



# Modeling dust particles from stack with artificial neural network and studying electrofilter performance: a case study of Zaveh cement factory

Ghasem Zolfaghari<sup>1✉</sup> | Sara Nezamparvar<sup>2</sup> | Mahmood Amintoosi<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: [g.zolfaghari@hsu.ac.ir](mailto:g.zolfaghari@hsu.ac.ir)

2. Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: [s.nezamparvar@hsu.ac.ir](mailto:s.nezamparvar@hsu.ac.ir)

3. Department of Computer Sciences, Faculty of Mathematics, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: [m.amintoosi@hsu.ac.ir](mailto:m.amintoosi@hsu.ac.ir)

| Article Info                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article type:</b><br/>Research Article</p> <p><b>Article history:</b><br/>Received 21 September 2024<br/>Received in revised form 25 December 2024<br/>Accepted 03 January 2025<br/>Published online 01 July 2025</p> <p><b>Keywords:</b><br/><i>Dust,</i><br/><i>Electrofilter,</i><br/><i>Sensitivity analysis,</i><br/><i>MLP and RBF neural networks.</i></p>                                                                                                            | <p>The aim of this research is to evaluate the performance of the electrofilter at the Zaveh Cement plant and to provide an optimized model for predicting dust using MLP and RBF neural networks. Using 5048 data points, the impact of parameters such as pressure, temperature, and voltage was examined in MATLAB software. The MLP network was designed with four layers, including an input layer, a first hidden layer, a second hidden layer, and an output layer, and the output error from the execution (three times) was calculated. In the MLP, the Levenberg-Marquardt learning algorithm and the Hyperbolic tangent transfer function were employed with 1000 epoch. The MLP layer multiplier was selected for the RBF. To assess the performance of the electrofilter, humidity, speed, pressure, flow rate, and gas temperature were measured under isokinetic conditions using the KIMO HD device, and dust was measured with the Westech device. The MSE for MLP was 1.36 for training data and 2.78 for test data, while for RBF it was 1.39 for training data and 3.15 for test data (<math>R^2 = 0.78</math> for MLP and 0.68 for RBF). The performance of the existing electrofilter did not decline significantly relative to the lifespan of the filters. The findings of this study suggest that if the neural network is properly trained, it can be an accurate and fast method for solving complex and time-consuming problems. It is recommended to investigate the effects of speed, humidity, and dew point on the output dust using the network.</p> |
| <p><b>Cite this article:</b> Zolfaghari, G., Nezamparvar, S., &amp; Amintoosi, M. (2025). Modeling dust particles from stack with artificial neural network and studying electrofilter performance: a case study of Zaveh cement factory. <i>Journal of Natural Environment</i>, 78 (Monitoring and Management of Natural Environmental Pollutants), 185-199.<br/>DOI: <a href="http://doi.org/10.22059/jne.2025.380898.2713">http://doi.org/10.22059/jne.2025.380898.2713</a></p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |



## مدل سازی ذرات غبار خروجی از دودکش با شبکه عصبی مصنوعی و بررسی عملکرد الکتروفیلتر: مطالعه کارخانه سیمان زاوه

قاسم ذوالفقاری<sup>۱</sup> | سارا نظام پرور<sup>۲</sup> | محمود امین طوسی<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: [g.zolfaghari@hsu.ac.ir](mailto:g.zolfaghari@hsu.ac.ir)

۲. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: [s.nezamparvar@hsu.ac.ir](mailto:s.nezamparvar@hsu.ac.ir)

۳. گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: [m.amintoosi@hsu.ac.ir](mailto:m.amintoosi@hsu.ac.ir)

| اطلاعات مقاله                                                                         | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی                                                               | هدف از این تحقیق بررسی عملکرد الکتروفیلتر کارخانه سیمان زاوه و ارائه مدل بهینه پیش بینی غبار با شبکه های عصبی پرسپترون (MLP) و تابع پایه شعاعی (RBF) است. با استفاده از ۵۰۴۸ داده، تأثیر پارامترهای فشار، دما، و ولتاژ در نرم افزار MATLAB بررسی شد. شبکه MLP با چهار لایه شامل لایه ورودی (سه نورون)، لایه اول پنهان (۲ تا ۲۰ نورون)، لایه دوم پنهان (۲ تا ۱۰ نورون)، و لایه آخر (یک نورون) طراحی و خطای خروجی حاصل از اجرا (سه مرتبه) محاسبه گردید. در MLP، الگوریتم یادگیری Levenberg-Marquardt و تابع انتقال Hyperbolic tangent با حداکثر تعداد تکرار یادگیری (Epoch) ۱۰۰۰ به کار گرفته شد. در RBF ضرب دو لایه MLP برای RBF انتخاب شد. برای بررسی عملکرد الکتروفیلتر، رطوبت، سرعت، فشار، دبی، و دمای گاز توسط دستگاه KIMO HD و غبار با دستگاه Westech در شرایط ایزوکنتیک اندازه گیری گردید. میانگین مربعات خطا در MLP برای داده های آموزش ۱/۳۶ و برای داده های تست ۲/۷۸ و در RBF برای داده های آموزش ۱/۳۹ و برای داده های تست ۳/۱۵ بود (ضریب همبستگی ۰/۷۸ در MLP و ۰/۶۸ در RBF). نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که تغییرات ولتاژ تأثیر مهمی بر غبار نسبت به سایر پارامترها می گذارد. براساس بررسی وضعیت سیستم کنترل غبار، عملکرد الکتروفیلتر موجود نسبت به عمر مفید الکتروفیلترها کاهش چشمگیری نداشت. یافته های این پژوهش دلالت می کنند که اگر شبکه عصبی به درستی آموزش داده شود، می تواند روشی دقیق و سریع برای حل مسائل پیچیده و زمان بر باشد. پیشنهاد می شود تأثیر سرعت، رطوبت، و نقطه شبنم بر غبار خروجی با استفاده از شبکه بررسی گردد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| کلیدواژه ها:<br>آنالیز حساسیت،<br>الکتروفیلتر،<br>غبار،<br>شبکه های عصبی MLP و<br>RBF |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

استناد: ذوالفقاری، قاسم؛ نظام پرور، سارا؛ و امین طوسی، محمود (۱۴۰۴). مدل سازی ذرات غبار خروجی از دودکش با شبکه عصبی مصنوعی و بررسی عملکرد الکتروفیلتر: مطالعه کارخانه سیمان زاوه. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (ویژه نامه پایش و مدیریت آلاینده های محیط زیست طبیعی)، ۱۹۹-۱۸۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.380898.2713>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

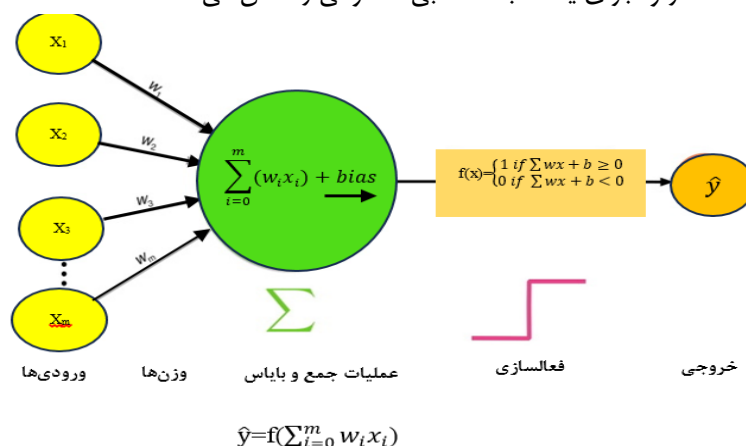
فعالیت‌های انسانی در مسیر توسعه از یک سو تأثیرات مثبتی بر زندگی بشر گذاشته اما از طرف دیگر منجر به ایجاد آلودگی محیط‌زیست شده است (Zolfaghari et al., 2006; Atabati et al., 2022). آلاینده‌های موجود در محیط‌زیست حتی در غلظت‌های پایین بر موجودات زنده و انسان اثر مضر دارند (Esmaili Sari et al., 2007; Zolfaghari, 2018). اکنون مسایل محیط‌زیستی به‌قدری توسعه یافته‌اند که قلمرو آنها به تمام مسائل فنی و مدیریتی مرتبط می‌شود (Zolfaghari et al., 2016; Zolfaghari and Kragar, 2019). فعالیت‌های کشاورزی، مجتمع کشت و صنعت، کشتارگاه‌ها، دامداری‌ها، واحدهای صنعتی و معدنی، سکونت‌گاه‌های شهری و روستایی، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و مخازن نگهداری ضایعات صنعتی هر کدام به طریقی باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شوند (Zolfaghari, 2023).

