

پایداری، توسعه و محیط زیست، دوره دوم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صص ۹۳-۱۰۷

مدلسازی تحلیل خسارات دی اکسید گوگرد خروجی از نیروگاه‌ها بر سازه های

شهری قزوین (مطالعه موردی: نیروگاه شهید رجائی)

الهام مجاور^۱

فرامرز معطر^{۲*}

faramarzmoatar@gmail.com

سهیل سبحان اردکانی^۳

سید علی جوزی^۴

سید مسعود منوری^۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

چکیده:

زمینه و هدف: در این پژوهش، یک مدل برای محاسبه اثرات و پیامدهای فیزیکی-اقتصادی ناشی از آلاینده‌های منتشره از نیروگاه‌ها بر ابنیه شهری توسعه داده شد. برای مطالعه موردی اثر آلاینده دی اکسید گوگرد ناشی از نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجائی روی نماهای بناهای شهری شهر قزوین مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: برای توسعه این مدل، از مدل دود گوسی جهت محاسبه پراکنش آلودگی هوا و از توابع غلظت-عملکرد با بهره‌گیری از روش IPA به منظور محاسبه هزینه‌های ناشی از آلودگی استفاده شده است. به منظور محاسبه میزان خسارت وارده ناشی از آلاینده دی اکسید گوگرد بر بناهای شهری، به واسطه افزایش خوردگی مصالح ساختمان و خاک گرفتگی و به تبع آن افزایش هزینه شستشو، بر هر متر از بر پایه نوع نمای بناهای شهری، تمام هزینه‌ها بومی‌سازی شد. پس از صحت‌سنجی نتایج خروجی مدل توسعه داده شده، هزینه‌های خارجی بر اساس نوع بناهای شهری، سرعت باد، و کلاس پایداری مختلف جوی محاسبه شد. کلاس‌های پایداری مختلف جوی بر اساس طبقه‌بندی کلاسیک پاسکیل-گیفورد (P-G) تعیین شد.

۱- دانشجوی دکتری ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- دکترای تخصصی شیمی هسته‌ای، استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (مسوول مکاتبات)

۳- استاد گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۴- دکتری تخصصی ارزیابی و آمایش سرزمین، استاد، دانشکده علوم و فنون دریایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۵- دکتری تخصصی علوم محیط‌زیست، دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۶- Exposure response function

یافته‌ها: بر اساس نوع بناهای شهری، بیشترین هزینه خارجی مربوط به نمای سیمان سفید ۳۶۵۷۵ دلار معادل ۸۴۹ میلیون ریال برآورد شد. برای نمای کاهگلی که مصالح بومی منطقه است هزینه خارجی برابر ۵۳۷۶ دلار معادل ۱۲۴۷ میلیون ریال تخمین زده شد. بر اساس سرعت باد، بیشترین هزینه‌های خارجی برای باد با سرعت ۱ متر بر ثانیه هزینه خارجی به‌میزان ۱۳۹۰۲۶ دلار معادل ۳۲۲۵۴ میلیون ریال و کمترین هزینه خارجی در سرعت باد با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه با مقدار ۳۵۲ دلار معادل ۸۲ میلیون ریال به‌دست آمد. از دیدگاه کلاس پایداری پاسکیل-گیفورد، کمترین هزینه خارجی در کلاس به شدت ناپایدار (A) و بیشترین هزینه خارجی در کلاس خنثی (D) برآورد شده‌است. هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده دی‌اکسید گوگرد برای شهر قزوین، به ازای هر مگاوات ساعت برق تولیدی ۰,۰۰۹ دلار (۲۱۶۲ ریال) محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد مصالح سازگار با منطقه، بومی و دارای ریشه در فرهنگ آن منطقه می‌تواند هزینه‌های خارجی به‌مراتب کمتری در مقایسه با مصالح جدید داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خسارت، SO₂، هزینه خارجی، نمای ساختمان

**Full title: Modeling for Estimation of the Damage Posed by SO₂
Emitted from Power Plants on Qazvin Urban Structures
(Case Study: Shahid Rajae Power Plant)**

Elham Mojaver ^١

Faramarz Moattar ^{٢*}

faramarzmoatar@gmail.com

Soheil Sobhanardakani ^٣

Seyed Ali Jozi ^٤

Seyed Masoud Monavari ^٥

Received: February 15, 2022

Accepted: June 29, 2022

Abstract

Background and Objective: In this study, a model for measuring the effects and the physical-economic consequences of air pollutants emitted from Power Plants on urban buildings facades was developed. For the case study, the effect of SO₂ pollutant emitted from Rajae Combined-cycle Power Plant on Qazvin's buildings' facades was studied.

Methods and materials: To develop this model, the Gaussian plume method was used to estimate the air pollution dispersion and impact pathway assessment (IPA) to calculate the air pollutant external costs. The damage costs of SO₂ due to the corrosion of building materials, soiling, and consequently an increase in cleaning expenses of each square meter of urban buildings' facades were localized. After the validation of the output results of the developed model, the external costs based on the wind speed and different atmospheric stability classification were estimated. Different atmospheric stability classes were examined using the Pasquil-Gifford (P-G) classification.

Findings: Based on the facade's material, the highest external costs were related to the white cement with 36575 dollars (849 million Rials). For the thatch façade, which is the local material of the region, the external cost was estimated to be 5376 dollars (1247 million Rials).

Based on the wind speed, the highest external cost was obtained for the wind 1m/s with 139026 dollars (3254 million Rials) and the lowest cost was 352 dollars (82 million Rials) for the wind speed of 20 m/s.

