

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

میلاذ سعیدی^{۱*}، علیرضا رودباری^۲

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده پرواز، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۵؛ 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 می‌باشد.

روش کار: در این تحقیق با استفاده از سیستم مدل‌سازی WRF/CAMx غلظت همه آلاینده‌های ناشی از منابع متحرک در یک اپیزود ۶۰ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ۱۳۹۴) در محدوده شهر تهران محاسبه شده و همچنین کانتور توزیع غلظت برای آلاینده‌های NO_2 ، CO و $\text{PM}_{2.5}$ 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 آماده شده و سپس با استفاده از مدل CAMx، کیفیت هوای شهر تهران در طول این ۶۰ روز شبیه‌سازی شده است.

یافته‌ها: نتایج مربوط به شبیه‌سازی هواشناسی با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه مهرآباد مقایسه و درستی سنجی شده‌اند. همچنین به‌منظور درستی سنجی نتایج مربوط به شبیه‌سازی، غلظت آلاینده ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرومتر با غلظت اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا مقایسه شده است. در این مطالعه کانتور غلظت برای NO_2 ، CO و $\text{PM}_{2.5}$ و نحوه توزیع غلظت این آلاینده‌ها مشخص شده است با توجه به کانتورهای غلظت نقاط مرکزی تهران از آلودگی بیشتر برخوردارند. میزان خطای میانگین مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برای ایستگاه‌های شریف، شادآباد، شهری و گلبرگ به ترتیب ۴۱٪، ۲۴٪، ۳۷٫۸٪ و ۳۷٫۲٪ می‌باشد. که در بحث شبیه‌سازی آلودگی هوا قابل قبول می‌باشند.

نتیجه‌گیری: این مدل‌سازی نشان می‌دهد در نقاطی که منابع متحرک بیشتر تردد دارند مقدار آلودگی هوا بیشتر است و می‌توان گفت بیشتر آلودگی هوای تهران ناشی از منابع متحرک می‌باشد.

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

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 ۴۰۰۰ نفر بر اثر 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 در واقع ترکیبات پیچیده‌ای از ذرات یا قطرات مایع هستند که از اجزا مختلفی تشکیل شده‌اند.^۲ اجزا تشکیل‌دهنده ذرات معلق بستگی زیادی به منبع انتشار آلاینده، شرایط آب و هوایی و تغییرات زمانی دارد. منابع ذرات معلق می‌تواند به صورت طبیعی یا ساخت دست بشر باشند. ذرات آلاینده از اجزا مختلف شامل اسیدها (مانند نیترات‌ها و سولفات‌ها)، مواد شیمیایی آلی، فلزات و خاک یا ذرات گردوغبار تشکیل شده است. ذرات معلق ممکن است به صورت مستقیم از منبع انتشار آلاینده وارد جو شوند که به عنوان آلاینده اولیه شناخته می‌شوند و یا ممکن است بر اثر واکنش شیمیایی در جو تولید شوند که در این صورت به آن‌ها ذرات ثانویه می‌گوییم.^{۳، ۴}

یکی از مهم‌ترین اقدامات مورد نیاز 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 می‌شود، 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 مورد استفاده قرار گیرد. نتایج مدل‌سازی آلودگی هوا می‌تواند برای اهداف وسیعی از جمله: پیش‌بینی وضعیت روزانه آلودگی هوا، بررسی اثربخشی راهکارهای کنترل و کاهش آلودگی هوا (به عنوان مثال طرح‌های که توسط سیاست‌گذاران تصویب می‌شود قبل از اجرا می‌توان میزان اثرگذاری این طرح‌ها را با مدل‌سازی مشخص کرد)، طراحی ساختار و هندسه شهری و غیره مورد استفاده 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.^۶ فهم رابطه میان میزان انتشار آلاینده‌ها از منابع انتشار و غلظت آلاینده‌ها می‌تواند در تعریف سناریوهای که باعث کاهش غلظت آلاینده‌ها می‌شوند، بسیار مفید باشد. برای شبیه‌سازی غلظت آلاینده‌ها نیاز به مدلی است که در مقیاس منطقه‌ای شبیه‌سازی انجام دهد تا اثرات شرایط مرزی بالادست را به حداقل برساند. مطالعاتی که به شبیه‌سازی آلاینده‌ها پرداخته‌اند از مدل‌های جعبه‌ای اوپلری، مدل‌های خط سیری لاگرانژی، مدل‌های توده‌ای لاگرانژی و مدل‌های سه‌بعدی اوپلری (این پژوهش) استفاده کرده‌اند. در بیشتر مطالعات مربوط به شبکه‌های بزرگ برای شبیه‌سازی تغییرات شیمیایی و فرآیندهای انتقال آلاینده‌ها از مدل‌های ۳- بعدی اوپلری استفاده شده است.^{۷، ۸}

