

بررسی میزان مشارکت منابع تولید آلاینده‌ی ذرات معلق ریز به کمک ترکیبی از مدل‌های پذیرنده در شهر تهران

مریم زارع شهنه* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

محمد ارحامی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۵۸-۵۱، پژوهشی)

در نوشتار حاضر، سهم‌بندی منابع انتشار ذرات معلق به کمک غلظت اجزاء شیمیایی ذرات و پروفیل منابع محتمل در شهر تهران توسط مدل CMB انجام شده است. طبق نتایج به دست آمده، منابع متحرک به عنوان مهم‌ترین منبع در تولید ذرات به طور متوسط، ۵۸٪ از کل غلظت $PM_{2.5}$ را شامل می‌شوند. با اجرای مدل PCA، منبع گرد و غبار به عنوان اولین عامل ۴۹٪ از تغییرات غلظت ذرات را توصیف کرد. با ترکیب دو مدل PCA و CMB به کمک رگرسیون چندمتغیره‌ی خطی مشخص شد که عامل دوم مدل PCA با دربرگیری ۱۷٪ از تغییرات PM به‌عنوان منبع مرکب، تحت تأثیر فلزات سنگین ناشی از منابع انسانی، شامل: صنایع، ترمز ماشین و تایر خودرو، روغن‌های روانکاری خودرو است و در آن احتراق سوخت‌های سنگین با میانگین $65/1^{\circ}$ بیشترین سهم را در انتشار ذرات معلق داشته‌اند. منبع ذکر شده، اصلی‌ترین بخش مشتق شده از سوخت‌های سنگین است و پس از منبع غبار، مهم‌ترین عامل، تغییرات غلظت در دوره‌ی زمانی مورد مطالعه است.

واژگان کلیدی: آلودگی هوا، ذرات معلق ریز، مدل‌های پذیرنده، مدل ترکیبی، شهر تهران.

maryam.zare@sharif.edu
arhami@sharif.edu

۱. مقدمه

آلی و معدنی، نمک‌های سولفات و نیترات، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ی (PAHs) و فلزات (شبه فلزات) نیز در میزان سمیت آن‌ها اثر می‌گذارد.^[۱] ذرات معلق از بخش‌های مختلفی، همچون: کربن آلی، کربن معدنی و کربنات‌ها تشکیل شده‌اند که همگی آثار سوء بر محیط زیست دارند.^[۲]

اولین گام در جهت به کارگیری راهکارهای کنترلی در زمینه‌ی آلودگی هوا، شناسایی کامل ترکیب‌های آلاینده‌هاست. داشتن یک بانک اطلاعاتی کامل در مورد ترکیب‌های اصلی موجود در هوا و همچنین غلظت و روند تغییرات آن‌ها در طول سال می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار مسئولان سیاست‌گذار قرار دهد. بیشتر متخصصان دخیل در بحث آلودگی هوا بر آثار سوء ذرات معلق در سلامت انسان اتفاق نظر دارند.^[۳] با وجود این، همه‌ی ذرات معلق تولید شده از منابع مختلف، اثر یکناختی در سلامت انسان ندارند. امروزه با توجه به آمارهای جهانی، ذرات معلق با قطر آئروپنایمیکی کوچک‌تر از $2.5/5$ میکرومتر ($PM_{2.5}$)، یکی از مهم‌ترین آلاینده‌ها و عامل بیماری‌های تنفسی، قلبی و عروقی به‌شمار می‌آیند.^[۴]

یکی از راه‌های شناسایی و مطالعه‌ی آثار منفی ذرات معلق در محیط زیست، شناسایی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها به کمک آنالیز شیمیایی است. اگر سمیت ذرات را بتوان به منابع مشخصی از ذرات معلق یا ترکیب‌های شیمیایی ارتباط داد،

امروزه آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی شهرهای بزرگ دنیا است. رشد جمعیت شهرنشین، توسعه‌ی صنعت و افزایش ترافیک در داخل و اطراف شهرها منجر به افزایش انتشار آلاینده‌ها و تشدید مشکل مذکور در شهرها شده است. آلودگی هوا وجود یک یا چند آلاینده در هوای آزاد است که کمیت‌ها، ویژگی‌ها و زمان ماند آن‌ها برای زندگی و سلامت انسان، گیاهان و حیوانات مضر باشند یا به طور غیرقابل قبولی مخل استفاده‌ی راحت از زندگی شود.^[۱]

ذرات معلق^۱، مجموعه‌ی تمامی جامدات و مایعات معلق در هواست که به صورت کلوئید پراکنده شده‌اند. ذرات معلق مستقیماً توسط منابع طبیعی (آتشفشان‌ها، طوفان‌های شن و ماسه و آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع و ...) و یا صنایع ساخت بشر (دود خروجی از آگروزاتومبیل‌ها و دود حاصل از سوخت کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها و ...) وارد هوای کره می‌شوند و یا در هوای کره در اثر ترکیب با مولکول‌های موجود در هوا به‌وجود می‌آیند.^[۱]

علاوه بر اهمیت اندازه‌ی ذرات معلق، ترکیب شیمیایی ذرات معلق (شامل کربن

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۵، پذیرش ۱۴۰۰/۴/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2021.57146.2889

مدیریت آلودگی هوا در منطقه‌ی موردنظر بسیار جامع‌تر خواهد بود. یکی دیگر از مزایای شناسایی ساختار ذرات معلق و برآورد سهم انتشار هر منبع، این است که این قبیل مطالعات، کمک شایانی به مدیران در جهت تصمیم‌گیری و تدوین راهکارهای کنترلی خواهد کرد.^[۷]