کارخانه‌های سیمان از اساسی‌ترین معضلات محیط‌زیستی آلودگی هوا به‌شمار می‌آیند. از همین رو یکی از مسایل و مشکلات اساسی این کارخانه‌ها کنترل و پیشگیری از انتشار بیش از حد آلاینده‌ها می‌باشد. با حرکت دود و غبار به‌سمت فواصل دورتر از دودکش، حجم هوای بیشتری قابلیت مخلوط شدن با دود و ترقیق آن را خواهد داشت اما در هر شرایط باز هم پایین‌دست خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از رایج‌ترین فرآیندهای غبارگیری که در کارخانه‌های سیمان استفاده می‌شود، فیلترهای کیسه‌ای یا فیلترخانه (Baghouse)، رسوب‌دهنده‌های الکتروستاتیک یا الکتروفیلترها (Electrostatic Precipitator (ESP)) (با بالاترین عملکرد)، فیلترهای شنی، سیکلون‌ها و مولتی سیکلون‌ها می‌باشند. در بین روش‌های مذکور، تکنولوژی الکتروفیلتر، توسعه و کاربرد بیشتری یافته است. از جمله مزایای این سیستم‌ها توان مصرفی کم و بازدهی بسیار بالا، قابلیت بهره‌برداری در شرایط فشار و دمای بسیار بالا می‌باشد اما از جمله معایب آن حساسیت زیاد به نوسانات شرایط همچون دما، ولتاژ، و فشار است (Chehregani, 2003). در مطالعه‌ای میزان ذرات معلق آلاینده خروجی از کارخانه سیمان اردبیل بررسی شد (Haq Moradkhani et al., 2013). در این پژوهش دودکش کارخانه قبل از اتصال فیلترهای کیسه‌ای به الکتروفیلتر و پس از اتصال آن پایش گردید. غلظت ذرات پس از اتصال و ترکیب دو روش بسیار کمتر از مقادیر غلظت استاندارد مشاهده گردید. این موضوع حاکی از اثر بخشی فیلترهای کیسه‌ای متصل شده به الکتروفیلتر می‌باشد. دستگاه جدید یعنی هیبرید الکتروفیلتر و فیلترهای کیسه‌ای توانست ۷۳ درصد از ذرات خروجی از دستگاه قبلی (تک الکتروفیلتر) را حذف کند. این پژوهش نشان داد که استفاده از فیلترهای ترکیبی یک روش مؤثر جهت افزایش بازدهی حذف ذرات خروجی از دودکش کارخانه‌های سیمان است.

مدل‌سازی آلودگی هوا به درک مشخصه‌های اصلی آلودگی هوا کمک کرده و پیش‌بینی غلظت و توزیع آلاینده‌ها و به‌کارگیری آنها در مدیریت محیط‌زیست را ممکن می‌سازد (Noorpoor and Kazemi Shahabi, 2014). در مطالعه‌ای پارامترهای مؤثر بر میزان آلودگی ناشی از نیروگاه حرارتی رامین با استفاده از مدل شبکه عصبی انجام شدند (Onsori et al., 2013). برای افزایش دقت، تمامی داده‌ها در بازه صفر و یک نرمال شدند. برای لایه اول از تابع انتقال Logsig، لایه دوم از تابع Tansig، لایه سوم از تابع Purelin و برای الگوریتم یادگیری شبکه نیز از مدل Trainlm استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که با افزایش ۲۰ درصدی دمای هوای ورودی به بویلر، میزان دی‌اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن به‌ترتیب به‌میزان ۹، ۹، ۱۰ و ۹ درصد با شیب تند افزایش یافت. از طرف دیگر با افزایش ۲۰ درصدی میزان سوخت، آلاینده‌های خروجی مذکور به‌ترتیب به‌میزان ۱۳، ۱۳، ۲۵ و ۵ درصد افزایش پیدا کرد. فشار سوخت ورودی به بویلر نیز از سایر پارامترهای مورد بررسی بود. در مطالعه دیگری پیش‌بینی کوتاه‌مدت غلظت ازن برحسب شرایط آب و هوایی برای شهر تبریز توسط مدل رگرسیون (روش خطی) و یک مدل شبکه عصبی (غیرخطی) صورت گرفت. برای آموزش بهینه شبکه، پارامترهای هواشناسی و غلظت آلودگی به‌ترتیب در بازه ۰ و ۱ و نیز ۰/۹- و ۰/۹ نرمال شدند. شبکه از نوع پرسپترون چندلایه، تابع انتقال هاپیر بولیک و الگوریتم یادگیری از نوع LM بود. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی توانایی بیشتری نسبت به رگرسیون چندگانه دارد، به‌طوری که ضریب همبستگی در مدل رگرسیون چندگانه ۰/۴۵ و در مدل شبکه عصبی ۰/۹۱ بود (Sadr, 2010). در مطالعه تغییرات میانگین غلظت روزانه منواکسید کربن در شهر مشهد در ارتباط با پارامترهای هواشناسی، ضریب همبستگی (Correlation Coefficient (R)) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error (RMSE)) در شبکه عصبی به‌ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۰/۰۶۹ و برای مدل رگرسیونی به‌ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۱ به‌دست آمد. براساس

نتایج حاصل از این تحقیق، مهمترین عوامل هواشناسی مؤثر بر غلظت منواکسید کربن در شهر مشهد به ترتیب سرعت باد، دمای هوا، تشعشع و رطوبت نسبی بودند (Taghavi et al., 2012). همچنین در یک پژوهش دیگر رفتار پارامترهای مؤثر بر تولید گازهای گلخانه ای ناشی از زباله سوز پزشکی با استفاده از شبکه های عصبی پیش بینی شد. نتایج نشان داد که درجه حرارت و رطوبت نسبت به دیگر پارامترها (فشار و جریان سوخت) در تولید گازهای گلخانه ای نقش بیشتری دارند (Huang et al., 2014).

در مدل سازی غلظت ها شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network (ANN)) معمولاً نسبت به روش های خطی نتایج بهتری دارند (Gardner and Dorling, 1998). اجزای اصلی شبکه عصبی عبارتند از: گره (Node) و لایه (Layer). گره های شبکه های عصبی، عملکردی مشابه با عملکرد نورون های مغز انسان دارند (Kia, 2011) که مجموعه ای از محرک های خارجی را دریافت می کنند (Anwar and Deshmukh, 2018). گره از ورودی گره، وزن گره، تابع فعال سازی، و بایاس گره در شبکه عصبی تشکیل شده است. زمانی که در شبکه عصبی، چندین گره در یک ردیف کنار هم قرار بگیرند، یک لایه را تشکیل می دهند. زمانی که چندین لایه از گره ها در کنار یکدیگر قرار بگیرند، شبکه عصبی ساخته می شود (Faradars, 2024). یک شبکه عصبی شامل اجزای سازنده لایه ها و وزن ها می باشد (Sivaneasan et al., 2017). در حالت کلی در شبکه های عصبی سه نوع لایه نورونی وجود دارد: لایه ورودی: دریافت اطلاعات خامی که به شبکه تغذیه شده است. لایه های پنهان: عملکرد این لایه ها به وسیله ورودی ها و وزن ارتباط بین آنها و لایه های پنهان تعیین می شود. قدرت ارتباط هر نورون با نورون دیگر را وزن نورون گویند ( $w_i$ ). لایه خروجی: عملکرد واحد خروجی بسته به فعالیت واحد پنهان و وزن ارتباط بین واحد پنهان و خروجی می باشد (Dorffner, 1996). شکل ۱ ساختار و اجزای یک شبکه عصبی مصنوعی را نشان می دهد.



