نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و سوم، شماره ۶۹، تابستان ۱۴۰۲

# 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[۱]

**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 موردتوجه 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 مورداستفاده قرار گیرد. در این مطالعه انتشار آلاینده‌های $NO_X$، CO و $PM_{۱۰}$ با استفاده از نرم‌افزار AERMOD در شهر مشهد مدل‌سازی و بررسی‌شده 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، CO، $NO_X$، $PM_{۱۰}$، نیروگاه حرارتی، جهت توسعه شهر.

---

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

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]

[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

**مقدمه**

شهر مشهد در شمال‌شرقی ایران واقع‌شده است. این شهر حدود سه ونیم میلیون نفر جمعیت ساکن دارد. درمجموع 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. باوجود اهمیت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌های CO، $NO_X$ و $PM_{۱۰}$ نیروگاه، تاکنون مطالعه‌ای در این رابطه با این موضوع انجام‌نشده است.

مدل انتشار آلاینده‌های CO و $PM_{10}$ 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 $PM_{۱۰}$ هوای شهر مشهد با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP[1] و مدل زنجیره مارکف را تحقیق کرده و به نتایج خوبی دست‌یافته است (فردی، ۱۳۹۶: ۴۷). بررسی رفتار دی‌اکسید نیتروژن در شهرستان مشهد و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی مشخص‌شده است (شاهمحمدی، ۱۳۹۸: زیر چاپ).

تحقیقی در زمینه انتشار آلاینده‌های منتشره از یک ایستگاه راه‌آهن در شهر آتلانتا از ایالت جرجیا آمریکا انجام‌شده 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 انجام‌شده است. این کار با بررسی عملکرد مدل پلوم گاوسی استاندارد و اصلاح‌شده با استفاده از اندازه‌گیری $NO_۲$، $PM_{۱۰}$، $PM_{۲.۵}$ را انجام‌شده است (فلاح شرشانی، ۲۰۱۵: ۱۵۷). به‌منظور تحلیل بهتر شرایط و پایش آنلاین شرایط آب‌وهوایی یک الگوریتم و نرم‌افزار جدید برای مدیریت پایدار آلودگی شهری طراحی‌شده است. تعدادی از روش‌ها و ابزارهای مختلف، ازجمله GIS،LCA[2]، مدل‌سازی حمل‌ونقل، جهت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تجزیه‌وتحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره یکپارچه‌شده است. در یک مطالعه موردی که به بررسی اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی آلودگی ناشی از صنعتی و منابع دیگر ازجمله حمل‌ونقل در شهر شده است. شهر انتخاب برای مطالعه شفیلد در انگلستان و آلاینده‌های اصلی در نظر گرفته‌شده $NO_x$، $SO_۲$ و $PM_{۱۰}$ می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که حذف منابع بزرگ صنعتی موجود در شهرستان به کاهش ۹۰ درصد از $SO_۲$ و ۷۰ درصد از غلظت $NO_۲$ در سطح زمین، درنتیجه 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 (آزاپاژیک، ۲۰۱۳: 508).

تعریف یک مدل به‌منظور تحلیل و بررسی الگوی انتشار آلاینده‌ها در سطح شهر بستون در کشور نمودند. در این تحقیق غلظت $PM_{۱۰}$، غلظت ذرات کربن، کربن عالی، نمک دریا، آمونیاک، گوگرد و گردوغبار موردبررسی قرارگرفته

[1] Multiple layer perceptron
[2] Life-cycle assessment

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

شده است (کوئان دی، ۲۰۱۶: ۲).

یک روش مدل‌سازی، برای انجام مدل‌سازی در زمان کمتر و به‌تبع آن زمان محاسبات کمتر، از فناوری شبیه‌سازی-های CFD[1] است. در همین حال، ازنقطه‌نظر عملی، روش مدل‌سازی نتایج دقیق با وضوح‌بالا ارائه می‌کند. با استفاده از این رویکرد، برنامه‌ریزان شهری و معماران می‌توانند در مقیاس محله در سطح تنفس عابر پیاده انتشار آلاینده را برآورد و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و طراحی مناسب در خصوص طراحی شهری موفق داشته باشند (چئی یوگان، ۲۰۱۶: ۱۵۲).

مدل‌سازی داده یکپارچه به‌منظور برآورد آلودگی $PM_{2.5}$ از فعالیت حمل‌ونقل وسایل نقلیه سنگین یک منطقه شهری سینسیناتی انجام‌شده است. از نتایج مهم حاصل این تحقیق می‌توان به نقش کامیون‌های سنگین در انتشار حدود ۷۱ درصد از تولید گازها گلخانه‌ای $PM_{2.5}$ همراه منبع شهری توسط این وسایل نقلیه ایجاد می‌شود و همچنین ۲۱ درصد از غلظت $PM_{2.5}$ شهری محیط کلی را می‌توان 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 نرم‌افزار AERMOD[2] در محیط نرم‌افزار MATLAB شده‌اند در توسعه مدل بیشتر بر روی بهبود کیفیت خروجی‌های نرم‌افزار مطلب کار شده است (نژادکورکی، ۱۳۹۲: ۱۱۴). در مطالعه‌ای ارتباط میان شبکه حمل‌ونقل، تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از ترافیک معابر و مدل پراکندگی به‌منظور توسعه یک مدل مناسب با قدرت تفکیک مکانی بالا انجام پذیرفته است. غلظت NOx، $PM_{2.5}$ را در اطراف جاده‌ها به‌دست آوردند (شیه یینل چنگ، ۲۰۱۵: ۲۰۱، ۹۰۵). در تحقیق دیگری چارچوب مدل‌سازی جدید، به نام چارچوبی برای بررسی سریع انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدی، سناریو و برآورد تأثیر سلامت[3] را ارائه نمایند. این مدل تخمین غلظت و اثرات بهداشتی ناشی از حالات انتشار آلاینده‌های را در مقیاس شهری و محاسبات کارآمدی از تولید گازهای گلخانه‌ای، اثرات بهداشتی محیط موردنظر ارائه می‌دهد. مضافاً، این مدل می‌تواند کاهش انتشار آلاینده‌ها بهینه‌سازی برای مواجهه با محدودیت‌های زیست‌محیطی و سلامت مشخص‌شده و یک رابط کاربری مناسب و نمایش گرافیکی برای تسهیل ارزیابی سناریو در اختیار دارد. چارچوب جدید در منطقه $SO_2$ غیر حصول در جنوب شرقی میشیگان با دو استراتژی بهینه‌سازی نشان داد: ۱: به حداقل رساندن انتشار آلاینده‌های موردنیاز برای رسیدن به یک هدف مشخص؛ ۲: به حداقل رساندن غلظت در حال تولید گازهای گلخانه‌ای ثابت نگه‌داشتن شده‌اند (چاد وی میلاندو، ۲۰۱۶: ۹۴، ۴۷۳).

