Archive of SID

مجله مهندسی بهداشت محیط، بهار ۱۳۹۸، سال ٦، شماره ۳: ۳۲٦-۳۳۸

تعیین توزیع غلظت NO_2، CO و $PM_{2.5}$ با استفاده از یک مدل فتوشیمیایی آلودگی هوا: مطالعه موردی شهر تهران

میلاد سعیدی[1*]، علیرضا رودباری[2]

[1] کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
[2] استادیار، دانشکده پرواز، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹٦/۱۱/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۶

چکیده

زمینه و هدف: تهران از نظر آلودگی هوا یکی از شهرهای بسیار آلوده جهان است. مدل‌سازی یک ابزار مفید در مدیریت آلودگی هوا بشمار میرود. اهداف این مطالعه شامل تعیین توزیع غلظت آلاینده‌های اصلی هوا در شهر تهران و ساختن مدلی فتوشیمیایی متناسب جغرافیا و خصوصیات طبیعی شهر تهران می باشد.

روش کار: در این تحقیق با استفاده از سیستم مدل‌سازی WRF/CAMx غلظت همه آلاینده‌های ناشی از منابع متحرک در یک اپیزود ٦۰ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ۱۳۹٤) در محدوده شهر تهران محاسبه‌شده و همچنین کانتور توزیع غلظت برای آلاینده های NO_2، CO و $PM_{2.5}$ رسم شده است. در این راستا سیاهه انتشار مربوط به منابع متحرک با کد نویسی در فرترن و خروجی‌های مدل هواشناسی WRF برای مدل‌سازی کیفیت هوا آماده‌شده و سپس با استفاده از مدل CAMx، کیفیت هوای شهر تهران در طول این ٦۰ روز شبیه‌سازی‌شده است.

یافته‌ها: نتایج مربوط به شبیه سازی هواشناسی با مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه مهرآباد مقایسه و درستی سنجی شده اند. همچنین به‌منظور درستی سنجی نتایج مربوط به شبیه سازی، غلظت آلاینده ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر با غلظت اندازه گیری شده ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا مقایسه شده است. در این مطالعه کانتور غلظت برای NO_2، CO و $PM_{2.5}$ و نحوه توزیع غلظت این آلاینده ها مشخص شده است با توجه به کانتورهای غلظت نقاط مرکزی تهران از آلودگی بیشتر برخودارند. میزان خطای میانگین مدل نسبت به مقادیر اندازه گیری شده برای ایستگاه‌های شریف، شادآباد، شهرری و گلبرگ به ترتیب ٤۱٪، ۲٤٪، ۳۷,۸٪ و ۳۷,۲٪ می‌باشد. که در بحث شبیه سازی آلودگی هوا قابل قبول می باشند.

نتیجه‌گیری: این مدل سازی نشان می دهد در نقاطی که منابع متحرک بیشتر تردد دارند مقدار آلودگی هوا بیشتر است و می توان گفت بیشتر آلودگی هوای تهران ناشی از منابع متحرک می باشد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، آلودگی هوا، ذرات معلق، WRF-CAMx

[*] **نویسنده مسئول:** کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
ایمیل: saeedi_milad@mech.sharif.ir - تلفن تماس: ۶۶۰۰۵۷۱۶ -۰۲۱

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین معضلات شهر تهران در سال‌های اخیر بوده است که علاوه بر ضررهای وارده بر سلامت شهروندان، تأثیرات اجتماعی و اقتصادی فراوانی را بر شهر تحمیل می‌کند. بر اساس آمار وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی سالیانه در تهران، حدود ۷۰۰۰ نفر به علت آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند که از این تعداد ٤۰۰۰ نفر براثر بیماری‌های ناشی از ذرات معلق و ۳۰۰۰ نفر به علت سرطان‌های ناشی از آلودگی است [۱]. از میان این آلاینده‌ها ذرات معلق تأثیرات بیشتری بر سلامت انسان دارند. این ذرات که به ذرات آلاینده مشهورند درواقع ترکیبات پیچیده‌ای از ذرات یا قطرات مایع هستند که از اجزا مختلفی تشکیل‌شده‌اند [۲]. اجزا تشکیل‌دهنده ذرات معلق بستگی زیادی به منبع انتشار آلاینده، شرایط آب و هوایی و تغییرات زمانی دارد. منابع ذرات معلق می‌تواند به‌صورت طبیعی یا ساخت دست بشر باشند. ذرات آلاینده از اجرا مختلف شامل اسیدها (مانند نیترات‌ها و سولفات‌ها)، مواد شیمیایی آلی، فلزات و خاک یا ذرات گردوغبار تشکیل‌شده است. ذرات معلق ممکن است به‌صورت مستقیم از منبع انتشار آلاینده وارد جو شوند که به‌عنوان آلاینده اولیه شناخته می‌شوند و یا ممکن است براثر واکنش شیمیایی در جو تولید شوند که در این صورت به آن‌ها ذرات ثانویه می‌گوییم [۳،٤].

یکی از مهم‌ترین اقدامات موردنیاز جهت مقابله مؤثر با پدیده آلودگی هوا، داشتن اطلاعات کافی در مورد منشأ و منابع تولید آلاینده‌ها و سهم هر منبع در غلظت آلاینده‌ها است. شناخت دقیق تأثیر این منابع بر غلظت آلاینده‌ها و بررسی تأثیرگذاری سیاست‌های که برای کنترل آلودگی هوا اخذ می شود، ضروری است. مدل‌سازی آلودگی هوا یکی از ابزارهای مفید در زمینه مطالعات و مدیریت آلودگی هوا بشمار می‌رود [۵]. در ارتباط با ضرورت مدل‌سازی آلودگی هوا توجه به این نکته ضروری است که اندازه‌گیری‌های محیطی تنها نشان‌دهنده یک تصویر از وضعیت اتمسفر در زمان و مکان خاص است. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های محیطی نمی‌تواند به‌طور مستقیم توسط سیاست‌گذاران به‌منظور تدوین استراتژی‌های مؤثر جهت بهبود کیفیت هوا مورداستفاده قرار گیرد. نتایج مدل‌سازی آلودگی هوا می‌تواند برای اهداف وسیعی ازجمله: پیش‌بینی وضعیت روزانه آلودگی هوا، بررسی اثربخشی راهکارهای کنترل و کاهش آلودگی هوا (به عنوان مثال طرح های که توسط سیاست گذاران تصویب می شود قبل از اجرا می توان میزان اثرگذاری این طرح ها را با مدل سازی مشخص کرد)، طراحی ساختار و هندسه شهری و غیره مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، با استفاده از مدل‌های آلودگی هوا می‌توان به اطلاعات دقیق‌تری از توزیع غلظت آلاینده‌ها در مناطقی که ایستگاه‌های پایش در آن نقاط وجود ندارند، دست‌یافت [٦]. فهم رابطه میان میزان انتشار آلاینده‌ها از منابع انتشار و غلظت آلاینده‌ها می تواند در تعریف سناریوهای که باعث کاهش غلظت آلاینده ها می شوند، بسیار مفید باشد. برای شبیه‌سازی غلظت آلاینده ها نیاز به مدلی است که در مقیاس منطقه‌ای شبیه‌سازی انجام دهد تا اثرات شرایط مرزی بالادست را به حداقل برساند. مطالعاتی که به شبیه‌سازی آلاینده ها پرداخته‌اند از مدل‌های جعبه‌ای اویلری، مدل‌های خط سیری لاگرانژی، مدل‌های توده‌ای لاگرانژی و مدل‌های سه‌بعدی اویلری (این پژوهش) استفاده کرده‌اند. در بیشتر مطالعات مربوط به شبکه‌های بزرگ برای شبیه‌سازی تغییرات شیمیایی و فرآیندهای انتقال آلاینده‌ها از مدل‌های ۳-بعدی اویلری استفاده‌شده است [۷،۸].

