

## تعیین جهت توسعه شهر بر مبنای مدل‌سازی انتشار آلودگی هوا از نیروگاه‌های حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد)

دریافت مقاله: ۹۸/۵/۳۰ پذیرش نهایی: ۹۸/۱۲/۲۰

صفحات: ۱۵۳-۱۳۷

محمد امیر محرری: دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

**Email:** amir168113@yahoo.com

کامران لاری: دانشیار، گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران<sup>۱</sup>

**Email:** k\_lari@iau-tnb.ac.ir

فروزان ارکیان: استادیار، گروه هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

**Email:** f.arkian@gmail.com

غلامرضا صالحی: استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

**Email:** rezasalehi20@gmail.com

### چکیده

به‌منظور توسعه شهرها عوامل محدودکننده متعددی وجود دارد. این عوامل سبب توسعه شهرها در جهت‌های خاص می‌شود. آلودگی هوا به‌عنوان یک معضل بزرگ کلان‌شهرها خود می‌تواند به‌عنوان یک عامل محدودکننده توسعه شهری مورد توجه تصمیم‌گیران شهری قرار گیرد. در شهر مشهد ۴ نیروگاه نسبتاً بزرگ در حال فعالیت می‌باشد. در حال حاضر ۲ نیروگاه در شرق شهر و ۲ نیروگاه در غرب مشهد وجود دارند. بخش عمده سوخت این نیروگاه‌ها، مازوت و گاز طبیعی می‌باشد. مدل‌سازی انتشار آلاینده‌های هوای این نیروگاه‌ها و مشخص شدن الگوی انتشار آلاینده‌ها در سطح شهر می‌تواند نقش کلیدی در کیفیت زندگی و سلامت حدود ۳.۵ میلیون ساکن شهر مشهد داشته باشد. خروجی‌های این مدل همچنین می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در تخمین مدل توسعه شهری مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه انتشار آلاینده‌های  $PM_{10}$ ،  $CO$ ،  $NO_x$  با استفاده از نرم‌افزار AERMOD در شهر مشهد مدل‌سازی و بررسی شده است. با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS جمعیت تحت تأثیر این آلاینده‌های هوا با بازه‌های زمانی یک سال شمسی غلظت آلاینده‌ها در مناطق مختلف شهر به تفکیک جمعیت و مساحت تحت تأثیر آن محدوده غلظت آلودگی مشخص گردید.

کلید واژگان: انتشار آلودگی هوا،  $PM_{10}$ ،  $NO_x$ ،  $CO$ ، نیروگاه حرارتی، جهت توسعه شهر.

۱. نویسنده مسئول: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، دانشکده علوم و فنون دریایی، گروه فیزیک دریا

## مقدمه

شهر مشهد در شمال شرقی ایران واقع شده است. این شهر حدود سه و نیم میلیون نفر جمعیت ساکن دارد. در مجموع ۴ نیروگاه شهر مشهد در روز حدود معادل ۷ میلیون لیتر سوخت مصرف می‌شود بنابراین، ارزیابی خطرات سلامتی این نیروگاه‌ها بر روی مردم سلامت شهر کاملاً احساس می‌شود. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش مصرف نفت کوره برای تولید برق این خطر بیشتر احساس می‌شود. با وجود اهمیت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌های CO، NO<sub>x</sub> و PM<sub>۱۰</sub> نیروگاه، تاکنون مطالعه‌ای در این رابطه با این موضوع انجام نشده است.

مدل انتشار آلاینده‌های CO و PM<sub>10</sub> را در سطح شهر مشهد انجام دادند و محل‌های تجمع آلاینده و محل‌های عاری از آلاینده‌ها را مشخص کردند (محرری، ۲۰۱۹: زیر چاپ). پیش‌بینی آلودگی PM<sub>۱۰</sub> هوای شهر مشهد با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP<sup>۱</sup> و مدل زنجیره مارکف را تحقیق کرده و به نتایج خوبی دست یافته است (فردی، ۱۳۹۶: ۴۷). بررسی رفتار دی‌اکسید نیتروژن در شهرستان مشهد و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی مشخص شده است (شاه‌محمدی، ۱۳۹۸: زیر چاپ).

تحقیقی در زمینه انتشار آلاینده‌های منتشره از یک ایستگاه راه‌آهن در شهر آتلانتا از ایالت جرجیا آمریکا انجام شده و الگوی انتشار آلاینده‌ها با تغییر لوکوموتیوها بررسی کردند و موفق شدند الگوی انتشار آلاینده‌های این ایستگاه در محیط اطراف را مشخص نمایند (بوریس گالویس، ۲۰۱۵: ۱۵۷). مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها در اطراف اتوبان در گرنوبل فرانسه ۲، در بازه ۱۱-۲۷ سپتامبر ۲۰۱۱ انجام شده است. این کار با بررسی عملکرد مدل پلوم گاوسی استاندارد و اصلاح شده با استفاده از اندازه‌گیری NO<sub>۲</sub>، PM<sub>۱۰</sub>، PM<sub>۲.۵</sub> را انجام شده است (فلاح شرشانی، ۲۰۱۵: ۱۵۷). به منظور تحلیل بهتر شرایط و پایش آنلاین شرایط آب‌وهوایی یک الگوریتم و نرم‌افزار جدید برای مدیریت پایدار آلودگی شهری طراحی شده است. تعدادی از روش‌ها و ابزارهای مختلف، از جمله GIS، LCA<sup>۲</sup>، مدل‌سازی حمل‌ونقل، جهت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره یکپارچه شده است. در یک مطالعه موردی که به بررسی اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی آلودگی ناشی از صنعتی و منابع دیگر از جمله حمل‌ونقل در شهر شده است. شهر انتخاب برای مطالعه شفیلد در انگلستان و آلاینده‌های اصلی در نظر گرفته شده NO<sub>x</sub>، SO<sub>۲</sub> و PM<sub>۱۰</sub> می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که حذف منابع بزرگ صنعتی موجود در شهرستان به کاهش ۹۰ درصد از SO<sub>۲</sub> و ۷۰ درصد از غلظت NO<sub>۲</sub> در سطح زمین، در نتیجه جلوگیری از ۲۷ کشته و ۱۸ بستری شدن در بیمارستان به دلیل مشکلات تنفسی در سال برای جمعیت ۵۰۰،۰۰۰ منجر می‌شود. بر اساس کل پذیرش مرگ‌ومیر و بیمارستان سالانه در شفیلد در سال از ارزیابی، این بدان معنی است که ۰/۵۳ درصد از مرگ‌ومیر زودرس و ۰/۴۹ درصد از بستری شدن در بیمارستان تنفسی خواهد بود که توسط کاهش تخمینی در آلودگی هوا جلوگیری کرد (آزایاژیک، ۲۰۱۳: ۵۰۸).

تعریف یک مدل به منظور تحلیل و بررسی الگوی انتشار آلاینده‌ها در سطح شهر بستون در کشور نمودند. در این تحقیق غلظت PM<sub>۱۰</sub>، غلظت ذرات کربن، کربن عالی، نمک دریا، آمونیاک، گوگرد و گردوغبار مورد بررسی قرار گرفته

<sup>1</sup> Multiple layer perceptron

<sup>2</sup> Life-cycle assessment

شده است (کوئان دی، ۲۰۱۶: ۲).

یک روش مدل سازی، برای انجام مدل سازی در زمان کمتر و به تبع آن زمان محاسبات کمتر، از فناوری شبیه سازی-های CFD<sup>۱</sup> است. در همین حال، از نقطه نظر عملی، روش مدل سازی نتایج دقیق با وضوح بالا ارائه می کند. با استفاده از این رویکرد، برنامه ریزان شهری و معماران می توانند در مقیاس محله در سطح تنفس عابر پیاده انتشار آلاینده را برآورد و بهینه سازی برنامه ریزی و طراحی مناسب در خصوص طراحی شهری موفق داشته باشند (چئی یوگان، ۲۰۱۶: ۱۵۲).

