

تخمین غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در تهران با استفاده از داده‌های دورسنجی عمق نوری هواویزها

امیر هوشنگ احسانی^{۱*}، مصطفی بیگدلی^۲

۱- دانشیار دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۲- دانشجوی مقطع دکتری آلودگی هوا دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

چکیده

تأثیر قابل ملاحظه و منفی ذرات $PM_{2.5}$ بر سلامتی انسان و محیط زیست، ضرورت اندازه‌گیری دقیق و مستمر این آلاینده را اجتناب ناپذیر می‌سازد. استفاده از تکنولوژیهای نوین سنجش از دور ماهواره‌ای می‌تواند جایگزین مناسب و کم هزینه ای برای اندازه‌گیری‌های زمینی باشد. تخمین دقیق غلظت زمینی ذرات $PM_{2.5}$ با استفاده از عمق نوری هواویزها (AOD) به این دلیل که رابطه بین AOD و $PM_{2.5}$ تحت تأثیر پارامترهای مختلف و شرایط هواشناسی است، به آسانی قابل انجام نمی‌باشد. در این مطالعه مقادیر AOD از داده های سنجنده MODIS با دقت مکانی سه کیلومتر طی یک دوره‌ی زمانی یکساله از ۱ تیر ۱۳۹۶ تا ۳۱ خرداد ۱۳۹۷ جهت تخمین غلظت‌های $PM_{2.5}$ برای ۱۶ ایستگاه زمینی در شهر تهران استخراج گردید. غلظت‌های $PM_{2.5}$ برآورد شده با مقادیر سالانه اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شرکت کنترل کیفیت هوای تهران برای مدت زمان مورد مطالعه مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل رگرسیونی برقرار شده با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.99$) همخوانی کامل مقادیر سالانه غلظت‌های $PM_{2.5}$ برآورد شده و اندازه‌گیری شده از داده‌های MODIS در ایستگاه‌ها دارد. با توجه به نقشه توزیع مکانی غلظت $PM_{2.5}$ پیش‌بینی شده، مناطق اطراف ایستگاه‌های شادآباد و شهرداری منطقه ۱۱ به عنوان آلوده‌ترین و مناطق اطراف ایستگاه‌های اقدسیه، گلبرگ، شهرداری منطقه ۲ و مسعودیه بعنوان پاک‌ترین بخش‌های شهر تهران می‌باشند. نتایج نشان داد که داده های دورسنجی عمق نوری هواویز دارای توانایی قابل قبولی جهت پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ سالانه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: داده‌های ماهواره‌ای، عمق نوری هواویز، آلودگی هوا، $PM_{2.5}$ ، MODIS.

مقدمه

یکی از آلاینده‌های اصلی هوا ذرات معلق (PM_{10})، به ویژه ذرات ریز با قطر آئرودینامیکی کمتر از $2.5 \mu m$ میکرون ($PM_{2.5}$) است، که هنوز علی‌رغم تلاش‌های برجسته برای کاهش و کنترل آن، بعنوان یک مشکل فراگیر باقی است. ذرات $PM_{2.5}$ عمیقاً بر کیفیت هوا که رابطه نزدیکی با محیط‌زیست و سلامتی عمومی دارد اثر می‌گذارند. این ذرات بر امکان دید، جذب مستقیم و غیرمستقیم تابش خورشید، اثرات آب و هوایی و اکوسیستم‌ها تاثیر می‌گذارند (بیگدلی و همکاران، ۱۳۹۴). مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که ذرات $PM_{2.5}$ با نرخ مرگ و میر، مشکلات سیستم تنفسی و سرطان ریه ارتباط دارند. این آلاینده یکی از مولفه‌های اصلی آلودگی هوا در فضای باز است و به عنوان گروه یک سرطان زایی برای انسان طبقه بندی شده است (IARC, 2013). بنابراین ارزیابی دقیق توزیع غلظت $PM_{2.5}$ و میزان در معرض بودن افراد با آن جهت تدوین سیاست‌های کنترلی و کاهش اثرات منفی بر سلامتی بسیار حائز اهمیت است.

اگرچه اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی پایش غلظت ذرات $PM_{2.5}$ بدلیل عدم پوشش کلیه مناطق برای بررسی و مطالعه آلودگی و اثرات سلامتی ناشی از این ذرات ناکافی می‌باشد (Han et al., 2015)، سنجش از دور ماهواره‌ای در بسیاری از مطالعات (Chudnovsky et al., 2014; Kloog et al., 2011; Lee et al., 2015) به دلیل در دسترس بودن داده‌ها در یک شرایط با پوشش کامل و یکنواخت جهت دستیابی به توزیع بزرگ مقیاس ذرات استفاده شده است. محصول متداول ماهواره‌ای برای برآورد غلظت زمینی ذرات $PM_{2.5}$ ، عمق نوری هواویزها (AOD_{500}) می‌باشد.

در میان همه خصوصیات هواویزها، دانش ویژگی‌های نوری آنها یک قسمت مهم جهت ارزیابی و پیش بینی نیروهای تابشی مستقیم (یا غیر مستقیم) ناشی از آنها است. از آنجائیکه AOD یک ستون یکپارچه از ضرایب خاموشی (انقراض) هواویزها را مشخص می‌کند و در حالی که $PM_{2.5}$ نشان دهنده غلظت جرمی سطحی هواویزها است، توزیع عمودی هواویزها یک موضوع کلیدی در فرآیند تبدیل است. تعدادی از مطالعات قبلی از ساختار عمودی هواویزهای شبیه سازی شده توسط مدل‌های نقل و انتقال

