

# برآورد غلظت ذرات معلق در سطح زمین با استفاده از روش سنجش از دور و پارامترهای هواشناسی (مطالعه‌ی موردی در تهران)

سبا قطبی\* (کارشناس ارشد)

سعید ستوده‌یان (دانشجوی دکتری)

محمد ارحامی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۷ (۱۳-۱۳)  
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۳، ص. ۱۸-۱۳

تعیین غلظت ذرات معلق (آلاینده‌ی تأثیرگذار) در کلان شهرها، نیازمند استفاده از ایستگاه‌های متعدد پایش است. استفاده از پارامترهای ماهواره‌ی با پوشش مکانی و زمانی کامل، جایگزین روش غیراقتصادی افزایش تعداد ایستگاه‌ها شده است. هدف از مطالعه‌ی حاضر یافتن مدلی جهت دستیابی رابطی موجود بین غلظت ذرات معلق با سائز کمتر از  $10^{\circ}$  میکرومتر و پارامتر عمق اپتیکی ذرات معلق به دست آمده از سنجنده‌های ماهواره‌ی است. مدل آثار اختلاط خطی جهت بیان رابطه‌ی استفاده‌شده و به منظور بهبود عملکرد مدل از پارامترهای هواشناسی استفاده شده است. پارامتر عمق اپتیکی ذرات معلق از سنجنده‌ی مودیس ( $20^{\circ}9$ ) استخراج شده است. مدل پیشنهادی،  $77\%$  از تغییرات غلظت ذرات معلق سطح را توصیف می‌کند ( $R = 0.78$ ). ضریب تعیین غلظت اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در اعتبارسنجی متقاطع  $0.61$  است ( $R = 0.78$ ). بهترین عملکرد مدل در فصل پاییز ( $RMSE = 15.4$ ) و ضعیف‌ترین عملکرد در فصل تابستان با ( $RMSE = 19.3$ ) بوده است. علی‌رغم کاهش دقت در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در تابستان، عملکرد کلی آن همچنان قابل اطمینان است.

saba.ghotbi@gmail.com  
saeed\_sotodian@yahoo.com  
arhami@sharif.edu

واژگان کلیدی: سنجش از دور،  $PM_{10}$ ، AOD، مدل آثار اختلاط، MODIS.

## ۱. مقدمه

امروزه به معضل آلودگی هوا به ویژه افزایش غلظت ذرات معلق ( $PM_{10}$ ) به عنوان یکی از آلاینده‌های معیار به دلیل آثار مخرب در سلامتی افراد بسیار توجه شده و موضوع مطالعات بسیاری قرار گرفته است. مطالعات مذکور نشان داده‌اند که وجود ذرات معلق به صورت مداوم و یا در دوره‌ی زمانی کوتاه در جو، رابطه‌ی مستقیمی با افزایش مشکلات مختلف سلامتی، از جمله: مشکلات تنفسی، بیماری‌های قلبی - عروقی، آسم و غیره دارد.<sup>[۱-۵]</sup> همچنین در برخی از مطالعات اپیدمیولوژیکی مشخص شده است که واکنش ذرات معلق با آلاینده‌های دیگر خصوصاً ترکیب آن‌ها با ازن، سبب تغییر ترکیب ذرات معلق می‌شود و ذراتی شدیداً سمی تولید می‌کند.<sup>[۶]</sup> لذا تعیین غلظت ذرات معلق در نقاط مختلف جهت ارائه‌ی راهکارهای کنترلی و راهبردهای مدیریتی امری ضروری است. از طرفی با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری غلظت در سطح زمین و همچنین غیراقتصادی بودن افزایش تعداد ایستگاه‌های سنجش در یک منطقه، شبکه‌ی اندازه‌گیری زمینی، پوشش مکانی

\* نویسنده مسؤل

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۹/۱، پذیرش ۱۳۹۵/۹/۱۵

DOI: 10.24200/J30.2018.1412

ذرات معلق در سطح دارد و نشان داده شد که مدل غیرخطی به دست آمده از سنجنده‌ی مسر، توانایی توصیف ۳۸٪ از تغییرات را دارد.<sup>[۱۳]</sup> در سال‌های اخیر با توجه به ضعف مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی در تخمین غلظت ذرات معلق در سطح زمین، به مدل آماری آثار اختلاط جهت پیش‌بینی غلظت بسیار توجه شده است. با وجود این، تاکنون مطالعه‌ی جامعی در زمینه‌ی ذکرشده در ایران انجام نشده است. از این رو در پژوهش حاضر به منظور بهبود رابطه‌ی موجود بین غلظت ذرات معلق در سطح و داده‌های خروجی از مودیس، مدل آماری آثار اختلاط که شامل پارامترهای هواشناسی (جهت تقویت رابطه‌ی موردنظر) نیز است، مطالعه و توانایی آن جهت پیش‌بینی غلظت ذرات در سطح ارزیابی شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. مشخصات منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، شهر تهران است که در محدوده‌ی ۵۱ الی ۵۱٫۷ در جهت طول جغرافیایی و ۳۵٫۵ الی ۳۶ در جهت عرض جغرافیایی قرار گرفته است. وجود ارتفاعات البرز در شمال تهران و کوه‌های محدودکننده در شرق شهر ری، مانع از خروج آلاینده‌های تولیدی شده و لذا معضل آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران را شدت بخشیده است.

