

## سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران

پذیرش نهایی: ۹۶/۷/۲۲

دریافت مقاله: ۹۶/۴/۲۳

DOI: 10.18869/acadpub.geores.32.3.23

### چکیده

سیستم‌های پیش‌بینی کیفیت هوا از جمله ابزارهای کاربردی در راستای حفاظت از سلامت شهروندان می‌باشند که به‌طور گسترده در کشورهای مختلف پیاده‌سازی شده‌اند. این سیستم‌ها به‌منظور محاسبه غلظت آلاینده‌هایی نظیر  $\text{O}_3$ <sup>۱</sup>، دی‌اکسید نیتروژن<sup>۲</sup>، ذرات معلق کوچکتر از  $2.5\mu\text{m}$  و  $10\mu\text{m}$  میکرون<sup>۳</sup> که تأثیرات جدی بر سلامت انسان دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این اطلاعات و نتایج پیش‌بینی آلودگی هوا می‌توان در جهت هشدار به شهروندان در شرایط اضطرار آلودگی هوا و همچنین تسهیل اتخاذ تصمیمات مدیریتی توسط مدیران و برنامه‌ریزان شهری استفاده کرد. از جمله این تصمیمات می‌توان به اعمال محدودیت‌های ترافیکی نظیر طرح زوج و فرد، تعطیلی صنایع آلاینده، تعطیلی مدارس و ادارات و غیره اشاره کرد. در همین راستا برای شهر تهران نیز سامانه پیش‌بینی آلودگی هوا برای اهداف مدیریت کوتاه مدت و بلند مدت آلودگی هوای این شهر راه‌اندازی شده است. این سامانه در حاضر به‌صورت عملیاتی و روزانه برای شهر تهران در حال اجرا و استفاده می‌باشد و نتایج مربوط به پیش‌بینی شرایط هواشناسی و آلودگی هوا برای ۷۲ ساعت آینده در شهر تهران را از طریق سایت سامانه<sup>۴</sup> در اختیار شهروندان، کارشناسان و تصمیم‌گیران شهری قرار می‌دهد. در مقاله حاضر به معرفی این سامانه، بانک‌های اطلاعاتی در حال استفاده، مدل‌ها و اجزای مختلف آن پرداخته شده است. همچنین ارتباط میان اجزای مختلف سامانه، کاربردهای آن و خروجی‌هایی که سامانه در اختیار می‌گذارد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای سایر کلان‌شهرهای کشور در راستای راه‌اندازی سامانه‌های مدیریتی در حوزه کاهش آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: سامانه پیش‌بینی آلودگی هوا، مدیریت آلودگی هوا

### مقدمه

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین معضلات کلان‌شهرهای جهان است که علاوه بر ضررهای وارده بر سلامت شهروندان، تأثیرات اجتماعی و اقتصادی فراوانی را بر شهر تحمیل می‌کند. سیستم‌های پیش‌بینی کیفیت هوا از جمله ابزارهای کاربردی در راستای حفاظت از سلامت شهروندان می‌باشند که به‌طور گسترده در کشورهای مختلف پیاده‌سازی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها به‌منظور محاسبه غلظت آلاینده‌هایی نظیر مونوکسید کربن، اکسیدهای گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و ذرات معلق که

<sup>۱</sup>  $\text{O}_3$

<sup>۲</sup>  $\text{NO}_2$

<sup>۳</sup>  $\text{PM}_{2.5}$

<sup>۴</sup>  $\text{PM}_{10}$

تأثیرات جدی بر سلامت انسان دارند مورد استفاده قرار می گیرند (Hosseini, Shahbazi, 2016). از این اطلاعات و نتایج پیش-بینی های آلودگی هوا می توان در جهت هشدار به شهروندان در شرایط اضطرار آلودگی هوا و همچنین تسهیل اتخاذ تصمیمات مدیریتی توسط مدیران و برنامه ریزان شهری استفاده کرد (Baldasano, Jiménez-Guerrero et al, 2008). از جمله این تصمیمات می توان به اعمال محدودیت های ترافیکی نظیر طرح زوج و فرد، تعطیلی صنایع آلاینده، تعطیلی مدارس، ادارات و غیره اشاره کرد. برای این منظور مطالعات مختلفی در کشور به منظور مدل سازی آلودگی هوا و محاسبه غلظت آلاینده ها و همچنین آماده سازی ورودی های مورد نیاز برای این ابزارها انجام گرفته است. در سال ۱۳۸۸، الله یاری با استفاده از شبکه عصبی به پیش بینی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۱۰ میکرون<sup>۱</sup> شهر تهران در سال های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ پرداخته است. در این تحقیق مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه ای برای چند ایستگاه ساخته شد و با غلظت های ثبت شده در ایستگاه ها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این کار نشان داد که این مدل توانایی خوبی در پیش بینی غلظت آلاینده مورد نظر دارد (الله یاری، ۱۳۸۸). در سال ۱۳۹۰، گیوه چی با استفاده از مدل انتشار<sup>۲</sup> به مطالعه غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرون ناشی از غبار صحرایی شهر تهران در سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ پرداخته است. در این تحقیق با استفاده از عکس ها و غلظت های ثبت شده در ایستگاه های سنجش آلودگی نتایج به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی، سهم میزان گردوغبار ناشی از صحرای کشورهای همسایه در شهر تهران را مشخص می کند (گیوه چی، ۱۳۹۰). در سال ۱۳۹۱ شهبازی و همکاران پراکنش آلاینده های مونوکسید کربن<sup>۳</sup>، مونوکسید نیتروژن<sup>۴</sup>، دی اکسید گوگرد<sup>۵</sup> و دی اکسید نیتروژن در یک اپیزود بحرانی با استفاده از سیستم مدل سازی کیفیت هوا<sup>۶</sup> را بررسی کرده اند و نتایج شبیه سازی را با داده های ایستگاه های پایش کیفیت هوا ارزیابی کرده اند (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۱). در سال ۱۳۹۱ هاشمیان نژاد، پراکنش آلاینده های مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، دی اکسید گوگرد و دی اکسید نیتروژن را با ترکیب مدل های انتشار، هواشناسی و کیفیت هوا<sup>۷</sup> شبیه سازی کرده است. در این تحقیق برای مدل سازی هواشناسی از سه شبکه تودرتو استفاده شده است. نتایج این تحقیق با مقادیر اندازه گیری شده غلظت آلاینده ها در شهر تهران تطابق خوبی نشان داده است (هاشمیان نژاد، ۱۳۹۱). در سال ۱۳۹۲، شهبازی تأثیر پدیده وارونگی در ایجاد بحران آلودگی هوا را با استفاده از سیستم مدل سازی کیفیت هوا<sup>۸</sup> مورد مطالعه قرار داده است. در این تحقیق مدل سازی در دو اپیزود (۳ تا ۷ ژوئیه ۲۰۱۲ و ۳۰ نوامبر تا ۶ دسامبر ۲۰۱۳) به منظور بررسی پدیده وارونگی هوا انجام شده و نتایج به دست آمده برای غلظت آلاینده های مونوکسید کربن، مونوکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و دی اکسید نیتروژن با داده های ایستگاه های پایش آلودگی هوا مقایسه شده اند. در نهایت نشان داده شد به دلیل پدیده وارونگی، غلظت این آلاینده ها در اپیزود دوم افزایش یافته است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۲). در سال ۱۳۹۲، محق با استفاده از مدل ترکیبی هواشناسی و کیفیت هوا<sup>۹</sup> به مطالعه غلظت مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و دی اکسید گوگرد در کشور ایران پرداخته است. در این تحقیق نتایج مدل با مقدار غلظت آلاینده های ثبت شده در ۵ شهر بزرگ صنعتی مقایسه شد. نتایج به دست آمده از مقادیر اندازه گیری شده در واقعیت بسیار کمتر بوده که دلیل این اختلاف دقت پایین داده های انتشار بیان شده است (محق، ۱۳۹۲). در سال ۱۳۹۳ میرشی به توسعه ضرایب انتشار منابع متحرک شهر تهران به منظور استفاده در مدل عددی پراکنش آلاینده های<sup>۱۰</sup> پرداخته است. در این تحقیق توسعه ماتریس انتشار مربوط به منابع متحرک در سیستم مدل سازی انتشار<sup>۱۱</sup> صورت گرفته است. ضرایب انتشار جاده ای شهر با استفاده از داده های واقعی ترافیکی و اجرای مدل سازی انتشار منابع متحرک<sup>۱۲</sup>