شیمیایی جهانی یا منطقه‌ای (Drury et al., 2010) استفاده کرده‌اند. مطالعات بسیاری رابطه‌ی بین AOD و غلظت $PM_{2.5}$ را از طریق روش‌های مختلفی از قبیل مدل‌های آماری تجربی (Li et al., 2013; Guo et al., 2014; Liu et al., 2011; Van Donkelaar et al., 2010; Wang et al., 2010a; Xu et al., 2013) و مدل‌های فیزیکی (Su et al., 2017) ارائه کرده‌اند. روش‌های تجربی آماری رگرسیونی از قبیل رگرسیون‌های ساده خطی تا رگرسیون‌های پیچیده چند متغیره (شامل متغیرهای ارتفاع لایه مرزی، درجه حرارت، رطوبت نسبی و باد) برای ایجاد ارتباط بین AOD و $PM_{2.5}$ در ادبیات بکار رفته‌اند (Benas et al., 2013; Li et al., 2011). از آنجایی که لایه مرزی سیاره‌ای^۳ (PBL) اثرات قابل توجهی بر ساختار قائم هواویزها درون لایه‌ی شامل آلاینده‌ها می‌گذارد، در بسیاری از مطالعات، ارتفاع لایه مرزی^۴ (BLH) به عنوان یک پارامتر مهم جهت تعیین توزیع عمودی هواویزها مطرح شده است (Barnaba et al., 2010; Boyouk et al., 2010). در برخی از برآوردها، فرض می‌شود که هواویزها بطور قائم در بالای لایه مرزی محبوس شده‌اند و بطور همگن با این لایه ترکیب شده‌اند. بسیاری از مطالعات اخیر از AOD کل جهت تخمین غلظت زمینی $PM_{2.5}$ استفاده کرده‌اند (Eeftens et al., 2012; Lee et al., 2012; Luo et al., 2014).

طیف سنجی از طریق تصویربرداری چندگانه ($MISR^5$) و طیف سنجی تصویربرداری با وضوح متوسط ($MODIS^6$) دو سنجنده متداول برای اندازه‌گیری AOD بر روی خشکی و اقیانوس هستند. بطور خاص، سنجنده پیشرفته $MODIS$ برای بدست آوردن عمق نوری هواویزها (AOD) در طولانی مدت در مقیاس جهانی بکار می‌رود. بسیاری از مطالعات از محصولات AOD سنجنده $MODIS$ برای دستیابی به غلظت‌های ذرات معلق (Karimian et al., 2016; Lee et al., 2011; Lin et al., 2015; Wang et al., 2012; Wu et al., 2010b) استفاده کرده‌اند.

هدف از این تحقیق، برآورد غلظت‌های جرمی سالانه ذرات $PM_{2.5}$ با استفاده از روابط رگرسیونی و داده‌های ماهواره‌ای، بررسی روند تغییرات فصلی عمق نوری هواویزها بر روی شهر تهران و غلظت ذرات $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده توسط

ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای شرکت کنترل کیفیت هوای تهران طی یک دوره یکساله و بررسی اثر اجرای طرح ترافیک جدید بر روی غلظت $PM_{2.5}$ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه برای این تحقیق شهر تهران با ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی انتخاب گردید. تهران با جمعیت حدودی ۸/۵ میلیون نفر و مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع در کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه البرز، از شمال به نواحی کوهستانی و از جنوب به نواحی کویری منتهی شده است. ارتفاع از سطح دریای تهران در شمالی‌ترین نقاط حدوداً ۱۸۲۰ متر و در جنوبی‌ترین نقاط تقریباً ۱۰۵۰ متر می‌باشد (حجازی و همکاران، ۱۳۹۱). شهر تهران در سال ۲۰۱۱ میلادی، توسط سازمان بهداشت جهانی جزء ۱۰ پایتخت آلوده جهان بعد از بررسی آلودگی هوا در ۱۱۰۰ شهر در نقاط مختلف جهان، معرفی شد (Yu et al., 2013). مقدار غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در تهران در سال‌های اخیر و بخصوص در اواخر فصل پاییز و اوایل زمستان، در بسیاری از مواقع بالای حد استاندارد بوده که در برخی اوقات موجب بروز وضعیت هشدار و حتی خطرناک شده است.

داده‌ها

ماهواره‌های خورشید آهنگ گردشی - قطبی Terra و Aqua، در مدار قطبی با فاصله ۷۰۵ کیلومتر از زمین بین طول جغرافیایی ۸۲° شمالی و ۸۲° جنوبی که تقریباً به ترتیب در ساعات ۱۰:۳۰ و ۱۳:۳۰ به وقت جهانی خط استوا را قطع می‌کنند، قرار دارند. سنجنده MODIS در هر دو ماهواره Terra و Aqua دارای نوار عرضی ۲۳۳۰ کیلومتر هستند و داده‌های AOD روزانه را تقریباً در مقیاس جهانی با وضوح تصویر ۳ km × 3 km و 10 × 10 km ارائه می‌کنند. در این تحقیق از محصول MOD04_L2 (سطح دو مجموعه ۶/۱) سنجنده MODIS بر روی ماهواره Terra در طول موج ۵۵۰ نانومتر (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>) با قدرت

تفکیک مکانی 3 × 3 km استفاده گردید. داده‌های AOD در بازه زمانی ۱۰:۳۰-۸:۳۰ به وقت جهانی (متناظر با ۱۴-۱۲ وقت محلی) برای یک دوره‌ی زمانی یکساله از ۱ تیر ۱۳۹۶ تا ۳۱ خرداد ۱۳۹۷ دریافت شدند. با استخراج مقادیر AOD برای محدوده شهر تهران و همچنین استخراج مقادیر عمق نوری دارای طول و عرض جغرافیایی مشابه با هر یک از ایستگاه سنجش آلودگی هوای زمینی، مقدار عمق نوری هواویز روزانه هر ایستگاه مشخص گردید. در این تحقیق از داده‌های مربوط به غلظت‌های جرمی ذرات $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده (بر حسب میکروگرم بر مترمکعب) توسط دستگاه BAM^A در ایستگاه‌های شرکت کنترل کیفیت هوا (AQCC^۹) برای دوره یکساله مذکور برای ساعات ۱۲ تا ۱۴ تا متناظر با زمان عبور ماهواره از منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. همانطور که مشاهده می‌شود موقعیت مکانی ۱۶ ایستگاه مورد استفاده در شکل ۱ مشخص شده است. شایان ذکر است که مابقی ایستگاه‌های پایش شرکت کنترل کیفیت هوا در دوره مطالعاتی فاقد داده بودند.