### ۲.۲. داده‌ها

سنجنده‌ی مودیس بر روی دو ماهواره‌ی ترا<sup>۱۰</sup> و آکوا<sup>۱۱</sup> که در مدارهای تکمیل‌کننده‌ی یکدیگر در حرکت‌اند، نصب شده است. سنجنده‌ی مودیس با عرض دید ۲۳۳۰ کیلومتر، پوشش جهانی کاملی را در یک روز انجام می‌دهد،<sup>[۱۴]</sup> و قادر است در ۹ زاویه، تصاویر را در ۴ باند مختلف در هر زاویه تهیه کند. داده‌های AOD به دست آمده از سنجنده‌ی مودیس از بخش هوا<sup>۱۲</sup> و سطح ۲ که دقت مکانی بالایی (۳ km × ۳ km) دارد، استخراج شده است. در مطالعه‌ی حاضر، داده‌های مربوط به عمق اپتیکی ذرات معلق برای سال ۲۰۰۹ و بازه‌ی زمانی ۸:۳۰ الی ۱۰:۳۰ به وقت جهانی (۱۲ الی ۱۴ به وقت تهران) از سایت<sup>۱۳</sup> مربوط به پارامتر AOD تهیه شده است.

شکل ۱، جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری غلظت PM<sub>۱۰</sub> و ایستگاه‌های سینوپتیک در شهر تهران را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ی حاضر، داده‌های مربوط به غلظت ذرات معلق برای ۱۰ ایستگاه در سال ۲۰۰۹ از شرکت کنترل کیفیت هوا (AQCC)<sup>۱۴</sup> تهیه شده است. ایستگاه‌های مذکور در طول شبانه‌روز و به صورت ساعتی غلظت آلاینده‌های مختلف هوا، از جمله ذرات معلق را اندازه‌گیری می‌کنند. داده‌های غلظت مورد استفاده، مربوط به بازه‌ی زمانی مارچ الی نوامبر سال ۲۰۰۹ هستند. با توجه به زمان بازیابی داده‌های AOD توسط سنجنده، برای ذرات معلق از میانگین غلظت در بازه‌ی زمانی ۱۲ الی ۱۴ استفاده شده است. استخراج داده‌های مربوط به ذرات معلق نشان داده است که در طول بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، هر ایستگاه به طور متوسط برای ۲۷۵ روز از سال، داده‌های غلظت ثبت شده دارد.

با توجه به تأثیر پارامترهای هواشناسی در رابطه‌ی AOD - PM<sub>۱۰</sub>، پارامترهای جوی، از قبیل: رطوبت نسبی (RH)<sup>۱۵</sup>، دما و سرعت باد جهت اصلاح رابطه‌ی مذکور از سازمان هواشناسی شهر تهران تهیه شد. از آنجایی که ایستگاه‌های سینوپتیک،

در این راستا در سال ۲۰۰۳، رابطه‌ی خطی میان غلظت ساعتی ذرات معلق با قطر آبرودینامیکی کمتر از ۲٫۵ میکرومتر<sup>۲</sup> و AOD به دست آمده از مودیس برای ۷ ایستگاه در آلاباما بررسی شد و ضریب همبستگی ۰٫۷ به دست آمد. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی میان متوسط ماهانه‌ی غلظت و AOD، در حدود ۰٫۹ است.<sup>[۱۴]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۷، دو مدل رگرسیونی خطی چندمتغیره جهت تخمین غلظت PM<sub>۲٫۵</sub> با استفاده از داده‌های AOD بازیابی شده از سنجنده‌ی مودیس<sup>۴</sup> و مسر<sup>۵</sup> پیشنهاد شد و نتایج نشان داد که مدل‌های حاصل از سنجنده‌های مودیس و مسر به ترتیب توانایی توصیف ۵۱٪ و ۶۳٪ تغییرات موجود در غلظت PM<sub>۲٫۵</sub> را دارند.<sup>[۱۷]</sup>