با تصویب قوانین کنترل کیفیت هوا در ایالات متحده ضرورت مدل‌سازی پخش آلاینده بیشتر نمایان شد. توسعه مدل‌های فتوشیمیایی کیفیت هوا از سال ۱۹۷۰ آغاز شده، از آن زمان مدل‌های فتوشیمیایی زیادی ارائه شده است.^۹ در نسل اول این مدل‌ها تنها چندگونه و واکنش در نظر گرفته شده بود. در نسل دوم این مدل‌ها گونه‌ها، واکنش‌ها و فرایندهای

موردبررسی قرار گرفته 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 موتورسیکلت های شهر تهران در حدود ۴ تا ۶ درصد و با حذف ۵۰ درصد از موتورسیکلتها کاربراتوروری ۸ تا ۱۱ درصد از غلظت ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرومتر در شهر تهران کاهش می یابد^{۱۴}.

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 مدل سازی 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 ۶۰ روزه (آذرماه و دی ماه سال ۱۳۹۴) مدل شده و با توجه به اینکه بیشتر روزهای ناسالم هوای تهران در این دو ماه قرار دارد این بازه برای مدل سازی بسیار مهم و مناسب است. در نهایت با استفاده از این دو ورودی، مدل کیفیت هوای CAMx اجرا شده است. در نهایت نتایج مدل سازی 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 تشکیل شده است (شکل ۱). قسمت اول پردازشگر اطلاعات هواشناسی می باشد که با استفاده از قوانین دینامیک اتمسفر و معادلات مربوط به ترمودینامیک اتمسفر میدان هواشناسی منطقه مورد نظر را محاسبه می کند. قسمت دوم پردازشگر اطلاعات انتشار می باشد، 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

فیزیکی مانند ته نشینی به مدلها افزوده شد. در نسل سوم این مدلها، واکنشها، هواشناسی و دیگر فرایندهای فیزیکی به صورت کوپل در نظر گرفته شد. مدل UAM از اولین مدل های بود که در سال ۱۹۷۰ به منظور مدل سازی ازن در امریکا توسعه داده شد^{۱۰}. مدل های فتوشیمیایی در حال حاضر می توانند گونه های ذرات و گازها را مدل سازی کنند. در کشورهای مختلف مدل های زیادی توسعه داده شده اند اما مدل های فتوشیمیایی که سازمان محیط زیست آمریکا معرفی کرده که شامل سیستم های مدل سازی CAMx، CMAQ، REMSAD و UAM-V می باشند، بیشتر استفاده شده و قابل اعتمادترند. از مدل های دیگری که به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته می توان به مدل WRF-Chem اشاره کرد^{۱۱}.

شهبازی و همکاران در سال ۲۰۱۶ سیاهه انتشار دقیقی بر اساس GIS برای تهران تهیه کرده اند. در این تحقیق از دقت ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر استفاده شده و سهم هر منبع در انتشار هر آلاینده مشخص شده است. همچنین مشخص شده که بیشتر انتشار آلاینده ها در شهر تهران مربوط به منابع متحرک است. بر اساس این تحقیق منابع متحرک ۶۲٪ از اکسیدهای گوگرد (SO_x)، ۴۶٪ از اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ۹۷٪ از مونوکسید کربن (CO)، ۸۶٪ از ترکیبات آلی فرار (VOC) و ۶۹٪ از ذرات معلق ($PM_{2.5}$) را تولید می کنند در این مطالعه از این سیاهه انتشار استفاده شده است^{۱۲}. در زمینه مدل سازی آلودگی هوا در شهر تهران شهبازی و همکاران در سال ۱۳۹۱ غلظت آلاینده های گازی NO ، NO_2 ، CO ، SO_2 را با استفاده از مدل WRF/CAMx مدل سازی کرده و با غلظت های اندازه گیری شده در ایستگاه های پایش آلودگی در شهر تهران مقایسه کرده اند. تفاوت غلظت منوکسید کربن و توزیع آن در شهر تهران بین یک روز کاری و یک روز تعطیل مورد مطالعه قرار گرفته است. در یک مطالعه دیگر با استفاده از مدل سازی تأثیر محدودیت ترافیکی زوج و فرد در شهر تهران

