد بین مقادیر PM10 و مدل به دست آمده در مقیاس زمانی ساعتی رابطه قوی‌تری وجود دارد. خوش‌سیما و همکاران (۱۳۹۴) برای تخمین PM10 با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس (ماهواره اکوا و ترا)، داده های دستگاه نورسنج خورشیدی و همچنین داده‌های هواشناسی شامل فشار، دما، رطوبت، تندی و جهت باد برای استان زنجان در فصل تابستان و زمستان سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰م از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و همبستگی چندمتغیره استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که اندازه تیرگی تابستان در مقایسه با زمستان بیشتر و همچنین شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتری از همبستگی چندمتغیره دارد.

مقدار AOD ثبت شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط جو است. بنابراین، به منظور به دست آوردن مقدار PM سطح زمین باید تبدیل مناسبی به کار رود. به این منظور و برای بهبود دقت برآورد PM، پارامترهای هواشناسی نیز برای توسعه مدل‌های پیچیده‌تر مثل مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره استفاده می‌شوند. یو و همکاران

(۲۰۱۵) با تحلیل‌هایی درباره متغیرهای هواشناسی نشان دادن که رطوبت نسبی و دید فاکتورهای مهمی برای بهبود رابطه بین AOD و PM10 هستند. رطوبت نسبی سطحی و ارتفاع لایه مرزی (HPBL) مدل‌های تجربی رابطه AOD-PM، را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، چون ویژگی‌های جذب و پراکنش ذرات با اختلاط عمودی و رشد هیگروسکوپی هواویزها تغییر می‌کنند (Chu & et al., 2013: 185; Donkelaar & et al., 2006: 1; Liu & et al., 2005: 3276). سرعت باد سطحی یکی از فاکتورهای مهم انتقال ذرات به جو و همچنین اختلاط است و بنابراین غلظت ذرات معلق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دمای سطحی نیز به میزان زیادی با تولید ذرات ثانویه، به‌ویژه در تابستان مرتبط است و غلظت هواویزها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Liu & et al., 2007: 42). باوجود این در مطالعات انجام‌شده در ایران، تاکنون میزان تأثیر پارامترهای هواشناسی به‌ویژه ارتفاع لایه مرزی در بهبود توانایی مدل در برآورد PM10 مورد توجه نبوده است. بنابراین هدف این مطالعه، بررسی امکان تخمین PM10 براساس داده‌های ضخامت نوری هواویزها با کاربرد مدل رگرسیون و ارزیابی میزان تأثیر پارامترهای هواشناسی شامل سرعت باد سطحی، دمای سطحی، رطوبت نسبی سطحی، دید افقی و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای در بهبود مدل است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش سعی شد با کاربرد مدل رگرسیون براساس داده‌های ضخامت نوری هواویزها (AOD) میزان PM10 برآورد و دقت آن ارزیابی شود. چون مقدار AOD ثبت‌شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای تحت تأثیر شرایط جو است، برای افزایش دقت برآورد PM10، پارامترهای هواشناسی نیز در مدل تبدیل مقدار AOD به PM10 به کار گرفته شدند. پارامترهای هواشناسی که برای تخمین دقیق‌تر مقدار ذرات معلق موجود در جو به کار گرفته شدند عبارت‌اند از: سرعت باد سطحی، دمای سطحی، رطوبت نسبی سطحی، دیدافقی و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای (HPBL)^۱. در ادامه ابتدا توضیحاتی در رابطه با داده‌های به کار رفته و شیوه تلفیق آن‌ها ارائه شده و سپس به روش ارزیابی مدل پرداخته می‌شود.

1..Height of the Planetary Boundary Layer

داده‌ها

داده‌های ذرات معلق (PM10)

داده‌های ذرات معلق (PM10) اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سنجش آلودگی از سازمان محیط زیست دریافت شد. از آنجا که در دوره بررسی شده (۲۰۱۲-۲۰۱۷)، داده‌های سه ایستگاه آتی‌ساز، شکوفه و چشمه نسبت به دیگر ایستگاه‌ها کامل‌تر بوده‌اند، داده‌های این ایستگاه‌ها در این مطالعه به کار گرفته شد، که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. از بین این سه ایستگاه نیز داده‌های ایستگاه شکوفه به دلیل کمتر بودن داده‌های مفقود برای مدل‌سازی که به زوج داده‌های متغیر مستقل و وابسته بیشتری نیاز دارد، انتخاب شد و داده‌های دو ایستگاه چشمه و آتی‌ساز که داده‌های مفقود بیشتری نسبت به ایستگاه شکوفه داشتند، نیز با هدف ارزیابی میزان کارایی مدل برای نقاط فاقد ایستگاه سنجش، انتخاب شدند.

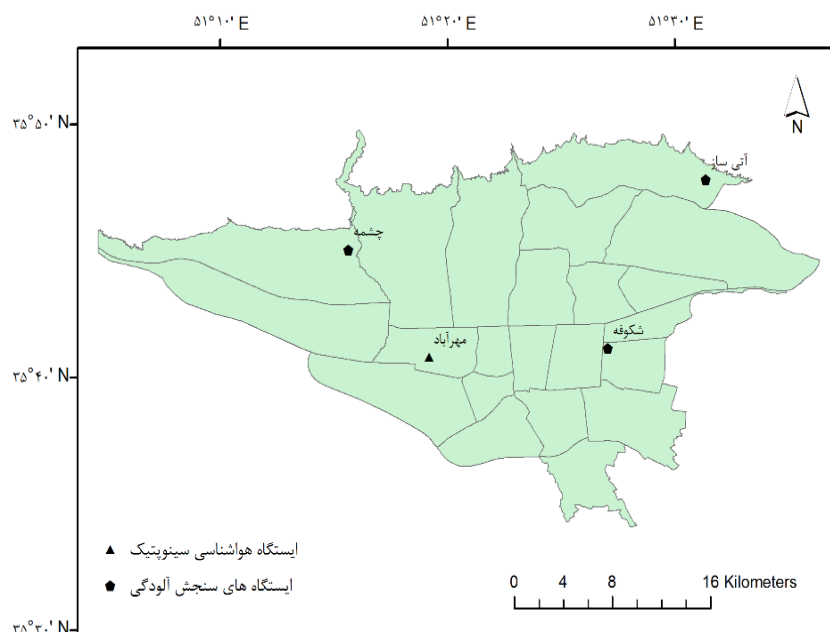
جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های سنجش آلودگی

ردیف	نام ایستگاه	مدل	طول و عرض جغرافیایی	آدرس ایستگاه
۱	آتی‌ساز	Environment S.A	35°47'48.91" N	بلوار ارتش - ضلع غربی ساختمان‌های آتی‌ساز
			51°31'21.10"E	
۲	شکوفه	Environment S.A	35°41'08.65" N	خیابان شکوفه - ضلع شرقی پارک شکوفه
			51°27'02.74" E	
۳	چشمه	Environment S.A	35°45'02.86" N	دهکده المپیک - مجتمع ورزشی غدیر
			51°15'38.69" E	

داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک

در این مطالعه برای بررسی تأثیر داده‌های هواشناسی بر تخمین ذرات معلق، ایستگاه همدید مهرآباد به دلیل داشتن کمترین داده‌های مفقود انتخاب شد، هرچند این ایستگاه نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به تمامی ایستگاه‌های سنجش آلودگی منتخب نبوده است. به عنوان نمونه، ایستگاه‌های ژئوفیزیک و دوشان‌تپه نسبت به ایستگاه مهرآباد کمی به ایستگاه سنجش آلودگی

شکوفه نزدیک‌ترند، اما با توجه به اینکه متغیرهای هواشناسی مثل دما، رطوبت و دید افقی در فواصل ایستگاه‌های موجود در منطقه مطالعه ضریب همبستگی بسیار بالا و متغیری مثل سرعت باد نیز با وجود تغییرپذیری مکانی بالا، ضریب همبستگی قابل قبولی در بین ایستگاه‌های منطقه دارند (در سطح اطمینان ۹۹ درصد)، بنابراین تغییر ایستگاه هواشناسی با توجه به کمبود اختلاف فاصله آن‌ها از ایستگاه‌های سنجش آلودگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتیجه مطالعه نخواهند داشت. بنابراین داده‌های دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، جهت باد، دید افقی و ابرناکی ایستگاه سینوپتیک مهرآباد به کار گرفته شد. این داده‌ها برای دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ م و ساعت‌های ۶، ۹، ۱۲ به وقت جهانی (۹:۳۰، ۱۲:۳۰، ۱۵:۳۰ به وقت محلی) از سازمان هواشناسی دریافت شد.