در پژوهش دیگری نیز در همان سال، عملکرد مدل خطی PM-AOD با اضافه کردن متغیرهای کمکی به ویژه پارامترهای هواشناسی بهبود بخشیده شد و مدل پیشنهادی، توانایی توصیف ۷۶٪ از تغییرات موجود در غلظت ذرات معلق را داشت.<sup>[۱۸]</sup> همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۹، به بررسی میزان دقت در تخمین غلظت PM<sub>۲٫۵</sub> با استفاده از پارامتر AOD پرداخته و از پارامترهای هواشناسی و کاربری زمین در منطقه‌ی ماساچوست جهت بهبود عملکرد مدل استفاده شد و مدل توسعه داده شده توانایی توصیف ۷۹٪ تغییرات موجود در غلظت ذرات معلق را داشت.<sup>[۱۹]</sup>

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۰ نیز تلاش شد تا توانایی دو مدل رگرسیونی (خطی و نیمه‌تجربی غیرخطی) در پیش‌بینی غلظت PM<sub>۲٫۵</sub> بررسی شود و مدل نیمه‌تجربی ارائه شده، توانایی توصیف ۶۵٪ از تغییرات غلظت ذرات معلق در سطح را داشت که نسبت به مدل خطی، عملکرد مناسب‌تری نتیجه گرفته شد.<sup>[۷]</sup>

همچنین در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۱، با استفاده از مقادیر عمق اپتیکی ذرات معلق روزانه‌ی بازیابی شده و بهره‌گیری از مدل آثار اختلاط، غلظت ذرات معلق ۲٫۵ میکرومتری تخمین زده شده و مدل آماری ارائه شده، غلظت ذرات معلق در سطح را با ضریب تعیین قابل ملاحظه ( $R^2 = ۰٫۸۳$ ) و میانگین مربع نسبی خطای پایین (MRE)  $۶(۲٫۵)$  پیش‌بینی کرده است.<sup>[۲۰]</sup> در سال ۲۰۱۳ نیز با استفاده از پارامتر AOD به دست آمده از سنجنده‌ی مودیس، مدلی جهت تخمین غلظت ذرات معلق ارائه شد و مدل به دست آمده با ضریب تعیین، توانایی بالایی جهت تخمین غلظت ذرات معلق در سطح زمین داشت.<sup>[۲۱]</sup> همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۳، میزان غلظت ذرات معلق با قطر آبرودینامیکی کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر<sup>۲</sup> با استفاده از مدل خطی آثار اختلاط<sup>۸</sup> و عمق اپتیکی ذرات معلق استخراج شده از سنجنده‌ی مودیس در منطقه‌ی در شمال ایتالیا تخمین زده شد و نتایج نشان داد که مدل ارائه شده، ۷۸٪ از تغییرات غلظت ذرات معلق در منطقه را توصیف می‌کند.<sup>[۹]</sup> در سال ۲۰۱۴ نیز با افزایش دقت مکانی، پارامتر عمق اپتیکی ذرات معلق از ۱۰ کیلومتر به ۱ کیلومتر و همچنین استفاده از پارامترهای هواشناسی (میانگین روزانه)، مدلی جهت تخمین غلظت ذرات معلق ارائه شد که ضریب تعیین آن، ۶۷٪ در دوره‌ی اعتبارسنجی بود.<sup>[۱۰]</sup>

همچنین در مطالعه‌ی دیگری در شهر تهران (۲۰۰۷)، به بررسی رابطه‌ی خطی تک‌متغیره بین عمق اپتیکی ذرات معلق استخراج شده از مودیس و غلظت PM<sub>۱۰</sub> و همچنین غلظت کل ذرات معلق موجود در هوا<sup>۹</sup> پرداخته شد و نتایج نشان داد که ضریب همبستگی میان غلظت کل ذرات معلق و AOD در بازه‌ی ۰٫۸-۰٫۷ و میان غلظت PM<sub>۱۰</sub> و عمق اپتیکی ذرات معلق در بازه‌ی ۰٫۴-۰٫۳ است.<sup>[۲۲]</sup> در بررسی دو مدل رگرسیونی خطی و غیرخطی و استفاده از پارامتر عمق اپتیکی ذرات معلق به دست آمده از سنجنده‌های مودیس و مسر به همراه پارامترهای هواشناسی (۲۰۱۴) نشان داده شد که مدل غیرخطی، توانایی بالاتری جهت پیش‌بینی غلظت