امروزه به منظور تعیین سهم منابع انتشار آلاینده‌های هوا از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها، استفاده از مدل‌های پذیرنده^۲ است.^[۸] مدل‌های پذیرنده، معادلات ریاضی یا آماری هستند که از اطلاعات فیزیکی و شیمیایی گازها و ذرات در منبع و پذیرنده استفاده می‌کنند و میزان مشارکت کمی منابع آلاینده در یک پذیرنده را تخمین می‌زنند.^[۹] در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌یی در سراسر جهان در زمینه‌ی سهم‌بندی منابع با استفاده از مدل‌های پذیرنده انجام شده است. در مدل پذیرنده به کمک غلظت اجزاء شیمیایی ذرات معلق و با در نظر گرفتن پیش‌فرض‌هایی در ارتباط با شرایط ایستگاه و منابع محتمل در منطقه، میزان مشارکت منابع تعیین می‌شود.^[۱۰] آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۳ یک ابزار مطلوب برای مطالعه‌ی داده‌های با ابعاد بزرگ است. نخستین بار پیرسون (۱۹۰۱) موفق به معرفی مدلی به عنوان یک روش تحلیل چندمتغیره جهت کاهش ابعاد و متغیرهای داده‌ها شد. نظریات پیرسون با توجه به اینکه ۵۰ سال قبل از گسترش اولین رایانه‌ها بوده است، بسیار قابل ملاحظه و حائز اهمیت است.^[۱۱] بعدها، هتلینگ (۱۹۳۳)، عمده‌ی تلاش خود را روی یافتن پایه‌های جبری روش PCA گذاشت و نهایتاً مطالعات او منجر به جرقه‌ی ایده‌ی آنالیز مؤلفه‌های اصلی شد. ایده‌ی اصلی روش PCA، کاهش ابعاد داده‌هایی است که تعداد زیادی متغیر وابسته و مرتبط با هم دارند. در مدل PCA به کمک غلظت اجزاء شیمیایی ذرات معلق و بدون هیچ پیش‌فرضی در زمینه‌ی شرایط ایستگاه و یا منابع تولید آلاینده، سهم‌بندی منابع در محیط برنامه‌های متن باز انجام می‌شود.^[۱۲] همچنین، مدل تعادل جرم شیمیایی (CMB)^۴ یکی از مدل‌های پذیرنده و پرکاربردترین آن‌ها طی دو دهه‌ی اخیر است. در سال ۱۹۷۳، فرنلاندر برای نخستین بار حل به روش کمینه‌ی مربعات وزنی را برای مدل اخیر معرفی کرد که کمک می‌کرد تخمین بهتری از عدم قطعیت‌های مرتبط با مشارکت منابع حاصل شود.^[۱۳] در مدل‌های پذیرنده علاوه بر غلظت‌های اندازه‌گیری شده به پروفیل انتشار منابع^۵ نیز نیاز است. واتسون توانست به کمک مدل CMB، پروفیل منبع، یعنی کسر جرمی یک جزء شیمیایی در انتشار از هر منبع را شناسایی کند. در پژوهش واتسون، داده‌های کیفیت هوا که در محل پذیرنده اندازه‌گیری شده بودند، به همراه عدم قطعیت‌های مرتبط به عنوان داده‌های ورودی و درصد مشارکت هر منبع در آلودگی به عنوان خروجی شناخته شدند.^[۱۳] در بیست سال گذشته، مطالعات شاور به عنوان برجسته‌ترین مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی منشایابی آلاینده‌های هوا به کمک غلظت اجزاء شیمیایی به کار رفته در آن، مورد استفاده‌ی سایر پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفته است.^[۱۴-۱۹] در سال ۲۰۰۹ و بعد از آن، پژوهشگران از روش ترکیبی و استفاده‌ی همزمان از مدل‌های پذیرنده، جهت تخمین دقیق‌تر منابع تولید ذرات و بهره‌گیری بیشتر از نقاط قوت مدل‌های پذیرنده بهره جستند.^[۲۰-۲۱] نتایج مطالعات اخیر در زمینه‌ی به کارگیری چند مدل پذیرنده به صورت هم‌زمان، حاکی از آن است که با این اقدام، امکان شناسایی سهم مشارکتی منابع به صورت دقیق‌تر فراهم می‌شود و سهم مشارکتی منابع ناشناس و همچنین خطای مدل‌سازی کاهش می‌یابد.^[۲۱]

ترکیب‌های تشکیل‌دهنده‌ی ذرات و سهم‌بندی منابع تولید آلاینده‌ی ذرات معلق به کمک مجموعه‌یی از مدل‌های پذیرنده، ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر به کمک اندازه‌گیری‌های میدانی و آزمایشگاهی در طی یک دوره‌ی یک ساله، ساختار ذرات معلق شناسایی و میزان مشارکت منابع مختلف تولید آن‌ها در شهر تهران تعیین شده است. در این راستا، اقداماتی، از جمله اندازه‌گیری و نمونه‌برداری از ذرات معلق ریز طی یک دوره‌ی یک ساله در یک ایستگاه در شهر تهران صورت گرفته است. در بررسی حاضر، تلاش شده است به کمک اندازه‌گیری‌های میدانی، تغییرات مکانی^۶ و زمانی^۷ آلاینده‌ی PM_{۲.۵} و ترکیب‌های شیمیایی موجود در آن در شهر تهران برای دوره‌ی مدنظر مطالعه شود. همچنین سهم منابع مختلف انتشار ذرات معلق PM_{۲.۵} در شهر تهران با به کارگیری مدل‌های پذیرنده که توضیح آن در ادامه ارائه شده است، محاسبه و بررسی شده‌اند.