شکل ۱: ایستگاه‌های هواشناسی و سنجش آلودگی

داده‌های شبکه‌ای ارتفاع لایه مرزی

ارتفاع لایه مرزی از داده‌های بازکاوی پایگاه داده ECMWF (WWW.ECMWF.int) با تفکیک مکانی $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ طول و عرض جغرافیایی برای ساعت‌های ۶ و ۱۲ به وقت جهانی (۹:۳۰ و

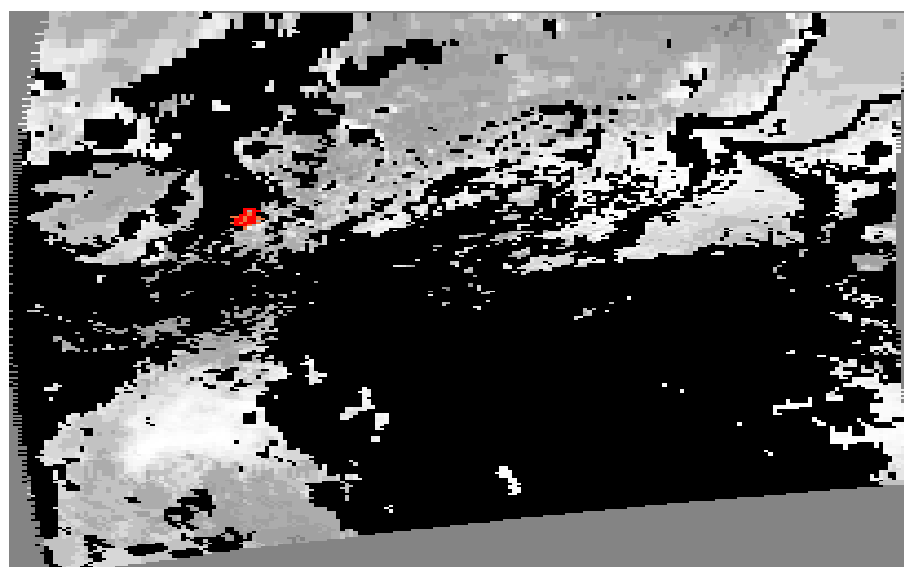
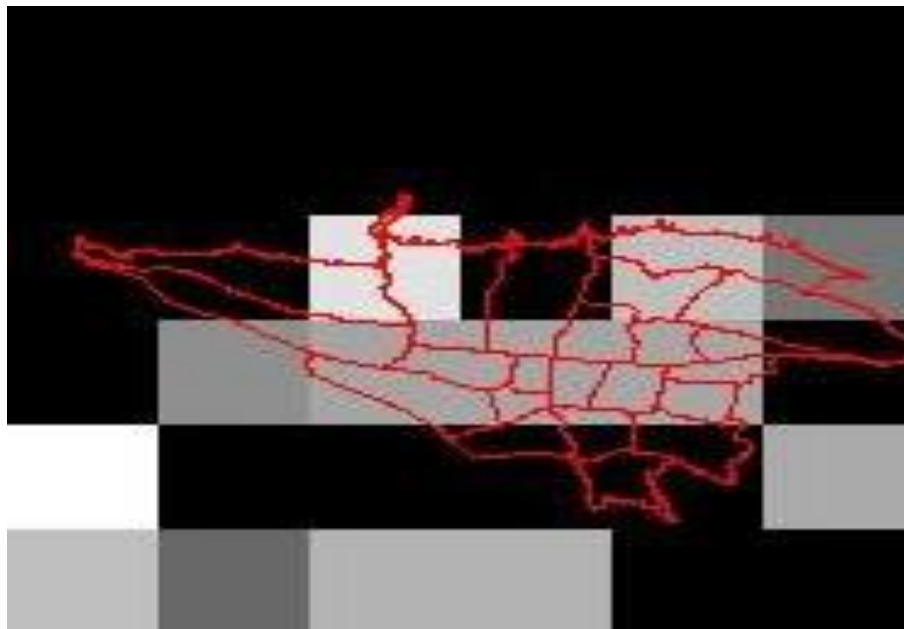
۱۵:۳۰ به وقت محلی) با فرمت NetCDF استخراج شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار گردس داده‌ها برای محدوده ایستگاه‌های سنجش آلودگی مورد مطالعه استخراج و میانگین‌گیری شد.

داده‌های ماهواره مادیس

در این بررسی مجموعه شش محصولات هواویز مادیس در دوره آماری شش‌ساله (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷) با فرمت HDF از سایت <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> استخراج شدند. در بین این مجموعه برای این بررسی، از محصول ضخامت نوری هواویزهای حاصل الگوریتم های ادغامی دیپ‌بلو و دارک‌تارگت ۰/۵۵۰ نانومتر بهره گرفته شد. الگوریتم دارک‌تارگت خشکی برای بازیابی هواویزها بر روی سطوح روشن (شامل نواحی بیابانی) طراحی نشده است. برای این سطوح الگوریتم دیگری به نام دیپ‌بلو (Gupta & Christoph, 2008) به کار گرفته می‌شود. هرچند از این الگوریتم برای تخمین ویژگی هواویزها بر روی نواحی با پوشش گیاهی نیز بهره می‌برند (Sayer & et al., 2013: 7864; Gupta & et al., 2013: 50). به‌طور کلی، الگوریتم دارک‌تارگت برآورد بهتری در نواحی با پوشش گیاهی متراکم و الگوریتم دیپ‌بلو برآورد بهتری در نواحی بیابانی دارد، اما برای نواحی با پوشش گیاهی کم تعیین این‌که کدام الگوریتم تخمین بهتری دارد، مشکل است (Remer & et al., 2013: 1842). بنابراین در این محصول ادغامی از محصول NDVI (شاخص پوشش گیاهی استاندارد شده)^۱ برای تعیین اینکه تخمین کدام الگوریتم به کار گرفته شود، بهره برده شده است. اگر NDVI بزرگ‌تر از ۰/۳ باشد، برآورد الگوریتم دارک‌تارگت و اگر NDVI کوچک‌تر از ۰/۲ باشد، تخمین الگوریتم دیپ‌بلو انتخاب می‌شود. برای نواحی با NDVI بین ۰/۲ تا ۰/۳ برآورد الگوریتمی به کار می‌رود که سطح اطمینان بالاتری دارد. اگر هر دو سطح اطمینان بالایی داشته باشند، از برآورد هر دو الگوریتم میانگین گرفته می‌شود (Levy & et al., 2013: 3017).

برای کاهش خطای محاسبه ناشی از پوشش ابری تنها روزهای با آسمان صاف و یا پوشش ابری محدود (یک هشتم) به عنوان روزهای مطالعه انتخاب شدند. تصاویر مناسب با سطح اطمینان تخمین AOD خوب یا عالی (Remer & et al., 2013) در منطقه مطالعه انتخاب و با کاربرد نرم‌افزار Envi زمین‌مرجع شدند و برای پردازش‌های بعدی به کار رفتند.