روش مدل‌سازی یکپارچه به برآورد تولید گازهای گلخانه‌ای ترافیک شهری ایجاد کردند. این مدل دارای امکان ترافیک شبیه‌سازی انتشار در ریزمقیاس‌ها و برآورد تولید گازهای گلخانه‌ای محیط حل بوده است. همچنین یک چارچوب یکپارچه به‌منظور مدل‌سازی برای CO و $NO_x$ می‌باشد. مطالعات آماری عملکرد QUIC[4] از مدل‌های پراکندگی AERMOD بررسی قرار گرفت (ارشب میسرا، ۲۰۱۳: 73، 81). در مطالعه‌ای بر روی انتشار آلاینده‌ها در سطح شهر مادرید اسپانیا نتایج ارزنده‌ای به‌دست‌آمده است. تیم محققین با انجام برداشت اطلاعات توزیع و انتشار

[1] Computational fluid dynamic
[2] American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model
[3] FRESH-EST
[4] Quick Urban and Industrial Complex

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

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 موردمطالعه کاملاً مشخص‌شده است (رافائل بورگی، ۲۰۱۶: ۰۶، ۲۰).

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

در این مطالعه ۳ مرحله کار صورت گرفته است. ابتدا اطلاعات آلاینده‌های منتشره از نیروگاه‌ها به‌صورت دقیق تهیه‌شده است. با استناد به استانداردهای مورد تأیید و اجباری سازمان حفاظت ایران محیط موردبررسی قرارگرفته و ملاک عمل قرارگرفته‌اند. غلظت ذرات معلق $PM_{۱۰}$ 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. به‌منظور مشخص شدن الگوی توسعه شهر و همچنین مشخص کردن جهت توسعه شهر در این تحقیق ابتدا مناطق آلوده و پاک به تفکیک مشخص‌شده 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[1] 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. به‌طورکلی مدل‌های گوسی، محدود به جریان‌های عبوری از سطوح ساده‌اند، اما AERMOD روش ساده‌ای جهت تقریب‌زدن جریان‌های عبوری از پستی‌وبلندی بکار می‌برد.

1 Convective boundary layer

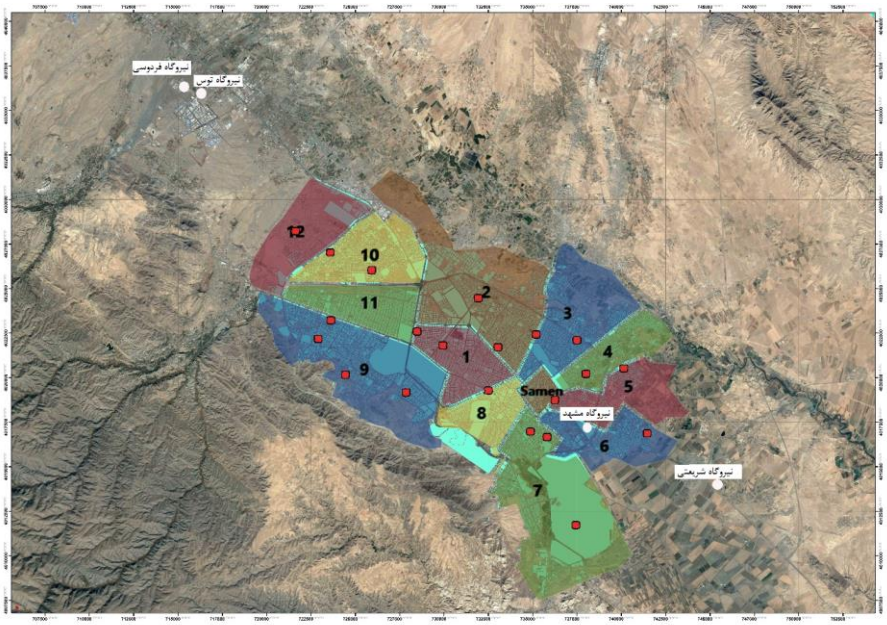
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

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 طراحی‌شده 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 بررسی‌شده 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 گرفته‌شده است. اطلاعات مربوط به خروجی دودکش‌ها نیز با توجه به استاندارد-های ملی و در شرایط استاندارد با در نظر گرفتن میزان تولید محاسبه‌شده 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 مشخص‌شده است را نشان می‌دهد. جهت وزش باد غالب در ناحیه موردمطالعه از جنوب‌شرقی و شرق می‌باشد. سرعت میانگین جریان هوا که حدود km/hr ۱۱ می‌باشد. شکل (۲) گلباد شهر[1] مشهد را نشان می‌دهد. شرایط آب‌وهوای مشهد در بازه زمانی سال ۱۳۹۴ در مدل‌سازی در نظر گرفته‌شده است.