بالحالت‌های 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 نوشته شده که شکل زمین را دنبال می‌کند. همچنین معادلات به منظور در نظر گرفتن تأثیر رطوبت و انحنای کره زمین توسعه داده شده است. معادلات موجود در هسته این مدل با استفاده از مختصات عمود بر راستای سطح زمین (به منظور دنبال کردن زمین) فرمول‌بندی شده‌اند^{۱۶}.

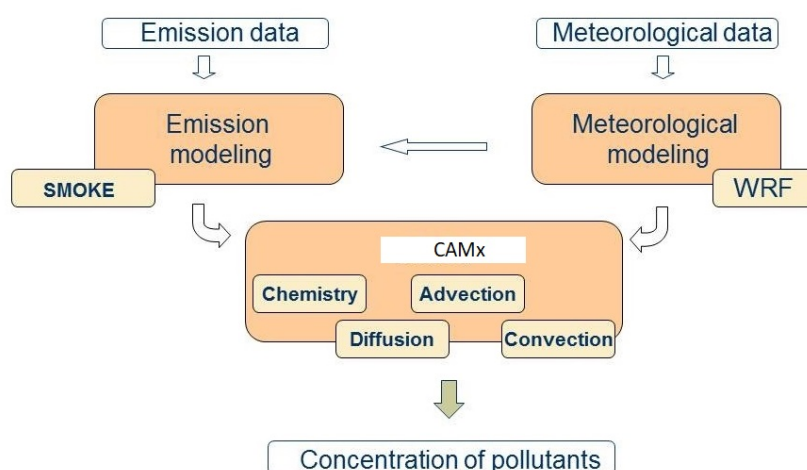
در پروژه حاضر به منظور محاسبه میدان‌های هواشناسی، مدل WRF بر روی شهر تهران در یک اپیزود زمانی ۶۰ روزه (آذرماه و دی‌ماه سال ۹۴) به صورت تو در تو مورد اجرا قرار گرفته است. برای اجرای مدل WRF مانند شکل ۲ از سه شبکه تودرتو با دقت ۳، ۹ و ۲۷ کیلومتر به ترتیب با تعداد شبکه ۵۱×۳۹، ۳۳×۲۷، ۲۷×۲۱ و ۳۸ لایه عمودی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

پالایشگاه یا یک سطح وسیع) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته 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.

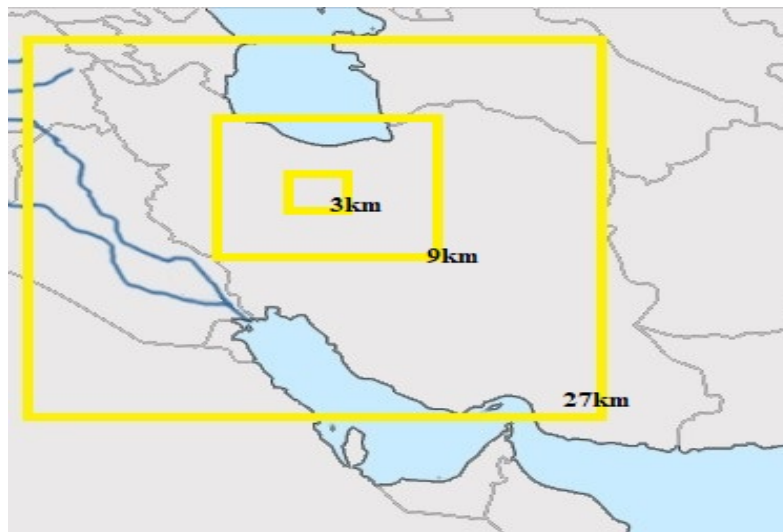
برای شبیه‌سازی ذرات معلق هوا باید همه آلاینده‌ها از جمله گازها و ذرات در نظر گرفته شود چون واکنش‌های شیمیایی در تشکیل ذرات معلق ثانویه و غلظت کل ذرات بسیار تأثیر دارند. در اکثر پژوهش‌های قبلی در شهر تهران فقط غلظت گازها با مدل‌های فتوشیمیایی شبیه‌سازی شده و مطالعات زیادی در زمینه ذرات معلق انجام نشده است. در این پژوهش سیستم WRF و CAMx برای شهر تهران تنظیم شده و با استفاده از سیاهه انتشار مربوط منابع متحرک در سطح تهران مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل سازی هواشناسی