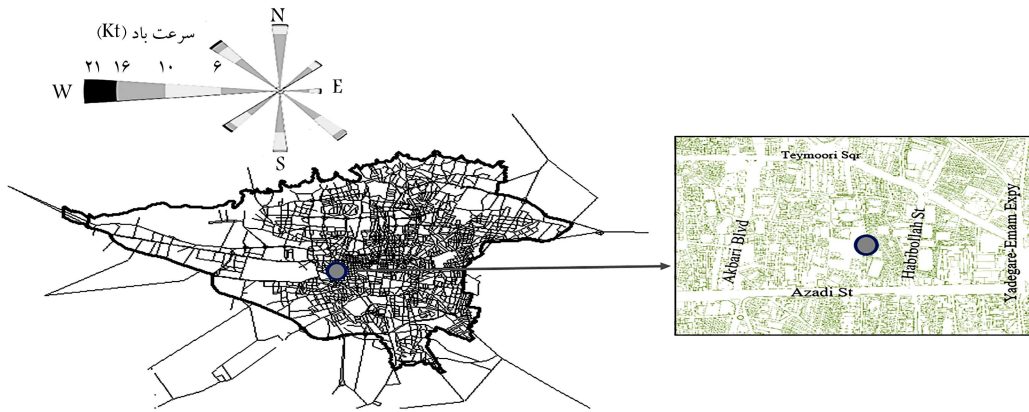
۲. روش انجام کار

۲.۱. ایستگاه نمونه‌برداری

شهر تهران در موقعیت جغرافیایی ۲۵° ۵۱' شرقی و ۴۱° ۳۵' شمالی بر روی دامنه‌ی جنوبی رشته کوه البرز واقع شده است. باد غالب تهران از جهت غرب می‌وزد، در نتیجه کوه‌های بخش شمالی و شرقی تهران در شرایطی که باد سرعت کافی نداشته باشد، مانع خروج آلاینده‌ها از شهر می‌شوند. ایستگاه شریف در غرب شهر تهران و در مجاورت خیابان آزادی که یکی از پرتددترین خیابان‌های شهر تهران است، مستقر شده است. منابع عمده‌ی اطراف محدوده‌ی دانشگاه را مناطق مسکونی تشکیل داده‌اند و کمتر منابع صنعتی تولید آلودگی در اطراف آن وجود دارد. ذرات معلق و محتویات کربن آلی و معدنی و دیگر آلاینده‌های منتشر شده در هوای اطراف ایستگاه شریف می‌تواند ناشی از منابع متداول شهری تولید آلاینده، از قبیل: وسائط نقلیه‌ی بنزینی و دیزلی، گاز طبیعی خانگی و ذرات گرد و غبار موجود در اتمسفر باشد. همچنین می‌تواند نشأت گرفته از پایانه‌ی حمل‌ونقل واقع در میدان آزادی و حجم قابل توجه عبور و مرور وسائط نقلیه‌ی اطراف میدان آزادی و خیابان آزادی باشد. به‌طور کلی بافت اطراف ایستگاه شریف از نوع مسکونی و اداری است. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده در ارتباط با نحوه‌ی تغییرات غلظت ذرات معلق ریز در ایستگاه‌های مختلف شهر تهران، ایستگاه دانشگاه شریف به علت قرار گرفتن در موقعیت متداول شهری، مطابقت بالایی با میانگین غلظت ذرات معلق در شهر تهران دارد و می‌توان به وضعیت منابع ایستگاه دانشگاه صنعتی شریف به عنوان معیاری از وضعیت منابع در سراسر شهر تهران اشاره کرد. در ایستگاه شریف، نمونه‌برداری به مدت ۱ سال (۲۰۱۵ - ۲۰۱۴) به صورت هر ۶ روز ۱ بار انجام شده و غلظت المان‌های آلی و معدنی و یون‌های محلول در آب موجود در ذرات معلق به دست آمده است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی ایستگاه شریف و نمودار گل باد محدوده‌ی مورد بررسی مشاهده می‌شود.

۲.۲. آنالیزهای شیمیایی

طبق مطالعات صورت گرفته، سهم‌بندی و شناسایی منابع تولید آلاینده‌های هوا با داشتن غلظت ترکیب‌ها و مؤلفه‌های آن امکان‌پذیر است. به‌طور کلی آنالیزهای انجام شده روی ذرات معلق به چند دسته تقسیم می‌شوند. در دسته‌ی اول به کمک آنالیزهای جرمی مختلف، جرم فیلترهای نمونه‌برداری که حاوی ذرات معلق



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه مستقر در دانشگاه صنعتی شریف و نمودار گل باد محدوده‌ی مورد بررسی.

در فازهای مختلف است. مدل‌های پذیرنده از اندازه‌گیری ترکیب‌های شیمیایی انباشته شده بر روی نمونه استفاده می‌کنند و لذا، در بیشتر موارد، راه قابل اطمینانی جهت تعیین سهم منابع آلاینده هستند. بعضی از مدل‌های پذیرنده براساس آنالیز روابط بین غلظت اندازه‌گیری‌شده‌ی نمونه‌های شیمیایی (با فرض اینکه ترکیب‌های مختلف از منابع یکسان تولید می‌شوند) عمل می‌کنند. در ارزیابی‌های اولیه در یک ناحیه، استفاده از مدل‌های آماری موجب شناسایی بهتر منابع آلودگی می‌شود. در مرحله‌ی دوم ارزیابی، مدل‌های خطی آماری می‌توانند دقیقاً درصد مشارکت هر منبع را در تولید ذرات معلق موجود در هوا مشخص کنند.^[۹]

ترکیب‌های زیادی هستند که از آن‌ها به عنوان ردیاب در سهم‌بندی منابع یاد می‌شود. وجود مواد مذکور در پروفیل‌های شیمیایی مورد استفاده، موجب افزایش دقت روش‌های آماری به‌کار برده شده برای سهم‌بندی منابع می‌شود. برای یافتن درصد مشارکت منابع مختلف براساس پروفیل منابع، باید از روش‌های آماری استفاده کرد. در مدل‌های پذیرنده فرض می‌شود که شدت هر جزء شیمیایی در پذیرنده متناسب با ترکیب خطی یک سری مقادیر از گونه‌های شیمیایی است.^[۱۲] رابطه‌ی ۱، چگونگی تفسیر مدل‌های خطی پذیرنده را شرح می‌دهد:

$$X_j = \sum_k G_k \times F_{kj} + E_j \quad (1)$$

که در آن، G_k غلظت ذرات منتشر شده از منبع K در ایستگاه پذیرنده ($\mu g/m^3$)، X_j غلظت هر جزء شیمیایی در ایستگاه پذیرنده ($\mu g/m^3$)، F_{kj} نسبت جزء شیمیایی به کل ذرات منتشر شده از منبع K و E_j خطای مدل ($\mu g/m^3$) است.^[۱۳]

۱.۳.۲. مدل تعادل جرم شیمیایی

همان‌گونه که ذکر شد، شاید پرکاربردترین مدل از میان مدل‌های خطی آماری، مدل CMB است. مدل CMB به کمک روش کمینه‌ی مربعات وزنی جهت سهم‌بندی منابع آلودگی هوا استفاده می‌شود. با توجه به رابطه‌ی ۱ و با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی غلظت اجزاء شیمیایی $\langle X \rangle$ و پروفیل انتشار منابع $[F]$ مقدار مشارکت منابع $\langle G \rangle$ را به نحوی انتخاب می‌کنند که خطا کمینه شود.^[۱۴] با حل رابطه‌ی ۱، روش کمینه‌ی مربعات وزنی، رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\langle G \rangle = \langle X \rangle [W] [F] ([F]^T [W] [F])^{-1} \quad (2)$$

جدول ۱. آنالیزهای انجام گرفته بر روی نمونه‌ها.

خروجی مدنظر	نوع فیلتر	نام آنالیز
غلظت کربن آلی و معدنی	کوارتز	TOT
غلظت ترکیبات آلی	کوارتز	GCMS
غلظت یون‌های محلول در آب	کوارتز	IC
غلظت فلزات	تفلون	SF-ICP
ظرفیت اکسایش	تفلون	ROS

هستند، به دست می‌آید. به منظور محاسبه‌ی غلظت کل $PM_{2.5}$ ، فیلترهای تفلون به وسیله‌ی ترازوی با دقت 0.001 میلی‌گرم، قبل و بعد از نمونه‌برداری تحت شرایط کنترل شده (دمای 2 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 2 ± 30 درصد) توزین می‌شوند. پس از چند بار توزین و محاسبه‌ی خطای استاندارد برای آن‌ها، نتیجه به عنوان جرم کل $PM_{2.5}$ اعلام می‌شود. دسته‌ی دوم آنالیزها برای استخراج غلظت گونه‌های مختلف موجود در ذرات معلق هوا به کار می‌رود. معمولاً یک شناخت اولیه از ماده برای طراحی آزمایش‌ها و محاسبه‌های مربوط به سهم‌بندی موردنیاز است. همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، آنالیز شیمیایی فیلترهای حاوی ذرات معلق به کمک روش‌های TOT ، $GCMS$ ، IC ، $SF-ICPMS$ و ROS به ترتیب برای استخراج غلظت کربن آلی و معدنی، ترکیب‌های آلی، یون‌های محلول در آب، فلزات و ظرفیت اکسایش موجود در $PM_{2.5}$ بسیار کارآمد و مناسب است.^[۱۲،۱۴] آنالیزهای اخیر بر روی فیلترهایی از جنس تفلون یا کوارتز، که حاوی ذرات معلق PM هستند، انجام شده است. در جدول ۱، آنالیزهای شیمیایی موجود برای تحلیل ذرات معلق و جنس فیلترهای موردنظر، به طور خلاصه ارائه شده است.

