

Optimization of Stack Height for SO₂ Emission Reduction: Quantitative and Qualitative Dispersion Modeling Using AERMOD Software

Reza Peykanpour Fard

* PhD candidate, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (Corresponding Author)

r.peykanpour@na.iut.ac.ir

Mahsa Tamjidi

PhD, Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Manije Mahdi abadi

M.sc, Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Ferial Farasat

PhD candidate, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Background and Objective: Today, many people are exposed to air pollution, a phenomenon that threatens human health in various ways. Air pollution is defined as the presence of a pollutant at concentrations exceeding permissible limits in the natural environment. The primary objective of this study is to examine the effect of stack height on the concentration of pollutants emitted from an industrial stack.

Materials and Methods: In this descriptive-analytical study, the AERMOD software was employed to model the dispersion of SO₂ emissions at four different stack heights (63, 97, 103, and 110 meters). The input data included: technical specifications of the stack (flow rate, temperature, and exit gas velocity), hourly meteorological data from the Shiraz synoptic station (2021-2022), and a 90-meter resolution digital elevation model of the study area. The modeling domain was divided into a 300×300 meter grid within a 10 km radius of the stack.

Results: The findings demonstrated that increasing the stack height from 63 to 110 meters (a %42 increase) resulted in a %32 reduction in SO₂ concentrations. At the 63-meter height, the maximum 1-hour SO₂ concentration reached 263 µg/m³ (exceeding the 196 µg/m³ standard limit), while at 110 meters, this value decreased to 178 µg/m³. The minimum effective height for compliance with air quality standards was determined to be 103 meters.

Conclusion: This research demonstrates that modifying stack height significantly affects both the concentration and spatial distribution of pollutants. Future studies should investigate the combined effects of other physical stack parameters to develop more comprehensive emission control strategies.

Keywords: Stack Height, Air Pollution Modeling, Point Source, SO₂

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2025/01/20

Accepted: 2025/05/16

Doi:10.22038/jreh.2025.26312

► **Citation:** Peykanpour Fard R, Tamjidi M, Mahdi abadi M, Farasat F. Optimization of Stack Height for SO₂ Emission Reduction: Quantitative and Qualitative Dispersion Modeling Using AERMOD Software. *Journal of Research in Environmental Health*. 11(2):42-54.

بهینه‌سازی ارتفاع دودکش برای کاهش انتشار SO_2 : مدل‌سازی پراکنش کمی و کیفی با استفاده از نرم‌افزار AERMOD

رضا پیکانپور فرد

دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول)
r.peykanpour@na.iut.ac.ir

مهسا تمجیدی

دکتری گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

منیژه مهدی‌آبادی

کارشناسی ارشد گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران ایران

فریال فراست

دانشجوی دکتری گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: امروزه بسیاری از انسان‌ها در معرض آلودگی هوا قرار دارند و این پدیده، سلامت انسان‌ها را از جنبه‌های مختلفی تهدید می‌کند. حضور یک آلاینده با غلظت بیش از حد مجاز در یک محیط طبیعی را آلودگی هوا می‌گویند. هدف اصلی این مقاله بررسی میزان تاثیر ارتفاع دودکش بر غلظت آلاینده‌های خروجی از یک دودکش می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش توصیفی-تحلیلی، از نرم‌افزار AERMOD برای مدل‌سازی پراکنش آلاینده SO_2 در چهار رویکرد ارتفاعی (۶۳، ۹۷، ۱۰۳ و ۱۱۰ متر) استفاده گردید. داده‌های مورد استفاده شامل مشخصات فنی دودکش (دبی، دما و سرعت خروج گاز)، داده‌های هواشناسی ساعتی از ایستگاه سینوپتیک شیراز در بازه زمانی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ شمسی و مدل رقومی ارتفاع منطقه با دقت ۹۰ متر بود. منطقه مورد مطالعه با شبکه‌بندی 300×300 متر و در شعاع ۱۰ کیلومتری از دودکش مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد افزایش ارتفاع دودکش از ۶۳ به ۱۱۰ متر (افزایش ۴۲ درصدی) موجب کاهش ۳۲ درصدی غلظت SO_2 می‌شود. در ارتفاع ۶۳ متر، غلظت یک‌ساعته SO_2 به ۲۶۳ میکروگرم بر مترمکعب (فراتر از حد مجاز ۱۹۶ میکروگرم بر مترمکعب) رسید، در حالی که در ارتفاع ۱۱۰ متر، این مقدار به ۱۷۸ میکروگرم بر مترمکعب کاهش یافت. حداقل ارتفاع مؤثر برای رعایت استانداردهای آلودگی هوا ۱۰۳ متر تعیین شد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر ارتفاع دودکش تاثیر بسیار زیادی در میزان و محل تاثیر آلاینده‌ها دارد و می‌توان تاثیر سایر ویژگی‌های فیزیکی دودکش را نیز در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار داد.

کلیدواژه‌ها: ارتفاع دودکش، مدل‌سازی آلودگی هوا، منبع نقطه‌ای، SO_2

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

نوع مقاله: پژوهشی

◀ **استناد:** پیکانپور فرد، ر، تمجیدی م، مهدی‌آبادی م، فراست ف. بهینه‌سازی ارتفاع دودکش برای کاهش انتشار SO_2 : مدل‌سازی پراکنش کمی و کیفی با استفاده از نرم‌افزار AERMOD. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. تابستان ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۴۲-۵۴.

مقدمه

انسان با تهیه، تدوین و اجرای طرح‌های بهره‌برداری و بهره‌وری از سرزمین (طرح‌های جنگل‌داری، پارک‌داری، شهرسازی و سایر پارامترهای مشابه) پیش از پیدایش دانش آمایش در جهان، سعی در استفاده‌ی مطلوب از منابع سرزمین (آب و زمین) برای مصارف عمده‌ی انسانی (چوب، تفرج، مسکن و سایر پارامترهای مشابه) داشته است. این‌گونه طرح‌ها به خاطر دخالت ندادن استعدادهای طبیعی (توان بوم‌شناختی) سرزمین در فرآیند بهره‌برداری اغلب دچار مخمصه شده، در نتیجه به‌دنبال اجرای این‌گونه طرح‌ها، خرابی محیط‌زیست عاید انسان شده است (۱ و ۲). بالا رفتن سطح زندگی در قرن حاضر مدیون ایجاد و توسعه‌ی سریع صنعت است. مسئله‌ی برخورداری انسان از زندگی و محیط بهتر در آینده از نظر کمی و کیفی به توسعه‌ی اقتصادی و ضرورتاً توجه به انتخاب محل صنایع و گسترش اقتصادی آن بستگی دارد. در حال حاضر بخش مهمی از بررسی‌های جغرافیایی و محیط‌زیستی را موضوعات مربوط به صنایع قابل توجه در زندگی مردم به‌ویژه نواحی تمرکز صنایع تشکیل می‌دهد (۳). در این میان، صنایع به‌عنوان محرک‌های اصلی آلودگی هوا، نقش تعیین‌کننده‌ای در این چالش‌های محیط‌زیستی ایفا می‌کنند. به‌ویژه صنایع مادر مانند ذوب آهن که با انتشار آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید گوگرد^۱، فشار مضاعفی بر محیط زیست وارد می‌سازند.

منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها به عنوان بستر اصلی جذب و تعدیل آلاینده‌های هوا عمل می‌کنند، اما توسعه‌ی صنعتی بی‌رویه این ظرفیت طبیعی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. مطالعات نشان می‌دهد که انتشار آلاینده‌هایی مانند SO₂ نه‌تنها کیفیت هوا را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق بارش‌های اسیدی موجب تخریب منابع طبیعی و کاهش توان بوم‌شناختی مناطق می‌شود (۴). در این شرایط، برنامه‌ریزی صنعتی پایدار باید با در نظر گرفتن دو مؤلفه کلیدی انجام شود: اولاً ظرفیت تحمل محیط‌زیست در جذب آلاینده‌ها و ثانیاً الگوی پراکنش فضایی آلودگی هوا. امروزه با پیشرفت سیستم‌های پایش و مدل‌سازی

آلودگی هوا، امکان ارزیابی دقیق تأثیرات زیست‌محیطی صنایع قبل از استقرار آن‌ها فراهم شده است (۵). این رویکرد می‌تواند از بروز بحران‌های محیط‌زیستی ناشی از فعالیت صنایع آلاینده جلوگیری کند.

در جو زمین عناصر گوناگونی وجود دارد، ماده‌هایی چون مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌ها، اکسیدهای سولفور و ذرات معلق به‌عنوان آلوده‌کننده‌های اصلی هوا شناخته شده و باعث به‌وجود آمدن بیش از ۹۰ درصد آلودگی هوا می‌شوند (۶ و ۷). چگونگی ورود آلاینده‌ها و همچنین سرعت آزادسازی آلاینده‌ها به اتمسفر بر آلودگی هوا تأثیر دارد. آلاینده‌ها ممکن است به‌طور متناوب یا پیوسته یا دوره‌ای آزاد شوند یا از یک منبع یا از چندین منبع یا از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آزاد شوند. همچنین پراکندگی آلاینده‌ها به طریقه‌ی ورود آن‌ها به اتمسفر بستگی دارد. فقدان اطلاعات از نحوه‌ی پراکنش آلاینده‌ها باعث می‌شود تعیین تأثیر انتشار آن‌ها بر خارج از مرزهای سایت و در مناطق مسکونی اطراف دشوار باشد (۸). بر اساس مطالعاتی که تاکنون بررسی شد در میان آلاینده‌های مختلف هوا، دی‌اکسید گوگرد به‌دلیل ویژگی‌های شیمیایی منحصر به فرد و نقش محوری در تشکیل باران‌های اسیدی، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات آلودگی هوا برخوردار است. این آلاینده نه‌تنها مستقیماً بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارد، بلکه از طریق مکانیسم‌های پیچیده‌ای به اکوسیستم‌های طبیعی آسیب می‌رساند.

اصلی‌ترین عوامل حرکت ذرات و آلاینده‌های موجود در هوا سرعت و جهت باد است؛ اما پارامترهایی دیگری مانند رطوبت، بارش و ارتفاع دودکش‌ها نیز پراکندگی گازها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۹). مدل AERMOD^۲ یک مدل پراکنش گوسی برای آلاینده‌ها گازی بوده که رفتار توده هوای حاوی آلاینده‌ها را بر مبنای حل معادلات پراکنش در حالت دائمی مدل‌سازی می‌کند. توزیع جرم آلاینده در راستای افقی گوسی و در راستای عمودی دو-گوسی بوده و جهت انتقال آلاینده باد محور است. عملکرد مدل AERMOD برای مدل‌سازی نزدیک منطقه (حداکثر ۵۰ کیلومتر) برای شرایط پایداری مختلف بر مبنای مفاهیم تلاطم لایه مرزی سیاره‌ای استوار است (۱۰). در این راستا، مدل‌سازی دقیق پراکنش آلاینده‌ها با

^۱ AMS EPA Regulatory Model

^۱ SO₂

ابزارهایی مانند AERMOD می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی‌های یکپارچه منطقه‌ای در جهت کاهش آلودگی هوا عمل کند، همان‌گونه که تجربه موفق اروپا در توسعه شهرک‌های کم کربن نشان داده است (۱۱).

کمیسیون اروپا اهمیت جوامع محلی و منطقه‌ای را در تلاش برای مقابله با تغییرات آب و هوایی اذعان کرده است. در این راستا تعدادی از برنامه‌ها برای ایجاد شهرک‌های اروپایی در تلاش برای دستیابی به آینده کم کربن و بهبود کیفیت زندگی از طریق توسعه اقتصادی پایدار انجام داده است. این ابتکارها به‌طور کلی موفقیت‌آمیز بوده و منجر به تعهد تعداد بیشتری از شهرهای اروپایی در این راستا شده است. در عین حال مشخص شده است که یک نیاز کلیدی برای بهبود برنامه جامع شهرها به‌وسیله یک رویکرد یکپارچه و استراتژیک که بر ارزیابی هزینه‌ها در برابر استفاده از انرژی پایدار تمرکز دارد، موجود است (۱۲).

در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه‌ی ارزیابی محیط زیستی و آلودگی هوا انجام شده است به‌طوری‌که بخشی از آن‌ها به مکان‌یابی و ارزیابی توان کاربری صنعتی (۱۳، ۱۴، ۱۵)، کاربری شهری (۱۶، ۱۷ و ۱۸) و کاربری کشاورزی (۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲) پرداخته‌اند. پدیده‌ی آلودگی هوا در بسیاری از مناطق توسعه‌یافته‌ی زمین به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه یک مسئله‌ی جدی است به‌طوری‌که مشکلات متنوعی برای سلامتی انسان بوجود آورده است (۲۳)؛ بنابراین، در بسیاری از مطالعات مکان‌یابی نامناسب را منشاء آلودگی هوا (صنایع و یا شهرها) و وضعیت حاد آلودگی می‌دانند (۲۴). با این حال، در مواقعی هم استقرار یک توسعه‌ی جدید در مکانی که تحت تاثیر آلودگی هواست صورت می‌گیرد. در این شرایط حتی اگر فرآیند ارزیابی کاربری اراضی به‌طور دقیق اما با معیارهای سنتی و بدون لحاظ آلودگی هوا صورت پذیرد، چیدمانی منطقی در جهت توسعه پایدار حاصل نخواهد شد. با این وجود، می‌توان دید که معیار آلودگی هوا در مطالعات ارزیابی کاربری اراضی چندان معمول نیست (۲۵ و ۲۶).