مدل سازی داده یکپارچه به منظور برآورد آلودگی PM<sub>2.5</sub> از فعالیت حمل و نقل وسایل نقلیه سنگین یک منطقه شهری سینسیناتی انجام شده است. از نتایج مهم حاصل این تحقیق می توان به نقش کامیون های سنگین در انتشار حدود ۷۱ درصد از تولید گازها گلخانه ای PM<sub>2.5</sub> همراه منبع شهری توسط این وسایل نقلیه ایجاد می شود و همچنین ۲۱ درصد از غلظت PM<sub>2.5</sub> شهری محیط کلی را می توان به کامیون در منطقه سینسیناتی نسبت را به این وسایل داد (هری کیشان، ۲۰۱۶: ۱۱۴). نژادکورکی و همکاران در سال ۱۳۹۲ موفق به توسعه مدل نرم افزار AERMOD<sup>۲</sup> در محیط نرم افزار MATLAB شده اند در توسعه مدل بیشتر بر روی بهبود کیفیت خروجی های نرم افزار مطلب کار شده است (نژادکورکی، ۱۳۹۲: ۱۱۴). در مطالعه ای ارتباط میان شبکه حمل و نقل، تولید گازهای گلخانه ای ناشی از ترافیک معابر و مدل پراکندگی به منظور توسعه یک مدل مناسب با قدرت تفکیک مکانی بالا انجام پذیرفته است. غلظت NO<sub>x</sub>، PM<sub>2.5</sub> را در اطراف جاده ها به دست آوردند (شیه یینل چنگ، ۲۰۱۵: ۲۰۱، ۹۰۵). در تحقیق دیگری چارچوب مدل سازی جدید، به نام چارچوبی برای بررسی سریع انتشار گازهای گلخانه ای تولیدی، سناریو و برآورد تأثیر سلامت<sup>۳</sup> را ارائه نمایند. این مدل تخمین غلظت و اثرات بهداشتی ناشی از حالات انتشار آلاینده های را در مقیاس شهری و محاسبات کارآمدی از تولید گازهای گلخانه ای، اثرات بهداشتی محیط مورد نظر ارائه می دهد. مضافاً، این مدل می تواند کاهش انتشار آلاینده ها بهینه سازی برای مواجهه با محدودیت های زیست محیطی و سلامت مشخص شده و یک رابط کاربری مناسب و نمایش گرافیکی برای تسهیل ارزیابی سناریو در اختیار دارد. چارچوب جدید در منطقه SO<sub>2</sub> غیر حصول در جنوب شرقی میشیگان با دو استراتژی بهینه سازی نشان داد: ۱: به حداقل رساندن انتشار آلاینده های مورد نیاز برای رسیدن به یک هدف مشخص؛ ۲: به حداقل رساندن غلظت در حال تولید گازهای گلخانه ای ثابت نگه داشتن شده اند (چاد وی میلاندو، ۲۰۱۶: ۹۴، ۴۷۳).

روش مدل سازی یکپارچه به برآورد تولید گازهای گلخانه ای ترافیک شهری ایجاد کردند. این مدل دارای امکان ترافیک شبیه سازی انتشار در ریزمقیاس ها و برآورد تولید گازهای گلخانه ای محیط حل بوده است. همچنین یک چارچوب یکپارچه به منظور مدل سازی برای CO و NO<sub>x</sub> می باشد. مطالعات آماری عملکرد<sup>۴</sup> QUIC از مدل های پراکندگی AERMOD بررسی قرار گرفت (ارشب میسر، ۲۰۱۳: ۷۳، ۸۱). در مطالعه ای بر روی انتشار آلاینده ها در سطح شهر مادرید اسپانیا نتایج ارزنده ای به دست آمده است. تیم محققین با انجام برداشت اطلاعات توزیع و انتشار

<sup>1</sup> Computational fluid dynamic

<sup>2</sup> American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model

<sup>3</sup> FRESH-EST

<sup>4</sup> Quick Urban and Industrial Complex

آلاینده‌ها در سطح شهر و انطباق نتایج میدانی با نتایج مدل‌سازی به جمع‌بندی بسیار خوبی در زمینه مدل‌سازی دست یافتند. الگوی انتشار آلاینده و محل‌های تجمع آن‌ها در منطقه مورد مطالعه کاملاً مشخص شده است (رافائل بورگی، ۲۰۱۶: ۰۶، ۲۰).

تحقیقات ذکر شده به خوبی روش‌های مختلف مدل‌سازی و شخص کردن کیفیت هوا در مناطق مختلف را بیان کرده‌اند. باید دقت داشت در تحقیقات بیان شده چندین روش مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها ذکر شده است. به دلیل تطابق خوب شرایط محیط حل این تحقیق با استانداردها و قابلیت‌های نرم‌افزار AERMOD در این تحقیق از این مدل استفاده شده است. مزیت اصلی این تحقیق نسبت به تحقیقات ذکر شده تبدیل کردن داده‌های مرتبط به انتشار آلاینده‌ها و محیط‌زیست به خروجی‌های قابل تحلیل و برنامه‌ریزی تصمیم‌سازان شهری است. در تحقیقات انجام شده بیشتر به اثر انتشار آلاینده بر مناطق مختلف و جمعیت‌های تحت تأثیر یا شیوه انتشار آلاینده‌ها و همچنین کاهش فیزیکی حجم آلاینده‌ها پرداخته شده است. این در حالی است که این تحقیق به این موضوعات ورود نکرده و آلودگی هوا را با شرایط موجود مورد بررسی قرار داده است.

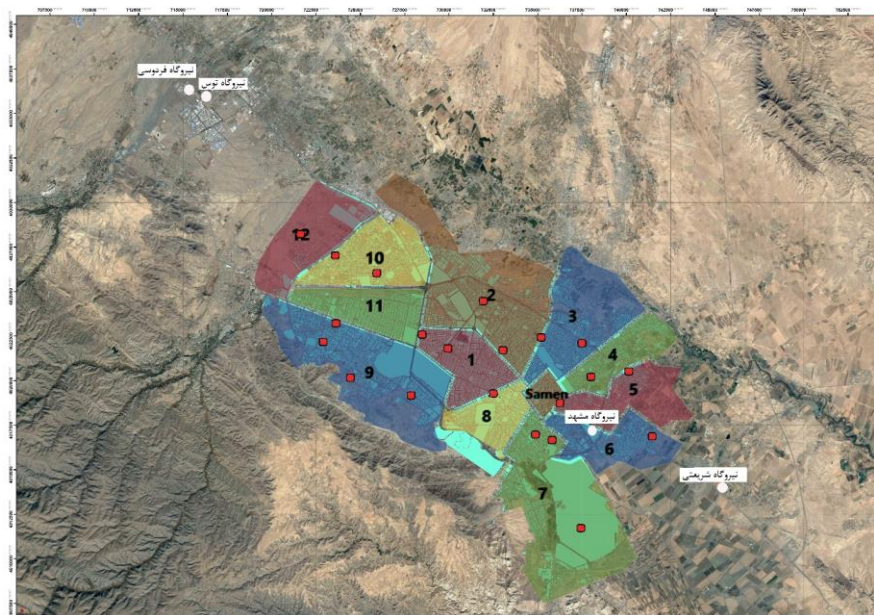
در این مطالعه ۳ مرحله کار صورت گرفته است. ابتدا اطلاعات آلاینده‌های منتشره از نیروگاه‌ها به صورت دقیق تهیه شده است. با استناد به استانداردهای مورد تأیید و اجباری سازمان حفاظت ایران محیط مورد بررسی قرار گرفته و ملاک عمل قرار گرفته‌اند. غلظت ذرات معلق  $PM_{10}$  و CO با کمک نرم‌افزار AERMOD (سازمان محیط‌زیست آمریکا، ۲۰۰۹). مدل‌سازی شده است. نتایج خروجی به کمک نرم‌افزار ARC GIS تحلیل گردیده است و میزان مساحت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف آلاینده مشخص گردیدند. به منظور مشخص شدن الگوی توسعه شهر و همچنین مشخص کردن جهت توسعه شهر در این تحقیق ابتدا مناطق آلوده و پاک به تفکیک مشخص شده است. سپس مناطق واقع در حریم شهر و دارای حداقل استانداردهای توسعه‌ای جهت مشخص و به‌عنوان مناطق مناسب جهت توسعه شهر معرفی گردیده‌اند.