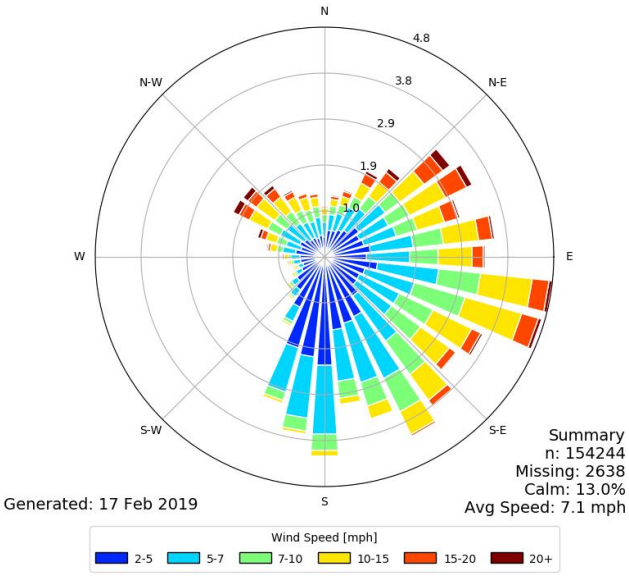
پس از مشخص شدن مدل انتشار آلاینده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار AERMOD نتایج در نرم‌افزار ARC GIS بارگذاری شده است. در این نرم‌افزار با استفاده از اطلاعات منتشرشده توسط نهاد مطالعات شهرداری مشهد و اطلاعات حاصل از نرم‌افزار AERMOD جهت توسعه شهر مشخص و مورد تحلیل قرارگرفته است.

1 Rose wind

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]




**شکل (۱). نقشه مناطق سیزده‌گانه 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**

**صحه‌گذاری**

به‌منظور صحه‌گذاری مدل، نتایج مدل‌سازی با خروجی‌های ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا مقایسه می‌شوند. خروجی‌های ایستگاه‌های هواشناسی منتشرشده توسط سازمان هواشناسی به‌منظور مقایسه و تحلیل مورده استفاده است، می‌باشد؛ بنابراین تنها جزئیات مهم، در این تحقیق ارائه می‌شود.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

به‌منظور بررسی نتایج مدل‌سازی با خروجی‌های دستگاه‌های کنترل و پایش هوا مورداستفاده قرارگرفته است. نتایج شاخص‌های آماری به‌کاررفته در این پژوهش، روابط (۱ تا ۵)، شاخص توافق (IOA[1])، اُریبی کسری (FB[2])، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE[3])، خطای میانگین مربع نرمال شده (NMSE[4]) و ضریب همبستگی پیرسون (R[5]) بر اساس معیارهای ارائه‌شده برای آن‌ها، حاکی از توانایی بالای مدل AERMOD در شبیه‌سازی میدانی انتشار آلاینده‌ها هوا دارد. در جدول (۱) مقادیر پارامترها ذکرشده قابل‌مشاهده می‌باشد.

$$IOA = 1 - \frac{\sum\left(P_i - \bar{O}_l\right)^2}{\sum\left(\left|P_i - P_l\right| + \left|O_i - \bar{O}_l\right|\right)^2}$$ رابطه(۱)

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

$$NMSE = \frac{\overline{(\bar{O}_l - \bar{P}_l)}}{\left(\overline{O_l P_l}\right)}$$ رابطه(۳)

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

$$R = \frac{\overline{O_l - \bar{O}_l} - \overline{P_l - \bar{P}_l}}{\sigma P_i \sigma O_i}$$ رابطه(۵)

جایی که N نشان‌دهنده تعداد داده‌ها است، $P_i$ و $O_i$ به ترتیب غلظت پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده‌اند؛ و مقادیر متوسط غلظت پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده است. به همین ترتیب، $\sigma P_i$ و $\sigma O_i$ انحرافات استاندارد پیش‌بینی‌ها و مشاهدات است.

اریبی کسری در این تحقیق بر اساس چهارچوب ارائه‌شده توسط اولسن عملکرد آماری نتایج توسط پارامترهای اریبی کسری که بیانگر تمایل مدل به پیش‌بینی بیش‌ازحد و یا کمتر از حد واقعی می‌باشد، بیان می‌شود. مقدار اریبی برای هر دو آلاینده CO و$PM_{10}$ معادل پیش‌بینی بیشتر با ضریب ۲ معادل پیش‌بینی کمتر با ضریب ۲ می‌باشد و اریبی کسری صفر به‌طور متوسط نشان‌دهنده این است که پیش‌بینی مدل کامل است.