با تصویب قوانین کنترل کیفیت هوا در ایالات‌متحده ضرورت مدل‌سازی پخش آلاینده بیشتر نمایان شد. توسعه مدل‌های فتوشیمیایی کیفیت هوا از سال ۱۹۷۰ آغازشده، از آن زمان مدل‌های فتوشیمیایی زیادی ارائه‌شده است [۹]. در نسل اول این مدل‌ها تنها چندگونه و واکنش در نظر گرفته‌شده بود. در نسل دوم این مدل‌ها گونه‌ها، واکنش‌ها و فرایندهای

www.SID.ir

Archive of SID

فیزیکی مانند ته‌نشینی به مدل‌ها افزوده شد. در نسل سوم این مدل‌ها، واکنش‌ها، هواشناسی و دیگر فرایندهای فیزیکی به‌صورت کوپل در نظر گرفته شد. مدل UAM از اولین مدل‌های بود که در سال ۱۹۷۰ به‌منظور مدل‌سازی ازن در امریکا توسعه داده شد [۱۰]. مدل‌های فتوشیمیایی در حال حاضر می‌توانند گونه‌های ذرات و گازها را مدل‌سازی کنند. در کشورهای مختلف مدل‌های زیادی توسعه داده‌شده‌اند اما مدل‌های فتوشیمیایی که سازمان محیط‌زیست آمریکا معرفی کرده که شامل سیستم‌های مدل‌سازی CAMx، CMAQ، REMSAD و UAM-V می‌باشند، بیشتر استفاده‌شده و قابل‌اعتمادترند. از مدل‌های دیگری که به‌صورت گسترده مورداستفاده قرارگرفته می‌توان به مدل WRF-Chem اشاره کرد [۱۱].

شهبازی و همکاران در سال ۲۰۱٦ سیاهه انتشار دقیقی بر اساس GIS برای تهران تهیه‌کرده‌اند. در این تحقیق از دقت ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر استفاده‌شده و سهم هر منبع در انتشار هر آلاینده مشخص‌شده است. همچنین مشخص‌شده که بیشتر انتشار آلاینده‌ها در شهر تهران مربوط به منابع متحرک است. بر اساس این تحقیق منابع متحرک ٦/۲۲٪ از اکسیدهای گوگرد (SO_x) ، ٤٦/۱٪ از اکسیدهای نیتروژن (NO_x) ، ۹۷/۵٪ از مونوکسید کربن (CO) ، ۸٦٪ از ترکیبات آلی فرار (VOC) و ٦۹/۸٪ درصد از ذرات معلق ($PM_{2.5}$) را تولید می‌کنند دز این مطالعه از این سیاهه انتشار استفاده شده است [۱۲]. در زمینه مدل‌سازی آلودگی هوا در شهر تهران شهبازی و همکاران در سال ۱۳۹۱ غلظت آلاینده‌های گازی NO، NO_2، CO، SO_2 را با استفاده از مدل WRF/CAMx مدل‌سازی کرده و با غلظت‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های پایش آلودگی در شهر تهران مقایسه کرده‌اند. تفاوت غلظت منوکسیدکربن و توزیع آن در شهر تهران بین یک روز کاری و یک روز تعطیل موردمطالعه قرارگرفته است. در یک مطالعه دیگر با استفاده از مدل‌سازی تأثیر محدودیت ترافیکی زوج و فرد در شهر تهران موردبررسی قرارگرفته است [۱۳]. همچنین سعیدی و همکاران در سال ۱۳۹۵ با استفاده از مدل WRF/CAMx تاثیر موتورسیکلت ها را بر هوای تهران مورد مطالعه قرار دادند در این مطالعه نشان داده شد با حذف ۲۵ درصد موتورسیکلتهای شهر تهران در حدود ٤ تا ٦ درصد و با حذف ۵۰ درد از موتورسیکلتها کاربراتوری ۸ تا ۱۱ درصد از غلظت ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر در شهر تهران کاهش می یابد [۱٤].

در این مطالعه با استفاده از مدل ترکیبی WRF/CAMx همه آلاینده های هوای شهر تهران با تمرکز بر ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر و با در نظر گرفتن همه منابع متحرک مدل‌سازی شده است. در این مطالعه ابتدا سیاهه انشتار آلاینده های شهر تهران با استفاده از یک کد فرترن به ورودی مورد نیاز مدل CAMx تبدیل شده و سپس مدل هواشناسی WRF به منظور آماده سازی ورودی های هوا شناسی برای یک بازه ٦۰ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ۱۳۹٤) مدل شده و با توجه به اینکه بیشتر روزهای ناسالم هوای تهران در این دو ماه قرار دارد این بازه برای مدل‌سازی بسیار مهم و مناسب است. در نهایت با استفاده از این دو ورودی، مدل کیفیت هوای CAMx اجرا شده است. در نهایت نتایج مدل‌سازی با غلظت های واقعی در محل ایستگاههای سنجش آلودگی هوا تهران مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

هر مدل پراکنش آلودگی هوا معمولاً از سه قسمت اصلی تشکیل‌شده است(شکل ۱). قسمت اول پردازشگر اطلاعات هواشناسی می‌باشد که با استفاده از قوانین دینامیک اتمسفر و معادلات مربوط به ترمودینامیک اتمسفر میدان هواشناسی منطقه موردنظر را محاسبه می‌کند. قسمت دوم پردازشگر اطلاعات انتشار می‌باشد، در این قسمت اطلاعات مربوط به انواع منابع تولید آلاینده نظیر دودکش‌ها، منابع خطی (نظیر راه‌ها و خیابان‌ها) و منابع سطحی (نظیر تولید آلودگی از یک

www.SID.ir

Archive of SID

پالایشگاه یا یک سطح وسیع) مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته و آماده ورود به مدل می‌شود. قسمت سوم معادله اصل بقا جرم همراه با در نظر گرفتن کانوکشن، نفوذ در جریان درهم، واکنش‌های فتوشیمیایی و مکانیسم‌های رفع آلودگی است.

