



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

مقاله پژوهشی

## بهره‌گیری از مدل اثرات اختلاط خطی جهت پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین: مطالعه موردی در تهران

سعید ستوده‌یان\*، محمد ارحامی

گروه مهندسی محیط‌زیست و منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر وضعیت بحرانی غلظت ذرات معلق در کلان شهر تهران به‌عنوان معضلی شاخص همواره مورد توجه بوده است. با توجه به محدود بودن شبکه ایستگاه‌های پایش آلاینده‌های هوا و عدم صرفه اقتصادی جهت افزایش ایستگاه‌های موجود، محققین استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور را به‌عنوان روشی اقتصادی و آسان جهت دست‌یابی به پوشش مکانی و زمانی کامل از غلظت ذرات معلق پیشنهاد نموده‌اند.

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۳۱  
تاریخ ویرایش: ۹۶/۰۵/۲۱  
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۲۵  
تاریخ انتشار: ۹۶/۰۶/۲۹

روش بررسی: در مطالعه پیش‌رو پارامتر ماهواره‌ای عمق اپتیکی ذرات معلق (AOD) از سنجنده MODIS به همراه پارامترهای هواشناسی جهت توسعه مدل آماری اثرات اختلاط خطی و پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های AOD با وضوح مکانی ۳ km برای ۱۳ ایستگاه پایش زمینی و داده‌های هواشناسی برای ۵ ایستگاه سینوپتیک در سطح شهر تهران برای سال ۲۰۱۳ استخراج شده‌اند.

واژگان کلیدی:  $PM_{2.5}$ ، عمق اپتیکی آلاینده‌ها، سنجنده MODIS، مدل اثرات اختلاط خطی

یافته‌ها: مدل پیشنهادی توانایی پیش‌بینی ۷۲-۵۷ درصد تغییرات روزانه غلظت  $PM_{2.5}$  را دارا است. آنالیز زمانی مقادیر تخمین زده شده برای غلظت  $PM_{2.5}$  توانسته است روند موجود در مقادیر اندازه‌گیری شده را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید. بهترین عملکرد مدل طی مراحل مدل‌سازی و اعتبارسنجی مربوط به ماه May سال ۲۰۱۳ است. توزیع مکانی غلظت پیش‌بینی شده توسط مدل دارای همخوانی کاملی با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها است.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

Saeed\_sotodian@yahoo.com

نتیجه‌گیری: با توجه به نقشه توزیع مکانی غلظت  $PM_{2.5}$  پیش‌بینی شده، مناطق مرکزی و شمالی به‌عنوان آلوده‌ترین بخش‌ها تعیین شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل اثرات اختلاط خطی به همراه پارامتر ماهواره‌ای و متغیرهای هواشناسی دارای توانایی قابل قبولی جهت پیش‌بینی غلظت  $PM_{2.5}$  است.

## مقدمه

غلظت بالای آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با سلامتی انسان‌ها به ویژه در شهرهای بزرگ دنیا و کشورهای در حال پیشرفت به موضوعی بدل شده است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۱، ۲). در میان آلاینده‌های مختلف، ذرات معلق (Particulate Matter (PM)) شامل  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  (به ترتیب ذرات معلق با قطر آئروئودینامیکی کمتر از  $10 \mu m$  و  $2.5 \mu m$ ) به دلیل تاثیرات قابل توجه بر سلامت عمومی افراد جامعه سبب بروز نگرانی گسترده‌ای در جوامع مختلف گردیده است. مطالعات نشان داده است که افزایش غلظت ذرات معلق می‌تواند سبب بروز مشکلات تنفسی، بیماری‌های قلبی و عروقی و افزایش آمار مرگ و میر گردد (۳-۶). با توجه به محدود بودن شبکه ایستگاه‌های پایش آلاینده‌های هوا و غیر اقتصادی بودن افزایش تعداد ایستگاه‌های موجود، دستیابی به پوشش مکانی و زمانی مناسب جهت نشان دادن تغییرات غلظت ذرات معلق در سطح زمین بسیار دشوار است. در این بین محققان کوشیده‌اند تا با بهره‌گیری از تکنیک سنجش از دور، ابزاری سریع و اقتصادی را جهت پایش بینی غلظت ذرات معلق در اختیار قرار دهند (۷-۹). سنجنده‌های ماهواره‌ای کدورت موجود در ستون جو ناشی از فراوانی ذرات معلق را از طریق بازایی شاخص عمق اپتیکی آلاینده‌ها (Aerosol Optical Depth (AOD)) مشخص می‌نمایند. محققان همواره در تلاش هستند تا رابطه PM-AOD را از طریق ارائه مدل‌های خطی بسیار ساده تا مدل‌های غیرخطی پیچیده، بهبود بخشیده و توانایی آنها در پایش بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین را افزایش دهند. مطالعات انجام شده نشان داده است که استفاده از یک رابطه خطی تک متغیره بین پارامتر غلظت ذرات معلق و AOD نمی‌تواند منجر به مدلی مقاوم و توانا جهت پایش بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین شود. در نتیجه پیشنهاد شده است تا با استفاده از پارامترهای کمکی از جمله پارامترهای هواشناسی موثر، توانایی مدل‌ها افزایش داده شود (۷، ۱۰-۱۲).