For the atmospheric stability classification, the lowest external cost in extremely unstable class (A) and the highest external cost in neutral class (D) have been measured. The external cost due to the

^١- Ph.D. student in Environmental Assessment & Land use Planning, College of natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^٢- Ph.D. in Nuclear chemistry, professor, College of natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran *(Corresponding Author)

^٣- Professor, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

^٤- Ph.D. in Environmental Assessment & Land use Planning, professor, College of Marine Science and Technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^٥- Ph.D. in Environmental Science, Associate Professor, College of natural resources and environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

SO₂ pollutants for the city of Qazvin was 0.009 dollars (2162 Rials) For each megawatt-hour generated electricity.

Conclusion: The results showed that the materials compatible with the local region can have lower external costs compared with the new materials used in the buildings.

Keywords: damage analysis, SO₂, combined cycle power plant, external cost, building facade

مواد و روش ها:

محاسبه غلظت

در این پژوهش برای محاسبه میزان غلظت دی اکسید گوگرد ناشی از منبع انتشار دودکش در فواصل مختلف، از رابطه گوسی نشان داده شده در معادله (۱) استفاده شده است (۴، ۶، ۱۵):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{[H+z]^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

است (۷، ۱۶). برای محاسبه میزان انتشار از دودکش نیز از معادله (۲) استفاده شده است:

$$Q = CF v \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

کامپوزیت برجسته شهری، از تابع ریاضی در معادله (۳) به شرح زیر استفاده شده است (۱۵، ۱۷):

$$\text{composite ERF slope} = (CSO_{2,back} \exp[0.018 RH_{back} + b(T_{back} - 10)]) / \tau^{0.15} \quad (3)$$

مختلف ساختمانی به عنوان تابعی از زمان ارائه می شوند (۱۲). از این رو، این تلفات باید به فرکانس های تعمیر یا تعویض تبدیل شوند که این زمان، برای کامپوزیت برجسته، سنگ آهک و سنگ طبیعی، به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۲ و ۱۵ سال در نظر گرفته می شود (۱۸).

در این پژوهش، به منظور محاسبه تابع مواجهه برای سنگ های آهکی، ماسه سنگ و نماهای رنگی، به ترتیب از معادلات ۴ تا ۶، به شرح زیر استفاده شده است (۴، ۶، ۲۱):

انتخاب و یک مدل جدید یکپارچه بر اساس روش IPA، توسعه و معرفی شد که برای توسعه مدل و همچنین برآورد تأثیرات آلاینده مزبور و هزینه های خارجی ناشی از آن، محیط نرم افزار Matlab مورد استفاده قرار گرفت.

در این معادله، u سرعت باد در جهت وزش باد، C غلظت در نقاط x, y, z ، انتشار آلاینده، Q پراکنش انتشار در انحراف استاندارد عمودی و افقی، و H ارتفاع موثر دودکش

در این معادله، CF ضریب انتشار آلاینده SO_2 ، v سرعت دود خروجی از دودکش، و D قطر دودکش است.

برآورد خسارات

به منظور برآورد خسارات ناشی از آلاینده SO_2 بر نماهای

در این معادله، $CSO_{2,back}$ میزان غلظت دی اکسید گوگرد در محیط بر حسب میلی گرم بر متر مکعب، RH_{back} میانگین رطوبت محیط بر حسب درصد، T_{back} میانگین دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد، τ زمان تعمیرات و نگهداری بر حسب نوع مصالح در سال است. توابع مواجهه (ERF^۱)، روابطی غیرخطی هستند که به شدت به دمای زمینه، رطوبت نسبی محیط و غلظت دی اکسید گوگرد وابسته اند که مدت زمان تأثیر غلظت دی اکسید گوگرد برای مصالح گوناگون، متغیر است. توابع مواجهه بر حسب کاهش ضخامت مصالح

$$\text{Limestone ERF slope} = (3.4 \times 10^{-4} C_{\text{SO}_2 \text{ back}}^{-0.52} \exp[-0.0018 T_{\text{back}}]) / \tau^{0.04} \quad (۴)$$

$$\text{sandstone ERF slope} = \begin{cases} (2.9 \times 10^{-4} C_{\text{SO}_2 \text{ back}}^{-0.48}) / \tau^{0.09} & T_{\text{back}} < 10 \\ (2.9 \times 10^{-4} C_{\text{SO}_2 \text{ back}}^{-0.48} \exp[-0.013(T_{\text{back}} - 10)]) / \tau^{0.09} & T_{\text{back}} \geq 10 \end{cases} \quad (۵)$$

$$\text{painted surface ERF} = 24 \times 10^{-4} (1 - \exp[-(0.121 RH_{\text{back}}) / (100 - RH_{\text{back}})]) \quad (۶)$$

در نهایت، هزینه خسارت آلاینده SO₂ بر نماهای بناهای شهری، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود (۲۲).

$$\text{Damage Cost} = U_v \times \sum_{\text{over all cells}} \text{Exposed surface} \times \text{ERF} (C_{\text{SO}_2 \text{ back}}, T_{\text{back}}, RH_{\text{back}}, \tau) \times C_{\text{regional}} \quad (۷)$$

دی اکسید گوگرد ناشی از نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین بر بناهای شهری قزوین در نظر گرفته شد. نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی قزوین، با ظرفیتی معادل ۱۰۴۲ مگاوات، در کیلومتر ۲۵ بزرگراه قزوین- تهران در طول شرقی " ۴۷، ۱۷، ۵۰° و عرض شمالی " ۳۳، ۰۹، ۳۶° واقع شده و در فاصله ۳۰ کیلومتری شهر قزوین قرار دارد. برای تعیین ارتفاع طبقات، مساحت نماها و نوع جنس نما در محدوده مورد مطالعه در شهر قزوین، از طرح های جامع و تفصیلی سال ۱۳۹۴ استان قزوین استفاده شد (۲۳). میزان خسارات وارده ناشی از آلاینده دی اکسید گوگرد بر نمای ساختمان های شهری پس از بومی کردن هزینه ها با استفاده از فهرست بها سازمان برنامه و بودجه برای بازسازی هر مترمربع نما، با احتساب هزینه های خرید مصالح و هزینه نصب محاسبه شده است (۲۴). برای تعیین انتشار دی اکسید گوگرد خروجی از دودکش نیروگاه، از نتایج خود اظهاری آنالیز گازهای محیطی استفاده شده است. مشخصات دودکش، دود خروجی و میانگین نرخ انتشار دی اکسید گوگرد مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است (۱۸).