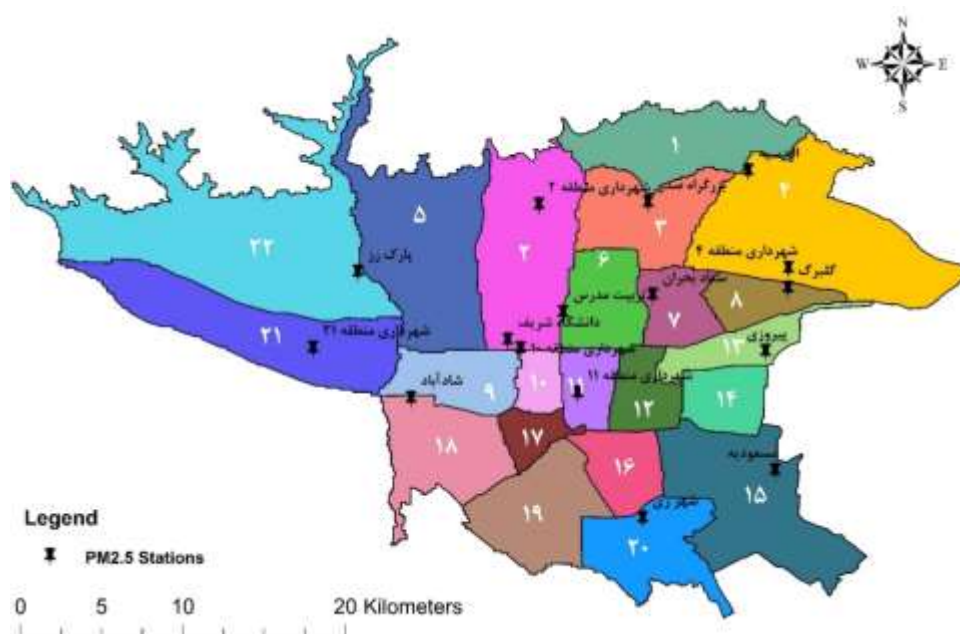
غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در دیگر نقاط تهران که فاقد ایستگاه بودند با استفاده از روش درونیابی معکوس فاصله وزنی (IDW^{10}) در یک شعاع ۱۲ کیلومتری اطراف هر ایستگاه پایش آلودگی هوا، غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در دیگر نقاط تهران که فاقد ایستگاه بودند، پیش‌بینی گردید.

استخراج غلظت سالانه ذرات معلق

جهت تعیین روابط رگرسیونی برای هر ایستگاه از داده‌های AOD و $PM_{2.5}$ روزانه (حین دوره یکساله) استفاده گردید. در این روش که مستقلاً بر روی هر یک از ایستگاه‌ها اعمال گردید، داده‌های مربوط به یک ماه از هر ایستگاه جدا و معادله رگرسیون بین داده‌های ۱۱ ماه باقیمانده برقرار شد. سپس مقادیر غلظت ذرات معلق برای ماه جدا شده با استفاده از رابطه رگرسیونی بدست آمده پیش‌بینی گردید تا توانایی رابطه مذکور در تخمین مقادیر غلظتی که از آنها در تشکیل معادله رگرسیونی استفاده نشده، سنجیده شود. نهایتاً مقادیر غلظت سالانه هر ایستگاه با میانگین‌گیری از مقادیر روزانه برآورد شده بدست آمد. این عمل برای تمامی ایستگاه‌ها به صورت جداگانه تکرار گردید تا مقدار متوسط غلظت سالانه

ایستگاه) از داده‌های AOD و PM_{2.5} روزهایی که هر دو پارامتر مذکور دارای مقدار بودند، استفاده گردید.

ذرات معلق همه ایستگاه‌ها پیش بینی شود. لازم به ذکر است که جهت تعیین معادلات رگرسیونی برای هر ماه (در هر



شکل ۱ - جانمایی ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در سطح شهر تهران

نتایج و بحث

بررسی آماری داده‌ها

براساس میانگین غلظت مجاز روزانه‌ی اعلام شده از سوی سازمان بهداشت جهانی (WHO^{۱۲})، ۳۵۴۵ مقدار از ۵۸۰۷ مقدار (یعنی حدود ۶۱٪) غلظت‌های PM_{2.5} روزانه اندازه‌گیری شده توسط همه ایستگاه‌ها بالای این مقدار ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) بودند. از طرف دیگر از این ۵۸۰۷ داده PM_{2.5} روزانه اندازه‌گیری شده تنها ۹۰۰ داده (یعنی حدود ۱۵/۵ درصد) دارای AOD متناظر بازیابی شده توسط ماهواره بودند. این موضوع می‌تواند بیانگر ضعف سنجنده MODIS در بازیابی AOD به دلایل مختلف از قبیل پوشش ابری، آلودگی ابری شدید، براق بودن سطوح و غیر باشد (ستوده‌یان و ارحامی، ۱۳۹۶).

نکته قابل توجه دیگر، میانگین سرعت باد ماهانه و مجموع بارش ماهانه می‌باشد که از سایت سازمان هواشناسی برای سال ۲۰۱۷ دریافت شد. براساس داده‌های بدست آمده، میانگین سرعت باد ماهانه بیشینه در ماه ژوئن (خرداد-تیر ۱۳۹۶ با مقدار ۳/۸ متر بر ثانیه) و میانگین سرعت باد ماهانه کمینه در دسامبر (آذر-دی ۱۳۹۶ با مقدار ۲/۱ متر بر ثانیه) رخ داده است. کمتر بودن سرعت باد به غالب شدن پدیده وارونگی و پایداری جو کمک قابل توجهی می‌کند. همچنین