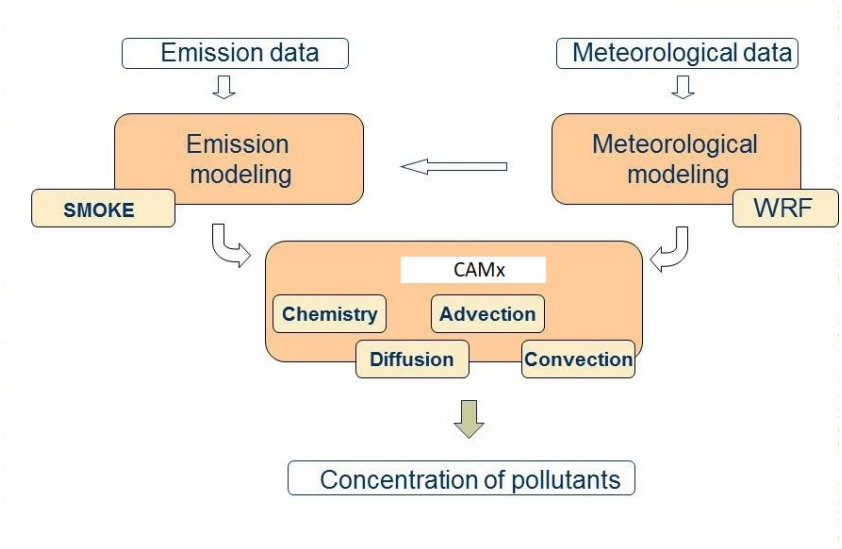
برای شبیه‌سازی ذرات معلق هوا باید همه آلاینده‌ها ازجمله گازها و ذرات در نظر گرفته شود چون واکنش‌های شیمیایی در تشکیل ذرات معلق ثانویه و غلظت کل ذرات بسیار تأثیر دارند. در اکثر پژوهش‌های قبلی در شهر تهران فقط غلظت گازها با مدل‌های فتوشیمیایی شبیه‌سازی‌شده و مطالعات زیادی در زمینه ذرات معلق انجام‌نشده است. در این پژوهش سیستم WRF و CAMx برای شهر تهران تنظیم‌شده و با استفاده از سیاهه انتشار مربوط منابع متحرک در سطح تهران موردمطالعه قرارگرفته است.

مدل‌سازی هواشناسی

مدل پیش‌بینی وضعیت آب و هوایی WRF یک مدل عددی میان‌مقیاس برای پیش‌بینی آب‌وهواست. این سیستم مدل‌سازی در طی چند سال گذشته درحال‌توسعه بوده و یک مدل انعطاف‌پذیر است که می‌تواند در جاهای مختلف و باحالت‌های پردازش موازی به اجرا درآید. می‌توان از این مدل برای کاربردهای مختلف استفاده نمود [۱۵].

هسته اصلی این مدل حل گر معادله اولری غیر هیدرو استاتیک تراکم پذیر است. معادلات در این مدل به نحوی نوشته‌شده که شکل زمین را دنبال می‌کند. همچنین معادلات به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر رطوبت و انحنایی کره زمین توسعه داده‌شده است. معادلات موجود در هسته ابن مدل با استفاده از مختصات عمود بر راستای سطح زمین (به‌منظور دنبال کردن زمین) فرمول‌بندی شده‌اند [۱۶].

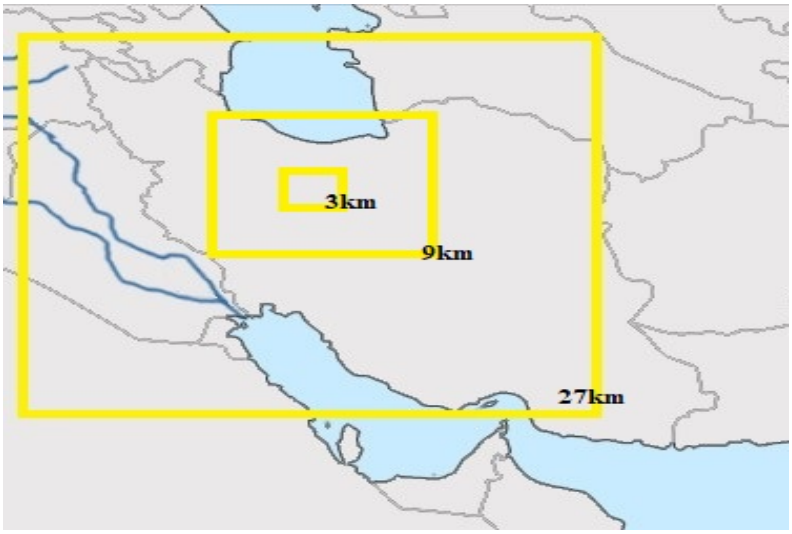
در پروژه حاضر به‌منظور محاسبه میدان‌های هواشناسی، مدل WRF بر روی شهر تهران در یک اپیزود زمانی ۶۰ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ۹۴) به‌صورت تو در تو مورد اجرا قرارگرفته است. برای اجرای مدل WRF مانند شکل ۲ از سه شبکه تودرتو با دقت ۳، ۹ و ۲۷ کیلومتر به ترتیب با تعداد شبکه ۵۱×۳۹، ۳۳×۲۷ ، ۲۷×۲۱ و ۳۸ لایه عمودی استفاده‌شده است. در مدل به‌منظور مقداردهی اولیه مدل از داده‌های جهانی FNL که از اجرای سایر مدل‌ها به‌دست‌آمده‌اند، با دقت $1^{o}\times1^{o}$ استفاده‌شده است.