در این رابطه، U_v نمایشگر هزینه های نگهداری هر متر مربع مصالح بر حسب دلار بر متر مربع، Exposed surface سطح مصالح در معرض بر حسب متر مربع، $C_{\text{SO}_2 \text{ back}}$ غلظت پیش زمینه دی اکسید گوگرد بر حسب میلی گرم بر متر مکعب، همچنین RH_{back} میانگین رطوبت بر حسب درصد، T_{back} میانگین دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد، τ زمان تعمیرات و نگهداری مصالح بر حسب سال و C_{regional} غلظت منطقه ای SO₂ بر حسب میکروگرم بر متر مکعب است. از آنجایی که اثر آلاینده ها بر سازه های شهری بلند مدت است، برای محاسبه غلظت آلاینده پیش زمینه محیط $C_{\text{SO}_2 \text{ back}}$ میانگین غلظت ۱۵ ساله در نظر گرفته شده است که از داده های غلظت SO₂ ایستگاه قزوین به دست آمده است. بازه های تعمیر و نگهداری معمولاً با استفاده از ارزیابی داده های رفتار مصالح در ساختمان در برابر آلاینده، رطوبت و دما بر اساس برنامه همکاری بین المللی بررسی اثرات روی مصالح ساختمانی (ICP Materials^۱) تعیین می شود (۱۹، ۲۰). در این تحقیق همانگونه که اشاره شد ۱۰، ۱۲ و ۱۵ سال بر حسب نوع مصالح در نظر گرفته شده است.

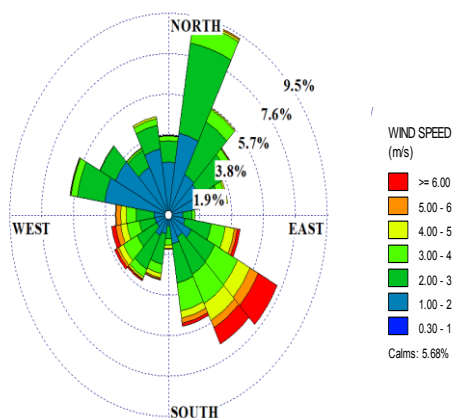
مطالعه موردی

در این پژوهش، برای مطالعه موردی تأثیر انتشار آلاینده

و میزان هزینه‌های خارجی بر اساس طبقه‌بندی کلاس‌های پایداری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین کلاس پایداری در منطقه از طبقه‌بندی کلاسیک (P-G) استفاده شد که شامل شش کلاس به‌شدت ناپایدار (A)، متوسط ناپایدار (B)، کمی ناپایدار (C)، خنثی (D)، کمی پایدار (E)، و متوسط تا شدیداً پایدار (F) در طبقه‌بندی P-G است (۲۹). جدول ۲ سرعت‌های باد متناظر با هر کلاس، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱ گلباد ۱ ساله منطقه مورد نظر را بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهید رجائی که در این پژوهش استفاده شده‌است نشان می‌دهد.

جدول ۲- سناریوهای مربوی به سرعت باد

سرعت باد (متر بر ثانیه)	کلاس های پایداری P-G
۱۰ متر بر ثانیه	کلاس به‌شدت ناپایدار (A)
۸ متر بر ثانیه	کلاس متوسط ناپایدار (B)
۶ متر بر ثانیه	کلاس کمی ناپایدار (C)
۴ متر بر ثانیه	کلاس خنثی (D)
۳ متر بر ثانیه	کلاس کمی پایدار (E)
۲ متر بر ثانیه	کلاس متوسط پایدار (F)



شکل ۱- گلباد سالانه ایستگاه سینوپتیک شهید رجائی

شکل ۱ نشان می‌دهد باد غالب منطقه بر اساس گلباد از سمت

جدول ۱- مشخصات دودکش نیروگاه شهید رجائی

مشخصات	واحد	مقدار
قطر دودکش	متر	۴,۵
ارتفاع دودکش	متر	۴۰
تعداد دودکش	عدد	۶
سرعت دود خروجی از دودکش	متر/ثانیه	۲۵,۱۹
دمای گازخروجی از دودکش	کلوین	۴۰۰,۳
میانگین دمای محیط	کلوین	۲۸۸,۸
میانگین سرعت باد	متر/ثانیه	۳,۲
نرخ انتشار دی اکسید گوگرد	گرم/ثانیه	۵۲۲,۵

سوخت‌های مصرفی در واحدهای چرخه ترکیبی به ترتیب اولویت شامل گاز طبیعی در اکثر فصول و گازوئیل در فصول سرد است. بنابراین برای تعیین نرخ انتشار سالانه در بازه زمانی مزبور هر دو سوخت در نظر گرفته شده‌است. در نتیجه میانگین انتشار گاز دی‌اکسید گوگرد معادل با ۵۲۲,۵ گرم بر ثانیه برآورد شده‌است. این محاسبات متعلق به بازه زمانی منتهی به سال ۱۳۹۷ بوده است. برای محاسبات ابتدا داده‌های مربوط به هر دودکش جداگانه در مدل توسعه‌یافته وارد می‌شوند از این رو برای هر دودکش نرخ انتشار، قطر دودکش، ارتفاع دودکش و دمای خروجی دودکش به صورت مجزا به مدل داده می‌شود و در نهایت اثر تجمعی آن‌ها محاسبه می‌گردد. در این پژوهش، نسبت هزینه‌های خارجی آلاینده دی‌اکسید گوگرد با عمده مصالح ساختمانی به کار رفته در نما برای ایران (شهر قزوین) با استفاده از طرح جامع و تفصیلی برای مساحت حدود ۲۸۲۶ کیلومتر مربع (معادل ۲۸۲۶۰۰ هکتار) محاسبه شده‌است (۲۴). (۲۵).

