



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## بررسی رابطه موجود میان غلظت ذرات معلق و عمق اپتیکی آلاینده‌ها طی دوره‌های گردوغبار: مطالعه موردی در شهر تهران

سعید ستوده‌یان\*، بهناز شیرازی رومنن  
شهرداری تهران، تهران، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: طی سالیان گذشته، آلودگی هوا و افزایش سطح ذرات معلق (PMs) به یک معضل اصلی بهداشت در کلانشهر تهران بدل شده است. هزینه بالای احداث و نگهداری ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، امکان دستیابی به یک پوشش مکانی-زمانی مناسب از داده‌های PM را دشوار نموده است. در این راستا، استفاده از داده‌های سنجش از دور مانند عمق اپتیکی آلاینده‌ها (AOD) می‌تواند به عنوان روشی سریع و اقتصادی به منظور برطرف نمودن موانع موجود به کار گرفته شود.

۹۹/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت:

۹۹/۰۶/۱۲

تاریخ ویرایش:

۹۹/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش:

۹۹/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار:

روش بررسی: با توجه به ضعف رابطه خطی خام تک متغیره PM<sub>10</sub>-AOD در شرایط عادی، در تحقیق پیش‌رو رابطه مذکور برای بازه‌های زمانی وقوع پدیده گردوغبار طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ میلادی در تهران مورد بررسی قرار گرفته است. از داده‌های ماهواره‌ای با دقت مکانی ۳ km و ۱۰ km استخراج شده از سنجنده MODIS به منظور برازش مدل‌ها استفاده شده است.

یافته‌ها: بهترین عملکرد مدل تک متغیره مربوط به شعاع ۳ km استخراج AOD و متوسط روزانه PM<sub>10</sub> است (R<sup>2</sup>=۰/۵۵). استفاده از متغیرهای کمکی هواشناسی و توسعه مدل رگرسیون خطی چند متغیره سبب بهبود عملکرد مدل گردیده است (R<sup>2</sup>=۰/۶۴). همچنین مدل نهایی توانایی پیش‌بینی غلظت‌های بالای PM<sub>10</sub> در دوره‌های گردوغبار را داراست.

واژگان کلیدی: ذرات معلق، عمق اپتیکی آلاینده‌ها، طوفان‌های گردوغبار، مدل رگرسیون خطی چند متغیره، سنجنده مادیس

نتیجه‌گیری: در مجموع، رابطه خطی خام تک متغیره میان PM<sub>10</sub> و AOD در دوره‌های گردوغبار قوی‌تر از رابطه مذکور در شرایط عادی بوده و این امر نشان می‌دهد همبستگی بالاتری میان AOD و PM<sub>10</sub> ناشی از گردوغبار -نسبت به ذرات معلق ناشی از منابع دیگر- وجود دارد. همچنین مدل نهایی توسعه داده شده می‌تواند به منظور پیش‌بینی روزانه PM<sub>10</sub> در دوره‌های گردوغبار به کار گرفته شود.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

Saeed\_sotodian@yahoo.com

## مقدمه

طی دهه‌های گذشته غلظت آلاینده‌های هوا در دنیا به ویژه در کشورهای در حال توسعه به میزان قابل توجهی افزایش یافته و این موضوع به دلیل ارتباط تنگاتنگ آن با سلامتی افراد جامعه به یک معضل جهانی بدل شده است (۱، ۲). افزایش سطح غلظت ذرات معلق شامل  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  (به ترتیب ذرات معلق با قطر آیرودینامیکی کمتر از  $2.5 \mu m$  و  $10 \mu m$ )، دارای ارتباط مستقیم و معنی‌داری با اثرات سوء بر سلامتی افراد جامعه است (۳-۶). به منظور تعیین دقیق غلظت ذرات معلق در سطح زمین، ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در نقاط مختلف کلانشهرها احداث و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. با این حال، مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها می‌تواند معرف خوبی برای یک محدوده کوچک در اطراف آنها بوده و مقادیر مذکور برای نقاط دورتر (به دلیل میزان قابل توجه ذرات معلق ناشی از منابع مختلف) با عدم قطعیت‌های زیادی همراه خواهد بود. از سوی دیگر، با توجه به توزیع مکانی نامناسب و هزینه بالای بهره‌برداری و نگهداری ایستگاه‌های سنجش در مناطق شهری، دستیابی به پوشش مکانی-زمانی دقیق از غلظت ذرات معلق در مناطق مورد نظر بسیار دشوار است. در این راستا، تکنیک سنجش از دور به منظور غلبه بر معضل مذکور و دستیابی به تخمین قابل قبولی از سطح ذرات معلق در محیط‌های آلوده شهری پیشنهاد شده است (۷-۹). طی دهه‌های گذشته پارامتر بازیابی شده توسط ماهواره‌ها تحت عنوان عمق اپتیکی آلاینده‌ها (Aerosol Optical Depth (AOD)) که دارای دقت زمانی و مکانی مناسبی است، به منظور تخمین مقادیر غلظت ذرات معلق در سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است. AOD بازیابی شده پارامتری بی بعد است که نشان دهنده میزان بار آلاینده‌های اتمسفری و ترکیبات آنها بوده و می‌تواند به عنوان یک متغیر کمکی تاثیرگذار به منظور تخمین غلظت ذرات معلق به کار گرفته شود (۱۰-۱۲). شایان ذکر است AOD بازیابی شده توسط سنسورهای ماهواره‌ای به عنوان

شاخصی از خصوصیات اپتیکی آلاینده‌ها در ستون جو، به شدت تحت تاثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات بوده و تغییرات آنها می‌تواند سبب تاثیر قابل توجه بر رابطه PM-AOD گردد (۱۳، ۱۴). رابطه PM-AOD طی سالیان گذشته با استفاده از روش‌های مختلف مدلسازی شده و عملکرد آن در نقاط مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات اولیه رابطه تک متغیره ساده میان مقادیر غلظت و پارامتر AOD بررسی گردید (۱۷-۱۵) و در ادامه مدل‌های پیچیده‌تر با استفاده از پارامترهای کمکی موثر از جمله پارامترهای هواشناسی توسعه داده شد (۲۴-۱۸). اگرچه مطالعات اخیر توانایی قابل توجه محصولات ماهواره‌ای در تخمین غلظت ذرات معلق در سطح زمین را نشان می‌دهد (۲۷-۲۵)؛ رابطه PM-AOD به دلیل تغییر خصوصیات ذرات، شرایط آب‌وهوایی، منابع و نوع ذرات معلق تولید شده در منطقه مورد مطالعه دارای عملکرد متفاوت در نقاط مختلف دنیا است (۲۸، ۲۹).

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد رابطه تک متغیره PM-AOD در نقاط مختلف دنیا در بازه‌های زمانی عادی عملکرد متفاوتی داشته است. در این راستا، Wang و همکاران رابطه بین AOD به دست آمده از MODIS و غلظت  $PM_{2.5}$  در ۷ ایستگاه در شهر جفرسون در آلاباما در سال ۲۰۰۲ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که رابطه خوبی بین AOD و  $PM_{2.5}$  برقرار است ( $r^2=0.7$ ). آنها نشان دادند با استفاده از یک رابطه خطی تجربی بین AOD و متوسط روزانه  $PM_{2.5}$ ، می‌توان از AOD به منظور تخمین کیفیت هوا استفاده نمود (۱۵). Engel-Cox و همکاران طی مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۲ مقادیر AOD بازیابی شده توسط MODIS و همچنین تصاویر ماهواره‌ای در دسترس را با مقادیر غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی مقایسه نمودند. نتایج حاصله نشان داد مقدار  $r^2$  مربوط به رابطه خطی مورد بحث برای مقادیر متوسط روزانه و متوسط ساعتی غلظت ذرات معلق به ترتیب برابر با ۰/۱۸ و ۰/۱۶

از MODIS، ضریب تعیین تا ۰/۲۱ افزایش یافته است (۳۰). همچنین Ghotbi و همکاران نشان دادند ضریب همبستگی رابطه خام تک متغیره  $PM_{10}$ -AOD برای شهر تهران طی سال ۲۰۰۹ برای ۱۰ ایستگاه انتخابی ۰/۱۲ است و در صورت استفاده از مدل‌های پیچیده آماری و بهره‌گیری از پارامترهای هواشناسی، عملکرد مدل اولیه به میزان قابل توجهی ارتقاء خواهد یافت (۳۱). Sotoudeheian و همکار با استفاده از داده‌های AOD استخراج شده از MODIS با دقت مکانی ۳ km برای ۱۳ ایستگاه در شهر تهران، رابطه  $PM_{2.5}$ -AOD را برای سال ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد رابطه خطی تک متغیره  $PM_{2.5}$ -AOD دارای ضریب تعیین بسیار پایین است ( $r^2$  برابر با ۰/۰۳) و در صورت استفاده از پارامترهای هواشناسی و مدل‌های آماری غیرخطی، عملکرد مدل بهبود خواهد یافت (۳۲). با توجه به مطالعات انجام شده مشخص می‌شود که اگرچه استفاده از مدل‌های پیچیده غیرخطی می‌تواند سبب بهبود عملکرد رابطه  $PM$ -AOD گردد؛ اما رابطه خطی تک متغیره و خام، اغلب دارای عملکرد مناسبی نیست. لذا، می‌بایست رابطه مذکور برای شرایط زمانی و مکانی مختلف مورد بررسی و ارزیابی دقیق‌تر قرار گیرد.