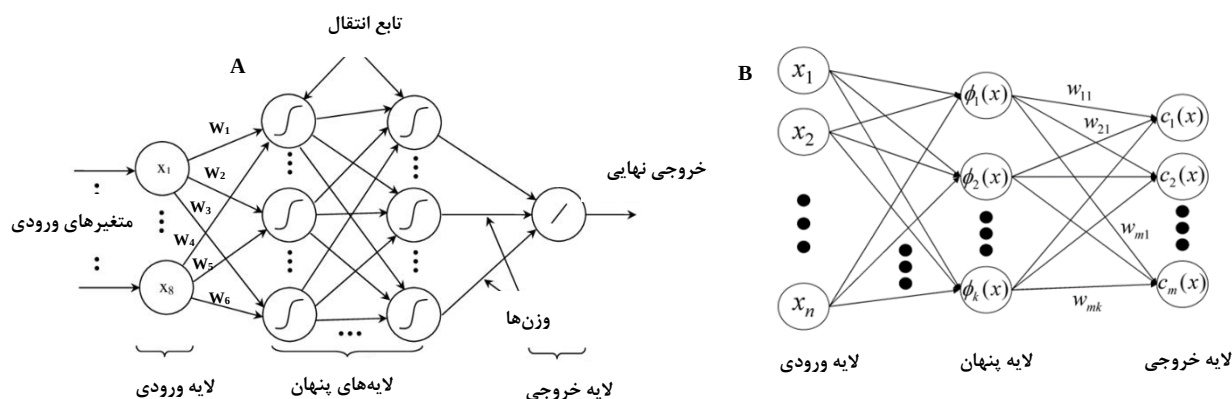
شکل ۱- ساختار و اجزای یک شبکه عصبی مصنوعی

نوعی از شبکه عصبی بر مبنای یک واحد محاسباتی به نام پرسپترون ساخته می شود. یک پرسپترون برداری از ورودی های با مقادیر حقیقی ( $x_i$ ) را گرفته و یک ترکیب خطی از این ورودی ها را محاسبه می کند. (Kolehmainen et al., 2001). MLP پرسپترون چند لایه است که شبکه چند لایه پیشخور نیز نامیده می شود. در مدل سازی با استفاده از شبکه عصبی MLP نورون ها در لایه های مختلفی قرار می گیرند. شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF) نوعی از شبکه های عصبی هستند که از توابع پایه شعاعی به عنوان توابع فعال ساز استفاده می کنند (شکل ۲).

این شبکه ها پیش بینی را بر اساس خوشه بندی انجام می دهند و روش خوشه بندی شبیه روش k میانگین (K-mean clustering) است. شبکه های RBF از سه لایه ورودی، مخفی و خروجی تشکیل شده اند (Messikh et al., 2020). برای انتقال خروجی های حاصل شده از هر لایه به لایه های بعد، از توابع انتقال (فعال ساز/محرک) استفاده می شود. توابع انتقال انواع متفاوتی دارند که از معروف ترین و پرکاربردترین آنها تابع خطی، تابع غیر خطی، تابع لگاریتم سیگموئید (تابع سیگموئید)، تابع تانژانت سیگموئید (تابع تانژانت هیپربولیک) است (Chiu and Lin, 2004).

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد سیستم الکتروفیلتر کارخانه سیمان زاوه و ارائه مدل بهینه پیش بینی غبار جهت افزایش جذب ذرات غبار و کاهش انتشار آن در الکتروفیلتر بوده که با استفاده از مدل شبکه های عصبی پرسپترون (Multi-Layer

(Perceptron (MLP) و تابع پایه شعاعی (Radial Basis Function (RBF) در محیط MATLAB انجام شد. در این مدل شبکه عصبی، تأثیر پارامترهای فشار، دما، و ولتاژ بر غبار خروجی الکتروفیلتر مورد مطالعه قرار گرفت. در پژوهش کاربردی حاضر فرضیه‌های زیر مورد آزمون واقع شد: ۱- الکتروفیلتر کارخانه سیمان زاوه بازدهی بالایی در حذف ذرات معلق دارد. ۲- مدل پرسپترون چند لایه (MLP) قابلیت پیش‌بینی انتشار غبار را دارد. ۳- بین متغیرهای سیستم الکتروفیلتر یعنی فشار، دما، و ولتاژ با میزان غبار رابطه همبستگی وجود دارد.



شکل ۲- شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (A) و شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (B)

### روش‌شناسی پژوهش

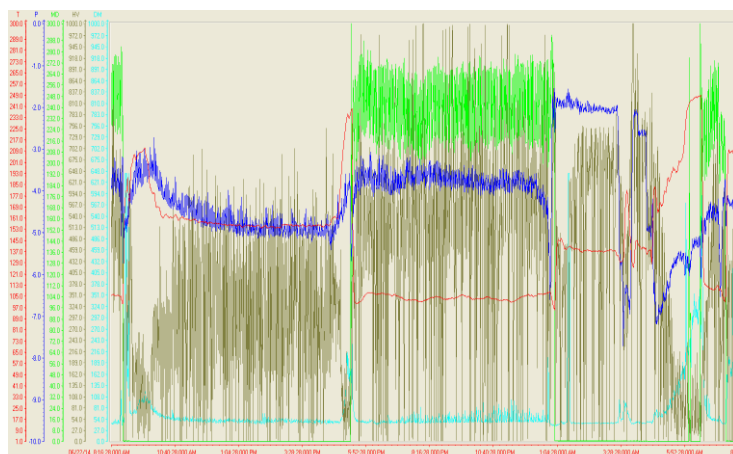
**منطقه مورد مطالعه:** کارخانه سیمان زاوه در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۴۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه در ۲۵ کیلومتری تربت حیدریه واقع در شهر زاوه می‌باشد. کارخانه سیمان زاوه با مساحت ۱۴۶ هکتار در سال ۱۳۸۷ با ظرفیت ۳۵۰۰ تن در روز با نوع سیمان پرتلند شروع به کار کرد. معادن سنگ آهک و آلومین (خاک رس) در نزدیکی و سه کیلومتری کارخانه قرار دارد که استخراج به صورت روباز پلکانی صورت می‌گیرد. سنگ آهک با استفاده از دریل واگن استخراج و به وسیله کامیون و دامپتراک از معادن به کارخانه سنگ شکن حمل می‌شود. ظرفیت سنگ شکن با دو قیف (Hopper) ورودی ۸۰۰ تن بر ساعت می‌باشد. سنگ‌های آهک بعد از خرد شدن به ابعاد ۸۰ میلی‌متر به وسیله نوار نقاله از جداکننده آهن‌آلات اضافی (Magnet separator) و آنالیز لحظه‌ای مواد (Geoscan) عبور می‌کند. بعد از این مواد وارد سالن اختلاط برای کم کردن ساعت کار سنگ شکن و در واقع صرفه‌جویی در انجام کار در یک شیفت و همگن کردن مواد می‌شود (همگن‌سازی با دستگاهی به نام استاکر و برداشت از اطراف توسط دستگاه ریکلایمر). به منظور ورود مواد به آسیاب مواد و به علت تثبیت مواد توسط دستگاه ژئواسکن و پس از تنظیم و ترکیب توسط دستگاه رومیکس، مواد به صورت آنالیز شده وارد آسیاب مواد می‌شود. پیش‌گرم‌کن (Preheater) که بزرگترین سازه در این کارخانه بوده و ارتفاع آن به ۱۲۰ متر و در ۷ طبقه است، وظیفه آماده کردن مواد قبل از ورود به کوره را دارد. مواد خام پس از خروج از زیر سیلوها توسط ایرلیفت به بالای پری‌هیتر رسیده و دمای مواد از ۵۰°C شروع و در ۵ مرحله به ۸۶۰°C که در ابتدای ورودی کوره است می‌رسد. دو عدد دستگاه آنالیزور در ورودی و خروجی کوره آلاینده‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. سیستم کلساینر نیز که وظیفه جداسازی دی‌اکسید کربن از کربنات کلسیم را دارد در مجموعه پری‌هیتر طراحی شده است. دما در داخل کوره به ۱۴۶۰°C می‌رسد و قلب هر کارخانه سیمانی را تشکیل می‌دهد. به علت شیب ۳/۵ درصدی کوره و چرخش دورانی، دانه‌های پخت شده وارد خنک‌کن می‌شود و مواد تا ۱۰۰°C خنک می‌شوند. محصول تولید شده را کلینکر گویند. کلینکرها ساجمه‌های سیاه‌رنگ هستند و مواد اولیه سیمان پرتلند را تشکیل می‌دهند. کلینکرها توسط نوار نقاله‌های فلزی به سیلوهای کلینکر می‌رسند. این کارخانه دارای ۲ آسیاب سیمان از نوع گلوله‌ای می‌باشد. برای تبدیل کلینکر به سیمان باید ۳٪ گچ به کلینکر اضافه شود. جهت حفاظت از محیط‌زیست کارخانه چند دستگاه فیلتر کیسه‌ای و دو دستگاه الکتروفیلتر جهت غبارگیری نصب کرده است.