سرعت باد و کلاس‌های پایداری جوی پاسکیل-گیفورد

پژوهش‌ها نشان می‌دهد سرعت باد در تشکیل ارتفاع اختلاط که می‌تواند در پراکنش آلاینده مؤثر باشد نقش دارد (۲۶، ۲۷، ۲۸). از این رو، در این پژوهش میزان هزینه‌های خارجی در سرعت‌های مختلف باد به‌منظور نگاه دقیق‌تر به نقش پارامتر هواشناسی در محاسبه هزینه خارجی بررسی شد

یافته‌ها

صحت‌سنجی مدل توسعه داده‌شده

از آنجایی که مدل توسعه داده‌شده در این مقاله بر پایه مدل Airpacts و هدف ارتقا و به‌روزرسانی برپایه قیمت‌های موجود در ایران و رفع کاستی‌های مدل Airpacts بوده است، به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل توسعه داده‌شده از مدل نتایج خروجی مدل Airpacts استفاده شده است. بدین منظور، یک مطالعه موردی مشابه با هر دو مدل اجرا شد و با استفاده از ضرایب قیمتی مدل Airpacts، نتایج پارامترهای یکسان در هر مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با توجه به اینکه مدل توسعه داده‌شده در این مقاله بر پایه مدل Airpacts است پس باید انتظار داشت نتایج هر دو مدل به هم نزدیک باشد و اینگونه می‌توان از درستی نتایج مدل توسعه‌داده‌شده اطمینان حاصل کرد.

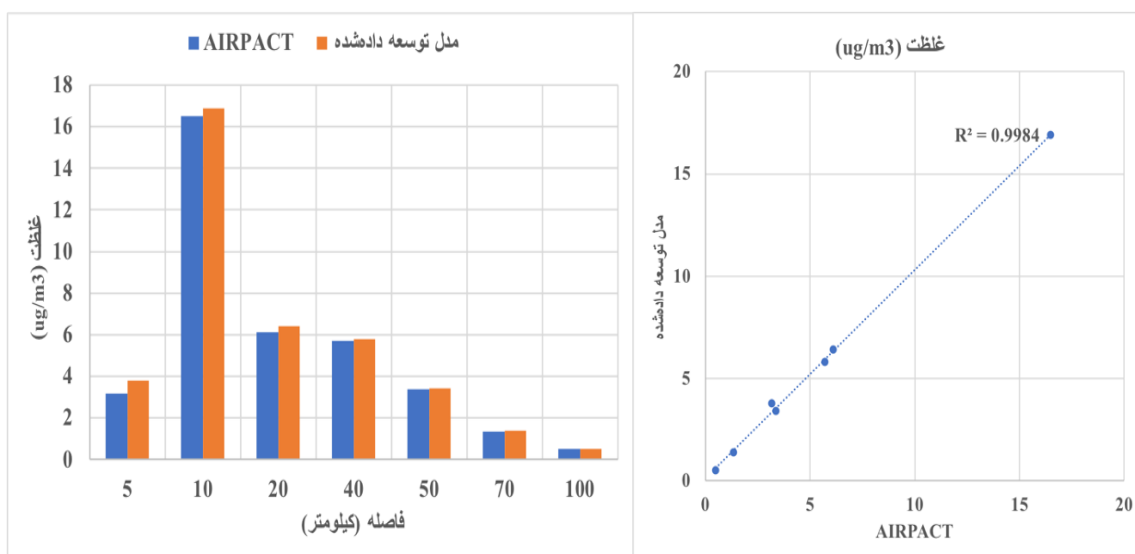
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل، ابتدا مقادیر غلظت در هر دو مدل در فواصل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل توسعه‌داده‌شده به خوبی (با ضریب همبستگی ۰٫۹۹) قادر به شبیه‌سازی نتایج مدل Airpacts است.

جنوب شرقی به سمت شمال غربی وزیده شده است. در مدل توسعه‌یافته تأثیرگذاری آلاینده بر اساس ورودی داده‌های هواشناسی است. همچنین در این مدل به دلیل سهولت انجام کار که از مزایای آن نیز به‌شمار می‌آید، با هر سرعت و جهت بادی میزان خسارات بر نما محاسبه می‌شود.

تبدیل قیمت‌ها

با توجه به قیمت متغیر ارز در زمان نوشتار این مقاله، قیمت‌ها به دلار و ریال محاسبه و ارائه شده است. برای تبدیل نرخ ارز از دلار به ریال، قیمت ارز نیمایی برابر با ۲۳۲۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.

برآورد هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده دی‌اکسید گوگرد منتشرشده از نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجایی بر نماهای بناهای شهری محدوده مورد مطالعه، با استفاده از فهرست بهاء سال ۱۴۰۰ سازمان برنامه و بودجه کشور انجام شد (۲۴). به‌منظور برآورد خسارات ناشی از آلاینده مزبور بر انواع نماهای ساختمانی، مترآژ و نوع مصالح ساختمانی به‌کاررفته در شعاع ۳۰ کیلومتری پیرامونی نیروگاه مورد مطالعه، در نظر گرفته شد.