ساکنین شهر تهران (به عنوان پایتخت ایران) همه ساله در معرض سطح بالایی از غلظت ذرات معلق ناشی از شبکه حمل و نقل متراکم و دوره‌های گردوغبار مداوم (تولید شده از منابع مختلف موجود در خاورمیانه) قرار دارند (۳۳، ۳۴). علیرغم وجود چنین معضلی در کلانشهر تهران و انجام مطالعات محدود در این خصوص، به نظر می‌رسد در شرایط فعلی انجام مطالعات جدید و بررسی رابطه  $PM$ -AOD برای شرایط خاص امری ضروری است (۳۰-۳۲، ۳۵). از سوی دیگر مشکلات مربوط به بازیابی AOD توسط سنسورهای ماهواره‌ای در مناطق خشک و نیمه خشک سبب شده است تا بررسی رابطه  $PM$ -AOD به یک موضوع چالشی تبدیل شده و به دلایل متعددی مانند ضعف سنسورها در بازیابی

است. همبستگی حاصله برای مناطق شرقی و میانه غربی دارای عملکرد بهتری است (۱۲). Gupta و همکاران با استفاده از داده‌های غلظت ذرات معلق ساعتی همزمان، AOD بازیابی شده از MODIS و پارامترهای هواشناسی، مدل رگرسیون خطی چند متغیره‌ای را برای مناطق جنوب شرقی آمریکا توسعه دادند. بررسی‌ها نشان داد رابطه خطی تک متغیره  $PM$ -AOD دارای مقدار  $r^2$  برابر با ۰/۳۶ بوده و با اضافه شدن پارامترهای هواشناسی به رابطه خطی مقدار  $r^2$  می‌تواند تا ۰/۴۶ افزایش یابد (۱۸). Dinoi و همکاران طی مطالعه‌ای در مناطق جنوب شرقی ایتالیا در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸، همبستگی موجود میان AOD بازیابی شده از MODIS و غلظت روزانه  $PM_{10}$  در ایستگاه‌های زمینی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد مقدار  $r^2$  مربوط به رابطه خطی  $PM_{10}$ -AOD می‌تواند در بازه ۰/۱۲-۰/۰۴ تغییر نماید. برای حالتی که آنالیزها به شرایط آسمان بدون ابر محدود می‌گردد، بازه مذکور بهبود می‌یابد (۰/۱۲-۰/۳۳) (۱۱). Sorek-Hamer و همکاران نیز طی مطالعه انجام شده در کالیفرنیا، ضمن بررسی ۳ مدل پیش‌بینی کننده از جمله مدل رگرسیون خطی، نشان دادند مقدار  $r^2$  رابطه خطی  $PM$ -AOD برابر با ۰/۲ است (۲۰). Bilal و همکاران با بررسی رابطه موجود میان مقادیر AOD بازیابی شده از MODIS با دقت مکانی ۳ km و ۱۰ km مقادیر غلظت ذرات معلق، مقدار  $r^2$  رابطه مذکور را در بازه ۰/۳۶-۰/۲۵ برآورد نمودند (۱۷).

Sotoudeheian و همکار با استفاده از داده‌های AOD بازیابی شده توسط MODIS و MISR و بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، رابطه  $PM_{10}$ -AOD را برای شهر تهران طی بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۰ مورد بررسی قرار دادند. برای رابطه خام تک متغیره میان مقادیر  $PM_{10}$  و پارامتر ماهواره‌ای AOD، مقدار  $r^2$  کمتر از ۰/۱۵ برآورد شده است. در صورت استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره برای داده‌های استخراج شده

## مواد و روش‌ها

### - منطقه مورد مطالعه

تهران به عنوان یکی از آلوده‌ترین شهرها در خاورمیانه جهت بررسی رابطه  $PM_{10}$ -AOD در دوره‌های گردوغبار انتخاب شده است که در محدوده  $51/2$  الی  $51/6$  در جهت طول جغرافیایی و  $35/4$  الی  $35/8$  در جهت عرض جغرافیایی واقع شده است. این کلان‌شهر با دارا بودن جمعیتی در حدود  $8/7$  میلیون نفر به عنوان جمعیت ثابت در بازه‌هایی از سال در معرض طوفان‌های گردوغبار متناوب ناشی از منابع داخلی و خارجی (کشورهای مجاور) قرار داشته که این موضوع دارای اثرات منفی قابل ملاحظه‌ای بر سلامت شهروندان است (۳۰).

### - داده‌ها

با توجه به رابطه ضعیف  $PM$ -AOD در حالت خام (رگرسیون خطی تک متغیره بدون هیچگونه فاکتور اصلاحی) برای بازه‌های زمانی مختلف، در این مطالعه رابطه مذکور تنها برای دوره‌های گردوغبار مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از دوره‌های گردوغبار در بازه زمانی سال‌های  $2007-2010$  که در مطالعات پیشین مشخص گردیده است (۳۷) به عنوان بازه زمانی مورد مطالعه استفاده شده است. در ادامه مقادیر غلظت  $PM_{10}$  متناظر با دوره‌های مذکور از بانک داده ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا متعلق به شرکت کنترل کیفیت هوا استخراج گردیده است. لازم به ذکر است که داده‌های غلظت با در نظرگیری دو سناریو استخراج شده‌اند: (۱) متوسط روزانه، (۲) متوسط در بازه زمانی  $15-12$  هر روز (همزمان با عبور ماهواره از محدوده مورد مطالعه و بازیابی داده AOD توسط سنجنده). از آنجایی که در برخی از مطالعات پیشین از متوسط روزانه غلظت و در برخی دیگر از متوسط غلظت در بازه زمانی عبور ماهواره بر فراز محدوده مورد مطالعه استفاده شده است؛ لذا در این تحقیق سعی گردید تا هر دو حالت مورد بررسی قرار گیرد تا مشخص شود محصولات ماهواره‌ای با غلظت ذرات معلق در چه حالتی همخوانی بیشتری دارند. لازم به ذکر است تعداد دوره‌های

مقادیر AOD برای سطوح براق، آلودگی ابری (Cloud Contamination) و خطاهای بازیابی، امکان تعیین دقیق مقادیر AOD در این مناطق وجود نداشته باشد. مطالعات انجام شده تاکنون نیز موید این موضوع بوده و بر رابطه ضعیف  $PM$ -AOD (در حالت خام و تک متغیره) صحه گذاشته است (۲۹، ۳۱، ۳۲).

با توجه به ضعف رابطه خام  $PM_{10}$ -AOD در شهر تهران در حالت کلی و برای بازه‌های زمانی مختلف، در مطالعه پیش‌رو رابطه مذکور نه برای تمام سال بلکه برای دوره‌های گردوغبار در شهر تهران (به عنوان یک شرایط خاص) در بازه زمانی سال‌های  $2007-2010$  میلادی مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع همخوانی بیشتر مقادیر AOD بازیابی شده توسط ماهواره‌ها با مقادیر غلظت ذرات معلق در دوره‌های گردوغبار به عنوان یک نظریه در مطالعه حاضر مورد ارزیابی واقع شده است. با توجه به اینکه هدف از مطالعه حاضر بررسی رابطه میان AOD و غلظت ذرات معلق در دوره‌های گردوغبار است و این دوره‌ها طی سالیان متمادی با روندهای مختلفی به وقوع پیوسته‌اند؛ لذا بازه زمانی انتخابی برای مطالعه چندان اهمیتی نداشته و می‌تواند برای هر بازه زمانی دیگر نیز صورت پذیرد و به بیان دیگر هدف، بررسی ارتباط محتمل میان غلظت ذرات معلق ناشی از گردوغبار و پارامتر ماهواره‌ای است. در ادامه به منظور بررسی نقش پارامترهای هواشناسی بر رابطه تک متغیره  $PM_{10}$ -AOD در دوره‌های گردوغبار، تاثیر پارامترهای مذکور با استفاده از روش گام‌به‌گام رو به جلو مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در این تحقیق از داده‌های AOD با دقت مکانی  $3 \text{ km}$  (این داده‌ها در سال  $2014$  توسط ناسا در اختیار محققین قرار گرفته است (۳۶)) و  $10 \text{ km}$  استفاده شده و اگرچه تاکنون مطالعات مختلفی به منظور بررسی رابطه  $PM_{10}$ -AOD صورت پذیرفته است؛ اما پژوهش حاضر اولین مطالعه پیرامون بررسی رابطه  $PM_{10}$ -AOD در دوره‌های گردوغبار در ایران است.

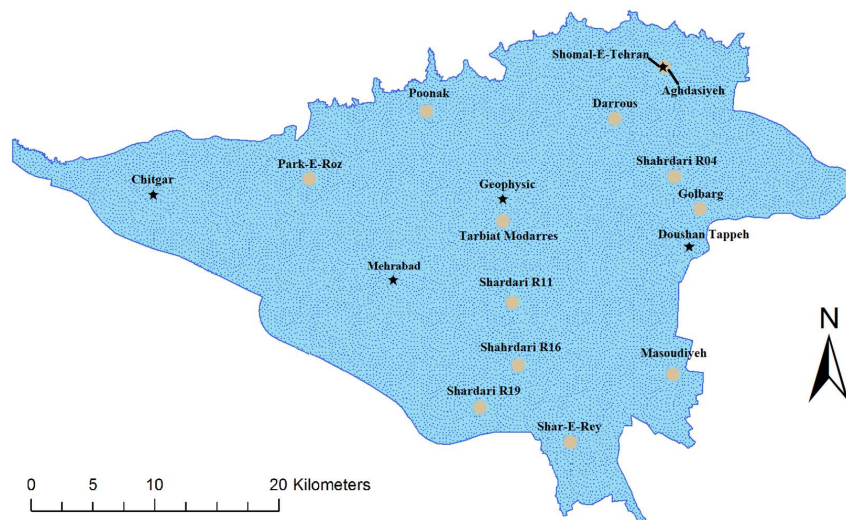
AOD برای ۳ سناریو ذیل استخراج شده‌اند:

- داده AOD برای نزدیک‌ترین نقطه در شعاع استخراج گزارش می‌شود؛ حال این نقطه می‌تواند دارای AOD با مقدار ۹۹۹۹- یا مقداری بزرگتر از صفر باشد (روش اول).
- مقدار بیشینه AOD برای ایستگاه مورد نظر در شعاع استخراج گزارش می‌شود (روش دوم).
- مقدار AOD برای نزدیک‌ترین پیکسل دارای داده در شعاع تعریف شده (بدین معنی که مقادیر AOD برابر با ۹۹۹۹- در فرایند استخراج در نظر گرفته نشده و نزدیک‌ترین نقطه دارای AOD با مقداری در بازه ۵-۰ به عنوان خروجی گزارش می‌شود) استخراج شده است (روش سوم).

سناریوهای مذکور در راستای تعیین میزان حساسیت رابطه AOD-PM<sub>10</sub> برای الگوریتم‌های مختلف استخراج داده، تعریف شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. به منظور در نظرگیری تاثیر خصوصیات اپتیکی ذرات معلق - که خود تحت تاثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها است - بر روی رابطه AOD-PM<sub>10</sub> و با توجه به تاثیر پارامترهای هواشناسی بر رابطه مورد بحث، پارامترهای مذکور به عنوان متغیرهای کمکی و برای بهبود عملکرد رابطه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۳۰). در این راستا، پارامترهای هواشناسی دید افقی (Vis)، پوشش ابر (TC)، سرعت باد (WS)، جهت باد (WD)، دما (Temp)، تبخیر (Eva)، ساعات آفتابی (ST)، بارش کل (TP) و رطوبت نسبی (RH) برای بازه زمانی مورد مطالعه استخراج شده‌اند. کلیه پارامترهای هواشناسی ذکر شده از ۵ ایستگاه سینوپتیک متعلق به سازمان هواشناسی کشور (<http://www.irimo.ir/>) تهیه شده‌اند. لازم به ذکر است با توجه به حجم قابل ملاحظه داده‌های هواشناسی مورد نیاز، داده‌های مذکور از سازمان هواشناسی خریداری گردیده‌اند. داده‌های هواشناسی متناظر با هر ایستگاه سنجش آلودگی هوا از نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک استخراج شده است. جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و ایستگاه‌های سینوپتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

گردوغبار در بازه سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ به ترتیب ۴، ۱۳، ۵ و ۵ دوره است.