مطالعات ابتدایی در راستای بررسی رابطه  $PM_{2.5}$ -AOD

عموماً از رگرسیون خطی جهت ایجاد ارتباط مورد نظر استفاده کرده‌اند (۱۰، ۱۳، ۱۴). جهت بهبود رابطه مورد نظر مدل‌های رگرسیونی چند متغیره با بهره‌گیری از پارامترهای هواشناسی مانند رطوبت نسبی و ارتفاع لایه مرزی (۷، ۱۱) و اطلاعات کاربری زمین (۱۵) جهت پایش بینی غلظت ذرات معلق پیشنهاد گردید. با توجه به اینکه بسیاری از پارامترهای موثر بر رابطه  $PM_{2.5}$ -AOD مانند متغیرهای هواشناسی (دما و رطوبت)، پروفایل عمودی غلظت ذرات معلق و سایر خصوصیات اپتیکی آلاینده‌ها دارای تغییرات روزانه هستند، انتظار می‌رود تا رابطه مورد نظر نیز به صورت روزانه تغییر نماید. به منظور در نظرگیری تغییرات روزانه پارامترهای مورد استفاده و بهبود عملکرد مدل، Lee و همکاران در سال ۲۰۱۱ بهره‌گیری از مدل اثرات اختلاط را پیشنهاد کردند (۱۶). در ادامه این مدل توسط محققین در مناطق مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفت و نتایج متفاوتی را در برداشت (۸، ۹، ۱۷-۲۱).

مروری بر ادبیات موضوع نشان داده است که مطالعات انجام شده در رابطه با استفاده از تکنیک سنجش از دور جهت پایش بینی غلظت ذرات معلق در ایران بسیار محدود بوده است. مطالعات مشابه نیز از مدل‌های آماری جهت پایش بینی غلظت  $PM_{10}$  استفاده نموده‌اند (۲۲، ۲۳). این در حالی است که تاکنون مطالعه‌ای جامع در رابطه با پایش بینی غلظت  $PM_{2.5}$  با استفاده از پارامتر بازایی شده توسط ماهواره برای شهر تهران انجام نشده است. لذا، در تحقیق پیش‌رو - با توجه به ضعف مدل‌های رگرسیون خطی - از مدل اثرات اختلاط خطی جهت توسعه مدل و پایش بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

## - منطقه مورد مطالعه

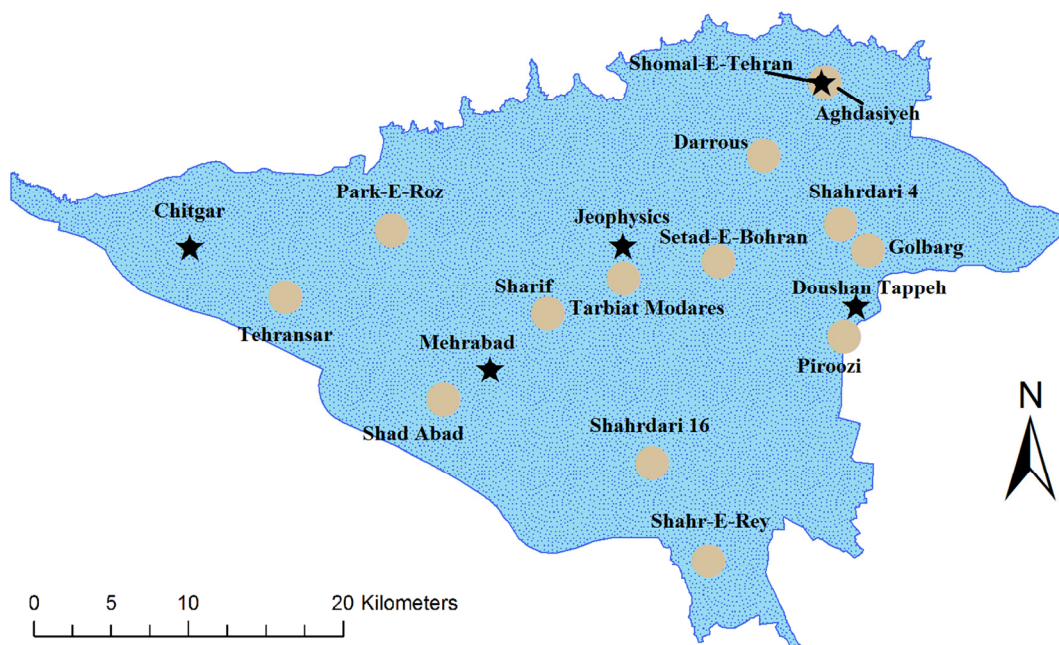
محدوده مکانی مورد نظر جهت بررسی رابطه  $PM_{2.5}$ -AOD کلان شهر تهران است که در محدوده ۵۱ الی ۵۱/۷ در جهت طول جغرافیایی و ۳۵/۵ الی ۳۶ در جهت عرض جغرافیایی واقع شده است. این کلان شهر با دارا بودن جمعیتی در حدود

کیفیت ( $QA=3$ ) است (۲۴، ۲۵). داده‌های مربوط به غلظت ساعتی  $PM_{2.5}$  از ۱۳ ایستگاه سنجش آلودگی هوا در سطح شهر تهران (زیر نظر شرکت کنترل کیفیت هوا) برای سال ۲۰۱۳ جمع‌آوری شده است. مقادیر غلظت استفاده شده در این مطالعه از متوسط غلظت ثبت شده برای ساعات ۱۲ الی ۱۴ به دست آمده که متناظر با زمان عبور ماهواره بر فراز منطقه مورد مطالعه است. از آنجایی که پارامترهای هواشناسی می‌توانند از طریق تاثیر بر روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات معلق، ویژگی‌های اپتیکی آنها را تغییر دهند؛ لذا به نظر می‌رسد استفاده از این پارامترها در مدل‌های آماری سبب افزایش توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی غلظت ذرات گردد (۲۳). بدین منظور پارامترهای هواشناسی مختلف از ۵ ایستگاه سینوپتیک در سطح شهر تهران جمع‌آوری شده و جهت استفاده در مدل بکار گرفته شده‌اند. جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و ایستگاه‌های سینوپتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

۸/۵ میلیون نفر به عنوان جمعیت ثابت و شبکه حمل و نقل متراکم و همچنین طوفان‌های گردوغبار متناوب ناشی از کشورهای همسایه، به شدت با معضل آلودگی هوا به ویژه غلظت بالای  $PM_{2.5}$  روبرو است (۲۳).