شکل ۲- مقایسه غلظت خروجی مدل Airpacts و مدل توسعه داده‌شده

ضرایب قیمتی مدل توسعه داده‌شده به ضرایب قیمتی در مدل

همچنین به‌منظور اطمینان از نتایج هزینه‌های خارجی،

Airpacts تغییر داده شد تا بتوان صحت خروجی نتایج مدل توسعه داده شده تقریباً نتایج یکسانی با مدل Airpacts دارد. توسعه داده شده مورد ارزیابی قرار گیرد. مقایسه نتایج خروجی این مدل در جدول ۳ نشان داده شده است که بر اساس آن، مدل

جدول ۳- مقایسه هزینه خارجی محاسبه شده توسط مدل Airpacts و مدل توسعه داده شده

مصلح	هزینه خارجی مدل Airpacts (دلار)	هزینه خارجی مدل توسعه داده شده (دلار)	اختلاف (دلار)	درصد اختلاف (%)
گرانیت + تراورتن + مرمر + کامپوزیت برجسته	۱۹۵۰۰	۲۱۳۰۰	۱۸۰۰	۰,۰۹
رنگ	۲۶۹۳۵	۲۷۴۲۰	۴۸۵	۰,۰۲
سیمان سفید + پودر خاک سنگ + آجر	۳۳۵۷۵	۳۴۲۰۰	۶۲۵	۰,۰۲
کامپوزیت	۱۵۲۰	۱۶۷۲	۱۵۳	۰,۰۱

مصلح بومی، در جدول ارائه شده است (۲۴). در این جدول، هزینه خارجی حاصل از این پژوهش به تفکیک هر نما برای شرایط جوی خنثی یا کلاس پایداری (D) ارائه شده است.

هزینه خارجی بر پایه نوع نمای بناهای شهری هزینه تعویض یا تعمیر هر مترمربع مصالح به کاررفته در نمای بناهای شهری و همچنین توابع مواجهه (ERF) برای انواع

جدول ۴- هزینه خارجی مصالح مختلف نما بر حسب دلار بر متر مربع

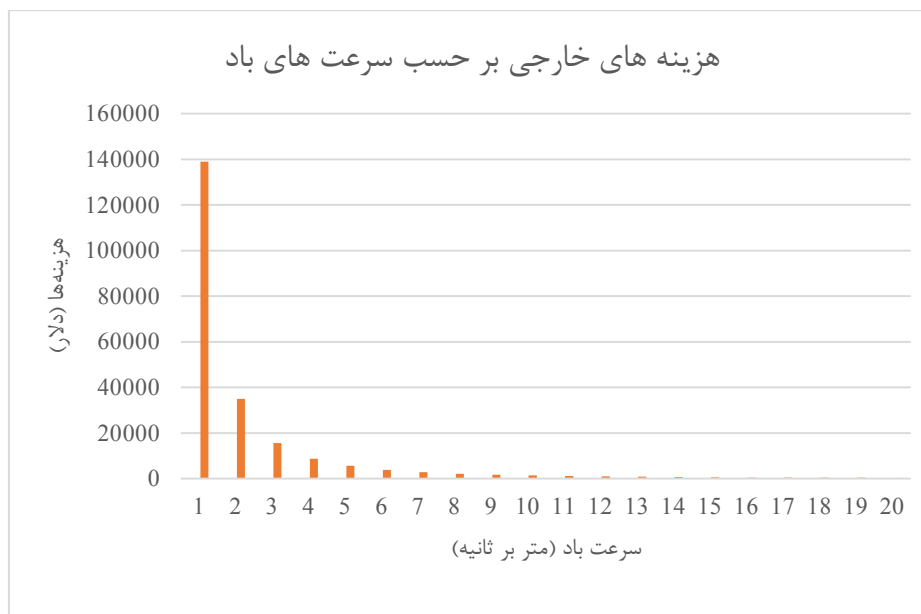
نما	توابع مواجهه (ERF)	سطح نما (متر مربع)	هزینه (دلار/متر مربع)	هزینه خارجی کل (دلار)	هزینه خارجی (میلیون ریال)	هزینه خارجی (میلیارد ریال)
گرانیت	۰,۰۰۰۱۲۳	۴۲۴۸۱۹,۲	۲۵	۳۳۰,۷	۷۷	۰,۰۷۷
تراورتن	۰,۰۰۰۱۲۳	۲۲۶۵۷۰,۲	۲۰	۱۴۱۰,۷	۳۲۷	۰,۳
مرمر	۰,۰۰۰۱۲۳	۲۵۴۸۹۱۵	۲۰	۱۵۸۷	۳۶۸	۰,۳
نمای اسلامی	۰,۰۰۰۱۲۳	۲۲۶۵۷۰,۲	۱۵	۱۰۵۳	۲۴۴	۰,۲
کامپوزیت برجسته	۰,۰۰۰۱۲۳	۷۳۶۳۵۳,۳	۱۵	۳۴۴	۸۰	۰,۰۸
سیمان سفید	۰,۰۰۰۲۵	۹۶۳۳۸۴۹,۸	۶	۳۶۵۷۵	۸۴۸۵	۸,۴
کاهگلی	۰,۰۰۰۲۵	۱۶۹۹۲۷۶۸	۵	۵۳۷۶	۱۲۴۷	۱,۲
پودر خاک سنگ	۰,۰۰۰۲۵	۳۰۵۸۶۹۸	۱۲	۲۳۲۲	۵۳۹	۱,۵
آجر	۰,۰۰۰۲۵	۴۲۴۸۱۹۲	۱۰	۲۶۸۸	۶۲۴	۱,۶
رنگ	۰,۰۰۰۲۵	۹۰۶۲۸۰۹,۶	۳	۱۷۲۰	۳۹۹	۰,۴
کامپوزیت	۰,۰۰۰۱۲۴۹	۲۶۰۲۰۱	۳۹	۳۲۰	۷۴	۰,۰۷۴

