



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۲ | اسفند ۱۴۰۰ (ص ۲۹۸۳-۲۹۶۷)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.330907.669082>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Assessment of MODIS Data in Monitoring the Concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ Pollutants with Emphasis on Meteorological Variables

SABA HOSEINI TABESH¹, ZAHRA AGHASHARIATMADARI^{1*}, SOMAYEH HEJABI²

1. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received: Sep. 19, 2021- Revised: Dec. 12, 2021- Accepted: Jan. 10, 2022)

ABSTRACT

In this study, the function of the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor to estimate the concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants in Tehran was assessed by using the data obtained from this sensor. In this study, linear and non-linear models for estimating the concentration of aerosols were presented in six meteorological and ground pollution monitoring stations in Tehran province. The results of the models were compared to the ground station observations by using statistical tests and the most appropriate model was elected from the regressions. The developed model (based on aerosol optical depth which was extracted from MOD04-L2 products of TERRA satellite MODIS sensor), 24-hour precipitation, average water vapor pressure, and sunshine) showed high accuracy, very low RMSE, and rather high R² in Tehran province (R² = 0.75 and RMSE= 7.47 ug / m³) and stations. In this model, PM_{2.5} concentration and sunshine hours have a negative correlation, also the positive relationship to other variables is observed. The results demonstrated that utilizing meteorological variables and attention to the prevailing atmospheric phenomena enhance the performance of MODIS sensor data in estimating PM_{2.5} pollutant concentration. Undesirable as MODIS sensor data might be in terms of certainty and accuracy, they are undoubtedly beneficial considering elimination defect of ground-based pollution monitoring stations in estimating aerosols concentration and complement each other suitably.

Keywords: PM_{2.5}, PM₁₀, MODIS Sensor, Meteorological Variables, Aerosol Depth of Atmosphere.

ارزیابی داده‌های سنجنده مودیس (MODIS) در پایش غلظت آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ با تأکید بر متغیرهای هواشناسی

صبا حسینی تابش^۱، زهرا آقاشریعتمداری^{۱*}، سمیه حجابی^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۹/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از سنجنده مودیس (MODIS) به ارزیابی توانایی داده‌های این سنجنده در برآورد غلظت آلاینده‌های PM_{10} و $PM_{2.5}$ در شهر تهران پرداخته شد. برای این منظور از داده‌های شش ایستگاه هواشناسی و آلودگی سنجی زمینی استفاده شد و مدل‌های خطی و غیرخطی برآورد غلظت هواویزها ارائه شد. متغیرهای این مدل‌ها شامل متغیرهای هواشناسی و عمق نوری هواویزها (AOD) مستخرج از محصولات MOD04-L2 سنجنده مودیس ماهواره ترا (TERRA) است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد مدل رگرسیون خطی که شامل متغیرهای عمق نوری هواویزها، بارش ۲۴ ساعته، میانگین فشار بخار آب و ساعت آفتابی است، در مقیاس کل شهر تهران $R^2=0.75$ و $7/47 \text{ ug/m}^3$ (RMSE=) و ایستگاه‌ها مناسب‌ترین مدل در مقایسه با بقیه مدل‌های به‌دست آمده است. در این مدل غلظت $PM_{2.5}$ با ساعت آفتابی رابطه عکس و با بقیه متغیرها رابطه مستقیم دارد. نتایج نشان داد استفاده از متغیرهای هواشناسی و توجه به پدیده‌های جوی موجب بهبود عملکرد داده‌های سنجنده مودیس در برآورد غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ می‌شود و مدل ارائه شده می‌تواند مکمل مناسبی برای ایستگاه‌های زمینی پایش آلودگی هوا در برآورد غلظت هواویزها باشد و نواقص آن‌ها تا حد زیادی برطرف سازد.

واژه‌های کلیدی: PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، سنجنده مودیس، متغیرهای هواشناسی، عمق نوری هواویزها، شهر تهران

مقدمه

بر این فعالیت‌های کشاورزی همان‌طور که از آلاینده‌های موجود آسیب می‌بیند، موجب تولید هواویزها نیز می‌شوند. باتوجه‌به تأثیر سوء آلاینده‌ها و استانداردهای موجود وضع شده، غلظت این گروه از آلاینده‌ها در محیط بایستی از نظر زمانی و مکانی به‌صورت پیوسته مورد پایش قرار گیرد (Holben *et al.*, 2001; Bilal *et al.*, 2017). نخستین و مهم‌ترین اقدام در راستای کنترل آلودگی و بهبود کیفیت هوا، دسترسی به اطلاعات صحیح و به‌روز درباره این مسئله است. روش سنتی کسب اطلاعات مربوط به این ذرات، استفاده از ایستگاه‌های آلودگی سنجی زمینی است که اغلب در شهرهای بزرگ تأسیس شده‌اند، لذا اطلاعاتی که ارائه می‌کنند با محدودیت مکانی و زمانی روبه‌رو هستند (Bilal *et al.*, 2016; Adams *et al.*, 2017). تأسیس و نگهداری ایستگاه‌های زمینی هزینه بالایی دارد؛ لذا تعداد این ایستگاه‌ها به‌ویژه در مناطق غیرشهری که بخش اعظم هر کشور را تشکیل می‌دهد، محدود است. علاوه بر این ذرات هواویز ممکن است با صعود به

هواویزها به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده هوا در سال‌های اخیر شناخته شده است. در یک تعریف ساده هواویزها ترکیبی از ذرات معلق جامد و مایعی هستند که در هوا موجودند؛ اندازه آن‌ها بین ۲/۵ تا ۱۰ میکرومتر است که PM_{10} ها از شناخته‌شده‌ترین هواویزها هستند که بانفوذ به عمق سیستم تنفسی انسان‌ها موجب بیماری‌های قلبی تنفسی بسیاری می‌گردند. باتوجه‌به موارد فوق، آلودگی هوا می‌تواند در بلندمدت هزینه‌های گزاف مالی و جانی را به جوامع بشری تحمیل کند، لذا اولویت بخشیدن به آن در سیاست‌گذاری‌های کلان دولت‌ها الزامی به نظر می‌رسد (Walton *et al.*, 2015). وجود این آلاینده‌ها به کشاورزی آسیب قابل توجهی می‌زند به‌طوری‌که مطالعات نشان دادند وجود ذرات $PM_{2.5}$ بر متوسط بازده گندم و ذرت تأثیر داشته و امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد (Cao *et al.*, 2015). این ذرات با بازتاب نور خورشید، مانع از جذب آن توسط گیاهان شده و در نتیجه میزان فتوسنتز و تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهند. علاوه

* نویسنده مسئول: zaghera@ut.ac.ir

طبقات بالای جو از دسترس پایش توسط ایستگاه‌های مذکور خارج شوند.

باتوجه به محدودیت‌های کمتر مکانی و زمانی اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و قابلیت پایش ذرات در طبقات بالای جو، سنجنش‌ازدور پتانسیل بالایی جهت فائق آمدن بر چنین محدودیت‌هایی را دارد و می‌تواند معایب و کاستی‌های اندازه‌گیری‌های زمینی را برطرف کند لذا در صورت دسترسی به امکانات ماهواره‌ای موردنظر برای هر آلاینده، سنجنش آلودگی هوا با این روش بسیار به‌روزتر، و مقرون‌به‌صرفه‌تر خواهد بود (Qorbani Salkhord *et al.*, 2012; Al-Saadi *et al.*, 2005; Gupta *et al.*, 2006).

یکی از سنجنده‌های پرکاربرد در این زمینه، سنجنده مودیس^۱ MODIS مستقر بر ماهواره‌های آکوا (AQUA) و ترا (TERRA) است. عمق نوری هواویزها^۲ AOD یکی از قابل‌دسترس‌ترین و مهم‌ترین داده‌های موجود برای استفاده در مدل‌های پیش‌بینی PM_{2.5} و PM₁₀ است (Clarke *et al.*, 2001 and Holben *et al.*, 2001). مطالعات بسیاری نشان داده است که AOD حاصل از تصاویر ماهواره‌ای پتانسیل لازم برای تعیین توزیع مکانی PM_{2.5} را دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای (Cao *et al.*, 2015) و (Asl *et al.*, 2019) اشاره نمود. همچنین باتوجه به نقطه‌ای بودن اطلاعات ایستگاه‌های زمینی، وسعت پوشش مکانی اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای در ترکیب با مدل‌های زمینی می‌تواند جهت تعیین شاخص کیفیت هوا با هزینه کمتر مفید باشند.

درحوزه‌ی مطالعات هواشناسی برآورد غلظت PM_{2.5} با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر بیشتر به آن پرداخته شده است. مطالعات دانشمندان در مناطق مختلف جهان نشان داده است AOD نماینده معتبری برای تخمین غلظت هواویزها است به‌طوری‌که همبستگی قوی بین PM_{2.5} و PM₁₀ با AOD (ضریب تبیین بین ۰/۴ تا ۰/۹ و $RMSE < 71/75 \mu g/m^3 < 22/26$) در مقیاس منطقه‌ای وجود دارد اما در مقیاس جهانی کاربردی ندارد زیرا همبستگی در میان آن‌ها ضعیف است.

هواویزها یکی از بزرگ‌ترین منابع عدم قطعیت مدل‌سازی اقلیمی می‌باشند بنابراین برای بهبود مدل‌سازی این آلاینده‌ها اطلاعات تکمیلی دیگری مانند متغیرهای هواشناسی باید وجود داشته باشد. متغیرهای مختلفی مانند رطوبت نسبی، ارتفاع لایه مرزی و دما برای بهبود عملکرد این‌گونه مدل‌ها پیشنهاد شده است (Rangzan *et al.*, 2014; Paciorek and Liu., 2009)؛

Hadjimitsis *et al.*, 2004؛ Lee *et al.*, 2016؛ Tian and Chen (2010) و Tsai (2011) ارائه شدند که میزان همبستگی آن‌ها برای ماهواره ترا به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۹۵ است. آن‌ها همچنین نشان دادند همبستگی در فصول سرد سال بیشتر از فصول گرم است. Lin *et al.* (2015) نیز با بررسی داده‌های ایستگاه‌های زمینی کنترل کیفیت هوا در چین به این نتیجه رسیدند که همبستگی بین PM_{2.5} و AOD در مقیاس سالانه و ماهانه به ترتیب ۰/۹ و ۰/۷۶ است.

ازجمله مطالعات مشابه در این زمینه می‌توان به پژوهش Lee *et al.*, (2016) اشاره کرد که به کمک الگوریتم Deep Blue در کالیفرنیا مدلی با همبستگی $R^2 = 0.66$ برای برآورد غلظت PM_{2.5} ارائه کردند. همچنین You *et al.*, (2016) در چین، یک مدل رگرسیونی وزنی را بر پایه اطلاعات ماهواره‌ای (AOD) برای تخمین غلظت PM_{2.5} توسعه دادند که همبستگی بالایی بین این دو وجود دارد ($R^2 = 0.76$ و $RMSE = 22/26 \mu g/m^3$). بنابراین این روش برای تخمین غلظت PM_{2.5} ها پیشنهاد می‌شود.