1. normalized difference vegetation index



شکل ۲: محصول AOD مادیس در منطقه مورد مطالعه (۲۷ فوریه ۲۰۱۳ ساعت ۹:۵۵)

سمت چپ: تصویری از محصول AOD کل منطقه، سمت راست: بزرگنمایی شده بر روی منطقه مورد مطالعه (محدوده شهر تهران با رنگ قرمز مشخص شده است)



پردازش و تلفیق داده‌ها

با توجه به اینکه داده‌های به‌کار رفته از ۴ منبع متفاوت استخراج شدند که تفکیک زمانی و مکانی متفاوتی دارند، لازم است شیوه‌ای برای تلفیق و هماهنگ‌سازی در فضا و زمان نیز به‌کار رود. برای ایجاد زوج داده‌های AOD و PM10 حاصل از ماهواره آکوا، نقشه برداری ایستگاه‌های سنجش آلودگی روی تصاویر ماهواره‌ای همپوشانی شد و مقادیر AOD برای پیکسل نزدیک ترین همسایه و همچنین مقادیر آن برای یک پنجره ۳ در ۳ از پیکسل‌ها استخراج شد. بنابراین دو زوج AOD و PM10 تشکیل شد، یکی با مقادیر نزدیک‌ترین همسایه و دیگری با میانگین وزنی (وزن‌دهی عکس فاصله) مقادیر AOD در یک پنجره ۳ در ۳. در ادامه چون مقادیر PM10 با مقادیر AOD از نزدیک‌ترین همسایه رابطه بیشتری داشتند، زوج حاصل از میانگین وزنی از محاسبات کنار گذاشته شد. محققین دیگر مثل گاپتا و کریستوفر (2008) و یو و همکاران (۲۰۱۵) رویکردهای مشابهی داشتند؛ اما گاپتا و کریستوفر (۲۰۰۸) درنهایت از میانگین ساده مقادیر AOD در یک پنجره ۵ در ۵ و یو و همکاران (۲۰۱۵) از مقادیر AOD نزدیک‌ترین همسایه در یک پنجره ۳ در ۳ بهره بردند. دلیل این تفاوت این است که میزان تغییرات مکانی ذرات معلق در مناطق مختلف بسته به ویژگی‌های محیطی مثل منابع آلودگی و تصفیه و شرایط اقلیم محلی بسیار متفاوت است.

از آنجا که داده‌های حاصل از ماهواره آکوا روی منطقه زمان عبور دقیقاً معینی ندارد (از ساعت ۸:۵۵ تا ۱۰:۳۵ به‌وقت جهانی، ۱۲:۲۵ تا ۱۴:۰۵ به‌وقت محلی)، در هر مورد از PM10 اندازه‌گیری‌شده در ساعت اخذ تصویر استفاده شد. چون رزولوشن اندازه‌گیری‌های PM10 یک ساعته است، بنابراین برای موارد استخراج تصویر در ساعات میانی، میانگین وزنی مقادیر PM10 در دو ساعت نزدیک به زمان آن محاسبه شد. همچنین جهت کاهش خطا برای عدم تطابق زمانی داده‌های هواشناسی با مقادیر AOD و همچنین مشابه نبودن زمان اخذ AOD در روزهای مختلف با یک‌دیگر، از میانگین داده‌ها در نزدیک‌ترین زمان به زمان اخذ تصویر استفاده شد. به‌عبارت دیگر درمورد داده‌های اخذ شده از ایستگاه‌های سینوپتیک با رزولوشن زمانی ۳ ساعته، از میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده در ساعت‌های (۶، ۹ و ۱۲ به‌وقت جهانی، ۹:۳۰، ۱۲:۳۰ و ۱۵:۳۰ به‌وقت محلی) و درمورد داده‌های HPBL با رزولوشن زمانی ۶ ساعته نیز از میانگین مقادیر در ساعت‌های ۶ و ۱۲ به‌وقت جهانی (۹:۳۰ و ۱۵:۳۰ به‌وقت محلی) بهره گرفته شد.

توسعه و اعتبارسنجی مدل

۱۰۰ نمونه در فصل گرم (ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور) برای توسعه مدل و ۶۵ نمونه برای اعتبارسنجی آن، همچنین ۱۴۰ نمونه در فصل سرد (آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند) برای توسعه مدل و ۵۰ نمونه برای اعتبارسنجی آن به کار گرفته شد.

در این پژوهش سعی شد یک مدل رگرسیون خطی ساده (رابطه ۱) و یک رگرسیون مدل چندمتغیره براساس لگاریتم طبیعی مقادیر (رابطه ۲) که در مطالعه یو و همکاران (۲۰۱۵) نتایج دقیقی ارائه داده بود، توسعه داده شود و میزان دقت برآورد PM10 توسط این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شود.

رابطه ۱

$$PM10 = a + b1(AOD)$$

رابطه ۲

$$\ln(PM10) = a + b1\ln(AOD) + b2\ln(HPBL) + b3\ln(RH) + b4\ln(VIS) + b5\ln(T) + b6\ln(WS)$$

PM10: جرم ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون (میکروگرم در متر مکعب)

AOD: ضخامت نوری هواویزها (بی بعد)

HPBL: ارتفاع لایه مرزی (متر)

RH: رطوبت نسبی (درصد)

VIS: دید افقی (کیلومتر)

T: دما (درجه سانتی‌گراد)

WS: سرعت باد (متر بر ثانیه)

در مرحله آخر با کاربرد داده‌های ایستگاه سنجش آلودگی چشمه و آتی‌ساز که در ارائه مدل به کار گرفته نشده‌اند، میزان دقت مدل با کاربرد شاخص‌هایی مثل ضریب تعیین، میانگین انحراف خطاها (Bias) و میانگین ریشه دوم مجذور خطاها (RMSE) ارزیابی شد.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)$$



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}$$

S_i : مقدار برآوردشده

M_i : مقدار اندازه‌گیری شده

نتایج

در این بخش، ابتدا به بررسی ویژگی‌های آمار توصیفی متغیرها پرداخته می‌شود. سپس رابطه هریک از متغیرهای مستقل شامل ضخامت نوری هواویزها، دما، رطوبت نسبی، ارتفاع لایه مرزی و سرعت باد با متغیر وابسته (PM10) در هریک از فصول گرم و سرد به تفکیک بررسی می‌شود. در گام بعد، مدل‌های رگرسیون فصل‌های گرم و سرد و ویژگی‌های هریک ارائه و تفسیر می‌شود. در نهایت، به تحلیل نتایج ارزیابی بهترین مدل‌های فصل سرد و گرم پرداخته می‌شود.

ویژگی‌های آماری متغیرها

به‌منظور بررسی ویژگی‌های آماری متغیرهای به‌کار رفته در مدل‌های رگرسیون، جدول آمار توصیفی و هیستوگرام هر متغیر به تفکیک فصل گرم و سرد در زیر ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، توزیع PM10 و AOD در فصل گرم مشابه و هر دو نزدیک به نرمال است که نشان‌دهنده وجود رابطه بین این دو متغیر است. کمینه مقدار PM10 در فصل گرم حدود ۱۵ و بیشینه آن حدود ۴۸۰ میکروگرم در مترمکعب است که دامنه تغییرات زیاد این متغیر را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، PM10 در فصل گرم مقداری در حدود 90 ± 58 میکروگرم در مترمکعب با ضریب تغییراتی در حدود ۶۴ درصد دارد. مقادیر AOD در این فصل نیز کمینه و بیشینه‌ای در حدود ۰/۰۲ و ۰/۶۷ دارند. میانگین و انحراف معیار این متغیر ($0/19 \pm 0/11$) نیز همانند PM10 نشان‌دهنده ضریب تغییرات نسبتاً بالای AOD در این فصل است. درحالی که در فصل سرد، توزیع دو متغیر AOD و PM10 تفاوت زیادی با یکدیگر نشان می‌دهند (شکل ۴). در این فصل، PM10 کمینه و بیشینه‌ای در حدود ۱۷ و ۲۵۱ و میانگینی در حدود 80 ± 43 میکروگرم در متر مکعب دارد. بنابراین مقدار آن در فصل سرد نسبت به فصل گرم در حدود ۱۱ درصد کاهش نشان می‌دهد. ضریب تغییرات آن نیز نسبت به فصل گرم کمتر است (۵۳٪). همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار AOD در این فصل کمینه‌ای نزدیک به صفر و بیشینه‌ای برابر ۰/۷۱ دارد. میانگین و انحراف معیار این متغیر ($0/13 \pm 0/12$) نوسان