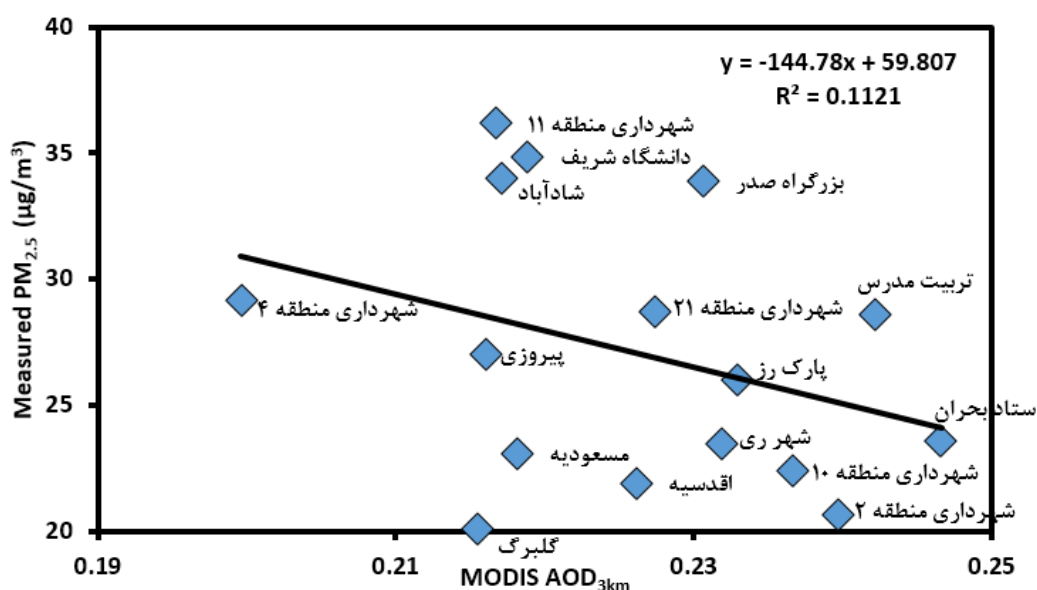
مقادیر آماری فصلی و سالیانه داده‌های AOD و PM_{2.5} اندازه‌گیری شده همه ایستگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. مقدار AOD سالانه کل ایستگاه‌ها با متوسط ۰/۲۳ و انحراف معیار (SD^{11}) ۰/۰۱ بین ۰/۲۰ تا ۰/۲۵ متغیر بود که در بین فصول مختلف بیشترین مقدار متوسط (۰/۲۴) مربوط به فصل پاییز بود. همچنین بیشترین و کمترین مقدار AOD اندازه‌گیری شده (به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۰۶) مربوط به فصل بهار بود. مقدار غلظت ذرات PM_{2.5} نیز سالانه کل ایستگاه‌ها با متوسط $27/09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و انحراف معیار (SD) ۵/۱۶ بین $20/10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ تا $36/14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ متغیر بود که در بین فصول مختلف بیشترین مقدار متوسط ($34/95 \mu\text{g}/\text{m}^3$) مربوط به فصل پاییز بود. بیشترین ($71 \mu\text{g}/\text{m}^3$) و کمترین ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) مقدار غلظت PM_{2.5} اندازه‌گیری شده به ترتیب مربوط به فصول پاییز و بهار بود. لازم به ذکر است که بیشترین مقدار متوسط داده‌های AOD و PM_{2.5} اندازه‌گیری شده (در بین همه ایستگاه‌ها) مربوط به فصل پاییز بوده است.

بیانگر ارتباط اولیه نه چندان قوی موجود بین این دو پارامتر است. استفاده از پارامترهای کمکی نظیر پارامترهای هواشناسی جهت بهبود رابطه موجود بین داده‌های AOD و $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده، مفید به نظر می‌رسد.

مجموع بارش ماهانه در ماه مارس (اسفند-فروردین ۱۳۹۶ با مقدار ۳۹٫۵ میلیمتر) بیشترین مقدار را داشته است. ارتباط بین داده‌های AOD و $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده همه ایستگاه‌ها در نمودار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب همبستگی بدست آمده ($R^2=0.11$)

جدول ۱- مقادیر آماری فصلی و سالیانه داده‌های AOD و $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده

متغیر-آماره	مقدار AOD				$PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده ($\mu g/m^3$)				فصل
	SD	Mean	Max	Min	SD	Mean	Max	Min	
	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۰۶	۴/۳۳	۲۱/۳۲	۳۴/۸۶	۷/۱۷	بهار
	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۰۱	۱۷/۰۵	۲۴/۴۱	۳۲/۹۸	۴/۶۶	تابستان
	۰/۱۰	۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۰۵	۲۱/۴۹	۳۴/۹۵	۷۱/۰۰	۱۲/۷۵	پاییز
	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۰۲	۱۶/۳۷	۳۴/۳۳	۵۵/۶۴	۱۱/۱۸	زمستان
	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۰۱	۲۰/۱۰	۳۷/۰۹	۳۶/۱۴	۵/۱۶	سالانه



نمودار ۱- همبستگی بین داده‌های AOD و $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده همه ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای تهران

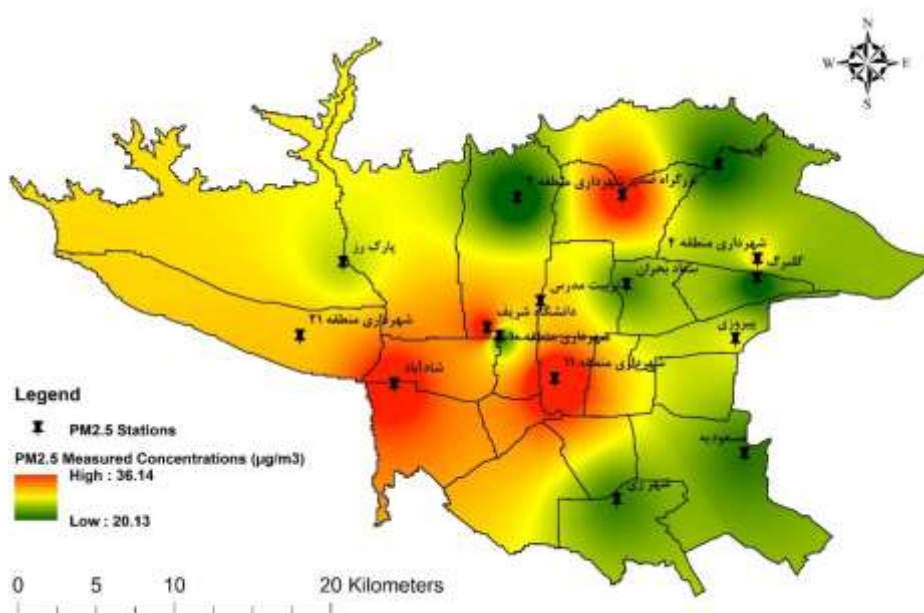
سرعت باد و میزان بارش بیشتر) و مناطق پیرامون ایستگاه‌های شادآباد، دانشگاه شریف، شهرداری منطقه ۱۱ و بزرگراه صدر (تا $36/14 \mu g/m^3$) که ممکن است ناشی از حجم سنگین عبور و مرور وسایط نقلیه از این اتوبان یا انجام تعمیرات پل باشد، بیشترین مقدار غلظت متوسط سالانه ذرات معلق $PM_{2.5}$ را دارا بودند. کاهش و تغییر درجه حرارت، و روی دادن پدیده وارونگی یکی از دلایلی است که موجب بالارفتن غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در