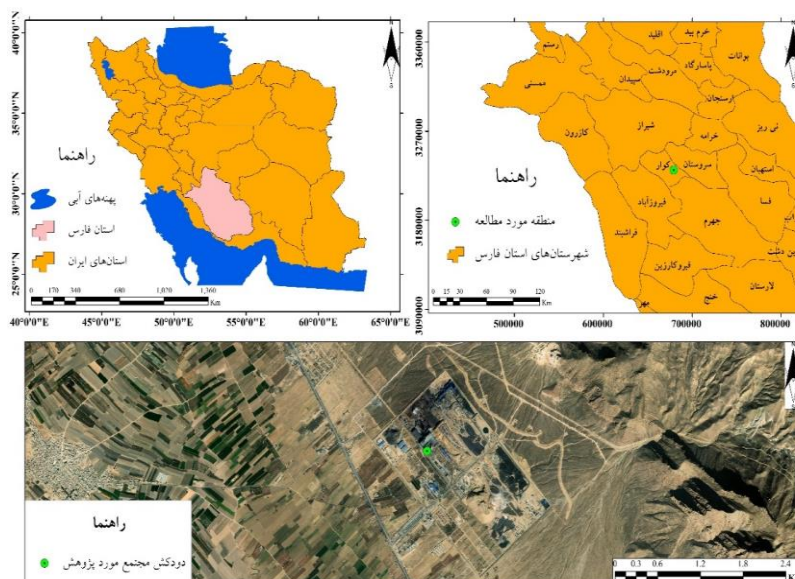
از آن‌جا که طبق قانون مصوب ایران (قانون استقرار صنایع خارج از شعاع ۵۰ کیلومتری شهر شیراز)، توسعه‌ی

صنعتی در شعاع ۵۰ کیلومتر شهر شیراز ممنوع است، بنابراین، بسیاری از صنایع بزرگ مانند مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد در دهه‌های اخیر در شهرهای اطراف شیراز نظیر شهرستان کوار استقرار پیدا کرده است. با این حال، وضعیت آلودگی هوا ناشی از صنایع بزرگ در منطقه شهرستان کوار رضایت‌بخش نیست. بنابراین، در این تحقیق ما به دنبال ارائه‌ی مدلی جهت بررسی میزان و جانمایی تاثیر آلودگی هوای ناشی از مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد به‌خصوص بر روستاهای اطراف می‌باشیم. هم‌چنین هدف اصلی این پژوهش پس از دستیابی به میزان و مکان تحت تاثیر آلودگی هوای ناشی از صنعت یاد شده به دنبال کاهش این اثرات با ایجاد تغییر در خصوصیات فیزیکی دودکش (ارتفاع دودکش) مجموعه خواهیم بود که در راستای توسعه و پایدار و درخور منطقه باشد. نوآوری این پژوهش بر تغییر خصوصیات فیزیکی دودکش بنا شده است که بسیار کم‌هزینه‌تر از تغییر خصوصیات شیمیایی دودکش می‌باشد و هم‌چنین از نظر اجرا قابلیت بیشتری دارد.

روش کار

منطقه‌ی مورد مطالعه

مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد به‌عنوان محدوده‌ی مورد مطالعه در استان فارس، شهرستان کوار قرار دارد (شکل ۱). محدوده مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد در فاصله‌ی حدوداً ۵۰۰۰ متری روستای مظفری واقع شده است (نزدیک‌ترین سکونت‌گاه انسانی). سایر مناطق مهم نزدیک به طرح در جدول ۱ قابل مشاهده است. با توجه به این‌که در این پژوهش استان فارس و شهرستان کوار به‌عنوان محدوده اثر غیرمستقیم یا همان مرز اجتماعی و اقتصادی در نظر گرفته شده است، لذا در این بخش شاخص‌های جمعیتی این محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. بر طبق سرشماری سال ۱۳۹۵، پرجمعیت‌ترین شهرستان استان، شهرستان شیراز با ۱۸۶۹۰۰۱ نفر جمعیت و سهم جمعیتی ۳۸/۵ درصد است. شهرستان کوار ۸۳۸۸۳ نفر و سهم جمعیتی ۱/۷ درصد جز کم جمعیت‌ترین شهرستان‌های استان می‌باشد (۲۷).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

جدول ۱. فاصله‌های مراکز تجمع انسانی و جانوری از دودکش منطقه‌ی مورد مطالعه

شماره	نوع عارضه	نام عارضه	فاصله (کیلومتر)	جهت
۱	مرکز استان	شیراز	۵۰	شمال غرب منطقه
۲	شهر	کوار	۱۵	غرب منطقه
۳	روستا	مظفری	۵	غرب منطقه
۴	مرکز آموزشی	دانشگاه شیراز	۴۸	شمال غرب منطقه
۵	بیمارستان	شیراز	۴۵	شمال غرب منطقه
۶	فرودگاه	شیراز	۴۲	شمال غرب منطقه
۷	منطقه حفاظت شده	میانجنگل	۵۲	شرق منطقه
۸	رودخانه	علی آباد	۵	جنوب غرب منطقه
۹	تالاب (دریاچه)	مهارلو	۳۰	شمال منطقه

توجه به هدف اصلی که به دنبال کاهش اثرات آلودگی هوا به خصوص در مراکز جمعیتی نزدیک مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد با ایجاد تغییر در خصوصیات فیزیکی دودکش (ارتفاع دودکش) هستیم فقط آلاینده SO_2 در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب تنها یک آلاینده مربوط به ماهیت پژوهش است که به دنبال قبول یا رد فرضیه تاثیر ارتفاع دودکش در میزان غلظت آلاینده‌ها است که آلاینده SO_2 به عنوان نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین نمونه‌برداری و تعیین غلظت تمام آلاینده‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد.

حدود آستانه‌های انواع آلاینده‌های هوا

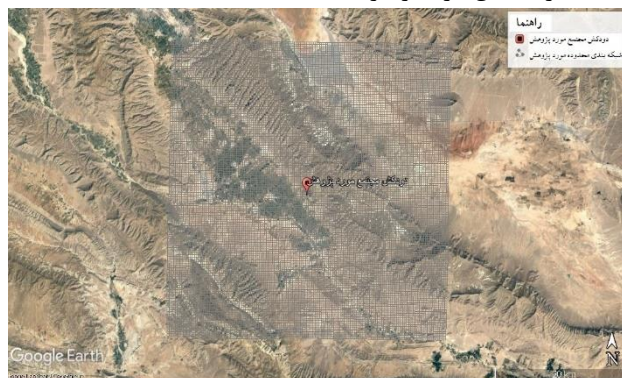
سازمان بهداشت جهانی در رابطه با میزان ماندگاری آلاینده‌ها در اتمسفر، دستورالعمل کیفیت هوا را برای برخی آلاینده‌ها مثل ذرات معلق، اوزون، دی‌اکسیدنیترژن و دی‌اکسیدگوگرد، در غلظت‌های مختلف بررسی کرده است (۲۸). هم‌چنین استاندارد هوای پاک ایران مصوب سال ۱۳۹۵ در جدول ۲ نشان داده شده است. آلودگی هوا مخلوطی از ذرات معلق (مانند $PM_{2.5}$ ، PM_{10})، گازها (مانند مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدنیترژن، اوزون و دی‌اکسیدگوگرد)، ترکیبات آلی (مانند هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی) و فلزات می‌باشد. در این پژوهش با