عملکرد رگرسیون خطی چندگانه در برآورد غلظت هواویزها در مطالعات متعددی بررسی شده است به‌طوری‌که مدل پیشنهادی (Sotoudehian and Arhami (2017) با تفکیک مکانی سه کیلومتر برای تخمین غلظت PM_{2.5} در تهران دارای ضریب همبستگی در بازه ۰/۷۲-۰/۵۷ است. همچنین Faraji *et al.*, (2018) در روشی مشابه با تفکیک مکانی یک کیلومتر در اصفهان، مدلی چندمتغیره با ضریب تبیین ۰/۶۸ ارائه کرد. در هند نیز (Chelani (2019) و (Sathe *et al.*, (2019) به روش مشابه مدلی با کمترین $RMSE = 71/75 \mu g/m^3$ و $MAPE = 7.42/5$ و بیشترین $R^2 = 0.64$ ارائه کردند و نتایج آن‌ها نشان داد به‌طور کلی هواشناسی ظرفیت آن را دارد که عملکرد رگرسیون چندگانه را در تخمین غلظت PM_{2.5} بهبود بخشد.

در مطالعات مشابهی که در شهر تهران صورت‌گرفته به‌ندرت نقش متغیرهای هواشناسی در نظر گرفته شده است. برتری این پژوهش در انتخاب مناسب‌ترین ترکیب از متغیرهای هواشناسی باهدف ارائه مدلی محلی با نتایج بهتر نسبت به مطالعات گذشته برای پایش هواویزها است که در این راستا کارایی سنجنده مودیس ارزیابی می‌گردد. همچنین به تبیین نقش متغیرهای هواشناسی تأثیرگذار و درک ارتباط بین متغیرها و توجیه فیزیکی پدیده‌های تأثیرگذار پرداخته شده است. نتایج

درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی، در جنوب رشته‌کوه‌های البرز و در حفاصل منطقه کوهستانی و دشت قرار گرفته است. در این پژوهش ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک شمیران، ژئوفیزیک، فرودگاه مهرآباد و ایستگاه‌های آلودگی سنجی اقدسیه، تربیت مدرس، میدان فتح به‌عنوان ایستگاه‌های مطالعاتی انتخاب شده و بررسی‌ها از مرحله کنترل کیفیت آمار تا استخراج روابط با استفاده از داده‌های ساعتی و روزانه این ایستگاه‌ها در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۸ انجام شده است. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ و شکل ۱ آمده است. اساس انتخاب این ایستگاه‌ها طول دوره آماری بلندمدت داده‌های ایستگاه‌های آلودگی سنجی آلاینده‌های (PM₂ و PM₁₀) و داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک (متغیرهای هواشناسی) است.

مدل‌ها در مقیاس خرد اقلیم هر ایستگاه و کل شهر تهران بررسی می‌شود تا مشخص شود مدل‌های محلی در چه مقیاسی نتایج بهتری دارند. همین‌طور با استفاده از سنج‌های آماری به مقایسه و بحث بر روی مدل‌های خطی و غیرخطی حاصل پرداخته خواهد شد و توانایی آن‌ها برای پیش‌غلظت هواویزها ارزیابی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

شهر تهران با مساحت آن ۷۳۰ کیلومتر مربع در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

طول جغرافیایی (درجه اعشار)	عرض جغرافیایی (درجه اعشار)	نام ایستگاه	
۵۱/۴۸	۳۵/۷۹	شمیران	ایستگاه‌های سینوپتیک
۵۱/۳۸	۳۵/۷۴	ژئوفیزیک	
۵۱/۳۰	۳۵/۶۹	فرودگاه مهرآباد	
۵۱/۴۸	۳۵/۷۹	اقدسیه	ایستگاه‌های آلودگی سنجی
۵۱/۳۸	۳۵/۷۱	تربیت مدرس	
۵۱/۳۳	۳۵/۶۷	میدان فتح	

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های سنجش‌ازدور (تصاویر ماهواره‌ای)

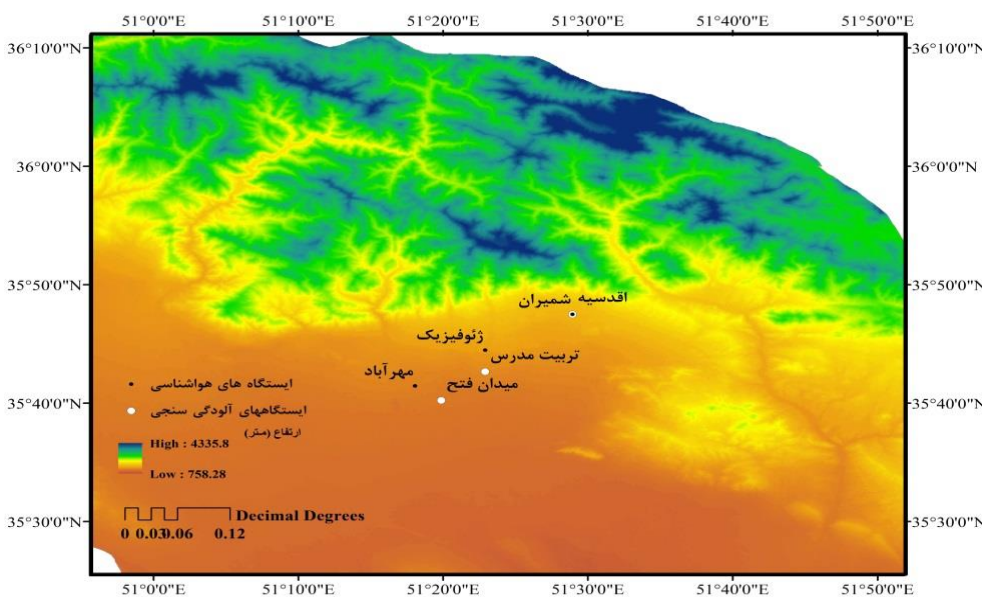
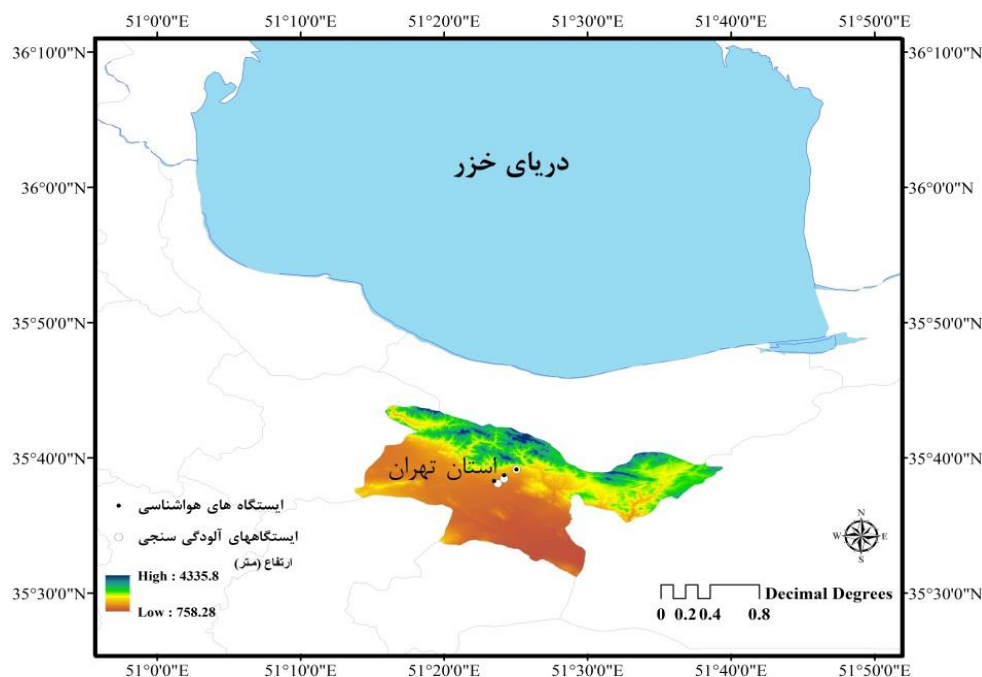
در این پژوهش تصاویر مورد استفاده از سنجنده مودیس ماهواره ترا به‌صورت روزانه در طی دوره مشخص شده (۱۳۹۱-۱۳۹۸) برای منطقه مطالعاتی از طریق پایگاه اینترنتی <https://search.earthdata.nasa.gov> دریافت شد. ماهواره ترا بین ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۱:۳۰ به‌وقت محلی از محدوده ایران می‌گذرد بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن غلظت آلاینده‌ها در همان زمان در سطح زمین، توانایی این سنجنده را با توجه به تأثیر متغیرهای هواشناسی ارزیابی کرد. در راستای هدف مورد پژوهش از محصولات MOD04-L2 داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مودیس استفاده شد و این داده‌ها در قالب فایل‌های HDF ذخیره شدند. برخی از لایه‌های محصولات MOD04 شامل عمق نوری هواویز (AOD) سراسر کره زمین است که با استفاده از الگوریتم‌های بازیابی (DT) Dark Target و (DB) Deep Blue به‌دست آمده‌اند. از آنجایی که منطقه مطالعاتی ما شامل مناطق خشکی و سرزمین‌های تیره است از الگوریتم ترکیبی DT و DB استفاده شد. مقادیر حاصل از هر دو الگوریتم در پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۰×۱۰ کیلومتر فراهم شده‌اند.

عمق نوری هواویزها (AOD)

پایش هواویزها در سنجش‌ازدور با استفاده از مقدار عمق نوری هواویزها (Aerosol Optical Depth) انجام می‌شود. AOD ها اندازه‌گیری هواویزهایی است که در ستون هوا از (سطح زمین) تا بالای جو توزیع می‌شود. این متغیر (معیار بیان‌کننده تضعیف تابش ورودی به اتمسفر بر اثر جذب و پراکنش ذرات معلق است) را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای محاسبه می‌نمایند. مقدار AOD بین ۰/۱ تا ۱ است و این بدان معنا است که اگر آسمان صاف و شفاف باشد مقدار آن ۱/۰ است و هرچه غلظت هواویزها افزایش یابد، مقدار AOD به یک نزدیک‌تر می‌شود.