همانطور که در قسمت ۲٫۲ اشاره شد، با استفاده از روش درونیابی IDW در یک شعاع ۱۲ کیلومتری اطراف هر ایستگاه پایش آلودگی هوا، متوسط غلظت سالانه ذرات $PM_{2.5}$ برای مناطقی از تهران که فاقد ایستگاه بودند، پیش‌بینی گردید (شکل ۲). بر این اساس مناطق اطراف ایستگاه‌های اقدسیه، شهرداری منطقه ۲ و گلبرگ با غلظتی تا حدود $22 \mu g/m^3$ کمترین مقدار غلظت (بدلیل قرارگیری در ارتفاع بالاتر نسبت به سایر ایستگاه‌ها و احتمال دارا بودن

۱۸، ۱۹، ۲۱ و ۲۲ تهران در دوره مطالعاتی (۱۳۹۶-۹۷) غلظت‌های بالایی داشته‌اند.

در این تحقیق بطور خاص، میزان غلظت PM_{2.5} دو ماه خرداد و تیر سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ جهت بررسی تاثیر طرح ترافیک جدید (ابلاغ شده در اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ توسط شهرداری تهران) بر مقدار غلظت ذرات معلق، مقایسه گردید. متوسط غلظت خرداد و تیر ۱۳۹۶ به ترتیب $29/12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و $28/88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ اندازه‌گیری شد در حالیکه غلظت متوسط ماه‌های خرداد و تیر ۱۳۹۷ به ترتیب $24/06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و $27/87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ گزارش گردید. همانطور که ملاحظه می‌شود با اجرای طرح ترافیک جدید در شهر تهران حدود ۱۷/۳ درصد در خرداد ماه ۱۳۹۷ و حدود ۳/۵ درصد در تیرماه ۱۳۹۷ نسبت به مدت مشابه سال قبل کاهش غلظت رخ داده است.

محدوده‌های اطراف این ایستگاه‌ها شده است. غلظت‌های بالا در فصول پاییز و زمستان موجب افزایش مقدار متوسط غلظت سالانه شده است. بالاترین غلظت PM_{2.5} در ماه‌های فصل زمستان تا حدودی می‌تواند مربوط به شرایط آب و هوایی مشخص از نظر اختلاط قائم کم بدلیل پرتوهای خورشیدی ضعیف باشد. برعکس، کمترین غلظت در ماه‌های این فصل می‌تواند قدری ناشی از بارش‌های مکرر باشد که منجر به حذف موثر ذرات معلق از اتمسفر می‌گردد. در مجموع اینگونه می‌توان برداشت کرد که با تعدیل دما و پیشروی به سمت فصول سرد، تغلیظ غلظت ذرات PM_{2.5} و پدیده‌ی چگالش^{۱۳} رخ داده است. نکته قابل توجه دیگر نزدیکی دو ایستگاه دانشگاه شریف و شهرداری منطقه ۱۰ به ترتیب با غلظت‌های زیاد و کم در کنار یکدیگر است. همچنین می‌توان پیش‌بینی کرد که احتمالاً محدوده‌های وسیعی از مناطق ۲، ۳، ۵، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۷،



شکل ۲- توزیع مکانی متوسط غلظت سالانه ذرات PM_{2.5} اندازه‌گیری شده در تهران (با استفاده از روش IDW)

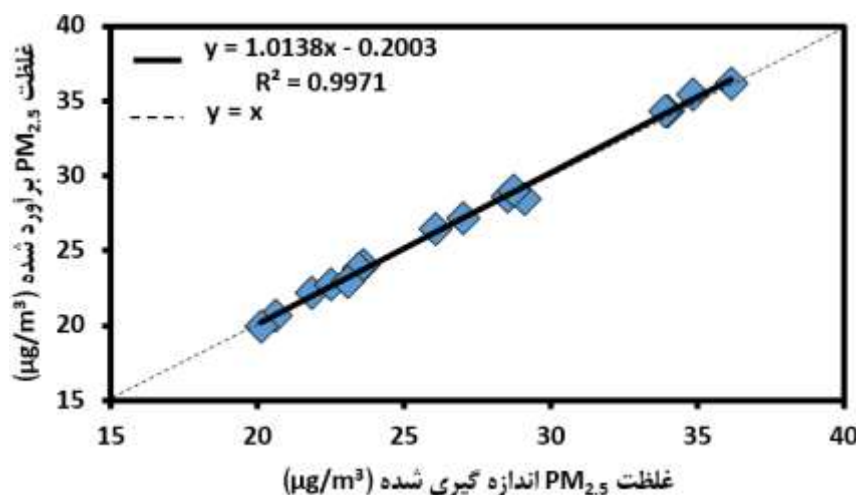
شده ارتباط بسیار خوبی بین مقادیر متوسط سالانه PM_{2.5} اندازه‌گیری شده و برآورد شده ایستگاه‌ها با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0.99$) مشاهده شد. با توجه به این نتیجه، می‌توان اظهار داشت که روش استفاده از روابط رگرسیونی دارای توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی غلظت سالانه ذرات معلق است.