سنجنده MODIS نصب شده بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua به منظور بازیابی خصوصیات ذرات و ابرها بر فراز خشکی‌ها و دریاها به ترتیب از دسامبر ۱۹۹۹ و می ۲۰۰۲ شروع به فعالیت کرده است. تا سال ۲۰۱۴، سنجنده MODIS داده AOD را با دقت مکانی ۱۰ km در اختیار پژوهشگران قرار می‌داد که این دقت مکانی بیشتر برای مطالعات منطقه‌ای مناسب است. از سال ۲۰۱۴ تیم مطالعاتی ناسا، داده AOD را با دقت مکانی ۳ km به عنوان زیر مجموعه ای از مجموعه MODIS-۶ جهت تخمین غلظت ذرات معلق در مقیاس محلی و با دقت مکانی ریزتر فراهم ساخته است (۳۶). مجموعه قدیم و جدید محصول AOD از وب سایت مربوط به سنجنده MODIS قابل دانلود است (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>). در مطالعه حاضر داده‌های AOD از سطح دو-مجموعه ۶ سنجنده MODIS با دقت‌های مکانی ۳ km و ۱۰ km-نصب شده بر روی ماهواره اکو- که در طول موج ۵۵۰ nm توسط الگوریتم هدف تاریک بازیابی شده است، جهت بررسی رابطه موجود میان مقادیر PM<sub>10</sub> در دوره‌های گردوغبار و داده AOD، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌ها با دقت مکانی ۱۰ km نیز به منظور مقایسه عملکرد محصولات جدید (دقت مکانی ۳ km) با قدیم در تخمین غلظت ذرات معلق به کار گرفته شده است. مقادیر AOD حاصله از MODIS در بازه ۵ تا ۰/۰۵- قرار دارد (در صورتی که سنجنده به هر دلیلی توانایی بازیابی AOD را نداشته باشد، مقدار ۹۹۹۹- به عنوان Missing Data گزارش می‌شود). می‌توان از مقادیر منفی به جهت ایجاد بایاس در فرایند کالیبراسیون صرف نظر نمود. لازم به ذکر است که کلیه داده‌های استخراج شده دارای بالاترین سطح تضمین کیفیت (Quality Assurance) است (۳۶، ۳۸). با توجه به دقت مکانی داده‌های AOD، با در نظرگیری شعاع ۳ km، ۵ و ۸ km در اطراف هر ایستگاه پایش آلودگی هوا، داده



شکل ۱- جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و سینوپتیک در سطح شهر تهران (دوایر ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا هستند)

پارامتر دید افقی، سرعت باد در جهت شمال به جنوب و ساعات آفتابی هستند.  $\alpha_0$  عرض از مبدا ثابت و  $\alpha_1$  تا  $\alpha_4$  شیب ثابت متغیرهای مستقل هستند. به منظور تعیین شکل بهینه مدل و حذف متغیرهای بی‌تاثیر در آن از روش آماری گام‌به‌گام رو به جلو (Forward Stepwise Method) استفاده شده است. در این روش، در ابتدا مدل اولیه بدون هیچگونه تغییری در نظر گرفته شده (مدل صفر) و در مرحله اول هر کدام از متغیرهای مستقل به صورت جداگانه به مدل صفر اضافه می‌شوند. در این مرحله بهترین مدل براساس بالاترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) انتخاب می‌گردد. لازم به ذکر است که متغیر انتخابی می‌بایست از لحاظ آماری نیز معنی‌دار باشد ( $p < 0.05$ ). در مرحله بعد متغیر انتخابی در مرحله نخست در مدل حفظ شده و متغیرهای باقیمانده به صورت جداگانه به مدل اضافه می‌شوند. در این مرحله نیز تغییری که بیشترین تاثیر در مقدار ضریب همبستگی را دارد به مدل اضافه شده و مدل در این مرحله نیز نهایی می‌گردد. این فرایند تا زمانی که کلیه متغیرهای معنی‌دار به مدل اضافه شوند ادامه پیدا خواهد کرد (۳۹). همانطوری که از روش‌شناسی فوق نیز مشخص است، پارامترهای با اهمیت بیشتر

#### - توسعه مدل آماری

در ابتدا رابطه تک متغیره  $PM_{10}$ -AOD برای سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت (معادله ۱).

$$PM_{10} = \alpha + \beta \times AOD \quad (1)$$

در معادله ۱،  $PM_{10}$  و AOD به ترتیب غلظت  $PM_{10}$  و عمق اپتیکی ذرات معلق و  $\alpha$  و  $\beta$  نیز به ترتیب عرض از مبدا و شیب ثابت معادله هستند. در مرحله بعد و پس از بررسی کلیه سناریوهای تعریف شده و تعیین حالتی که رابطه  $PM_{10}$ -AOD دارای بهترین عملکرد است؛ رابطه مذکور با استفاده از پارامترهای هواشناسی به عنوان پارامترهای کمکی به منظور بهبود عملکرد مدل، گسترش داده شد. کلیه حالات به‌کارگیری متغیرهای کمکی در توسعه رابطه بررسی شده و شکل نهایی مدل در معادله ۲ آورده شده است.

$$PM_{10} = \alpha_0 + \alpha_1 \times AOD + \alpha_2 \times Vis + \alpha_3 \times V_y + \alpha_4 \times ST \quad (2)$$

در معادله ۲،  $PM_{10}$  و AOD به ترتیب غلظت  $PM_{10}$  و عمق اپتیکی ذرات معلق است.  $Vis$ ،  $V_y$  و ST به ترتیب

برای سال‌های مختلف، متفاوت است. سال ۲۰۰۷ با ۴ ایستگاه و سال ۲۰۰۹ با ۱۱ ایستگاه به ترتیب دارای کمترین و بیشترین تعداد ایستگاه‌های دارای داده در بازه زمانی مورد مطالعه هستند. توصیف آماری داده‌های مورد استفاده در رابطه تک متغیره PM-AOD در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است به دلیل متفاوت بودن تعداد روزهای دارای داده AOD برای سه سناریو ۳ km، ۵ km و ۸ km، آماره‌های ارائه شده در جدول مذکور برای سه حالت با یکدیگر تفاوت دارند. همبستگی موجود بین پارامتر AOD بازیابی شده توسط ماهواره و مقادیر غلظت PM<sub>10</sub> برای سناریوهای مختلف طبقه‌بندی شده در جدول ۱، در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین بهترین عملکرد رابطه PM<sub>10</sub>-AOD برای شعاع استخراج ۳ km، ۵ km و ۸ km نیز در نمودار ۱ آورده شده است.

در مراحل ابتدایی به مدل اضافه می‌شوند و متغیرهای ذکر شده در معادله ۲ نیز براساس اهمیت و نقش آنها در عملکرد مدل در فرمول مذکور آورده شده‌اند. جهت ارزیابی عملکرد مدل از  $R^2$  و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. به منظور برآزش انواع مدل‌های رگرسیون خطی تک متغیره و چند متغیره و انجام آزمون‌های آماری معنی‌داری پارامترها از نرم‌افزار R بهره گرفته شده است.

## یافته‌ها

### رابطه خطی تک متغیره PM-AOD

#### - توصیف آماری داده‌ها

بررسی اولیه داده‌های استخراج شده PM<sub>10</sub> نشان می‌دهد تعداد ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا که در بازه زمانی مورد مطالعه دارای داده اندازه‌گیری شده غلظت هستند

جدول ۱- توصیف آماری پارامترهای مستقل و وابسته مورد استفاده در رابطه تک متغیره PM<sub>10</sub>-AOD

| SD    | Mean  | Max  | 95th Percentile | 5th Percentile | Min | تعداد | بازه زمانی | متغیر                          | شعاع استخراج |
|-------|-------|------|-----------------|----------------|-----|-------|------------|--------------------------------|--------------|
| ۵۳/۹  | ۱۱۷/۲ | ۳۵۶  | ۲۳۴             | ۵۸             | ۲۶  | ۱۴۱   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | متوسط روزانه PM <sub>10</sub>  |              |
| ۲۱/۴  | ۸۳/۴  | ۱۳۲  | ۱۰۹/۲           | ۵۱/۴           | ۴۶  | ۲۹    | ۲۰۰۷       |                                |              |
| ۴۸/۸  | ۱۱۴/۵ | ۲۵۶  | ۲۱۸/۶           | ۵۵/۸           | ۲۶  | ۶۰    | ۲۰۰۸       |                                |              |
| ۶۱/۱  | ۱۳۶/۱ | ۳۰۱  | ۲۵۴/۱           | ۸۶/۷           | ۸۶  | ۱۵    | ۲۰۰۹       |                                |              |
| ۶۳    | ۱۴۰/۴ | ۳۵۶  | ۲۷۲             | ۷۵/۴           | ۵۷  | ۳۷    | ۲۰۱۰       | متوسط ۳ ساعته PM <sub>10</sub> |              |
| ۵۵/۱  | ۱۰۹/۸ | ۳۵۶  | ۲۱۱/۶           | ۴۳             | ۲۷  | ۱۳۲   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  |                                |              |
| ۳۱/۳  | ۷۵/۷  | ۱۷۰  | ۱۳۱/۴           | ۴۲/۴           | ۳۸  | ۲۹    | ۲۰۰۷       |                                |              |
| ۵۰/۵  | ۱۱۲   | ۲۸۷  | ۱۸۹/۵           | ۴۷/۳           | ۲۷  | ۵۴    | ۲۰۰۸       |                                |              |
| ۵۱/۲  | ۱۲۳/۴ | ۲۶۶  | ۱۹۴/۶           | ۶۸             | ۶۸  | ۱۵    | ۲۰۰۹       | AOD (سناریو ۱)                 | ۳ km         |
| ۶۷/۱  | ۱۲۹/۵ | ۳۵۶  | ۲۵۴             | ۵۰/۲           | ۴۳  | ۳۴    | ۲۰۱۰       |                                |              |
| ۲۷۱/۶ | ۷۶۳/۵ | ۱۹۴۹ | ۱۳۰۹/۷          | ۳۶۴/۲          | ۲۱۲ | ۱۲۲   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  |                                |              |
| ۲۲۲/۱ | ۶۸۳/۹ | ۱۰۳۵ | ۹۸۶/۵           | ۳۲۷            | ۳۱۴ | ۲۷    | ۲۰۰۷       |                                |              |
| ۲۷۹/۲ | ۷۵۱/۳ | ۱۴۹۴ | ۱۲۹۴/۵          | ۲۷۱/۸          | ۲۱۲ | ۴۶    | ۲۰۰۸       | AOD (سناریو ۲)                 |              |
| ۳۷۱/۸ | ۹۵۷/۹ | ۱۹۴۹ | ۱۵۸۱/۱          | ۶۰۲/۸          | ۵۹۵ | ۱۴    | ۲۰۰۹       |                                |              |
| ۲۱۹/۲ | ۷۶۳/۱ | ۱۳۷۹ | ۱۰۹۵            | ۴۴۵            | ۳۹۴ | ۳۵    | ۲۰۱۰       |                                |              |
| ۲۷۵/۹ | ۷۹۰/۱ | ۲۲۰۱ | ۱۳۲۶/۵          | ۳۸۵/۵          | ۲۱۲ | ۱۵۱   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  |                                |              |
| ۲۱۷/۷ | ۷۰۴/۱ | ۱۰۳۵ | ۹۸۲             | ۳۴۳/۶          | ۳۱۴ | ۲۹    | ۲۰۰۷       | AOD (سناریو ۳)                 |              |
| ۲۷۵/۸ | ۷۸۱   | ۱۴۹۴ | ۱۳۳۸            | ۳۶۴            | ۲۱۲ | ۶۱    | ۲۰۰۸       |                                |              |
| ۴۲۱/۱ | ۹۷۱/۲ | ۲۲۰۱ | ۱۷۰۰/۸          | ۶۴۸/۵          | ۶۴۷ | ۱۶    | ۲۰۰۹       |                                |              |
| ۲۱۹/۴ | ۷۹۳/۵ | ۱۳۷۹ | ۱۲۱۲            | ۴۴۸/۴          | ۳۹۴ | ۴۵    | ۲۰۱۰       |                                |              |
| ۲۵۹   | ۷۷۷   | ۱۹۴۹ | ۱۳۰۸            | ۳۶۹            | ۲۱۲ | ۱۵۱   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۳)                 |              |
| ۲۱۹/۴ | ۶۹۶/۶ | ۱۰۳۵ | ۹۸۲             | ۳۳۱            | ۳۱۴ | ۲۹    | ۲۰۰۷       |                                |              |
| ۲۶۲/۹ | ۷۶۶/۴ | ۱۴۹۴ | ۱۳۱۵            | ۳۶۴            | ۲۱۲ | ۶۱    | ۲۰۰۸       |                                |              |
| ۳۵۷   | ۹۲۶/۹ | ۱۹۴۹ | ۱۵۲۴/۵          | ۶۰۴            | ۵۹۵ | ۱۶    | ۲۰۰۹       |                                |              |
| ۲۱۸/۸ | ۷۸۹/۷ | ۱۳۷۹ | ۱۲۱۲            | ۴۴۸/۴          | ۳۹۴ | ۴۵    | ۲۰۱۰       |                                |              |