مدل پیش‌بینی وضعیت آب و هوایی WRF یک مدل عددی میان‌مقیاس برای پیش‌بینی آب‌وهواست. این سیستم مدل‌سازی در طی چند سال گذشته در حال توسعه بوده و یک مدل انعطاف‌پذیر است که می‌تواند در جاهای مختلف و



شکل ۱: بخش‌های اصلی یک سیستم مدل‌سازی کیفیت هوا



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

داده‌های انتشار معمولاً به صورت 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 مورد نیاز 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 منحصر به فردی دارند. در شکل ۳ مراحل مدل‌سازی انتشار به صورت شماتیک نشان داده شده 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 از جمله 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

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 تفکیک پذیری بالا، مثلاً برای یک کشور یا قاره و برای یک سال یا یک دهه و یا بسیار جزئی و با تفکیک پذیری پایین، مثلاً برای منبع و طی یک ساعت تهیه شود. اطلاعات انتشار حاصل از مدل‌های انتشار و سیاهه‌های انتشار تنظیم شده، 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 قابل انعطاف است.^{۱۷}

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

مجموع تمام منابع متحرک ۶۱۷ هزار تن بوده، بنابراین ۸۵/۱ درصد از آلودگی هوای تهران از منابع متحرک تولید می‌شود.

مدل‌سازی پراکنش آلودگی هوا

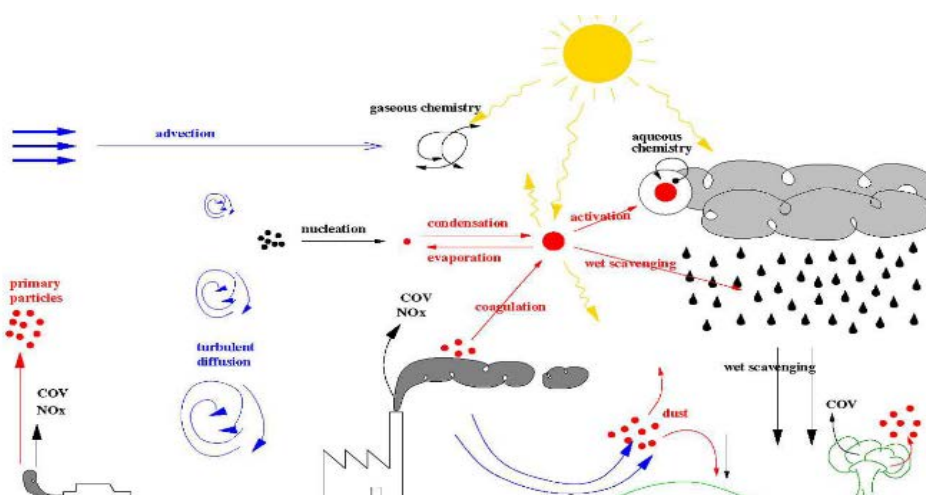
در سال‌های اخیر مدل‌های انتقال شیمیایی مختلفی برای شبیه‌سازی تشکیل و تکامل ذرات معلق و پیش‌بینی سطح آلودگی هوا توسعه داده شده‌اند. با این حال یک مدل تنها می‌تواند تعداد محدودی از گونه‌ها را مدل کند، درحالی‌که میلیون‌ها گونه ارگانیک و محصولات آن‌ها در تشکیل ذرات و از ن دخالت دارند. امروزه مدل‌های کیفیت هوا، معادلات تکامل شیمیایی انتقال جوی و همچنین فرایندهای رسوب خشک و تر مدل‌سازی می‌شوند. در شکل ۴ فرایندهای که باعث تکامل گونه‌ها می‌شوند نشان داده شده است.^{۱۵}