#### - داده‌ها

در مطالعه حاضر از داده‌های مربوط به عمق اپتیکی آلاینده‌ها در طول موج ۵۵۰ nm بازتابی شده توسط سنجنده (Moderate-resolution imaging spectroradiometer) MODIS (سطح دو-مجموعه ۶) که بر روی ماهواره اکو (ارسال شده در تاریخ ۴ May ۲۰۰۲) قرار دارد، استفاده شده است. سنجنده MODIS به دلیل پوشش جهانی روزانه و وضوح مکانی ۳ km ابزار مناسب جهت پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین است. داده‌های AOD برای سال ۲۰۱۳ و بازه زمانی ۱۰:۳۰-۸:۳۰ به وقت جهانی متناظر با ۱۲ الی ۱۴ به وقت محلی تهیه شده است. لازم به ذکر است که کلیه داده‌های استخراج شده دارای بالاترین سطح تضمین



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

### - توسعه مدل آماری

با توجه به عملکرد مناسب مدل اثرات اختلاط در مطالعات اخیر، در این مطالعه نیز سعی شده است تا با بهره‌گیری از مدل اثرات اختلاط چند متغیره خطی و استفاده از پارامترهای کمکی، مدلی مقاوم با عملکرد قابل قبول جهت پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح ارائه شود. مدل نهایی به‌دست آمده در این پژوهش در معادله ۱ آورده شده است.

$$PM_{ij} = (\alpha_0 + U_j) + \alpha_1 \times AOD_{ij} + \alpha_2 \times Temp_{ij} + \alpha_3 \times RH_{ij} + \alpha_4 \times TC_{ij} + \alpha_5 \times PBLH_{ij} + V_j \times AOD_{ij} + s_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

در معادله ۱  $PM_{ij}$  غلظت  $PM_{2.5}$  در ایستگاه پایش  $i$ ام و در روز  $j$ ام است.  $AOD_{ij}$ ،  $Temp_{ij}$ ،  $RH_{ij}$ ،  $TC_{ij}$ ،  $PBLH_{ij}$  به ترتیب عمق اپتیکی ذرات معلق، دما، رطوبت نسبی، پوشش ابری و ارتفاع لایه مرزی مربوط به ایستگاه سنجش  $i$  در روز  $j$ ام است.  $\alpha_0$  و  $U_j$  به ترتیب عرض از مبدا ثابت و رندم،  $\alpha_1$  تا  $\alpha_5$  شیب‌های ثابت و  $V_j$  شیب رندم مربوط به پارامتر  $AOD$  است.  $s_i$  عرض از مبدا رندم مربوط به ایستگاه پایش  $i$  است.  $\varepsilon_{ij}$  عبارت خطا در ایستگاه سنجش  $i$  و روز  $j$ ام است. با برازش اشکال مختلف مدل بر روی مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده، شکل نهایی مدل بصورت معادله ۱ تعیین گردید و ضرایب ثابت و رندم مدل مذکور تعیین شد. جهت ارزیابی عملکرد مدل از ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) استفاده شده است. مقادیر ضریب تعیین، میزان همبستگی موجود بین مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد؛ در حالی که  $RMSE$  بیانگر میزان خطای مدل در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین است. لازم به ذکر است که با توجه به بررسی تغییرات روزانه پارامترها در طی بازه مورد مطالعه توسط مدل اثرات اختلاط، این مدل جهت برازش در یک روز خاص نیازمند حداقل دو زوج  $PM_{2.5}$ - $AOD$  است. در نتیجه روزهایی از سال که در آن تنها یک ایستگاه پایش دارای پارامترهای مستقل مورد نیاز جهت برازش مدل باشد از مدلسازی حذف می‌شود.

جهت برازش مدل اثرات اختلاط خطی بر روی مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده از نرم‌افزار  $R$  استفاده شده است.

### - اعتبارسنجی مدل آماری

جهت اعتبارسنجی مدل آماری از روش اعتبارسنجی متقاطع ( $Cross Validation (CV)$ ) استفاده شده است. در این روش داده‌های مربوط به یک ایستگاه جدا شده و مدلسازی با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۲ ایستگاه باقیمانده صورت می‌پذیرد. سپس مقادیر غلظت ذرات معلق برای ایستگاه جدا شده، توسط مدل پیش‌بینی می‌گردد تا توانایی مدل در تخمین مقادیر غلظتی که برای آنها آموزش داده نشده است، سنجیده شود. این عمل برای تمامی ایستگاه‌ها به صورت جداگانه تکرار شده و بدین ترتیب کلیه داده‌ها یکبار جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### یافته‌ها