ادامه جدول ۱- توصیف آماری پارامترهای مستقل و وابسته مورد استفاده در رابطه تک متغیره  $PM_{10}$ -AOD

| SD    | Mean   | Max  | 95th Percentile | 5th Percentile | Min | تعداد | بازه زمانی | متغیر                   | شعاع استخراج |
|-------|--------|------|-----------------|----------------|-----|-------|------------|-------------------------|--------------|
| ۵۶/۴  | ۱۲۱/۲  | ۳۵۶  | ۲۴۱/۶           | ۵۷/۱           | ۲۶  | ۲۰۲   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | متوسط روزانه $PM_{10}$  |              |
| ۲۱/۲  | ۸۲/۴   | ۱۳۲  | ۱۰۸/۸           | ۵۲/۴           | ۴۶  | ۳۳    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۴۷/۸  | ۱۱۹    | ۲۵۶  | ۲۱۶/۴           | ۵۶/۳           | ۲۶  | ۸۲    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۷۱    | ۱۴۶/۶  | ۳۰۵  | ۳۰۴/۴           | ۸۶/۲           | ۷۸  | ۲۴    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۶۳/۲  | ۱۳۴/۹  | ۳۵۶  | ۲۷۶/۲           | ۶۳/۲           | ۴۸  | ۶۳    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۶۸/۷  | ۱۱۵/۴  | ۳۵۶  | ۲۱۹             | ۴۳             | ۱۴  | ۱۹۰   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | متوسط ۳ ساعته $PM_{10}$ |              |
| ۳۱    | ۷۵/۱   | ۱۷۰  | ۱۲۸/۶           | ۴۲/۶           | ۳۸  | ۳۳    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۵۱/۶  | ۱۱۷    | ۲۸۷  | ۱۹۶             | ۴۷/۵           | ۲۷  | ۷۶    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۵۱    | ۱۲۷/۴  | ۲۶۶  | ۱۹۸/۴           | ۶۲/۱           | ۶۰  | ۲۴    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۶۵/۶  | ۱۲۱/۹  | ۳۵۶  | ۲۴۸/۴           | ۴۳             | ۱۴  | ۵۷    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۲۷۳/۴ | ۷۳۷/۶  | ۱۹۴۹ | ۱۲۷۲/۸          | ۳۴۷/۶          | ۲۱۲ | ۱۳۳   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۱)          | ۵ km         |
| ۲۲۴/۲ | ۶۵۸/۱  | ۱۰۳۵ | ۹۴۶/۹           | ۳۲۱/۶          | ۳۱۴ | ۲۷    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۲۷۴/۸ | ۷۳۰/۸  | ۱۴۹۴ | ۱۲۵۱            | ۳۰۲/۵          | ۲۱۲ | ۵۱    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۳۶۴/۵ | ۹۴۰/۵  | ۱۹۴۹ | ۱۵۵۲/۸          | ۶۰۳/۴          | ۵۹۵ | ۱۵    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۲۳۳/۶ | ۷۲۳/۸  | ۱۳۷۹ | ۱۰۴۰/۸          | ۳۹۲/۱          | ۳۵۴ | ۴۰    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۳۴۱/۶ | ۸۲۲/۵  | ۳۰۵۶ | ۱۳۹۱/۸          | ۳۷۰            | ۲۱۲ | ۲۱۳   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۲)          |              |
| ۲۴۴/۹ | ۷۲۰/۴  | ۱۲۰۰ | ۱۰۸۶/۱          | ۳۴۲/۱          | ۳۲۶ | ۳۴    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۲۷۱/۸ | ۸۰۵/۷  | ۱۴۹۴ | ۱۳۳۳/۴          | ۴۲۱            | ۲۱۲ | ۸۵    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۶۰۹/۹ | ۱۱۶۸   | ۳۰۵۶ | ۲۳۱۸/۶          | ۶۵۹            | ۶۴۷ | ۲۵    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۲۴۴/۶ | ۷۶۸/۴  | ۱۴۰۲ | ۱۲۴۱/۶          | ۴۱۴/۴          | ۳۵۴ | ۶۹    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۳۲۵/۹ | ۷۸۷/۳  | ۳۰۵۶ | ۱۳۴۴/۲          | ۳۶۰/۸          | ۲۱۲ | ۲۱۳   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۳)          |              |
| ۲۱۵   | ۶۷۶/۷  | ۱۰۳۵ | ۹۳۷/۵           | ۳۲۹/۳          | ۳۱۴ | ۳۴    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۲۵۶/۱ | ۷۶۴/۳  | ۱۴۹۴ | ۱۳۰۰            | ۴۰۰            | ۲۱۲ | ۸۵    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۵۹۵/۳ | ۱۱۱۹/۸ | ۳۰۵۶ | ۲۲۶۸/۲          | ۶۱۵            | ۵۹۵ | ۲۵    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۲۳۱/۹ | ۷۴۹/۶  | ۱۳۷۹ | ۱۱۷۸            | ۴۰۲            | ۳۵۴ | ۶۹    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۵۶    | ۱۲۷/۲  | ۴۱۷  | ۲۲۶/۶           | ۶۲             | ۴۸  | ۱۶۹   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | متوسط روزانه $PM_{10}$  | ۸ km         |
| ۲۲/۷  | ۹۰/۳   | ۱۸۶  | ۱۱۵/۹           | ۵۸/۷           | ۵۶  | ۳۱    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۴۵/۴  | ۱۲۰/۵  | ۲۴۲  | ۲۱۷/۷           | ۶۲             | ۵۱  | ۶۳    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۹۱/۹  | ۱۵۱    | ۴۱۷  | ۳۱۰/۶           | ۸۳/۸           | ۸۰  | ۲۰    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۴۸/۶  | ۱۲۶/۳  | ۳۵۶  | ۱۹۲/۸           | ۶۱/۲           | ۴۸  | ۵۵    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۷۵/۸  | ۱۲۴/۲  | ۴۱۰  | ۲۴۱/۵           | ۴۸             | ۱۴  | ۱۶۱   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | متوسط ۳ ساعته $PM_{10}$ |              |
| ۲۷/۴  | ۸۱/۷   | ۲۰۳  | ۱۳۸/۸           | ۵۳/۸           | ۵۰  | ۳۱    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۵۳/۳  | ۱۲۰/۱  | ۳۴۱  | ۱۹۹/۶           | ۵۷/۲           | ۴۴  | ۵۹    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۸۴/۴  | ۱۳۲/۴  | ۴۱۰  | ۲۸۰/۴           | ۶۷/۳           | ۶۱  | ۱۹    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۵۴/۶  | ۱۱۵/۵  | ۳۵۶  | ۱۹۳/۵           | ۴۳             | ۱۴  | ۵۲    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۲۵۰/۳ | ۷۷۷/۵  | ۱۸۲۸ | ۱۲۴۴            | ۳۸۰/۲          | ۲۶۹ | ۱۶۰   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۱)          | ۸ km         |
| ۲۳۱/۲ | ۶۳۴/۸  | ۹۸۴  | ۹۳۸             | ۳۶۷/۲          | ۳۴۱ | ۳۰    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۲۴۵   | ۷۷۹/۷  | ۱۲۷۹ | ۱۲۴۲            | ۲۹۸            | ۲۶۹ | ۵۳    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۲۸۸/۷ | ۸۵۸/۶  | ۱۸۲۸ | ۱۲۸۴/۶          | ۴۸۱            | ۴۸۱ | ۲۰    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۲۳۸/۸ | ۷۴۷    | ۱۴۴۰ | ۱۲۴۴            | ۳۹۱/۴          | ۳۶۹ | ۵۷    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۳۲۳/۵ | ۸۲۴/۴  | ۳۱۸۵ | ۱۲۵۴/۵          | ۳۸۲/۵          | ۲۶۹ | ۱۸۳   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۲)          |              |
| ۲۵۰/۶ | ۶۸۹/۲  | ۱۰۱۷ | ۹۵۷/۷           | ۳۶۹/۱          | ۳۴۱ | ۳۲    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۲۴۵/۶ | ۸۰۸/۶  | ۱۲۷۹ | ۱۲۴۹/۷          | ۳۲۰/۵          | ۲۶۹ | ۶۷    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۵۷۷/۸ | ۹۷۹    | ۳۱۸۵ | ۱۸۲۸            | ۴۸۱            | ۴۸۱ | ۲۱    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۲۶۷/۷ | ۷۸۹/۷  | ۱۴۴۰ | ۱۲۴۴            | ۳۹۲            | ۳۳۱ | ۶۳    | ۲۰۱۰       |                         |              |
| ۳۲۴/۲ | ۸۰۲/۵  | ۳۱۸۵ | ۱۲۵۴/۵          | ۳۸۱            | ۲۶۹ | ۱۸۳   | ۲۰۱۰-۲۰۰۷  | AOD (سناریو ۳)          |              |
| ۲۴۷/۱ | ۶۸۰/۱  | ۱۰۱۷ | ۹۵۷/۷           | ۳۶۹/۱          | ۳۴۱ | ۳۲    | ۲۰۰۷       |                         |              |
| ۲۴۳/۸ | ۷۸۹/۴  | ۱۲۷۹ | ۱۲۴۹/۷          | ۳۲۰/۵          | ۲۶۹ | ۶۷    | ۲۰۰۸       |                         |              |
| ۵۸۰/۴ | ۹۶۹/۳  | ۳۱۸۵ | ۱۸۲۸            | ۴۸۱            | ۴۸۱ | ۲۱    | ۲۰۰۹       |                         |              |
| ۲۶۶/۴ | ۷۶۰/۸  | ۱۴۴۰ | ۱۲۴۴            | ۳۸۹/۳          | ۳۳۱ | ۶۳    | ۲۰۱۰       |                         |              |