که در آن، متغیر *predicted* مربوط به غلظت ذرات معلق پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار *observed* مربوط به غلظت اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های پایش است. مقدار ضریب تعیین، میزان همبستگی موجود بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقدار جذر میانگین مربعات نیز میزان خطای مدل در پیش‌بینی را گزارش می‌دهد. در واقع دو پارامتر آماری ذکر شده به همراه میزان توانایی مدل جهت تخمین غلظت ذرات معلق در سطح را مشخص می‌کنند. جهت مدل‌سازی از داده‌های اندازه‌گیری شده در ۱۰ ایستگاه سنجش آلودگی در سطح شهر تهران استفاده شده است. مدل آثار اختلاط جهت مدل‌سازی در یک روز خاص نیازمند دست‌کم ۲ زوج  $PM_{10} - AOD$  است؛ لذا روزهایی از سال که فقط یک ایستگاه برای پارامترهای مستقل در مدل داده دارد، از فرایند مدل‌سازی حذف می‌شوند. همچنین روزهایی که غلظت ذرات معلق آن‌ها خارج از بازه  $(+3\sigma - 3\sigma)$  نسبت به میانگین بودند، از مجموعه‌ی داده‌ها جدا و به صورت چشمی چک شدند. در صورت وجود عدم سازگاری فاحش بین زوج‌های جدا شده (غلظت بسیار بالای ذرات معلق متناظر با AOD بسیار پایین و برعکس)، زوج مورد نظر به عنوان داده‌ی پرت  $1^8$  محسوب و از مدل‌سازی حذف شده است. استخراج داده‌ها نشان داده است که از ۲۷۵ روزی که داده‌های غلظت ذرات معلق در اختیار بوده است، برای ۱۲۴ روز، مقدار کمی پارامتر ماهواره‌ی توسط سنجنده بازایی شده است؛ که از این تعداد فقط در حدود ۱۰ زوج  $PM_{10} - AOD$  (مربوط به ۶ روز) با توجه به محدودیت‌های اعمال شده حذف شده‌اند. در نتیجه از داده‌های مربوط به ۱۱۸ روز جهت برازش مدل نهایی استفاده شده است. لازم به ذکر است که کلیه‌ی مراحل مربوط به آنالیزهای آماری و توسعه‌ی مدل‌ها در نرم‌افزار *R* صورت گرفته است.

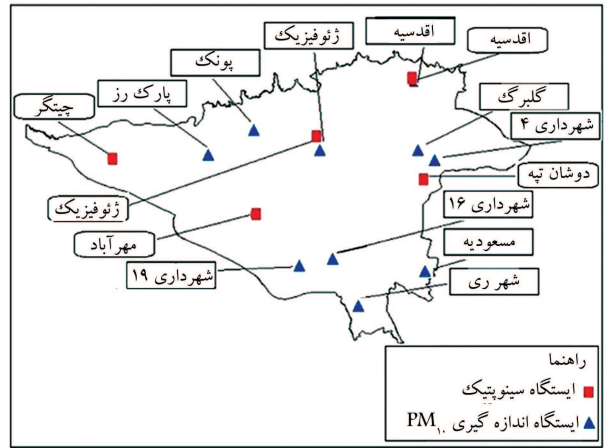
#### ۴.۲. اعتبارسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی مدل از روش اعتبارسنجی متقاطع  $(CV)^{19}$  استفاده شده است. این روش مانع از برآورد خوش‌بینانه‌ی  $2^0$  مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مدل می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر از میان ۱۰ ایستگاه، ۹ ایستگاه جهت مدل‌سازی انتخاب و از داده‌های مربوط به ایستگاه آخر جهت اعتبارسنجی استفاده شده است. با استفاده از مدل برازش داده‌شده‌ی نهایی، غلظت ذرات معلق برای ایستگاه کنار گذاشته شده، پیش‌بینی و مقدار ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا مربوط به آن جهت ارزیابی عملکرد مدل محاسبه شده است. پیش‌بینی مذکور برای هر ایستگاه به صورت جداگانه انجام شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. توصیف داده‌ها

جهت تعیین خصوصیات روزهایی که عمق اپتیکی ذرات معلق برای آن روزها قابل بازایی توسط سنجنده بوده است، آنالیز آماری به منظور بررسی فراوانی پارامترهای هواشناسی مختلف صورت پذیرفته است. مقدار متوسط روزانه‌ی دما، رطوبت نسبی، و سرعت باد مربوط به روزهای دارای داده‌ی AOD به ترتیب  $(28 \pm 6, 2)(c^0)$ ،  $(20 \pm 8, 1)(\%)$  و  $(7, 2 \pm 3, 4)(m/s)$  بوده است. این مقادیر برای روزهایی که سنجنده موفق به بازایی عمق اپتیکی ذرات معلق نشده است، عبارت‌اند از:  $(22 \pm 8, 5)(c^0)$ ،  $(2, 2 \pm 1, 5)(\%)$  و  $(7, 8 \pm 3, 7)(m/s)$ . با مقایسه‌ی مقادیر متوسط پارامترها در دو حالت ذکر شده مشاهده می‌شود که روزهای دارای AOD، متناظر با روزهای با رطوبت نسبی و سرعت باد پایین و دمای بالا هستند.