## روش تحقیق

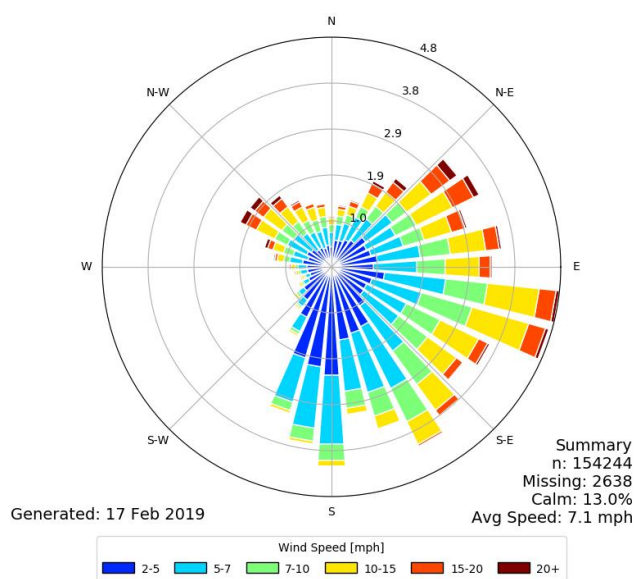
### مدل شبیه‌سازی آلودگی AERMOD

AERMOD یک مدل پلوم گوسی برای حالت پایدار و برای موارد نزدیک به سایت است که بر مبنای ساختار و مفاهیم تلاطم لایه‌مرزی سیاره‌ای استوار می‌باشد. در این مدل منابع سطحی و مرتفع در نواحی مسطح یا دارای پستی‌وبلندی در نظر گرفته می‌شوند. این مدل قادر به شبیه‌سازی منابع چندگانه آلاینده از انواع مختلف نقطه‌ای، سطحی و حجمی می‌باشد. در لایه‌مرزی ثابت، توزیع در هر دو جهت افقی و عمودی، گوسی فرض می‌شود. اگرچه در لایه‌مرزی منتقل‌شونده (CBL)، توزیع عمودی به کمک یک تابع چگالی احتمال دوگوسی توصیف می‌گردد، ولی در توزیع افقی دوباره گوسی در نظر گرفته می‌شود. AERMOD قادر است پلوم‌های شناور را شبیه‌سازی نماید. به‌طور کلی مدل‌های گوسی، محدود به جریان‌های عبوری از سطوح ساده‌اند، اما AERMOD روش ساده‌ای جهت تقریب‌زدن جریان‌های عبوری از پستی‌وبلندی بکار می‌برد.

اتمسفر توسط یک سری روابط سنجش تشابه و فقط با استفاده از یک اندازه‌گیری از سرعت باد سطحی، جهت باد و دما برای پیش‌بینی پروفیل‌های عمودی سرعت و جهت باد، دما، تلاطم و گرادیان دما، توصیف می‌گردد. این مدل ته‌نشست خشک یا تر گازها را در برنمی‌گیرد و فقط رفتار ساده ته‌نشست خشک را با استفاده از یک الگوریتم بازتاب در نظر می‌گیرد. با این‌که AERMOD برای شبیه‌سازی پراکنش ذره‌ای طراحی شده است، ولی در حال حاضر فقط برای تحقیقات پراکنش فاز گازی استفاده می‌شود. در یک مطالعه فاز گازی، توانایی این مدل در شبیه‌سازی پراکنش یک ردیاب خنثی در یک محیط شهری بررسی شده است. ولی در مقایسه با مقادیر میانی، توافق خوبی نشان داد. همچنین میزان توافق خروجی‌های مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده، برای گیرنده‌های نزدیک به منبع، ضعیف و در نقاط دورتر مناسب‌تر بود. اطلاعات ارائه‌شده به نرم‌افزار شامل اطلاعات هواشناسی مربوط به ایستگاه هواشناسی فرودگاه مشهد در کل سال ۱۳۹۷ می‌باشد. همچنین محیط حل با ابعاد ۲۵\*۲۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به خروجی دودکش‌ها نیز با توجه به استاندارد-های ملی و در شرایط استاندارد با در نظر گرفتن میزان تولید محاسبه شده است. شکل (۱) مناطق ۱۳ گانه شهر مشهد را به تفکیک رنگ و چهار نیروگاه موجود در شهر و اطراف آن و ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا که با نقاط قرمز مشخص شده است را نشان می‌دهد. جهت وزش باد غالب در ناحیه مورد مطالعه از جنوب شرقی و شرق می‌باشد. سرعت میانگین جریان هوا که حدود ۱۱ km/hr می‌باشد. شکل (۲) گلباد شهر<sup>۱</sup> مشهد را نشان می‌دهد. شرایط آب‌وهوای مشهد در بازه زمانی سال ۱۳۹۴ در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. پس از مشخص شدن مدل انتشار آلاینده‌ها به وسیله نرم‌افزار AERMOD نتایج در نرم‌افزار ARC GIS بارگذاری شده است. در این نرم‌افزار با استفاده از اطلاعات منتشرشده توسط نهاد مطالعات شهرداری مشهد و اطلاعات حاصل از نرم‌افزار AERMOD جهت توسعه شهر مشخص و مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۱). نقشه مناطق سیزده گانه شهر مشهد، موقعیت چهار نیروگاه موجود در شهر (نقاط سفید) و اطراف آن و ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا (نقاط قرمز)



شکل (۲). گلباد شهر مشهد در سال ۱۳۹۴

### صحه گذاری

به منظور صحه گذاری مدل، نتایج مدل سازی با خروجی های ایستگاه های پایش کیفیت هوا مقایسه می شوند. خروجی های ایستگاه های هواشناسی منتشر شده توسط سازمان هواشناسی به منظور مقایسه و تحلیل مورد استفاده است، می باشد؛ بنابراین تنها جزئیات مهم، در این تحقیق ارائه می شود.

به منظور بررسی نتایج مدل سازی با خروجی های دستگاه های کنترل و پایش هوا مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شاخص های آماری به کاررفته در این پژوهش، روابط (۱ تا ۵)، شاخص توافق (IOA<sup>1</sup>)، آریبی کسری (FB<sup>2</sup>)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE<sup>3</sup>)، خطای میانگین مربع نرمال شده (NMSE<sup>4</sup>) و ضریب همبستگی پیرسون (R<sup>5</sup>) بر اساس معیارهای ارائه شده برای آنها، حاکی از توانایی بالای مدل AERMOD در شبیه سازی میدانی انتشار آلاینده ها هوا دارد. در جدول (۱) مقادیر پارامترها ذکر شده قابل مشاهده می باشد.

$$IOA = 1 - \frac{\sum (P_i - \bar{O}_i)^2}{\sum (|P_i - P_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$FB = \frac{(\bar{O}_i - \bar{P}_i)}{5(\bar{O}_i + \bar{P}_i)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$NMSE = \frac{(\bar{O}_i - \bar{P}_i)}{(O_i P_i)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$R = \frac{\overline{O_i - \bar{O}_i - P_i - \bar{P}_i}}{\sigma P_i \sigma O_i} \quad \text{رابطه (۵)}$$

جایی که N نشان دهنده تعداد داده ها است،  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب غلظت پیش بینی شده و مشاهده شده اند؛ و مقادیر متوسط غلظت پیش بینی شده و مشاهده شده است. به همین ترتیب،  $\sigma P_i$  و  $\sigma O_i$  انحرافات استاندارد پیش بینی ها و مشاهدات است.