انتشار تأثیر قابل توجهی در کیفیت خروجی‌های مدل‌سازی دارد. عدم قطعیت در داده‌های انتشار غیرقابل اجتناب 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 شهرداری و همکاران^{۱۲} برای شهر تهران آماده شده استفاده می‌شود. در این سیاهه انتشار میزان تولید آلاینده‌های مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، اسیدهای 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 محاسبه شده 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



شکل ۳: مراحل مدل‌سازی انتشار



شکل ۴: فرایندهای که در مدل‌های فتوشیمیایی توصیف شده است

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 $35/614^\circ$ و $51/466^\circ$ ، دقت ۳ کیلومتر در ۳ کیلومتر و تعداد شبکه 39×51 استفاده شده 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 اندازه‌گیری شده، مقایسه شده است. در شکل ۵-الف و ۵-ب به ترتیب نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته بوسیله مدل WRF برای دما در ارتفاع ۲ متر و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی مهرآباد که در طول جغرافیایی $51/19^\circ$ و عرض جغرافیایی $35/41^\circ$ قرار دارد، به عنوان نمونه برای ۱۰ روز (اول آذر ماه تا ۱۰ آذر) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با توجه به این شکل می‌توان دید مدل توانسته به خوبی دما در ارتفاع ۲ متر را پیش‌بینی کند. همچنین مدل WRF توانسته مقدار سرعت در ارتفاع ۱۰ متر را تا حد خوبی پیش‌بینی کند.

نتایج مدل‌سازی کیفیت هوا

در این قسمت بعد از مدل‌سازی، کانتورهای توزیع غلظت میانگین آلاینده‌های CO ، NO_2 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

مدل‌های کیفیت هوا تغییرات غلظت گونه‌ها را با زمان در یک دومین مدل می‌کنند. در این مدل‌ها انتقال، واکنش شیمیایی و فرایندهای دیگر مانند انتشار و رسوب در نظر گرفته شده است. برای مدل‌های آفلاین شرایط آب‌وهوای و انتشار به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. مدل CAMx یک مدل پراکنش فتوشیمیایی اولری است که به منظور مدل‌سازی غلظت گازها و ذرات معلق در هوا طراحی شده است. این مدل در مقیاس‌های محله‌ای، منطقه‌ای و جهانی قابل استفاده است. این مدل نیز مانند دیگر مدل‌های فتوشیمیایی به منظور مدل‌سازی غلظت آلاینده‌ها از معادله پیوستگی اولری (معادله ۱) استفاده می‌کند.

(۱)

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

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 لایه مرزی، ρ چگالی اتمسفر و K ضریب نفوذ ادی می‌باشد. ترم اول در سمت راست معادله جابجایی افقی، ترم دوم نرخ انتقال عمودی بر اثر جابجایی لایه مرزی و ترم سوم نرخ میزان نفوذ عمودی بر اثر جابجایی لایه مرزی را نشان می‌دهد. شیمی مسئله نیز به صورت واکنش‌های که در مکانیزم‌های شیمیایی آمده، در نظر گرفته شده است. همچنین حذف گونه‌های آلاینده که شامل ته‌نشینی خشک و تر و میزان انتشار، به صورت چشمه در این معادله در نظر گرفته شده است.^{۱۹}

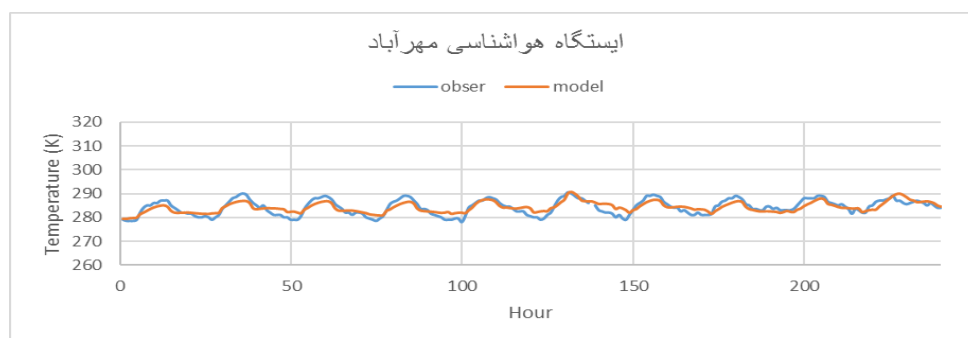
همان‌طور که گفته شده برای مدل‌سازی ذرات معلق به دلیل وجود واکنش‌های شیمیایی باید همه آلاینده‌ها (گازی و

برای ایستگاه‌های که نتایج ذرات معلق کمتر از ۲,۵ میکرومتر را بدرستی گزارش کرده‌اند، انجام شده 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 به صورت 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 داده‌های مربوط به ایستگاهها مقایسه شده است.