**ضریب همبستگی بین غبار و متغیرهای عملیاتی الکتروفیلتر:** برای به دست آوردن ارتباط بین متغیرها با غبار از ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SPSS 22 استفاده شد. در اینجا از مجموع ۵۰۴۸ داده مورد تأیید و استخراج شده از

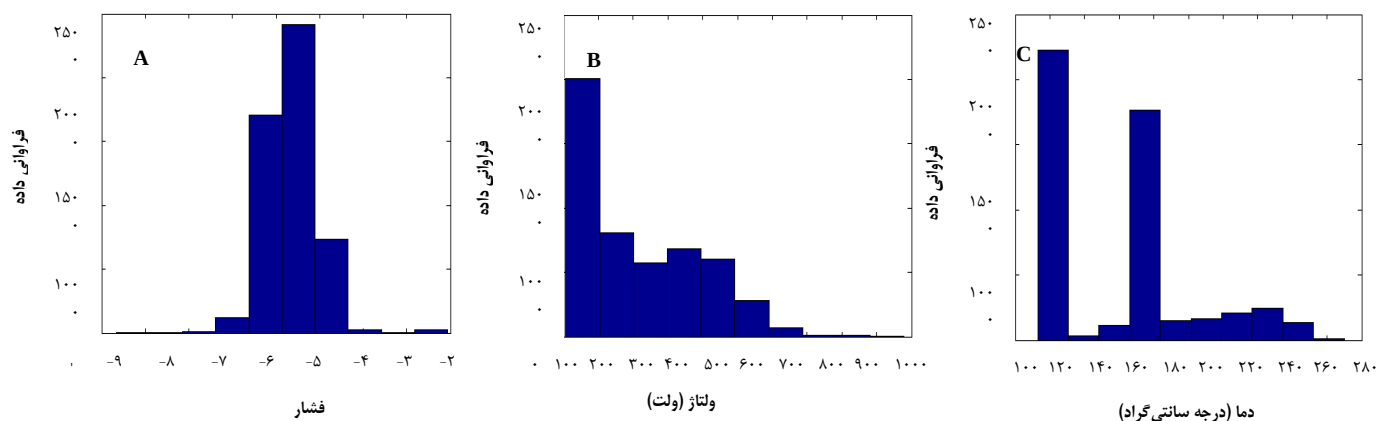
تصاویر داده ای با نرم افزار MATLAB ابتدا میانگین و انحراف معیار در SPSS محاسبه شد سپس ارتباط بین متغیرها بررسی گردید با این تفاوت که برای محاسبات آماری بر خلاف شبکه عصبی از داده های غیر نرمالیزه استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون از معادله ۱ محاسبه می شود که در آن R: ضریب همبستگی، N: جامعه آماری، X: متغیرهای تابع و Y: متغیرهای مستقل است.

$$R = \frac{N \sum xy - \sum x \cdot \sum y}{\sqrt{N \cdot \sum X^2}} \quad \text{معادله (۱)}$$

**مدل سازی داده های استخراج شده از تصاویر اتاق کنترل الکتروفیلتر با شبکه های عصبی:** در این مطالعه سعی شد که با شبیه سازی فرآیند جذب غبار در الکتروفیلتر، تأثیر پارامترهای کلیدی در این فرآیند همچون فشار، درجه حرارت و ولتاژ (به عنوان ورودی) را روی غبار (خروجی) جهت ارائه مدل بهینه حداکثر جذب غبار با استفاده از شبکه های عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) و تابع شعاعی پایه (RBF) بررسی گردد. یکی از مهمترین بخش های مدل سازی، ایجاد داده های مورد نیاز است به طوری که شبکه ایجاد شده به خوبی بتواند فرآیند مورد نظر را پیش بینی کند. جهت تولید داده، شناخت اولیه از پارامترهای حاکم بر مدل ضروری است. کافی بودن تعداد داده ها به کیفیت آنها بستگی دارد. هرچه خروجی مدل ارتباط نهفته بیشتری نسبت به ورودی ها داشته باشد، آموزش بهتر صورت می گیرد. این داده ها باید در ساختارهای مختلف شبکه عصبی برای تولید مدل به کار روند. انتخاب مناسب شبکه قدم دوم در مدل سازی است که باید با دقت انجام گردد. اطلاعات ورودی مورد استفاده جهت مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی در این مطالعه عبارتند از فشار برحسب میلی بار (mb)، درجه حرارت (°C) و ولتاژ الکتروفیلتر، ولت (V) و اطلاعات خروجی مورد نیاز غبار است که برحسب میلی گرم بر متر مکعب (mg/m<sup>3</sup>) می باشد. تمامی داده ها در سال ۱۴۰۰ و در بازه سه ماهه (تابستان) توسط محققین این مطالعه از اتاق کنترل الکتروفیلتر کارخانه سیمان تهیه گردید. شکل ۳A نمونه ای از داده های جمع آوری شده از الکتروفیلتر را نشان می دهد. تعداد داده های استخراجی مورد استفاده در این مطالعه ۵۰۴۸ عدد می باشد که از تصاویر اتاق کنترل استخراج شده است (مانند شکل ۳A). چنین داده هایی که حاصل پایش آنلاین و با دقت بالا است و تعداد آنها زیاد است به شدت کیفیت مدل سازی را بالا می برند. با توجه به داده های جمع آوری شده مشاهده شد که هر یک از پارامترهای فشار، دما، و ولتاژ تقریباً در دو دسته قرار می گیرند. به عنوان مثال در شکل ۴A ملاحظه می شود که دما تقریباً در دو گروه ۱۰۵ درجه و ۱۵۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته است. فشار تقریباً در دو گروه ۳/۵- و ۴/۵- میلی بار قرار دارد و ولتاژ نیز در دو گروه تقریبی ۸۰ و ۴۰۰ ولت قرار گرفته است. در خصوص فشار و ولتاژ مقادیر حاصل از خوشه بندی K-means و برای درجه حرارت نیز از مقادیر دو پیک نمودار فراوانی آن استفاده شده است. در شکل های ۴A، ۴B و ۴C محور yها فراوانی داده در بازه مورد نظر را نشان می دهد. بنابر مطالعه پژوهش ها و تحقیقات مشابهی که در این زمینه صورت گرفته (Ilamathi, 2012) در پیش بینی غلظت ها که به صورت غیرخطی می باشند، استفاده از شبکه عصبی مناسب و قابل قبول به نظر می رسد، بنابراین در این تحقیق نیز از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده گردید و با روش تابع شعاعی پایه (RBF) مقایسه شد. بعد از تعداد داده ها، نوع شبکه و الگوریتم یادگیری باید بررسی گردد. داده های اعتباربخشی در طول آموزش، اما داده های تست بعد از آموزش برای سنجش کارایی شبکه به کار می رود (منهاج، ۱۳۸۱). برای افزایش دقت، تمامی داده های ورودی در بازه صفر تا یک و داده های خروجی در بازه ۱- تا ۱ نرمالیزه شدند. شبکه عصبی مصنوعی MLP ایجاد شده چهار لایه بوده و لایه اول (ورودی) سه نورون متناظر با تعداد ورودی ها، لایه اول پنهان در بازه ۲ تا ۲۰ نورون و تعداد نورون های لایه دوم پنهان در بازه ۲ تا ۱۰ نورون و لایه آخر (خروجی) با یک نورون طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای هر ساختار شبکه، سه بار خطای شبکه اجرا و خطای خروجی محاسبه گردید. در این بین شبکه از دو لایه پنهان اول و دوم به ترتیب با تعداد ۲۰ و ۹ نورون به صورت میانگین و کاملاً اتوماتیک محاسبه شد که خطای کمتری داشت و این ساختار برای ادامه کار مورد استفاده قرار گرفت. مناسب ترین الگوریتم یادگیری جهت مدل سازی با شبکه های پرسپترون نیز Levenberg-Marquardt شناخته شد. همچنین برای تابع انتقال از تانژانت سیگموئید که پیش فرض خود مدل شبکه پرسپترون می باشد، استفاده شد.