#### - توصیف آماری داده‌ها

توصیف آماری داده‌های مورد استفاده در مدل در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر غلظت  $PM_{2.5}$  در کلیه ایستگاه‌ها با میزان متوسط  $31.7 \mu g/m^3$  ( $SD=18.2 \mu g/m^3$ ) از  $4.5 \mu g/m^3$  تا  $127.5 \mu g/m^3$  متغیر بوده است که بیانگر سطح بالای غلظت این آلاینده است. داده‌های  $AOD$  از  $0.21$  تا  $1.54$  متغیر بوده و دارای متوسط  $0.71$  ( $SD=0.25$ ) است. لازم به ذکر است که تمام داده‌های  $PM_{2.5}$  اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها لزوماً دارای پارامتر ماهواره‌ای  $AOD$  متناظر نیستند؛ از ۳۶۰۰ داده اندازه‌گیری شده برای  $PM_{2.5}$  در بازه زمانی مورد مطالعه و مربوط به ۱۳ ایستگاه پایش، تنها ۱۳ درصد از این داده‌ها دارای پارامتر  $AOD$  متناظر بازیابی شده توسط ماهواره هستند. این موضوع ضعف سنجنده  $MODIS$  در بازیابی  $AOD$  را به دلایل مختلف از جمله آلودگی ابری ( $Cloud Contamination$ )، براق بودن سطوح و غیره نشان می‌دهد. مقادیر دما با متوسط  $28.8^\circ C$  و بازه تغییرات  $11.2^\circ C$  تا  $39.2^\circ C$  نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه این پارامتر در طی فصول است. تأثیر دما بر غلظت ذرات معلق

داده‌ها نشان می‌دهد که آلودگی ابری سبب عدم بازیابی پارامتر AOD در بسیاری از زمان‌ها به ویژه در فصول سرد گردیده است. مقادیر ارتفاع لایه مرزی در بازه ۹۱۹ m تا ۴۱۱۰ m متغیر است. در حالی که عوامل دیگر دارای اثرات متفاوت بر روی رابطه AOD-PM<sub>2.5</sub> هستند؛ کاهش ارتفاع لایه مرزی و اختلاط عمودی می‌تواند سبب افزایش غلظت ذرات معلق در سطح زمین گردد (۲۶).

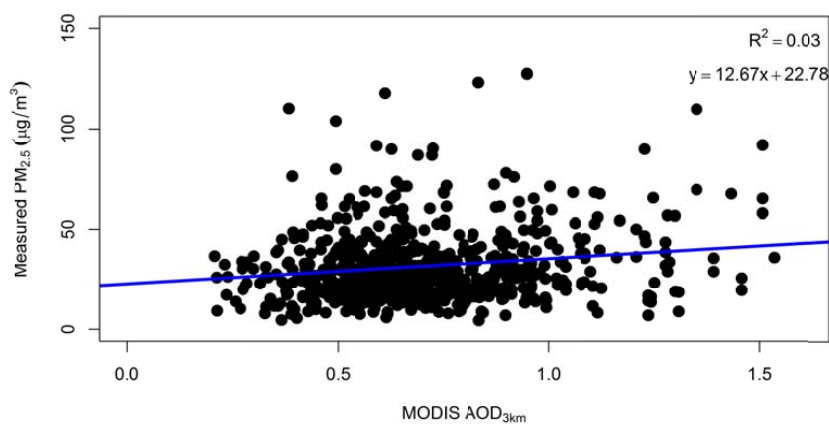
لزوماً به صورت رابطه مستقیم نبوده و به ترکیب ذرات معلق بستگی دارد (۲۶). متوسط میزان رطوبت نسبی ۱۹/۵ درصد با انحراف معیار ۶/۸ درصد بوده که نشان‌دهنده شرایط جوی خشک به دلیل مجاورت محدوده مطالعه به مناطق کویری است. با این حال برای روزهایی که میزان رطوبت نسبی افزایش می‌یابد، ذرات آبدوست (Hygroscopic Particles) تغییر اندازه داده و خصوصیات اپتیکی آنها تغییر می‌کند (۲۶). پوشش ابری نیز دارای میانگین ۱ و انحراف معیار ۱/۵ است.

جدول ۱- توصیف آماری پارامترهای مستقل و وابسته مورد استفاده در مدل آماری

متغیر	آماره	Min	۵ درصد	۹۵ درصد	Max	Mean	SD
PM <sub>2.5</sub>	۴/۵	۱۰/۷	۶۷/۷	۱۲۷/۵	۳۱/۷	۱۸/۲	
AOD	۰/۲۱	۰/۳۷	۱/۲۱	۱/۵۴	۰/۷۱	۰/۲۵	
TC	صفر	صفر	۴	۸	۱	۱/۵	
Temp	۱۱/۲	۱۷	۳۶/۲	۳۹/۲	۲۸/۸	۶	
RH	۵	۱۰	۳۱	۶۱	۱۹/۵	۶/۸	
PBLH	۹۱۹	۱۹۲۶	۳۶۶۰	۴۱۱۰	۲۸۴۱	۵۰۳	

جهت پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین را در اختیار قرار دهد. جهت بهبود رابطه موجود بین PM<sub>2.5</sub> و مقادیر AOD بازیابی شده توسط ماهواره از مدل اثرات اختلاط به همراه پارامترهای کمکی موثر از جمله پارامترهای هواشناسی استفاده شده است تا مدل به حد مطلوب نزدیک شود.