شکل ۱. نقشه‌ی توزیع مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک و اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق در شهر تهران.

پارامترهای هواشناسی را هر ۳ ساعت یک بار اندازه‌گیری می‌کنند؛ در مطالعه‌ی حاضر از میانگین داده‌های جوی برای دو ساعت ۱۲ و ۱۵ جهت اصلاح مدل‌های آماری استفاده شده است.

#### ۳.۲. توسعه‌ی مدل

با توجه به ارائه‌ی مدل آثار اختلاط خطی در مطالعات اخیر، در مطالعه‌ی حاضر جهت دستیابی به عملکردی مطلوب در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در سطح زمین، از مدل مذکور استفاده شده است. مدل آثار اختلاط خطی توسعه داده شده در پژوهش حاضر در معادله‌ی ۱ ارائه شده است:

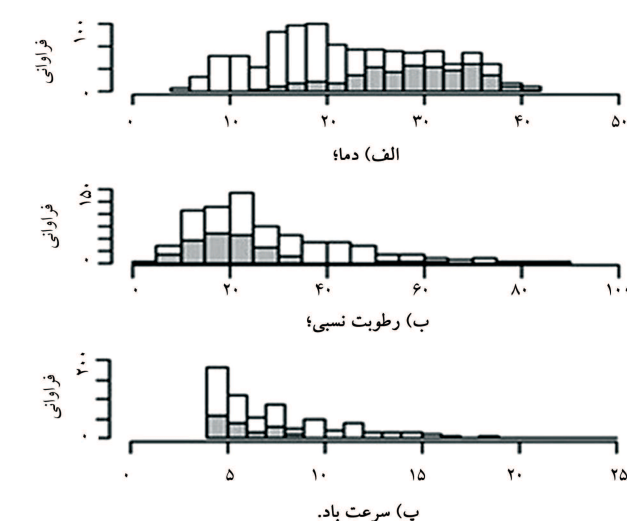
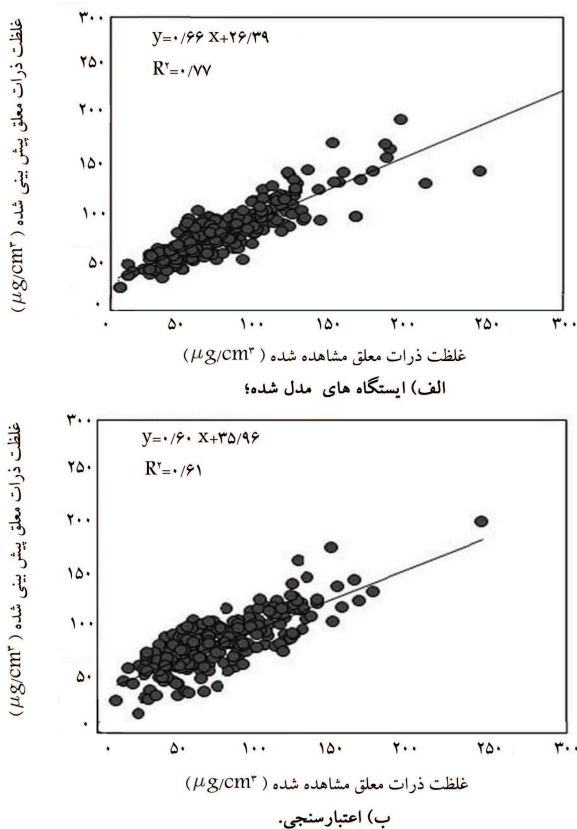
$$PM_{ij} = (\alpha + U_j) + \beta \times Temp_{ij} + V_j \times AOD_{ij} + W_j \times RH_{ij} + \varepsilon_{ij}, U_j \sim N(0, D1), V_j \sim N(0, D2), W_j \sim N(0, D3) \quad (1)$$