<sup>1</sup> PM10

<sup>2</sup> HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)

<sup>3</sup> CO

<sup>4</sup> NO

<sup>5</sup> SO2

<sup>6</sup> Weather Research and Forecasting model (WRF)-Comprehensive Air quality Model with Extensions (CAMx)

<sup>7</sup> Sparse Matrix Operator Kernel (SMOKE)-WRF- Community Multiscale Air Quality (CMAQ)

<sup>8</sup> CMAQ-WRF

<sup>9</sup> MOVES-SMOKE

<sup>10</sup> MOVES

تعیین و برای تولید داده‌های انتشار انواع گونه‌های شیمیایی مورد بررسی در مکانیزم شیمیایی مدل‌های کیفیت هوا در زمان و مکان مشخص تلفیق شده‌اند. در نهایت در راستای کاربرد ماتریس انتشار منابع موردنظر، مدل کیفیت هوا در ترکیب با مدل‌سازی میدان هواشناسی<sup>۱</sup> اجرا شده است (میرشی، ۱۳۹۳). شهبازی و همکاران در سال ۲۰۱۶ سیاهه انتشار مکانی شهر تهران را به منظور استفاده در مدل‌های کیفیت هوا تهیه کرده‌اند. در این تحقیق میزان انتشار آلاینده‌های مختلف ناشی از منابع آلاینده موجود در شهر تهران در تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر ارائه شده است. همچنین براساس نتایج بدست آمده سهم منابع آلاینده مختلف در تولید انواع آلاینده‌ها در شهر تهران مشخص گردید. بر اساس این تحقیق منابع متحرک ۶٪ از اکسیدهای گوگرد، ۴۶٪ از اکسیدهای نیتروژن، ۹۷٪ از مونوکسید کربن، ۸۶٪ از ترکیبات آلی فرار و ۷۰ درصد از ذرات معلق را تولید می‌کنند (Shahbazi, Reyhanian et al, 2016). در سال ۲۰۱۷ شهبازی و همکاران با استفاده از مدل کیفیت هوای<sup>۳</sup> به بررسی تأثیر طرح زوج و فرد بر غلظت آلاینده‌های مونوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن در شهر تهران پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد، میانگین تغییر در غلظت این آلاینده‌ها با اعمال این سناریو در شهر تهران به ترتیب ۴ و ۲ درصد بوده است (Shahbazi, Ganjiazad et al, 2017).

در همین راستا برای شهر تهران نیز سامانه پیش‌بینی آلودگی هوا برای اهداف مدیریت کوتاه مدت و بلند مدت آلودگی هوای این شهر راه‌اندازی شده است. این سامانه در حاضر بصورت عملیاتی و روزانه برای شهر تهران در حال اجرا و استفاده می‌باشد و نتایج مربوط به پیش‌بینی شرایط هواشناسی و آلودگی هوا برای ۷۲ ساعت آینده در شهر تهران را از طریق سایت سامانه<sup>۲</sup> در اختیار شهروندان، کارشناسان و تصمیم‌گیران شهری قرار می‌دهد. در مقاله حاضر به معرفی این سامانه، بانک‌های اطلاعاتی در حال استفاده، مدل‌ها و اجزای مختلف آن پرداخته شده است. همچنین ارتباط میان اجزای مختلف سامانه، کاربردهای آن و خروجی‌هایی که سامانه در اختیار می‌گذارد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای سایر کلان‌شهرهای کشور در راستای راه‌اندازی سامانه‌های مدیریتی در حوزه کاهش آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد.