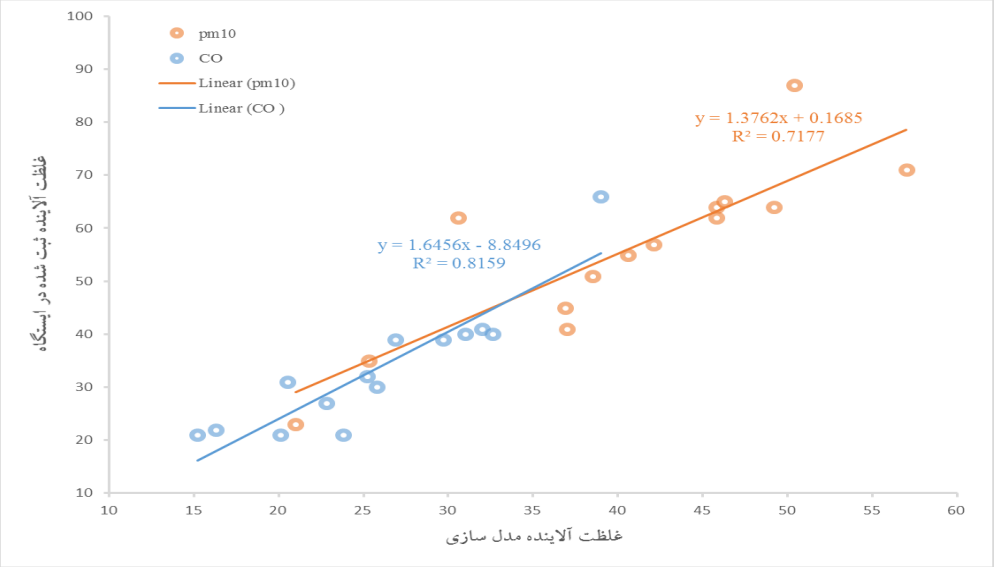
تعریف ضریب تعیین $R^2$ نسبتاً ساده است: ضریب تعیین $R^2$ نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به‌وسیله متغیر مستقل تبیین می‌شود یا به‌عبارت‌دیگر ضریب تعیین نشان‌دهنده این است که چه مقدار از

[1] index of agreement
[2] fractional bias
[3] Root Mean Square Error
[4] normalized mean square error
[5] correlation coefficient

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

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 $R^2$=۰.۷۱۷۷ 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**

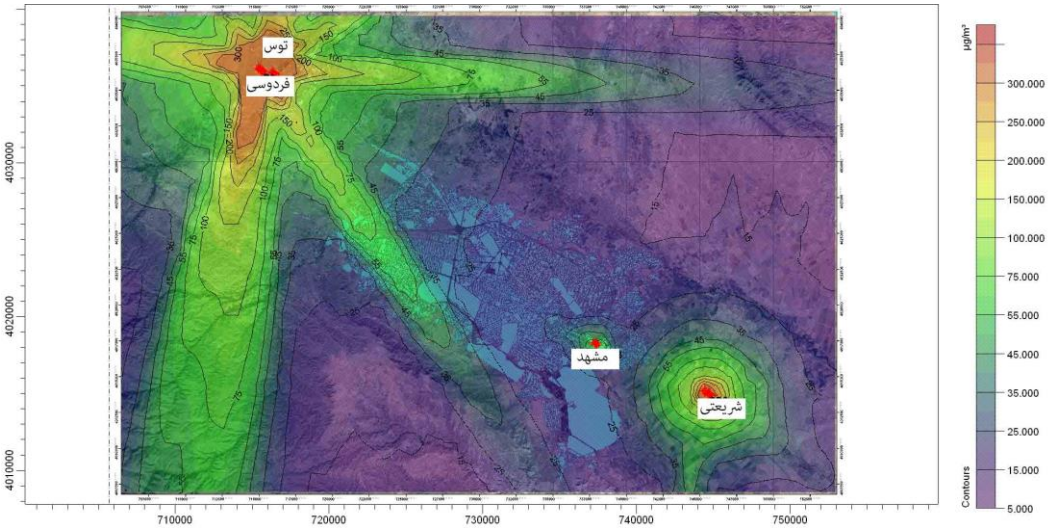
| | IOA | FB | NMSE | RMSE |
|---|---|---|---|---|
| $PM_{10}$ | ۰.۴۷۰۵۸۲ | ۰.۱۴۳۱ | ۰.۰۰۶۸۱ | ۰.۰۵۶۱ |
| CO | ۰.۶۷۵۷۸۹ | ۰.۱۴۴۱ | ۰.۰۰۶۸۱ | ۰.۱۲۱۳ |

## 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 میزان تولید آلاینده بیشترین تأثیر را بر غلظت آلاینده $PM_{۱۰}$ بر روی شهر مشهد دارد. البته

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

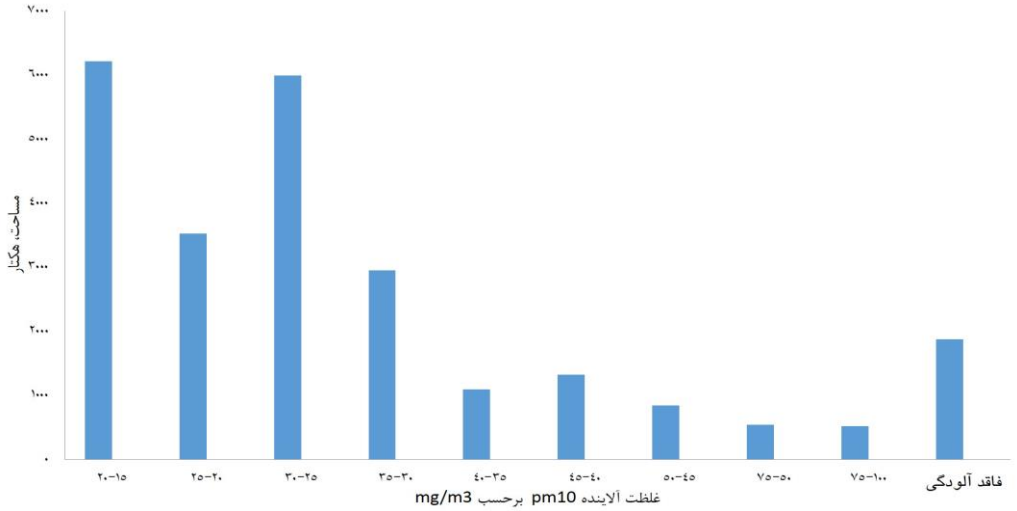
نکته مهم این است که نیروگاه مشهد باوجود میزان کم‌مصرف سوخت ولی نظر به این‌که در مرکز شهر و در منطقه پرجمعیت شهر قرار دارد تأثیر زیادی بر کیفیت هوای آن منطقه شهر دارد. بیشترین غلظت $PM_{۱۰}$ در سطح شهر حدود ۱۰۰ $mg/m^۳$ می‌باشد. آنچه در این تصویر به‌وضوح مشخص است جهت انتشار آلاینده‌ها وابسته به چندین عامل است، از عوامل مهم می‌توان جهت و سرعت وزش باد، باید هم‌زمان در نظر داشت دمای هوا و ناهمواری‌های زمین می‌باشد. این تصویر نشان می‌دهد تأثیر دما در فرونشست آلاینده در سرعت‌های پایین جریان هوا بیشتر از سایر پارامتر می‌باشد. گلباد شهر مشهد نشان می‌دهد باد غالب جنوب شرق به سمت شمال‌غرب می‌باشد. این در حالی است که بازه‌های زمانی خاص جهت باد با سرعت نسبتاً بالا از سمت شمال-غرب به سمت جنوب‌غرب می‌باشد. این جهت وزش باد با شرایط دمایی خاص همراه شده و سبب و انتشار گسترده آلاینده‌های منتشره از نیروگاه‌ها در سطح شهر می‌شوند. اشکال (۴ تا ۱۳) این بخش بر مبنای میانگین سالانه خروجی گرفته شده‌اند.