همچنین ریشه در فرهنگ و هویت معماری شهر قزوین بیشترین مترآژ نما را به خود اختصاص داده است (۳۰). این درحالی است که میزان هزینه خارجی برآورد شده برای آن برابر ۵۳۷۶ دلار معادل ۱۲۴۷ میلیون ریال است. این موضوع می تواند نشانگر این نکته باشد که استفاده از مصالح سازگار با

با توجه به جدول، بیشترین هزینه خارجی مربوط به نمای سیمان سفید ۳۶۵۷۵ دلار (معادل ۸۴۹ میلیون ریال) و کمترین هزینه خارجی مربوط به نمای کامپوزیت با میزان ۳۲۰ دلار (معادل ۷۴ میلیون ریال) برآورد شده است. نمای کاهگلی به علت ارزانی، فراوانی و دسترسی آسان به مصالح خاکی و

(۲۶)، هزینه‌های خارجی بر اساس سرعت بادهای مختلف برآورد شد. میزان هزینه‌های خارجی بر اساس سرعت‌های مختلف باد در شکل ۳ ارائه شده‌است.

منطقه، بومی و دارای ریشه در فرهنگ آن منطقه می‌تواند هزینه‌های به‌مراتب کمتری نسبت به مصالح جدید داشته باشد. **هزینه خارجی بر اساس سرعت باد** از آنجایی که سرعت باد در پراکنش آلودگی هوا تأثیر دارد



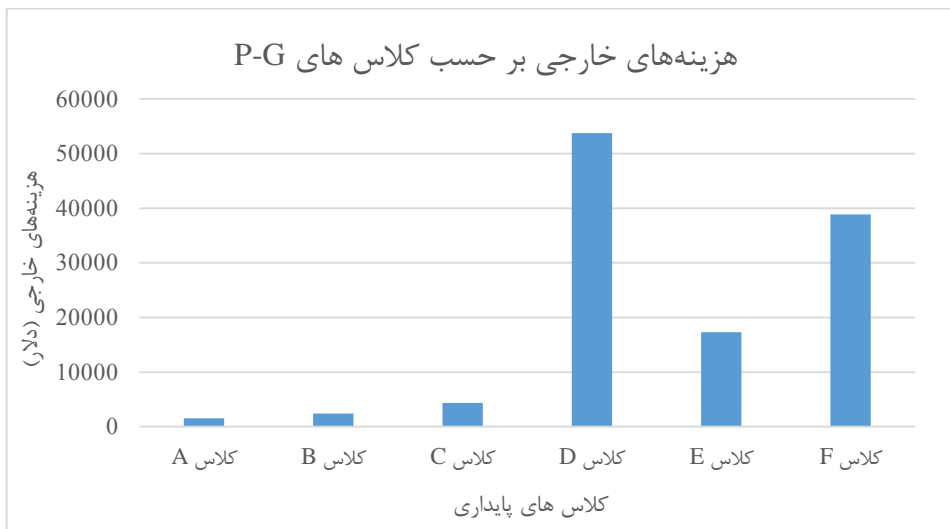
شکل ۳- هزینه‌های خارجی بر حسب سرعت های باد مختلف

سرعت باد کمتر باشد، غلظت آلاینده‌های ناشی از نیروگاه در اطراف آن بیشتر می‌شود (۳۱) که این یافته همسو با نتایج پژوهش حاضر است.

هزینه خارجی بر اساس کلاس‌های پایداری جوی

در این پژوهش، همچنین هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده SO_2 ناشی از نیروگاه شهید رجائی قزوین در کلاس‌های مختلف پایداری جوی پاسکیل-گیفورد برآورد شده‌است که در شکل ۴ و جدول ۵ نمایش داده شده‌است.

نتایج نشان می‌دهد هر چه سرعت باد کمتر باشد، هزینه‌های خارجی بیشتر می‌شود. با توجه به شکل ۳، بیشترین هزینه خارجی مربوط به باد با سرعت ۱ متر بر ثانیه با میزان ۱۳۹۰۲۶ دلار معادل ۳۲۲۵۴ میلیون ریال برآورد شده‌است و با افزایش سرعت باد میزان هزینه‌های خارجی کاهش می‌یابد. چنانچه هزینه خارجی مربوط به باد با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه، ۳۵۲ دلار معادل ۸۲ میلیون ریال برآورد شده‌است. دلیل این موضوع را می‌توان پراکنش آلاینده دی‌اکسید گوگرد دانست که در سرعت‌های کم باد، غلظت آن افزایش یافته است. در همین راستا، سیچووچ و همکاران (۲۰۲۰) دریافته‌اند که هر چه



شکل ۴- هزینه‌های خارجی برای کلاس های پایداری مختلف بر اساس پاسکیل - گیفورد

جدول ۵- هزینه خارجی مصالح نما برای کلاس‌های پایداری مختلف P-G بر حسب دلار و ریال

کلاس‌های پایداری P-G	هزینه‌های خارجی دلار	هزینه‌های خارجی میلیارد ریال
کلاس به شدت ناپایدار (A)	۱۵۴۹	۰,۴
کلاس متوسط ناپایدار (B)	۲۴۴۱	۱
کلاس کمی ناپایدار (C)	۴۳۳۰	۱
کلاس خنثی (D)	۵۳۷۳۲	۱۲
کلاس کمی پایدار (E)	۱۷۳۰۲	۴
کلاس متوسط پایدار (F)	۳۸۸۵۰	۹

ازای هر مگاوات ساعت برق تولیدی بر اساس مدل توسعه داده شده در این پژوهش ۰,۰۰۹ دلار (معادل ۱۶۲ ریال) به ازای هر مگا وات ساعت تولید برق در سال برآورد شده است.