۳.۲. مدل‌های پذیرنده

مدل‌های پذیرنده، روش‌های ریاضی برای کمی‌سازی سهم‌بندی منابع ترکیب‌های نمونه‌ها یا اثر منابع هستند. اصول اولیه و اساسی مدل پذیرنده (با در نظر گرفتن غلظت جرمی)، آنالیز موازنه‌ی جرمی است که می‌تواند به شناسایی و سهم‌بندی منابع آلاینده در اتمسفر کمک کند.^[۱۴] طراحی راهبردهای مناسب برای شناسایی و کنترل ذرات معلق در هوا نیازمند استفاده از روش‌های مختلف سهم‌بندی منابع

که در آن، $[W]$ ماتریس قطری به شکل رابطه‌ی ۳ است:

$$w_{jj} = \frac{1}{\sigma_{xj}^2} \quad (3)$$

که در آن، σ_{xj} عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری‌های مرتبط با جزء j است اخیراً در ماتریس $[W]$ عدم قطعیت مربوط به پروفیل منبع نیز لحاظ می‌شود (رابطه‌ی ۴):

$$w_{jj} = \frac{1}{\sigma_{xj}^2 + \sum_{k=1}^q \sigma_{Fjk}^2 g_k} \quad (4)$$

که در آن، σ_{Fjk} عدم قطعیت مربوط به پروفیل منبع برای جزء j منتشر شده از منبع k و g_k مشارکت تخمین زده شده‌ی منبع k است.^[۲۵]

۲.۳.۲. مدل آنالیز مؤلفه‌های اصلی

آنالیز مؤلفه‌های اصلی یا همان روش PCA، یک ابزار محبوب برای مطالعه‌ی داده‌های با ابعاد بزرگ است. مدل مذکور مانند مدل تعادل جرم شیمیایی است، با این تفاوت که $[F]$ و $[G]$ همزمان مجهول هستند. در مدل PCA، از روش کمینه‌ی مربعات باقیمانده‌ها استفاده می‌شود. رابطه‌ی ۵، شیوه‌ی عملکرد مدل اخیر را شرح می‌دهد که در آن، e_{ij} باقیمانده‌ی جزء j برای نمونه‌ی i است.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (e_{ij}/w_{ij})^2 \quad (5)$$

مدل PCA قدیمی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش تحلیل چندمتغیره^۸ و جزء مدل‌های خطی شکسته‌ی آماری است. مدل اخیر، معادله‌ی ۱ را به‌طوری حل می‌کند تا تابع Q را در معادله‌ی ۵ کمینه سازد.^[۹]

۳.۳.۲. مدل ترکیبی

هر مدل پذیرنده‌ی، نقاط قوت و ضعف مشخصی دارد. به عنوان مثال، در مدل‌های PCA و PMF فرض بر آن است که تمامی منابع دخیل در تولید آلاینده شناسایی می‌شوند، در حالی که دو مدل مذکور، در جداسازی برخی عوامل از هم (منابع) دقت لازم را ندارند و گاهی به‌علت تشابه در پروفایل منابع، از یک عامل دو یا چند منبع استخراج می‌شود.^[۲۰] همچنین در مدل CMB احتمال مشارکت منفی منبع و از آن مهم‌تر، مشکل منبع ناشناخته و گاهی ناسازگاری و عدم تطبیق وجود دارد.^[۱۰] از این رو در مطالعه‌ی حاضر، از مدل ترکیبی جهت بهره‌گیری بیشتر از نقاط قوت مدل‌های پذیرنده استفاده شده است. مدل‌های PCA و PMF به هیچ دانش اولیه‌ی در مورد تعداد منبع و ترکیب آن‌ها احتیاج ندارند. آن‌ها به کمک المان‌های ردیاب، هر عامل و منبع را شناسایی می‌کنند. در حالی که مدل CMB با به‌کارگیری اطلاعات منبع، نتایج نسبتاً دقیق‌تری به‌دست می‌آورد.^[۱۰]

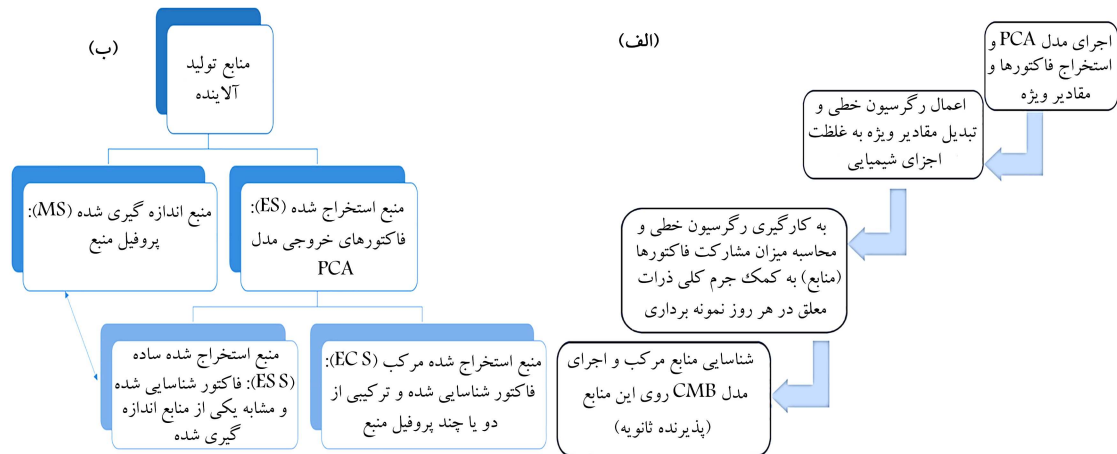
علاوه بر این، در واقعیت فرض‌های حاکم بر مدل CMB بسیار سخت‌گیرانه است و تمام آن‌ها به‌وقوع نمی‌پیوندند. این امر باعث ناپایداری^۹ مدل در اجرا می‌شود. دو علت عمده‌ی مشکل اخیر عبارت‌اند از: ۱. در حالی که مدل به همبستگی^{۱۰} حساس هست، پروفایل برخی منابع در موقعیت‌های واقعی بسیار به هم شبیه است. ۲. اگر دو یا چند منبع با ترکیب‌های پروفایل مشابه در سهم بندی حضور داشته باشند، ممکن است مدل نتایج منفی برای مشارکت برخی از آن‌ها در نظر بگیرد. وجود منبع ناشناخته (که غالباً منبع کم اهمیتی است) و پروفایل منبع غیردقیق، مشکل همبستگی را جدی‌تر و حادتر می‌کند. بنابراین مطالب ذکر شده، اگر داده‌های