## روش تحقیق

سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از مدل‌های هواشناسی و فتوشیمیایی مورد تأیید سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا<sup>۳</sup> توسعه داده شده است و در حال حاضر همه‌روزه برای شهر تهران در حال اجرا می‌باشد. با استفاده از این سامانه نتایج پیش‌بینی میدان‌های هواشناسی نظیر میدان‌های باد، دما، بارش، ابرناکی و غیره و همچنین وضعیت آلودگی هوای شهر تهران برای دو روزه آینده محاسبه شده و جهت اطلاع‌رسانی عمومی و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این سامانه همچنین در اهداف بررسی و محاسبه اثربخشی راه کارهای مختلف کنترل و کاهش آلودگی هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این جمله می‌توان به بررسی اثربخشی اجرایی شدن برنامه جامع کاهش آلودگی هوای شهر تهران دربرش یک‌ساله اشاره کرد. در این برنامه یک‌ساله تصمیماتی ازجمله طرح کاهش و ایجاد محدودیت ترافیکی برای وسایل نقلیه بر اساس میزان آلاینده‌گی تولیدی آن‌ها، جایگزینی تاکسی‌های فرسوده با نو، نصب فیلتر دوده بر روی ناوگان اتوبوس شرکت واحد، از رده خارج کردن مینی‌بوس‌های فرسوده شهر تهران و غیره اتخاذ شده است.

سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران از پنج قسمت اصلی تشکیل شده است:

- سامانه پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی

<sup>۱</sup> WRF-CAMx

۲ نشانی سایت: apfs.tehran.ir

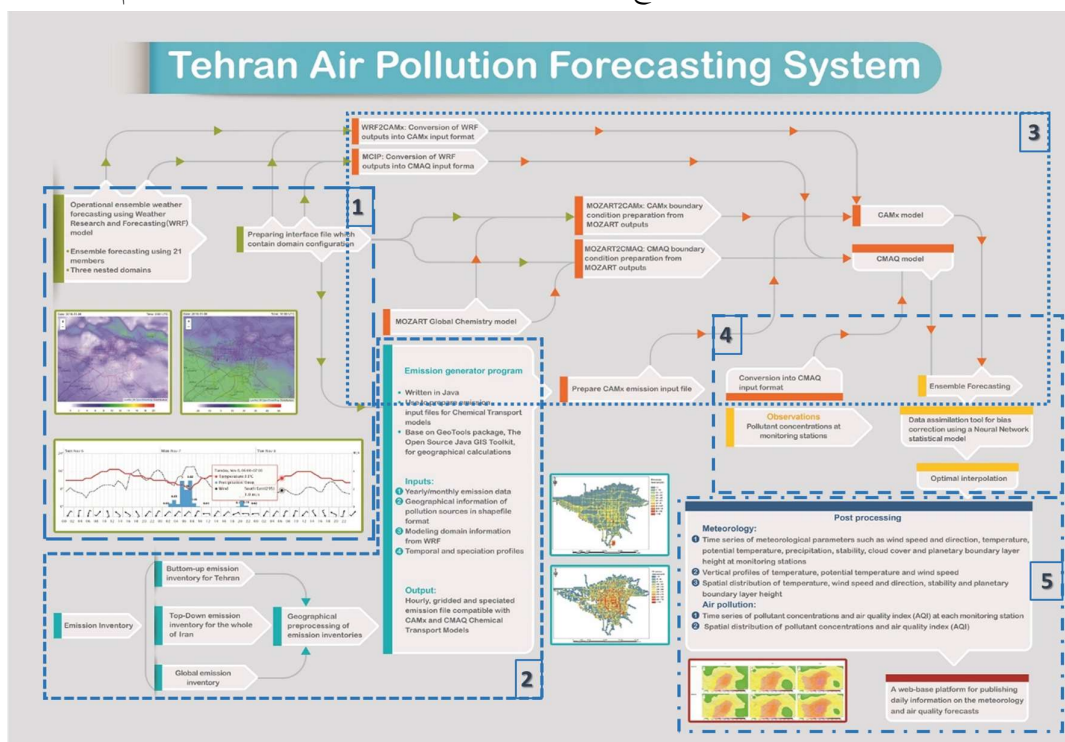
<sup>۳</sup> United States Environmental Protection Agency

- سامانه محاسبه و پردازش پایگاه داده انتشار
  - سامانه محاسبه و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها متشکل از دو مدل فتوشیمیایی
  - سامانه پردازش آماری و اصلاح نتایج پیش‌بینی‌ها
  - پس‌پردازش، تولید خروجی‌های گرافیکی و نمایش بر روی سامانه تحت وب
- در شکل ۱ اجزای مختلف سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر نشان داده شده است.

### سامانه پیش‌بینی هواشناسی

در اولین قسمت از سامانه، به پیش‌بینی میدان‌های هواشناسی، از جمله میدان‌های باد، دما، بارش، ابرناکی و غیره، در سه منطقه محاسباتی به ترتیب بر روی کل کشور ایران، استان تهران و استان‌های هم‌جوار و شهر تهران با ابعاد شبکه ۲۷، ۹ و ۳ کیلومتر پرداخته می‌شود (Shahbazi, Hosseini et al, 2014). برای این منظور از مدل پیش‌بینی وضعیت جوی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. دومین‌های محاسباتی در مدل هواشناسی به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است.

سامانه پیش‌بینی هواشناسی در سیستم پیش‌بینی کیفیت هوای شهر تهران، یک سامانه همادی می‌باشد. برای ایجاد اعضای همادی، از ایجاد پریشیدگی در شرایط اولیه و مرزی و همچنین استفاده از ترکیب پارامتر سازی‌های فیزیکی متفاوت استفاده می‌شود. بخش مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در شرایط اولیه و مرزی با ایجاد پریشیدگی‌های مثبت و منفی در شرایط اولیه و همچنین در شرایط مرزی مدل<sup>۱</sup> اعمال می‌شود. درواقع این پریشیدگی‌ها به شرایط اولیه و مرزی اضافه (و یا کم) می‌شوند.

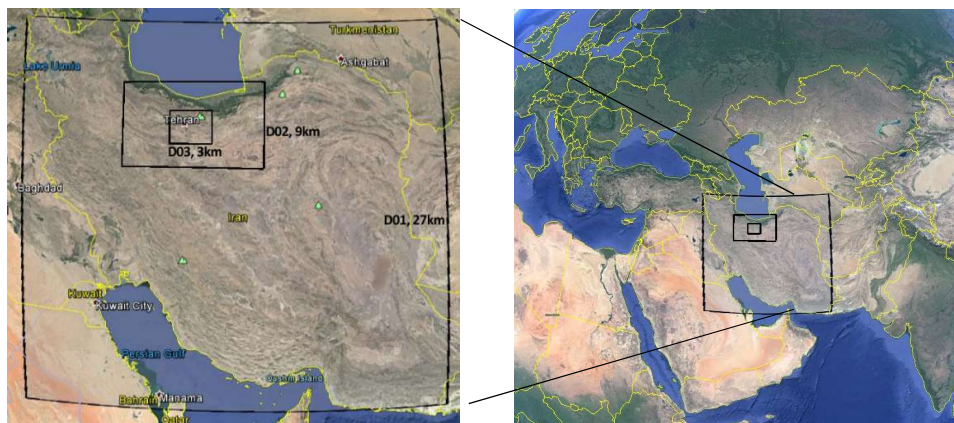


شکل ۱- شماتیک اجزای مختلف سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران و ارتباط آن‌ها با یکدیگر