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

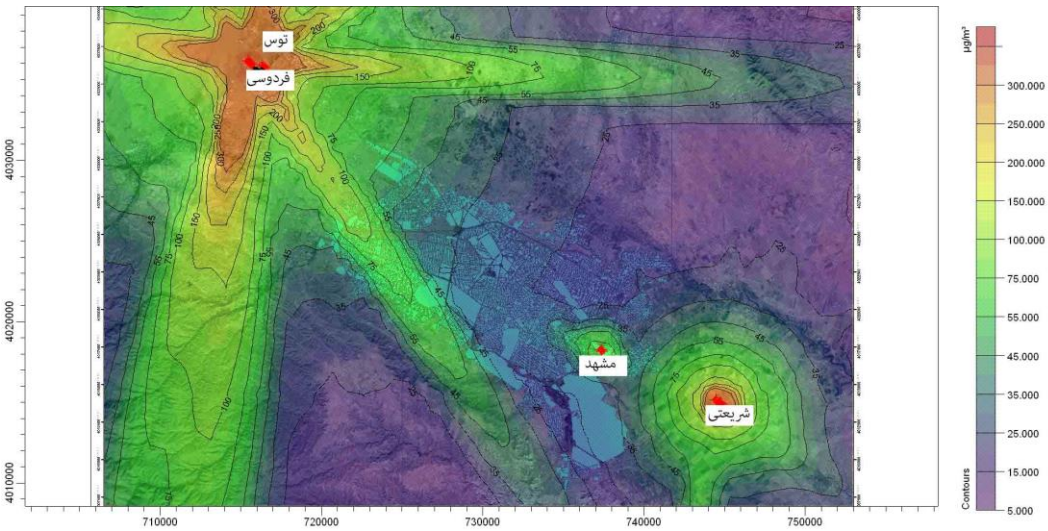
همان‌طورکه در شکل (۵) مشاهده می‌شود، ۶۰۰ هکتار از سطح شهر مشهد در معرض غلظت ۷۵-۵۰$mg/m^۳$ می‌باشد که حدود ۴ درصد مساحت شهر می‌باشد. این در حالی است که ۲۵ درصد مساحت شهر درگیر غلظت ۲۰-۱۵ $mg/m^۳$ است. همچنین مشاهده می‌شود تنها ۷ درصد مساحت شهر عاری از این آلاینده می‌باشد که برای کاربری‌های حساس مناسب می‌باشد. حدود ۱۴ درصد مساحت شهر درگیر آلودگی ۳۰-۲۵ $mg/m^۳$ و همچنین ۲۴ درصد مساحت شهر متأثر از غلظت ۲۵-۲۰ $mg/m^۳$ می‌باشد. حدود ۲۴.۹ درصد جمعیت شهر درگیر غلظت ۵۰-۳۰ $mg/m^۳$ همچنین حدود ۴ درصد مساحت شهر درگیر غلظت ۱۰۰-۷۵ $mg/m^۳$ می‌باشند.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]




**شکل (۵). مساحت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف آلاینده $PM_{10}$ 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 باوجود 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 $mg/m^3$ ۱۰۰ می‌باشد.

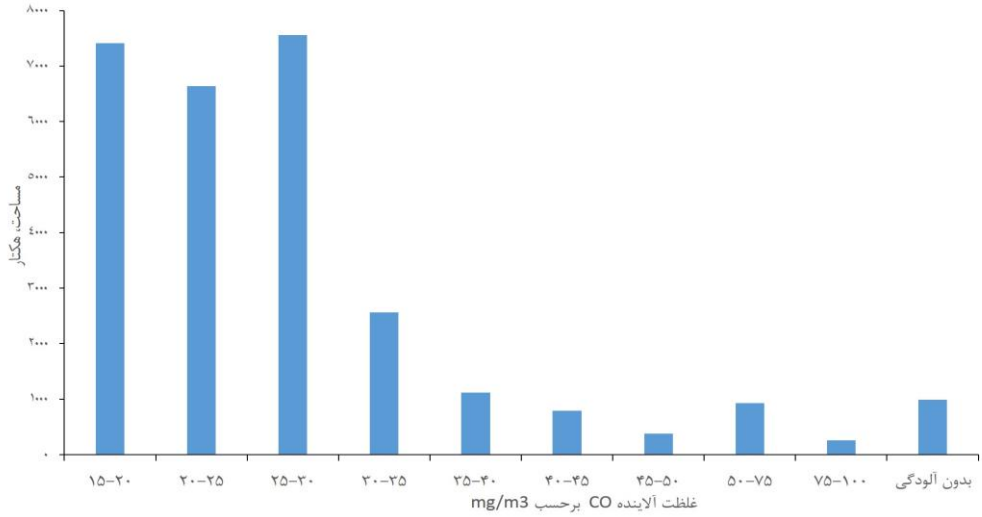



**شکل (۶). کانتور غلظت CO در سطح شهر مشهد**

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ۳۶۸ هکتار از سطح شهر مشهد در معرض غلظت $mg/m^3$ ۵۰-۷۵ می‌باشد که حدود ۱.۲ درصد مساحت شهر می‌باشد. این در حالی است که ۲۵ درصد مساحت شهر درگیر