الگوریتم Deep Blue

الگوریتم Deep Blue برای پردازش داده‌های سنجنده‌های مختلف ماهواره‌ها استفاده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر با استفاده از اندازه‌گیری تفاوت درخشندگی عارضه‌های سطحی و جوی، به محاسبه میزان AOD در طول موج‌های مختلف می‌پردازد که این فرایند بازیابی نام دارد. این الگوریتم بر فراز مناطق خشکی از باندهای مختلفی برای مناطق روشن (۴۱۲، ۴۷۰، و ۴۹۰ نانومتر) و تیره (۴۷۰، ۴۹۰ و ۶۵۰ نانومتر) استفاده می‌کند و بر روی دریاها کاربردی ندارد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

الگوریتم Dark Target

الگوریتم Dark Target داده‌های خام جمع‌آوری شده توسط سنجنده‌ها را جمع‌آوری کرده و به داده‌های زمین مرجع تبدیل می‌کند. این الگوریتم برای داده‌های سنجنده‌های چند طیفی به کار برده شده و بر فراز دریاها و خشکی‌ها معتبر است. ناسا این الگوریتم را برای پایش سیستم هواویز جهانی طراحی کرده است. محصولات استاندارد سنجنده مودیس برای الگوریتم DarkTarget ۱۰ کیلومتر وضوح تصویر دارند و این امر موجب می‌شود نسبت

سیگنال به نویز افزایش یافته و نتایج بهتری حاصل گردد (Levy et al., 2019).

داده‌های مرجع زمینی

داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و آلودگی سنجی

ابتدا آمار بلندمدت (۱۳۸۵-۱۳۹۸) ایستگاه‌های هواشناسی ابعلی، فرودگاه امام خمینی، چیتگر، دماوند، فیروزکوه، لوسان، شهریار، ژئوفیزیک، فرودگاه مهرآباد، شمیران و ورامین دریافت شد و از نظر خرد اقلیمی با ایستگاه‌های آلودگی سنجی مقایسه



Rees (1989) بصورتی که هرچه مقدار t کمتر باشد کارایی مدل بیشتر است. روابط محاسبه سنجها به شرح زیر است:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1) \times MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

یافته‌ها

جمع‌آوری و کنترل کیفیت داده‌های زمینی و ماهواره‌ای و پردازش آن‌ها

پس از انتخاب روزهای ناسالم برای گروه‌های حساس، موجود بودن متغیرهای هواشناسی در روزهای موردنظر بررسی شده و روزهایی که از نظر داده‌های هواشناسی نقض آماری داشتند حذف شدند. همچنین روزهایی که AOD آن‌ها برای ایستگاه‌های موردنظر و زمان منتخب وجود نداشت در محاسبات در نظر گرفته نشدند. در فصل‌های پاییز و زمستان به دلیل بازگشایی مدارس ترافیک بیشتری نسبت به فصل‌های دیگر وجود دارد ضمن آنکه پدیده وارونگی هوا نیز موجب می‌شود این پدیده در این فصل‌ها بیشتر قابل لمس باشد. به این دلیل از میان ۱۲۷۶ روز داده، ۸۵ روز (فصل‌های پاییز و زمستان) مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولکوگروف-اسمیرنوف استفاده شد. مقدار P Value این آزمون ۰/۰۴ به دست آمد و براین اساس داده‌ها با سطح معنی‌داری ۰/۰۵ نرمال هستند (جدول ۲ و شکل ۲). مدل‌های به‌دست‌آمده نیز فصلی بوده و برای فصل‌های پاییز و زمستان معتبر می‌باشند. همچنین برای مدل‌سازی و انتخاب مناسب‌ترین مدل، از رگرسیون‌های خطی و غیرخطی استفاده شد.

گردید. در مرحله انتخاب ایستگاه‌های مناسب دو محدودیت وجود دارد

- اغلب ایستگاه‌های سینوپتیک خارج از شهر و ایستگاه‌های آلودگی سنجی داخل شهر هستند و معیار انتخاب، تشابه خرداقليمی بين اين ايستگاه‌ها است.

- در تمام ایستگاه‌های آلودگی سنجی برخی از آلاینده‌ها (PM₁₀ و PM_{2.5}) اندازه‌گیری نمی‌شوند.

باتوجه به محدودیت‌های مذکور از بین ایستگاه‌های فوق سه ایستگاه سینوپتیک ژئوفیزیک، شمیران و فرودگاه مهرآباد در نظر گرفته شد و بانک اطلاعاتی شامل داده‌های حداقل دید افقی (m)، سرعت باد (m/s)، دما کمینه (C°)، دما بیشینه (C°)، میانگین فشار بخار (mb)، بارش ۲۴ ساعته (mm)، ابرناکی، رطوبت نسبی (درصد) و ساعت آفتابی (hr) تشکیل شد.

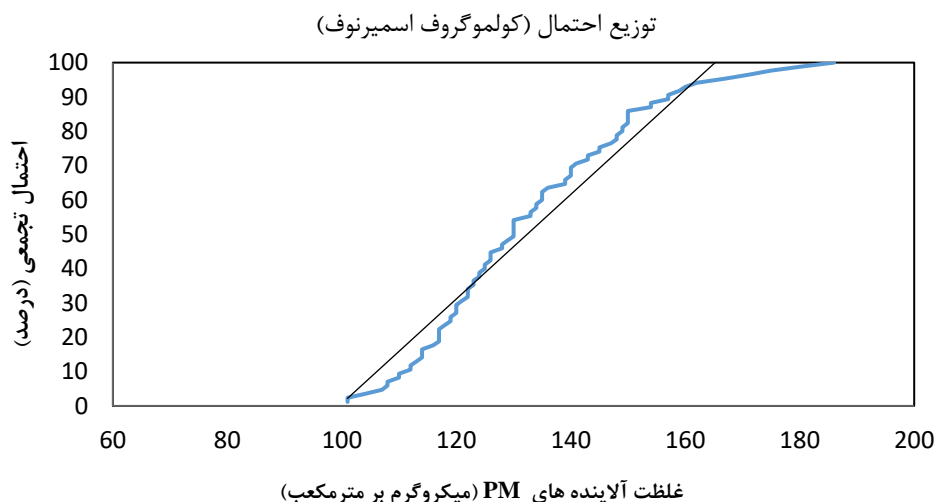
اطلاعات غلظت آلاینده‌ها (PM₁₀ و PM_{2.5}) از سایت شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (<http://airnow.tehran.ir>) به طور روزانه و ساعتی دریافت شد. این داده‌ها از سال ۱۳۸۹ تا کنون موجود است اما از آنجایی که داده‌های آلودگی سنجی و هواشناسی در بازه سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۸ هم‌پوشانی زمانی دارد، این دوره مورد بررسی قرار گرفت. در نخستین گام کنترل کیفیت، داده‌های فصول پاییز و زمستان که دارای روزهای آلوده بیشتری بودند در نظر گرفته شدند و سایر داده‌ها حذف شدند. علاوه بر این Tsai et al. (2011) و Zheng et al. (2013) نشان دادند همبستگی AODها و هواویزها در فصول سرد سال، بیشتر از فصول گرم سال است. در گام بعدی برای انتخاب روزهای آلوده، روزهایی که برای گروه حساس ناسالم به شمار می‌روند انتخاب شدند

معیارهای ارزیابی خطا

برای تعیین کارایی مدل از سنج‌های آماری MBE، RMSE، MAPE و MAE استفاده شد از آنجایی که RMSE و MBE به ویژه زمانی که مدل‌ها با هم مقایسه می‌شوند به تنهایی قادر به تعیین کارایی مدل (۱۹۹۳) نیستند از سنج t که ترکیبی از این دو است استفاده می‌شود. این سنج برای درجه آزادی (n-1)، از رابطه ۵ محاسبه می‌شود. کارایی مدل با مقدار t نسبت عکس دارد

جدول ۲- نتایج آزمون نرمالیت کولکوگروف-اسمیرنوف بر ۸۵ روز نهایی انتخاب شده از PMها

میانگین (ug/m^3)	انحراف معیار (ug/m^3)	تعداد روزهای آلوده	P-Value	آماره کولکوگروف اسمیرنوف
۱۳۲/۸	۱۸/۴۸	۸۵	۰/۰۴	۰/۱



نتایج و بحث

مدل رگرسیون خطی

در این مطالعه از روش رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression) به منظور برآورد غلظت PM استفاده شده است که به طور گسترده برای تحلیل و مطالعه ارتباط بین متغیرها

استفاده می‌شود. باتوجه به این که هدف ارزیابی توانایی داده‌های سنجنده مودیس در برآورد PM است متغیر آزاد اصلی AOD در نظر گرفته شده و در کنار آن از متغیرهای هواشناسی نیز برای بهبود عملکرد مدل استفاده می‌شود. عموماً برای نشان دادن میزان همبستگی بین متغیرها از ماتریس همبستگی استفاده می‌شود که از روش پارامتری همبستگی پیرسون به دست آمده است (جدول ۳).

جدول ۳- ماتریس همبستگی متغیرهای مورد بررسی

sshn	RH	nm	rrr24	e _a	Tmin	tmax	ffm	vvmin	AOD	PM _{2.5}
										۱
									۱	۰/۴۴
								۱	-۰/۶۳	-۰/۴۴
							۱	۰/۳۱	-۰/۲۲	-۰/۵۱
						۱	۰/۵۳	۰/۱۸	-۰/۶۲	-۰/۵۱
					۱	۰/۹۸	۰/۵۶	۰/۱۸	۰/۵۴	-۰/۴۹
				۱	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۰۷	۰/۴۵	-۰/۳	۰/۱۲
			۱	-۰/۱۲	-۰/۳	-۰/۳	-۰/۰۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۴
		۱	۰/۳۶	-۰/۰۹	-۰/۳۸	-۰/۴۱	-۰/۱۱	-۰/۴	۰/۵	۰/۲۴
	۱	۰/۴	۰/۳۱	-۰/۰۲	-۰/۸۶	-۰/۸۸	-۰/۵۳	-۰/۷۳	۰/۶	۰/۶۶
۱	-۰/۶۴	-۰/۵۵	-۰/۲۱	۰/۳۵	۰/۷	۰/۷۴	۰/۴۳	۰/۷	-۰/۵	-۰/۷

حد معنی‌داری تجاوز نشود باید ورود متغیرها به مدل در این مرحله متوقف گردد. همانند ماتریس همبستگی (جدول ۳)، اولین متغیر که باید به مدل اضافه شود و بیشترین همبستگی را داشته است ساعت آفتابی (sshn) است. نکته قابل توجه دیگر آن است که AOD به‌عنوان آخرین متغیر پس از متغیرهای میانگین فشار بخار آب (e_a)، بارش ۲۴ ساعته (rrr24) و ابرناکی (nm) وارد مدل شده است. این بدان معناست که این متغیر یکی از متغیرهای اثرگذار در مدل رگرسیون خطی است اما مهم‌ترین آن‌ها نبوده و در آخرین مرحله به رگرسیون خطی اضافه شده است. نکته دیگر آن است که نتایج روش روبه‌جلو با ماتریس همبستگی تفاوت‌هایی

باتوجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود غلظت PM_{2.5} به ترتیب بیشترین همبستگی را با متغیرهای sshn, RH, ffm, tmax, tmin, vvmin, AOD, rrr24, nm و e_a دارد. از آنجایی که مدل موردنظر در این پژوهش بیش از یک متغیر مستقل دارد می‌بایست میزان همبستگی ترکیب چندگانه این متغیرها با متغیر وابسته (PM_{2.5}) بررسی شود. برای این منظور از روش گام‌به‌گام (Step Wise) استفاده شده است.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تا اضافه شدن AOD در مرحله پنجم مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ است و از آنجایی که سطح معنی‌داری ۰/۰۵ تعریف شده است، برای اینکه از



به منظور بهبود کارایی مدل با روش گام به گام به مدل رگرسیون خطی اضافه شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از روش گام به گام روبه جلو متغیرهای ورودی به مدل رگرسیون خطی به ترتیب ساعت آفتابی (sshn)، میانگین فشار بخار آب (e_a) و بارش ۲۴ ساعته (rrr24) انتخاب شدند (جدول ۴).