<sup>۱</sup> WRF

سامانه پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران / ۵

پس از اجرای مدل هواشناسی، به منظور عملیاتی سازی اجرای سایر قسمت های سامانه، با استفاده از خروجی های مدل هواشناسی یک فایل رابط حاوی تنظیمات اجرایی مدل از جمله مشخصات دومین های محاسباتی، زمان شروع پردازش و مدت زمان مورد نیاز به منظور انجام پیش بینی، تولید و به عنوان ورودی در بخش های دیگر سامانه، یعنی مدل انتشار و مدل های کیفیت هوا، مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۲- شماتیک دومین های محاسباتی در سامانه پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران

### سامانه محاسبه اطلاعات انتشار

در دومین بخش از سامانه پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران، ورودی های انتشار مورد نیاز مدل های آلودگی هوا تولید و آماده ورودی به مدل می شوند. برای این منظور از سه پایگاه داده انتشار شامل الف) سیاهه انتشار شهر تهران، ب) سیاهه انتشار کل کشور ایران و ج) سیاهه انتشار جهانی<sup>۱</sup> استفاده می شود.

سیاهه انتشار شهر تهران، به دلیل دقت کیفیت بالاتر (رزولوشن مکانی ۵۰۰ متر) در مقایسه با دو پایگاه داده دیگر، با اولویت اول پردازش شده و وارد مدل می گردد (Shahbazi, Taghvaei et al, 2016, Shahbazi, Reyhanian et al, 2016). دومین پایگاه داده، تولید و انتشار آلودگی در کل ایران می باشد که با تفکیک مکانی شهرهای ایران پردازش شده و با اولویت دوم به ورودی انتشار مدل های کیفیت هوا اضافه می گردد. در مرحله سوم به منظور پوشش دادن مناطقی که اطلاعات انتشار برای آن ها موجود نمی باشد و یا برخی منابع نادیده گرفته شده اند، از اطلاعات پایگاه داده انتشار جهانی<sup>۱</sup> با تفکیک مکانی ۰٫۱ درجه استفاده می شود (Janssens-Maenhout, Dentener et al, 2012).

یکی از مراحل اصلی پردازش اطلاعات انتشار در سامانه پیش بینی آلودگی هوا، انجام سه فرآیند گونه زایی شیمیایی، اعمال تفکیک زمانی و در نهایت شبکه بندی سیاهه انتشار می باشد. به همین جهت، سه پایگاه داده انتشار، وارد ابزار پردازش اطلاعات انتشار به منظور تولید ورودی مدل آلودگی هوا می شوند. این برنامه به زبان جاوا<sup>۲</sup> نوشته شده و قابلیت انجام سه فرآیند گونه زایی شیمیایی، اعمال تفکیک زمانی بر روی داده های انتشار و شبکه بندی اطلاعات انتشار بر اساس موقعیت جغرافیایی منابع و اطلاعات شبکه را دارا می باشد. ورودی های مورد نیاز ابزار پردازش اطلاعات انتشار شامل دو فایل ورودی برای میزان سالانه انتشار از منبع آلاینده و موقعیت جغرافیایی منبع (به صورت نقطه ای، خطی و یا سطحی) می باشد. در تنظیمات ابزار پردازش اطلاعات انتشار برای هر منبع آلاینده پروفیل های تفکیک زمانی ماهانه، روزانه و ساعتی و همچنین پروفیل های گونه زایی شیمیایی مطابق با مکانیزم شیمیایی مورد استفاده در مدل آلودگی هوا به صورت مجزا اختصاص داده می شود.

<sup>۱</sup> Edgar-HTAP

<sup>۲</sup> JAVA

## سامانه پیش بینی کیفیت هوا

دو دسته ورودی تولیدشده در قسمت های اول و دوم سامانه، شامل پیش بینی میدان های هواشناسی و اطلاعات انتشار، وارد مدل های کیفیت هوا<sup>۱</sup> شده و در این مدل ها از طریق حل معادله بقاء برای هر گونه آلاینده، به محاسبه غلظت آلاینده های گازی و ذرات اولیه و ثانویه در سه دومین محاسباتی اشاره شده، پرداخته می شود (Shahbazi, Hosseini et al, 2014). مدل های کیفیت هوا<sup>۲</sup>، مدل های اولیری فتوشیمیایی می باشند که فرآیندهای جابجایی عمودی و افقی، پخش عمودی و افقی، ته نشینی تر و خشک و واکنش های شیمیایی را برای هر گونه شیمیایی (i) شبیه سازی کرده و با حل معادله پیوستگی (معادله ۱) غلظت آلاینده ها را محاسبه می کند.

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\nabla_H V_H c_l + \left[ \frac{\partial(c_l \eta)}{\partial z} - c_l \frac{\partial^2 h}{\partial z \partial t} \right] + \nabla \cdot \rho K \nabla \left( \frac{c_l}{\rho} \right) + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{Emission} + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{Chemistry} + \frac{\partial c_l}{\partial t} \Big|_{Removal} \quad (1)$$

که در این رابطه  $V_H$  بردار سرعت افقی،  $\eta$  نرخ انتقال عمودی،  $h$  ارتفاع لایه ی مشترک،  $\rho$  دانسیته اتمسفر،  $K$  ضریب تغییر توربولانسی<sup>۳</sup> است. اولین ترم در سمت راست معادله، جابجایی افقی، دومین ترم نرخ کلی انتقال در جهت عمودی و سومین ترم جریانات نفوذ را نشان می دهد. شیمی مسئله به صورت یک سری واکنش های خودبه خودی و با توجه به یک مکانیزم شیمیایی خاص تعریف می شود. حذف آلاینده ها نیز شامل، ته نشینی خشک<sup>۴</sup> و مرطوب<sup>۵</sup> (به وسیله بارش) می شود.