که در آن،  $pm_{ij}$  غلظت  $PM_{10}$  در سایت  $i$  و روز  $j$ ام،  $Temp_{ij}$ ،  $AOD_{ij}$ ،  $RH_{ij}$  به ترتیب دما، مقدار عمق اپتیکی ذرات معلق و رطوبت نسبی در سایت  $i$  و روز  $j$ ام است.  $\alpha$  و  $U_j$  به ترتیب عرض از مبدأ ثابت و رندم،  $\beta$  شیب ثابت و  $V_j$  و  $W_j$  شیب رندم پارامتر مورد نظر هستند. در رابطه‌ی مذکور  $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ ، عبارت خطا در سایت  $i$  و روز  $j$ ام است. ضرایب ثابت، معرف مقادیر متوسط در طول دوره‌ی مطالعه هستند؛ در حالی که ضرایب رندم تأثیر تغییرات روزانه‌ی پارامترها در رابطه‌ی  $PM_{10} - AOD$  را نشان می‌دهند. پس از مشخص شدن ضرایب ثابت و رندم و تعیین شکل نهایی مدل، جهت اعتبارسنجی و بررسی عملکرد آن از ضریب تعیین  $(R^2)^{16}$  و جذر میانگین مربعات خطا  $(RMSE)^{17}$  استفاده شده است که به ترتیب در معادله‌های ۲ و ۳ ارائه شده است:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_i [\hat{y}_i - \bar{y}_i] \times (y_i - \bar{y}_i)}{(\sum_i [(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \times (y_i - \bar{y}_i)^2])^{0.5}} \right)^2 \quad (2)$$

که در آن،  $y_i$  و  $\bar{y}_i$ ، به ترتیب مقادیر  $PM_{10}$  اندازه‌گیری شده و میانگین  $PM_{10}$  اندازه‌گیری شده و متغیرهای  $\hat{y}_i$  و  $\bar{\hat{y}}$  معرف غلظت و میانگین غلظت  $PM_{10}$  پیش‌بینی شده هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (predicted_i - observed_i)^2}{n}} \quad (3)$$



شکل ۲. هیستوگرام متغیرهای جوی برای روزهای با وجود عمق اپتیکی ذرات مععلق (توپر) و بدون عمق اپتیکی ذرات مععلق (توخالی).

این موضوع در شکل ۲ که نمودار هیستوگرام متغیرهای جوی در دو حالت را نشان می‌دهد، قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که میانگین غلظت ذرات مععلق برای ۱۰ ایستگاه منتخب  $77.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $SD = 33.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) است.

### ۲.۳. پیش‌بینی مدل

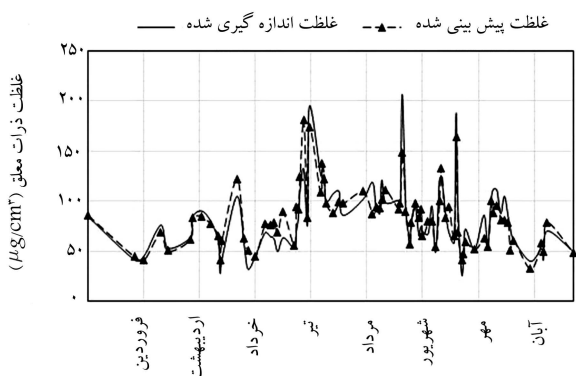
نتایج حاصل نشان می‌دهد که در مدل پیشنهادی، پارامترهای استفاده شده، سطح معناداری قابل قبولی دارند ( $p < 0.05$ ) که این امر استفاده از پارامترهای مذکور در مدل را جهت پیش‌بینی غلظت ذرات مععلق در سطح توجیه می‌کند. نتایج مربوط به عملکرد مدل آثار اختلاط در تخمین غلظت ذرات مععلق برای دو حالت مدل‌سازی و اعتبارسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل توسعه داده شده توانایی توصیف ۷۷٪ تغییرات موجود در غلظت ذرات مععلق در سطح را دارد ( $RMSE = 16.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $R = 0.88$  و  $R^2 = 0.77$ ). همچنین ضریب تعیین مدل برای بازه زمانی موردنظر طی فرایند اعتبارسنجی ۰/۶۱ تعیین شده است ( $RMSE = 18.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  و  $R = 0.78$ ,  $R^2 = 0.61$ ).

با توجه به اینکه بیش از ۹۰٪ داده‌های ماهواره‌ای در یک سال مربوط به فصل‌های بهار، تابستان و پاییز هستند، عملکرد مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی غلظت ذرات مععلق طی فصول ذکر شده قابل تعیین و مقایسه است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مدل توسعه داده شده، توانایی بالاتری جهت تخمین غلظت ذرات مععلق در دو فصل بهار و پاییز نسبت به فصل تابستان دارد. مدل پیشنهادی بهترین عملکرد را در فصل پاییز با  $RMSE = 15.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  دارد که این مقدار برای فصل تابستان به  $19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  می‌رسد. البته با وجود کاهش دقت مدل در پیش‌بینی غلظت ذرات مععلق در فصل تابستان، همچنان عملکرد مدل در پیش‌بینی غلظت ذرات مععلق در سطح قابل اطمینان و مناسب است.