دارد زیرا در ماتریس همبستگی تنها ارتباط دو به دو متغیرها بیان می‌شود اما در روش رگرسیون خطی روبه جلو پس از ورود متغیر با بیشترین همبستگی، متغیری اضافه می‌شود که در ترکیب با متغیر قبلی اضافه شده از حد معنی داری تجاوز نکند. با توجه به این که هدف ارزیابی کارایی سنجنده مادیس در برآورد PM است، متغیر اصلی AOD در نظر گرفته شده و سایر متغیرهای هواشناسی

جدول ۴- مراحل گام به گام ورود متغیرهای وابسته به مدل خطی برآورد غلظت PM_{2.5} به روش رو به جلو

مرحله نام متغیر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
sshn	-۴/۹۸										T value
	۰/۰۰۰										P value
ewm		۳/۳۸									T value
		۰/۰۰۳									P value
rrr24			۲/۷۲								T value
			۰/۰۱۲								P value
nm				-۴/۲۲							T value
				۰/۰۰۰							P value
AOD					۲/۹۳						T value
					۰/۰۰۸						P value
ffm						-۱/۶					T value
						۰/۱۲۵					P value
tmax							۱/۵۳				T value
							۰/۱۴۳				P value
tmin								-۱/۵۶			T value
								۰/۱۳۶			P value
vmin									۱/۴۹		T value
									۰/۱۵۴		P value
um										۱/۸	T value
										۰/۹۲	P value

متغیر دارند و همبستگی بالا و قابل قبولی دارند (۶۸٪ و ۷۵٪). انتخاب شده و با عنوان‌های مدل همبستگی سه متغیره و چهار متغیره مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند (جدول ۵).

اگرچه با افزایش تعداد متغیرهای هواشناسی همبستگی افزایش می‌یابد، اما هرچه تعداد متغیرهای آزاد در مدل رگرسیونی کمتر باشد از دقت بیشتری برخوردار است و مطلوبیت بیشتری دارد، لذا مدل‌های ردیف سه و چهار که به ترتیب سه و چهار

جدول ۵- نتایج معادلات رگرسیون خطی برآورد غلظت ذرات PM_{2.5}

P Value	RMSE (ug/m ³)	R ²	نام متغیرها	تعداد متغیر	معادله رگرسیونی	ردیف
۰/۰۲	۱۳/۴۵	٪ ۴۴	AOD	۱	$PM_{2.5} (ug/m^3) = 10.5/5 + 70/108 AOD$	۱
۰/۰۱۶	۱۰/۵۲	٪ ۵۰	sshn -AOD	۲	$PM_{2.5} (ug/m^3) = 178 + 18/9 AOD - 7/28 sshn$	۲
۰/۰۱۲	۸/۳۸	٪ ۶۸	ea - sshn-AOD	۳	$PM_{2.5} (ug/m^3) = 162 + 31/6 AOD - 8/67 sshn + 4/56 ea$	۳
۰/۰۱	۷/۴۷	٪ ۷۵	e _a -rrr24-sshn-AOD	۴	$PM_{2.5} (ug/m^3) = 162 + 18/6 AOD - 8/51 sshn + 53/1 rrr24 + 4/58 e_a$	۴

جدول ۶- بررسی نرمال بودن اجزای رگرسیون با روش کلموگروف اسمیرنوف

نام متغیر	میانگین	P Value
PM _{2.5}	۱۱۷ (ug/m ³)	۰/۰۰۵
ساعت آفتابی	۸/۳	۰/۰۳
بارش ۲۴ ساعته	۸/۴(mm)	۰/۰۱
میانگین فشار بخار	۵/۹ (mb)	۰/۰۰۶
ضخامت نوری اتمسفر	۰/۱۴	۰/۰۱

اختلاف قابل توجهی بین VIF های به دست آمده برای اجزای رگرسیون و عدد یک وجود ندارد لذا وجود پدیده هم خطی رد می شود.

جدول ۷- همخطی میان متغیرهای مستقیم

نام متغیر	VIF
sshn	۱/۹۹
rrr24	۱/۱۹
ewm	۱/۰۱
AOD	۱/۲۴

مدل های خطی ذرات PM_{2.5}

مدل رگرسیون خطی سه متغیره

(رابطه ۷)

$$PM_{2.5} \text{ (ug/m}^3\text{)} = ۱۶۲ + ۳۱/۶ AOD - ۸/۶۷ sshn + ۴/۵۶ e_a$$

که در آن PM_{2.5}، ذرات هواویز با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون؛ AOD، عمق نوری ذرات هواویز؛ sshn، ساعت آفتابی (hr)؛ e_a، میانگین فشار بخار آب (mb) است. در این مدل دو متغیر هواشناسی (sshn - e_a) و متغیر AOD به عنوان متغیرهای تأثیرگذار در نظر گرفته شده است. که در آن مقدار PM_{2.5} با AOD و e_a رابطه مستقیم و با sshn رابطه عکس دارد. همان طور که در شکل ۶-ا نیز مشاهده می شود با افزایش غلظت هواویزها تابش رسیده به سطح زمین کاهش می یابد و برعکس لذا این دو متغیر رابطه معکوس دارند که در رابطه به دست آمده نمود یافته است.

Hadjimitsis *et al.*, 2004 نشان دادند غلظت PM_{2.5} ها با

ضخامت نوری اتمسفر (AOD) ارتباط مستقیم دارد. این روند در شکل ۶-ب نیز مشاهده می شود. بارندگی به عنوان یک عامل پاک کننده طبیعی هواویزها در اتمسفر مطرح است و قادر به حذف ذرات هواویز از اتمسفر است. باران های کوتاه و سنگین ذرات با قطر کمتر دو و نیم میکرون را پاک می کنند اما باران های طولانی با شدت کم توانایی بارش را در پاک کردن ذرات هواویز با قطر بیشتر از دو و نیم میکرون را ضعیف می کند (Pranisha *et al.*, 1997). بعد از بارندگی رطوبت نسبی محیط افزایش می یابد و در صورتی که سرعت باد کم باشد، این ذرات با جذب رطوبت و رشد هیگروسکوپیک اندازه شان بزرگ تر شده و غلظت هواویزها

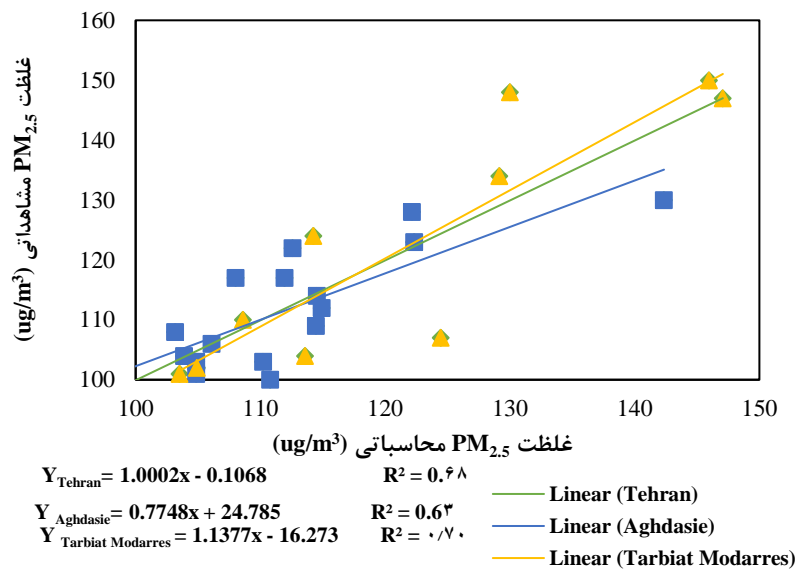
به منظور بررسی ضرورت وجود هریک از متغیرهای مستقل در مدل یا به عبارت دیگر برای بررسی معنی داری ضرایب متغیرهای مستقل رگرسیون، فرض صفر آن است که ضرورتی برای اضافه شدن آن وجود ندارد؛ لذا در هر مرحله ای که متغیر جدیدی به رگرسیون اضافه شده، P Value محاسبه و با ۰/۰۵ مقایسه می گردد. در صورتی که از ۰/۰۵ کوچک تر باشد فرض صفر برای آن متغیر رد شده و متغیر در مدل باقی می ماند و دارای تأثیر معنی داری بر روی متغیر وابسته است. همان طور که در جدول ۶ قابل مشاهده است مقدار P-Value در هر مرحله کمتر از ۰/۰۵ بوده پس تأثیر معنی داری بر روی متغیر وابسته داشته است. نرمال بودن اجزای رگرسیون با آزمون کلموگروف اسمیرنوف بررسی شد و همان طور که در جدول ۶ مشاهده می شود P Value همگی آن ها کمتر از ۰/۰۵ و در سطح ۵ درصد معنی دار هستند. برای استفاده از رگرسیون خطی باید فرضیات زیربنایی شامل نرمال بودن توزیع مانده ها، همسانی واریانس مانده ها، عدم وجود همبستگی سریالی در مانده ها و عدم وجود هم خطی میان متغیرهای مستقل (رگرسیون چندگانه) بررسی شود. هم خطی (Collinearity) پدیده ای است که به بیان وضعیتی می پردازد که یک متغیر توصیفی در رگرسیون چندگانه با یک یا چند متغیر دیگر دارای رابطه خطی است به طوری که می توان آن را به صورت ترکیب خطی از دیگر متغیرها در نظر گرفت. به این ترتیب هم خطی چندگانه (Multicollinearity) نیز وضعیتی را نشان می دهد که بین چندین متغیر توصیفی رابطه خطی وجود داشته باشد و بتوان آن ها را به صورت ترکیب خطی از یکدیگر نوشت. عامل تورم واریانس (variance inflation factor=VIF) شدت هم خطی چندگانه را در تحلیل رگرسیون چندگانه بررسی می کند و بیان می دارد که اگر آماره VIF از ۱۰ بزرگ تر باشد، نتایج رگرسیون قابل اعتماد نیست (Chatterjee and Price 1977).

$$VIF = \frac{1}{1-r^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن: r^2 : ضریب تبیین مدل رگرسیونی با متغیرهای مستقل مدل است. همان طور که در جدول ۷ مشاهده می شود،

پدیده می‌آوردند که در هوا شناور می‌شوند و فشار بخار آب (e_a) در مجاورت هر ذره افزایش یافته و به‌صورت ابرهای کوچک و بزرگ در می‌آیند. اگر شرایط دمایی مساعد باشد این قطرات سنگین شده به‌صورت باران سقوط می‌کنند و از ابرناکی کاسته می‌شود؛ لذا غلظت هواویزها با بارندگی و میانگین فشار بخار آب رابطه مستقیم دارد (رابطه ۷). روند تغییرات نسبتاً مشابه میانگین فشار بخار آب و غلظت $PM_{2.5}$ در شکل ۶-۷ نیز مشاهده می‌شود.