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

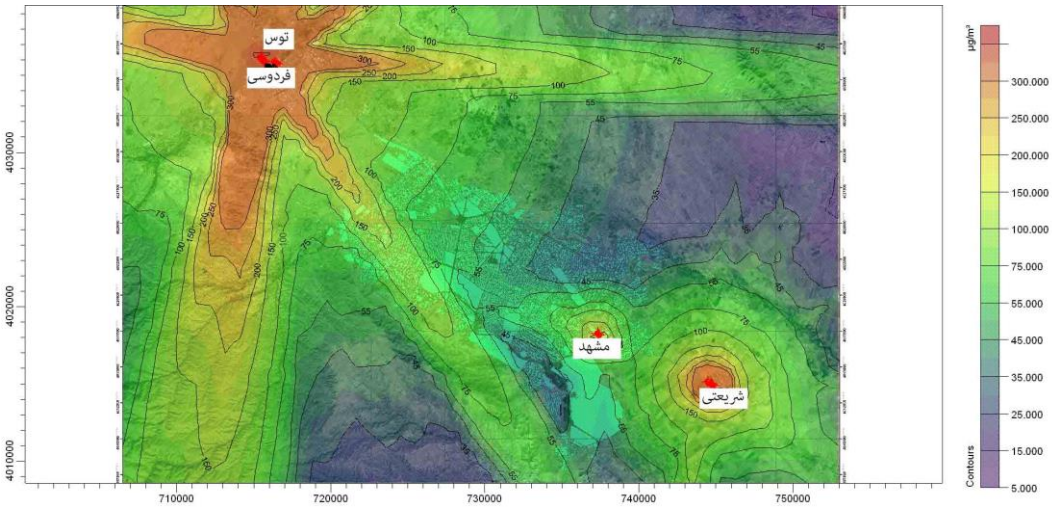
غلظت $mg/m^3$ ۱۵-۲۰ است. همچنین مشاهده می‌شود تنها ۵ درصد مساحت شهر عاری از این آلاینده می‌باشد که برای کاربری‌های حساس مناسب می‌باشد. حدود ۲۶ درصد مساحت شهر درگیر آلودگی $mg/m^3$ ۲۵-۳۰ و همچنین ۱۸.۵ درصد مساحت شهر متأثر از غلظت $mg/m^3$ ۲۰-۲۵ می‌باشد. حدود ۲۳ درصد جمعیت شهر درگیر غلظت $mg/m^3$ ۳۰-۵۰ می‌باشند. حدود ۴ درصد مساحت شهر درگیر آلاینده با غلظت $mg/m^3$ ۷۵-۱۰۰ می‌باشد.



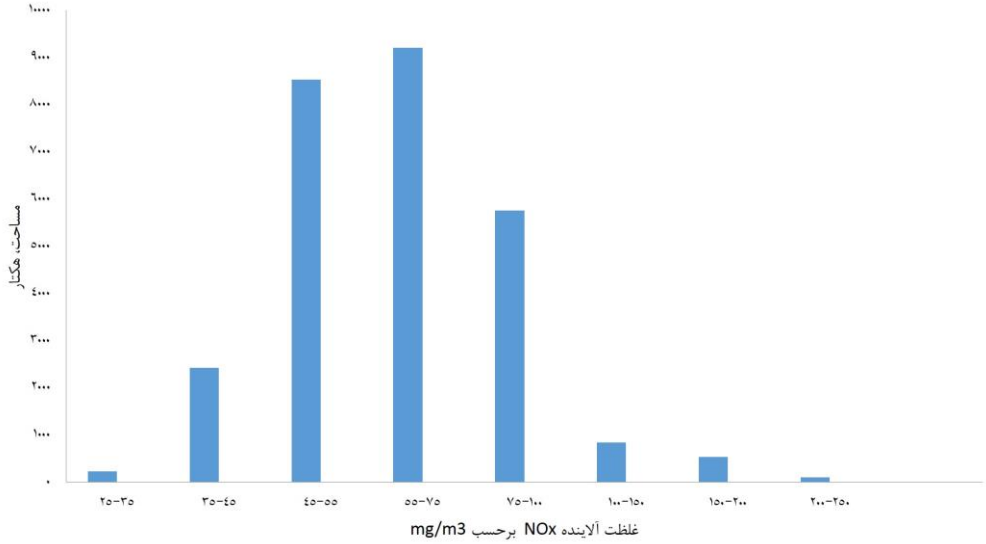

**شکل (۷). مساحت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف آلاینده CO در سطح شهر**

در شکل (۸) به‌وضوح مشخص است که نیروگاه‌های توس و فردوسی با توجه میزان تولید آلاینده بیشترین تأثیر را بر غلظت آلاینده $NO_X$ بر روی شهر مشهد دارد. البته نکته مهم این است که نیروگاه مشهد باوجود 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 $NO_X$ حدود $mg/m^3$ ۲۰۰ می‌باشد. شکل (۹) مساحت درگیر غلظت‌های مختلف آلاینده $NO_X$ به تفکیک نشان می‌دهد. حدود ۱۷۰۰۰ هکتار از مساحت شهر درگیر غلظت بین $mg/m^3$ ۴۵ تا ۷۵ می‌باشد که مساحت قابل‌توجهی باشد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]