همبستگی موجود بین پارامتر AOD بازیابی شده توسط ماهواره و مقادیر غلظت PM<sub>2.5</sub> در نمودار ۱ نشان داده شده است. ضریب تعیین ۰/۰۳ نشان می‌دهد که رابطه اولیه بسیار ضعیفی میان این دو پارامتر برقرار است. لذا می‌توان دریافت که استفاده از رابطه رگرسیونی تک متغیره نمی‌تواند مدلی مقاوم

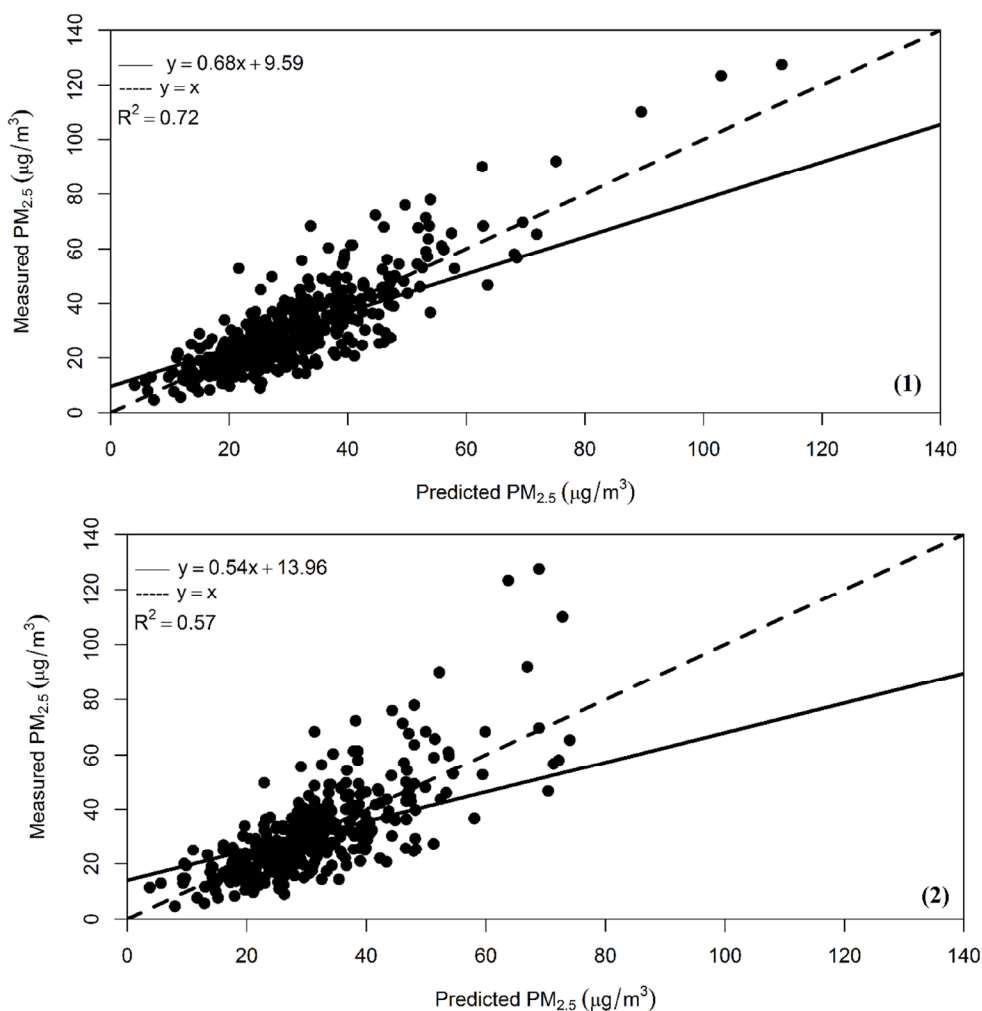


نمودار ۱- پراکندگی پارامتر مستقل AOD در مقابل غلظت PM<sub>2.5</sub> اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های پایش زمینی

### - عملکرد مدل

نتایج مربوط به عملکرد مدل پیشنهادی طی فرایند مدل‌سازی و اعتبار‌سنجی در نمودار ۲ نشان داده شده است. تمامی متغیرهای مستقل استفاده شده 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. مدل توسعه داده شده طی فرایند مدل‌سازی توانایی توصیف ۷۲ درصد از تغییرات موجود در

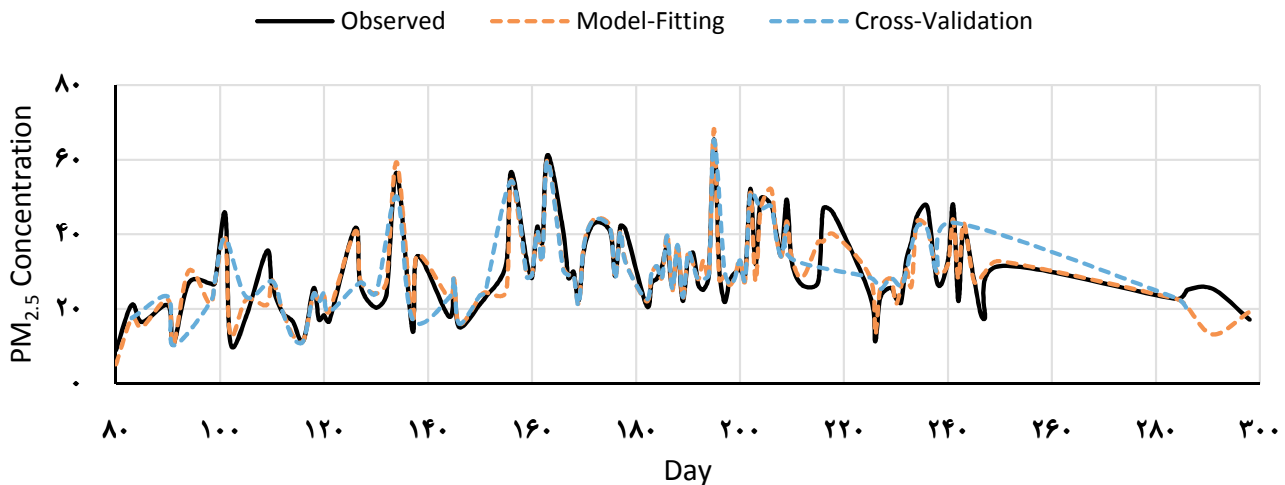
غلظت ذرات معلق در سطح زمین را دارا است ( $R=0.85$ ). این در حالی است که این مدل طی دوره اعتبار‌سنجی دارای ضریب تعیین  $0.57$  ( $R=0.76$ ) است. مقدار  $RMSE$  مربوط به مدل طی دوره مدل‌سازی و اعتبار‌سنجی به ترتیب  $1.5 \mu g/m^3$  و  $10.8 \mu g/m^3$  محاسبه شده است. با توجه به بازه بدست آمده برای ضریب همبستگی مدل پیشنهادی ( $R=0.76-0.85$ ) به نظر می‌رسد که مدل توسعه داده شده دارای توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین است.