به منظور بررسی عملکرد مدل های فتوشیمیایی در سامانه پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران نتایج مدل ها با غلظت های اندازه گیری شده در ایستگاه ها مقایسه می شوند تا از این طریق بتوان به طور مداوم عملکرد مدل ها در شرایط عملکردی مختلف را بررسی کرده و نواقص مدل بر طرف گردد. شکل ۳ نمونه ای از این نتایج را برای آلاینده های ذرات معلق کوچکتر از ۲,۵ میکرون، دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد و در بازه زمانی سه ماهه از ژانویه تا مارچ سال ۲۰۱۶ نشان می دهد. در این شکل میانگین غلظت روزانه آلاینده ها با پارامتر مشابه اندازه گیری شده در موقعیت ایستگاه های پایش مقایسه شده است.

از دیگر کاربردهای سامانه پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران، در کنار پیش بینی روزانه سطح غلظت آلاینده های مختلف، فراهم سازی ابزاری مناسب جهت بررسی اثربخشی راه کارهای کنترل و کاهش آلودگی هوا و همچنین انجام پردازش های آنالیز حساسیت آلودگی هوای شهر تهران نسبت به پارامترهای مختلف از جمله منابع تولید و انتشار آلودگی می باشد. به عنوان نمونه، در شکل ۴ تغییرات غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲,۵ میکرون در شهر تهران ناشی از جایگزینی موتورسیکلت های کاربراتوری با برقی در دو سناریو و برای یک اپیزود ۲۰ روزه بحرانی آلودگی در سال ۱۳۹۴ نشان داده شده است.

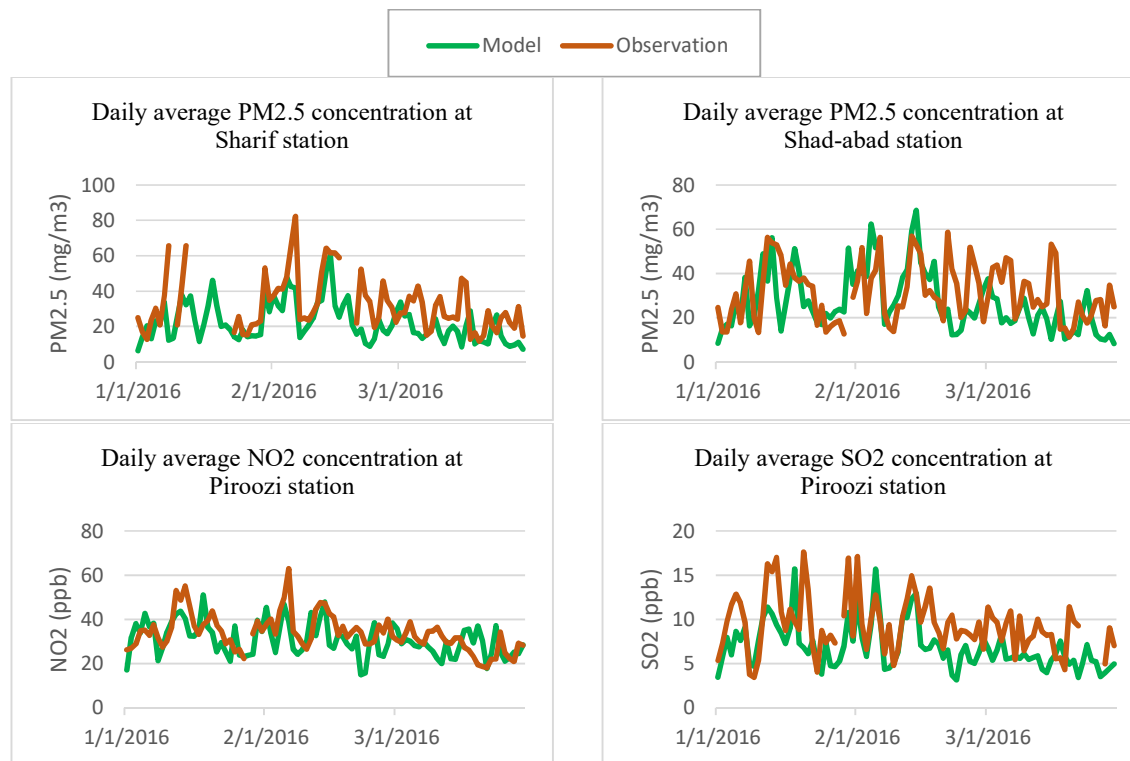
<sup>1</sup> CMAQ

<sup>2</sup> CAMx

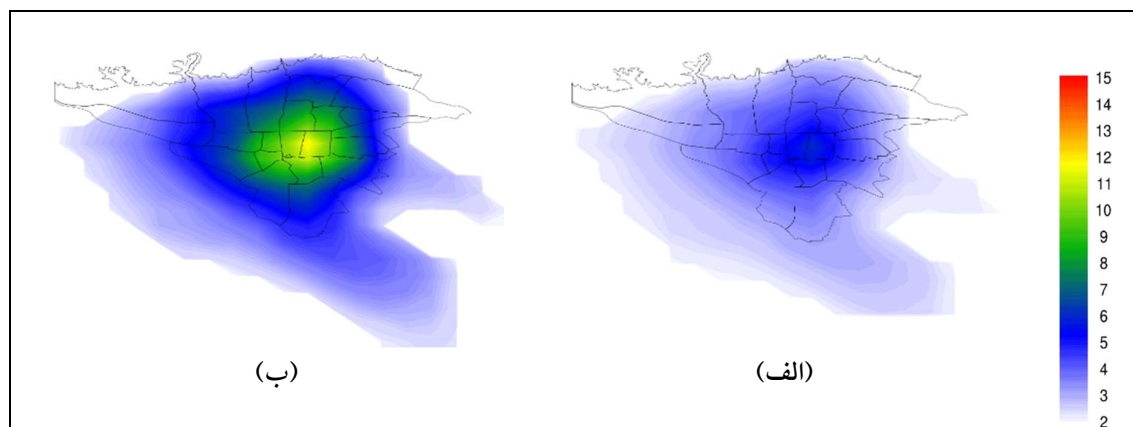
<sup>3</sup> Turbulent exchange (or diffusion) coefficient

<sup>4</sup> Dry deposition

<sup>5</sup> Wet scavenging



شکل ۳- مقایسه نتایج سامانه پیش‌بینی آلودگی هوا با غلظت‌های اندازه‌گیری شده در موقعیت ایستگاه‌های پایش شهر تهران