جدول ۲- ضریب همبستگی به دست آمده برای رابطه تک متغیره  $PM_{10}$ -AOD مربوط به سناریوهای مختلف استخراج داده‌های غلظت و  $R^2(r)$  - AOD

| شعاع استخراج | مقادیر غلظت استفاده شده | الگوریتم ۱  | الگوریتم ۲  | الگوریتم ۳  |
|--------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| ۳            | متوسط روزانه            | ۰/۲۱ (۰/۴۶) | ۰/۱۹ (۰/۴۳) | ۰/۱۸ (۰/۴۲) |
|              | متوسط ۳ ساعته           | ۰/۱۱ (۰/۳۳) | ۰/۱۲ (۰/۳۵) | ۰/۱۲ (۰/۳۵) |
| ۵            | متوسط روزانه            | ۰/۲۱ (۰/۴۶) | ۰/۳۰ (۰/۵۵) | ۰/۲۹ (۰/۵۴) |
|              | متوسط ۳ ساعته           | ۰/۱۲ (۰/۳۵) | ۰/۱۷ (۰/۴۱) | ۰/۱۶ (۰/۳۹) |
| ۸            | متوسط روزانه            | ۰/۱۳ (۰/۳۶) | ۰/۱۹ (۰/۴۴) | ۰/۱۸ (۰/۴۲) |
|              | متوسط ۳ ساعته           | ۰/۰۹ (۰/۲۹) | ۰/۱۰ (۰/۳۲) | ۰/۱۰ (۰/۳۲) |

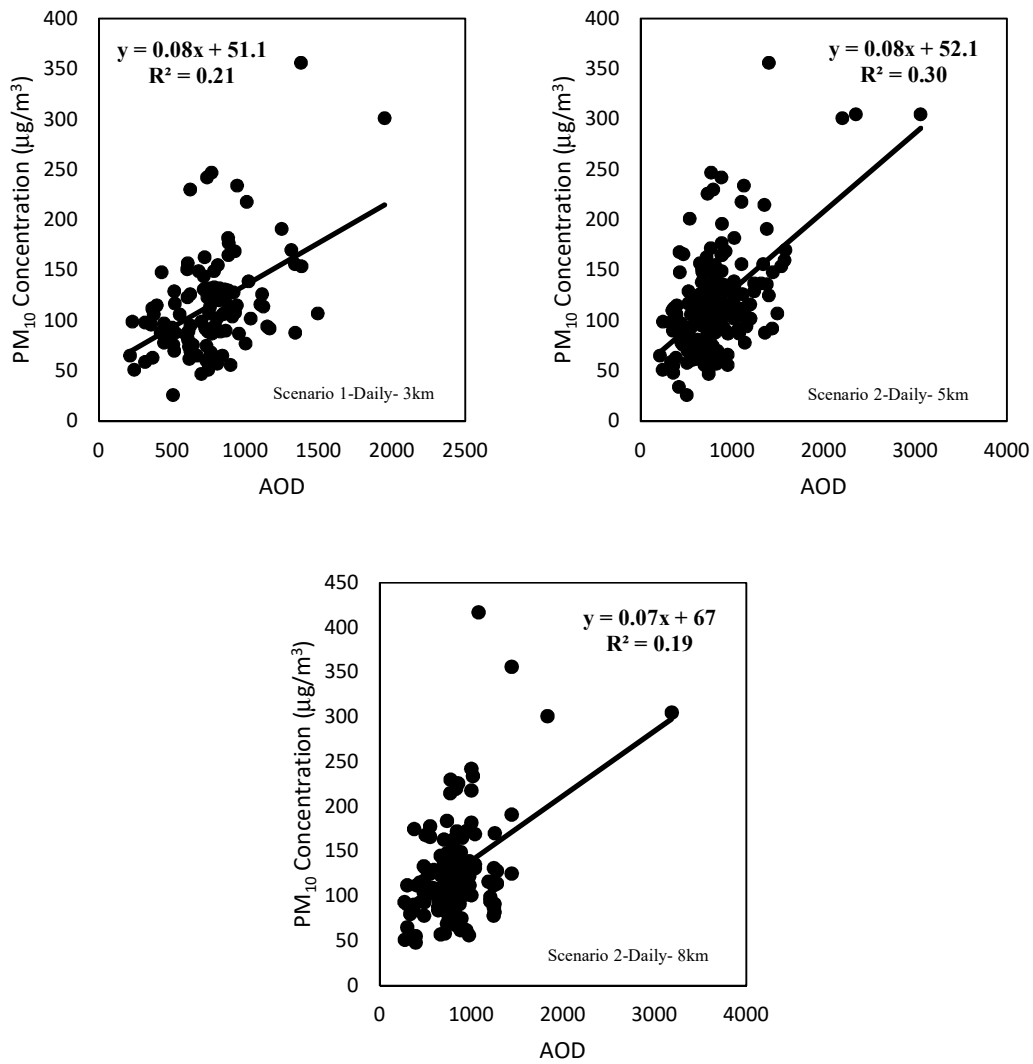
سال ۲۰۱۰ است.

#### توسعه رابطه تک متغیره $PM_{10}$ -AOD

با توجه به اینکه بهترین عملکرد در بین سناریوهای تعریف شده براساس جدول ۲ مربوط به شعاع استخراج ۵ km و غلظت روزانه  $PM_{10}$  و الگوریتم استخراج شماره ۲ است؛ در ادامه رابطه تک متغیره برای این حالت با استفاده از پارامترهای هواشناسی کمکی توسعه یافته است. اطلاعات آماری مربوط به متغیرهای مستقل و وابسته مورد استفاده، در جدول ۳ بیان شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که برخی از پارامترهای هواشناسی طی سال ۲۰۰۷ میلادی در دسترس نبودند، مدلسازی این بخش با استفاده از داده‌های سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ صورت پذیرفته است. شایان ذکر است از آنجایی که تمامی پارامترهای هواشناسی بالقوه در مدل نهایی موثر نبودند، متغیرهای موثر با علامت (\*) در جدول ۳ مشخص شده‌اند. براساس معادله ۲ پارامترهای عمق اپتیکی آلاینده، دید افقی، سرعت و جهت باد و ساعات آفتابی در طی روز به ترتیب دارای بیشترین تاثیر در عملکرد مدل بوده و همگی نیز با سطح اطمینان ۹۵ درصد در مدل نهایی معنی دار هستند. از حدود ۷۰۰ داده اندازه‌گیری شده  $PM_{10}$  استخراج شده از بانک داده ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا، در حدود ۳۰ درصد از این

با بررسی نتایج حاصله، موارد ذیل قابل نتیجه‌گیری است:

- ۱- ضرایب همبستگی مربوط به مقادیر غلظت روزانه بیشتر از ضرایب متناظر برای غلظت متوسط ۳ ساعته است (رابطه میان مقادیر غلظت روزانه ذرات معلق و  $AOD$  قوی‌تر از رابطه غلظت متوسط ۳ ساعته ذرات معلق و  $AOD$  است).
- ۲- الگوریتم شماره ۲ و ۳ جهت استخراج مقادیر  $AOD$  بازیابی شده در اکثر موارد عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم شماره ۱ از خود نشان داده است (ضرایب همبستگی به دست آمده میان مقادیر غلظت  $PM_{10}$  و  $AOD$  برای الگوریتم شماره ۲ و ۳ بیشتر از مقادیر متناظر برای الگوریتم شماره ۱ است).
- ۳- بررسی شعاع استخراج داده‌های  $AOD$  نیز نشان می‌دهد شعاع استخراج ۵ km، شعاع استخراج بهینه‌ای بوده و بهترین نتایج در این شعاع حاصل گردیده است.
- ۴- در مجموع، برای شعاع استخراج ۵ km و الگوریتم استخراج شماره ۲ در حالتی که از مقادیر غلظت روزانه  $PM_{10}$  استفاده می‌شود، رابطه  $PM_{10}$ -AOD دارای بهترین عملکرد است ( $r=0/55$ ). لازم به ذکر است تعداد زوج‌های  $PM_{10}$ -AOD بررسی شده به منظور برازش مدل خطی بین دو متغیر مورد بحث برای این حالت ۱۹۹ زوج بوده که از این تعداد ۳۱ زوج برای سال ۲۰۰۷، ۸۰ زوج برای سال ۲۰۰۸، ۲۴ زوج برای سال ۲۰۰۹ و ۶۴ زوج برای



نمودار ۱- پراکندگی پارامتر مستقل AOD در مقابل غلظت  $PM_{10}$  اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های پایش زمینی برای بهترین عملکرد در شعاع استخراج ۳ km، ۵ km و ۸ km

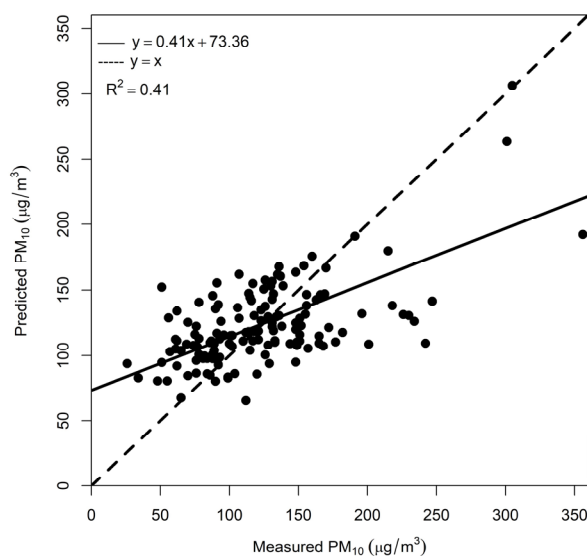
بررسی توانایی این مدل در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است تمامی متغیرهای مستقل مورد استفاده در مدل دارای سطح معنی‌داری قابل قبولی هستند ( $p < 0.05$ ). بدین معنا که استفاده از این پارامترها در مدل به بهبود عملکرد مدل در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین کمک خواهد کرد. عملکرد نهایی مدل پیشنهادی در نمودار ۲ نشان داده شده است. مدل توسعه داده شده توانایی توصیف ۴۱ درصد از تغییرات

داده‌ها دارای پارامتر AOD متناظر با باری شده توسط ماهواره هستند؛ که این موضوع ضعف سنجنده MODIS در باریابی AOD به دلایل مختلف از جمله وجود سطوح براق، آلودگی‌های ابری (Cloud Contamination) و غیره را نشان می‌دهد.