شکل ۱: بخش های اصلی یک سیستم مدل سازی کیفیت هوا

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲: شبکه استفاده شده برای مدل‌سازی هواشناسی با مدل WRF

آماده‌سازی سیاهه انتشار

فهرست یا سیاهه انتشار (emission inventory) شامل مجموعه‌ای از داده‌ها است که انتشار آلاینده‌های مختلف را از منابع گوناگون به تفکیک مکانی و زمان بیان کند. سیاهه انتشار می‌تواند، بسیار کلی و با تفکیک‌پذیری بالا، مثلاً برای یک کشور یا قاره و برای یک سال یا یک دهه و یا بسیار جزئی و با تفکیک‌پذیری پایین، مثلاً برای منبع و طی یک ساعت تهیه شود. اطلاعات انتشار حاصل از مدل‌های انتشار و سیاهه‌های انتشار تنظیم‌شده، مهم‌ترین ورودی مدل‌های کیفیت هوا هستند. دانشمندان از مدل‌های کیفیت هوا برای اهداف متفاوتی مانند توسعه شهرها و مناطق، بررسی سناریوهای کاهش آلودگی، پیش‌بینی کیفیت هوا و غیره استفاده می‌کنند. در همه این موارد تمایل به این است که مدل برای منطقه‌ای بزرگ با رزولوشن بالا و در نظر گرفتن بیشتر منابع انتشار باشد. این اهداف نیازمند یک سیستم پردازش داده‌ها انتشار کارآمد، کاربرپسند و قابل‌انعطاف است [۱۷].

هدف از پردازش اطلاعات انتشار تبدیل سیاهه انتشار به سیاهه انتشاری است که موردنیاز مدل‌های کیفیت هوا است.

داده‌های انتشار معمولاً به‌صورت مقدار کل انتشار سالانه برای هر منبع انتشار موجود می‌باشند. مدل‌های کنترل کیفیت هوا به انتشار ساعتی داده‌ها، برای هر سلول از شبکه و برای هر گونه‌ای که در مدل کیفیت هوا استفاده می‌شود، نیاز دارند؛ بنابراین برای به دست آوردن ورودی‌های موردنیاز مدل‌های کیفیت هوا، باید اطلاعات انتشار با تخصیص زمانی، گونه‌زایی شیمیایی و تخصیص مکانی پردازش شود. همچنین باید توجه داشت که ورودی انتشار مدل‌های کیفیت هوا فرمت مخصوص و منحصربه‌فردی دارند. در شکل ۳ مراحل مدل‌سازی انتشار به‌صورت شماتیک نشان داده‌شده است [۱۸].

منابع تولید آلاینده‌های هوای شهر تهران به دو دسته کلی منابع متحرک و منابع ساکن تقسیم می‌گردد. بر این اساس منابع متحرک شامل وسایل نقلیه در حال تردد در شهر تهران ازجمله خودروهای شخصی، تاکسی‌ها، موتورسیکلت‌ها مینی‌بوس‌ها، اتوبوس‌ها و خودروهای باری سبک و سنگین است.

عامل اصلی محدودکننده در مدل‌های کیفیت هوا عدم قطعیت در میزان انتشار آلاینده‌ها است. دقت در داده‌های

www.SID.ir

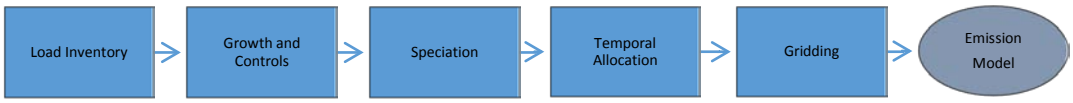
Archive of SID

انتشار تأثیر قابل‌توجهی در کیفیت خروجی‌های مدل‌سازی دارد. عدم قطعیت در داده‌های انتشار غیرقابل‌اجتناب است، چون بسیار دشوار است که میزان انتشار را با دقت بالا محاسبه کرد. این عدم قطعیت به‌طور عمده به دلیل تغییرات زمانی انتشار آلاینده‌ها رخ می‌دهد.

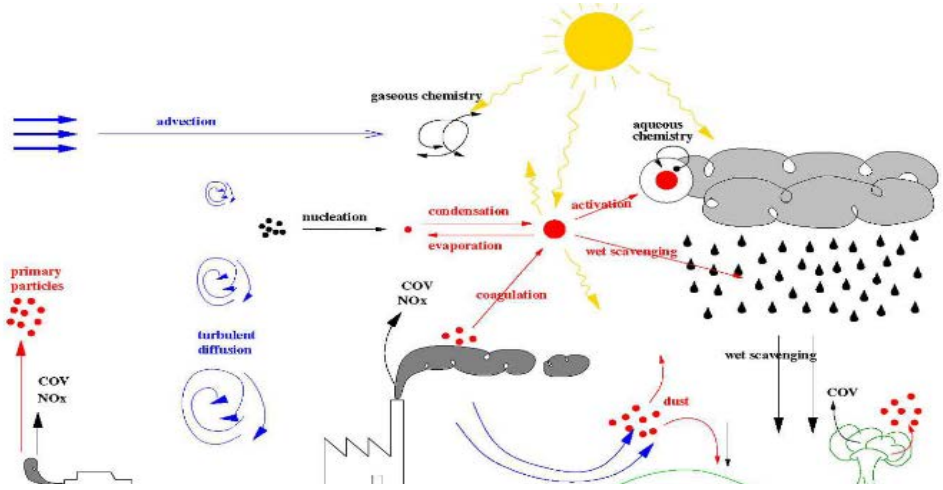
در این مطالعه از سیاهه انتشاری که توسط شهبازی و همکاران [۱۲] برای شهر تهران آماده‌شده استفاده می‌شود. در این سیاهه انتشار میزان تولید آلاینده‌های مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، اکسیدهای گوگرد (SO_x)، ترکیبات آلی فرار (VOC) و ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرومتر ($PM_{2.5}$) و آمونیاک (NH_3) در طول یک سال برای منابع مختلف محاسبه‌شده است. بر اساس این سیاهه انتشار سهم منابع متحرک در تولید آلاینده‌های هوا در سال ۱۳۹۲ در شهر تهران، برابر با ۷۲۵ هزار تن بوده است. این میزان برای مجموع تمام منابع متحرک ٦١٧ هزار تن بوده، بنابراین ۸۵/۱ درصد از آلودگی هوای تهران از منابع متحرک تولید می‌شود.