شکل ۴- درصد کاهش غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲٫۵ میکرون در شهر تهران ناشی از جاگزینی موتورسیکلت‌های کاربراتوری با برقی در دو سناریو الف) جایگزینی ۲۵٪ ناوگان - ب) جایگزینی ۵۰٪ ناوگان

مدت زمان اجرای روزانه مدل هواشناسی، مدل‌های کیفیت هوا<sup>۱</sup> بر روی سرور و به مدت ۷۲ ساعت به ترتیب ۲،۳۰، ۱،۳۰ و ۳ ساعت می‌باشد.<sup>۳</sup>

1 CMAQ  
2 CAMx

۳ مشخصات سخت‌افزار مورد استفاده در سامانه پیش‌بینی آلودگی هوا به صورت زیر می‌باشد:

-Operating system: CentOS 6.5  
-Server: HP ProLiant DL580 G7  
-8 Intel(R) Xeon E7- 4870 CPUs (2.40 GHz)  
-Number of CPU cores: 80  
-132GB memory space

## سامانه پردازش آماری و اصلاح پیش‌بینی‌ها

چهارمین قسمت از سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران، پردازش آماری نتایج پیش‌بینی‌ها در موقعیت ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا به منظور بهبود و اصلاح پیش‌بینی‌ها می‌باشد. برای این منظور از یک مدل آماری بر پایه شبکه عصبی استفاده شده است (Mishra and Goyal, 2016). مدل آماری با استفاده از داده‌های پیش‌بینی هواشناسی، پیش‌بینی آلودگی هوا و غلظت‌های اندازه‌گیری شده در موقعیت ایستگاه‌های پایش در بازه زمانی دو ساله از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ آموزش دیده شده و به صورت یک مدل مجزا همه‌روزه پس از اجرای مدل‌های هواشناسی و کیفیت هوا، اجرا شده است و نتایج نهایی پیش‌بینی کیفیت هوا در موقعیت ایستگاه‌های پایش شهر تهران را تولید می‌کند. پس از اجرای مدل آماری، با استفاده از روش میانبایی بهینه<sup>۱</sup>، نتایج مدل آماری در میدان غلظت پیش‌بینی شده توسط مدل‌های فتوشیمیایی اعمال شده و از این طریق نقشه‌های غلظت آلاینده‌ها بر روی شهر تهران نیز اصلاح می‌شود (Prasad, Gorai et al, 2016).

## پس‌پردازش، تولید خروجی‌های گرافیکی و نمایش بر روی سامانه تحت وب

نتایج روزانه پیش‌بینی کیفیت هوای شهر تهران در قالب سامانه‌ای تحت وب در اختیار کارشناسان متخصص قرار داده می‌شود تا با استفاده از این نتایج و بر اساس تجربه، وضعیت کیفیت هوای شهر تهران را برای دو روز آتی پیش‌بینی نمایند. اطلاعات متعددی از نتایج روزانه مدل‌های مختلف بر روی سامانه تحت وب پیش‌بینی آلودگی هوا قرار داده می‌شود که به دو دسته کلی پارامترهای هواشناسی و غلظت آلاینده‌ها تقسیم می‌شود.

در قسمت هواشناسی اطلاعاتی از جمله میدان دما، دمای پتانسیل، سرعت و جهت باد، بارش، ضخامت لایه‌مرزی و وضعیت پایداری جوی به صورت نقشه‌های دوبعدی، نمودار تغییرات زمانی و نمودار تغییرات عمودی با ارتفاع در نقاط مشخص در اختیار کارشناسان قرار داده می‌شود. در شکل ۵ نمونه‌ای از خروجی‌های هواشناسی که همه‌روزه بر اساس نتایج پیش‌بینی‌ها بر روی وبسایت سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران قرار داده می‌شود، نمایش داده شده است.

به همین صورت در قسمت آلودگی هوا، غلظت آلاینده‌های ذرات معلق کوچکتر از ۲٫۵ و ۱۰ میکرون، دی‌اکسید گوگرد، ازن، دی‌اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن و شاخص کیفیت هوا به صورت نقشه‌های دوبعدی یا کانتور، نمودارها و جداول متغیر با زمان در نقاط مشخص تولید می‌شود. در شکل ۶ نمونه‌ای از نتایج کیفیت هوا که همه‌روزه بر اساس پیش‌بینی‌های به دست آمده بر روی وبسایت سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران قرار داده می‌شود، نمایش داده شده است. خروجی‌های بخش کیفیت هوا، به تفکیک نتایج دو مدل اویلری فتوشیمیایی<sup>۲</sup> و مدل آماری در اختیار کاربر قرار داده می‌شود.