عملکرد مدل رگرسیونی

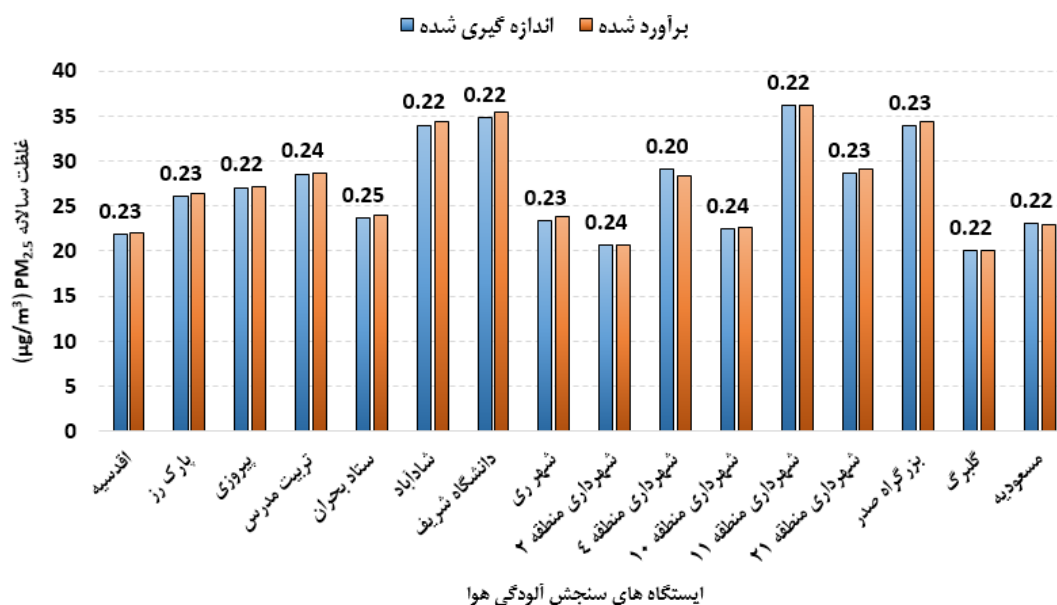
با استفاده از روش توضیح داده شده در قسمت ۲،۳، معادلات رگرسیونی بین داده‌های AOD و PM_{2.5} برای هر ماه در هر ایستگاه بدست آمد. سپس با جایگذاری داده‌های AOD در معادلات بدست آمده غلظت‌های PM_{2.5} برآورد شد. همانطور که در نمودار ۲ نشان داده

بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده بدست آمد. لازم به ذکر است که مقادیر غلظت سالانه ذرات $PM_{2.5}$ در هر ایستگاه اندکی بزرگتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد (overestimate) گردید.

مقادیر غلظت سالانه ذرات $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و مقدار AOD هر یک از ۱۶ ایستگاه مورد مطالعه در نمودار میله‌ای زیر ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اکثر ایستگاه‌ها مقادیر پیش‌بینی شده



نمودار ۲- همبستگی بین داده‌های سالانه $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده همه ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای تهران



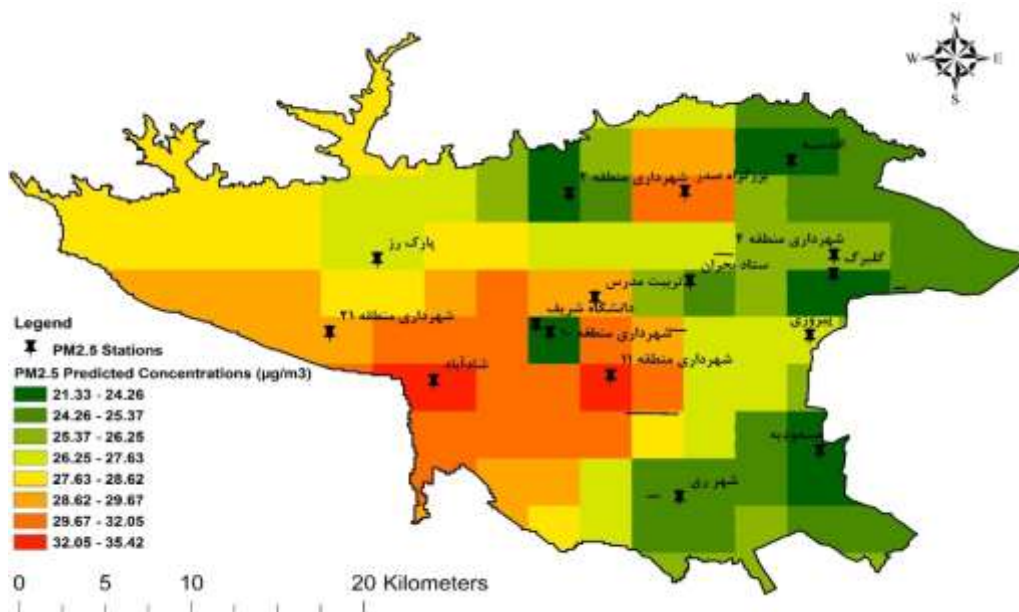
نمودار ۳- غلظت سالانه ذرات $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده همه ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای تهران

می‌شود تخمین سالانه غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در بازه $\mu g/m^3$ ۲۱/۳۳-۳۵/۴۲ قرار دارد. همانند نتایج بدست آمده برای ذرات $PM_{2.5}$ اندازه‌گیری شده، مناطق اطراف ایستگاه‌های اقدسیه، شهرداری منطقه ۲ و گلبرگ دارای کمترین مقدار غلظت (تا $24/26 \mu g/m^3$) و مناطق پیرامون ایستگاه‌های

توزیع مکانی متوسط غلظت سالانه ذرات $PM_{2.5}$ برآورد شده توسط روش رگرسیونی در شکل ۳ نشان داده شده است. غلظت ذرات معلق در سایر نقاط تهران با توجه به مقادیر برآورد شده در ایستگاه‌ها و استفاده از روش درونیابی IDW پیش‌بینی گردید. همانطور که مشاهده

بدین صورت که بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده ۷۰٪ ایستگاه‌ها هر دو روش IDW و Kriging اعمال شد و مقادیر حاصل شده توسط دو روش درونیابی مذکور برای ۳۰٪ مابقی ایستگاه‌ها با غلظت‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده مقایسه گردید.

شادآباد، دانشگاه شریف، شهرداری منطقه ۱۱ و بزرگراه صدر (تا $35/42 \mu\text{g}/\text{m}^3$) بیشترین غلظت پیش بینی شده را دارا بودند. لازم به ذکر است که علت استفاده از روش درونیابی IDW نسبت به روش درونیابی Kriging تخمین بهتر غلظت‌ها توسط روش IDW بود. که این موضوع نتیجه مقایسه بین مقادیر برآورد شده توسط هر دو روش با مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده در هر ایستگاه می‌باشد.