**شکل (۸). کانتور غلظت $NO_X$ در سطح شهر مشهد**



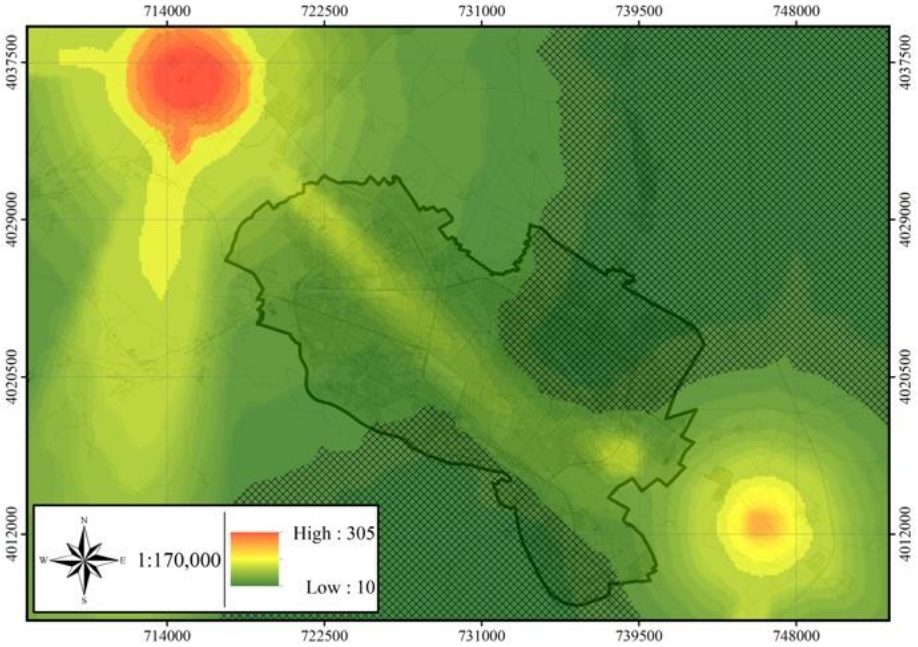

**شکل (۹). مساحت تحت تأثیر غلظت‌های مختلف آلاینده $NO_X$ در سطح شهر**

**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 مشخص‌شده است، موردبررسی قرارگرفته شده است. در این بخش عوامل طبیعی و مصنوعی موردبررسی قرارگرفته است. مناطق مناسب جهت توسعه شهر مشخص‌شده و در وضعیت موجود و پس از تغییر سیکل کارکرد نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی موردبررسی قرارگرفته است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

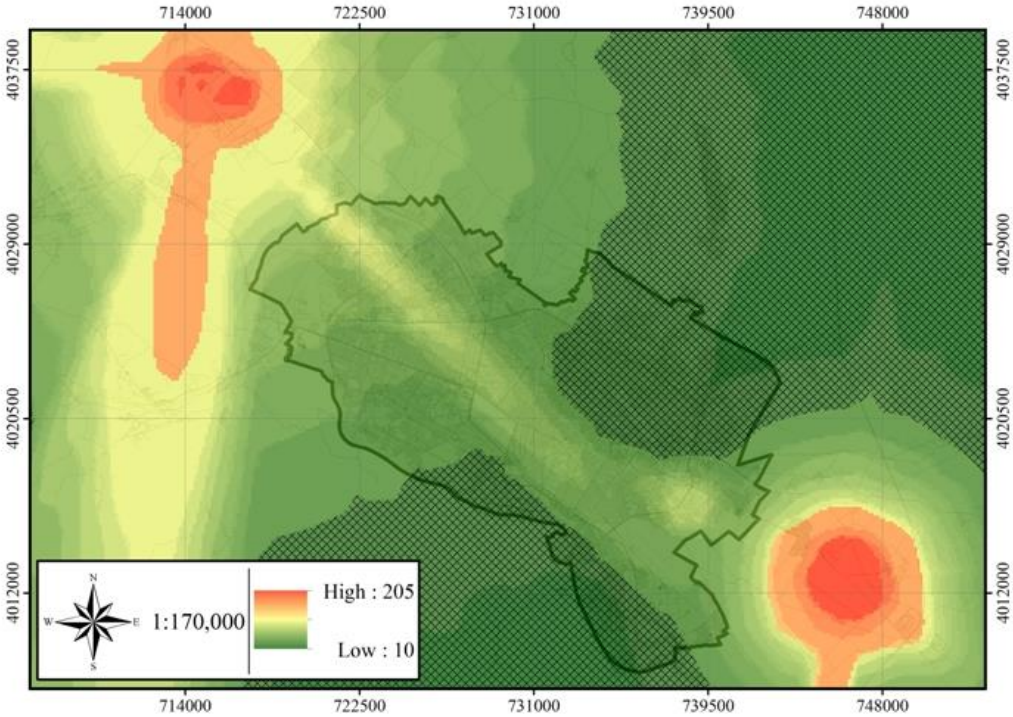
در شکل (۱۰) مجموع اثرات آلاینده‌ها بر کیفیت هوای شهر مشهد در وضعیت موجود ارائه‌شده است. در شکل (۱۰) قسمت‌های هاشور زده‌شده مناطق حومه شهر مشهد هستند، کیفیت هوا در آن‌ها در بالاترین مقدار ممکن می‌باشد. در این مناطق توسعه شهری اتفاق نیفتاده است یا به‌صورت خیلی محدود به شکل حاشیه‌نشینی یا بافت‌های فرسوده 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 واقع‌شده‌اند و بخشی در جنوب شرق این شهر قرار دارند. همان‌طورکه 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 موردبررسی قرارگرفته است. همان‌طورکه 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.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