پس از بررسی امکان‌سنجی استفاده از پارامترهای کمکی در رابطه  $PM_{10}$ -AOD با استفاده از روش گام‌به‌گام رو به جلو، شکل نهایی مدل تعیین گردید (معادله ۲) که در ادامه به

جدول ۳- توصیف آماری پارامترهای مستقل و وابسته بررسی شده در این مطالعه

| متغیر                         | آماره | Min  | 5th Percentile | 95th Percentile | Max  | Mean  | SD   |
|-------------------------------|-------|------|----------------|-----------------|------|-------|------|
| PM <sub>10</sub> متوسط روزانه |       | ۲۶   | ۵۷/۱           | ۲۴۱/۶           | ۳۵۶  | ۱۲۱/۲ | ۵۶/۴ |
| AOD (سناریو ۲)                |       | ۰/۲۱ | ۰/۳۷           | ۱/۳۹            | ۳/۰۶ | ۰/۸۲  | ۰/۳۴ |
| Vis *                         |       | ۱    | ۵              | ۱۰              | ۱۰   | ۸/۹   | ۱/۸  |
| TC                            |       | صفر  | صفر            | ۶               | ۱۰   | ۱/۳   | ۲/۲  |
| WS *                          |       | صفر  | صفر            | ۹               | ۱۲   | ۳/۸   | ۲/۷  |
| WD *                          |       | صفر  | صفر            | ۳۱۰             | ۳۶۰  | ۱۷۵/۴ | ۹۸/۵ |
| Temp                          |       | ۱۶/۶ | ۲۴/۴           | ۳۶              | ۴۰/۳ | ۳۱/۷  | ۳/۷  |
| Eva                           |       | ۲/۴  | ۶/۳            | ۱۷              | ۲۵/۸ | ۱۱/۸  | ۳/۳  |
| ST *                          |       | صفر  | ۷/۶            | ۱۲/۱            | ۱۳   | ۱۰/۳  | ۱/۹  |
| TP                            |       | صفر  | صفر            | ۰/۴             | ۵/۲  | ۰/۱   | ۰/۶  |
| RH                            |       | ۶    | ۱۰             | ۳۱              | ۳۴   | ۱۹/۹  | ۶/۴  |



نمودار ۲- پراکندگی مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل نهایی

عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی غلظت روزانه ذرات معلق در دوره‌های گردوغبار است. همچنین بررسی نمودار ۲ نشان می‌دهد مدل توسعه داده شده از عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی غلظت‌های بالای PM<sub>10</sub> برخوردار است.

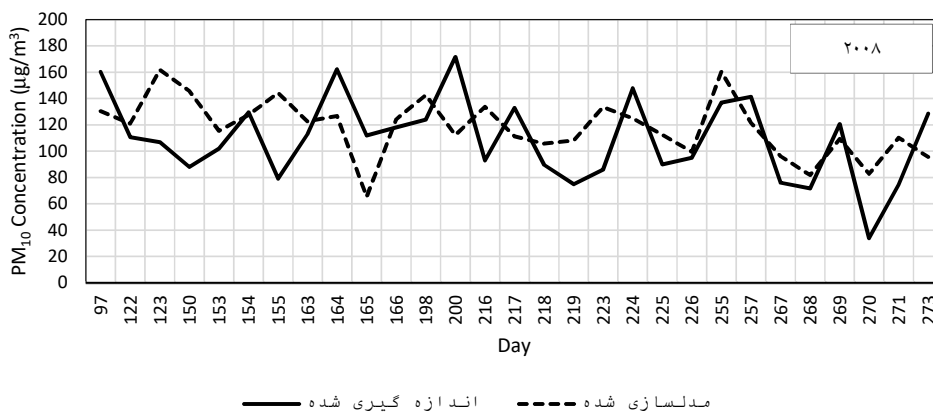
موجود در غلظت ذرات معلق در سطح زمین را داراست. مقدار RMSE مربوط به مدل نهایی ۴۲ µg/m<sup>3</sup> محاسبه شده است. با توجه به ضریب همبستگی مدل پیشنهادی (r=۰/۶۴) به نظر می‌رسد که مدل توسعه داده شده دارای

است که از غلظت متوسط ۳ ساعته استفاده می‌شود. از آنجایی که ممکن است AOD با نوع خاصی از ذرات معلق دارای رابطه‌ای قوی باشد و از طرفی در زمان عبور ماهواره (متوسط ۳ ساعته غلظت) ممکن است ذرات مذکور حضور کم‌رنگ‌تری در اتمسفر داشته باشند؛ به نظر می‌رسد استفاده از متوسط غلظت روزانه می‌تواند به نوعی اثر ذرات معلق موجود در جو طی یک روز - که دارای رابطه‌ای قوی با AOD هستند - را به صورت آماری (تاثیر آنها بر غلظت ذرات معلق روزانه) در رابطه خطی لحاظ نماید. از سوی دیگر، داده ماهواره‌ای AOD به صورت روزانه و در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۵ هر روز محاسبه شده و این عمل در بازه زمانی مذکور در روز بعد مجدداً تکرار می‌شود؛ لذا، وضعیت غلظت ذرات معلق طی بازه زمانی عبور ماهواره بر فراز محدوده مورد مطالعه، نماینده وضعیت غلظت  $PM_{10}$  در طی یک شبانه‌روز است. به بیان دیگر، ذرات معلق تولید شده در ساعات دیگر شبانه‌روز (برای مثال در شب) مسلماً بر میزان کمی ذرات و نوع آنها در زمان عبور ماهواره موثر خواهد بود و این امر نیز سبب گشته تا رابطه مورد بحث برای حالتی که از غلظت متوسط روزانه استفاده می‌شود، قوی‌تر عمل نماید. همچنین فعل و انفعالات رخ داده در اتمسفر طی شبانه‌روز و واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی اتفاق افتاده در جو نیز همگی بر غلظت ذرات معلق در بازه زمانی عبور ماهواره موثر بوده و این امر نیز

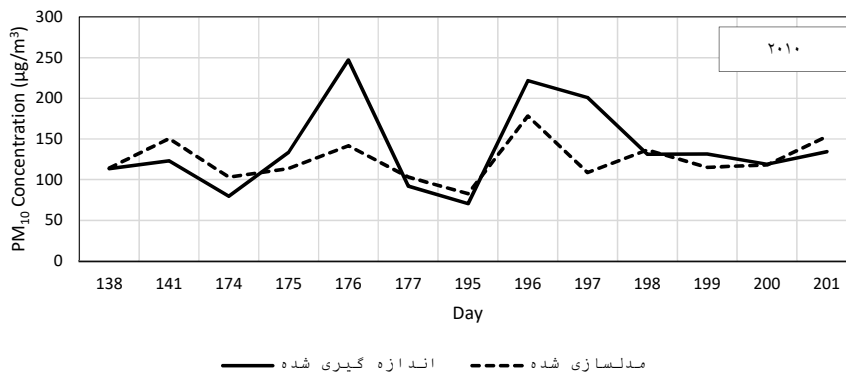
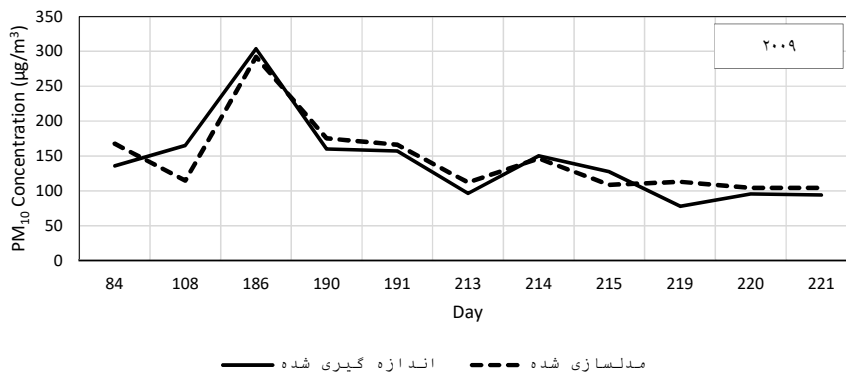
تغییرات روزانه مقادیر غلظت مدلسازی شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح زمین در نمودار ۳ به ترتیب برای سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ میلادی نشان داده شده است. مقادیر  $PM_{10}$  برای هر روز از میانگین غلظت ذرات معلق در ایستگاه‌های مختلف مربوط به همان روز محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که منحنی‌های حاصل از مقادیر پیش‌بینی شده توانایی دنبال کردن روند موجود در منحنی حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده را دارا هستند. اگرچه تعداد داده‌های جمع‌آوری شده برای سال ۲۰۰۸ نسبت به سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ بیشتر است؛ اما در هیچ بازه زمانی در سال ۲۰۰۸ همخوانی موجود میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مربوط به سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ مشاهده نمی‌شود. همچنین علیرغم یکسان بودن تقریبی تعداد داده‌های سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، عملکرد مدل در سال ۲۰۰۹ بهتر از سال ۲۰۱۰ است.