### ۴. نتیجه‌گیری

استفاده از روش سنجش از دور با پوشش مکانی و زمانی نسبتاً بالا و هزینه‌ی پایین نسبت به پایش‌های زمینی، روشی مناسب جهت تخمین غلظت ذرات مععلق در

شکل ۳. نمودار غلظت ذرات مععلق پیش‌بینی شده توسط مدل در مقابل غلظت مشاهده شده.



شکل ۴. تغییرات غلظت ذرات مععلق مشاهده شده و پیش‌بینی شده در سال ۲۰۰۹.

سطح را در اختیار پژوهشگران قرار داده است. در مطالعه‌ی حاضر از داده‌های عمق اپتیکی ذرات مععلق به دست آمده از سنجنده‌ی مودیس و پارامترهای هواشناسی به همراه مدل آثار اختلاط خطی جهت پیش‌بینی غلظت ذرات مععلق در شهر تهران استفاده شده است. مطالعات پیشین نشان داده است که مدل آثار اختلاط نسبت به رگرسیون خطی و غیرخطی، توانایی بالاتری در توصیف تغییرات موجود در غلظت ذرات مععلق دارد.<sup>[۱۰،۱۱]</sup> شکل‌های مختلف مدل بر مجموعه‌ی داده‌های جمع‌آوری شده شامل AOD و پارامترهای هواشناسی برازش داده شد و تأثیر متغیرهای مختلف در عملکرد مدل ارزیابی شد. آنالیز حساسیت انجام شده بر روی ترکیبات مختلف پارامترهای مورداستفاده در مدل حاکی از آن است که دو پارامتر دما و رطوبت نسبی در بهبود عملکرد مدل، نقش مؤثرتری دارند. همچنین نتایج نشان داده است

بهرتر عملکرد، این اعتبارسنجی برای یک دوره زمانی نیز انجام شود. با توجه به مطالعات اندک انجام شده در بحث استفاده از مدل های آماری جهت پیش بینی غلظت ذرات معلق در سطح با بهره گیری از داده های ماهواره ای، استفاده از پارامتر AOD با وضوح مکانی مناسب تر نسبت به مطالعات قبلی، مدلی کاربردی جهت تخمین غلظت در شهر تهران را نتیجه داده است. با توجه به بهره گیری مدل مذکور از پارامترهای هواشناسی و AOD، این مدل برای مناطقی در ایران که شرایط آب و هوایی و منابع آلاینده های مشابه دارند (برای مثال کلان شهرهایی که آب و هوای نیمه خشک و شبکه ای متراکم حمل و نقل دارند) نیز قابل استفاده است. نتایج نشان داده است که روش سنجش از دور می تواند به عنوان روشی اقتصادی و سریع جهت تخمین غلظت ذرات معلق استفاده شود.

که پارامتر رطوبت نسبی با توجه به تغییرات روزانه آن، همانند پارامتر عمق اپتیکی ذرات معلق باید به عنوان متغیر رندم مؤثر، در مدل نهایی استفاده شود. ضریب تعیین محاسبه شده بین مقادیر غلظت پیش بینی شده و اندازه گیری شده طی فرایند مدل سازی ۷۷٪، برآورد شده است، که نشان دهنده ی برازش قابل قبول بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده است. نتایج اعتبارسنجی متقاطع مدل توسعه داده شده نیز نشان می دهد که مدل حاصل، توانایی توصیف ۶۱٪ از تغییرات موجود در غلظت ذرات معلق در ایستگاه های پایش را دارد. بررسی فصلی مقادیر پیش بینی شده ی غلظت نشان داده است که مدل پیشنهادی، بهترین عملکرد را در فصل پاییز دارد ( $RMSE = 15.40 \mu g/m^3$ ). البته با توجه به اینکه در اعتبارسنجی مکانی در هر مرحله یک سایت خارج از مدل سازی قرار می گیرد، بهتر است برای بررسی

## پانویس ها

1. particulate matter
2. aerosol optical depth
3.  $PM_{1.5}$
4. MODIS
5. MISR
6. mean relative error
7.  $PM_{1.0}$
8. linear mixed effect model
9. total suspended particles
10. Terra
11. Aqua
12. atmosphere
13. <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>
14. air quality control company
15. relative humidity
16. coefficient of determination
17. root mean square error
18. outlier
19. cross validation
20. overestimation