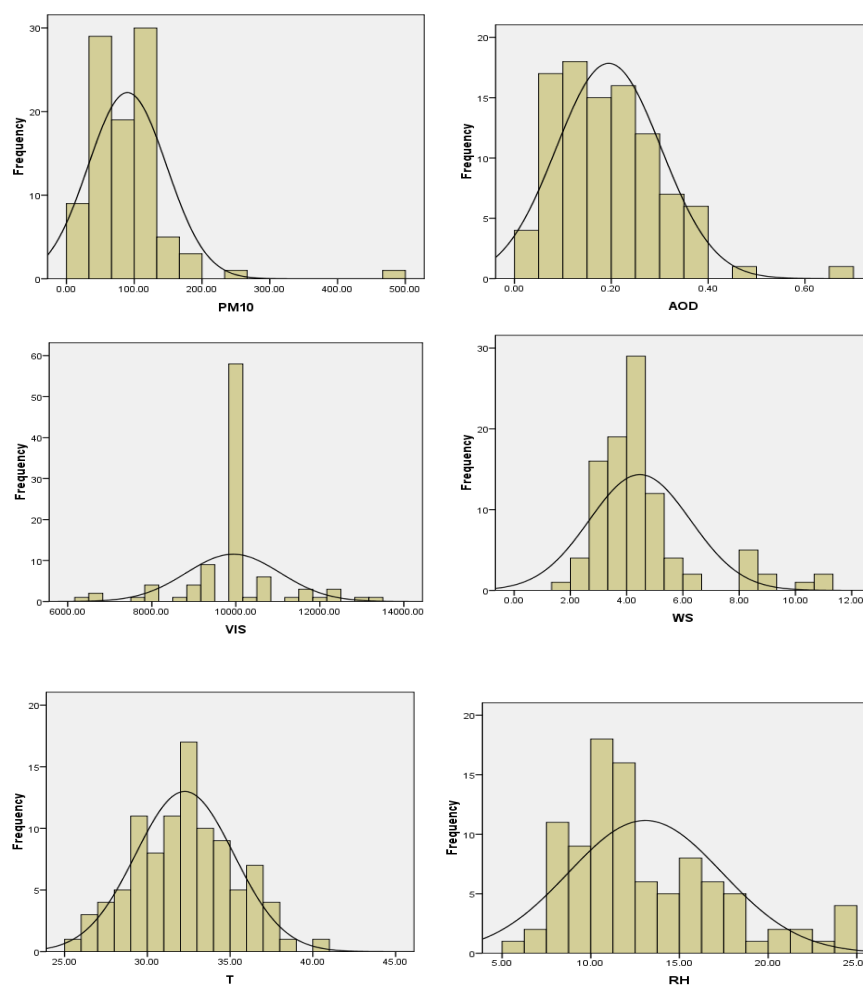
بسیار بالای آن را در فصل سرد (۹۲ درصد) نشان می‌دهد. بنابراین، ضریب تغییرات AOD و PM10 نیز در این فصل نمایانگر رابطه ضعیف این دو متغیر در این فصل است.

جدول ۲: مشخصات توصیفی متغیرهای بررسی شده

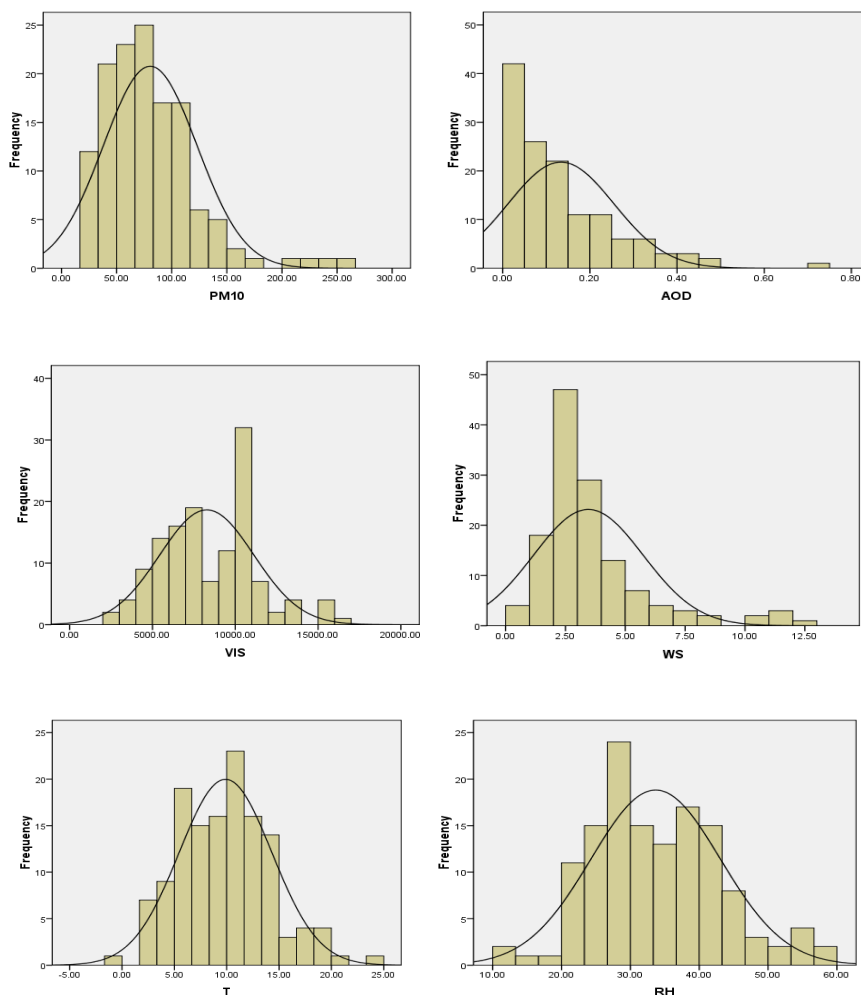
فصل گرم	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
PM10 (μgm^{-3})	۱۵/۴	۴۷۹/۷	۸۹/۹	۵۷/۹	۶۴
AOD	۰/۰۲	۰/۶۷	۰/۱۹	۰/۱۱	۵۸
دما (C)	۲۵	۴۰	۳۲	۳	۹
رطوبت (%)	۶	۲۵	۱۳	۴	۳۱
سرعت باد (ms^{-1})	۲	۱۱	۴	۲	۵۰
دید افقی (Km)	۶۳۳۳	۱۳۳۳۳	۹۹۳۸	۱۱۱۷	۱۱
ارتفاع لایه مرزی (m)	۹۷۰	۳۲۵۵	۱۹۳۲	۵۰۹	۲۶
فصل سرد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
PM10 (μgm^{-3})	۱۷/۱۸	۲۵۱/۰۱	۸۰/۴۵	۴۲/۵۸	۵۳
AOD	۰/۰۰۳	۰/۷۱	۰/۱۳	۰/۱۲	۹۲
دما (C)	-۱	۲۳	۱۰	۴	۴۰
رطوبت (%)	۱۲	۵۹	۳۴	۹	۲۶
سرعت باد (ms^{-1})	۰	۱۳	۳	۲	۶۷
دید افقی (Km)	۲۳۳۳	۱۶۶۶۷	۸۲۸۱	۲۸۴۶	۳۴
ارتفاع لایه مرزی (m)	۲۴۵	۲۳۶۷	۶۵۴	۳۰۴	۴۶

همان‌طور که در بالا بیان شد، شکل توزیع دو متغیر AOD و PM10 مشابهت زیادی در فصل گرم دارند، اما در فصل سرد این مشابهت بسیار کمتر است. بنابراین، می‌توان انتظار داشت این دو متغیر در فصل گرم نسبت به فصل سرد رابطه بهتری با یکدیگر داشته باشند. دلیل این موضوع را می‌توان این گونه توجیه نمود که در فصل گرم تغییرپذیری دما کمتر است (جدول ۲)، علاوه بر آن به دلیل بالا بودن دما ضریب تغییرات لایه مرزی و سرعت باد نیز کمتر است. تغییرپذیری کمتر این متغیرها می‌تواند رابطه بهتر دو متغیر AOD و PM10 را در فصل گرم توجیه نماید. در فصل گرم توزیع فراوانی هر دو متغیر به توزیع نرمال نزدیک‌تر است. توزیع

دیگر متغیرهای مورد بررسی نیز به استثنای متغیر دما، چندان به توزیع نرمال شباهت ندارد. هرچند در فصل سرد علاوه بر متغیر دما توزیع فراوانی متغیرهای رطوبت نسبی و دید افقی نیز به توزیع نرمال نزدیک است.