شکل ۳- نمونه‌ای از داده‌های جمع‌آوری شده از اتاق کنترل الکتروفیلتر. نمودار تغییرات غبار خروجی، دما (درجه سانتی‌گراد)، فشار (میلی‌بار)، و ولتاژ (ولت) الکتروفیلتر را نشان می‌دهد



شکل ۴- برآورد نرخ تغییرات پارامترهای مؤثر بر غبار خروجی از الکتروفیلتر: فشار (A)، ب- ولتاژ (B) و ج- دما (C)

در حوزه مدل سازی ریاضی، RBF یک شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد که از توابع پایه‌ای شعاعی به عنوان توابع فعالیت استفاده می‌کند. خروجی این شبکه یک ترکیب خطی از توابع پایه شعاعی برای پارامترهای ورودی و نورون‌هاست. در MLP می‌توان چند لایه مخفی داشت حال آنکه در RBF تنها یک لایه مخفی ممکن است. معمولاً در MLP اگر برای pattern classification استفاده شود تمامی توابع غیر خطی اند. آرگومان توابع در RBF فاصله اقلیدسی است حال آنکه در MLP این آرگومان ضرب داخلی بردار ورودی لایه در وزن‌هاست. MLP یک تقریب کلی از رابطه ورودی-خروجی به دست می‌آورد در صورتی که در RBF این تخمین به صورت محلی محاسبه می‌شود. سرعت یادگیری RBF بیشتر است، در عین حال تعداد پارامترهای آزاد آن هم بیشتر است. از گزاره‌های فوق برای طراحی RBF در این مطالعه استفاده شد. برای مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی مورد مطالعه (MLP و RBF) و تأیید نتایج از میانگین مربعات خطا ((Mean Square Error (MSE)، جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error (RMSE)، و ضریب همبستگی (R) طبق معادلات ۲، ۳، و ۴ استفاده شد (Khodaparast Shirazi and Sadeghi, 2016). به این شکل که مدل مطلوب مدلی است که کمترین MSE و بیشترین R را داشته باشد:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \quad \text{معادله (۲)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{معادله (۳)}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2} \quad \text{معادله (۴)}$$

که  $O_i$  غلظت غبار مشاهده شده،  $P_i$  مقدار غبار پیش بینی شده،  $\bar{O}_i$  میانگین مقادیر مشاهده شده و  $N$  تعداد مشاهدات است. **نمونه برداری و اندازه گیری غبار جهت بررسی عملکرد الکتروفیلتر:** تمامی مراحل نمونه برداری و اندازه گیری ها طبق الزامات استاندارد سازمان محیط زیست بوده است. بدین منظور طبق استاندارد ابتدا اقدام به تست نشت یابی برای اطمینان از عدم نشتی سیستم با استفاده از دستگاه Leak Test انجام گرفت و برای اندازه گیری رطوبت، سرعت، فشار و دمای گاز خروجی نیز از دستگاه پرتابل KIMO HD 200 استفاده شد. همچنین با اندازه گیری میزان دبی دودکش توسط دستگاه KIMO می توان مقادیر اندازه گیری شده در داخل دودکش را به حالت استاندارد اصلاح کرد (شرایط ایزوکنتیک). سپس اپراتور (پژوهشگر)، نازل متناسب با میزان سرعت اندازه گیری شده را انتخاب کرده که این مرحله یکی از مهمترین مراحل آزمایش به حساب می آید در صورت عدم انتخاب درست نازل میزان خطا بالا می رود. سپس دستگاه فاصله نقاط روی قطر داخلی دودکش و زمان لازم جهت نمونه برداری را براساس استاندارد تعیین می نماید. به دنبال آن، فیلتری که از قبل با شرایط ذکر شده توزین شده را روی فیلتر هولدر قرار داده و براساس شرایط تعیین شده توسط دستگاه Westech با روش ISO9096 و در شرایط ایزوکنتیک، اقدام به اندازه گیری غبار شد. اندازه گیری از این دستگاه با استفاده از فیلترهای گراویمتری صورت گرفت، این دستگاه شامل یک پمپ برای مکش هواست که به یک لوله فلزی که وظیفه آن تحمل دمای داخل دودکش است، متصل می شود. به انتهای این لوله یک فیلتر متصل می شود و پس از آن یک نازل به عنوان ورودی هوا داخل دودکش به دستگاه Westech، مورد استفاده قرار می گیرد. نازل انواع و شماره های مختلف دارد و انتخاب نازل مناسب به میزان دبی دودکش بستگی دارد. برای اندازه گیری ابتدا فیلتر جاذب را وزن کرده و در نگهدارنده مخصوص فیلتر قرار داده می شود. سپس در هنگام نمونه برداری آن را به پمپ متصل کرده و پس از پایان نمونه برداری حجم گاز خشک مکش شده را ثبت کرده و فیلترها با حفظ شرایط به محل آزمایشگاه انتقال داده شد. بعد از رطوبت گیری فیلتر، اختلاف وزن فیلتر محاسبه گردید و میزان ذرات معلق در واحد حجم محاسبه شد. جهت سنجش از روش گراویمتریک (ISO 9096) استفاده گردید. در این روش پس از آماده سازی فیلتر با استفاده از آون، فیلترها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شد. سپس نسبت به توزین فیلتر با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ عمل توزین اقدام شد.