آریبی کسری در این تحقیق بر اساس چهارچوب ارائه شده توسط اولسن عملکرد آماری نتایج توسط پارامترهای آریبی کسری که بیانگر تمایل مدل به پیش بینی بیش از حد و یا کمتر از حد واقعی می باشد، بیان می شود. مقدار آریبی برای هر دو آلاینده CO و PM<sub>10</sub> معادل پیش بینی بیشتر با ضریب ۲ معادل پیش بینی کمتر با ضریب ۲ می باشد و آریبی کسری صفر به طور متوسط نشان دهنده این است که پیش بینی مدل کامل است.

تعریف ضریب تعیین R<sup>2</sup> نسبتاً ساده است: ضریب تعیین R<sup>2</sup> نشان می دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل تبیین می شود یا به عبارت دیگر ضریب تعیین نشان دهنده این است که چه مقدار از

<sup>1</sup> index of agreement

<sup>2</sup> fractional bias

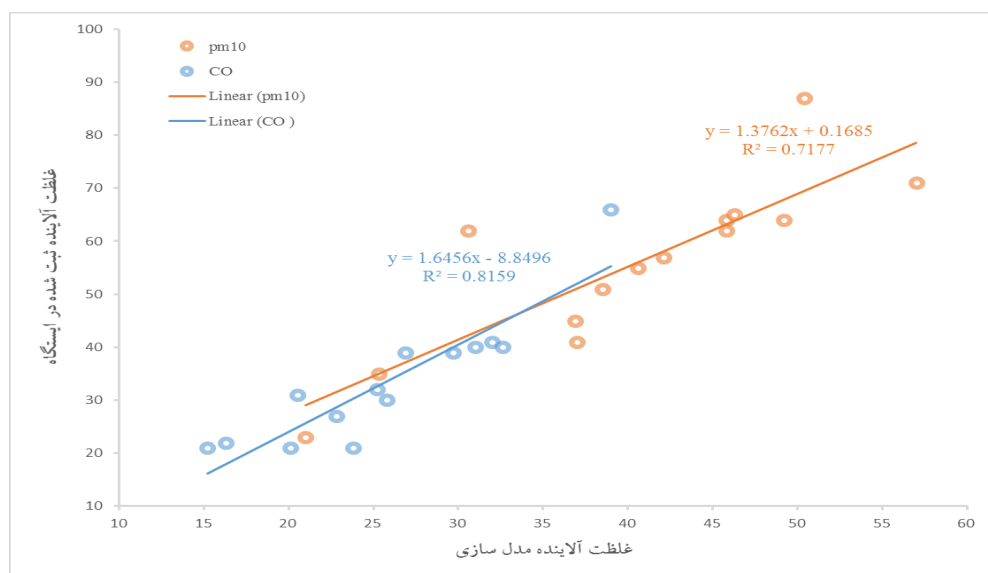
<sup>3</sup> Root Mean Square Error

<sup>4</sup> normalized mean square error

<sup>5</sup> correlation coefficient

تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می‌باشد. ضریب تعیین همیشه بین ۰ و ۱ است. صفر نشان می‌دهد که مدل هیچ‌یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی‌کند. شکل (۳) نشان می‌دهد که مدل همه تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند. در مدل‌سازی انجام‌شده مقدار پارامتر  $R^2=0.7177$  با تقریب بسیار خوبی برای آلاینده  $PM_{10}$  به‌دست‌آمده است. همچنین توزیع پراکندگی بین شبیه‌سازی و مشاهده، غلظت  $PM_{10}$  (خط نارنجی) و غلظت CO (خط آبی) را نشان می‌دهد.

مقدار این پارامتر برای آلاینده CO با تقریب بهتری ۰.۸۱۵۹ محاسبه‌شده است؛ که این دو عدد به‌خوبی نشان می‌دهد نتایج تحقیق تا تقریب بسیار خوبی با مقادیر تجربی به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های پایش آلودگی هوای سازمان حفاظت محیط‌زیست و شهرداری مشهد هم‌خوانی دارد.



شکل (۳). توزیع پراکندگی بین شبیه‌سازی و مشاهده (داده‌های تجربی): غلظت  $PM_{10}$  (خط نارنجی) و غلظت CO (خط آبی)

جدول (۱). مقادیر IOA, FB, NMSE, RMSE

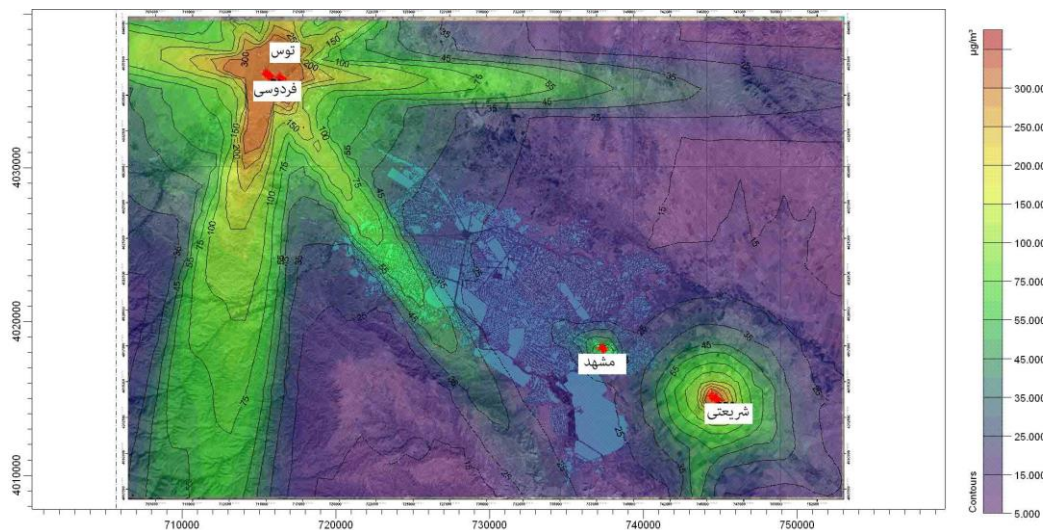
	IOA	FB	NMSE	RMSE
$PM_{10}$	۰.۴۷۰۵۸۲	۰.۱۴۳۱	۰.۰۰۶۸۱	۰.۰۵۶۱
CO	۰.۶۷۵۷۸۹	۰.۱۴۴۱	۰.۰۰۶۸۱	۰.۱۲۱۳

## نتایج

در اطراف نیروگاه‌ها با توجه به میزان تولید برق و مصرف سوخت جهت وزش باد و سایر عوامل مؤثر در مسافت‌های متفاوت بر کیفیت هوا تأثیر می‌گذارند. از شکل (۴) به‌وضوح مشخص است که نیروگاه‌های توس و فردوسی با توجه به میزان تولید آلاینده بیشترین تأثیر را بر غلظت آلاینده  $PM_{10}$  بر روی شهر مشهد دارد. البته