افزایش می‌یابد. رشد هیگروسکوپیک و تشکیل ثانویه هواویزها نقش کلیدی در آلودگی هوا دارد. (Sun 2018) در دشت‌های شمال چین نشان داد رطوبت نسبی بالا و سرعت باد کم دو عامل زیست‌محیطی مهم برای رشد هیگروسکوپیک و تشکیل ثانویه هواویزها هستند که ۷۰٪ از آلودگی هوا شدید را تشکیل می‌دهند. در صورت وجود رطوبت در هوا این ذرات رشد هیگروسکوپیک کرده و با جذب آب میلیون‌ها ذره کوچک آب



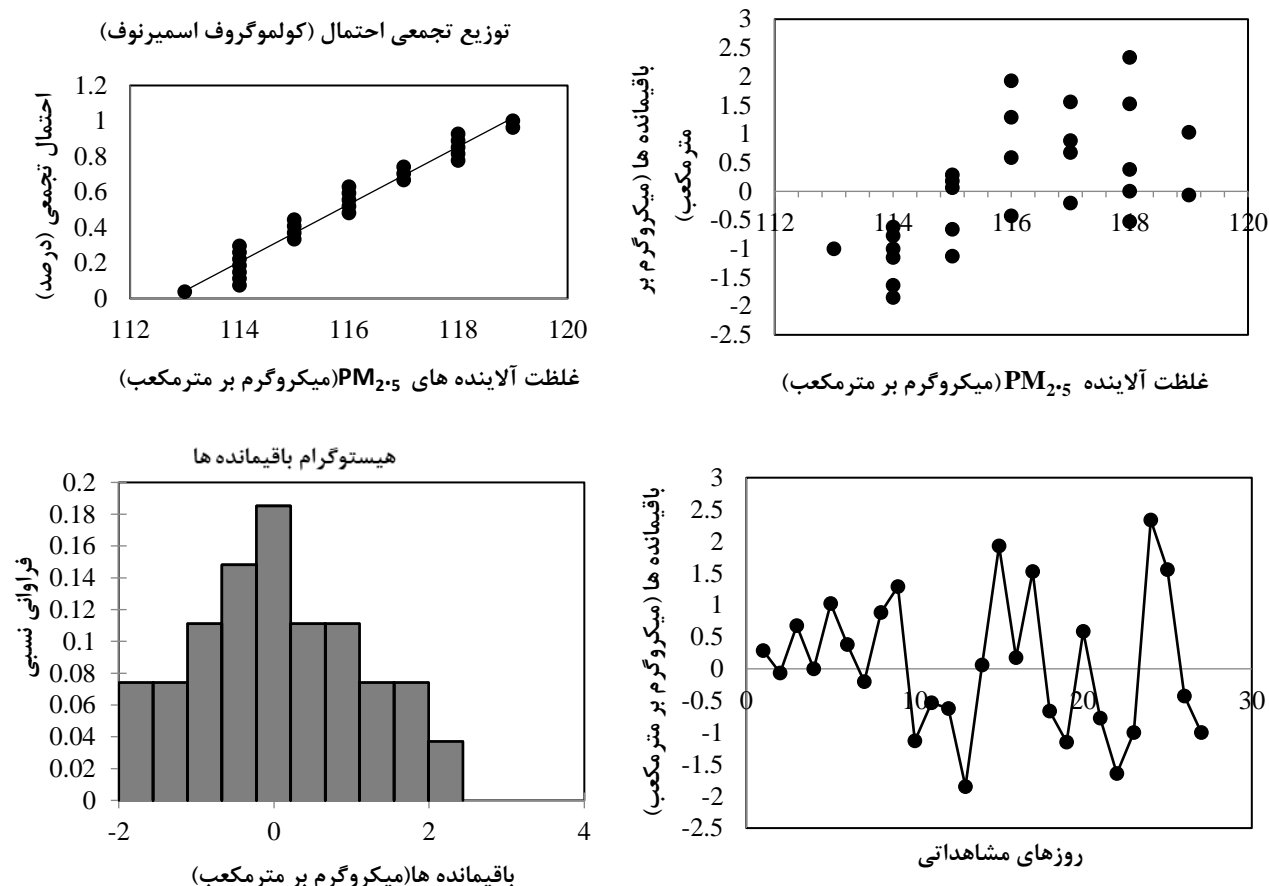
شکل ۳- نمودار مقادیر $PM_{2.5}$ برآورد شده توسط رگرسیون خطی سه متغیره در برابر مقادیر مشاهده شده

مربوط به خطا نشان می‌دهد مدل سه متغیره به‌دست‌آمده در ایستگاه اقدسیه دارای کمترین خطا است ($MAPE = 4/4\%$) و بیشتر از کل تهران و ایستگاه اقدسیه است ($MAPE = 6/78\%$) و مدل در ایستگاه اقدسیه رخ داده است همچنین این مدل، باتوجه به سنج‌های آماری در کل محدوده شهر تهران و در مقیاس ایستگاه‌ها به‌صورت مجزا نیز عملکرد خوب و قابل قبولی دارد.

همبستگی مدل سه متغیره در سه محدوده کل تهران، ایستگاه اقدسیه و ایستگاه تربیت‌مدرس در شکل ۳ نشان داده شده است تا مقادیر پیش‌بینی شده مدل و مقادیر مشاهداتی متناظر قابل مشاهده باشند. باتوجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که نمایه MBE در ایستگاه اقدسیه مثبت و در ایستگاه تربیت‌مدرس و کل تهران منفی است ($MBE_{TarbiatModarres} = -0/35 \text{ ug/m}^3$ ، $MBE_{Tehran} = 1/09 \text{ ug/m}^3$ و $MBE_{Aghdasieh} = 0/07$)؛ بنابراین این مدل در مقیاس کل منطقه و ایستگاه تربیت‌مدرس کم برآورد و در ایستگاه اقدسیه بیش برآورد دارد. همچنین بررسی آماره‌های

جدول ۸- بررسی مدل همبستگی خطی سه متغیره در محدوده کل شهر تهران و به تفکیک ایستگاه‌ها

t	MBE (ug/m^3)	MAE (ug/m^3)	RMSE (ug/m^3)	MAPE	R^2	نام محدوده
۰/۲۱	-۰/۳۵	۶/۲۳	۸/۳۸	۵/۲۸	٪ ۶۸	کل تهران
۰/۰۴	۰/۰۷	۴/۹۷	۶/۳	۴/۴	٪ ۶۳	اقدسیه
۰/۳۸	-۱/۰۹	۸/۳۸	۸/۴۷	۶/۷۸	٪ ۷۰	تربیت‌مدرس



شکل ۴- بررسی مانده‌ها در رابطه ۷

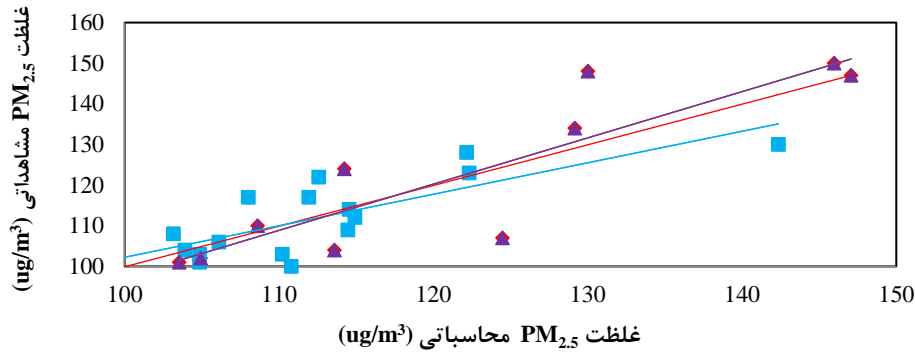
مقادیر مشاهداتی متناظر در سه محدوده کل تهران، ایستگاه اقدسیه و ایستگاه تربیت مدرس شکل ۵ نشان داده شده است. باتوجه به جدول ۹، نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد ضریب تبیین مدل در ایستگاه تربیت مدرس بیشتر از ایستگاه اقدسیه و شهر تهران $(R^2_{TarbiatModarres}=0/78)$ ، $R^2_{Aghdasieh}=0/64$ و $R^2_{Tehran}=0/54$ و از مقادیر خطا کمتری نیز برخوردار است. مقادیر MBE نشان می‌دهد که مدل بیش برآورد دارد $(MBE_{Tehran}=0/08)$ ، $MBE_{Aghdasieh}=0/45$ ، $MBE_{TarbiatModarres}=0/108$. بررسی آماره‌های مربوط به خطا نشان می‌دهد مدل چهار متغیره به دست آمده در ایستگاه اقدسیه دارای کمترین خطا است $(MAPE=0/43)$ و $RMSE=6/12 \text{ ug/m}^3$ و همانند مدل سه متغیره، خطای برآورد در ایستگاه تربیت مدرس بیشتر از کل شهر تهران و ایستگاه اقدسیه است $(MAPE=0/58)$ و $RMSE=16/7 \text{ ug/m}^3$ اما مقایسه آماره‌های خطا در جدول ۸ و ۹، نشان می‌دهد خطای مدل چهار متغیره نسبت به مدل سه متغیره به‌طور کلی کمتر است لذا مدل دقیق‌تری می‌باشد.

باتوجه به رسم نمودار احتمال نرمال (شکل ۴) مشاهده می‌شود که باقی مانده‌ها نرمال هستند و واریانس مانده‌ها در بازه $4 \text{ ug/m}^3 - 4 \text{ ug/m}^3$ است.