نمودار ۲- مقایسه مقادیر غلظت پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (۱) مدل‌سازی (۲) اعتبار‌سنجی

اندازه‌گیری شده است. مدل در فرایند مدل‌سازی دارای بهترین عملکرد طی ماه‌های May و July با ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۱ است. این در حالی است که مدل طی اعتبارسنجی در ماه‌های May و August با ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۶ بهترین عملکرد خود را نشان داده است. مقایسه مقادیر  $R^2$  به دست آمده طی ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده در اواسط بازه زمانی مورد مطالعه به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک بوده ولی در ابتدا و انتهای بازه زمانی، عملکرد مدل کاهش می‌یابد؛ با این حال توانایی مدل همچنان در سطح قابل قبولی قرار دارد (نمودار ۳).

تغییرات روزانه مقادیر غلظت پیش‌بینی شده طی فرایند مدل‌سازی و اعتبارسنجی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح زمین در نمودار ۳ نشان داده شده است. در این نمودار مقادیر  $PM_{2.5}$  استفاده شده 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. با این حال، منحنی مقادیر پیش‌بینی شده طی فرایند مدل‌سازی دارای همخوانی بیشتری با منحنی حاصل از داده‌های

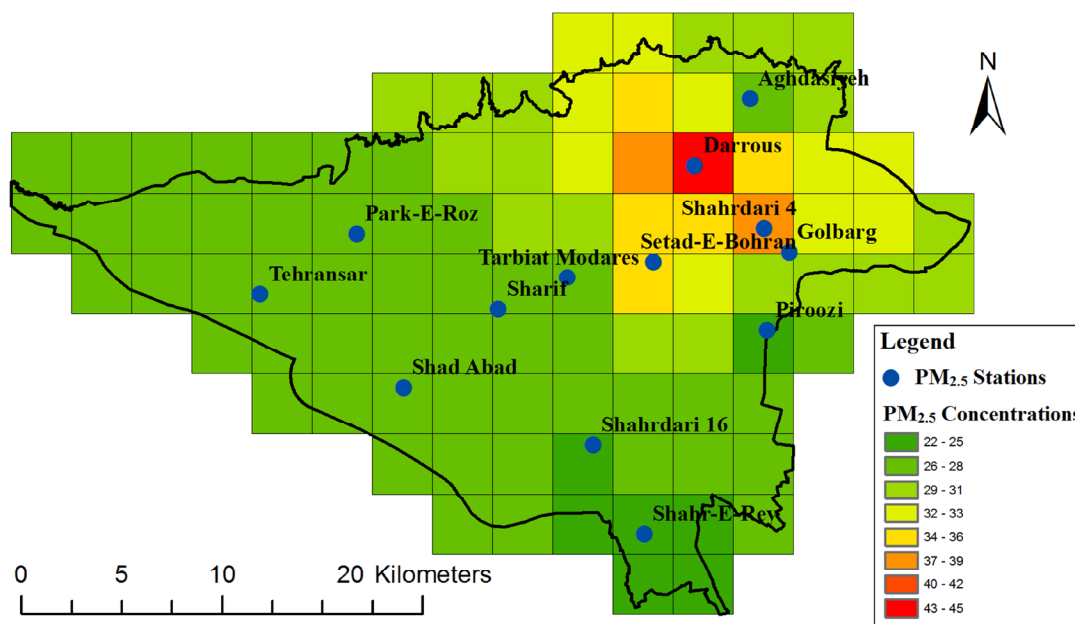


نمودار ۳- تغییرات روزانه  $PM_{2.5}$  اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده طی فرایند مدل‌سازی و اعتبارسنجی

### بحث

مقایسه پژوهش انجام شده با نتایج مطالعات پیشین بیانگر این موضوع است که یافته‌های این تحقیق و ضرایب تعیین حاصله میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، در سطح قابل قبولی نسبت به نتایج مطالعات انجام شده توسط سایرین بوده است (۸، ۱۶، ۱۹، ۲۱). لازم به ذکر است که داده‌های AOD

توزیع مکانی غلظت  $PM_{2.5}$  تخمین زده شده توسط مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. تخمین سالانه غلظت ذرات معلق در شهر تهران در بازه  $45-22 \mu g/m^3$  قرار دارد. مقادیر بالای غلظت پیش‌بینی شده مربوط به مناطق مرکزی و شمالی شهر تهران است که با مقادیر اندازه‌گیری شده نیز تطابق دارد.