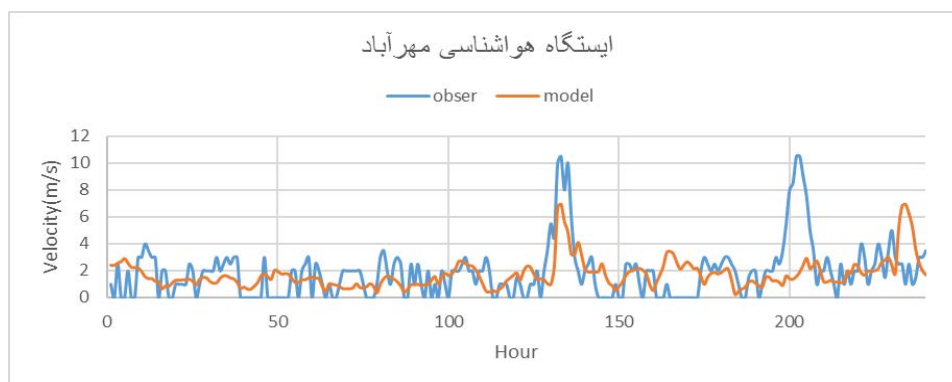
مرکزی شهر غلظت این آلاینده‌ها بیشتر است. این مدل‌سازی نشان می‌دهد در نقاطی که منابع متحرک بیشتر تردد دارند مقدار آلودگی هوا بیشتر است و می‌توان گفت بیشتر آلودگی هوای تهران ناشی از منابع متحرک می‌باشد.

درستی سنجی نتایج

به منظور 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 مورد مطالعه 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