مدل رگرسیون خطی چهار متغیره

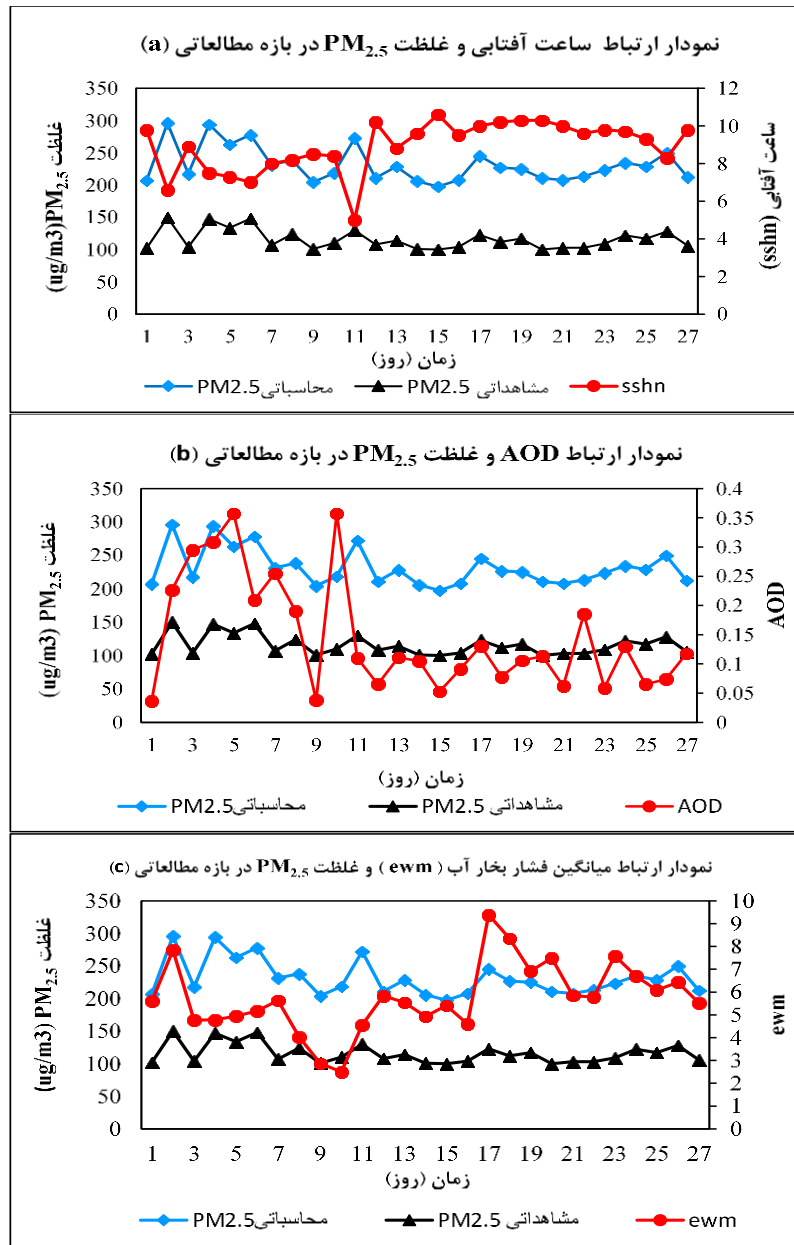
$$PM_{2.5} (\text{ug/m}^3) = 162 + 6/18 AOD - 51/8 sshn + 58/4 e_a - 1/53 rrr24 \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن $PM_{2.5}$ ، ذرات هواویز با قطر کمتر از $2/5$ میکرون؛ AOD ، عمق نوری ذرات هواویز؛ $sshn$ ، تعداد ساعت آفتابی (hr)؛ e_a میانگین فشار بخار آب (mb)؛ $rrr24$ ، بارندگی ۲۴ ساعته (mm) است. در مدل رگرسیون خطی چهار متغیره، سه متغیره هواشناسی تعداد ساعات آفتابی، بارندگی و فشار بخار آب و متغیره AOD در نظر گرفته شد. تفاوت این مدل با رگرسیون خطی سه متغیره (رابطه ۷) در این است که طبق نتایج به دست آمده از رگرسیون خطی روبه جلو، متغیره بارش ۲۴ ساعته به عنوان متغیره چهارم در ساختار رابطه اضافه شده است. برای درک بهتر مقادیر پیش‌بینی شده مدل چهار متغیره و



$Y_{Tehran} = 1.0002x - 0.1089$	$R^2 = 0.75$	Linear (Tarbiat Modarres)
$Y_{Aghdasie} = 0.7748x + 24.785$	$R^2 = 0.6449$	Linear (Tarbiat Modarres)
$Y_{Tarbiat Modarres} = 1.1377x - 16.273$	$R^2 = 0.7803$	Linear (Tarbiat Modarres)

شکل ۵- نمودار مقادیر $PM_{2.5}$ برآورد شده توسط همبستگی چهار متغیره در برابر مقادیر مشاهده شده



شکل ۶. نمودار ارتباط متغیرها و غلظت $PM_{2.5}$

جدول ۹- بررسی مدل همبستگی چهار متغیره در محدوده شهر تهران و به تفکیک ایستگاه‌ها

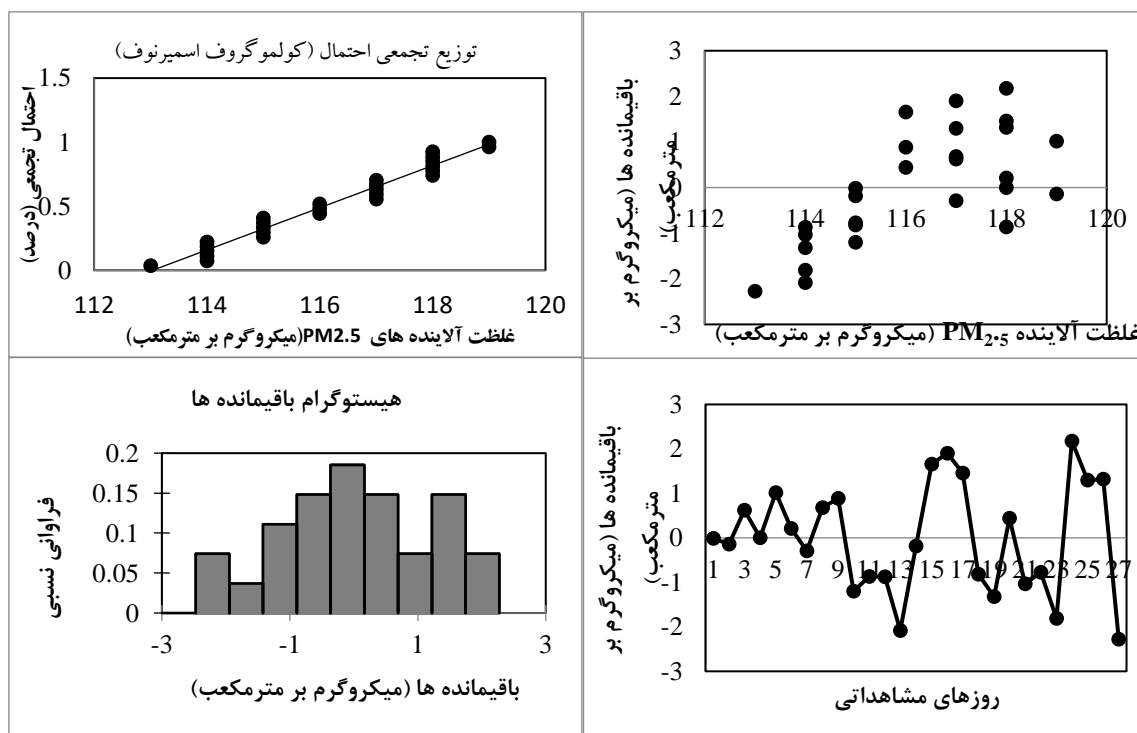
نام محدوده	R2	MAPE	RMSE (ug/m3)	MAE (ug/m3)	MBE (ug/m3)	t
کل تهران	٪ ۷۵	۴/۸۷	۷/۴۷	۵/۶۶	۰/۰۸	۰/۰۵
اقدسیه	٪ ۶۴	۴/۳	۶/۱۲	۴/۸۵	۰/۴۵	۰/۲۹
تربیت‌مدرس	٪ ۸۲	۵/۸۵	۷/۱۶	۷/۰۵	-۰/۵۴	۰/۰۲

جدول ۱۰- مقایسه سنج‌های آماری مدل‌های خطی در مقیاس کل شهر تهران

رابطه	R2	MAPE	RMSE (ug/m3)	MAE (ug/m3)	MBE (ug/m3)	t
رابطه ۷ (مدل سه متغیره)	٪ ۶۸	۵/۲۸	۸/۳۸	۶/۲۳	-۰/۳۵	۰/۳۸
رابطه ۸ (مدل چهار متغیره)	٪ ۷۵	۴/۸۷	۷/۴۷	۵/۶۶	۰/۰۸	۰/۰۵

در ایستگاه اقدسیه (جدول ۹) مدل چهارمتغیره (رابطه ۸) ضریب تبیین بالاتر ($R^2=0/64$)، آماره‌های خطای کمتر ($RMSE=6/12 \text{ ug/m}^3$ و $MAPE=4/3$ ، $MAE=4/85 \text{ ug/m}^3$) و سنج t پایین‌تری نسبت به مدل سه متغیره دارد ($t=0/29$) و بنابراین کارایی آن در ایستگاه اقدسیه بیشتر بوده و خطای کمتری در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ دارد. در ایستگاه تربیت‌مدرس نیز مشابه ایستگاه اقدسیه مدل چهارمتغیره عملکرد بهتری دارد. همبستگی نتایج حاصل از مدل‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش با مشاهدات ایستگاه‌های آلودگی سنجی زمینی ۸۲٪ - ۶۳٪ است. لذا نسبت به همبستگی مدل به‌دست‌آمده از پژوهش Sotoudehian and Arhami (2017) که ۷۲٪ - ۵۷٪ در شهر تهران را دارا بود، برتری دارد.