جدول ۲. برگرفته از استاندارد هوای پاک ایران مصوب سال ۱۳۹۵

نوع آلاینده (SO_x)	واحد (میکروگرم بر مترمکعب)	حداکثر مجاز برای تکرار در یکسال
حداکثر ۱ ساعته	۱۹۶	هیچگونه شاخصی اعلام نشده است

مدل سازی آلودگی هوا با استفاده از نرم افزار AERMOD

نرم افزار AERMOD برای شبیه سازی پراکندگی آلاینده ها از نقطه، منطقه و منابع حجمی استفاده می کند و برای دامنه کوتاه برد (۵۰ کیلومتر در ۵۰ کیلومتر) پیشنهاد می شود (۲۹) در این مطالعه شعاع مدل سازی ۱۰ کیلومتر از دودکش در نظر گرفته شد زیرا شعاع ۱۰ کیلومتری اکثر مناطق جمعیتی پیرامون مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد را در برمی گیرد؛ همچنین به منظور تعیین مقیاس مدل سازی، با توجه به مساحت ۱۰۰ کیلومتر مربعی در نظر گرفته شده از یک شبکه با سلول هایی به ابعاد ۳۰۰ متر در ۳۰۰ متر استفاده گردید (شکل ۲). داده های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات اندازه گیری شده نرخ انتشار از دودکش مجتمع مذکور برای آلاینده SO_2 می باشد (جدول ۳). در واقع نرخ انتشار معیاری کمی برای سنجش میزان آلاینده های منتشر شده از یک منبع در واحد زمان است که طبق نرم افزار این میزان فعالیت کاری به طور متوسط برای هر ساعت در یکسال در نظر گرفته شد.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی دودکش و شبکه بندی محدوده مورد پژوهش

جدول ۳. اطلاعات ثابت مربوط به خروجی دودکش در هر چهار رویکرد

ردیف	عنوان	مقدار	واحد
۱	نرخ انتشار SO_2	۹۵	گرم بر ثانیه
۲	سرعت انتشار خروجی	۱۳/۱	متر بر ثانیه
۳	قطر دهانه دودکش	۵۰۰	سانتی متر
۴	دمای گاز خروجی	۱۴۹	درجه سلسیوس

گام های مدل سازی آلودگی هوا با استفاده از نرم افزار

AERMOD

(۱) پیش پردازشگر AERMET^۱: پیش پردازنده AERMET با در نظر گرفتن داده های خام هواشناسی به صورت یک ساعته برای فاکتورهای مختلف هواشناسی از جمله ابرناکی، جهت باد، سرعت باد، بارندگی یک ساعته، رطوبت نسبی و دمای هوای خشک شروع به اقدام محاسباتی هم چون ارتفاع اختلاط همرفتی و مکانیکی، مقیاس سرعت همرفتی و غیره می نماید که این اطلاعات به صورت خروجی وارد مدل AERMOD شد. در این مرحله اطلاعات اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور (ایستگاه سینوپتیک شیراز با کد ۴۰۸۴۸) از تاریخ ۱۴۰۰/۰۵/۰۱ تا ۱۴۰۱/۰۴/۳۱ شمسی استفاده شده است.

(۲) پیش پردازشگر AERMAP^۲: برای مباحث توپوگرافی و مدل رقومی ارتفاع منطقه مطالعاتی طبق فرمت نرم افزار از داده های SRTM 90 متری استفاده می کند و خروجی آن نیز وارد مدل AERMOD شد (شکل ۳).



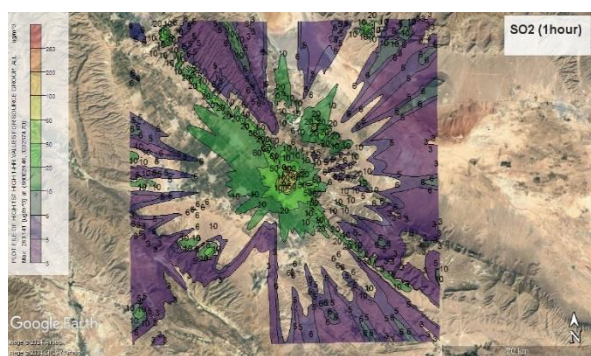
شکل ۳. طبقات ارتفاعی محدوده مورد پژوهش

(۳) ماژول اصلی AERMOD: مدل AERMOD یک مدل گوسی پخش و پراکنش آلاینده های گازی بوده

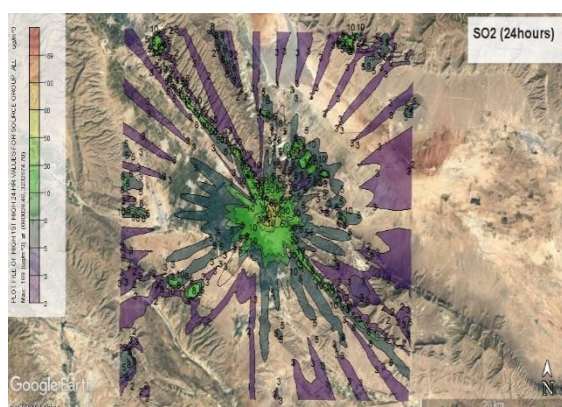
^۱ AMS EPA Regulatory Meteorological

^۲ AMS EPA Regulatory Map

شده است. بر اساس این شکل حداکثر غلظت برابر با ۲۶۳ میکروگرم بر مترمکعب خواهد بود؛ که در پیرامون مرز بلافصل رخ داده است. بر اساس استاندارد حداکثر غلظت یک ساعته مجاز برابر با ۱۹۶ میکروگرم بر مترمکعب است (جدول ۲). بنابراین گاز یک ساعته دی‌اکسید گوگرد از لحاظ حداکثر غلظت کمی بیش از حد استاندارد است. همچنین دامنه‌ی پراکنش و حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی‌اکسید گوگرد در حالت حداکثر در شکل ۵ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل حداکثر غلظت برابر با ۱۶۹ میکروگرم بر مترمکعب خواهد بود؛ که در پیرامون مرز بلافصل رخ داده است. بر اساس استاندارد حداکثر غلظت ۲۴ ساعته مجاز برابر با ۳۹۵ میکروگرم بر مترمکعب است (جدول ۲). بنابراین طرح مورد نظر از لحاظ حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی‌اکسید گوگرد کمتر از حد استاندارد است.