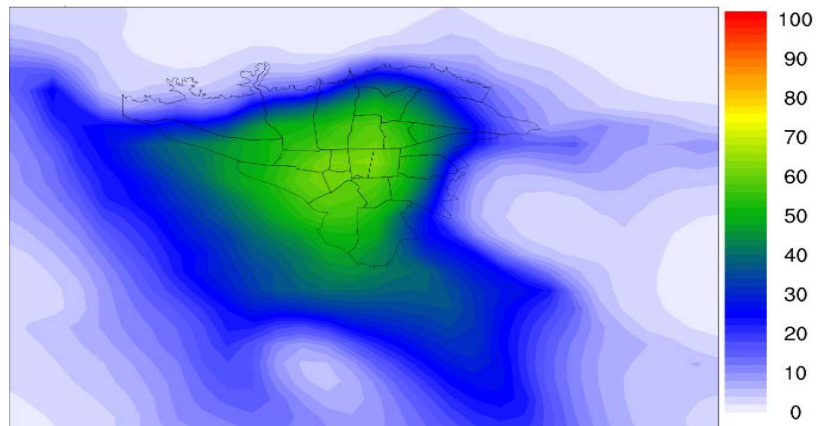
الف



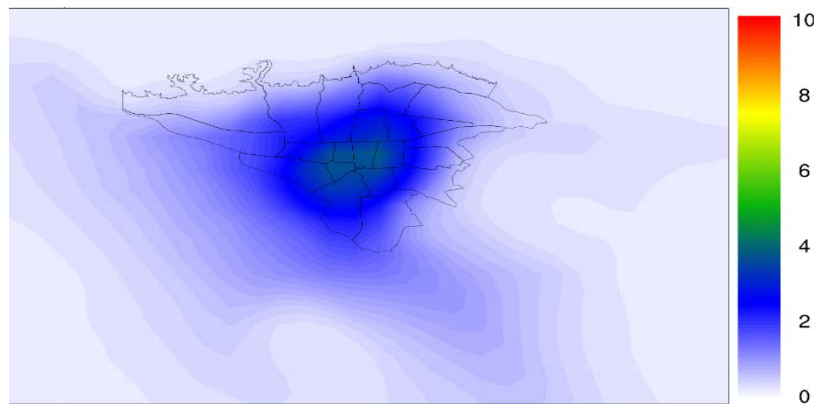
ب

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

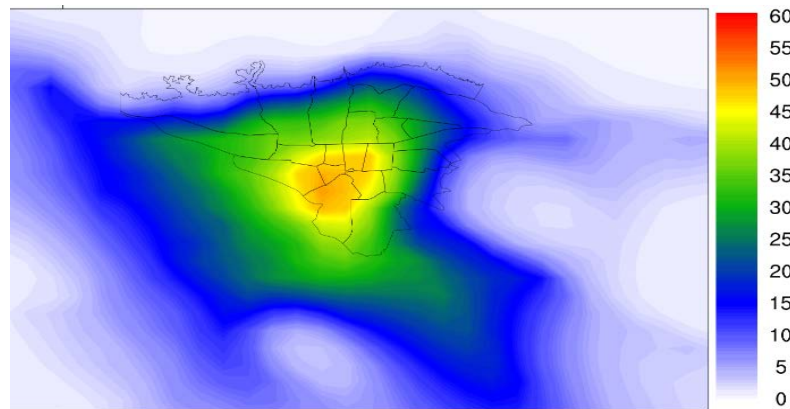
تعیین توزیع غلظت NO_2 ، CO و $PM_{2.5}$ با استفاده از یک مدل فتوشیمیایی آلودگی هوا: مطالعه موردی شهر تهران



الف



ب



ج

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

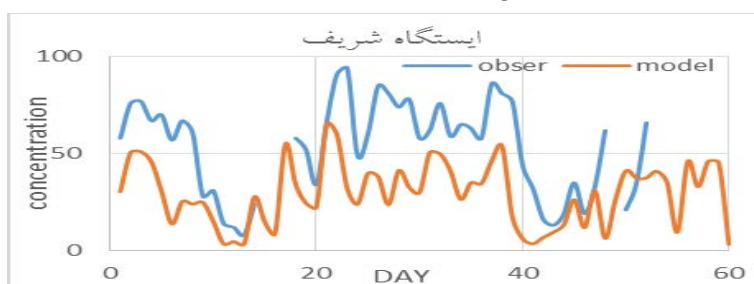
شهری و گلبرگ که در طول این اپیزود ۶۰ روزه غلظت این ذرات را در بیشتر روزها اندازه گیری کرده اند، مقایسه شده است. در همه این ایستگاه ها مقادیر غلظت های اندازه گیری

در شکل ۷ به منظور درستی سنجی نتایج به دست آمده، غلظت میانگین روزانه ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرومتر با مقادیر اندازه گیری شده در چهار ایستگاه شریف، شادآباد،

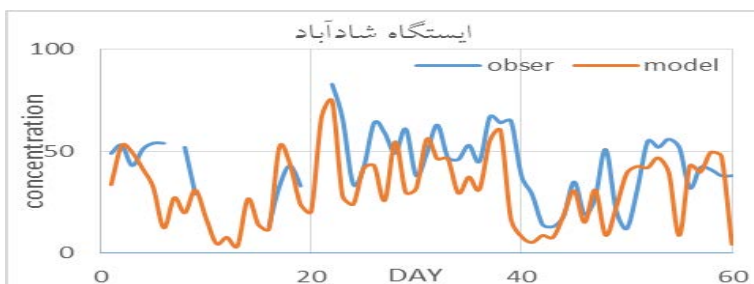
همانطور که از این شکل مشخص است، مدل توانسته به خوبی روند تغییرات میانگین روزانه غلظت ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرومتر را دنبال کند.

$$NMB = \frac{1}{DAY} \left(\sum_{i=1}^{DAY} \frac{observation - model}{observation} \right) * 100 \quad (2)$$