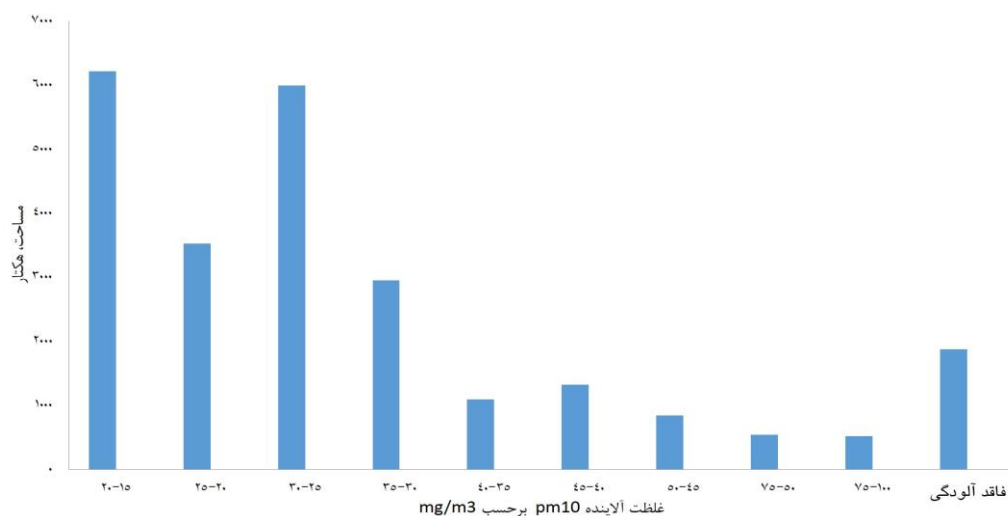


نکته مهم این است که نیروگاه مشهد با وجود میزان کم مصرف سوخت ولی نظر به این که در مرکز شهر و در منطقه پرجمعیت شهر قرار دارد تأثیر زیادی بر کیفیت هوای آن منطقه شهر دارد. بیشترین غلظت  $PM_{10}$  در سطح شهر حدود  $100 \text{ mg/m}^3$  می باشد. آنچه در این تصویر به وضوح مشخص است جهت انتشار آلاینده ها وابسته به چندین عامل است، از عوامل مهم می توان جهت و سرعت وزش باد، باید هم زمان در نظر داشت دمای هوا و ناهمواری های زمین می باشد. این تصویر نشان می دهد تأثیر دما در فرونشست آلاینده در سرعت های پایین جریان هوا بیشتر از سایر پارامتر می باشد. گلباد شهر مشهد نشان می دهد باد غالب جنوب شرق به سمت شمال غرب می باشد. این در حالی است که بازه های زمانی خاص جهت باد با سرعت نسبتاً بالا از سمت شمال-غرب به سمت جنوب غرب می باشد. این جهت وزش باد با شرایط دمایی خاص همراه شده و سبب و انتشار گسترده آلاینده های منتشره از نیروگاه ها در سطح شهر می شوند. اشکال (۴ تا ۱۳) این بخش بر مبنای میانگین سالانه خروجی گرفته شده اند.



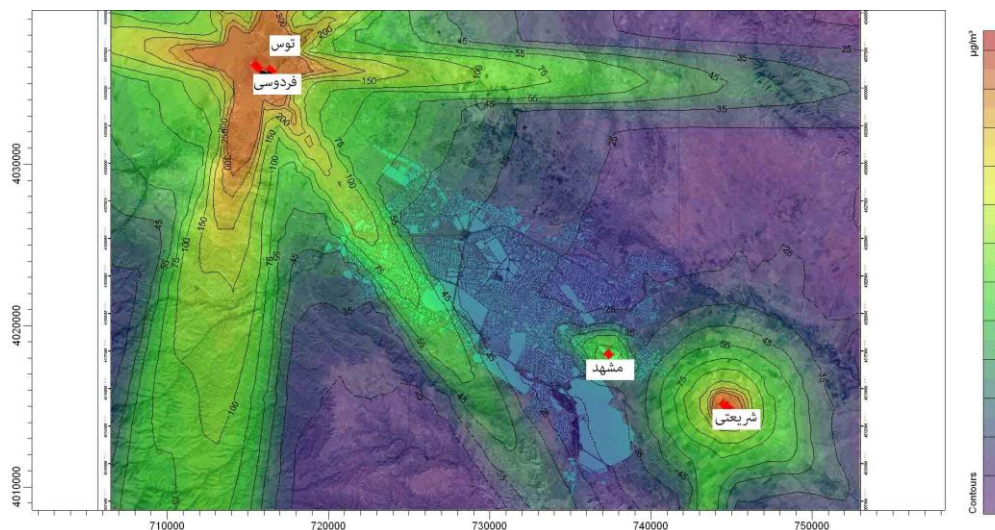
شکل (۴). کانتور غلظت  $PM_{10}$  در سطح شهر مشهد

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، ۶۰۰ هکتار از سطح شهر مشهد در معرض غلظت  $50-75 \text{ mg/m}^3$  می باشد که حدود ۴ درصد مساحت شهر می باشد. این در حالی است که ۲۵ درصد مساحت شهر درگیر غلظت  $15-20 \text{ mg/m}^3$  است. همچنین مشاهده می شود تنها ۷ درصد مساحت شهر عاری از این آلاینده می باشد که برای کاربری های حساس مناسب می باشد. حدود ۱۴ درصد مساحت شهر درگیر آلودگی  $25-30 \text{ mg/m}^3$  و همچنین ۲۴ درصد مساحت شهر متأثر از غلظت  $20-25 \text{ mg/m}^3$  می باشد. حدود ۲۴.۹ درصد جمعیت شهر درگیر غلظت  $30-50 \text{ mg/m}^3$  همچنین حدود ۴ درصد مساحت شهر درگیر غلظت  $75-100 \text{ mg/m}^3$  می باشند.



شکل (۵). مساحت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف آلاینده PM10 در سطح شهر

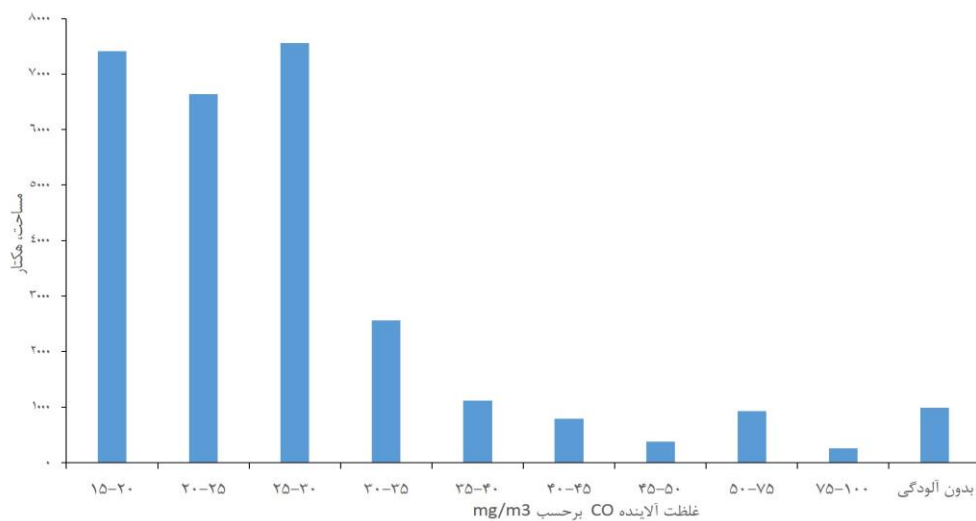
در شکل (۶) به‌وضوح مشخص است که نیروگاه‌های توس و فردوسی با توجه میزان تولید آلاینده بیشترین تأثیر را بر غلظت آلاینده CO بر روی شهر مشهد دارد. البته نکته مهم این است که نیروگاه مشهد با وجود میزان کم مصرف سوخت ولی نظر به این‌که در مرکز شهر و در منطقه پرجمعیت شهر قرار دارد تأثیر زیادی بر کیفیت هوای آن منطقه شهر دارد. بیشترین غلظت CO حدود  $100 \text{ mg/m}^3$  می‌باشد.