شکل ۳: توزیع فراوانی متغیرها در فصل گرم



شکل ۴: توزیع فراوانی متغیرها در فصل سرد

بررسی رابطه بین ذرات معلق با ضخامت نوری هواویزها و متغیرهای هواشناسی با توجه به نرمال نبودن توزیع فراوانی برخی از متغیرها (شکل‌های ۳ و ۴)، ضریب همبستگی ناپارامتری اسپیرمن برای بررسی رابطه بین ذرات معلق با ضخامت نوری هواویزها و متغیرهای هواشناسی به کار گرفته شد. جدول ۳ ضریب همبستگی بین PM10 و هریک از متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده (ضخامت نوری هواویزها یا AOD، دید افقی، سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و ارتفاع لایه مرزی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شده ضریب



همبستگی بین AOD و PM10 در فصل گرم بالاتر از ضریب همبستگی آن‌ها در فصل سرد است (جدول ۳)، به‌طوری که رابطه این دو متغیر در فصل گرم در سطح اطمینان ۹۹ درصد و در فصل سرد تنها در سطح اطمینان ۹۵ درصد قابل قبول است. در هر دو فصل، همان‌طور که انتظار می‌رود رابطه مستقیمی بین این دو متغیر برقرار است. به این صورت که با افزایش PM10 و پراکنش بیشتر نور خورشید، به‌دلیل وجود ذرات معلق بیشتر در جو، امواج الکترومغناطیس کمتری به سنجنده رسیده و بنابراین ضریب کاهش نور افزایش می‌یابد. اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی قوی بین این دو متغیر وجود ندارد. به عبارت دیگر، با محاسبه ضریب تعیین (ضریب همبستگی به توان ۲) می‌توان بیان نمود که تغییرات AOD تنها حدود ۱۰ درصد از تغییرات PM10 را توجیه می‌کند و ۹۰ درصد از تغییرات این متغیر با عوامل دیگر قابل توجیه خواهد بود. همچنین برای فصل سرد نیز تنها ۴ درصد از تغییرات این متغیر با تغییرات AOD هماهنگ است. متغیر دید افقی در هر دو فصل رابطه منفی معنی‌داری با PM10 نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر، با افزایش هواویزها دید افقی کاهش می‌یابد. هرچند این رابطه در فصل گرم ضعیف‌تر (معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد) و در فصل سرد بسیار قوی‌تر (معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد) است؛ به‌طوری که در فصل گرم ۴ درصد از تغییرات این دو متغیر با یکدیگر هماهنگ است. درحالی که در فصل سرد حدود ۳۴ درصد از تغییرات آن‌ها با یکدیگر هماهنگ است که تفاوت قابل ملاحظه‌ای است. رابطه PM10 و سرعت باد در فصل گرم مثبت است، اما در سطح اطمینان ۹۵ یا ۹۹ درصد معنی‌دار نیست. درحالی که رابطه این دو متغیر در فصل سرد منفی و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. به عبارت دیگر در فصل سرد با افزایش سرعت باد، مقدار PM10 کاهش می‌یابد که به‌دلیل اختلاط مؤثرتر هوا و پراکنش بیشتر ذرات معلق توسط باد است. تغییرات سرعت باد حدود ۶ درصد از تغییرات PM10 را در فصل سرد توجیه می‌کند. متغیرهای دما و رطوبت نسبی رابطه معنی‌داری با PM10 در هیچ‌یک از دو فصل گرم و سرد را نشان نمی‌دهند. شاید به این دلیل که این رابطه در دو فصل سرد و گرم به‌طور مجزا بررسی می‌شود و بنابراین نوسان دما به ویژه در فصل گرم کمتر از متغیرهای دیگر است. البته رطوبت نسبی با PM10 در فصل گرم بدون ارتباط نیستند، اما این رابطه در سطح اطمینان منتخب معنی‌دار نیست. درنهایت متغیر ارتفاع لایه مرزی نیز تنها در فصل سرد رابطه معنی‌داری با PM10 نشان می‌دهد. درواقع این متغیر در فصل سرد ۱۱ درصد از تغییرات PM10 را توجیه می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شده دلیل این موضوع را می‌توان اینگونه توجیه نمود که در فصل گرم به‌دلیل بالا بودن دما تغییرپذیری لایه مرزی کمتر است، بنابراین رابطه‌ای بین ارتفاع لایه مرزی و PM10

کاربرد داده‌های ضخامت نوری سنجده مادیس... ----- سمیه رفعتی و همکار

مشاهده نمی‌شود، اما در فصل سرد به دلیل نوسان بیشتر دما ارتفاع لایه مرزی نیز نوسان بیشتری دارد، بنابراین رابطه بین PM10 و ارتفاع لایه مرزی نمایان می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳: ضریب همبستگی اسپیرمن بین PM10 و متغیرهای مستقل مورد بررسی در فصل گرم و سرد

متغیر مستقل	PM10 فصل گرم	PM10 فصل سرد
ضخامت نوری هواویزها	۰/۳۱۷**	۰/۱۹۵*
دید افقی	۰/۲۱۳*	-۰/۵۷۸**
سرعت باد	۰/۱۱۸	-۰/۲۴۲**
دما	-۰/۰۰۲	۰/۰۳۲
رطوبت نسبی	۰/۱۶۹	۰/۰۶۲
ارتفاع لایه مرزی	-۰/۰۲۲	-۰/۳۳۸**

* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

** معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

بررسی مدل‌های رگرسیون در فصول گرم و سرد

در هر فصل، سعی شد نخست یک مدل رگرسیون تک‌متغیره (رابطه بین PM10 و AOD) ارائه شود و سپس یک مدل چندمتغیره که در آن علاوه بر متغیر AOD، متغیرهای هواشناسی مؤثر بر این رابطه مثل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ارتفاع لایه مرزی و دید افقی نیز در مدل وارد شوند. همچنین علاوه بر ارائه مدل‌های خطی سعی شد، رابطه رگرسیون دیگری نیز براساس لگاریتم طبیعی متغیرها ارائه شود و میزان بهبود نتایج بررسی شود. در این بخش مدل‌های به دست آمده در هریک از فصول سرد و گرم به‌طور مجزا ارائه شده و نتایج هریک مقایسه و تحلیل می‌شود.

فصل گرم

اولین مدل ارائه شده، مدل رگرسیون تک‌متغیره خطی است که در آن تنها رابطه بین دو متغیر PM10 و AOD مدل شده است. در مدل ارائه شده شیب خط رگرسیون برازش شده با روش کمینه مربعات خطاها برابر ۰/۱۴۷ و عرض از مبدأ برابر ۶۱/۳۴۹ به دست آمد. همان‌طور که در



جدول ۴ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی حاصل از این مدل بسیار پایین و برابر ۰/۲۷ است. به عبارت دیگر، این مدل تنها حدود ۷ درصد از تغییرات PM10 را توسط AOD حاصل از تصاویر ماهواره‌ای توجیه می‌نماید. اما به لحاظ آماری مدل قابل قبول و معنی‌دار است و نوساناتی که قادر به نمایش آن است تصادفی نیست (احتمال تصادفی بودن ۶ درصد).
مدل ۱:

$$PM10 = 61/349 + 0/147 AOD$$

مدل دوم یک مدل رگرسیون تک‌متغیره است که حاصل به کارگیری لگاریتم طبیعی مقادیر دو متغیر PM10 و AOD است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شیب خط رگرسیون برازش شده برابر ۰/۳۰۵ و عرض از مبدأ آن برابر ۲/۷۷۴ است. ضریب همبستگی مدل دوم نسبت به مدل اول به میزان کمی (۰/۳۲) بهبود یافته است (جدول ۴) به طوری که این مدل قادر است ۱۰ درصد از تغییرات PM10 را به درستی نشان دهد (احتمال تصادفی بودن ۱ درصد).
مدل ۲:

$$\ln(PM10) = 2/774 + 0/305 \ln(AOD)$$

در مرحله سوم، علاوه بر متغیر AOD متغیرهای هواشناسی نیز به مدل وارد شدند و مدل رگرسیون با کاربرد روش گام‌به‌گام ارائه شد. ضمناً به دلیل بهبود مدل، لگاریتم طبیعی مقادیر به جای خود مقادیر در توسعه مدل به کار رفت. اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این مدل تنها متغیرهای AOD و سرعت باد باقی ماندند و متغیرهای دیگر که اثر قابل قبول و معنی‌داری در بهبود مدل ارائه شده نداشته‌اند، از مدل رگرسیون حذف شدند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هم AOD و هم سرعت باد رابطه مستقیمی با PM10 دارند، به عبارت دیگر، با افزایش هر دو متغیر مقدار PM10 افزایش می‌یابد. در مورد متغیر AOD که دلیل این مسئله مشخص است، اما در مورد متغیر سرعت باد با این نتیجه می‌توان استنباط نمود که در فصل گرم به دلیل رطوبت کم خاک در منطقه افزایش سرعت باد می‌تواند قدرت انتقال و حمل ذرات جامد از سطح زمین به جو را افزایش داده و بنابراین میزان PM10 را افزایش دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی چند متغیره این مدل نسبت به دو مدل قبل اندکی بهبود یافته و به مقدار ۰/۴ افزایش یافته است. بنابراین، مدل رگرسیون در بهترین حالت به دست آمده در این بررسی تنها می‌تواند ۱۶ درصد از تغییرات PM10 را به درستی پیش‌بینی نماید که نتیجه چندان رضایت بخشی نیست.