## منابع (References)

1. Arhami, M., Minguillon, M.C., Polidori, A., Schauer, J.J., Delfino, R.J. and Sioutas, C. "Organic compound characterization and source apportionment of indoor and outdoor quasi-ultrafine particulate matter in retirement homes of the Los Angeles Basin", *Indoor Air*, **20**(1), pp. 17-30 (2000).
2. Pope, C.A., Dockery, D.W. and Schwartz, J. "Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution", *Inhalation Toxicology*, **7**(1), pp. 1-18 (1995).
3. Ntziachristos, L., Froines, J.R., Cho, A.K. and Sioutas, C. "Relationship between redox activity and chemical speciation of size-fractionated particulate matter", *Particle and Fibre Toxicology*, **4**(1), pp. 1 (2007).
4. Gauderman, W.J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., McConnell, R., Kuenzli, N., Lurmann, F., Rappaport, E., Margolis, H., Bates, D. and Peters, J. "The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age", *New England Journal of Medicine*, **351**(11), pp. 1057-1067 (2004).
5. Dominici, F., Peng, R.D., Bell, M.L., Pham, L., McDermottm A., Zeger, S.L. and Samet, J.M. "Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases", *Jama*, **295**(10), pp. 1127-1134 (2006).
6. Flagan, R.C. and Seinfeld, J.H. "Fundamentals of air pollution engineering", *Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall*, **xiii**, 542 p. (1988).
7. Tian, J. and 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*, **114**(2), pp. 221-229 (2010).
8. Lee, H.J., Coull, B.A., Bell, M.L. and Koutrakis, P. "Use of satellite-based aerosol optical depth and spatial clustering to predict ambient PM 2.5 concentrations", *Environmental Research*, **118**, pp. 8-15 (2012).
9. Nordio, F., Kloog, I., Coull, B.A., Chundovsky, A., Grillo, P., Bertazzi, P.A., Baccarelli, A.A. and Schuartz, J. "Estimating spatio-temporal resolved PM 10 aerosol mass concentrations using MODIS satellite data and land use regression over Lombardy, Italy", *Atmospheric Environment*, **74**, pp. 227-236 (2013).
10. Hu, X., Waller, L.A., Lyapustin, A., Wang, Y., Al-Hamdan, M.Z., Crosson, W.L., Estes Jr., M.G., Estes, S.M., Quattrochi, D.A., Puttaswamy, S.J. and Liu, Y. "Estimating ground-level PM 2.5 concentrations in the Southeastern United States using MAIAC AOD retrievals and a two-stage model", *Remote Sensing of Environment*, **140**, pp. 220-232 (2014).
11. Zhang, Y. and Li, Z. "Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM 2.5) mass concentration near

- the ground from satellite observation”, *Remote Sensing of Environment*, **160**, pp. 252-262 (2015).
12. Liu, G.-R., Chen., A.J., Lin, T.-H. and Kuo, T.-H. “Applying SPOT data to estimate the aerosol optical depth and air quality”, *Environmental Modelling & Software*, **17**(1), pp. 3-9 (2002).
  13. Vladutescu, V., Holloman, C.H., Coutant, B.W. and Hoff, R.M. “Aerosol layer properties and their effect on optical depth relations to PM<sub>2.5</sub> concentrations”, In IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE (2008).
  14. Wang, J. and Christopher, S.A. “Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies”, *Geophysical Research Letters*, **30**(21), pp.1-4 (2003).
  15. Engel-Cox, J.A., Holloman, C.H., Coutant, B.W. and Hoff, R.M. “Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality”, *Atmospheric Environment*, **38**(16), pp. 2495-2509 (2004).
  16. You, W., Zang, Z., Pan, X., Zhang, L. and 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*, **505**, pp. 1156-1165 (2015).
  17. Liu, Y., Franklin, M., Kahn, R. and 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*, **107**(1-2), pp. 33-44 (2007).
  18. Pelletier, B., Santer, R. and Vidot, J. “Retrieving of particulate matter from optical measurements: A semiparametric approach”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112**(D6), pp. (2007).
  19. Liu, Y., Paciorek, C.J. and Koutrakis, P. “Estimating regional spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub> concentrations using satellite data, meteorology, and land use information”, *Environmental Health Perspective*, **117**(6), pp. 886-892 (2009).
  20. Lee, H., Liu, Y., Coull, B.A. and Koutrakis, P. “A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM<sub>2.5</sub> concentrations”, *Atmos. Chem. Phys*, **11**(15), pp. 7991-8002 (2011).
  21. Yap, X. and Hashim, M. “A robust calibration approach for PM<sub>10</sub> prediction from MODIS aerosol optical depth”, *Atmos. Chem. Phys*, **13**(6), pp. 3517-3526 (2013).
  22. Torkian, A., Amid, F. and Keshavarzi, H. “The application of MODIS satellite remote sensing in estimation of particulate urban air pollution”, In *Proceeding 100th AWMA Conference Pittsburg* (2007).
  23. Sotoudeheian, S. and Arhami, M. “Estimating ground-level PM<sub>10</sub> using satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements over Tehran”, *J. Environ. Health Sci. Eng.*, **12**(1), pp. 122 (2014).