شکل ۳- توزیع مکانی متوسط غلظت سالانه ذرات PM_{2.5} برآورد شده در تهران (با استفاده از روش IDW)

وجود نواحی بیابانی و نیمه بیابانی به جهت دارا بودن سطح براق باشد که موجب ایجاد مشکل در بازیابی AOD توسط سنجنده MODIS می‌گردد. با توجه به پایین بدست آمدن ضریب همبستگی (R^2) رابطه $\text{PM}_{2.5}$ -AOD مشابه با پژوهش‌های پیشین (ستوده‌یان و ارحامی، ۱۳۹۶)، ضرورت انجام مطالعات بیشتر برای محدوده مورد مطالعه در آینده احساس می‌گردد.

توزیع مکانی مقادیر پیش بینی شده با توجه به شرایط جغرافیایی و توپوگرافی ایستگاه‌ها و استقرار منابع ساکن تولید آلاینده صنعتی و تجاری و همچنین وجود منابع متحرک آلاینده و شبکه حمل و نقل متراکم با شرایط واقعی شهر و مطالعات پیشین مطابقت داشت و می‌توان اظهار کرد که در نقشه تولید شده مرکز و جنوب غربی تهران آلودگی بیشتری دارد (حجازی و همکاران، ۱۳۹۱). بطور مثال مناطق

نتایج بدست آمده در این مطالعه در مقایسه با مطالعات پیشین صورت گرفته داخلی و خارجی نسبتاً قابل قبول می‌باشد. علی‌رغم استفاده از معادلات رگرسیونی بین داده‌های AOD و $\text{PM}_{2.5}$ و در نظر نگرفتن پارامترهای هواشناسی و کمکی، همخوانی بسیار خوبی بین مقادیر متوسط غلظت سالانه $\text{PM}_{2.5}$ اندازه‌گیری شده و پیش بینی شده ایستگاه‌ها بدست آمد. لازم به ذکر است مقدار غلظت اندازه‌گیری شده در بعضی از روزها بطور غیر عادی بالا مشاهده شد که به دلیل عدم رخ دادن رویداد خاصی در آن روزها، داده‌های مذکور خارج از محدوده^{۱۴} در نظر گرفته شد و از روند بررسی‌های این تحقیق حذف گردید. همچنین موجود نبودن داده‌های AOD در برخی از روزهای سال (برای هر ایستگاه) بر میزان عملکرد روش‌های رگرسیونی تأثیرگذار بود. این موضوع می‌تواند ناشی از

اقتصادی و کم هزینه نسبت به ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای زمینی که معمولاً بصورت پراکنده و دور از هم مستقر هستند، مد نظر باشد.

منابع

1. Barnaba, F., Putaud, J., Gruening, C., Dell'Acqua, A., Dos Santos, S.J.J.o.G.R.A., 2010. Annual cycle in co-located in situ, total-column, and height-resolved aerosol observations in the Po Valley (Italy): Implications for ground-level particulate matter mass concentration estimation from remote sensing. 115.
2. Benas, N., Beloconi, A., Chrysoulakis, N.J.A.e., 2013. Estimation of urban PM₁₀ concentration, based on MODIS and MERIS/AATSR synergistic observations. 79, 448-454.
3. Bigdeli, M., Arhami, M., Hosseini, V., Lai, A., Schauer, J.J., 2016. Characterizing PM_{2.5} Chemical Constituents (CMC) in Tehran, 4th National Conference on Air and Noise Pollution Management, Tehran, Iran - Center for International Broadcasting.
4. Boyouk, N., Léon, J.-F., Delbarre, H., Podvin, T., Deroo, C.J.A.E., 2010. Impact of the mixing boundary layer on the relationship between PM_{2.5} and aerosol optical thickness. 44, 271-277.
5. Chudnovsky, A.A., Koutrakis, P., Kloog, I., Melly, S., Nordio, F., Lyapustin, A., Wang, Y., Schwartz, J.J.A.E., 2014. Fine particulate matter predictions using high resolution Aerosol Optical Depth (AOD) retrievals. 89, 189-198.
- 6.
7. Drury, E., Jacob, D.J., Spurr, R.J., Wang, J., Shinzuka, Y., Anderson, B. E., Clarke, A.D., Dibb, J., McNaughton, C., Weber, R.J.J.o.G.R.A., 2010. Synthesis of satellite (MODIS), aircraft (ICARTT), and surface (IMPROVE, EPA-AQS, AERONET) aerosol observations over eastern North America to improve MODIS aerosol retrievals and constrain surface aerosol concentrations and sources. 115.
8. Eeftens, M., Beelen, R., de Hoogh, K., Bellander, T., Cesaroni, G., Cirach, M., Declercq, C., Dedele, A., Dons, E., de Nazelle, A.J.E.s., technology, 2012. Development of land use regression models for PM_{2.5}, PM_{2.5} absorbance, PM₁₀ and PMcoarse in 20 European study areas; results of the ESCAPE project. 46, 11195-11205.