شکل ۴. حداکثر غلظت یک ساعته دی‌اکسید گوگرد در دودکش با ارتفاع ۶۳ متر



شکل ۵. حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی‌اکسید گوگرد در دودکش با ارتفاع ۶۳ متر

مدل‌سازی آلودگی ناشی از دودکش با ارتفاع ۱۱۰ متر (حداکثر ارتفاع سازه)

که رفتار توده حاوی آلاینده‌ها را بر مبنای حل معادلات پخش و پراکنش در حالت دائمی برای هر آلاینده به‌صورت جداگانه مدل‌سازی می‌کند. در نتیجه در این پژوهش میزان آلودگی هوا برای آلاینده SO_2 به‌صورت زیر محاسبه گردید:

$$E=Q \cdot C$$

$$Q=A \cdot S$$

در این رابطه E نرخ انتشار بر اساس واحد (گرم بر ثانیه)، Q دبی حجمی بر اساس واحد (مترمکعب در ثانیه)، C غلظت جرمی آلاینده بر اساس واحد (گرم بر مترمکعب)، A سطح مقطع بر حسب مترمربع و S خروجی بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.

مدل‌سازی آلودگی هوا با تغییر ارتفاع دودکش

بر اساس هدف اصلی این پژوهش، منبع انتشار آلاینده در مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد عبارت است از یک دودکش به ارتفاع ۶۳ متر که دارای قطر دهانه ۵۰۰ سانتیمتری می‌باشد. با توجه به نوع سازه رویکردهای معرفی شده فقط شامل تغییر ارتفاع دودکش است و سایر پارامترها کاملاً مشابه در نظر گرفته شد (جدول ۴). هم‌چنین ارتفاع بیش از ۱۱۰ متر بدون تغییر در سایر ویژگی‌های فیزیکی دودکش از جمله قطر دهانه آن میسر نمی‌باشد به‌همین دلیل ارتفاع نهایی ۱۱۰ متر برآورد شده است. از طرفی انتخاب اعداد ۹۷ و ۱۰۳ براساس آزمون خطا بوده که کمترین میزان آلودگی را با کمترین ارتفاع (هزینه ساخت کمتر) داشته باشد.

جدول ۴. انواع رویکردهای پیشنهادی تغییر ارتفاع دودکش

شماره رویکرد	ارتفاع دودکش	سایر مشخصات
۱	۶۳	مشابه
۲	۹۷	
۳	۱۰۳	
۴	۱۱۰	

یافته‌ها

مدل‌سازی آلودگی ناشی از دودکش با ارتفاع ۶۳ متر

متر (حداقل ارتفاع سازه)

دامنه‌ی پراکنش و حداکثر غلظت یک ساعته دی‌اکسید گوگرد در حالت حداکثر در شکل ۴ نمایش داده

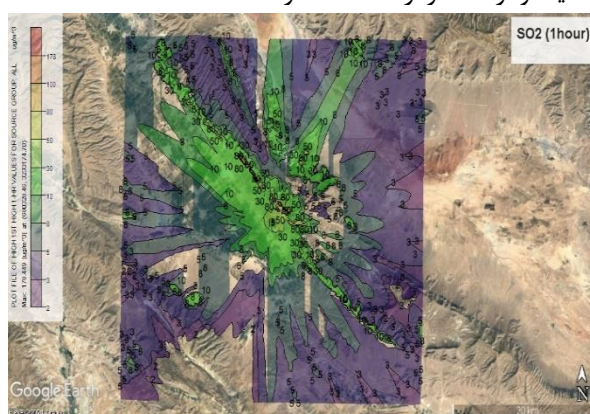
مقایسه نتایج مدل سازی آلودگی ناشی از دودکش در رویکردهای ارتفاعی متفاوت

بررسی شکل های ۴ تا ۷ نشان می دهد که افزایش ارتفاع دودکش نه تنها بر غلظت بیشینه، بلکه بر الگوی فضایی پراکنش SO_2 نیز تأثیر چشمگیری دارد. در ارتفاع ۶۳ متر (شکل ۴)، آلاینده در شعاع ۱/۵ کیلومتری دودکش متمرکز شده و دامنه پراکنش به دلیل اثر فروافکنی هوا^۱ محدود است. در مقابل، در ارتفاع ۱۱۰ متر (شکل ۶) پراکنش آلاینده تا شعاع ۳ کیلومتری گسترش یافته، اما با غلظت های یکنواخت تر که دارای شدت کمتر است. هم چنین جهت پراکنش در تمام رویکردها همسو با باد غالب شمال غربی است که نشان دهنده تأثیرپذیری شدید از الگوی جریان های هوایی منطقه می باشد.

همان طور که طبق نتایج مشاهده شد با ثابت ماندن سایر ویژگی های فیزیکی دودکش، ارتفاع آن از ۶۳ به ۱۱۰ متر افزایش پیدا کرد (۴۲٪ افزایش ارتفاع). این افزایش ارتفاع در حالت حداکثر غلظت یک ساعته دی اکسید گوگرد از ۲۶۳ میکروگرم بر مترمکعب به ۱۷۸ میکروگرم بر مترمکعب تقلیل پیدا کرد؛ به بیانی دیگر میزان غلظت آلاینده حدود ۳۲/۳۲٪ کمتر شده است. هم چنین در حالت حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی اکسید گوگرد از ۱۶۹ میکروگرم بر مترمکعب به ۱۱۵ میکروگرم بر مترمکعب تقلیل پیدا کرد؛ به بیانی دیگر میزان غلظت آلاینده حدود ۳۱/۹۵٪ کمتر شده است.

در جدول ۵ نیز میزان غلظت آلاینده دی اکسید گوگرد در حالت های یک و ۲۴ ساعته قابل مشاهده است. باتوجه به چهار مدل سازی انجام شده به نظر می رسد که در ارتفاع زیر ۱۰۳ متر دودکش میزان غلظت آلاینده در حالت یک ساعته بیش از حد مجاز اعلام شده توسط قانون هوای پاک در سال ۱۳۹۵ است. از طرفی میزان غلظت آلاینده ها در ارتفاع بیش از ۱۰۳ متر در حالت ۲۴ ساعته کمی افزایش می یابد. اما به نظر می رسد حداقل ارتفاع لازم برای رعایت قانون آلودگی هوا ۱۰۳ متر می باشد. هم چنین دلیل عدم ارتفاع بیشتر از ۱۱۰ متر محدودیت در ایجاد تغییر در سازه می باشد.