شکل (۶). کانتور غلظت CO در سطح شهر مشهد

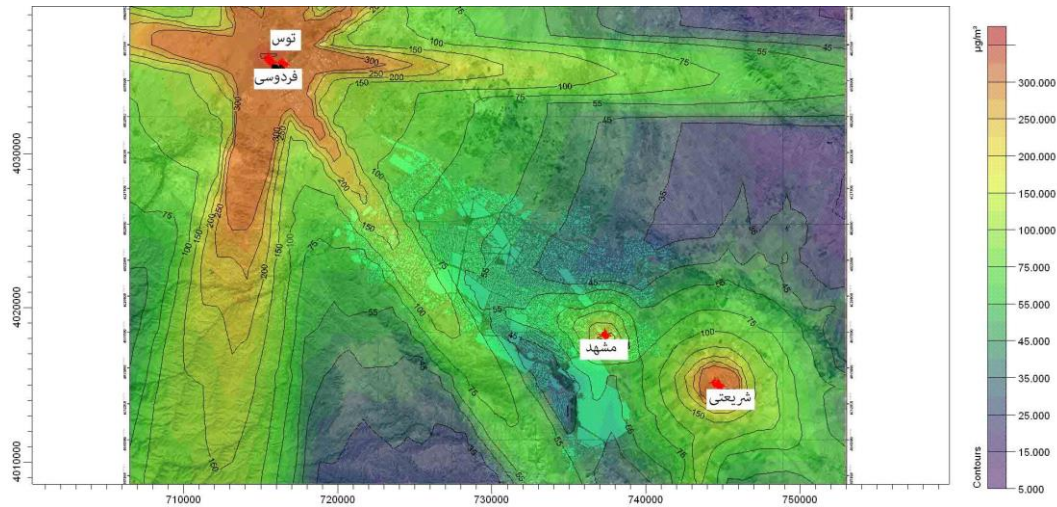
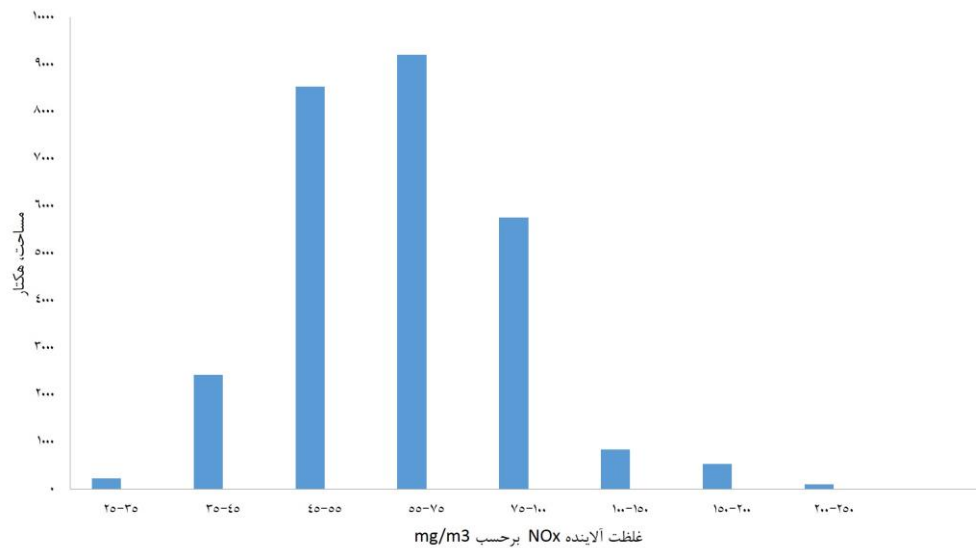
همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ۳۶۸ هکتار از سطح شهر مشهد در معرض غلظت  $50-75 \text{ mg/m}^3$  می‌باشد که حدود ۱.۲ درصد مساحت شهر می‌باشد. این در حالی است که ۲۵ درصد مساحت شهر درگیر

غلظت  $15-20 \text{ mg/m}^3$  است. همچنین مشاهده می شود تنها ۵ درصد مساحت شهر عاری از این آلاینده می باشد که برای کاربری های حساس مناسب می باشد. حدود ۲۶ درصد مساحت شهر درگیر آلودگی  $\text{mg/m}^3$   $20-25$  و همچنین ۱۸.۵ درصد مساحت شهر متأثر از غلظت  $25-30 \text{ mg/m}^3$  می باشد. حدود ۲۳ درصد جمعیت شهر درگیر غلظت  $30-50 \text{ mg/m}^3$  می باشند. حدود ۴ درصد مساحت شهر درگیر آلاینده با غلظت  $75-100 \text{ mg/m}^3$  می باشد.



شکل (۷). مساحت تحت تأثیر غلظت های مختلف آلاینده CO در سطح شهر

در شکل (۸) به وضوح مشخص است که نیروگاه های توس و فردوسی با توجه میزان تولید آلاینده بیشترین تأثیر را بر غلظت آلاینده  $\text{NO}_x$  بر روی شهر مشهد دارد. البته نکته مهم این است که نیروگاه مشهد با وجود میزان کم مصرف سوخت ولی نظر به اینکه در مرکز شهر و در منطقه پرجمعیت شهر قرار دارد تأثیر زیادی بر کیفیت هوای آن منطقه شهر دارد. بیشترین غلظت  $\text{NO}_x$  حدود  $200 \text{ mg/m}^3$  می باشد. شکل (۹) مساحت درگیر غلظت های مختلف آلاینده  $\text{NO}_x$  به تفکیک نشان می دهد. حدود ۱۷۰۰۰ هکتار از مساحت شهر درگیر غلظت بین  $45 \text{ mg/m}^3$  تا  $75 \text{ mg/m}^3$  می باشد که مساحت قابل توجهی باشد.

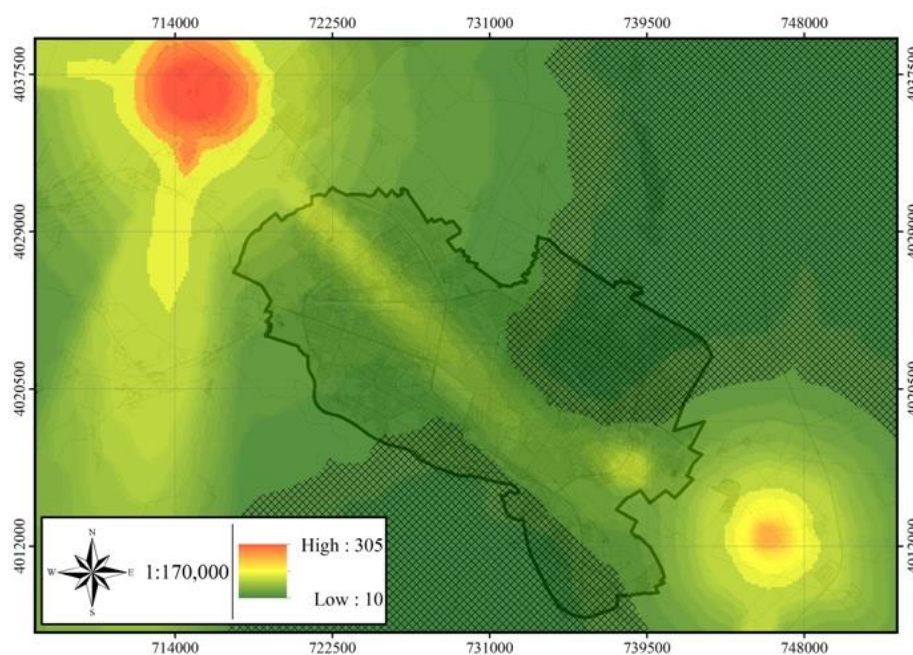
شکل (۸). کانتور غلظت NO<sub>x</sub> در سطح شهر مشهدشکل (۹). مساحت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف آلاینده NO<sub>x</sub> در سطح شهر

#### تعیین جهت توسعه شهر

توسعه شهرها امری اجتناب‌ناپذیر است. تعیین جهت توسعه دو نوع محدودیت دارد. گونه اول محدودیت‌های طبیعی مانند دریاها، رودخانه‌ها، جنگل‌ها، کوه‌ها و موارد مشابه. گونه دوم عوامل مصنوعی مانند ایستگاه‌های قطار، فرودگاه‌ها، بنادر و موارد مشابه می‌باشد. در این تحقیق آلودگی هوا را به‌عنوان یک عامل مصنوعی توسعه شهرها معرفی می‌گردد. در مطالعه موردی شهر مشهد مناطق محدوده شهر که برای آینده توسعه شهر توسط دستگاه‌های مسئول مشخص شده است، مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این بخش عوامل طبیعی و مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. مناطق مناسب جهت توسعه شهر مشخص شده و در وضعیت موجود و پس از تغییر سیکل کارکرد نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است.