مدل‌سازی پراکنش آلودگی هوا

در سال‌های اخیر مدل‌های انتقال شیمیایی مختلفی برای شبیه‌سازی تشکیل و تکامل ذرات معلق و پیش‌بینی سطح آلودگی هوا توسعه داده‌شده‌اند. با این حال یک مدل تنها می‌تواند تعداد محدودی از گونه‌ها را مدل کند، درحالی‌که میلیون‌ها گونه ارگانیک و محصولات آن‌ها در تشکیل ذرات و ازن دخالت دارند. امروزه مدل‌های کیفیت هوا، معادلات تکامل شیمیایی انتقال جوی و همچنین فرایندهای رسوب خشک و تر مدل‌سازی می‌شوند. در شکل ٤ فرایندهای که باعث تکامل گونه‌ها می‌شوند نشان داده‌شده است [۱۵].



شکل ۳: مراحل مدل‌سازی انتشار



شکل ٤: فرایندهای که در مدل‌های فتوشیمیایی توصیف‌شده است

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌های کیفیت هوا تغییرات غلظت گونه‌ها را بازمان در یک دومین مدل می‌کنند. در این مدل‌ها انتقال، واکنش شیمیایی و فرایندهای دیگر مانند انتشار و رسوب در نظر گرفته‌شده است. برای مدل‌های آفلاین شرایط آب‌وهوای و انتشار به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود .مدل CAMx یک مدل پراکنش فتوشیمیایی اولری است که به‌منظور مدل‌سازی غلظت گازها و ذرات معلق در هوا طراحی‌شده است. این مدل در مقیاس‌های محله‌ای، منطقه‌ای و جهانی قابل‌استفاده است. این مدل نیز مانند دیگر مدل‌های فتوشیمیایی به‌منظور مدل‌سازی غلظت آلاینده‌ها از معادله پیوستگی اولری (معادله ۱) استفاده می‌کند.

(۱)

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\nabla_H V_H c_l + \left[\frac{\partial (c_l \eta)}{\partial z} - c_l \frac{\partial^2 h}{\partial z \partial t}\right] + \nabla . \rho K \nabla \left(\frac{c_l}{\rho}\right) + \underbrace{\frac{\partial c_l}{\partial t}}_{Chemistry} + \underbrace{\frac{\partial c_l}{\partial t}}_{Removel} + \underbrace{\frac{\partial c_l}{\partial t}}_{Emission}$$

در این معادله z ارتفاع از سطح زمین، c_l غلظت گونه آلاینده، V_H بردار افقی سرعت، η نرخ عمودی انتقال شیمیایی، h ارتفاع لایه‌مرزی، ρ چگالی اتمسفر و K ضریب نفوذ ادی می‌باشد. ترم اول در سمت راست معادله جابجایی افقی، ترم دوم نرخ انتقال عمودی براثر جابجایی لایه‌مرزی و ترم سوم نرخ میزان نفوذ عمودی براثر جابجایی لایه‌مرزی را نشان می‌دهد. شیمی مسئله نیز به‌صورت واکنش‌های که در مکانیزم‌های شیمیایی آمده، در نظر گرفته‌شده است. همچنین حذف گونه‌های آلاینده که شامل ته‌نشینی خشک و تر و میزان انتشار، به‌صورت چشمه در این معادله در نظر گرفته‌شده است [۱۹].

همان‌طور که گفته‌شده برای مدل‌سازی ذرات معلق به دلیل وجود واکنش‌های شیمیایی باید همه آلاینده‌ها (گازی و ذرات)را مدل‌سازی کرد، در همین راستا پس از آماده‌سازی فایل انتشار مربوط به همه آلاینده‌ها و داده‌های هواشناسی نوبت به اجرای مدل فتوشیمیایی CAMx و محاسبه غلظت آلاینده‌های مختلف در محدوده شهر تهران می‌رسد. برای اجرای مدل در محدود شهر تهران از یک منطقه محاسباتی به مرکزیت نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی °۳۵/۶۱۴ و °۵۱/۴۶۶ ، دقت ۳ کیلومتر در ۳ کیلومتر و تعداد شبکه ۵۱×۳۹ استفاده‌شده است. و مدل در یک اپیزود زمانی ۶۰ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ۹۴) اجرا شده است.

نتایج و بحث

نتایج مدل هواشناسی

در این قسمت به منظور درستی سنجی نتایج مدل هواشناسی با مقادیر اندازه گیری شده، مقایسه شده است. در شکل ۵-الف و ۵-ب به ترتیب نتایج شبیه سازی انجام گرفته بوسیله مدل WRF برای دما در ارتفاع ۲ متر و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر با مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی مهرآباد که در طول جغرافیایی ۵۱/۱۹ و عرض جغرافیایی ۳۵/۴۱ قرار دارد، به عنوان نمونه برای ۱۰ روز (اول آذر ماه تا ۱۰ آذر) مورد مقایسه قرار گرفته اند. با توجه به این شکل می توان دید مدل توانسته به خوبی دما در ارتفاع ۲ متر را پیش بینی کند. همچنین مدل WRF توانسته مقدار سرعت در ارتفاع ۱۰ متر را تا حد خوبی پیش بینی کند.

نتایج مدل‌سازی کیفیت هوا

در این قسمت بعد از مدل‌سازی، کانتورهای توزیع غلظت میانگین آلاینده‌های NO_2، CO و $PM_{2.5}$ در یک اپیزود ۲۰ روزه (۲۰ آذر تا ۱۰ دی ۱۳۹۴) که وضعیت شهر تهران بحرانی بوده، به ترتیب در شکل ۶ الف، ب و ج رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در نواحی

www.SID.ir

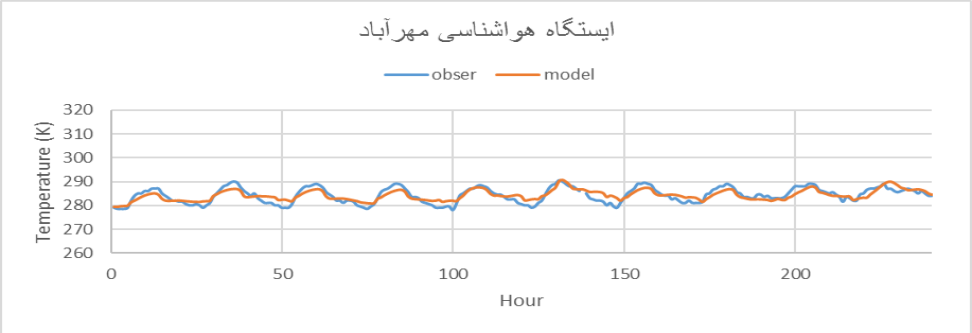
Archive of SID

مرکزی شهر غلظت این آلاینده‌ها بیشتر است. این مدل سازی نشان می دهد در نقاطی که منابع متحرک بیشتر تردد دارند مقدار آلودگی هوا بیشتر است و می توان گفت بیشتر آلودگی هوای تهران ناشی از منابع متحرک می باشد.