دامنه ی پراکنش و حداکثر غلظت یک ساعته دی اکسید گوگرد در حالت حداکثر در شکل ۶ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل حداکثر غلظت برابر با ۱۷۸ میکروگرم بر مترمکعب خواهد بود؛ که در پیرامون مرز بلافصل رخ داده است. بر اساس استاندارد حداکثر غلظت یک ساعته مجاز برابر با ۱۹۶ میکروگرم بر مترمکعب است (جدول ۲). بنابراین گاز یک ساعته دی اکسید گوگرد از لحاظ حداکثر غلظت کمتر از حد استاندارد است. هم چنین دامنه ی پراکنش و حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی اکسید گوگرد در حالت حداکثر در شکل ۷ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل حداکثر غلظت برابر با ۱۱۵ میکروگرم بر مترمکعب خواهد بود؛ که در پیرامون مرز بلافصل رخ داده است. بر اساس استاندارد حداکثر غلظت ۲۴ ساعته مجاز برابر با ۳۹۵ میکروگرم بر مترمکعب است (جدول ۲). بنابراین طرح مورد نظر از لحاظ حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی اکسید گوگرد کمتر از حد استاندارد است.



شکل ۶. حداکثر غلظت یک ساعته دی اکسید گوگرد در دودکش با ارتفاع ۱۱۰ متر



شکل ۷. حداکثر غلظت ۲۴ ساعته دی اکسید گوگرد در دودکش با ارتفاع ۱۱۰ متر

^۱ Downwash

جدول ۵. نتایج انواع رویکردهای پیشنهادی تغییر ارتفاع دودکش

شماره رویکرد	ارتفاع دودکش	حداکثر غلظت یک ساعته SO_2 بر حسب mg/m^3 (حداکثر مجاز 196 mg/m^3)	حداکثر غلظت ۲۴ ساعته SO_2 بر حسب mg/m^3 (حداکثر مجاز 395 mg/m^3)
۱	۶۳	۲۶۳	۱۶۹
۲	۹۷	۲۴۵	۱۳۷
۳	۱۰۳	۱۹۵	۱۰۳
۴	۱۱۰	۱۷۸	۱۱۵

بحث

یکی از اساسی‌ترین مشکلات آلودگی هوا این است که معمولاً مناطق وسیعی از کاربری‌های مختلف هم‌چون شهرها و محصولات کشاورزی را در صدها کیلومتر از منشأ تولید آلاینده‌ها تحت تأثیر خود قرار داده و یا موجب اثرات تجمعی با دیگر صنایع شده است (۳۰). آلودگی هوای حاصل از صنایع از راه‌های مختلفی بر کشاورزی تأثیر می‌گذارد. SO_2 تولیدی کارخانه‌ها می‌تواند رشد و عملکرد محصولات محلی و سبزیجات را کاهش دهد. هم‌چنین مونوکسیدکربن، متان، مواد آلی فرار و اکسید نیتروژن از دیگر آلاینده‌های مهم مرتبط با صنعت هستند که تلفات قابل توجهی در کشاورزی ایجاد می‌کنند (۳۱ و ۳۲). توجیه آلودگی هوای صنایع در برابر سود اقتصادی کوتاه مدت، هزینه زیادی برای محیط‌زیست به‌همراه داشته است که این خسارات شامل تأثیر منفی بر محصولات کشاورزی نیز می‌شود؛ برای نمونه در مناطق مختلف شهر پکن در کشور چین آلودگی حاصل از صنایع باعث شده است که تولید گندم در این شهر بین ۶ تا ۱۵ درصد کمتر از حالت قبل شود (۳۳). در مطالعه‌ی دیگری که در کشور چین انجام شده است محققان با بررسی تأثیر آلودگی هوای حاصل از ۲۰۶۹ کارخانه‌ی آلوده‌کننده‌ی هوا به این نتیجه رسیدند که هزینه تلفات کشاورزی به-دلیل آلودگی هوا ۱/۴۳ میلیارد دلار آمریکا بوده است (۳۴). باید در نظر داشت که جوامع انسانی امروزی هم به صنایع بزرگ نیاز داشته، هم به شهرها جهت سکونت وابستگی دارد و هم به زمین‌های کشاورزی جهت تولید غذا نیازمند است. اگر هرکدام از این کاربری‌ها به‌صورت منطقی و خردمندانه مکان‌یابی شده باشند، محصولات کشاورزی حداقل اثرات منفی را از بخش صنعت دریافت خواهند کرد. به‌طورکلی، این مطالعات نشان داده‌اند که توجه و شناخت وضعیت آلودگی هوای در گام اول و

سپس ایجاد راهبرد برای کاهش آلودگی حاصل از صنایع در گام دوم بسیار ضروری است؛ که موضوع اصلی این پژوهش نیز بر همین راهبرد استوار بود. شهرها و روستاها جزو بیشترین بخش‌های محیط‌زیست انسانی هستند که از آلودگی هوا تأثیر پذیرفته‌اند. آلودگی هوا موجب اثرات منفی متعدد و انواع بیماری‌ها مانند کاهش عملکرد ریه در اثر قرار گرفتن در معرض $\text{PM}_{2.5}$ و NO_x حاصل از صنایع می‌شود. هم‌چنین مطالعات ثابت کرده است که قرار گرفتن در معرض $\text{PM}_{2.5}$ موجب آسم و سرفه خشک نیز می‌شود (۳۵ و ۳۶). تأثیر سلامتی و هزینه‌های مربوط به آلودگی هوای ناشی از ذرات $\text{PM}_{2.5}$ در پایتخت ایران در سال ۲۰۱۷ برآورد شده است. در این مطالعه، علاوه بر میزان مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی هوای محیط در تهران، تأثیر اقتصادی مرتبط با این اثرات نیز تخمین زده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش از ۷۰۰۰ کشته یا ۱۰۰۰۰۰ سال زندگی از دست رفته است؛ و هزینه اقتصادی مربوط به آن حدود ۳ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۷ بوده است. استراتژی‌های قاطع و پایدار کاهش آلودگی هوا می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در هر دو بخش سلامت و اقتصاد به‌همراه داشته باشد که بدون توجه متمرکز در سطح دولت و سیاست‌گذاران مسئول قابل دستیابی نیست (۳۷). بنابراین، اکثر مطالعات نشان داده‌اند که آلودگی هوای ناشی از صنایع نقش بسیار مهمی در ایجاد این بیماری‌ها داشته‌اند و در نتیجه شناخت برای کاهش اثرات آن‌ها امری بسیار مهم در ایجاد توسعه پایدار تلقی می‌شود؛ که در این پژوهش به ایجاد راهکار عملی برای کاهش اثرات آلودگی هوای ناشی از صنایع پرداخته شد.