کلی (پذیرنده‌ی اصلی) به عنوان ورودی مدل CMB انتخاب شوند، استخراج نتایج کامل و منطقی کار دشواری به‌نظر می‌رسد. برای بهبود نتایج می‌توان از پروفایل منابع دقیق‌تر که به‌صورت میدانی برای سایت موردنظر تدوین شده است و یا از مدل ترکیبی^{۱۱} استفاده کرد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، مدل CMB برای اجرا به پروفیل‌های منابع نیاز دارد. یکی از بهترین روش‌ها، در شرایطی که پروفیل منبع برای سایت موردنظر محاسبه و تعیین نشده باشد، این است که ابتدا مدل‌های PCA یا PMF برای داده‌های موجود اجرا و سپس خروجی آن‌ها به‌عنوان ورودی به مدل CMB داده شود.^[۲۰]

در روش اخیر، پروفیل منبع که به‌عنوان ورودی به مدل CMB وارد می‌شود، به عنوان منبع اندازه‌گیری شده^{۱۲} و عواملی که خروجی مدل‌های PCA یا PMF هستند، به‌عنوان منبع استخراج شده^{۱۳} نام‌گذاری می‌شوند. اگر از بین عوامل شناسایی شده، عاملی به فرم یک پروفیل منبع (منبع اندازه‌گیری شده) باشد، منبع استخراج شده‌ی مذکور از نوع ساده^{۱۴} و اگر ترکیبی از دو یا چند پروفیل منبع باشد، از نوع مرکب^{۱۵} است.^[۲۰]

در مرحله‌ی اول، داده‌های کلی غلظت گونه‌ها^{۱۶} توسط مدل‌های PCA یا PMF آنالیز می‌شوند. خروجی مرحله‌ی اول، درصد مشارکت و پروفیل منابع ES-Source و EC-Source است. همچنین، همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، بخشی از مشارکت‌ها ناشناخته باقی می‌ماند، که به آن منبع ناشناخته اطلاق می‌شود. در مرحله‌ی دوم، EC-Source به عنوان پذیرنده‌ی جدید (پذیرنده‌ی ثانویه) به مدل CMB وارد می‌شود. لازم به ذکر است اطلاعات جزئی مانند: تعداد منابع، دسته‌بندی منابع و ...، در مورد پتانسیل درصد مشارکت منابع در EC-Source از اطلاعات دنیای حقیقی به‌دست می‌آید. به منابع اشاره شده‌ی محتمل موجود در پذیرنده‌ی ثانویه، زیر - منبع اندازه‌گیری شده^{۱۷} گفته می‌شود. در نهایت، با جمع‌بندی نتایج دو مرحله‌ی اخیر (درصد مشارکت ES-Source و Msub-source)، نتیجه‌ی نهایی مدل ترکیبی حاصل می‌شود. با به‌کارگیری مدل ترکیبی و استخراج منابع ES-Source و حذف آن‌ها در مرحله‌ی بعد، پذیرنده‌ی ثانویه ساده‌تر و امکان تحلیل و بررسی عمیق‌تری فراهم می‌شود. در واقع تعداد منابع مشارکت‌کننده در پذیرنده‌ی ثانویه (مرحله‌ی دوم) با توجه به قیاس آن‌ها با تعداد منابعی که در پذیرنده‌ی اصلی مشارکت دارند، کمتر می‌شود. از طرفی درصد سهم منابع ناشناخته کمتر می‌شود (در مدل CMB فرض بر این بود که تمامی منابع شناسایی می‌شوند، اما در واقعیت این‌طور نبود). منابع ناشناخته همان منابعی هستند که در فایل محتوی پروفایل منابع نیامده‌اند و باعث ناسازگاری و عدم تطبیق منبع و پذیرنده می‌شوند. اما با روش اشاره شده، منابع ناشناخته از پذیرنده‌ی ثانویه حذف و پذیرنده‌ی ثانویه و زیر - منابع آن تطبیق بیشتری پیدا می‌کنند.^[۲۱] در شکل ۲، فرایند کلی مدل‌سازی ذکر شده و نحوه‌ی تفکیک منابع تولید آلاینده در مدل ترکیبی مشاهده می‌شود.

به منظور ارتباط بین نتایج PCA و CMB لازم است روی خروجی مدل PCA پردازش‌هایی انجام شود تا خروجی آن متناسب با ورودی مدل CMB شود.^[۲۱] از این رو از رگرسیون چندمتغیره‌ی خطی به منظور محاسبه‌ی درصد مشارکت عوامل به‌دست آمده از PCA و میزان غلظت مشارکتی هرگونه شیمیایی در عوامل مختلف استفاده می‌شود.^[۲۲] به بیان دیگر در پژوهش حاضر، از تلفیق رگرسیون خطی چندگانه با تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور بهره‌گیری از مزایای هر دو استفاده شده است. استفادی بهتر از رگرسیون خطی چندگانه، مستلزم ورود متغیرهای مهم و تأثیرگذار استفاده‌شده در آن است. برای تعیین بهترین مقادیر پارامترهای رگرسیون خطی چندگانه معمولاً از روش‌های کاهش بعد داده‌های نظیر



شکل ۲. الف) خلاصه‌ی از نحوه‌ی مدل‌سازی، ب) نحوه‌ی تفکیک منابع در مدل ترکیبی.

استفاده می‌شود. به همین منظور در مطالعه‌ی حاضر از PCA به عنوان یک روش بهینه‌سازی در الگوریتم ترکیبی استفاده شده است. با این روش متغیرهای مستقل اولیه به مؤلفه‌های جدید و مستقل (بدون همبستگی) تبدیل و سپس از مؤلفه‌های مذکور به جای متغیرهای اولیه استفاده می‌شود. مؤلفه‌های جدید، ترکیبی خطی از متغیرهای اولیه هستند.^[۲۰] در فصل بعد، ابتدا مدل رگرسیونی تشریح و سپس عوامل چندگانه (پروفیل منبع مرکب یا همان پذیرنده ثانویه) وارد مدل CMB شده‌اند.