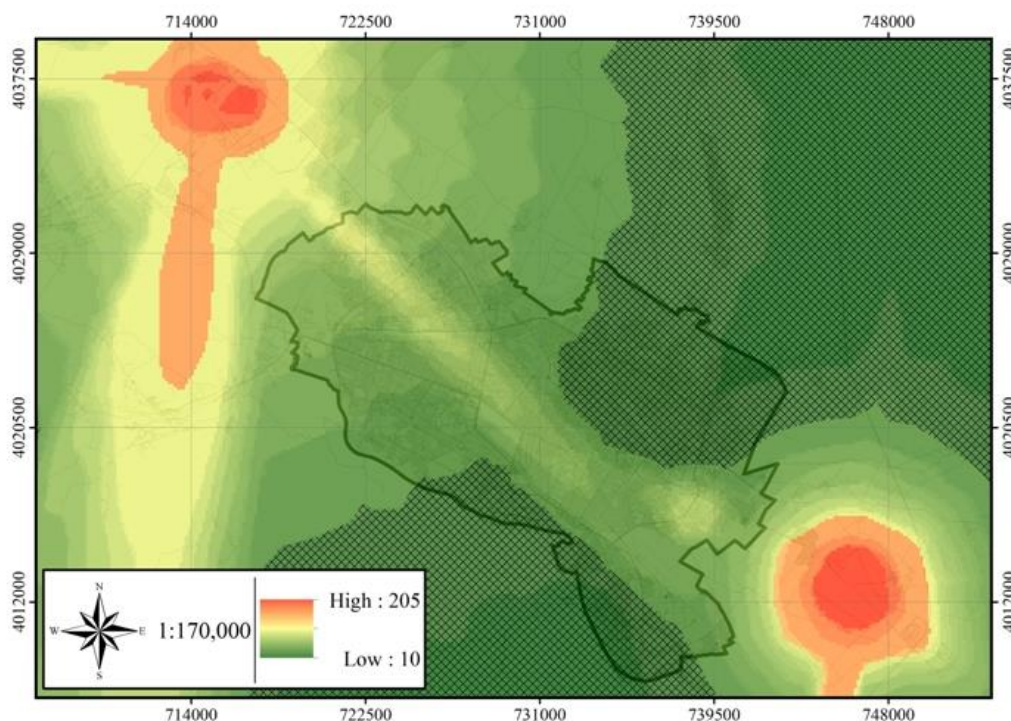


در شکل (۱۰) مجموع اثرات آلاینده‌ها بر کیفیت هوای شهر مشهد در وضعیت موجود ارائه شده است. در شکل (۱۰) قسمت‌های هاشور زده شده مناطق حومه شهر مشهد هستند، کیفیت هوا در آن‌ها در بالاترین مقدار ممکن می‌باشد. در این مناطق توسعه شهری اتفاق نیفتاده است یا به صورت خیلی محدود به شکل حاشیه‌نشینی یا بافت‌های فرسوده مورداستفاده قرار می‌گیرند. این مناطق به لحاظ کیفیت هوا، دارای بالاترین کیفیت هوا در سطح شهر و حومه آن می‌باشند و می‌توانند جهت مناسبی برای توسعه شهر مشهد باشند. بخشی از این مناطق در شمال شرق شهر مشهد واقع شده‌اند و بخشی در جنوب شرق این شهر قرار دارند. همان‌طور که اشاره شد آلودگی هوا به‌عنوان یک عمل مصنوعی توسعه شهرها مطرح می‌باشد. لذا باید سایر عوامل بدیهی طبیعی را نیز در این رابطه در نظر داشت از آن جمله می‌توان به رشته‌کوه‌های جنوبی مشهد اشاره نمود که با شیب‌های بسیار تند عملاً مانع توسعه شهر در مناطق جنوبی شهر می‌باشند. لذا اگر مساحت دقیق قسمت‌های مناسب برای توسعه شهر را محاسبه شود، مساحت این مناطق باید از مساحت کل کسر گردد.



شکل (۱۰). مجموع اثرات آلاینده‌ها بر کیفیت هوا شهر مشهد در وضعیت موجود (سال ۱۳۹۴)

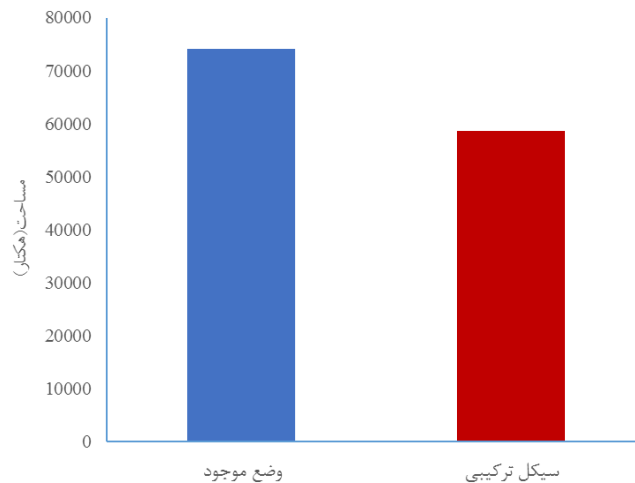
در شکل (۱۱) مجموع غلظت آلاینده‌ها در حالتی که سیکل کار نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی تغییر کرده باشد مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد، بخش زیادی از مناطق مناسب جهت توسعه شهر با تغییر سیکل کاری نیروگاه از دست خواهد رفت. همچنین کیفیت هوا در مناطق شهری موجود نیز کاهش خواهد یافت.



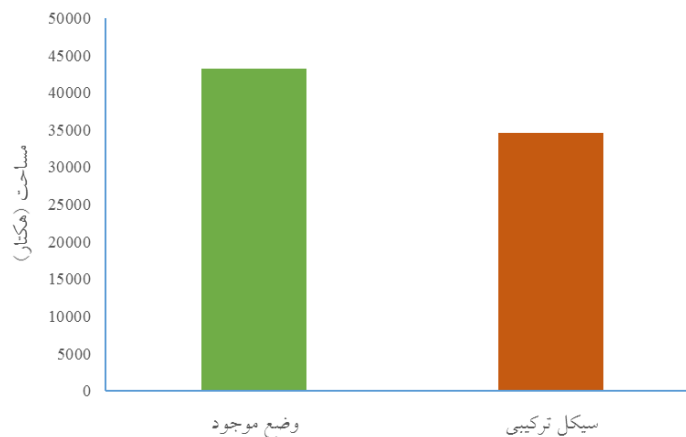
شکل (۱۱). مجموع اثرات آلاینده‌ها بر کیفیت هوا شهر مشهد در شرایط تغییر سیکل کارکرد نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی (سال ۱۳۹۴)