### شکل ۶ کارهای آتی

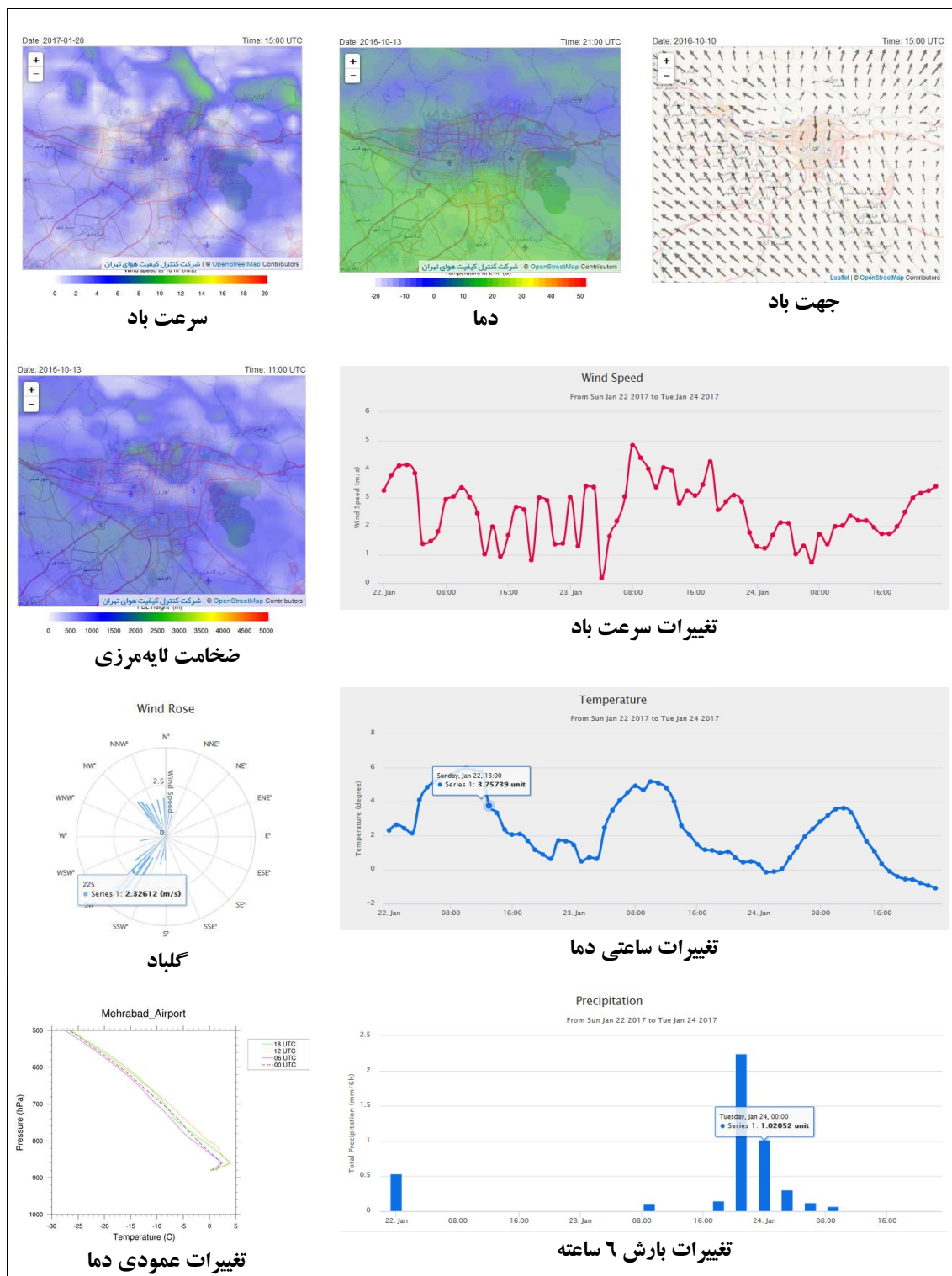
اقدامات گوناگونی به منظور ارتقاء کیفیت سیستم پیش‌بینی آلودگی هوای تهران در دست انجام می‌باشد. از آن جمله می‌توان به راه‌اندازی یک سامانه پیش‌بینی کیفیت هوا در مقیاس جهانی به منظور فراهم‌سازی شرایط مرزی مورد نیاز در مدل‌های کیفیت هوا مورد استفاده<sup>۱</sup>، اشاره کرد. همچنین با استفاده از روش‌های نوین گوارد داده و مدل‌سازی معکوس در نظر است تا پایگاه داده انتشار و پروفیل‌های تغییرات ساعتی و فصلی، در دو مرحله بر روی کل کشور ایران و شهر تهران با استفاده از داده‌های مشاهدات اصلاح گردد. از دیگر اقدامات ضروری در زمینه به‌روزرسانی سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران، تهیه مدل مناسب به منظور محاسبه میزان انتشار گرد و خاک از کانون‌های مؤثر بر منطقه می‌باشد.

5.6TB hard space

<sup>۱</sup> Optimal Interpolation (OI)

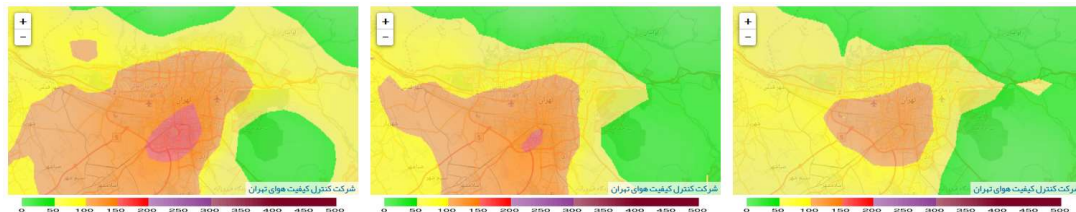
<sup>۲</sup> CMAQ & CAMx



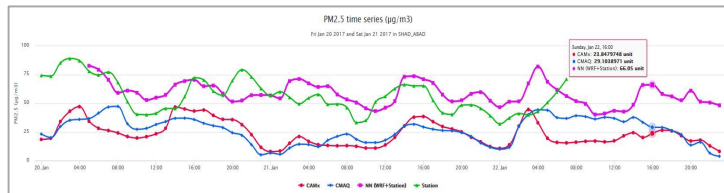
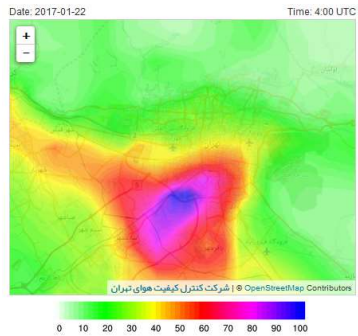


شکل ۵- نمونه‌ای از خروجی‌های پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی در سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران

## سامانه پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران / ۱۰

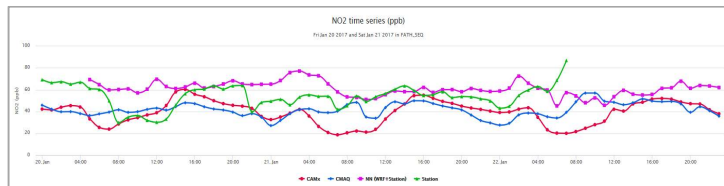
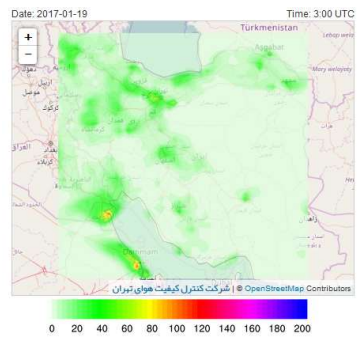