مدل ۳:

$$\ln(PM10) = 1/931 + 0/354 \ln(AOD) + 0/416 \ln(WS)$$

جدول ۴: نتایج مدل‌های رگرسیون فصل گرم

معنی‌داری	ضریب تعیین	ضریب همبستگی	
۰/۰۰۶	۰/۰۷	۰/۲۷	رگرسیون خطی تک‌متغیره ۱
۰/۰۰۱	۰/۱۰	۰/۳۲	رگرسیون تک‌متغیره ۲
۰	۰/۱۶	۰/۴۰	رگرسیون چندمتغیره ۳

فصل سرد

در مدل اول یا رگرسیون خطی تک‌متغیره ارائه‌شده در فصل سرد شیب خط رگرسیون برازش شده برابر ۰/۰۶۱ و عرض از مبدأ برای ۶۹/۵۱۹ به‌دست آمد. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی حاصل از این مدل بسیار پایین و برابر ۰/۱۷ است. به عبارت دیگر، با کاربرد این مدل تنها حدود ۳ درصد از تغییرات PM10 توسط AOD حاصل از تصاویر ماهواره‌ای توجیه می‌شود. بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رود به‌دلیل رابطه ضعیف‌تر AOD و PM10 در فصل سرد نسبت به فصل گرم، این مدل نسبت به مدل مشابه در فصل گرم ضعیف‌تر است. هرچند به لحاظ آماری مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد قابل قبول و معنی‌دار است و نوساناتی که قادر به نمایش آن است تصادفی نیست (احتمال تصادفی بودن ۴/۷ درصد).
مدل ۱:

$$PM10 = 69.519 + 0.061 \cdot AOD$$

همانند فصل گرم در این فصل نیز مدل دوم یک مدل رگرسیون تک‌متغیره است که حاصل به‌کارگیری لگاریتم طبیعی مقادیر دو متغیر PM10 و AOD است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شیب خط رگرسیون برازش‌شده برابر ۰/۱۳۳ و عرض از مبدأ آن برابر ۳/۶۰۱ است. ضریب همبستگی مدل دوم نسبت به مدل اول به میزان کمی (۰/۱۹) بهبود یافته است (جدول ۴-۴) به‌طوری که این مدل قادر است ۴ درصد از تغییرات PM10 را به درستی نشان دهد (احتمال تصادفی بودن ۲/۷ درصد).
مدل ۲:

$$\ln(PM10) = 3.601 + 0.133 \cdot \ln(AOD)$$

در مدل سوم علاوه‌بر متغیر AOD متغیرهای هواشناسی نیز به مدل وارد شدند و مدل رگرسیون با کاربرد روش گام‌به‌گام ارائه شد. اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این مدل تنها



متغیر دید افقی باقی ماند و متغیرهای دیگر که اثر قابل قبول و معنی‌داری در بهبود مدل نداشته‌اند، از مدل رگرسیون حذف شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دید افقی میزان PM10 کاهش می‌یابد. به این ترتیب علاوه بر AOD، متغیرهای هواشناسی مثل سرعت باد و ارتفاع لایه مرزی با وجود اینکه با مقدار PM10 رابطه معنی‌داری داشتند، از مدل حذف شدند که به دلیل ارتباط بین متغیرهای مستقل است. بنابراین عمده تغییراتی که توسط این متغیرها توجیه می‌شود، چون با تغییراتی که توسط دید افقی توجیه می‌شود، مشترک بوده است، این متغیرها از مدل حذف شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی چند متغیره این مدل نسبت به دو مدل قبل بهبود قابل توجهی یافته و به مقدار ۰/۵۹ افزایش یافته است. بنابراین، این مدل می‌تواند ۳۵ درصد از تغییرات PM10 را به درستی پیش‌بینی نماید.

مدل ۳:

$$\ln(\text{PM}_{10}) = 11/277 - 0/783 \ln(\text{VIS})$$

با توجه به حذف تمام متغیرها توسط دید افقی در مدل قبلی، تصمیم بر این شد مدلی بدون در نظرگیری متغیر دید افقی (با روش گام به گام) نیز ارائه شود تا تأثیر متغیرهای دیگر از جمله AOD بر تخمین PM10 سنجیده شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل چهارم، متغیرهای ارتفاع لایه مرزی، AOD و دما برای تخمین PM10 در مدل حفظ شدند. متغیر ارتفاع لایه مرزی ارتباط منفی و دو متغیر دیگر ارتباط مثبت با PM10 نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع لایه مرزی مقدار PM10 کاهش می‌یابد که به دلیل گسترش لایه اختلاط جو و کاهش غلظت هواویزها در این شرایط است. رابطه مثبت دما نیز با مقدار PM10 تا اندازه‌ای غیرمنتظره است. بیشترین نقش دما بر مقدار PM10 به واسطه افزایش لایه مرزی و ارتباط این دو متغیر وابسته قابل توجیه است که از این رو باعث کاهش تراکم PM10 می‌شود، اما از آنجا که این نقش عنصر دما توسط همان متغیر ارتفاع لایه مرزی نشان داده می‌شود، آنچه باقی می‌ماند نقش ثانویه دما در تولید ذرات PM10 است. در نتیجه، این نکته می‌تواند نشان دهد که چرا دما با مقدار PM10 رابطه معنی‌داری نشان نمی‌دهد که دلیل آن نقش دو جانبه دما است. به هر صورت مدل چهارم، همان‌طور که انتظار می‌رود نسبت به مدل سوم ضعیف‌تر است و ضریب همبستگی چندمتغیره آن برابر ۰/۴۵ است و ۲۰ درصد تغییرات PM10 را توجیه می‌نماید.

مدل ۴:

$$\ln(\text{PM}_{10}) = 6/248 - 0/474 \ln(\text{BL}) + 0/135 \ln(\text{AOD}) + 0/175 \ln(\text{T})$$

جدول ۵: ویژگی‌های مدل‌های رگرسیون فصل سرد

معنی‌داری	ضریب تعیین	ضریب همبستگی چند متغیره	
۰/۰۴۷	۰/۰۳	۰/۱۷	رگرسیون تک‌متغیره ۱
۰/۰۲۷	۰/۰۴	۰/۱۹	رگرسیون تک‌متغیره ۲
۰	۰/۳۵	۰/۵۹	رگرسیون چندمتغیره ۳
۰	۰/۲۰	۰/۴۵	رگرسیون چندمتغیره ۴

ارزیابی مدل

برای ارزیابی بهترین مدل‌های به‌دست آمده در هر فصل (مدل ۳ فصل گرم و مدل‌های ۳ و ۴ فصل سرد) که از داده‌های ایستگاه شکوفه به‌دست آمدند، این مدل‌ها برای تخمین PM10 در ایستگاه‌های سنجش آلودگی چشمه و آتی‌ساز براساس داده‌های روزهایی که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفتند، به‌کار گرفته شدند. سپس میزان خطای هر مدل (ریشه میانگین مربعات خطاها-RMSE و میانگین انحراف‌ها (Bias) محاسبه و براساس آن میزان دقت مدل‌های به‌دست آمده ارزیابی شد. جدول ۶ نتایج ارزیابی مدل‌ها را در ایستگاه‌های چشمه و آتی‌ساز برای فصول سرد و گرم به تفکیک نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در فصل گرم، که تنها مدل ۳ ارزیابی شد، ریشه میانگین مربعات خطاها در ایستگاه چشمه برابر ۳۱/۷۶ میکروگرم در مترمکعب و در ایستگاه آتی‌ساز برابر ۳۳/۵۶ میکروگرم در مترمکعب به دست آمده است. همچنین تخمین‌ها در ایستگاه چشمه به‌طور میانگین به میزان ۲/۸۹ میکروگرم در متر مکعب بیش از واقعیت و در ایستگاه آتی‌ساز به میزان ۸/۸۱ میکروگرم در متر مکعب کمتر از واقعیت برآورد شده است.