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص است مساحت کل مناطق قابل توسعه در وضعیت موجود برای شهر مشهد و محدوده قانونی آن حدود ۷۴۱۰۶ هکتار می‌باشد. این در حالی است که در صورت تغییر سیکل نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی تنها ۵۸۶۹۸ هکتار مناطق پاک جهت توسعه شهر در اختیار خواهد بود. به تعبیر ساده‌تر حدود ۲۱ درصد اراضی پاک شهر و حومه آن کیفیت هوای خود را از دست داده و عملاً جهت توسعه شهر مناسب نخواهند بود. این درصد حدوداً ۱۵۴۰۸ هکتار است و مساحت قابل توجهی می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، مساحت کل مناطق پاک و بدون محدودیت طبیعی به‌منظور توسعه شهر برحسب هکتار در وضعیت موجود و پس از تغییر سیکل کاری نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی تغییر می‌کند نشان داده شده است. در این شکل مناطق جنوب شرقی که به علت ارتفاعات با شیب بسیار تند عملاً توسعه شهر به آن سمت قابل انجام نیست، از مساحت کل مناطق مناسب جهت توسعه شهر کسر گردیده است. با در نظر گرفتن این موضوع در وضعیت موجود مساحت مناطق مناسب جهت توسعه شهر ۴۳۱۶۰ هکتار است. پس از تغییر سیکل کاری نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی این مساحت به ۳۴۵۸۶ هکتار کاهش می‌یابد. با تغییر سیکل نیروگاه و کسر مناطق نامناسب جهت توسعه شهر، حدود ۲۰ درصد مناطق مناسب جهت توسعه شهر کارایی خود را از دست خواهند داد. به بیان ساده‌تر حدود ۸۵۷۴ هکتار از مناطق مناسب جهت توسعه شهری از دسترس خارج خواهند شد.



شکل (۱۲). مساحت کل مناطق پاک به منظور توسعه شهر برحسب هکتار در وضعیت موجود و پس از تغییر سیکل کاری نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی (سال ۱۳۹۴)



شکل (۱۳). مساحت کل مناطق پاک و بدون محدودیت طبیعی به منظور توسعه شهر برحسب هکتار در وضعیت موجود و پس از تغییر سیکل کاری نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی (سال ۱۳۹۴)

### نتیجه گیری

امروزه در طرح های جامع و تفصیلی جای خالی مطالعات زیست محیطی و به ویژه آلودگی هوا بسیار خالی است. آلودگی هوا بر روی موجودات زنده و انسان ها آثار سوء بسیاری دارد و موجب ایجاد هزینه های بسیاری برای دولت ها و شهروندان می شود. یکی از مواقعی که می توان از مطالعات آلودگی هوای شهرها بهره جست، زمان تهیه طرح های شهری برای توسعه شهرها است. مهم ترین نتیجه خروجی این تحقیق مشخص شدن جهت مطلوب برای توسعه شهر می باشد. این تحقیق یک عامل محدود کننده توسعه شهری مهم است که مستقیماً بر روی سلامت شهروندان تأثیرگذار است و سالانه موجب تحمیل هزینه های فراوان بر دوش خانوارها می گردد.

تاکنون این موضوع برای شهر مشهد مورد بررسی قرار نگرفته است و این تحقیق آن را مورد مطالعه قرار داده و به عنوان یک عامل تعیین کننده در تعیین جهت توسعه شهر مورد بررسی قرار می دهد. به کمک این تحقیق مشخص شد بهترین مناطق برای توسعه های آتی شهر مشهد، محدوده شهر مشهد مناطق شمال غربی این شهر می باشد.

## منابع

- شاهمحمدی، عاطفه، بیات، علی، مشهدی زاده ملکی، سعید، ۱۳۹۸، بررسی رفتار دی اکسید نیتروژن در شهرستان مشهد و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، زیر چاپ.
- فردی، غلامرضا اسدالله، زنگونی، ۱۳۹۶، حسین، پیش بینی آلودگی PM<sub>۱۰</sub> هوای شهر مشهد با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی MLP و مدل زنجیره مارکف، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷ (۴۷). نژاد کورکی، فرهاد، توسعه مدل پخش آلودگی هوا (AERMOD) در نرم افزار (MATLAB)، کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، ۱۳۹۲.
- Aarshabh Misra, Matthew J. Roorda, Heather L. MacLean, (۲۰۱۳). **An integrated modelling approach to estimate urban traffic emissions**. Atmospheric Environment ۷۳(۲۰۱۳) ۸۱\_91. AERMIC, ۲۰۰۹. AERMOD Modelling System. AERMIC.www.epa.gov/ttn/scram/dispersion prefrec.htm
- ArcGIS for (Desktop, Engine, Server) ۱۰,۲,۲| Samples and Utilities".
- Azapagic A. Z. Chalabi Z., Fletcher T. Grundy C. Jonesa M. Leonardo G. Osammord O. Sharifie V. Swithenbanke J. Tiwarya A. Vardoulakisb S. (۲۰۱۳), **An integrated approach to assessing the environmental and health impacts of pollution in the urban environment: Methodology and a case study**, Process Safety and Environmental Protection ۹۱, pp. ۵۰۸–۵۲۰.
- Boris Galvis, Michael Bergin, James Boylan, Yan Huang, Michelle Bergin, Armistead G. Russel (۲۰۱۵), **Science of the Total Environment**. Air quality impacts and health-benefit valuation of a low-emission technology for rail yard locomotives in Atlanta Georgia. ۵۳۲ (۲۰۱۵) ۱۵۶–۱۶۴.
- Chad W. Milando, Sheena E. Martenies, Stuart A. Batterman, (2016). **Assessing concentrations and health impacts of air quality management strategies: Framework for Rapid Emissions Scenario and Health impact ESTimation (FRESH-EST)**. Environment International ۹۴, pp 473-481.
- Chan. T.L., Dong. G., Leung. C.W., Cheung. C.S., Hung. W.T., ۲۰۰۲. **Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon**, Journal of Atmospheric Environment ۳۶, ۸۶۱–۸۷۲
- Chao Yuan, Leslie Norford, Rex Britter, Edward Ng, (2016). **A modelling-mapping approach for fine-scale assessment of pedestrian-level wind in high-density cities**. Building and Environment 97, pp 152-165.
- Dipankar.C, Gautam.B, Sakir.A., ۲۰۱۰. **Numerical simulation of flow past row of square cylinders for various separation ratios**, Computers & Fluids ۳۹, ۴۹–۵۹.
- Harikishan Perugu, Heng Wei, Zhuo Yao, (2016). **Integrated data-driven modeling to estimate PM2.5 pollution from heavy-duty truck transportation activity over metropolitan area**. Transportation Research Part D 46 (2016) 114–127.



Masoud Fallah Shorshani, Christian Seigneur, Lucie Polo Rehn, Hervé Chanut. Atmospheric dispersion modeling near a roadway under calm meteorological conditions, *Transportation Research Part D*. 34 (2015) 137–154.

Moharreri, M.A, Arkian, F, Lari, K, Salehi, G.R., 2019, **PM<sub>10</sub> and CO Dispersion Modeling of Emissions from the Four Thermal Power Plants in Mashhad-Iran**, *Scientia Iranica*, inpress.

Qian Di, Joel Schwartz, Petros Koutrakis (2016). **A Hybrid Prediction Model for PM<sub>2.5</sub> Mass and Components Using a Chemical Transport Model and Land Use Regression**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.002>.

Rafael Borge, Adolfo Narros, Begoña Artñano, Carlos Yagüe, Francisco Javier Gómez-Moreno, David de la Paz, Carlos Román-Cascón, Elías Díaz, Gregorio Maqueda, Mariano Sastre, Christina Quaassdorff, Chrysanthi Dimitroulopoulou, Sotiris Vardoulakis, (2016). [10.1016/j.atmosenv.2016.06.020](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.020).

Shih Ying Chang, William Vizuete, Alejandro Valencia, Brian Naess, Vlad Isakov, Ted Palma, (2015). **A modeling framework for characterizing near-road air pollutant concentration at community scales**. *Science of the Total Environment* 538 (2015) 905–921. [Support.esri.com](http://support.esri.com) Retrieved ۰۹-۱۲-۲۰۱۵.

Tamura.T., 2008. **Towards practical use of LES in wind engineering**, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 1451-1471.