رگرسیون چهارمتغیره ($R^2=0/75$) در مقایسه با مدل سه متغیره ($R^2=0/68$) در مقیاس کل شهر تهران ضریب تبیین بالاتری دارد و آماره‌های خطای آن نیز کمتر است لذا در مقیاس کل شهر تهران مدل چهار متغیره از سه متغیره بهتر نتیجه می‌دهد. (جدول ۱۰) با توجه مثبت بودن مقادیر MBE مدل چهار متغیره بیش برآورد ($MBE=0/08$) و مدل سه متغیره کم برآورد ($MBE=-0/35$) دارد. همچنین سنج‌های مربوط به خطای ($MAPE=4/87$ ، $MAE=5/66 \text{ ug/m}^3$ ، $MBE=0/08 \text{ ug/m}^3$) و ($RMSE=7/47 \text{ ug/m}^3$)، این رابطه نسبت به رگرسیون سه متغیره کمتر است. همچنین سنج t مدل چهارمتغیره از مدل سه متغیره کمتر است ($t_1=0/38$ و $t_2=0/04$) در نتیجه کارایی آن بالاتر است.



شکل ۷- بررسی باقی‌مانده‌ها در رابطه ۸

واریانس مانده ها در بازه ی 2 ug/m^3 تا 2 ug/m^3 است.

باتوجه به نمودار توزیع تجمعی احتمال (کولموگروف اسمیرنوف) مشاهده می شود که باقی مانده ها نرمال هستند و

جدول ۱۱- توزیع T Student و توزیع F

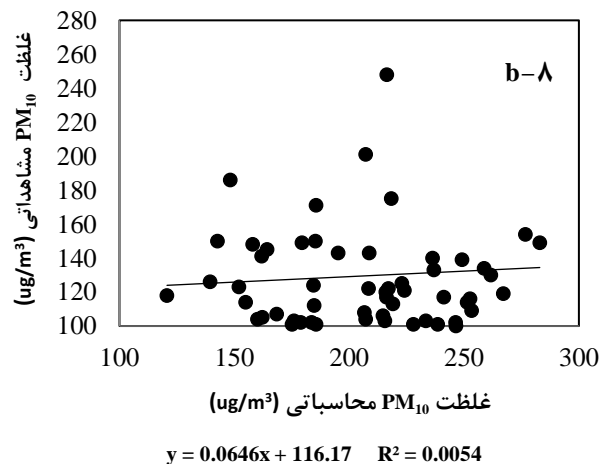
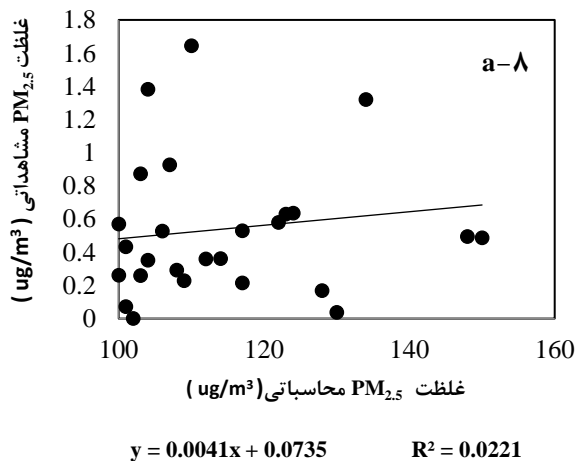
مدل	درجه آزادی	آماره F	P Value	آماره بحرانی F	آماره بحرانی T Student	آماره بحرانی T Student یکطرفه	آماره بحرانی T Student دوطرفه
رابطه ۷	۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۲	۴/۰۲	۰/۱۱	۱/۶۷	۲/۰۱
رابطه ۸	۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱	۴/۰۲	۰/۰۰۶	۱/۶۸	۲

AOD، عمق نوری ذرات هواویز؛ sshn، ساعت آفتابی است. Lee *et al.*, (2016) ادعا کردند مدل غیرخطی بهتر از مدل خطی در برآورد غلظت $\text{PM}_{2.5}$ عمل می کند، از این رو در این پژوهش به آن پرداخته شد. در این راستا علاوه بر AOD، بر اساس ماتریس همبستگی (جدول ۳) متغیر مستقل هواشناسی ساعت آفتابی که بیشترین همبستگی را دارد ($R^2=0.70$) در رگرسیون غیرخطی به کار برده شد. ضریب تبیین در این رابطه کمتر از ۰/۱ است که در شکل ۸-a نشان داده شده است؛ لذا از نظر آماری اعتبار کافی برای بررسی و توجیه فیزیکی ندارد. در نتیجه برخلاف Lee *et al.*, (2016) نتایج این پژوهش نشان داد روابط خطی در تخمین غلظت $\text{PM}_{2.5}$ ها بهتر عمل می کنند.

آزمون T Student با فرض متفاوت بودن واریانس ها را بر روی مقادیر محاسباتی و مشاهداتی $\text{PM}_{2.5}$ اعمال شد (جدول ۱۱). باتوجه به اینکه آماره آزمون از مقادیر بحرانی کوچک تر است لذا فرض اولیه صحیح بوده و مدل نتایج متفاوتی از مقادیر مشاهداتی تولید کرده است. همچنین به منظور بررسی معنی داری رگرسیون ها از توزیع F استفاده شد که در آن آماره F محاسبه شده از با مقدار بحرانی کوچک تر است لذا فرض صفر برای آن متغیر رد شده و رگرسیون معنی دار می باشد.

مدل های غیرخطی ذرات $\text{PM}_{2.5}$ و PM_{10}

(رابطه ۹)
$$\text{PM}_{2.5} (\text{ug/m}^3) = 7/09 \times \text{AOD}_{sshn}^{11/92}$$
 که در آن $\text{PM}_{2.5}$ ، ذرات هواویز با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون؛



شکل ۸- نمودار مقادیر PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$ برآورد شده توسط مدل های غیرخطی در برابر مقادیر مشاهده شده

رابطه به دست آورده شد. این مقایسه به کمک سنجه های آماری در نرم افزار Microsoft Office Excel پرداخته شد و بهترین مدل ممکن انتخاب گردید. اما برخلاف انتظارات ضریب تبیین بهترین رابطه غیرخطی نیز کمتر از ۰/۱ است و دقت قابل قبولی ندارد (شکل ۸b). در این پژوهش ثابت شد مقادیر حاصل از سنجنده توانایی کافی برای پایش غلظت آلاینده های PM_{10} را ندارد.

همچنین به منظور بررسی روابط غیرخطی ذرات PM_{10} و متغیرهای هواشناسی، ابتدا داده ها را به نرم افزار LAB Fit داده شد. نرم افزار ده رابطه رگرسیونی غیر خطی دو متغیره را پیشنهاد داد. این دو متغیر هواشناسی شامل عمق نوری هواویز و سرعت باد است که موثرترین متغیرها در برآورد غلظت PM_{10} است. سپس با مقایسه نتایج این مدل ها با مقادیر مشاهده شده بهترین

بحث

در این مطالعه با بررسی نقش متغیرهای هواشناسی ارتباط رخدادهای جوی و اثرات آن‌ها بر هواویزها شفاف‌تر نشان داده شده است. با توجه به اینکه بر اساس مطالعات صورت گرفته مدل‌های برآورد غلظت هواویزها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس منطقه‌ای معتبرند، در این پژوهش یک مدل منطقه‌ای در سطح شهر تهران ارائه شد و نقش متغیرهای هواشناسی در مدل‌های ارائه شده تبیین گردید و طبق پدیده‌های هواشناسی به درک ارتباط بین متغیرها و غلظت آلاینده پرداخته شد. بر اساس نتایج به دست آمده از داده‌های سه ایستگاه مورد مطالعه در سطح شهر تهران و همچنین به تفکیک هریک از ایستگاه‌ها، سنجنده مودیس توانایی قابل قبولی در پایش غلظت ذرات $PM_{2.5}$ دارد. بهترین مدل، رابطه رگرسیون خطی است که متغیرهای هواشناسی مؤثر در آن شامل ساعت آفتابی، میانگین فشار بخار آب و بارش ۲۴ ساعته است. نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات You et al., (2016) و Hadjimitsis et al., Zieger (2011) و Lee et al., (2011) و مطالعات (2004)، Pahlavan که نشان‌دهنده همبستگی بالایی بین غلظت $PM_{2.5}$ ها و عمق نوری ذرات (AOD) حاصل از سنجنده‌های ماهواره مودیس همخوانی دارد و تاییدی بر نتایج اتخاذ شده است. همچنین از مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات پیشین، می‌توان ادعان کرد همان‌طور که Paciorek and Liu., (۲۰۰۹) با بررسی همبستگی آماری AOD و $PM_{2.5}$ نشان دادند، به منظور پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ ، علاوه بر AOD باید اطلاعات جنبی دیگری مانند متغیرهای هواشناسی نیز وجود داشته باشد. از آنجایی که این ذرات وارد اتمسفر می‌شوند، خارج از انتظار نیست که پدیده‌های جوی بر آن‌ها تأثیرگذار باشند. نتایج بررسی‌های Chelani (2019) نیز بموید آن است که به‌طور کلی هواشناسی ظرفیت آن را دارد که عملکرد رگرسیون چندگانه را در تخمین غلظت $PM_{2.5}$ بهبود بخشد لذا بهره‌بردن از پتانسیل‌های هواشناسی در این گونه مدل‌ها توصیه می‌شود.

علی‌رغم شرایط زمانی و اقلیمی تقریباً مشابه با پژوهش et al., (2016) Lee، همبستگی مدل ارائه شده در این مطالعه ($R^2 < 0.63$ و $RMSE < 8/4 \text{ ug/m}^3$) بیشتر از پژوهش مذکور بوده است. وجه تمایز دو مطالعه با استفاده از الگوریتم منفرد Deep Blue توسط Lee و همکاران در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ بوده است در حالی که در بررسی حاضر از الگوریتم ترکیبی Deep Blue و Dark Target استفاده شده است. براین اساس پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به نتایج مطلوب‌تر و دقت بالاتر از این دو الگوریتم به صورت ترکیبی استفاده شود.

همچنین Faraji and Sotoudeheian and Arhami (2017) و Nadi (2018) داده‌های AOD را به ترتیب در تهران و اصفهان با وضوح مکانی و تعداد ایستگاه‌های بیشتر نسبت به پژوهش حاضر بررسی کردند اما نتایج همبستگی ضعیف‌تری به دست آوردند که از جمله دلایل آن می‌توان به در نظر نگرفتن تشابه اقلیمی بین ایستگاه‌های سینوپتیک و آلودگی سنجی اشاره کرد. در واقع نتایج این پژوهش موید اهمیت تشابه در خرد اقلیم ایستگاه‌های سینوپتیک و آلودگی سنجی زمینی در بهبود کیفیت مدل‌سازی است.

در این مطالعه تأیید می‌شود که استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی روش مکمل مناسبی برای پایش غلظت $PM_{2.5}$ در کنار ایستگاه‌های آلودگی سنجی زمینی است و با توجه به خلأ آماری شبکه زمینی پایش آلودگی هوا، مقادیر $PM_{2.5}$ ، با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و مدل رگرسیون خطی قابل برآورد بوده و خلأ فوق تا حد زیادی جبران می‌شود. این ادعا توسط Sathe et al., (2019) نیز در هند مطرح شد.

نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری نشان داد در این پژوهش مدل خطی رگرسیونی که شامل متغیرهای عمق نوری هواویزها، بارش ۲۴ ساعته، میانگین فشار بخار آب و ساعت آفتابی است عملکرد بهتری داشته و برای برآورد غلظت $PM_{2.5}$ از دقت قابل قبولی برخوردارند. این امر نشانگر توانایی مناسب سنجنده مودیس در پایش آلودگی هوا است. از آنجایی که داده‌های زمینی آلودگی هوا در ساعتی مورد بررسی قرار گرفتند که سنجنده مودیس در همان زمان از منطقه مورد مطالعه عبور می‌کند، بنابراین می‌توان ادعا کرد نتایج این تحقیق قابلیت استناد بالایی در ارزیابی این سنجنده دارد. استفاده از این مدل‌ها پیچیدگی خاصی ندارد و نقش متغیرهای هواشناسی در بهبود عملکرد این مدل‌ها کاملاً مشهود است به طوری که با اضافه کردن این متغیرها نتایج بهتری حاصل گردید؛ لذا پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به نتایج بهتر برآورد غلظت $PM_{2.5}$ و PM_{10} تمرکز بیشتری بر روی متغیرهای هواشناسی صورت گیرد.

اگرچه استفاده از محصولات سنجنده مودیس نمی‌تواند جایگزین اندازه‌گیری‌های زمینی برای پایش آلودگی هوا باشد اما با توجه به توانایی‌های آن در برآورد غلظت آلاینده‌های $PM_{2.5}$ می‌توان اظهار کرد برای پایش بهتر آلودگی هوا تمرکز بیشتری بر روی این روش مورد نیاز است. دسترسی به محصولات رایگان این سنجنده آسان است و همچنین پوشش مکانی و زمانی مناسب آن موجب پایش پهنه‌ای (و نه به صورت نقطه‌ای) آلودگی هوا می‌شود. این روش می‌تواند کاستی‌های اندازه‌گیری‌های زمینی را پوشش دهد و مکمل آن باشد تا نتایج بهتری حاصل شود؛ لذا

نتایج این پژوهش باتوجه به توانایی بالای داده‌های رایگان و در دسترس سنجنده مودیس در پایش غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در شهر تهران و اهمیت پایش این آلاینده و معضل آلودگی هوا، گامی روبه‌جلو برای بهره‌بردن از علم سنجش‌ازدور در کنار داده‌های زمینی است که در نهایت منجر به پایش بسیار دقیق‌تر و به‌صرفه‌تر آلودگی هوا می‌شود. بارش ۲۴ ساعته، میانگین فشار بخار آب و ساعت آفتابی از متغیرهای هواشناسی تأثیرگذار برای مدل‌سازی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ تشخیص داده شد که در کنار عمق نوری هواپرها می‌تواند عملکرد چشمگیری داشته باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Adams, M. D. and Kanaroglou, P. S. (2016). Mapping real-time air pollution health risk for environmental management: Combining mobile and stationary air pollution monitoring with neural network models. *Journal of environmental management*, 168, 133-141.
- Al-Saadi, J., Szykman, J., Pierce, R. B., Kittaka, C., Neil, D., Chu, D. A., Remer, L., Gumley, L., Prins, E., Weinstock, L., MacDonald, C., Wayland, R., Dimmick, F., & Fishman, J. (2005). Improving National Air Quality Forecasts with Satellite Aerosol Observations, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(9), 1249-1262. Retrieved Sep 6, 2021, from
- Asl, S. Z., Farid, A., & Choi, Y. S. (2019). Assessment of CALIOP and MODIS aerosol products over Iran to explore air quality. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1-2), 117-131.
- Bilal, M., Nichol, J. E. and Spak, S. N. (2017). A new approach for estimation of fine particulate concentrations using satellite aerosol optical depth and binning of meteorological variables. *Aerosol Air Qual. Res*, 11, 356-367..
- Cao, H., Amiraslani, F., Liu, J., & Zhou, N. (2015). Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets. *Science of the Total Environment*, 502, 224-235.
- Chatterjee S, Price B. 1977. *Regression Analysis by Example*. Wiley: New York, NY.
- Chelani, A. B. (2019). Estimating $PM_{2.5}$ concentrations from satellite derived aerosol optical depth and meteorological variables using a combination model. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 847-857.
- Clarke, A. D., Collins, W. G., Rasch, P. J., Kapustin, V. N., Moore, K., Howell, S. and Fuelberg, H. E. (2001). Dust and pollution transport on global scales: Aerosol measurements and model predictions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D23), 32555-32569..
- Faraji, M. and Nadi, S. (2018). Assessment of aerosol optical depth of MODIS sensor data by using $PM_{2.5}$ meteorological data in urban area. In proceeding of 3th spatial data of technology of engineering. Khaje Nasir Toosi University of technology, Tehran. (In Farsi)
- Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. and Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5880-5892.
- Hadjimitsis, D. G., Clayton, C. R. I. and Hope, V. S. (2004). An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, 25(18), 3651-3674.
- Holben, B. N., Tanre, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Abuhassan, N., ... and Kaufman, Y. J. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D11), 12067-12097.
- Lee, H. J., Chatfield, R. B. and Strawa, A. W. (2016). Enhancing the applicability of satellite remote sensing for $PM_{2.5}$ estimation using MODIS deep blue AOD and land use regression in California, United States. *Environmental Science & Technology*, 50(12), 6546-6555.
- Levy, R. (2019). Dark Target Aerosol Retrieval Algorithm. <https://darktarget.gsfc.nasa.gov>.
- Li, S., Joseph, E. and Min, Q. (2016). Remote sensing of ground-level $PM_{2.5}$ combining AOD and backscattering profile. *Remote Sensing of Environment*, 183, 120-128.
- Lin, C., Li, Y., Yuan, Z., Lau, A. K., Li, C. and Fung, J. C. (2015). Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level $PM_{2.5}$. *Remote Sensing of Environment*, 156, 117-128.
- Liu, Z., Vaughan, M., Winker, D., Kittaka, C., Getzewich, B., Kuehn, R., ... and Hostetler, C. (2009). The CALIPSO lidar cloud and aerosol discrimination: Version 2 algorithm and initial assessment of performance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(7), 1198-1213.
- Paciorek, C. J. and Liu, Y. (2009). Limitations of remotely sensed aerosol as a spatial proxy for fine

- particulate matter. *Environmental health perspectives*, 117(6), 904-909.
- Pahlavan, A. Pahlavan, R. and Esmaeli, A. (2014). Estimating PM10 and PM2.5 in Tehran mega city using MODIS data of Terra and Aqua satellites . In: Proceedings of the first International Congress on Application of advanced models of spatial analysis (remote sensing and GIS) in land management, 24-25 Oct. Azad University, Yazd, Iran, pp.125-138. (In Farsi)
- Pranasha, T. S. and Kamra, A. K. (1997). Scavenging of aerosol particles by large water drops: 3. Washout coefficients, half-lives, and rainfall depths. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D20), 23947-23953.
- Qorbani Salkhord R, Mobasheri MR, Rahimzadehgan M. (2012) A Fast Method for Assessment of PM10 Concentration Using MODIS Images, a Case Study in Tehran. *Hakim Research Journal*, 15(2):166-177. (In Farsi)
- Qorbani Salkhord, R., Mobasheri, M. and Rahimzadehgan, M. (2012). Assessment of the MODIS Data Ability in Quantitative and Qualitative Analysis of Air Quality in Urban Area, *Journal of Climate Research*, 1(3), 61. (In Farsi)
- Rangzan, K., Zarasvandi, A., Abdolkhani, A. and Mojaradi, B. (2014). Modeling of Air Pollution using MODIS Data: Khouzestan Dust storm. *Journal of Advanced Applied Geology*, 4(4), 38-45.
- Rees, D.G. (1989). *Essential statistics*. 2nd Edn., Chapman and Hall, London.
- Sathe, Y., Kulkarni, S., Gupta, P., Kaginalkar, A., Islam, S. and Gargava, P. (2019). Application of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aerosol Optical Depth (AOD) and Weather Research Forecasting (WRF) model meteorological data for assessment of fine particulate matter (PM2. 5) over India. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 418-434.
- Sotoudeheian, S., and Arhami, M. (2017). Using linear mixed effect model to estimate ground-level PM2.5: case study for Tehran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 10 (2), 213-224. (In Farsi)
- Sun, Y. (2018). Vertical structures of physical and chemical properties of urban boundary layer and formation mechanisms of atmospheric pollution. *Chinese Science Bulletin*, 63(14), 1374-1389.
- Tian, J. and Chen, D. (2010). Spectral, spatial, and temporal sensitivity of correlating MODIS aerosol optical depth with ground-based fine particulate matter (PM2. 5) across southern Ontario. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(2), 119-128.
- Tsai, T. C., Jeng, Y. J., Chu, D. A., Chen, J. P. and Chang, S. C. (2011). Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical depth and particulate matter from 2006 to 2008. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4777-4788.
- Walton, H. A., Anderson, H. R., Mills, I. C., Katsouyanni, E., Atkinson, R., Brunekreef, B., Cohen, A., Forastiere, F., Hurley, F., Krewski, D., & Krzyzanowski, M. (2015). Quantifying the health impacts of ambient air pollutants: recommendations of a WHO/Europe project. *International Journal of Public Health*. <https://doi.org/10.1007/s00038-015-0690-y>
- You, W., Zang, Z., Zhang, L. et al. (2016). Estimating national-scale ground-level PM25 concentration in China using geographically weighted regression based on MODIS and MISR AOD. *Environ Sci Pollut Res*, 23(9), 8327-8338.
- Zheng, J., Che, W., Zheng, Z., Chen, L. and Zhong, L. (2013). Analysis of Spatial and Temporal Variability of PM10 Concentrations Using MODIS Aerosol Optical Thickness in the Pearl River Delta Region, China. *Aerosol Air Qual. Res*. 13: 862-876.
- Zhou, L., Chen, X. and Tian, X. (2018). The impact of fine particulate matter (PM2. 5) on China's agricultural production from 2001 to 2010. *Journal of Cleaner Production*, 178, 133-141.
- Zieger, P., Weingartner, E., Henzing, J., Moerman, M., de Leeuw, G., Mikkilä, J., Ehn, M., Petäjä, T., Clémer, K., van Roozendaal, M., Yilmaz, S., Frieß, U., Irie, H., Wagner, T., Shaiganfar, R., Beirle, S., Apituley, A., Wilson, K. and Baltensperger, U. (2011). Comparison of ambient aerosol extinction coefficients obtained from in-situ, MAX-DOAS and LIDAR measurements at Cabauw, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2603-2624.