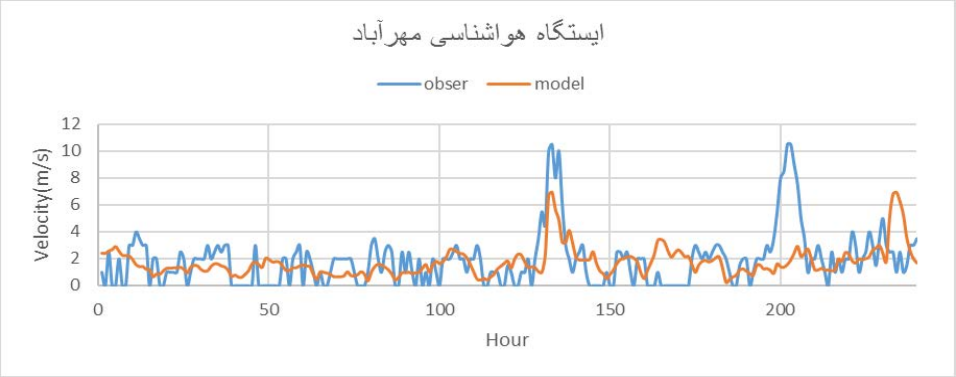
درستی سنجی نتایج

به‌منظور درستی سنجی، نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به آلاینده‌ها در ایستگاه‌های پایش شهر تهران مقایسه شده است. با توجه به اینکه برخی ایستگاه‌ها در اپیزود موردمطالعه غیرفعال بوده و یا با اشکال مواجه بوده و غلظت بعضی آلاینده‌ها اندازه‌گیری نشده است. با توجه به اینکه تمرکز این مطالعه روی ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر است، مقایسه بین نتایج مدل و غلظت‌های اندازه‌گیری شده برای ایستگاه‌های که نتایج ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر را بدرستی گزارش کرده‌اند، انجام‌شده است.

برای انجام مقایسه باید غلظت آلاینده‌ها در سلول‌های محاسباتی که ایستگاه‌ها در آن قرار می‌گیرند، استخراج شود. در هر ایستگاه پایش فقط غلظت یک نقطه خاص اندازه‌گیری می‌شود، اما نتایج مدل به‌صورت میانگین‌گیری شده در یک سلول 3km×3km می‌باشند، بنابراین احتمال اینکه بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف وجود داشته باشد، بسیار زیاد است. از عوامل دیگر وجود اختلاف بین مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده، می‌توان به عدم قطعیت سیاهه انتشار، داده‌های هواشناسی، شرایط مرزی و شرایط اولیه اشاره کرد. بعد از مدل‌سازی هوای شهر تهران برای یک اپیزود ۶۰ روزه نتایج مدل با داده های مربوط به ایستگاهها مقایسه شده است.



الف

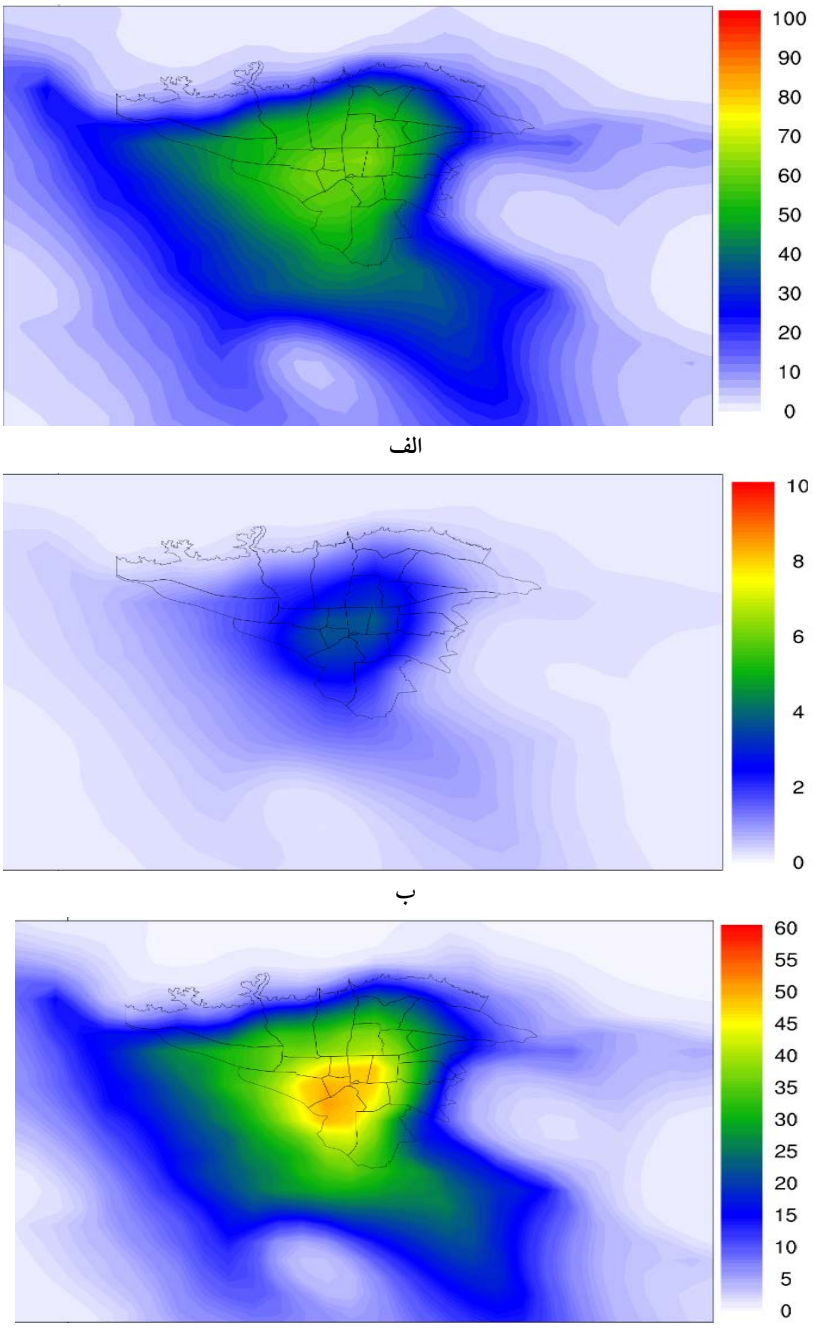


ب

شکل ۵: درستی سنجی نتایج هواشناسی الف) دما ب) سرعت باد در ایستگاه مهرآباد

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶: توزیع غلظت آلاینده های الف) NO_2 برحسب ppb ب) CO برحسب ppm ج) $PM_{2.5}$ برحسب میکروگرم