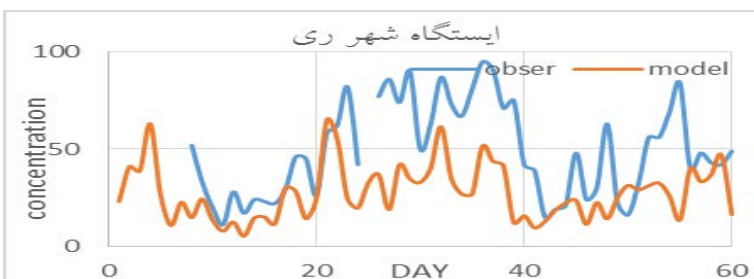
شده از نتایج مدل بیشتر است. دلیل بیشتر بودن مقادیر اندازه‌گیری شده می‌تواند به این مربوط شود که سیاهه انتشار دقیق نیست. میزان خطای NMB(Normalized Mean Bias) (فرمول ۵-۱) برای ایستگاه‌های شریف، شادآباد، شهری و گلبرگ به ترتیب ۰/۴۱، ۰/۲۴، ۰/۳۷ و ۰/۳۷ می‌باشد.



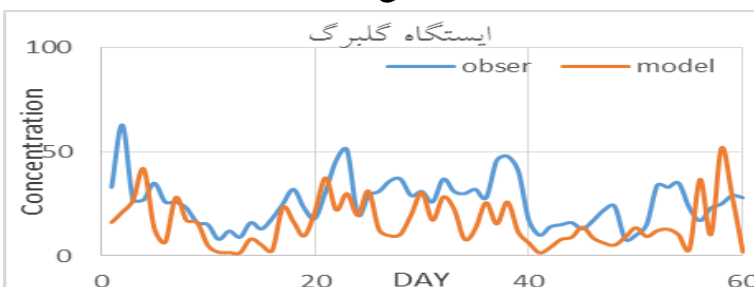
الف



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

نتیجه گیری

در سال‌های اخیر در شهر تهران معضل آلودگی هوا به یکی از جدی‌ترین مشکلات در این شهر تبدیل شده است. از میان آلاینده‌های هوا، ذرات معلق کمتر از 2.5 میکرومتر از نظر 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 به طوری که میزان آلاینده‌های موجود در هوا در حد مطلوب و مجاز قرار گیرد.

در این تحقیق با استفاده از سیستم مدل‌سازی $WRF/CAMx$ غلظت CO ، NO_2 و $PM_{2.5}$ ناشی از منابع متحرک در یک اپیزود 60 روزه (آذرماه و دی‌ماه سال 1394) در محدوده شهر تهران محاسبه شده است. در این راستا ابتدا سیاهه انتشار و خروجی‌های مدل هواشناسی WRF برای مدل‌سازی کیفیت هوا آماده شده و با استفاده از مدل $CAMx$ ، کیفیت هوای شهر تهران شبیه‌سازی شده است. سپس به منظور درستی سنجی، نتایج مربوط به غلظت ذرات معلق کمتر از 2.5 میکرومتر با غلظت‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا مقایسه شده است. میزان خطای میانگین برای ایستگاه‌های شریف، شادآباد، شهرری و

گلبرگ به ترتیب 41% ، 24% ، $37/8\%$ و $37/2\%$ می‌باشد. که این مقدار خطا برای مدل‌سازی آلودگی هوا قابل قبول می‌باشد. بنابراین از این سیستم مدل‌سازی می‌توان برای پیش‌بینی آلودگی هوا، مطالعه سناریوهای که می‌توانند در کاهش آلودگی هوا اثرگذار باشند، استفاده کرد. از خروجی مدل‌سازی آلودگی هوا و نتایج پیش‌بینی آلودگی هوا می‌توان در جهت هشدار به شهروندان در شرایطی که هوا ناسالم است و همچنین تسهیل اتخاذ تصمیمات مدیریتی به وسیله مدیران شهری استفاده کرد. از جمله این تصمیمات می‌توان به اعمال محدودیت‌های ترافیکی نظیر طرح زوج و فرد، تعطیلی صنایع آلاینده، نصب فیلتر دوده روی خودروهای دیزلی، تعطیلی مدارس و ادارات و غیره اشاره کرد. همچنین با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تأثیرات تصمیمات مدیریتی بلندمدت 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 گردو خاک مدل نشده است بنابراین در مطالعات آتی شبیه‌سازی انتشار ذرات گردو خاک 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.

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

Determination of the Distribution of NO₂, CO, and PM_{2.5} Concentration Using a Photochemical Model of Air Pollution: Case Study of Tehran City

Milad Saeedi^{1*}, Alireza Roudbari²

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 NO₂, 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 drawn for NO₂, 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