در فصل سرد نتایج ارزیابی برای هر دو مدل ۳ و ۴ ارائه شده است (جدول ۶)، که در مدل ۳ دیدافقی تنها متغیر مستقل و در مدل ۴ متغیرهای ارتفاع لایه مرزی، ضخامت نوری هواویزها و دما متغیرهای مستقل بوده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاربرد مدل ۳ فصل، ریشه میانگین مربعات خطاها در ایستگاه چشمه برابر ۴۷/۱۰ میکروگرم در مترمکعب و در ایستگاه آتی‌ساز برابر ۴۹/۸۱ میکروگرم در مترمکعب تخمین زده شد. همچنین در این دو ایستگاه مقدار PM10 به‌ترتیب به اندازه ۲۶/۱۷ و ۱۲/۴۳ میکروگرم در مترمکعب بیش‌ازواقعیت برآورد



شده است. اما با کاربرد مدل ۴ ریشه میانگین مربعات خطاها در ایستگاه چشمه برابر $38/42$ میکروگرم در مترمکعب و در ایستگاه آتی‌ساز برابر $39/11$ میکروگرم در مترمکعب تخمین زده شد، که تقریباً میزان خطا حدود ۱۰ میکروگرم در مترمکعب که مقدار قابل توجهی است، کاهش نشان می‌دهد. همچنین در این دو ایستگاه مقدار PM_{10} به ترتیب به اندازه $12/73$ و $2/82$ میکروگرم در مترمکعب بیش از واقعیت برآورد شده است. بنابراین با وجود این که مدل ۴ فصل سرد نسبت به مدل ۳ این فصل نتایج ضعیف‌تری (ضریب همبستگی چندمتغیره و ضریب تعیین کمتری) داشته است، در ارزیابی مدل که برای مکان و روزهای متفاوت با مکان و روزهای مدل‌سازی به کار گرفته شدند، نتایج بهتری ارائه داده است. بنابراین کاربرد AOD در مدل رگرسیون قابل قبول و قابل توجه است، هرچند که نتایج خیلی دقیقی ارائه نمی‌شود.

جدول ۶: نتایج ارزیابی مدل‌های رگرسیون فصول سرد و گرم

ایستگاه و فصل سال	RMSE($\mu g m^{-3}$)	Bias($\mu g m^{-3}$)
ایستگاه چشمه فصل گرم	31/76	2/89
ایستگاه آتی‌ساز فصل گرم	33/56	-8/81
ایستگاه چشمه فصل سرد (مدل ۳)	47/10	26/17
ایستگاه آتی‌ساز فصل سرد (مدل ۳)	49/81	12/43
ایستگاه چشمه فصل سرد (مدل ۴)	38/42	12/73
ایستگاه آتی‌ساز فصل سرد (مدل ۴)	39/11	2/82

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد، چنانچه از رگرسیون تک‌متغیره برای برآورد PM_{10} بهره برده شود، به عبارت دیگر AOD تنها متغیر مستقل باشد، مدل فصل گرم براساس ضریب تعیین نتایج بهتری ارائه می‌کند، به این دلیل که در فصل گرم تغییرپذیری دما، سرعت باد و لایه مرزی کمتر است؛ بنابراین رابطه دو متغیر AOD و PM_{10} در این فصل کمتر تحت تأثیر شرایط جوی قرار می‌گیرد. اما با بهره‌بردن از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره و پارامترهای هواشناسی، مدل فصل سرد نتایج بهتری ارائه می‌کند که در تطابق با نتیجه مطالعه یو و همکاران (۲۰۱۵) است. در مدل ارائه شده در فصل گرم متغیر سرعت باد می‌تواند نتایج حاصل از مدل رگرسیونی رابطه AOD و PM_{10} را بهبود ببخشد که رابطه مستقیمی با PM_{10} دارد.

یعنی با افزایش سرعت باد، مقدار PM10 افزایش می‌یابد. همان‌طور که نظری و همکاران (۱۳۹۲) نیز بیان کردند، رابطه مستقیم متغیر سرعت باد با PM10 نشان می‌دهد که در فصل گرم به دلیل رطوبت کم خاک در منطقه، افزایش سرعت باد می‌تواند قدرت انتقال و حمل ذرات جامد از سطح زمین به جو را افزایش داده و بنابراین میزان PM10 را افزایش دهد. اما در فصل سرد که فصل مرطوب منطقه مورد مطالعه است باد چنین اثری ندارد و نقش آن در پراکندگی ذرات معلق به کلی تغییر می‌کند. این مسئله توانسته با وجود ضریب تغییرات کمتر سرعت باد در فصل گرم، باعث نمود و تأثیرگذاری بیشتر آن در مدل این فصل (نسبت به مدل فصل سرد) شود. در فصل سرد وجود متغیرهای ارتفاع لایه مرزی و دما در مدل رگرسیون برای بهبود آن به لحاظ آماری قابل قبول است. متغیر ارتفاع لایه مرزی ارتباط منفی و دو متغیر دیگر ارتباط مثبت با PM10 نشان می‌دهند. بیشترین نقش دما بر مقدار PM10 به واسطه افزایش لایه مرزی و ارتباط این دو متغیر وابسته قابل توجه است که باعث کاهش تراکم PM10 می‌شود، اما از آنجا که این نقش عنصر دما توسط همان متغیر ارتفاع لایه مرزی نمود می‌یابد، آنچه باقی می‌ماند نقش ثانویه دما در تولید ذرات PM10 است. این مسئله می‌تواند نشان دهد چرا برخلاف نتایج نظری و همکاران (۱۳۹۲)، در این مطالعه دما با مقدار PM10 رابطه معنی‌داری نشان نمی‌دهد که دلیل آن نقش دو جانبه دما بر آن می‌باشد. نتایج این مطالعه در تطابق با نتایج رنگزن و همکاران (۱۳۹۳) در استان خوزستان نشان داد رطوبت نسبی عامل مهم تأثیرگذار بر رابطه PM10 و AOD نیست. درحالی که ونگ و همکاران (۲۰۱۰)، رابطه بین AOD و PM نشان دادند که رطوبت نسبی عامل تأثیرگذاری در تعیین مقدار PM10 است.

به‌طور کلی، براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان نمود که مدل‌های رگرسیون فصول گرم و سرد به لحاظ آماری در سطح اطمینان ۹۹ درصد قابل قبول است. بنابراین میزان نوسانات PM10 که توسط مدل قابل توجه است، تصادفی نیست، هرچند که تغییرات توجه‌شده توسط مدل ارائه‌شده کم است، و خطاهای محاسبه‌شده در بخش ارزیابی مدل نشان داد که مدل‌های ارائه‌شده دقت زیادی ندارند. یو و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند کاربرد مدل با محاسبه لگاریتم طبیعی در مقایسه با مدل رگرسیون خطی ضریب همبستگی را تا سه برابر بهبود می‌بخشد، درحالی که در این پژوهش میزان بهبود نتایج بسیار کمتر از این مقدار بوده است. گرگوریک و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیق خود همانند نتایج این پژوهش به نتیجه قابل قبولی در مورد رابطه AOD سنجده مادیس و مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه نرسیدند. به نظر می‌رسد آنچه نتایج این مطالعات را متفاوت می‌کند، احتمالاً شدت تغییرپذیری مکانی مقدار ذرات معلق در جو است. با توجه به قدرت تفکیک مکانی ضعیف محصولات AOD (۱۰ کیلومتر)، میزان نوسان این



متغیر می‌تواند عامل بسیار مهمی در شدت همبستگی متغیر AOD و PM10 باشد. بنابراین عملی‌شدن تخمین غلظت ذرات معلق با کاربرد AOD در نواحی با تغییرپذیری مکانی بالا، نیاز به کاربرد محصولاتی با قدرت تفکیک مکانی بهتر دارد. هرچند عدم قطعیت ناشی از اختلاف قدرت تفکیک زمینی می‌تواند نتایج را تحت‌تأثیر قرار دهد.