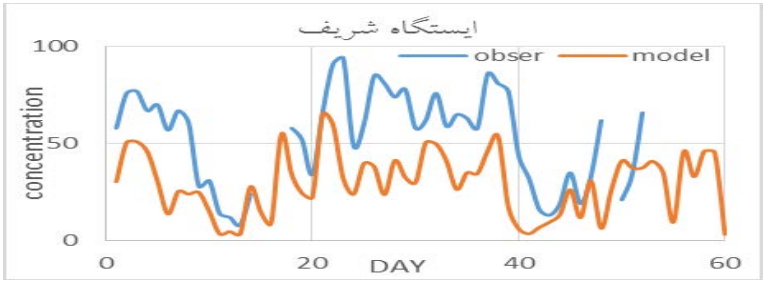
در شکل ۷ به‌منظور درستی سنجی نتایج به‌دست‌آمده، غلظت میانگین روزانه ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر با مقادیر اندازه‌گیری شده در چهار ایستگاه شریف، شادآباد، شهرری و گلبرگ که در طول این اپیزود ٦٠ روزه غلظت این ذرات را در بیشتر روزها اندازه‌گیری کرده‌اند، مقایسه شده است. در همه این ایستگاه‌ها مقادیر غلظت‌های اندازه‌گیری

www.SID.ir

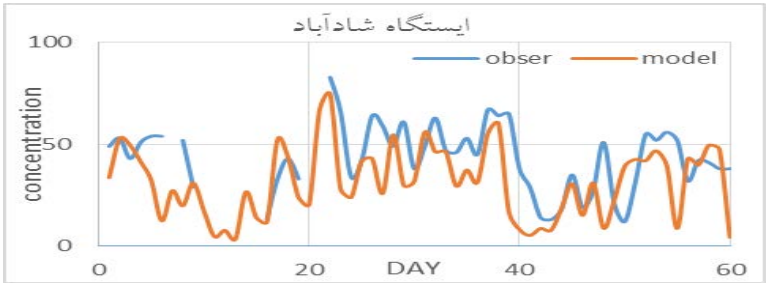
Archive of SID

شده از نتایج مدل بیشتر است. دلیل بیشتر بودن مقادیر اندازه‌گیری شده می‌تواند به این مربوط شود که سیاهه انتشار دقیق نیست. میزان خطای NMB(Normalized Mean Bias) (فرمول۵-۱) برای ایستگاه‌های شریف، شادآباد، شهرری و گلبرگ به ترتیب ٤١٪، ٢٤٪، ٣٧/٨٪ و ٣٧/٢٪ می‌باشد. همانطور که از این شکل مشخص است، مدل توانسته به خوبی روند تغییرات میانگین روزانه غلظت ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرومتر را دنبال کند.

$$NMB = \frac{1}{DAY}\left(\sum_{i=1}^{DAY}\frac{observation-model}{observation}\right) * 100 \qquad (۲)$$

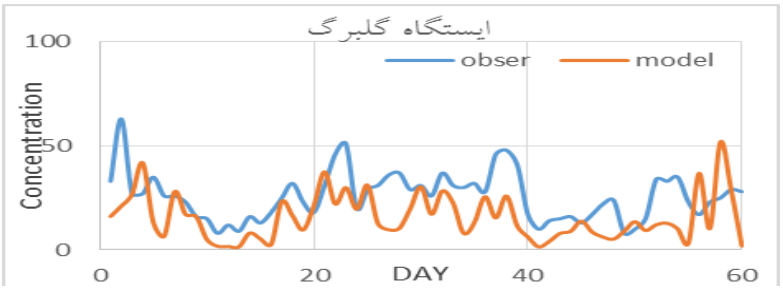


الف



ب

ج



د

شکل ۷: مقایسه غلظت میانگین روزانه ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر شبیه سازی شده با مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه آلف) شریف ب) شادآباد ج) شهر ری د) گلبرگ

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر در شهر تهران معضل آلودگی هوا به یکی از جدی‌ترین مشکلات در این شهر تبدیل‌شده است. از میان آلاینده‌های هوا، ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر ازنظر اثر منفی بر سلامت انسان‌ها و محیط‌زیست از اهمیت خاصی برخوردار است. همچنین مشکل اصلی آلودگی هوای شهر تهران به غلظت بالای این ذرات نسبت به استانداردها مربوط می‌شود. کنترل مؤثر این ذرات نیاز به وضع قوانین صحیح و اتخاذ شیوه‌های مدیریتی مناسب دارد. هدف نهایی از مدیریت آلودگی هوا کاهش و کنترل آلاینده‌های هوا در حال و آینده است به‌طوری‌که میزان آلاینده‌های موجود در هوا در حد مطلوب و مجاز قرار گیرد .

در این تحقیق با استفاده از سیستم مدل‌سازی WRF/CAMx غلظت NO_2، CO و $PM_{2.5}$ ناشی از منابع متحرک در یک اپیزود ٦٠ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ١٣٩٤) در محدوده شهر تهران محاسبه‌شده است. در این راستا ابتدا سیاهه انتشار و خروجی‌های مدل هواشناسی WRF برای مدل‌سازی کیفیت هوا اما ده شده و با استفاده از مدل CAMx، کیفیت هوای شهر تهران شبیه‌سازی‌شده است. سپس به‌منظور درستی سنجی، نتایج مربوط به غلظت ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر با غلظت های اندازه گیری شده در ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا مقایسه شده است. . میزان خطای میانگین برای ایستگاه‌های شریف، شادآباد، شهرری و گلبرگ به ترتیب ٤١٪، ٢٤٪، ٣٧/٨٪ و ٣٧/٢٪ می‌باشد. که این مقدار خطا برای مدل‌سازی آلودگی هوا قابل قبول می باشد. بنابراین از این سیستم مدل‌سازی می توان برای پیش بینی آلودگی هوا، مطالعه سناریوهای که می توانند در کاهش آلودگی هوا اثرگذار باشند، استفاده کرد. از خروجی مدل‌سازی آلودگی هوا و نتایج پیش بینی آلودگی هوا می توان در جهت هشدار به شهروندان در شرایط که هوا ناسالم است و همچنین تسهیل اتخاذ تصمیمات مدیریتی به وسیله مدیران شهری استفاده کرد. ازجمله این تصمیمات می توان به اعمال محدودیت های ترافیکی نظیر طرح زوج و فرد، تعطیلی صنایع آلاینده، نصب فیلتر دوده روی خودروهای دیزلی، تعطیلی مدارس وادارات و غیره اشاره کرد. همچنین با استفاده از این مدل ها می توان تاثیرات تصمیمات مدیریتی بلند مدت مانند نصب فیلتر دوده روی خودروهای دیزلی، حذف خودروهای کاربراتوری، حذف موتورسیکلت‌های کاربراتوری و غیره را بررسی کرد.