۱۱ و ۱۲ بدلیل حضور وزارت‌خانه‌ها، سازمان‌ها، ادارات، شرکت‌ها، مراکز تجاری و بازار دارای تراکم بالایی از منابع ساکن و متحرک آلاینده می باشد، لذا مقادیر غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری شده در اطراف این ایستگاه‌ها بسیار بالاتر از مناطق دیگر می‌باشد. در مقابل هوای پیرامون مناطقی که ارتفاع از سطح دریای بیشتری داشته (مانند منطقه ۱، ۲ و ۴) و شبکه حمل و نقل با تراکم کمتر و میزان بارندگی بیشتر دارند، دارای غلظت کمتری از ذرات معلق PM_{2.5} بودند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از داده‌های AOD بازیابی شده از محصول MOD04_L2 (سطح دو مجموعه ۶/۱) سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی 3×3km به همراه روش رگرسیونی جهت پیش‌بینی متوسط غلظت سالانه ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که معادلات رگرسیونی استفاده شده بین داده‌های AOD بازیابی شده و PM_{2.5} اندازه‌گیری شده، علی‌رغم در نظر نگرفتن پارامترهای هواشناسی و کمکی، ارتباط بسیار خوبی بین مقادیر متوسط غلظت سالانه PM_{2.5} اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ایستگاه‌ها برقرار کرده است ($R^2=0.99$). توزیع مکانی مقادیر متوسط غلظت ذرات PM_{2.5} اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با یکدیگر مطابقت داشتند و مناطق مرکزی تهران از قبیل مناطق ۱۱ و ۱۲ بدلیل حضور مراکز اداری و تجاری بسیار جزء آلوده‌ترین مناطق به آلاینده PM_{2.5} بودند درحالی‌که مناطق مرتفع (مانند منطقه ۱، ۲ و ۴) بعنوان پاک‌ترین مناطق مشاهده شدند. همچنین نقشه توزیع مکانی بدست آمده تا حد بالایی بیانگر و نشان‌دهنده وضعیت واقعی محدوده مورد مطالعه بود.

با توجه به توانایی قابل قبول روش رگرسیونی در تخمین متوسط غلظت سالانه ذرات معلق، می‌توان از آن برای مناطقی که از لحاظ توپوگرافی، وضعیت آب و هوایی و منابع آلاینده ساکن و متحرک مشابه هستند (دارای نواحی بیابانی و نیمه بیابانی و شبکه حمل و نقل متراکم) استفاده نمود. شایان ذکر است که جهت تسریع در پیش‌بینی (همراه با دقت قابل قبول) غلظت متوسط ذرات آلاینده PM_{2.5}، استفاده از دورسنجی ماهواره‌ای می‌تواند بعنوان جایگزینی

20. Luo, N., Zhao, W., Yan, X.J.F.E.B., 2014. Integrated aerosol optical thickness, gaseous pollutants and meteorological parameters to estimate ground PM_{2.5} concentration. 23, 2567-2577.
21. Sotudian, S., Arhami, M., 2017. Using the linear mixing effects model to predict the concentration of suspended particles at ground level: a case study in Tehran. Journal of Health and Environment, Iranian Society of Environmental Health 10th, No.2.
22. Su, T., Li, J., Li, C., Xiang, P., Lau, A.K.H., Guo, J., Yang, D., Miao, Y.J.J.o.G.R.A., 2017. An intercomparison of long-term planetary boundary layer heights retrieved from CALIPSO, ground-based lidar, and radiosonde measurements over Hong Kong. 122, 3929-3943.
23. Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., Villeneuve, P.J.J.E.h.p., 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. 118, 847.
24. Wang, J., Xu, X., Spurr, R., Wang, Y., Drury, E.J.R.S.o.E., 2010a. Improved algorithm for MODIS satellite retrievals of aerosol optical thickness over land in dusty atmosphere: Implications for air quality monitoring in China. 114, 2575-2583.
25. Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y., Su, L.J.R.s.o.e., 2010b. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. 114, 50-63.
26. Wu, Y., Guo, J., Zhang, X., Tian, X., Zhang, J., Wang, Y., Duan, J., Li, X.J.S.o.t.T.E., 2012. Synergy of satellite and ground based observations in estimation of particulate matter in eastern China. 433, 20-30.
27. Xu, X., Wang, J., Henze, D.K., Qu, W., Kopacz, M.J.J.o.G.R.A., 2013. Constraints on aerosol sources using GEOS-Chem adjoint and MODIS radiances, and evaluation with multisensor (OMI, MISR) data. 118, 6396-6413.
28. Yu, L., Wang, G., Zhang, R., Zhang, L., Song, Y., Wu, B., Li, X., An, K., Chu, J.J.A.A.Q.R., 2013. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in an urban environment in Beijing. 13, 574-583.
9. Guo, Y., Feng, N., Christopher, S.A., Kang, P., Zhan, F.B., Hong, S.J.I.j.o.r.s., 2014. Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality over Beijing using MODIS. 35, 6522-6544.
10. Han, Y., Wu, Y., Wang, T., Zhuang, B., Li, S., Zhao, K.J.S.o.t.T.E., 2015. Impacts of elevated-aerosol-layer and aerosol type on the correlation of AOD and particulate matter with ground-based and satellite measurements in Nanjing, southeast China. 532, 195-207.
11. Hejazi, A., Mobasheri, M., Ahmadian, A., 2013. Preparation of spatial distribution map of suspended particles with diameter less than two half micrometers in Tehran city using Modis sensor data. Applied Geosciences Research 12th Year, No. 26.
12. IARC, 2013. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths.
13. Karimian, H., Li, Q., Li, C., Jin, L., Fan, J., Li, Y.J.A., Research, A.Q., 2016. An improved method for monitoring fine particulate matter mass concentrations via satellite remote sensing. 16, 1081-1092.
14. Kloog, I., Sorek-Hamer, M., Lyapustin, A., Coull, B., Wang, Y., Just, A.C., Schwartz, J., Broday, D.M.J.A.E., 2015. Estimating daily PM_{2.5} and PM₁₀ across the complex geo-climate region of Israel using MAIAC satellite-based AOD data. 122, 409-416.
15. Lee, H., Liu, Y., Coull, B., Schwartz, J., Koutrakis, P.J.A.C., Discussions, P., 2011. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM_{2.5} concentrations. 11.
16. Lee, H.J., Coull, B.A., Bell, M.L., Koutrakis, P.J.E.r., 2012. Use of satellite-based aerosol optical depth and spatial clustering to predict ambient PM_{2.5} concentrations. 118, 8-15.
17. Li, C., Hsu, N.C., Tsay, S.-C.J.A.E., 2011. A study on the potential applications of satellite data in air quality monitoring and forecasting. 45, 3663-3675.
18. Lin, C., Li, Y., Yuan, Z., Lau, A.K., Li, C., Fung, J.C.J.R.S.o.E., 2015. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM_{2.5}. 156, 117-128.
19. Liu, Y., Wang, Z., Wang, J., Ferrare, R.A., Newsom, R.K., Welton, E.J.J.R.s.o.e., 2011. The effect of aerosol vertical profiles on satellite-estimated surface particle sulfate concentrations. 115, 508-513.