فهرست منابع

- Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Remer, L.A., Tanré, D., Holben, B.N., “Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval overland,” *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, No. 12, pp: 1-4, 2002.
- Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Zibordi, G., Chern, J.D., Mao, J., Li, C., Holben, B.N., “Global monitoring of air pollution over land from EOS- Terra MODIS,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. D21, pp: 1-18, 2003.
- Chu, D. A., Tsai, T. C., Chen, J. P., Chang, S. C., Jeng, Y. J., Chiang, W. L., Lin, N. H., “Interpreting lidar aerosol extinction profiles to better estimate surface PM2.5 for columnar AOD measurements,” *Atmos. Environ.*, Vol. 79, pp: 172-187, 2013.
- Donkelaar, A., Martin R. V., Park R. J., “Estimating ground level PM2.5 using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, No. D21, pp: 1-10, 2006. D21201. doi:10.1029/2005JD006996
- Grguric, S., Krizan, J., Gasparac, G., Antonic, O., Spiric, Z., Mamouri, R., et al., “Relationship between MODIS based Aerosol Optical Depth and PM10 over Croatia,” *Open Geoscience*, Vol. 6, No. 1, pp: 2-16, 2014.
- Gupta, P., Christopher, S.A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y.C., Kumar, N., “Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities,” *Atmos. Environ.* Vol. 40, No. 30, pp: 5880-5892, 2006.
- Gupta, P., Christopher, S.A., “An evaluation of Terra-MODIS sampling for monthly and annual particulate matter air quality assessment over the Southeastern United States,” *Atmospheric Environment*, Vol. 42, pp: 6465–6471, 2008.

- Gupta, P., Christopher, S.A., “Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach,” *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 114, pp: 1-13. 2009.
- Gupta, P., Khan, M. N., Silva, A., Patadia, F., “MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: quantity and quality of the data for air quality monitoring,” *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 4, pp: 43-52, 2013.
- Hejazi, A., Mobashari, M., Ahmadian, A., “Spatial distribution map of suspended particles with diameter less than two and a half micrometers in Tehran air using MODIS data,” *Journal of Applied Geosciences Research*, Vol. 12, No. 26, pp: 161-178, 2014.
- Hsu, N.C., Tsay, S.C., King, M.D., Herman, J.R., “Aerosol properties over bright reflecting source regions,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* Vol. 42, pp: 557-569, 2004.
- Hsu, N.C., Tsay, S.C., King, M.D., Herman, J.R., “Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* Vol. 44, pp: 3180-3195, 2006.
- Hsu, N.C., Gautam, R., Sayer, A.M., Bettenhausen, C., Li, C., Jeong, M.J., Tsay, S.C., Holebn, B.N., “Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010,” *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 12, No. 17, pp: 8037-8053, 2012.
- Kaufman, Y.J., “Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp: 16815–16830, 1997.
- Khoshshima, M., Sabet Ghadam, S., Aliakbar Bidokhti, A., “Estimation of atmospheric particulate matter (PM10) concentration based on remote sensing measurements and meteorological parameters: application of artificial neural network,” *Earth and Space Physics*, Vol. 41, No. 3, pp: 499-510, 2015.
- Lee, H. J., Liu, Y., Coull, B. A., Schwartz, J., Koutrakis, P., “A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM2.5 concentrations,” *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 11, pp: 7991-8002, 2011.



- Levy, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F., Kaufman, Y.J., “Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance,” *J. Geophys. Res.* Vol. 112, No. D13, pp:1 -21, 2007.
- Levy, R.C., Remer, L.A., Kleidman, R.G., Mattoo, S., Ichoku, C., Kahn, R., Eck, T.F., “Global evaluation of the collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land,” *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 10, pp: 10399-10420, 2010.
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F., Hsu, N.C., “The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean, ” *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 6, pp: 2989–3034, 2013.
- Liu, Y., Sarnat, J. A., Kilaru, V., Jacob, D. J., Koutrakis, P., “Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing,” *Environmental science & technology*. Vol. 39, pp: 3269-3278, 2005.
- Liu, Y., Franklin, M., Kahn, R., Koutrakis, P., “Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM_{2.5} concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 107, pp: 33-44, 2007.
- Martins, J. V., Tanré, D., Remer, L. A., Kaufman, Y. J., Mattoo, S., and Levy, R., “MODIS Cloud Screening for Remote Sensing of Aerosol over Oceans using Spatial Variability,” *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, No. 12, pp: 1-4, 2002.
- Mohamadinejad, S., Alimohamadi, A., Farajzadeh, M., “Air particles (less than 10Mq) spatial distribution Analysis and mapping in Khuzestan area based on Modissensorproducts,” *Spatial Planning*, Vol. 18, No. 3, pp:79-98, 2015.
- Mousivand A, shamsoddini A, asadollahi I. “Air pollution estimation using traffic volume data and primary weather data: case study Mashhad,” *Spatial Planning*, Vol. 21, No. 2, pp:197-218, 2017.
- Nazari, Z., Khorasani, N., Feiznia, S., Karami, M., “Investigation of Temporal Variations of PM₁₀ Concentration and Influence of Meteorological Parameters on it During 2005-2010,” *Journal of Natural Environment*, Vol. 66, No. 1, pp: 101-111, 2013.

- Pahlavan, A., Pahlavan, R., Esmaili, A., “Estimating PM10 and PM2.5 in Tehran mega city using MODIS data of Terra and Aqua satellites,” *Nivar*, Vol. 38, No. 84-85, pp: 57-68, 2014.
- Rangzan, K., Zarasvandi, A., Abdolkhani, A., Mojaradi, B., “Modeling Air Pollution Using Modis Images: A Case Study of Dust Masses in Khuzestan Province,” *Advanced Applied Geology*, Vol. 4, No. 4, pp: 38-45, 2014.
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F., Vermote, E., Holben, B.N., “The MODIS aerosol algorithm, products, and validation,” *J. Atmos. Sci.* Vol. 62, No. 4, pp: 947-973, 2005.
- Remer, L.A., Kleidman, R.G., Levy, R.C., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Martins, J.V., Ichoku, C., Koren, I., Yu, H., Holben, B., “Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors,” *J. Geophys. Res.* Vol. 113, pp: 1-18, 2008.
- Remer, L.A., Mattoo, S., Levy, R.C., Munchak, L.A., “MODIS 3km aerosol product: algorithm and global perspective,” *Atmos. Meas. Tech.*, Vol. 6, pp: 1829–1844, 2013.
- Retalis, A., Hadjimitsis, D. G., Michaelides, S., Tymvios, F., Chrysoulakis, N., Clayton, C. R. I. and Themistocleous, K., “Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* Vol. 10, pp: 421-428, 2010.
- Tanre, D., Herman, M., and Kaufman, Y., “Information on aerosol size distribution contained in solar reflected spectral radiances,” *J. Geophys. Res.-Atmos.* Vol. 101, pp: 19043–19060, 1996.
- Tanre, D., Kaufman, Y.J., Herman, M., Mattoo, S., “Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances,” *J. Geophys. Res.* Vol. 102, No. D14, pp: 16971-16988, 1997.
- Sayer, A. M., Hsu, N. C., Bettenhausen, C., and Jeong, M.-J., “Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 “Deep Blue” aerosol data,” *J. Geophys. Res.-Atmos.* Vol. 118, pp: 7864–7872, 2013.



- Segura, S., Estellés, V., Esteve, A. R., Tena, F., Utrillas, M. P., Martínez-Lozano, J. A., “Assessment and application of MODIS ocean and land algorithms for the characterization of aerosol properties over a Mediterranean coastal site,” *Atmospheric Research*. Vol. 157, pp: 66-73, 2015.
- Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y., Su, L., “Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method,” *Remote Sensing of Environment*. Vol. 114, No. 1, pp: 50-63, 2010.
- You, W, Zang, Z., Zhang, L., Zhang, Pan, X., Li, Y, “A nonlinear model for estimating ground-level PM10 concentration in Xi’an using MODIS aerosol optical depth retrieval,” *Atmospheric Research*, doi: 10.1016/j.atmosres.2015.09.008, 2015.
- Yu, Y., Xia, D. S., Chen, L. H., Liu, N., Chen, J. B., Gao, Y. H., “Analysis of particulate pollution characteristics and its causes in Lanzhou, Northwest China,” *Environmental Science*. Vol. 31, pp: 22-28, 2010.