مشکل اصلی در شبیه‌سازی آلودگی هوا در ایران نبود سیاهه انتشار دقیق می‌باشد، بنابراین قدم اول در ادامه این مطالعات آماده‌سازی سیاهه انتشار دقیق برای شهر تهران و کل ایران می‌باشد. و همچنین در این مطالعه غلظت ذرات ناشی از انتشار گردوخاک مدل نشده است بنابراین در مطالعات آتی شبیه‌سازی انتشار ذرات گردوخاک می‌تواند در دقیق‌تر شدن نتایج مدل بسیار مفید باشد.

References

1. Naddafi K, Hassanvand MS, Yunesian M, et al. Health impact assessment of air pollution in megacity of Tehran, Iran. Iran J Environ Health Sci Eng 2012;9(1):28.
2. Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. Jama 2002;287(9):1132-41.
3. Squizzato S, Masiol M, Brunelli A, et al. Factors determining the formation of secondary inorganic aerosol: a case study in the Po Valley (Italy). Atmos chem phys 2013;13(4): 1927-39.
4. Wang X, Zhang Y, Chen H, et al. Particulate nitrate formation in a highly polluted urban area: a case study by single-particle mass spectrometry in Shanghai. Env Sci Tech 2009;43(9):3061-6.

www.SID.ir

Archive of SID

5. Hanna S. Applications in air pollution modeling. Atmos Turb Air Pollut Model: Springer; 1984: 275-310.

6. Loehman E, De VH. Application of stochastic choice modeling to policy analysis of public goods: a case study of air quality improvements. Rev Econ Stat 1982:474-80.

7. Byun D, Schere KL. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. Appl Mech Rev 2006;59(2):51-77.

8. Lu R, Turco RP, Jacobson MZ. An integrated air pollution modeling system for urban and regional scales: 1. Structure and performance. J Geophys Res 1997;102(D5).

9. Bosanquet C, Pearson J. The spread of smoke and gases from chimneys. J. Chem. Soc. Faraday Trans 1936;32:1249-63.

10. Morris R, Yocke M, Myers T, editors. Overview of the variable-grid urban airshed model (UAM-V). A and Wma Annual Meeting; 1993: Air and Waste Management Association.

11. Mallet V, Quélo D, Sportisse B, et al. The air quality modeling system Polyphemus Atmos Chem Phys 2007;7(20):5479-87.

12. Shahbazi H, Taghvaee S, Hosseini V, Afshin H. A GIS based emission inventory development for Tehran. Urban Climate 2016;17:216-29.

13. Shahbazi H, Hosseini V, Hamedi M, editors. Investigating the Effect of Odd-Even Day Traffic Restriction Policy on Tehran Air Quality. Trans Research Board 93rd Annual Meeting; 2014.

14. Saeedi M, Shahbazi H, Hosseini V, Shamloo A. The effect of the removal of motorcycle carburetor scenario of Tehran's Air Quality (in persian). Fifth national conference on air and noise pollutant management.

15. Sportisse B. Pollution atmosphérique: des processus à la modélisation: Springer Sci & Busi Media; 2008.

16. Wang W, Barker D, Bray J, et al. User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division–National Center for Atmos Research (MMM-NCAR) 2007.

17. Borge R, Lumbreras J, Rodríguez E. Development of a high-resolution emission inventory for Spain using the SMOKE modelling system: a case study for the years 2000 and 2010. Env Model Soft 2008;23(8):1026-44.

18. Houyoux MR, Vukovich JM. Updates to the Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) modeling system and integration with Models-3. The Emis Inv: Reg Strat 1999;1461.

19. Balzarini A, Pirovano G, Riva GM, Toppetti A. Investigating the Influence of Model Coupling by Comparing CAMx and WRF/Chem Over Italy. Air Pollut Model App: Springer; 2014:475-9.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Environmental Health Engineering, May 2019; Vol. 6, No. 3: 326-338

Determination of the Distribution of NO_2, CO, and $PM_{2.5}$ Concentration Using a Photochemical Model of Air Pollution: Case Study of Tehran City

Milad Saeedi[1*], **Alireza Roudbari**[2]

1. Department of Mechanical Engineering, Sharif University of technology, Tehran, Iran.
2. Department of Aeronautical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

**** E-mail: saeedi_milad@mech.sharif.ir***

Received: 25 Jan 2018 ; Accepted: 28 Sep 2018

ABSTRACT

Background and objectives: Tehran is one of the most polluted cities in the world in terms of air pollution. Modeling is a useful tool in air pollution management. The objectives of this study are to determine the distribution of the main air pollutants concentration in Tehran and to construct a photochemical model appropriate to the geography and natural characteristics of Tehran.
Methods: In this research, by using the WRF / CAMx modeling system, the concentration of all pollutants from moving sources in a 60-day episode (22 November 2015 to 20 January 2016) is calculated in Tehran, and concentration contour has been plotted for NO_2, CO, and $PM_{2.5}$. In this regard, the emission inventory for moving sources has been calculated with coding in the FORTRAN and the outputs of the WRF meteorological model was prepared for air quality modeling and then, by using the CAMx model, the air quality of Tehran was simulated during this 60 day period.
Results: The results of the meteorological simulation have been compared and validated with the measured values at the Mehrabad station. Also, for the purpose of validation, the results of the simulation of pollutant concentrations of the particle matters with the measured concentrations of air pollution monitoring stations have been compared. In this study, the concentration contour and the distribution of pollutants have been drown for NO_2, CO, and $PM_{2.5}$. According to the concentration contours, the center of Tehran is more polluted. The Normalized Mean Bias for Sharif, Shadabad, Shahrery, and Golbarg stations is 41%, 24%, 37.8% and 37.2%, respectively. Which are acceptable in the simulation of air pollution.
Conclusion: This study shows that the amount of air pollutions is higher in the areas where moving sources are more in traffic, and it can be said that the majority of Tehran's air pollution is generated by moving sources.

Keywords: Simulation, Air pollution, Particle Matter, WRF-CAMx

www.SID.ir