۳. نتایج به دست آمده

همان‌طور که در بخش پیش اشاره شد، در مدل ترکیبی از خروجی مدل PCA به عنوان ورودی مدل CMB استفاده می‌شود. اساس کار روش PCA بر مبنای شناسایی مقادیر و بردارهای ویژه است. هدف مدل ترکیبی، توصیف بیشینه‌ی تغییرپذیری مجموعه‌ی داده‌ها (غلظت گونه‌های شیمیایی) توسط کمترین تعداد از عوامل است. عوامل ذکر شده، منعکس‌کننده‌ی منابع تولیدکننده‌ی آلاینده‌ی موردنظر هستند. در پژوهش حاضر، ۵۸ گونه‌ی شیمیایی شامل فلزات (شبه فلزات)، OC، EC و یون‌های محلول در آب، به عنوان متغیر در مدل استفاده شده‌اند. پس از وارد کردن غلظت اجزاء شیمیایی در روزهای نمونه‌برداری به مدل، مدل PCA اقدام به شناسایی عوامل اصلی و مؤثر می‌کند. لازم به ذکر است عوامل تخصیص‌یافته فقط بیانگر منابع شناسایی شده نیستند، بلکه ممکن است ترکیبی از منابع اخیر بین عوامل موجود باشند. منابع شناسایی شده براساس پروفایل‌های منبع و حضور گونه‌های نشانگر ذکر شده انتخاب شده‌اند. بعد از اجرای مدل، ۵ عامل براساس بردارهای ویژه و قابلیت تفسیرپذیری باقی ماندند (بردارهای ویژه‌ی بزرگ‌تر از ۱ برای ۵ عامل اول مشاهده شده است). عامل ذکر شده بیانگر ۸۱٪ از واریانس کل در مجموعه‌ی داده‌ها بودند. در جدول ۲، نتایج مربوط به اجرای مدل روی غلظت اجزاء شیمیایی ذرات ارائه شده است. عامل ۱ با داشتن سهمی در حدود ۴۸٪ از تغییرات، معرف منبع خاک و پوسته‌ی زمین است. در عامل اخیر، عناصر متداول در پوسته‌ی خاک همچون Ca و Al، Fe و نیز عناصر کمیاب در پوسته‌ی زمین مانند La، Eu، Dy حضور دارند. با اینکه تمامی المان‌های ذکر شده ردیاب خاک هستند، جهت بررسی دقیق‌تر اثر منبع خاک و پوسته‌ی زمین در المان‌های کمیاب پوسته‌ی زمین، ضریب همبستگی (R^2) بین عناصر مذکور و گرد و غبار به دست آمده در قسمت‌های قبلی، محاسبه

و مقدار ضرایب همبستگی بیش از ۹۵٪ به دست آمده است که این امر نشان می‌دهد عناصر اشاره شده فقط به منبع خاک اشاره دارند.^[۲۱] عامل ۲ که ۱۷٪ از تغییرات PM را شامل می‌شود، عمدتاً تحت تأثیر فلزات سنگین، شامل Ni، Sb، Ag، Cl، Ti، Pb، Sn، Cu، Rh، Cd، As، شامل است که به طور عمده از منابع انسانی و به‌طور گسترده‌ی صنایع، ترمز ماشین و تایر خودرو، روغن‌های روانکاری خودرو و حتی از انواع برخی سوخت‌های سنگین (مانند نفت کوره) منتشر می‌شود. عامل ۳ که ۷٪ از تغییرات ذرات معلق را شامل می‌شود، شامل کربن آلی است که عمدتاً از سوخت و ذرات ثانویه منتشر می‌شود. یون‌هایی که با WSOC و WIOC همبستگی دارند (NH_4^+ ، NO_3^- و SO_4^{2-})، نشان‌دهنده‌ی ذرات ثانویه‌ی هستند که از گازهای واکنش‌دهنده^{۱۸} تشکیل و از منابع متحرک منتشر می‌شوند.

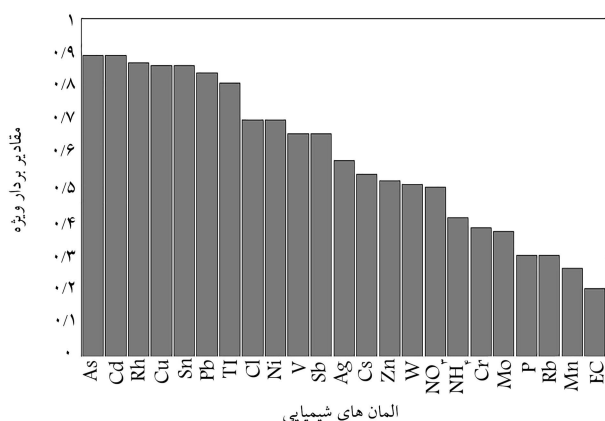
همچنین ۴٪ از تغییرات ذرات معلق ریز مربوط به عامل ۴ است که عمدتاً تحت تأثیر فلزات سنگین Ni، Zn، Mo، Pt، V از واریانس را توضیح می‌دهد، به طور عمده تحت تأثیر کربن معدنی قرار دارد و به همین ترتیب با منابع متحرک مرتبط است. فلزات سنگین مانند Ba، با سایش ترمز ناشی از منابع متحرک مرتبط هستند.^[۲۶]

$$PC_1 = 0.918(Al + Si + Y + La + Eu + Dy + Ho) + 0.917(Sc + Ti + Ce + Pr + Nd + Sm + Yb + Lu + Th) + 0.96(Fe + Co) + 0.95Mg + 0.94U + \dots \quad (6)$$

به منظور بررسی پیش فرض نرمال بودن توزیع خطای باقیمانده‌های مدل رگرسیون، از آزمون دوربین واتسون استفاده شده است. در صورتی که مقدار آماری ذکر شده

جدول ۲. نتایج خروجی مدل PCA.

فاکتور	شناسایی شده	
	منبع	المان
PC۱	المان‌های خاکی (موجود در پوسته زمین)	Al, Si, Y, La, Eu, Dy, Ho, Sc, Ti, Ce, Pr, Nd, Sm, Yb, Lu, Th, Fe, Co, Mg, U, Nb, Pd, Sr, Rb, P, Cr, Ba, Li, Mn, Cs, W, ws Na, ws Ca, Mo, SO ₄ ²⁻
PC۲	سوخت های سنگین احتراق، سایش فاز و پوشش تایر، روغن های روانکاری و صنایع محلی	As, Cd, Rh, Cu, Sn, Pb, Tl, Cl, Ni, V, Sb, Ag, Cs, Zn, W, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
PC۳	وسایل نقلیه سبک	WIOC, NH ₄ ⁺ , ws K, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , WSOC
PC۴	صنایع محلی	Pt, Mo Zn, V, Ni
PC۵	وسایل نقلیه سنگین	EC, ws Ca, ws Na, Ba, WSOC



شکل ۳. مقادیر بردار ویژه برای عامل دوم آنالیز PCA.