شکل ۲- تغییرات مکانی غلظت PM<sub>2.5</sub> تخمین زده شده در سال ۲۰۱۳

است این عملکرد را طی اعتبارسنجی حفظ نموده و جهت تخمین مقادیر بالای PM<sub>2.5</sub> با مشکل مواجه شده است. لازم به ذکر است که منطقه مورد مطالعه در بازه‌های زمانی خاصی از سال در معرض طوفان‌های گردوغبار محلی و منطقه‌ای بوده و این امر عموماً سبب افزایش غلظت ذرات معلق شده و فرایند مدلسازی را با مشکل مواجه می‌سازد (۲۸، ۲۹). همچنین مشکلات مربوط به بازیابی AOD توسط سنجنده در محدوده مطالعاتی به دلیل وجود نواحی بیابانی و نیمه-بیابانی به جهت دارا بودن سطوح براق می‌تواند بر عملکرد مدل‌های آماری تاثیر بگذارد (۲۲، ۲۳). مطالعه مشابه در منطقه خاورمیانه نیز بیشترین مقدار R<sup>2</sup> برای PM<sub>10</sub> و PM<sub>2.5</sub> را به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۴۵ گزارش کرده است (۲۱)؛ که این امر نشان‌دهنده چالش برانگیز بودن رابطه PM-AOD برای منطقه خاورمیانه نسبت به سایر نقاط دنیا است. لذا به نظر می‌رسد مطالعات بیشتر در این زمینه به منظور بررسی رابطه مورد نظر برای محدوده مورد مطالعه در آینده مورد نیاز خواهد بود. بررسی تغییرات زمانی مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

استفاده شده در این تحقیق دارای وضوح مکانی ۳ km بوده و در سال ۲۰۱۴ توسط ناسا در اختیار محققین قرار گرفته است (۲۵) و مطالعات اندکی با استفاده از داده‌هایی با این وضوح مکانی تاکنون در دنیا صورت پذیرفته است (۲۶، ۲۷). اگرچه تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص رابطه موجود بین پارامترهای ماهواره‌ای و غلظت ذرات معلق در سطح زمین صورت پذیرفته است؛ اما مطالعه حاضر اولین پژوهش در این رابطه جهت پیش‌بینی غلظت PM<sub>2.5</sub> با استفاده از داده‌های AOD با وضوح مکانی ۳ km در ایران است.

بررسی رابطه PM<sub>2.5</sub>-AOD نشان می‌دهد که رابطه خطی تک متغیره ضعیف میان این دو متغیر می‌تواند با استفاده از مدل اثرات اختلاط خطی و همچنین بکارگیری پارامترهای کمکی به میزان قابل قبولی بهبود یابد؛ بگونه‌ای که میزان ضریب تعیین از ۰/۰۳ برای مدل خطی تک متغیره به ۰/۷۲ افزایش یافته است. با این حال عملکرد مدل نشان داده است که اگرچه مدل اثرات اختلاط خطی طی فرایند مدلسازی توانایی پیش‌بینی غلظت‌های بالای PM<sub>2.5</sub> را دارا است، اما مدل مذکور نتوانسته



توصیف ۷۲ درصد از تغییرات غلظت ذرات معلق در سطح زمین را دارا است. نتایج حاصله در دوره اعتبارسنجی نیز نشان داده است که ضریب تعیین میان مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در این دوره ۰/۵۷ است. تغییرات روزانه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده حاکی از آن است که توانایی مدل در پیش‌بینی روند تغییرات و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده، در سطح قابل قبولی قرار دارد. همچنین توزیع مکانی مقادیر پیش‌بینی شده غلظت ذرات معلق در سطح شهر تهران با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابق بوده و مناطق مرکزی، شمالی و شمال شرق جزء مناطق آلوده شهری مشخص شده‌اند. نقشه توزیع مکانی بدست آمده با وضعیت واقعی محدوده مطالعه و منابع تولید کننده آلودگی همخوانی داشته است.

از آنجایی که مدل آماری ارائه شده به پارامتر ماهواره‌ای و متغیرهای هواشناسی وابسته است، می‌تواند برای مناطقی در ایران که دارای وضعیت آب‌وهوایی و منابع آلاینده مشابه - کلانشهرهای واقع در مناطق نیمه کویری دارای شبکه حمل‌ونقل متراکم - هستند مورد استفاده قرار گیرد. در انتها می‌توان گفت که استفاده از تکنیک سنجش از دور می‌تواند به عنوان روشی سریع و اقتصادی جهت تخمین مقادیر غلظت ذرات معلق در سطح بکار گرفته شود؛ بخصوص برای مناطقی که دارای شبکه ایستگاه‌های پایش زمینی پراکنده هستند.

#### منابع

1. WHO. Air quality guidelines for Europe. Copenhagen: World Health Organization 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. Pope CA. Epidemiology of fine particulate air pol-

نیز نشان می‌دهد که مدل بدست آمده از توانایی بالایی جهت تخمین مقادیر غلظت در سطح برخوردار است. همچنین نتایج مربوط به توزیع مکانی مقادیر پیش‌بینی شده غلظت ذرات معلق در شهر تهران با شرایط کنونی این شهر مطابقت دارد؛ چراکه از یک سو باد غالب شهر تهران (غرب به شرق) سبب انتقال آلاینده‌های تولیدی از مناطق صنعتی در حاشیه غربی به درون محدوده شهر گردیده و از سوی دیگر شبکه حمل‌ونقل متراکم موجود - به ویژه در مرکز شهر - و وسایل نقلیه با کیفیت پایین موجب شده است تا بحران آلودگی هوا در مناطق مرکزی، شمالی و شمال شرقی شدت مضاعف یابد.

#### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر مدل اثرات اختلاط خطی به همراه پارامتر AOD بازیابی شده توسط ماهواره با وضوح مکانی ۳ km از مجموعه ۶ MODIS (C06) جهت پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در شهر تهران بکار گرفته شده است. همچنین پارامترهای هواشناسی به عنوان پارامترهای کمکی جهت بهبود عملکرد مدل در شکل نهایی مدل لحاظ شده‌اند. آنالیز حساسیت جامعی بر روی ترکیبات مختلف پارامترهای مورد استفاده در مدل انجام شد تا بهترین شکل مدل با بالاترین سطح عملکردی تعیین گردد. نتایج نشان داده است که مدل پیشنهادی توانایی

- lution and human health: Biologic mechanisms and who's at risk? *Environmental Health Perspectives*. 2000;108(Suppl 4):713-23.
6. 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. *JAMA*. 2006;295(10):1127-34.
7. Tian J, Chen D. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM 2.5) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2010;114(2):221-29.
8. Nordio F, Kloog I, Coull BA, Chudnovsky A, Gril-

- lo P, Bertazzi PA, et al. Estimating spatio-temporal resolved PM 10 aerosol mass concentrations using MODIS satellite data and land use regression over Lombardy, Italy. *Atmospheric Environment*. 2013;74:227-36.
9. Lee HJ, Coull BA, Bell ML, Koutrakis P. Use of satellite-based aerosol optical depth and spatial clustering to predict ambient PM<sub>2.5</sub> concentrations. *Environmental Research*. 2012;118:8-15.
10. Wang J, Christopher SA. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*. 2003;30(21):2095. doi:10.1029/2003GL018174.
11. Liu Y, Franklin M, Kahn R, Koutrakis P. Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2007;107(1):33-44.
12. Liu Y, Sarnat JA, Kilaru V, Jacob DJ, Koutrakis P. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> in the eastern United States using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology*. 2005;39(9):3269-78.
13. 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.
14. Shao P, Xin J, An J, Kong L, Wang B, Wang J, et al. The empirical relationship between PM<sub>2.5</sub> and AOD in Nanjing of the Yangtze River Delta. *Atmospheric Pollution Research*. 2017;8(2):233-43.
15. Kloog I, Nordio F, Coull BA, Schwartz J. Incorporating local land use regression and satellite aerosol optical depth in a hybrid model of spatiotemporal PM<sub>2.5</sub> exposures in the Mid-Atlantic states. *Environmental Science & Technology*. 2012;46(21):11913-21.
16. Lee H, Liu Y, Coull B, Schwartz J, Koutrakis P. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM<sub>2.5</sub> concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011;11(15): 7991-8002.
17. Meng X, Fu Q, Ma Z, Chen L, Zou B, Zhang Y, et al. Estimating ground-level PM<sub>10</sub> in a Chinese city by combining satellite data, meteorological information and a land use regression model. *Environmental Pollution*. 2016;208:177-84.
18. Zheng Y, Zhang Q, Liu Y, Geng G, He K. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations over three megalopolises in China using satellite-derived aerosol optical depth measurements. *Atmospheric Environment*. 2016;124:232-42.
19. Yap X, Hashim M. A robust calibration approach for PM<sub>10</sub> prediction from MODIS aerosol optical depth. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013;13(6):3517-26.
20. Hu X, Waller LA, Lyapustin A, Wang Y, Al-Hamdan MZ, Crosson WL, et al. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Southeastern United States using MAIAC AOD retrievals and a two-stage model. *Remote Sensing of Environment*. 2014;140:220-32.
21. 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.
22. 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.
23. 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):122-35.
24. 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.
25. Remer L, Mattoo S, Levy R, Munchak L. MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013;6(7):1829-44.
26. 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.

27. Xie Y, Wang Y, Zhang K, Dong W, Lv B, Bai Y. Daily estimation of ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations over Beijing using 3 km resolution MODIS AOD. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(20):12280-88.
28. 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(23):14018-34.
29. 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. Transaction C, Chemistry, Chemical Engineering*. 2016;23(6):2478-93.



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

Original Article



## Using linear mixed effect model to estimate ground-level $PM_{2.5}$ : case study for Tehran

S Sotoudeheian \*, M Arhami

Environmental Engineering and Water Resource Division, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 21 May 2017  
**Revised:** 12 August 2017  
**Accepted:** 16 August 2017  
**Published:** 20 September 2017

**Key words:**  $PM_{2.5}$ , Aerosol optical depth, MODIS, Linear mixed effect model

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

### ABSTRACT

**Background and Objective:** In the recent decade, critical condition of particulate matters (PMs) concentration is considered as one of the most important issues in Tehran megacity. Due to sparse spatial distribution of air quality monitoring stations and economic considerations, researchers proposed remote sensing technique as a fast and economical way to obtain complete spatial and temporal coverage of PM concentrations.

**Materials and Methods:** In this study, aerosol optical depth (AOD) retrieved by MODIS along with meteorological parameters were used to develop statistical linear mixed effect (LME) model and estimating ground-level  $PM_{2.5}$  concentrations. AOD data with a spatial resolution of 3 km from 13 monitoring stations and meteorological data from 5 synoptic stations were extracted over Tehran during 2013.

**Results:** The results showed that the proposed model was able to explain about 57%-72% of daily  $PM_{2.5}$  concentration variations. Temporal analysis of predicted  $PM_{2.5}$  concentrations could follow the curve trend which was obtained from the observed  $PM_{2.5}$  measurements with a reasonable level of accuracy. Best performance of the model was in May 2013 during a model-fitting and cross-validation practice. Also, the spatial distribution of the estimated  $PM_{2.5}$  concentrations was consistent with the measured values in the monitoring stations.

**Conclusion:** Based on the spatial distribution map of the estimated  $PM_{2.5}$ , central and northern parts of Tehran were the most polluted areas in the study region. The result showed that the LME model using the satellite-derived AOD and meteorological variables could provide an accurate prediction of ground-level  $PM_{2.5}$  concentrations.