## بحث

رابطه موجود میان غلظت متوسط روزانه و غلظت متوسط در ساعات عبور ماهواره بر فراز محدوده مورد مطالعه با محصول AOD یکی از موضوعات و سوالات مطرح شده پیرامون رابطه PM-AOD است. بررسی نتایج حاصله نشان داده است که رابطه غلظت متوسط روزانه ذرات معلق با پارامتر ماهواره‌ای قوی‌تر از رابطه مذکور در حالتی



نمودار ۳- تغییرات روزانه  $PM_{10}$  اندازه‌گیری شده و مدلسازی شده مربوط به سال ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰



ادامه نمودار ۳- تغییرات روزانه  $PM_{10}$  اندازه‌گیری شده و مدلسازی شده مربوط به سال ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰

می‌یابد. در این راستا چنانچه شعاع استخراج داده AOD در اطراف هر ایستگاه بسیار کم در نظر گرفته شود، تعداد داده‌های استخراج شده کاهش یافته و نتایج چندان قابل اعتماد نخواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد، چنانچه شعاع استخراج ۵ km در نظر گرفته شود، علاوه بر دستیابی به دقت قابل قبول، تعداد داده‌های مورد نیاز و کافی به منظور برآزش مدل‌ها نیز در دسترس خواهد بود.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که رابطه خام و تک متغیره PM-AOD عموماً ضعیف و متوسط بوده و عملکرد مطلوبی ندارد و به نظر می‌رسد با توجه به اینکه AOD نماینده میزان کدرت موجود در جو ناشی از حضور ذرات معلق است؛ این پارامتر احتمالاً با نوع خاصی از ذرات معلق دارای رابطه قوی و معنی‌داری بوده و در نظرگیری کل ذرات معلق موجود در جو می‌تواند سبب تضعیف رابطه گردد. لذا در این مطالعه سعی گردید تا با اتخاذ رویکردی

مؤید نتایج حاصله است.

همانطوری که در بخش دیگری از نتایج مشاهده شد، الگوریتم شماره ۱ دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دو الگوریتم دیگر است. این موضوع نیز با توجه به سناریوهای تعریف شده قابل انتظار بود؛ چراکه سناریو شماره ۱ بسیار محدود کننده عمل نموده و نزدیکترین داده به ایستگاه را به عنوان خروجی معرفی می‌کند؛ حال آنکه ممکن است در فواصل دورتر و در شعاع استخراج قابل قبول، داده AOD موجود باشد. به بیان دیگر سناریو شماره ۱ سبب افزایش داده‌های غیر قابل قبول یا گم شده (Data Missing) می‌گردد.

با توجه به مشکلات موجود در بررسی رابطه مورد بحث از جمله ضعف سنسور در بازیابی مقادیر AOD برای سطوح براق، آلودگی ابری و خطاهای بازیابی، تعداد داده‌های غیر قابل قبول استخراج شده به میزان قابل توجهی افزایش

به نظر می‌رسد رابطه مذکور تا حدودی وابسته به محدوده مورد مطالعه و در نتیجه منابع تولید کننده ذرات معلق و همچنین بازه‌های زمانی انتخابی برای مطالعه بوده و همین امر سبب شده است تا ضرایب همبستگی مختلفی برای رابطه مذکور به دست آید. از اینرو است که ضریب همبستگی رابطه PM-AOD برای مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۲ در آلابامای ایالات متحده ۰/۴۹ (۱۵) و برای مطالعه دیگر (۱۱) در مناطق جنوب شرقی ایتالیا در بازه سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ در بهترین حالت در بازه ۰/۳۳-۰/۱۲ قرار می‌گیرد. در واقع، عوامل بسیاری از جمله محدوده مورد مطالعه، بازه زمانی انتخابی، منابع تولید کننده ذرات معلق و غیره بر عملکرد رابطه مورد بحث موثر بوده و مقایسه بین نتایج مطالعات مختلف می‌بایست با در نظر گرفتن تمامی عوامل تاثیرگذار صورت پذیرد. با عنایت به اینکه شرایط محدوده‌های مورد بررسی لزوماً با یکدیگر یکسان نیست، به نظر می‌رسد قرارگیری مقدار ضریب همبستگی مطالعات جدید در بازه تعیین شده در مطالعات پیشین می‌تواند معیاری برای عملکرد قابل قبول رابطه توسعه داده شده در هر مطالعه باشد. همچنین چنانچه مطالعات مشابهی در محدوده مورد مطالعه هر تحقیق وجود داشته باشد، مقایسه عملکرد بین نتایج تحقیق کنونی و مطالعات پیشین می‌تواند بهترین و دقیق‌ترین نتیجه‌گیری در خصوص کیفیت نتایج مطالعات جدید را در اختیار پژوهشگران قرار دهد؛ چراکه از لحاظ محدوده مکانی مورد مطالعه و منابع تولید ذرات معلق با یکدیگر مشترک بوده و این امر خطای مقایسه را کاهش خواهد داد.

با توجه به مطالب بیان شده مقایسه نتایج حاصله در این تحقیق با یافته‌های مطالعات پیشین در نقاط مختلف دنیا نشان می‌دهد ضرایب همبستگی حاصله و عملکرد رابطه در مطالعه حاضر در سطح قابل قبولی به دست آمده است. از سوی دیگر مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش با یافته‌های مطالعات انجام شده برای شهر تهران حاکی از عملکرد بهتر رابطه خام PM<sub>10</sub>-AOD برای دوره‌های

متفاوت از مطالعات قبلی، رابطه PM<sub>10</sub>-AOD تنها برای دوره‌های گردوغبار مورد بررسی قرار گیرد. همانطوری که در بخش مقدمه نیز به آن اشاره شد، رابطه خطی تک متغیره PM-AOD در نقاط مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفته و عملکردهای متفاوتی داشته است (۰/۴۹-۰/۰۳)  $r^2=$  در این راستا، Engel-Cox و همکاران طی بررسی‌های انجام شده نشان دادند مقدار ضریب تعیین رابطه خطی مورد نظر برای مقادیر متوسط روزانه و ساعتی غلظت ذرات معلق به ترتیب برابر با ۰/۱۸ و ۰/۱۶ است (۱۲). Gupta و همکاران طی مطالعه انجام شده ضریب تعیین رابطه خطی PM-AOD را ۰/۳۶ برآورد نمودند؛ که در صورت اضافه شدن پارامترهای هواشناسی به رابطه خطی مقدار  $r^2$  می‌تواند تا ۰/۴۶ افزایش یابد (۱۸). Dinoi و همکاران با بررسی رابطه خطی PM<sub>10</sub>-AOD با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS مقدار  $r^2$  مربوط به رابطه مذکور را در بازه ۰/۱۲-۰/۰۴ برآورد نمودند (۱۱). Sorek-Hamer و همکاران نیز ضمن بررسی انواع مدل‌های پیش‌بینی کننده، مقدار  $r^2$  رابطه خطی PM-AOD را ۰/۲ تعیین کردند (۲۰). Bilal و همکاران با بررسی ارتباط میان مقادیر عمق اپتیکی ذرات معلق استخراج شده از MODIS با دقت‌های مکانی متفاوت و مقادیر غلظت ذرات معلق، میزان ضریب تعیین رابطه را ۰/۳۶ برآورد نمودند (۱۷). طبق مطالعه Sotoudeheian و همکار برای رابطه خام تک متغیره میان مقادیر PM<sub>10</sub> و پارامتر ماهواره‌ای AOD استخراج شده از سنجنده MODIS طی بازه زمانی یکساله، مقدار  $r^2$  کمتر از ۰/۱۵ تخمین زده شده است (۳۰). همچنین Ghotbi و همکاران نشان دادند میزان  $r^2$  رابطه PM<sub>10</sub>-AOD طی سال ۲۰۰۹ برای ۱۰ ایستگاه انتخابی در سطح شهر تهران، ۰/۱۲ است (۳۱). Sotoudeheian و همکار طی مطالعه انجام شده برای شهر تهران در سال ۲۰۱۳ ضریب تعیین بسیار پایینی را برای رابطه خطی تک متغیره PM<sub>2.5</sub>-AOD به دست آوردند ( $r^2$  برابر با ۰/۰۳) (۳۲).

از مطالعات پیشین (در تحقیقات متداول گذشته رابطه PM-AOD به صورت روزانه و برای کل بازه زمانی سالانه مورد بررسی قرار گرفته است) رابطه خطی تک متغیره PM<sub>10</sub>-AOD برای دوره‌های گردوغبار برای شهر تهران بررسی شده و عملکرد رابطه مذکور در شرایطی که پدیده گردوغبار رخ می‌دهد، مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصله نشان داده است رابطه خطی خام PM<sub>10</sub>-AOD در دوره‌های گردوغبار برای شعاع استخراج ۵ km و غلظت روزانه ذرات معلق با ضریب همبستگی ۰/۳ دارای بهترین عملکرد است. مدل نهایی توسعه داده شده با استفاده از پارامترهای هواشناسی کمکی توانایی توصیف ۴۱ درصد از تغییرات غلظت روزانه ذرات معلق در دوره‌های گردوغبار را داراست (R<sup>2</sup>=۰/۶۴). با عنایت به کلیه مشکلات موجود از قبیل آلودگی ابری و ضعف سنسورهای ماهواره‌ای در تخمین مقادیر عمق اپتیکی آلاینده‌ها بر روی سطوح براق و همچنین مقایسه نتایج حاصله در این تحقیق با مطالعات پیشین، به نظر می‌رسد عملکرد مدل نهایی در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در دوره‌های گردوغبار در سطح قابل قبولی است. لازم به ذکر است مدل‌های توسعه داده شده در این مطالعه توانایی پیش‌بینی مقادیر بسیار بالای غلظت ذرات معلق را نیز با دقت خوبی داراست. نتایج حاصله نشان دهنده همبستگی بالاتری میان AOD و غلظت ذرات معلق ناشی از گردوغبار نسبت به ذرات معلق ناشی از منابع دیگر است؛ به بیان دیگر مقادیر AOD بازایی شده توسط MODIS با ذرات معلق ناشی از طوفان‌های گردوغبار دارای رابطه نسبتاً قوی‌تری است. همچنین با عنایت به مدل نهایی برازش داده شده و ضریب همبستگی حاصله می‌توان از مدل مذکور به منظور پیش‌بینی غلظت روزانه ذرات معلق طی دوره‌های گردوغبار در سایر شهرهایی که از لحاظ شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی همانند تهران بوده و در معرض طوفان‌های دوره‌ای گردوغبار هستند، با سطح خطای مشخص استفاده نمود.