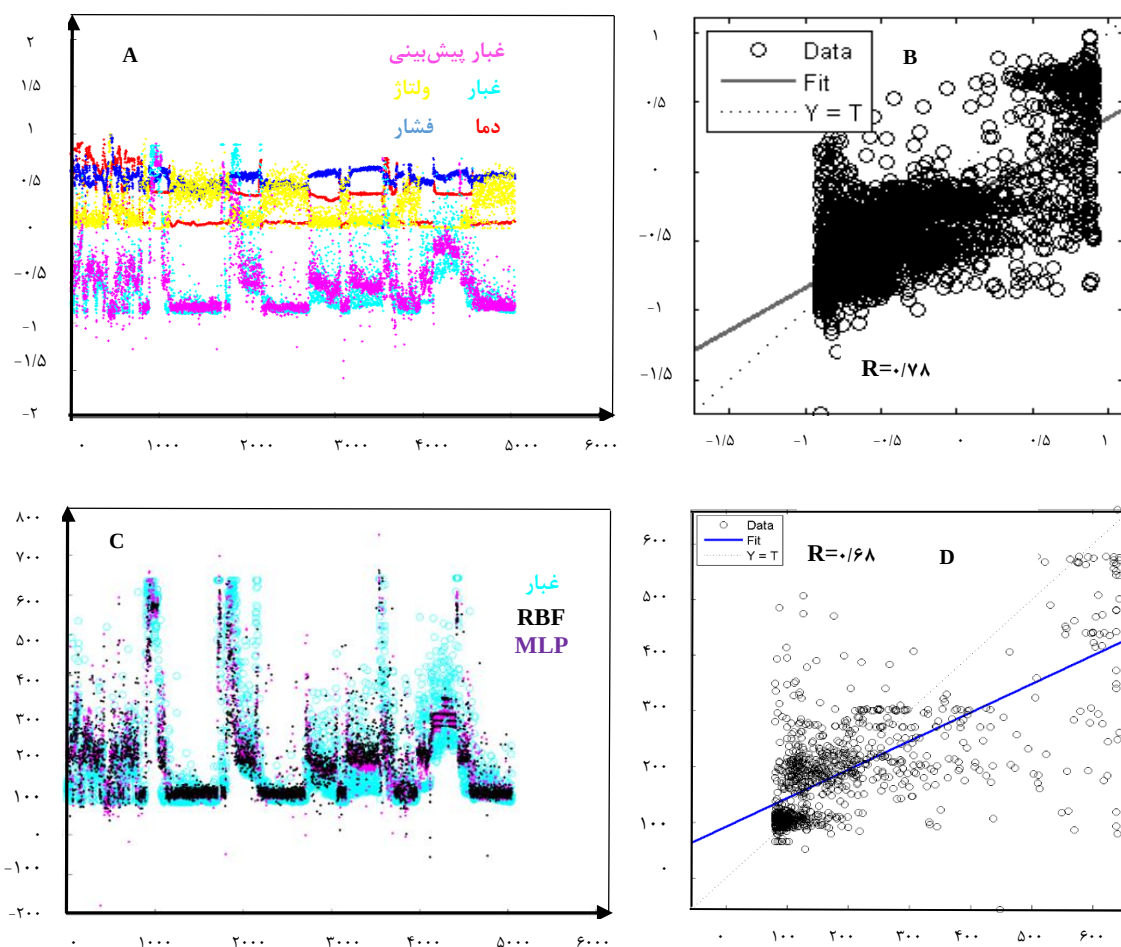
## یافته های پژوهش

**ضریب همبستگی بین غبار و متغیرهای الکتروفیلتر:** میانگین و انحراف معیار (SD) غلظت غبار در داده های به دست آمده ۱۴۲/۴۱±۰۹/۲۳ میلی گرم بر متر مکعب، فشار ۵/۰±۶۴/۵۹ میلی بار، و ولتاژ ۲۱۴/۱۷۶±۳۲/۳۶ ولت محاسبه شد. ضریب همبستگی بین فشار و غبار ۰/۴۵ بود (جدول ۱) که نشان دهنده همبستگی مثبت و معنی دار ( $P=0/000$ ) بین این دو متغیر است. ضریب همبستگی محاسبه شده بین غبار با ولتاژ منفی (۰/۵۵-) گزارش شد که نشان می دهد که با افزایش ولتاژ، غبار کاهش می یابد ( $P=0/000$ ). همچنین ضریب همبستگی درجه حرارت با غبار در سطح ۹۹٪ برابر ۰/۳۴ و مثبت ارزیابی شد و همبستگی بین این دو متغیر نیز معنی دار بود ( $P=0/000$ ). نتایج مذکور نشان دهنده وجود بیشترین رابطه بین ولتاژ و غبار است.

جدول ۱- ضریب همبستگی بین غبار و متغیرهای الکتروفیلتر

| پارامتر | غبار | فشار | ولتاژ | دما   |
|---------|------|------|-------|-------|
| غبار    | ---  | ۰/۴۵ | -۰/۵۴ | ۰/۳۴  |
| فشار    | ---  | ---  | -۰/۴۴ | ۰/۱۷  |
| ولتاژ   | ---  | ---  | ---   | -۰/۴۳ |
| دما     | ---  | ---  | ---   | ---   |

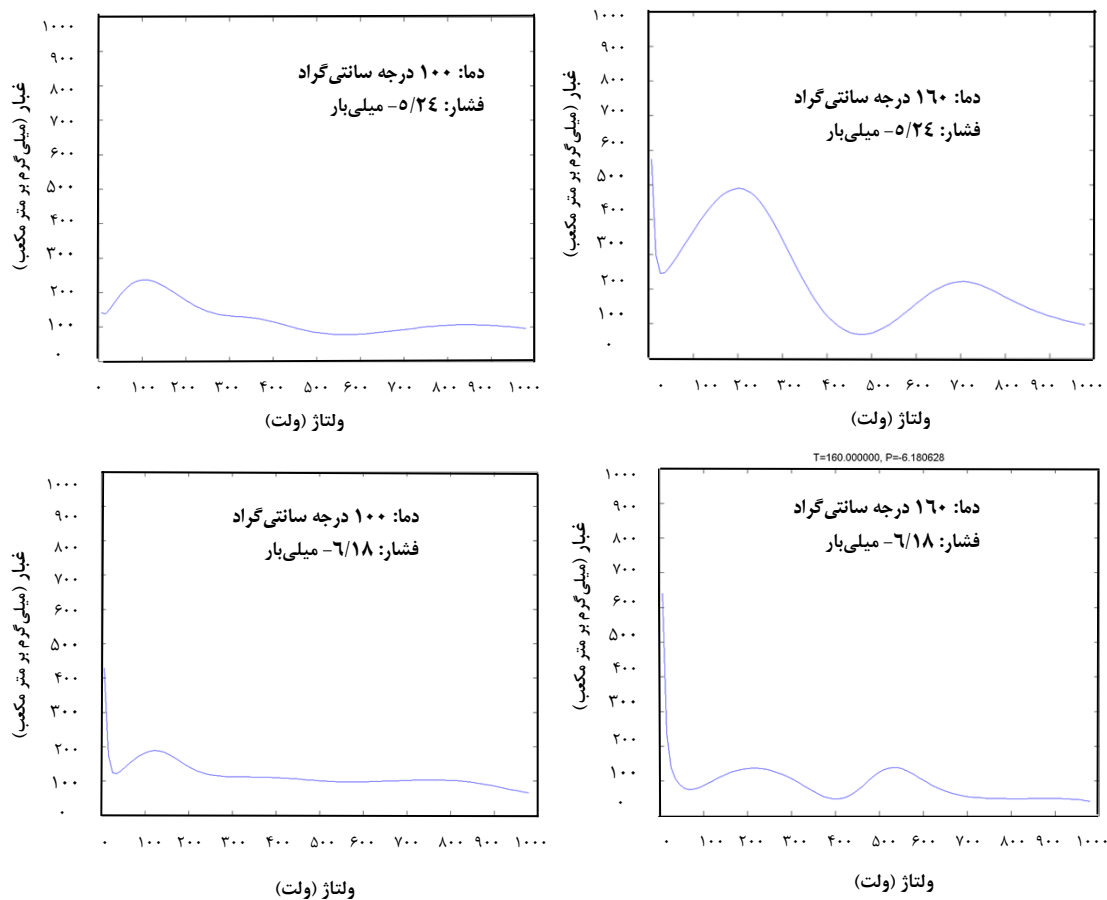
**مدل سازی با شبکه عصبی پرسپترون (MLP) و تابع شعاعی پایه (RBF):** در مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون (MLP) استفاده شده در این مطالعه تعداد نورون های لایه اول و دوم پنهان به ترتیب ۲۰ و ۹ نورون بود. حداکثر تعداد تکرار یادگیری (Epoch) ۱۰۰۰ اما عموماً در کمتر از ۳۰ تکرار شبکه همگرا شد. برای سایر پارامترهای شبکه عصبی از پیش فرض نرم افزار MATLAB استفاده گردید. نتایج مقایسه بین خروجی مدل شبکه عصبی MLP و اندازه گیری های واقعی غلظت غبار در شکل ۵ نشان داده شده است.



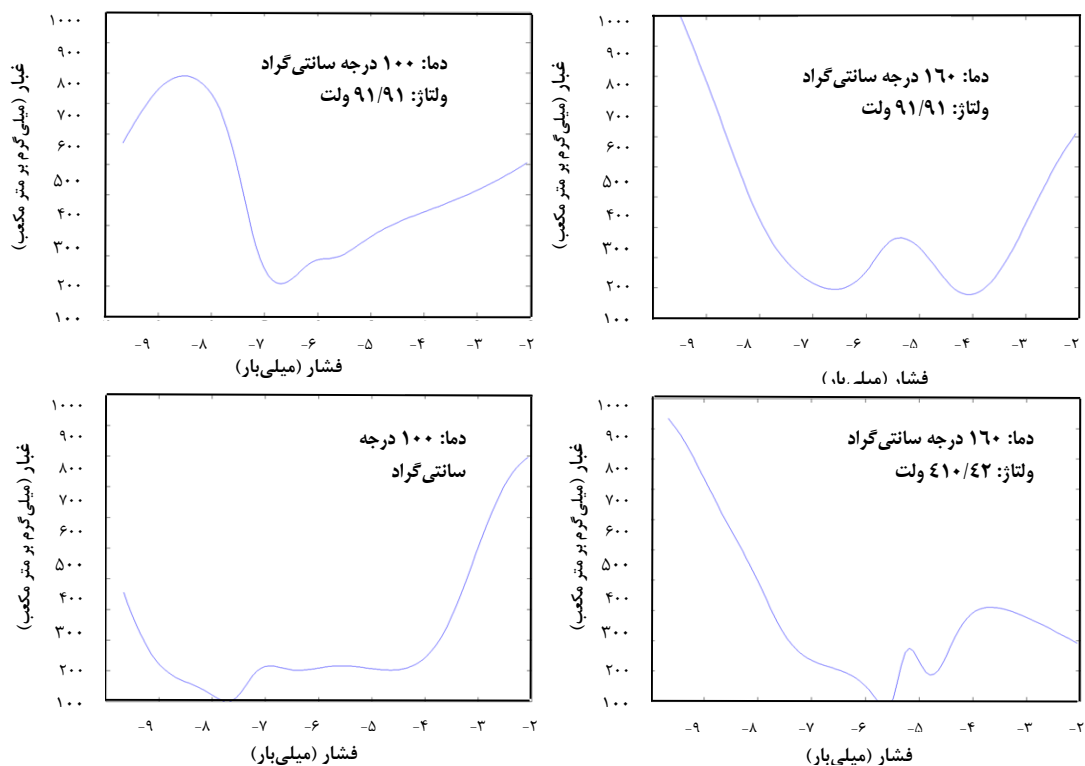
شکل ۵- نمایش اعتبارسنجی کل مدل شبکه عصبی برای MLP (A)، همبستگی بین داده‌های اصلی و پیش‌بینی برای غلظت غبار با استفاده از مدل پرسپترون (B)، مقایسه همبستگی بین مدل RBF و MLP با داده‌های غبار (C) و نمایش اعتبارسنجی کل مدل شبکه عصبی برای RBF (D)