نقاط قوت و محدودیت‌های مطالعه: این مطالعه با برخی محدودیت‌های مهم همراه بوده است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. اصلی‌ترین چالش، عدم امکان

متر تعیین شد که می‌تواند به‌عنوان معیاری برای طراحی دودکش‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که تغییر ارتفاع دودکش به‌تنهایی می‌تواند یک راهکار کم‌هزینه و عملی برای کاهش مواجهه جوامع پیرامونی با آلاینده SO_2 باشد. با این حال، برای دستیابی به نتایج بهینه‌تر، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده تأثیر ترکیبی ارتفاع دودکش با سایر پارامترهای فیزیکی مانند قطر دهانه، سرعت خروج گاز و دمای گازهای خروجی را بررسی کنند. هم‌چنین، اعتبارسنجی تجربی این یافته‌ها از طریق ساخت نمونه‌های آزمایشی و پایش میدانی می‌تواند به افزایش دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. این پژوهش گامی مهم در جهت توسعه راهکارهای مهندسی برای کنترل آلودگی هوا در صنایع انرژی‌بر مانند ذوب آهن محسوب می‌شود و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه محیط زیست قرار گیرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله از تمام افرادی که در سازمان محیط زیست در زمینه جمع‌آوری داده به تیم ما کمک کرده‌اند، نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: این مقاله حاصل پژوهش دانشجویان و کارشناسان سازمان محیط زیست بوده و نویسندگان از عوامل سازمان محیط زیست کمال تشکر و قدردانی را دارند.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان این مقاله تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

سهم نویسندگان: تمام نویسندگان به‌طور یکسان در اجرا و انجام تحقیق مشارکت داشته‌اند و پژوهش حاضر را مطالعه و تأیید نموده‌اند.

References

1. Azmoun M, Mohammadnejad M. Assessing the impact of industrial areas on urban air pollution (case study: Tabriz metropolis). Quarterly Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies 2013; 4(4): 66-54. (Persian)
2. Makhdoom M. The Foundation of Land Planning. 13th ed. Tehran: Tehran University Press.; 2012. P. 213-276. (Persian)
3. Shahpari S, Eversole R. Planning to 'Hear the Farmer's Voice': an Agent-Based Modelling Approach to Agricultural Land

انجام اعتبارسنجی تجربی مستقیم برای رویکردهای مختلف ارتفاعی بود، چرا که تغییر ارتفاع دودکش در مقیاس واقعی نیازمند اجرای پروژه‌های پرهزینه ساخت و بهره‌برداری می‌باشد. این محدودیت باعث شد پژوهش حاضر صرفاً بر مدل‌سازی عددی تکیه کند که اگرچه از روش‌های علمی معتبری استفاده شده، اما ممکن است با شرایط عملی تفاوت‌هایی داشته باشد. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هواشناسی، اثرات متقابل با سازه‌های مجاور و خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری پارامترهای ورودی است. علاوه بر این، تحقیق حاضر صرفاً بر تغییر ارتفاع دودکش متمرکز بوده و اثرات ترکیبی تغییر همزمان سایر پارامترهای فیزیکی مانند قطر دهانه و سرعت خروج گاز را در نظر نگرفته است. این موضوع می‌تواند زمینه‌ای برای مطالعات آتی باشد تا با در نظر گرفتن تأثیر متقابل این پارامترها، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های کنترل آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد.

این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار AERMOD نشان داد که افزایش ارتفاع دودکش از ۶۳ به ۱۱۰ متر (معادل ۴۲٪ افزایش) می‌تواند به کاهش ۳۲ درصدی غلظت آلاینده SO_2 در سطح زمین منجر شود. این بهبود نه تنها در مقادیر حداکثر غلظت یک‌ساعته (از ۲۶۳ به ۱۷۸ میکروگرم بر مترمکعب) و ۲۴ ساعته (از ۱۶۹ به ۱۱۵ میکروگرم بر مترمکعب) مشاهده شد، بلکه در الگوی پراکنش فضایی آلاینده نیز تأثیر چشمگیری داشت. با افزایش ارتفاع، شعاع مؤثر پراکنش از ۱/۵ به ۳ کیلومتر گسترش یافت و تمرکز آلاینده در نزدیکی منبع به‌طور محسوسی کاهش پیدا کرد. حداقل ارتفاع مؤثر برای دستیابی به استانداردهای کیفی هوا در این مطالعه ۱۰۳

4. Use Planning. Appl. Spatial Analysis 2024; 17:138–115. [Doi:10.1007/s12061-023-09538-7](https://doi.org/10.1007/s12061-023-09538-7).
5. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, World Health Organization. 2022; [20 screens] Availabel at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>. Accessed April 3, 2025.
6. United States Environmental Protection Agency, Air pollution modeling. 2023; [6 screens] Availabel at: <https://www.epa.gov/air-research/air-pollution-modeling>. Accessed April 6, 2025.
7. Abbaspour M. Air Pollution Modeling. 1th ed. Tehran: Sharif University of Technology Scientific Publishing Institute; 2011. P. 200-450. (Persian)
8. Gronoff G, Arras P, Baraka S, Bell J, Cessateur G, Cohen O, Moore B. Atmospheric escape processes and planetary atmospheric evolution. Journal of Geophysical Research: Space Physics 2020; 125(8): 39-27. [Doi:10.1029/2019JA027639](https://doi.org/10.1029/2019JA027639).
9. Rawan M, Madadi H, Sabzqabaei G. Assessing the impact of hospital sites on sulfur dioxide and nitrogen dioxide gas pollutants from the Abadan Oil Refinery using the CALPUFF model in 2018: A descriptive study. Scientific Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences 2019; 19(10): 1088-1071. (Persian) [Doi: 10.29252/jrums.19.10.1071](https://doi.org/10.29252/jrums.19.10.1071).
10. Peykanpour Fard R, Moradi H, Lotfi A, Pourmanafi S. Advancing the mapping of optimal land use structure in industrialized areas: incorporating AERMOD modeling and MCE approach. GeoJournal 2023; 88:1995–1979. [Doi:10.1007/s10708-022-10716-2](https://doi.org/10.1007/s10708-022-10716-2).
11. Kalhor M, Qale-Asgari S, Bozorgi M. Performance of AERMET Preprocessor in Calculating Boundary Layer Parameters and Investigating Its Effect on Carbon Monoxide Concentration Outputs in the AERMOD Model in Comparison with Upper Atmosphere Data. Quarterly Journal of Health and Environment 2018; 11(3): 376-365. (Persian)
12. Gargiulo M, Chiodi A, De Miglio, R, Simoes S, Long G, Pollard M, Gouveia JP, Giannakidis G. An integrated planning framework for the development of sustainable and resilient cities—the case of the InSMART project. Procedia engineering 2017; 198: 453-444. [Doi:10.1016/j.proeng.2017.07.099](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.099).
13. Saeedi A. Structural-Functional Dynamics: An Alternative Approach in Spatial Planning. Quarterly Journal of Spatial Economics and Rural Development 2012; 1(1): 18-1. (Persian)
14. Arefiev N, Terleev V, Badenko V. GIS-based fuzzy method for urban planning. Procedia Engineering 2015; 117(1): 44-39. [Doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.121](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.121).
15. Khavarian-Garmsir A, Rezaei M. Selection of appropriate locations for industrial areas using GIS-fuzzy methods. A case study of Yazd Township, Iran. Journal of Settlements and Spatial Planning 2015; 6(1): 25-19. [Doi:10.1016/j.seps.2020.100860](https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100860).
16. kuo Y, Lu S, Tzeng G, Lin Y, Huang Y. Using fuzzy integral approach to enhance site selection assessment—a case study of the optoelectronics industry. Procedia Computer Science 2013; 17: 313-306. [Doi:10.1016/j.procs.2013.05.040](https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.040).
17. Al-Maliki M, Al-Easawi N. The Efficiency of the Eucalyptus sp. Plant in Absorbing Pollutants Results from Vehicle Exhausts in the Baghdad City. Diyala Agricultural Sciences Journal 2024;16(1): 136-125. [Doi:/10.52951/dasj.24160111](https://doi.org/10.52951/dasj.24160111).
18. Najafi E, Shali M. The Place of Environmental Studies in Iranian Spatial Planning - A Case Study: Regional Physical Plan and Provincial Planning Program. "Sepehr" Scientific-Research Quarterly Journal of Geographic Information 2003; 32(128): 174-159. (Persian) [Doi:10.22131/sepehr.2023.1986896.2942](https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.1986896.2942).
19. Yazdani M, Farzaneh Sadat Zaranji Z. Optimal Location of Physical Expansion of Sardasht City Using Hybrid Methods