نقشه توزیع شاخص کیفیت هوا بر روی شهر تهران برای امروز و دو روز آینده



تغییرات ساعتی غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲,۵ میکرون

نقشه غلظت ذرات معلق کوچکتر از ۲,۵ میکرون بر روی شهر تهران



تغییرات ساعتی غلظت دی اکسید نیتروژن

نقشه غلظت دی اکسید نیتروژن بر روی ایران

Hour= 08:00 AM

Type	Station Name	Before Yesterday		Yesterday		Today		Tomorrow		After Tomorrow	
		Station	Model	Station	Model	Station	Model	Station	Model	Station	Model
	Average	109	117	119	120	123	121	-	119	-	123
	Maximum	147	148	162	151	143	146	-	159	-	157
Urban	Sharif university	-	136	-	140	125	135	-	139	-	143
Urban	Pirooz	111	112	124	121	136	143	-	137	-	144
Urban	Golbagh	90	89	124	124	120	129	-	110	-	99
Urban	Rose park	98	133	83	73	86	90	-	92	-	135
Urban	Bohran	107	114	123	119	128	115	-	123	-	120
Urban	Mantagheh 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Urban	Mantagheh 21	122	129	137	138	125	134	-	140	-	131
Urban	Mahallati	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Urban	Modares university	131	140	138	138	140	141	-	121	-	148

جدول شاخص کیفیت هوا در موقعیت ایستگاههای پایش کیفیت هوا

شکل ۶- نمونه‌ای از خروجی‌های پیش‌بینی کیفیت هوا در سامانه پیش‌بینی آلودگی هوای شهر تهران

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به معرفی سامانه سیستم پیش بینی آلودگی هوای شهر تهران پرداخته شد. اجزای مختلف سامانه و ارتباط میان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و کاربردهای سامانه در راستای مدیریت کوتاه مدت و بلندمدت آلودگی هوای شهر تهران بیان شدند. سیستم‌های پیش بینی کیفیت هوا در کشورهای مختلف به طور گسترده و برای اهداف گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از این سیستم‌ها می‌توان بحران‌های آلودگی هوا در یک منطقه را پیش از وقوع آن‌ها پیش بینی کرده و با اطلاع رسانی عمومی و همچنین فراهم سازی امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی، از جمله تعطیلی مدارس و ادارات، صنایع آلاینده، اعمال محدودیت‌های ترافیکی و غیره، از تشدید آلودگی هوا جلوگیری کرده و اقدامی مؤثر در جهت حفظ سلامت شهروندان برداشت.

## منابع و مآخذ

- ازوجی، حسن (۱۳۹۳)، مدل سازی غلظت ذرات معلق آلاینده هوای شهر تهران بوسیله مدل ، CMAQ پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- اله یاری، مهدی (۱۳۸۸)، مدل‌های شبکه عصبی برای پیش بینی غلظت ذرات معلق (PM10) در هوای تهران و مقایسه با اندازه گیری‌ها، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، رشته مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف.
- شهبازی، حسین، رشیدی، یوسف، حسینی، وحید (۱۳۹۱)، بررسی پراکندگی آلاینده‌های اصلی هوا در شهر تهران در یک اپیزود بحرانی، اولین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا، دانشگاه صنعتی شریف.
- شهبازی، حسین (۱۳۹۲)، بررسی اثرات وارونگی در ایجاد بحران آلودگی هوا با استفاده از مدل‌های هواشناسی و واکنش‌های فتوشیمیایی، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف.
- گیوه چی، راحله (۱۳۹۰)، تعیین منابع صحرایی طوفان‌های گرد و غبار مختلف و سهم هر کدام در غلظت PM10 در تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- محقی، محمد حسن (۱۳۹۲)، مدل سازی کیفیت هوای ایران بوسیله مدل ترکیبی WRF-CMAQ. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- میرشی، سمیرا (۱۳۹۳)، توسعه و کاربرد د ماتریس ضرایب انتشار منابع متحرک شهر تهران در مدل عددی پراکنش آلاینده‌های هوا WRF/CAMx پایان نامه ارشد رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف.
- هاشمیان نژاد، بابک (۱۳۹۳)، مطالعه پراکنش آلاینده‌های هوای تهران با مدل. CMAQ پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- Baldasano, J., Jiménez-Guerrero, P., Jorba, O., Pérez, C., López, E., Güereca, P., Martín, F., Vivanco, M., Palomino, I., Querol, X. (2008), Caliope an Operational Air Quality Forecasting System for the Iberian Peninsula, Balearic Islands and Canary Islands? First Annual Evaluation and Ongoing Developments Advances in Science and Research Vol. 2, pp. 89-98.
- Hosseini, V. Shahbazi, H. (2016), Urban Air Pollution in Iran, Iranian Studies, Vol. 49, No. 6, pp. 1029-1046.
- Janssens-Maenhout, G., Dentener, F., Van Aardenne, J., Monni, S., Pagliari, V., Orlandini, L., Klimont, Z., Kurokawa J-i., Akimoto, H., Ohara, T. (2012), EDGAR-HTAP a Harmonized Gridded Air Pollution Emission Dataset Based on National Inventories." European Commission Publications Office, Ispra, Italy, EUR report No. EUR 25229 40.
- Mishra, D., Goyal, P. (2016), Neuro-fuzzy Approach to Forecast NO. 2 Pollutants Addressed to Air Quality Dispersion Model Over Delhi, India Aerosol Air Qual. Res Vol. 16, pp. 166-174.
- Prasad, K., Gorai, A. K., Goyal, P. (2016), Development of ANFIS Models for Air Quality Forecasting and Input Optimization for Reducing the Computational Cost and Time." Atmospheric Environment, Vol. 128, pp. 246-262.
- Shahbazi, H., Hosseini, V., Hamed, M. (2014), Investigating the Effect of Odd-Even Day Traffic Restriction Policy on Tehran Air Quality. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting.

- Shahbazi, H., Reyhanian M., Hosseini, V., Afshin, H. (2016), The Relative Contributions of Mobile Sources to Air Pollutant Emissions in Tehran, Iran an Emission Inventory Approach." Emission Control Science and Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 44-56.
- Shahbazi, H., Rashidi, Y., Hosseini, V. (2012), Investigating the Distribution of Criteria Pollutants Over Tehran During a Highly Polluted Episode, First National Conference on Air and Noise Pollution Management, Tehran, Iran.
- Shahbazi, H., Taghvace, S., Hosseini, V., Afshin, H. (2016), A GIS based emission inventory development for Tehran, Urban Climate, Vol.17, pp.216-229.