دوم یک منبع مرکب و متشکل از چند ریزمنبع است. طبق نتایج به دست آمده از خروجی مدل PCA، عامل ۱ شامل المان‌های موجود در پوسته‌ی خاک است و یک منبع ساده به شمار می‌آید. در حالی که عامل ۲ که ۱۷٪ از تغییرات PM را شامل می‌شود، تحت تأثیر فزات سنگین ناشی از منابع انسانی، شامل: صنایع، ترمز ماشین، تایلر خودرو، روغن‌های روانکاری خودرو و حتی از انواع برخی سوخت‌های سنگین (مانند نفت کوره) منتشر می‌شود.^[۳] با توجه به حضور منابع متعدد در عامل ۲، عامل اخیر به عنوان پذیرنده‌ی جدید به مدل CMB معرفی و برای منابع محتمل، شامل: صنعت، ترمز ماشین، تایلر خودرو، روغن‌های روانکاری خودرو، و نفت کوره تحلیل شده است. در شکل ۳، پروفیل به دست آمده برای عامل ۲ مشاهده می‌شود. نتایج مدل CMB برای عامل ۲ که شامل داده‌های ورودی غلظت اجزاء شیمیایی موجود در عامل ۲ به دست آمده از یک مرحله‌ی رگرسیون روی جرم اجزاء و مقادیر ویژه و نیز پروفایل منابع دخیل در عامل اخیر، شامل: سایش لاستیک و

بین ۲/۵ - ۱/۵ باشد، نشان دهنده‌ی نرمال بودن توزیع خطاست که در مدل به دست آمده مقدار آن ۱/۹ به دست آمده است که نشان دهنده‌ی نرمال بودن توزیع خطاست. همچنین جهت بررسی پیش فرض عدم هم خطی (استقلال خطاها) از آماره‌ی تورم واریانس استفاده شده است که مقدار ایده‌آل آن ۱ و مقادیر بیشتر از ۱، نشان دهنده‌ی مشکل ساز بودن هم خطی بین متغیرهای مستقل در مدل رگرسیون است. پس از تأیید نرمال بودن توزیع مقادیر خطا و رفع مشکل همبستگی در متغیرهای مستقل، مدلی مناسب با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه برای تعیین مهم‌ترین متغیرهای دخیل در جرم ذرات معلق پیشنهاد شده است. به عبارت دیگر، به کمک رگرسیون چندمتغیره‌ی خطی، غلظت مشارکتی هرگونه شیمیایی (غلظت هر المان در عوامل به دست آمده) محاسبه می‌شود.

سپس، با به کارگیری مجدد رگرسیون و با داشتن جرم ذرات معلق، میزان مشارکت هر یک از عوامل به دست آمده از آنالیز PCA در هر روز نمونه‌گیری محاسبه شده است. در واقع، با این اقدام، امکان تعیین مشارکت هر یک از عوامل استخراج شده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی در غلظت جرمی آلاینده‌ی ذرات معلق فراهم می‌شود. بدیهی است که سهم مشارکتی هر عامل در هر نمونه برداری، از حاصل ضرب ضریب اختصاص یافته در مدل رگرسیونی با غلظت تخصیص یافته به اجزاء شیمیایی آن عامل محاسبه می‌شود. این روش عمدتاً در تکمیل نتایج مربوط به سهم بندی منابع با استفاده از روش PCA مطرح می‌شود و امکان بررسی دقیق‌تر نتایج سایر مدل‌ها را فراهم می‌کند. رابطه‌ی ۷، میزان مشارکت عوامل خروجی مدل را برای دوره‌ی مورد مطالعه در شهر تهران نشان می‌دهد:

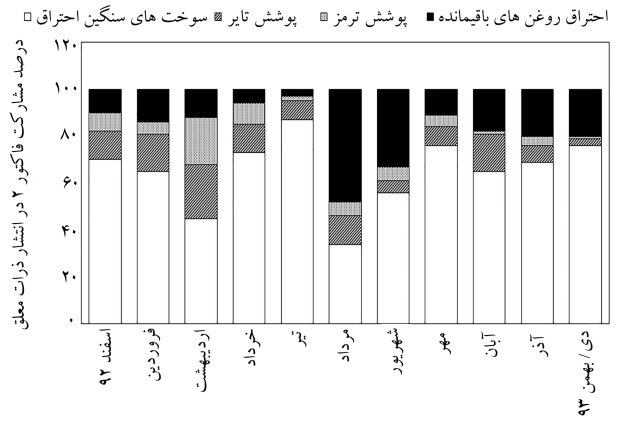
$$PM_{2.5} = 32.40 PC_1 + 138.80 PC_2 + 6.93 PC_3 - 7.02 \times 10^{-7} PC_4 + 0.3 PC_5 \quad (7)$$

با توجه به ضرایب به دست آمده از رگرسیون، عامل دوم با ضریب ۱۳۸/۸۰، اهمیت بیشتری نسبت به سایر عوامل دارد. همان‌طور که توضیح داده شد، عامل

و منابع تولید ذرات معلق در شهر تهران شناسایی و بررسی شدند. برای رسیدن به این منظور، غلظت ترکیب‌های شیمیایی موجود در ذرات و سهم منابع تولید آن‌ها در ایستگاه دانشگاه شریف در سال ۲۰۱۵ - ۲۰۱۴ تعیین شد. طبق نتایج آنالیزهای جرمی و شیمیایی صورت‌گرفته روی نمونه‌های ذرات معلق، ضمن تعیین مقدار بسیار بالای غلظت میانگین غلظت ذرات معلق ریز در شهر تهران، جرم آلی یکی از مهم‌ترین ترکیب‌های موجود در $PM_{2.5}$ به دست آمد. در بررسی حاضر، سهم بندی منابع انتشار ذرات معلق به کمک غلظت اجزاء شیمیایی ذرات و پروفیل منابع محتمل در شهر تهران توسط مدل CMB انجام گرفت. طبق نتایج به دست آمده، وسائط نقلیه‌ی متحرک (بنزینی، دیزلی و دودزا) و ذرات گرد و غبار به ترتیب به‌عنوان مهم‌ترین منابع در تولید ذرات شناسایی شدند. با مشخص شدن سهم عمده‌ی منبع وسائط نقلیه‌ی بنزینی در تولید ذرات، به منظور ارتقاء دقت نتایج در مدل پذیرنده، از مدل ترکیبی PCA-MLR-CMB استفاده و منابع جزئی‌تری از عوامل خروجی مدل PCA استخراج شدند. طبق نتایج به دست آمده منابعی همچون سایش لاستیک و ترمز خودرو، احتراق روغن باقیمانده و سوخت‌های سنگین احتراق از مهم‌ترین مؤثرترین منابع تغییرات ذرات معلق در طول دوره‌ی نمونه‌برداری هستند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت کنترل کیفیت هوا که در نمونه‌برداری‌های صورت گرفته از ذرات معلق، گروه را حمایت و پشتیبانی کردند، قدردانی و سپاسگزاری می‌شود. همچنین از آزمایشگاه دانشگاه ویسکانسین آمریکا، به جهت انجام آنالیزهای شیمیایی موردنیاز برای انجام پروژه تشکر ویژه می‌شود.