- and Fuzzy Network Transfer Process of Spatial Information System. Quarterly Journal of Disaster Prevention and Management Knowledge 2003; 13(4): 489-479. (Persian)
20. El Baroudy A. Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. Catena 2016; 140: 140-96. [Doi:10.1016/j.catena.2015.12.010](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.010).
21. Faraji A, Sahneh F. Evaluating the Ecological Potential of Land in Golestan Province for the Development of Agricultural Land Uses with a Land Management Approach. Scientific Journal "Land Management" 2010; 12(2): 253-247. (Persian) [Doi:10.22059/jtcp.2020.294811.670053](https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.294811.670053).
22. Shokrian F, Soleimani K. Land use changes based on satellite images in the Haraz Plain. Iranian Journal of Remote Sensing and GIS 2014; 16(1): 128-113. (Persian) [Doi:10.48308/gisj.2023.232979.1176](https://doi.org/10.48308/gisj.2023.232979.1176)
23. Memarbashi E, Azadi H, Barati A, Mohajeri F, Passel S, Witlox F. Land-use suitability in Northeast Iran: application of AHP-GIS hybrid model. ISPRS International Journal of Geo-Information 2017; 6(12): 410-396. [Doi:10.3390/ijgi6120396](https://doi.org/10.3390/ijgi6120396).
24. Akomolafe O, Olorunsogo T, Anyanwu E, Osasona F, Ogugua J, Daraojimba O. Air quality and public health: a review of urban pollution sources and mitigation measures. Engineering Science & Technology Journal 2024; 5(2): 271-259. [Doi:10.51594/estj.v5i2.751](https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.751).
25. Sarwar M, Maqbool A. Causes and control measures of urban air pollution in China. Environment & Ecosystem Science (EES) 2019; 3(1): 36-35.
26. Peykanpourfard R, Moradi H, Lotfi A, Pourmanafi S. Integrating air pollution mapping into land use planning. Research sample: Mobarakeh County. Geography and Environmental Planning 2012; 32(2): 66-45. (Persian) [Doi: 10.22108/GEP.2021.126855.1393](https://doi.org/10.22108/GEP.2021.126855.1393).
27. Xia H, Yuan S, Prishchepov A. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial
28. planning and management. Resources, Conservation and Recycling 2023; 189: 76-67. [Doi:10.1016/j.resconrec.2022.106767](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106767).
29. Statistical Yearbook of Isfahan Province. Fars Province Management and Planning Organization (Deputy of Statistics and Information). 2016; [77 screens] Availabel at: <https://amar.org.ir/salnamehamari/agentType/ViewType/PropertyTypeID/2095>. April 10, 2025.
30. Hoffmann, B. Air pollution in cities: Urban and transport planning determinants and health in cities. In Integrating Human Health into Urban and Transport Planning 2018; 40: 441-425. [Doi:10.1007/978-3-319-74983-9-21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74983-9-21).
31. Shaikh K, Imran U, Khan A, Khokhar W, Bakhsh H. Health risk assessment of emissions from brick kilns in Tando Hyder, Sindh, Pakistan using the AERMOD dispersion model. SN Applied Sciences 2020; 2: 11-1. [Doi:10.1007/s42452-020-3089-1](https://doi.org/10.1007/s42452-020-3089-1).
32. Taherpour Mansour M, Kalantari A. Investigating the social processes of environmental pollution and agricultural activities (an analysis on the normalization of the consequences of chemicals in agriculture). Society and Environment 2014; 1(1): 19-1. (Persian) [Doi:10.22080/jsn.2024.4945](https://doi.org/10.22080/jsn.2024.4945).
33. Ahmadi Moghadam E, Tondro H, Zarinpour M, Fakhreddin V. The function of spatial planning in economic defense with emphasis on population. Strategic Defense Studies 2013; 22(96): 46-25. (Persian)
34. Wang X, Manning W, Feng Z, Zhu Y. Ground-level ozone in China: distribution and effects on crop yields. Environmental Pollution 2007; 147(2): 400-394. [Doi:10.1016/j.envpol.2006.05.006](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.006).
35. Zhang Q, Wang K. Evaluating production risks for wheat producers in Beijing. China Agricultural Economic Review

- 2010; 2(2): 211-200.
[Doi:10.1108/17561371011044306](https://doi.org/10.1108/17561371011044306).
36. Wei J, Guo X, Marinova D, Fan J. Industrial SO₂ pollution and agricultural losses in China: evidence from heavy air polluters. *Journal of Cleaner Production* 2014; 64: 413-404.
[Doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.027](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.027).
37. Bergstra A, Brunekreef B, Burdorf A. The effect of industry-related air pollution on lung function and respiratory symptoms in school children. *Environmental Health* 2018; 17(1): 9-1.
[Doi:10.1016/j.envres.2019.108547](https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108547).
38. Peykanpourfard R, Peykanpourfard P, Hadian-Qahdrijani H. Investigation and quantification of air pollution distribution from industrial chimneys using AERMOD software in the southwest of Bandar Abbas city. *Journal of Research in Environmental Health* 2023; 9(3): 337-325. (Persian) [Doi: 10.22038/jreh.2023.66934.1536](https://doi.org/10.22038/jreh.2023.66934.1536).
39. Bayat R, Ashrafi K, Motlagh M, Hassanvand M, Daroudi R, Fink G, Künzli N. Health impact and related cost of ambient air pollution in Tehran. *Environmental research* 2019; 176: 12-1.