گردوغبار نسبت به بازه‌های زمانی عادی است. به عبارت دیگر ضریب همبستگی به دست آمده میان PM<sub>10</sub> و AOD در دوره‌های گردوغبار (در حالت خام و بدون هیچگونه اصلاح) بیشتر از ضرایب همبستگی در شرایط عادی است. لذا، یافته‌های این تحقیق با توجه به تغییرات بسیار بالای غلظت ذرات معلق در دوره‌های گردوغبار و نوع مدل برازش داده شده (رگرسیون خطی تک متغیره و چند متغیره) مطلوب و قابل قبول ارزیابی شده و از لحاظ عملکردی در سطح بالاتری نسبت به مطالعات پیشین قرار دارد. با این وجود به نظر می‌رسد عواملی همچون ضعف سنسور در بازایی عمق اپتیکی آلاینده‌ها بر فراز سطوح براق (مناطق بیابانی و نیمه بیابانی)، معضل آلودگی ابری و خطاهای سیستماتیک در بازایی AOD توسط سنسور از یک سو و عدم وجود داده‌های کافی غلظت آلاینده‌ها در ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا در سطح شهر تهران برای بازه‌های زمانی طولانی از سوی دیگر می‌تواند سبب کاهش دقت نتایج حاصله گردد. لازم به ذکر است به دلیل ابعاد نه چندان بزرگ محدوده مورد مطالعه، امکان استفاده از داده‌های AOD بازایی شده توسط الگوریتم‌هایی که تا حدودی مشکل مربوط به سطوح براق را برطرف نموده‌اند، وجود نداشت. همچنین در صورت وجود داده‌های غلظت برای شهر تهران به صورت سری زمانی بیش از ۱۵ سال و بررسی رابطه مورد بحث در آن حالت، به نظر می‌رسد نتایج حاصله از سطح اطمینان بالاتری برخوردار خواهند بود. با این حال علیرغم مشکلات مربوط به نبود داده و خصوصیات جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، ضروری است تا مطالعاتی از این دست انجام شود تا زمینه برای مطالعات آتی ایجاد شده و در سالیان بعد و با تکمیل بانک داده مربوط به غلظت ذرات معلق، پژوهش‌های تکمیلی و دقیق پیرامون موضوع با دسترسی کامل به حجم بالای داده صورت پذیرد.

## نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر سعی گردید تا با رویکردی متفاوت

## ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

## References

1. WHO. Air Quality Guidelines for Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2000.
2. Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*. 2008;151(2):362-67.
3. Atkinson RW, Ross Anderson H, Sunyer J, Ayres J, Baccini M, Vonk JM, et al. Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2001;164(10):1860-66.
4. Brunekreef B, Holgate ST. Air pollution and health. *The Lancet*. 2002;360(9341):1233-42.
5. Dominici F, Peng RD, Bell ML, Pham L, McDermott A, Zeger SL, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *Journal of American Medical Association*. 2006;295(10):1127-34.
6. Pope 3rd C. Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? *Environmental Health Perspectives*. 2000;108(suppl 4):713-23.
7. Nordio F, Kloog I, Coull BA, Chudnovsky A, Grillo P, Bertazzi PA, et al. Estimating spatio-temporal resolved PM10 aerosol mass concentrations using MODIS satellite data and land use regression over Lombardy, Italy. *Atmospheric Environment*. 2013;74:227-36.
8. Lee HJ, Coull BA, Bell ML, Koutrakis P. Use of satellite-based aerosol optical depth and spatial clustering to predict ambient PM2.5 concentrations. *Environmental Research*. 2012;118:8-15.
9. Tian J, Chen D. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM2.5) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2010;114(2):221-29.
10. Al-Saadi J, Szykman J, Pierce RB, Kittaka C, Neil D, Chu DA, et al. Improving national air quality forecasts with satellite aerosol observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2005;86(9):1249-61.
11. Dinoi A, Perrone MR, Burlizzi P. Application of MODIS products for air quality studies over South-eastern Italy. *Remote Sensing*. 2010;2(7):1767-96.
12. Engel-Cox JA, Holloman CH, Coutant BW, Hoff RM. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*. 2004;38(16):2495-509.
13. Liu Y, Franklin M, Kahn R, Koutrakis P. Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM2.5 concentrations in the St. Louis area: a comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2007;107(1):33-44.
14. Schaap M, Apituley A, Timmermans R, Koelemeijer R, Leeuw Gd. Exploring the relation between aerosol optical depth and PM2.5 at Cabauw, the Netherlands. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009;9(3):909-25.
15. Wang J, Christopher SA. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM2.5 mass: implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*. 2003;30(21).
16. Gupta P, Christopher SA, Wang J, Gehrig R, Lee Y, Kumar N. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*. 2006;40(30):5880-92.
17. Bilal M, Nichol JE, Spak SN. A new approach for estimation of fine particulate concentrations using satellite aerosol optical depth and binning of meteorological variables. *Aerosol and Air Quality Research*. 2017;11:356-67.
18. Gupta P, Christopher SA. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 2009;114:D14205. doi:10.1029/2008JD011496.
19. Liu Y, Paciorek CJ, Koutrakis P. Estimating regional spatial and temporal variability of PM2.5 concentrations using satellite data, meteorology, and land use information. *Environmental Health Perspectives*. 2009;117(6):886-92.



20. Sorek-Hamer M, Strawa A, Chatfield R, Esswein R, Cohen A, Broday D. Improved retrieval of PM<sub>2.5</sub> from satellite data products using non-linear methods. *Environmental Pollution*. 2013;182:417-23.
21. You W, Zang Z, Pan X, Zhang L, Chen D. Estimating PM<sub>2.5</sub> in Xi'an, China using aerosol optical depth: A comparison between the MODIS and MISR retrieval models. *Science of the Total Environment*. 2015;505:1156-65.
22. Chen G, Knibbs LD, Zhang W, Li S, Cao W, Guo J, et al. Estimating spatiotemporal distribution of PM<sub>1</sub> concentrations in China with satellite remote sensing, meteorology, and land use information. *Environmental Pollution*. 2018;233:1086-94.
23. Zeydan Ö, Wang Y. Using MODIS derived aerosol optical depth to estimate ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations over Turkey. *Atmospheric Pollution Research*. 2019;10(5):1565-76.
24. He Q, Huang B. Satellite-based mapping of daily high-resolution ground PM<sub>2.5</sub> in China via space-time regression modeling. *Remote Sensing of Environment*. 2018;206:72-83.
25. Zhang T, Zang L, Wan Y, Wang W, Zhang Y. Ground-level PM<sub>2.5</sub> estimation over urban agglomerations in China with high spatiotemporal resolution based on Himawari-8. *Science of the Total Environment*. 2019;676:535-44.
26. Yang L, Xu H, Jin Z. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> over a coastal region of China using satellite AOD and a combined model. *Journal of Cleaner Production*. 2019;227:472-82.
27. Li X, Zhang X. Predicting ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region: A hybrid remote sensing and machine learning approach. *Environmental Pollution*. 2019;249:735-49.
28. Xue T, Zheng Y, Tong D, Zheng B, Li X, Zhu T, et al. Spatiotemporal continuous estimates of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China, 2000–2016: A machine learning method with inputs from satellites, chemical transport model, and ground observations. *Environment International*. 2019;123:345-57.
29. Sorek-Hamer M, Kloog I, Koutrakis P, Strawa AW, Chatfield R, Cohen A, et al. Assessment of PM<sub>2.5</sub> concentrations over bright surfaces using MODIS satellite observations. *Remote Sensing of Environment*. 2015;163:180-85.
30. Sotoudeheian S, Arhami M. Estimating ground-level PM<sub>10</sub> using satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements over Tehran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014;12(1):122.
31. Ghotbi S, Sotoudeheian S, Arhami M. Estimating urban ground-level PM<sub>10</sub> using MODIS 3km AOD product and meteorological parameters from WRF model. *Atmospheric Environment*. 2016;141:333-46.
32. Sotoudeheian S, Arhami M. Using linear mixed effect model to estimate ground-level PM<sub>2.5</sub>: case study for Tehran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2017;10(2):213-24 (in Persian).
33. Kermanshah A, Sotoudeheian S, Tajrishy M. Satellite and ground-based assessment of Middle East meteorological parameters impact on dust activities in western Iran. *Scientia Iranica: Transactions on Civil Engineering (A)*. 2016;23(6):2478-93.
34. Sotoudeheian S, Salim R, Arhami M. Impact of Middle Eastern dust sources on PM<sub>10</sub> in Iran: Highlighting the impact of Tigris-Euphrates basin sources and Lake Urmia desiccation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 2016;121:14,018-14,034.
35. Nabavi SO, Haimberger L, Abbasi E. Assessing PM<sub>2.5</sub> concentrations in Tehran, Iran, from space using MAIAC, deep blue, and dark target AOD and machine learning algorithms. *Atmospheric Pollution Research*. 2019;10(3):889-903.
36. Remer L, Mattoo S, Levy R, Munchak L. MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. 2013;6(1):69-112.
37. Givehchi R. Contribution of the Middle Eastern dust source areas to PM<sub>10</sub> levels in urban receptors: Case study of Tehran, Iran [dissertation]. Sharif University of Technology; 2011 (in Persian).
38. Remer LA, Kaufman Y, Tanré D, Mattoo S, Chu D, Martins JV, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2005;62(4):947-73.
39. James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. An introduction to Statistical Learning. New York: Springer; 2013.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Investigating the relationship between ground-level particulate matter and aerosol optical depth during dust storm episodes: a case study of Tehran

Saeed Sotoudeheian\*, Behnaz Shirazi Rumenan  
Tehran Municipality, Tehran, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 15 June 2020  
**Revised:** 2 September 2020  
**Accepted:** 7 September 2020  
**Published:** 21 September 2020

**Keywords:** Particulate matter, Aerosol optical depth, Dust storms, Multivariable linear regression, MODIS

**\*Corresponding Author:**  
Saeed\_sotodian@yahoo.com

### ABSTRACT

**Background and Objective:** During the last few years, air pollution and increasing levels of particulate matters (PMs) have become major public health issues in the megacity of Tehran. The high cost of constructing and maintaining air pollution monitoring stations has made it difficult to achieve adequate spatial-temporal coverage of PM data over various regions. In this regard, the use of remote sensing data such as aerosol optical depth (AOD) can be a simple and cost-effective way to overcome the problem.

**Materials and Methods:** Due to the weakness of univariate linear relationship of  $PM_{10}$ -AOD under normal conditions, this relationship has been studied for the time periods of dust storm occurrence during 2007-2010 in Tehran. Satellite product with spatial resolution of 3 and 10 km obtained from MODIS sensor were used to fit the models.

**Results:** Results showed that the best performance of univariate model was achieved for 5 km radius of AOD extraction and daily mean of  $PM_{10}$  concentrations ( $r = 0.55$ ). Moreover, the use of meteorological auxiliary variables and the development of multivariate linear regression model have improved the performance of the model ( $r = 0.64$ ). The final model also exhibited accurate capability for prediction of high  $PM_{10}$  concentrations during dusty days.

**Conclusion:** Overall, the obtained univariate linear relationships of  $PM_{10}$ -AOD was stronger during dusty episodes than those of normal conditions, suggest a higher correlation between AOD and  $PM_{10}$  from dust activities as compared with  $PM_{10}$  originating from other sources. Furthermore, the final developed model could be used to predict daily level of  $PM_{10}$  concentrations during dusty episodes.

Please cite this article as: Sotoudeheian S, Shirazi Rumenan B. Investigating the relationship between ground-level particulate matter and aerosol optical depth during dust storm episodes: a case study of Tehran. Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(2):209-26.