میزان ضریب همبستگی  $0.78$  و جذر میانگین مربعات خطای کل نیز  $1/16$  به دست آمد. نتایج حاصل نشان داد که تأثیر پارامترها بر میزان خروج غبار آلاینده بسیار حائز اهمیت است. بدین ترتیب بین پارامترها و متغیرهای مهم الکتروفیلتر و غلظت غبار که از رابطه غیر خطی برخوردار می‌باشد این امکان فراهم شد تا با کمک شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهینه‌ای ارائه شود. از مجموع  $5048$  داده،  $80\%$  برای آموزش شبکه و مابقی برای تست در نظر گرفته شد. شکل ۵ نمایش اعتبارسنجی کل مدل شبکه عصبی برای RBF و مقایسه همبستگی بین مدل RBF و MLP با داده‌های غبار را نشان می‌دهد. همچنین نتایج تغییرات غبار همزمان با تغییرات ولتاژ، فشار و دما در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. چون برای هر پارامتر دو گروه در نظر گرفته شده است، بنابراین ۴ نمودار مختلف برای آن وجود خواهد داشت که پیش‌بینی و ارائه راهکار کنترلی جهت کاهش کنترل غبار خروجی از این طریق ممکن است.

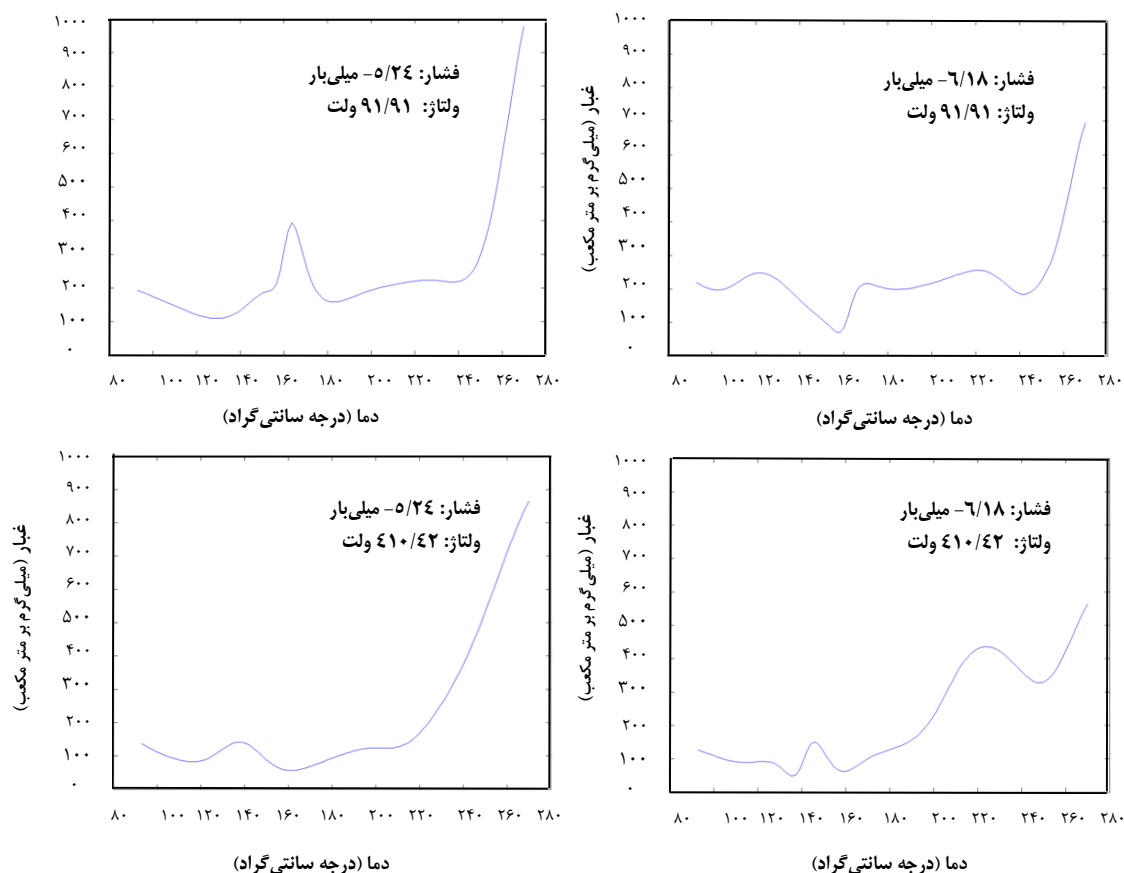
**عملکرد سیستم الکتروفیلتر در کنترل غبار:** بازدهی به دست آمده از طریق نمونه‌برداری با بازدهی تئوری ESP مقایسه گردید. بازدهی اسمی سیستم ESP برابر  $99/99$  درصد و میانگین بازدهی به دست آمده از این مطالعه از طریق نسبت بار ورودی و خروجی برای این سیستم  $99/23$  می‌باشد (جدول ۲).



شکل ۶- نمودار تغییر آلاینده گی غبار با تغییرات ولتاژ با ثابت نگه داشتن مقادیر دما و فشار



شکل ۷- نمودار تغییر آلاینده گی غبار با تغییرات فشار با ثابت نگه داشتن مقادیر دما و ولتاژ



شکل ۸- نمودار تغییر آلاینده‌گی غبار با تغییرات دما با ثابت نگه داشتن مقادیر فشار و ولتاژ

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری و ارزشیابی ذرات معلق قبل و بعد سیستم الکتروفیلتر

| تعداد نمونه‌ها | دمای گاز<br>(سانتی گراد) | فشار<br>(میلی بار) | سرعت گاز<br>(متر بر ثانیه) | مدت زمان<br>(دقیقه) | حجم (لیتر بر<br>دقیقه) | غبار<br>(میلی گرم بر<br>متر مکعب) | عملکرد % |
|----------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|----------|
| ۱              | ورودی ۵۵                 | ۸۰۷                | ۲۵                         | ۱۵                  | ۷/۵                    | ۸۷۰۰                              |          |
|                | خروجی ۸۷                 | ۸۵۴/۱              | ۱۰/۹                       | ۱۵                  | ۸                      | ۶۸/۸                              |          |
| ۲              | ورودی ۶۱                 | ۸۰۷/۵              | ۲۵                         | ۱۵                  | ۷/۵                    | ۹۷۵۶                              |          |
|                | خروجی ۷۴                 | ۸۵۳/۴              | ۱۱/۱                       | ۱۵                  | ۹                      | ۱۱۱/۶                             |          |
| ۳              | ورودی ۶۴/۱               | ۸۰۹                | ۲۴                         | ۱۵                  | ۷                      | ۹۷۱۰                              |          |
|                | خروجی ۸۹                 | ۸۵۳                | ۱۰                         | ۱۵                  | ۷/۵                    | ۱۱۰                               |          |
| ۴              | ورودی ۵۵                 | ۸۰۷/۲              | ۲۴/۵                       | ۱۵                  | ۷                      | ۱۱۳۴۰                             |          |
|                | خروجی ۷۷                 | ۸۵۴                | ۱۰                         | ۱۵                  | ۷/۵                    | ۹۷/۴                              |          |
| ۵              | ورودی ۵۳                 | ۸۰۶/۱              | ۲۴                         | ۱۵                  | ۷                      | ۱۰۱۰۰                             | ۹۹/۲۳    |
|                | خروجی ۸۱                 | ۸۵۳/۶              | ۱۰                         | ۱۵                  | ۷/۵                    | ۶۴                                |          |
| ۶              | ورودی ۵۴                 | ۸۰۹                | ۲۶                         | ۱۵                  | ۷                      | ۱۰۰۰۰                             |          |
|                | خروجی ۷۹                 | ۸۵۵                | ۹/۹                        | ۱۵                  | ۸/۵                    | ۹۸/۴                              |          |