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور برآورد هزینه‌های خارجی برآمده از انتشار آلاینده ناشی از نیروگاه چرخه ترکیبی و تأثیر آن بر انواع نماهای بناهای شهری، یک مدل بسط داده شد و اثر آلاینده دی اکسید گوگرد ناشی از نیروگاه چرخه ترکیبی شهید رجائی قزوین بر بناهای شهری قزوین به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. در این مدل از معادلات پراکنش گوس با در نظر گرفتن کلاس‌های مختلف پایداری جوی به منظور پخش و پراکنش

با توجه به شکل ۳ و جدول ۴، کمترین هزینه مربوط به کلاس جوی به شدت ناپایدار (A) و بیشترین هزینه مربوط به کلاس جوی خنثی (D) بوده که ممکن است علت آن ناشی از تفاوت پراکنش آلاینده SO₂ در کلاس پایداری مختلف باشد. در کلاس جوی به شدت تا متوسط ناپایدار (A و B)، آلاینده‌ها به خوبی در محیط پیرامون خود پخش می‌شود پس غلظت رسیده به دور دست می‌تواند به مراتب کاهش یابد (۷). اگرچه در کلاس کمی تا متوسط پایدار (E و F)، بیشترین غلظت آلاینده در فواصل دور دست اتفاق می‌افتد و به همین دلیل شهر قزوین بیشتر متأثر از آلودگی ناشی از نیروگاه قرار گرفته است (۷). هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده دی اکسید گوگرد برای محدوده مطالعاتی (شهر قزوین) و شرایط جوی خنثی (D)، به

لزوم، در قبوض برق نیز می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزارم

از دکتر محمودرضا مؤمنی برای مطالعه و بررسی مطالب مقاله و کمک به شکل‌گیری متن سپاس گزارم.

References

- 1- Hainoun A, Almoustafa A, Seif Aldin M. Estimating the health damage costs of syrian electricity generation system using impact pathway approach. Energy [Internet]. 2010;35(2):628–38. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.034>
- 2- Fouladi Fard R, Naddafi K, Yunesian M, Nabizadeh Nodehi R, Dehghani MH, Hassanvand MS. The assessment of health impacts and external costs of natural gas-fired power plant of Qom. Vol. 23, Environmental Science and Pollution Research. 2016. p. 20922–36.
- 3- Spadaro J Spadaro J V. Airpacts EQUATIONS FOR IMPACT AND DAMAGE COST ASSESSMENTS.
- 4- Spadaro J V. Damage Costs of Airborne Pollution : 2002;(October).
- 5- Reed WR. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. IC 9478 DHHS Publ No 2005-138 [Internet]. 2005;29. Available from: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/6833>
- 6- Spadaro J V. Airpacts manual. 2002;(April).
- 7- Zannetti P. Air pollution modeling: theories, computational methods and available software [Internet]. Theories computational method and available software. California: Springer Science+ Business Media, LLC; 2013. 450 p.

آلاینده و از یک روش جدید یکپارچه بر اساس IPA استفاده شد. در این مطالعه هزینه‌های بازسازی نما با کمی‌سازی اثرات پنهان و محاسبه هزینه واقعی تولید یک مگاوات الکتریسیته در کشور ایران (شهر قزوین) بومی‌سازی شد. همچنین به‌منظور توسعه مدل، برآورد تاثیرات آلاینده مزبور و هزینه‌های خارجی ناشی از آن از نرم‌افزار Matlab استفاده شد و نتایج آن با استفاده از مدل Airpacts مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل توسعه داده شده به‌خوبی می‌تواند رفتار مشابه با مدل Airpacts داشته باشد. در این پژوهش، هزینه‌های خارجی بر اساس نوع بناهای شهری، سرعت باد، و کلاس پایداری مختلف جوی پاسکیل-گیفورد محاسبه شد. بر اساس نوع بناهای شهری، بیشترین هزینه خارجی در سال مربوط به نمای سیمان سفید (با قیمت ۳۶۵۷۵ دلار معادل ۸۴۹ میلیون ریال)، کمترین هزینه مربوط به نمای کامپوزیت (با قیمت ۳۲۰ دلار معادل ۷۴ میلیون ریال) و هزینه خارجی برآوردشده برای مصالح بومی منطقه یعنی نمای کاهگلی، برابر ۵۳۷۶ دلار معادل ۱۲۴۷ میلیون ریال در سال است. بر اساس سرعت باد، بیشترین هزینه‌های خارجی در سال مربوط به باد در سرعت‌های کم (سرعت ۱ متر بر ثانیه) با قیمت ۱۳۹۰۲۶ دلار معادل ۳۲۲۵۴ میلیون ریال و کمترین مقدار هزینه خارجی در باد (سرعت ۲۰ متر بر ثانیه) با قیمت ۳۵۲ دلار معادل ۸۲ میلیون ریال است. در مورد هزینه‌های خارجی طبقه‌بندی کلاس پایداری پاسکیل-گیفورد نیز کمترین هزینه در کلاس به‌شدت ناپایدار (A) و بیشترین هزینه در کلاس خنثی (D) برآورد شده است. علاوه بر آن، هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده دی‌اکسیدگوگرد در شهر قزوین و شرایط جوی خنثی (کلاس D)، به ازای هر مگاوات ساعت (MWh) برق تولیدی نیروگاه شهید رجایی بر اساس مدل توسعه داده‌شده ۰,۰۰۹ دلار (معادل ۲۱۶۲ ریال) در سال محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد مصالح سازگار با منطقه، بومی و دارای ریشه در فرهنگ آن منطقه می‌تواند در مقایسه با مصالح جدید، به‌طور قابل توجهی از هزینه‌های کمتری برخوردار باشد. از طرفی، در نظر داشتن هزینه‌های خارجی برق و در صورت