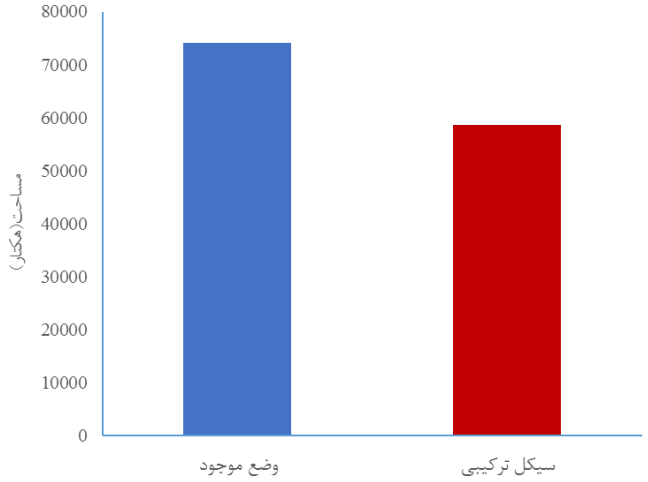



**شکل (۱۱). مجموع اثرات آلاینده‌ها بر کیفیت هوا شهر مشهد در شرایط تغییر سیکل کارکرد نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی (سال ۱۳۹۴)**

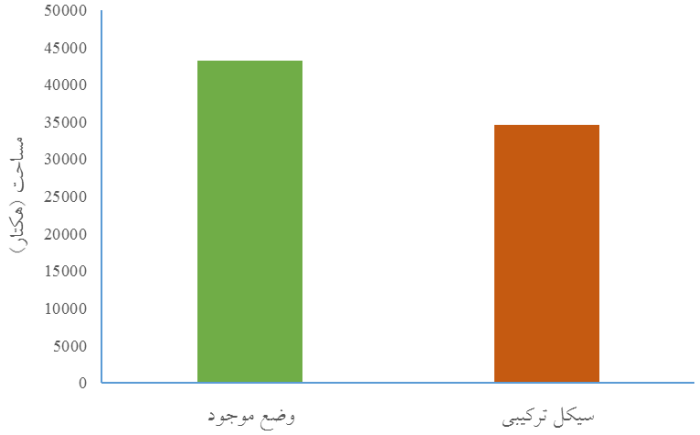
همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص است مساحت کل مناطق قابل توسعه در وضعیت موجود برای شهر مشهد و محدوده قانونی آن حدود ۷۴۱۰۶ هکتار می‌باشد. این در حالی است که در صورت تغییر سیکل نیروگاه فردوسی به سیکل ترکیبی تنها ۵۸۶۹۸ هکتار مناطق پاک جهت توسعه شهر در اختیار خواهد بود. به تعبیر ساده‌تر حدود ۲۱ درصد اراضی پاک 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 قابل‌توجهی 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 داده‌شده 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.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]




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

## نتیجه‌گیری

امروزه در طرح‌های جامع و تفصیلی جای خالی مطالعات زیست‌محیطی و به‌ویژه آلودگی هوا بسیار خالی است. آلودگی هوا بر روی موجودات زنده و انسان‌ها آثار سوء بسیاری دارد و موجب ایجاد هزینه‌های بسیاری برای دولت‌ها و شهروندان می‌شود. یکی از مواقعی که می‌توان از مطالعات آلودگی هوای شهرها بهره جست، زمان تهیه طرح‌های شهری برای توسعه شهرها است. مهم‌ترین نتیجه خروجی این تحقیق مشخص شدن جهت مطلوب برای توسعه شهر می‌باشد. این تحقیق یک عامل محدودکننده توسعه شهری مهم است که مستقیماً بر روی سلامت شهروندان تأثیرگذار است و سالانه موجب تحمیل هزینه‌های فراوان بر دوش خانوارها می‌گردد.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]
[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]
[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

تاکنون این موضوع برای شهر مشهد موردبررسی قرار نگرفته است و این تحقیق آن را موردمطالعه قرار داده و به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در تعیین جهت توسعه شهر موردبررسی قرار می‌دهد. به کمک این تحقیق مشخص شد بهترین مناطق برای توسعه‌های آتی شهر مشهد، محدوده شهر مشهد مناطق شمال غربی این شهر می‌باشد.

## منابع


شاهمحمدی، عاطفه، بیات، علی، مشهدی‌زاده ملکی، سعید، ۱۳۹۸، **بررسی رفتار دی‌اکسید نیتروژن در شهرستان مشهد و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، زیر چاپ.

فردی، غلامرضا اسدالله، زنگوئی، ۱۳۹۶، حسین، **پیش‌بینی آلودگی $PM_{۱۰}$ هوای شهر مشهد با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP و مدل زنجیره مارکف**، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷ (۴۷).

نژاد کورکی، فرهاد، **توسعه مدل پخش آلودگی هوا (AERMOD) در نرم‌افزار (MATLAB)**، کارشناسی ارشد مهندسی محیطزیست، 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. ۵۳۳ (۲۰۱۵) ۱۵٦–۱٦٤.

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 ۹٤, 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 ۳٦, ۸٦۱–.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, ٤۹–۵۹.

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.


[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]

[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]

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, **$PM_{10}$ 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 PM2.5 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 Artíñano, 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.

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 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.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28 ]

[ DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.85.8 ]

[ DOI: 10.61186/jgs.23.69.137 ]