شکل ۴. نتایج مدل CMB برای عامل ۲.

ترمز، احتراق روغن باقیمانده، و سوخت‌های سنگین احتراق (به دست آمده از پایگاه داده‌ی SPECIATE) است، مطابق جدول ۲ محاسبه شد. با توجه به شکل ۴، احتراق سوخت‌های سنگین با میانگین ۶۵/۱۰، بیشترین سهم تولید را در عامل ۲ داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

ذرات معلق ریز به‌عنوان یکی از آلاینده‌های معیار، یکی از بحرانی‌ترین آلاینده‌های هوا به لحاظ سلامت و کیفیت هوا در شهر تهران است. در پژوهش حاضر، ترکیب‌ها

پانویس‌ها

1. particulate matter
2. receptor model
3. principal component analysis (PCA)
4. chemical mass balance (CMB)
5. source profile
6. spatial variation
7. temporal variation
8. multi variational methods
9. Instability
10. Collinearity
11. combined model
12. measured source
13. extracted source
14. extracted simplex source
15. extracted complex source
16. original receptor
17. measured sub-source

18. precursor gases

منابع (References)

1. Seinfeld, J. and Pandis, S., *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Wiley, 3rd Edition, 1152 p. (2016).
2. Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J. and et al. "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution", *Jama*, **287**(9), pp. 1132-1141 (2002).
3. Nezis, I., Biskos, G., Eleftheriadis, K. and et al. "Particulate matter and health effects in offices - A review", *Building and Environment*, **156**, pp. 62-73 (2019).
4. Arhami, M., Shahne, M.Z., Hosseini, V. and et al. "Seasonal trends in the composition and sources of $PM_{2.5}$ and

- carbonaceous aerosol in Tehran, Iran”, *Environmental Pollution*, **239**, pp. 69-81 (2018).
5. Pope, C.A. and Dockery, D.W. “Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **56**(6), pp. 709-742 (2006).
 6. Al Hanai, A.H., Antkiewicz, D.S., Hemming, J.D.C. and et al. “Seasonal variations in the oxidative stress and inflammatory potential of PM_{2.5} in Tehran using an alveolar macrophage model: The role of chemical composition and sources”, *Environment International*, **123**, pp. 417-427 (2019).
 7. Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R. and et al. “Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C1-C29 organic compounds from fireplace combustion of wood”, *Environmental Science & Technology*, **35**(9), pp. 1716-1728 (2001).
 8. Heo, J., Dulger, M., Olson, M. and et al. “Source apportionments of PM_{2.5} organic carbon using molecular marker Positive Matrix Factorization and comparison of results from different receptor Models”, *Atmospheric Environment*, **73**, pp. 51-61 (2013).
 9. Chavent, M., Guegan, H. Kuentz, V. and et al. “PCA- and PMF-based methodology for air pollution sources identification and apportionment”, *Environmetrics*, **20**(8), pp. 928-942 (2009).
 10. Shi, G.-L., Li, X., Feng, Y.-C. and et al. “Combined source apportionment, using positive matrix factorization-chemical mass balance and principal component analysis/multiple linear regression-chemical mass balance models”, *Atmospheric Environment*, **43**(18), pp. 2929-2937 (2009).
 11. Pearson F.R.S., K. “LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space”, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **2**(11), pp. 559-572 (1901).
 12. Hotteling, H. “Analysis of a complex of statistical variables into principal components”, **24**(6), *Journal of Educational Psychology*, pp. 417-441 (1933).
 13. Watson, J.G., Robinson, N.F., Chow, J.C. and et al. “The USEPA/DRI chemical mass balance receptor model, CMB 7.0.”, *Environmental Software*, **5**(1), pp. 38-49 (1990).
 14. Arhami, M., Hosseini, V., Zare Shahne, M. and et al. “Seasonal trends, chemical speciation and source apportionment of fine PM in Tehran”, *Atmospheric Environment*, **153**, pp. 70-82 (2017).
 15. Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R. and et al. “Measurement of emissions from Air pollution sources. 2. C1 through C30 organic compounds from medium duty diesel trucks”, *Environmental Science & Technology*, **33**(10), pp. 1578-1587 (1999).
 16. Tefera, W., Kumie, A., Berhane, K. et la. “Source apportionment of fine organic particulate matter (PM_{2.5}) in central addis ababa, ethiopia”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **18**(21), 11608, (2021).(<https://DOI.org/10.3390/ijerph182111608>)
 17. Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R. and et al. “Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1-C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles”, *Environmental Science & Technology*, **36**(6), pp. 1169-1180 (2002).
 18. Schauer, J.J., Mader, B.T., Deminter, J.T. and et al. “ACE-Asia intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon”, *Environ. Sci. Technol*, **37**(5), pp. 993-1001 (2003).
 19. Villalobos, A.M., Amonov, M.O., Shafer, M.M. and et al. “Source apportionment of carbonaceous fine particulate matter (PM_{2.5}) in two contrasting cities across the Indo-Gangetic plain”, *Atmospheric Pollution Research*, **6**(3), pp. 398-405 (2015).
 20. Shi, G.-L., Liu, G.-R., Peng, X. and et al. “A Comparison of multiple combined models for source apportionment, including the PCA/MLR-CMB, Unmix-CMB and PMF-CMB models”, *Aerosol and Air Quality Research*, **14**(7), pp. 2040-2050 (2014).
 21. Keerthi, K., Selvaraju, N. and Varghese, L.A. “Use of combined receptor modeling technique for prediction of possible sources of particulate pollution in Kozhikode, India”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, **17**(5), pp. 2623-2636 (2020).
 22. Lough, G.C., Schauer, J.J., Park, J.-S. and et al. “Emissions of metals associated with motor vehicle roadways”, *Environmental Science & Technology*, **39**(3), pp. 826-836 (2005).
 23. Hopke, P.K. “Review of receptor modeling methods for source apportionment”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, **66**(3), pp. 237-259 (2016).
 24. Weber, S., Salameh, D., Albinet, A. and et al. “Comparison of PM₁₀ sources profiles at 15 French sites using a harmonized constrained positive matrix factorization approach”, *Atmosphere*, **10**(6), p. 310 (2019).
 25. Shi, G.-L., Zeng, F., Li, X. and et al. “Estimated contributions and uncertainties of PCA/MLR-CMB results: Source apportionment for synthetic and ambient datasets”, *Atmospheric Environment*, **45**(17), pp. 2811-2819 (2011).
 26. Arhami, M., Sillanpaa, M., Hu, S. and et al. “Size-segregated inorganic and organic components of PM in the communities of the Los Angeles harbor”, *Aerosol Science and Technology*, **43**(2), pp. 145-160 (2009).