- 14- Venkat Rao N, Rajasekhar M, Chinna Rao DRG. Detrimental effect of Air pollution, Corrosion on Building Materials and Historical Structures. Vol. 3, American Journal of Engineering Research. 2016. p. 359-64.
- 15- Nedellec V, Bachmann TM, Rabl A, Spadaro J V. Monetary valuation of trace pollutants emitted into air by industrial facilities. *Environ Heal.* 2019;(November 2020):470-84.
- 16- Lazaridis M1. First Principles of Meteorology. 2011. p. 67-118.
- 17- Spadaro J V. Airpacts Input Data: Source Characteristics. 2002;(October):1-4.
- 18- Mojaver E, Sobhanardakani S, Moattar F, Jozi SA, Monavari SM. Using a modified version of Airpacts model for estimating the damage posed by sulfur dioxide emission from power plants to urban and rural building façades (case study: Shahid Rajaei power plant, Qazvin Province, Iran). *Environ Monit Assess.* 2021;193(7).
- 19- Welcome to ICP Materials | RISE [Internet]. [cited 2022 Apr 22]. Available from: <https://www.ri.se/en/icp-materials>
- 20- Grøntoft T. Estimation of damage cost to building facades per kilo emission of air pollution in Norway. *Atmosphere (Basel).* 2020;11(7).
- 21- Rabl A, Spadaro J V. Damage Costs of Air Pollution and Policy Implications. *Compr Anal Chem.* 2016;73(May):881-915.
- 22- Spadaro J V. Input data: pollutant inventory. 2002;(October):1- Available from: [http://scholar.google.co.il/scholar?q=Zanetti,+P.+\(1990\).+Air+Pollution+Modeling:&btnG=&hl=en&as_sdt=0,5#0](http://scholar.google.co.il/scholar?q=Zanetti,+P.+(1990).+Air+Pollution+Modeling:&btnG=&hl=en&as_sdt=0,5#0)
- 8- Spadaro J V. (Version 1.0) A tool for assessing the environmental impacts and damage costs to human health, agricultural crops and man-made structures from exposure to routine atmospheric emissions. 2002;(October):1-4.
- 9- Rabl A, Spadaro J V. External Costs of Energy: How Much Is Clean Energy Worth? *J Sol Energy Eng Trans ASME.* 2016;138(4):1-8.
- 10- Liun Badan Tenaga Nuklir Nasional E, Liun E, Kuncoro AH, Sartono E. Environmental Impacts Assessment of Java's Electricity Generation Using SimPacts Model [Internet]. 2007. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/267819088>
- 11- Karimzadegan H, Rahmatian M, Farsiabi MM, Meiboudi H. Social cost of fossil-based electricity generation plants in Iran. *Environ Eng Manag J.* 2015;14(10):2373-82.
- 12- Rao NV, Rajasekhar M, Rao GC. Detrimental effect of Air pollution, Corrosion on Building Materials and Historical Structures. *Am J Eng Res [Internet].* 2014;03:359-64. Available from: www.ajer.org
- 13- Xu Y. Improvements in the Operation of SO₂ Scrubbers in China's Coal Power Plants. *Environ Sci Technol [Internet].* 2010 Jan 15 [cited 2021 Nov 1];45(2):380-5. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es1025678>

- DPV, Ruiz-Arias JA, Lara-Fanego V, Tovar-Pescador J. Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain). *J Appl Meteorol Climatol*. 2013 Jul;52(7):1592–609.
- 29- Octaviani M, Manomaiphiboon K, Prabamroong T. Wind Shear Coefficient at 23 Wind Monitoring Towers in Thailand. Vol. 6. 2015. p. 61–6.
- 30- Bater M, Ahmadi H, Abedi Koupai J, Emadi R. The Effect of Curing Time on Compressive and Tensile Strength of Traditional Kahgel TT - [Internet]. Vol. 36, Jhre. 2017 [cited 2021 Oct 29]. p. 69–86. Available from: <http://jhre.ir/article-1-1282-en.html>
- 31- Cichowicz R, Wielgosiński G, Fetter W. Effect of wind speed on the level of particulate matter PM10 concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant. *J Atmos Chem* 2020 771 [Internet]. 2020 May 17 [cited 2021 Oct 17];77(1):35–48. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10874-020-09401-w>
6. Ministry of Roads & Urban Development Islamic Republic of Iran [Internet]. [cited 2021 Aug 19]. Available from: <https://www.mrud.ir/en>
- 23- Plan and Budget Organization of Iran. [Internet]. Economic reports of 2004. Tehran: Plan and Budget Organization of Iran; [In persian]. 2005 [cited 2021 Aug 19]. Available from: <https://www.mporg.ir/en>
- 24- وزارت راه و شهرسازی [Internet]. [cited 2022 Apr 17]. Available from: <https://www.mrud.ir/>
- 25- Reiminger N, Jurado X, Vazquez J, Wemmert C, Blond N, Dufresne M, et al. Effects of wind speed and atmospheric stability on the air pollution reduction rate induced by noise barriers. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. 2020 May 1;200.
- 26- Santos-Alamillos FJ, Pozo-Vázquez D, Ruiz-Arias JA, Tovar-Pescador J. Influence of land-use misrepresentation on the accuracy of WRF wind estimates: Evaluation of GLCC and CORINE land-use maps in southern Spain. Vol. 157, *Atmospheric Research*. 2015. p. 17–28.
- 27- Santos-Alamillos FJ, Zquez
- 28-