## بحث و نتیجه گیری

نتایج همبستگی بین فشار و غبار حاکی از یک ارتباط مثبت بود. افت فشار که معرف مصرف انرژی الکتریکی فن است، به نسبت هوا به سطح وابستگی دارد. یعنی با افزایش این نسبت، مقدار افت فشار کاهش نشان می دهد. عمده افت فشار در الکتروفیلترها به سیستم جمع آوری و کانال های انتقال دهنده برمی گردد. صفحات توزیع کننده گاز وظیفه توزیع یکنواخت جریان گاز در داخل الکتروفیلتر را به عهده دارد. انواع مختلف این صفحات شامل سطوحی با سوراخ هایی به قطر ۵ تا ۷ سانتی متر و با سطح آزاد کل ۵۰ تا ۶۵ درصد می باشد. مقدار افت فشار به مقدار سطح آزاد این صفحات و اندازه سوراخ ها بستگی دارد. ضریب همبستگی بین غبار با ولتاژ نشان می دهد که با افزایش ولتاژ، غبار کاهش می یابد. عواملی که ولتاژ حداکثر الکتروفیلتر را تعیین می کنند، می تواند به سرعت تغییر کنند. بنابراین کنترل اتوماتیک ولتاژ طوری عمل می کند که بازدهی غبارگیری در حداکثر مقدار عملیاتی باشد. عملکرد الکتریکی در طول میدان نیز تغییر می کند. توربولانس و توزیع گاز، میزان غبار موجود در گاز و اندازه ذرات در ورودی الکتروفیلتر با خروجی آن بسیار متفاوت است. برای بهینه سازی انرژی دادن به الکتروفیلتر، باید الکترودها به طور مکانیکی و الکتریکی در جهت طول تقسیم بندی شوند. در نتیجه مقدار غبار گاز تمیز خروجی به صورت تابعی از تعداد میدان های الکتریکی مستقل که در آن سطح صفحات جمع کننده ثابت می باشد، رابطه عکس دارد، یعنی با افزایش تعداد میدان های الکتریکی مستقل، مقدار غبار باقیمانده کاهش می یابد. ضریب همبستگی درجه حرارت با غبار مثبت ارزیابی شد. مقاومت الکتریکی ذرات با افزایش دمای گاز بیشتر می شود. این مسئله سبب کاهش عملیات مؤثر غبارگیری می گردد و باید از آن اجتناب نمود. از طرف دیگر، کاهش زیاد درجه حرارت، مخلوط گازی را به نقطه شبنم نزدیک می نماید که خطر پوسیدگی و گرفتگی در داخل الکتروفیلتر و کانال های رابط را به دنبال خواهد داشت و از این پیشامد باید دور شد. در نتیجه بهترین دامنه حرارتی جهت بازدهی بهینه فیلترهای الکتریکی دمای بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد تعیین می شود. معمولاً بهتر است درجه حرارت گاز هنگامی که کوره توأم با آسیاب کار می کند به حد پایین و زمانی که آسیاب در مدار نیست به حد بالای دامنه تغییرات دما نزدیک باشد (Chehregani, 2003).

در این تحقیق از شبکه چهار لایه پرسپترون (با احتساب لایه های ورودی و خروجی) استفاده شد که با توجه به حجم داده ها این شبکه جواب بهینه ای داشته است. برای جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه که باعث افزایش خطا در شبکه می گردید، داده های تأیید در شبکه مورد استفاده قرار گرفت. لازم به توضیح است که هدف از این پژوهش پیشنهاد و ارائه مدل بهینه جهت کاهش میزان غبار آلاینده از سیستم الکتروفیلتر بود. سیستم الکتروفیلتر کارخانه سیمان زاوه در حالت نرمال و شرایط پایدار، میزان غبار خروجی آن ۵۴ میلی گرم بر متر مکعب می باشد و در شرایط غیر نرمال این میزان به ۵۵۰ میلی گرم بر متر مکعب و حتی بیشتر نیز خواهد رسید. در این شرایط کنترل و پیش بینی مناسب جهت پایین آوردن میزان گرد و غبار خروجی به مراتب دشوار است. شبکه RBF می تواند تا ۴۰۰۰ نورون در لایه پنهان داشته باشد اما در مدل مطالعه حاضر وقتی تعداد نورون ها خیلی افزایش داده شدند، دقت روی داده های آموزشی زیاد شد ولی روی داده های تست اثر معکوس داشت. در نتیجه تعداد نورون ها متناظر با MLP و شرایط یکسان با این شبکه ۱۸۰ تا در نظر گرفته شد با این تفاوت که در بالا هم ذکر شد لایه پنهان در MLP دوتا بود که لایه اول ۹ نورون و لایه دوم ۲۰ نورون در نظر گرفته شده بود اما با توجه به اینکه در RBF بیش از یک لایه پنهان نمی توان داشت مضرب دو لایه MLP برای RBF انتخاب شد (۱۸۰ نورون).

با توجه به شکل ۵ ضریب R رگرسیون برای مدل RBF برابر ۰/۶۸ می باشد که نسبت به مدل MLP کمتر است در نتیجه خطای بالاتری دارد. نتایج حاصل از مدل سازی هم گواه این حقیقت است که میزان MSE در مدل MLP برای داده های آموزش ۱/۳۶ و برای داده های تست ۲/۷۸ می باشد. همچنین میزان MSE در مدل RBF برای داده های آموزش ۱/۳۹ و برای داده های تست ۳/۱۵ می باشد. میزان RMSE برای شبکه RBF (داده های آموزش) برابر ۱/۱۷ گزارش شد. با مقایسه میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا برای هر دو مدل مشاهده می شود که مدل MLP می تواند پیش بینی مناسب تری را نسبت به مدل RBF ارائه کند. Noorani و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه ای به پیش بینی غلظت آلاینده های SO<sub>2</sub> و NO در شهر تبریز با استفاده از سیستم شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی فازی پرداختند. در این مطالعه از دما، سرعت باد، و رطوبت به همراه غلظت آلاینده ها استفاده گردید. نتایج حاکی از این بود که هر دو روش مورد استفاده نتایج مناسبی را ارائه دادند. در مطالعه Shokati

و همکاران (۲۰۲۱) از شبکه‌های عصبی CFB، FFB، و MLP برای تعیین نقاط بهینه‌ی احداث نیروگاه‌های خورشیدی استفاده شد. براساس این پژوهش شبکه CFB با RMSE برای داده‌های آموزش و تست به ترتیب ۰/۰۸۴ و ۰/۰۶۱ به عنوان بهترین شبکه انتخاب شد. مطالعات مختلفی تأکید می‌کنند که شبکه‌های عصبی کارایی بالایی در مدل سازی انتشار غبار دارند (Hosseini, 2021). طبق نتایج، آنالیز حساسیت ولتاژ مهمترین پارامتر در کنترل غبار خروجی است، اگرچه سایر متغیرها نیز کنترل کننده‌های مهمی هستند. به عنوان نمونه ولتاژهای پایین تر از ۲۰۰ ولت غبار خروجی را افزایش می‌دهند. به عنوان مثال نمودار ۶ نشان می‌دهد که در ولتاژهای پایین غلظت غبار به بیش از ۶۰۰ می‌رسد. این در حالی است که در ولتاژ ۵۰۰ ولت مقدار غبار به کمتر از ۱۰۰ میلی گرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد. این مسئله نشان می‌دهد که هر عاملی که سبب افت ولتاژ در الکتروفیلتر گردد مانع کنترل غبار خواهد بود. از طرف دیگر فشارهای بین ۴- تا ۷- میلی بار کمترین میزان غبار خروجی را داشته و در خارج از این محدوده گرد و غبار به شدت افزایش می‌یابد. همچنین از این نمودارها برای آنالیز حساسیت استفاده می‌شود به طوری که مشخص می‌شود کدام متغیر ورودی سهم بیشتری در تأثیرگذاری بر متغیر خروجی دارد (Noori et al., 2008). با توجه به فرضیه بیان شده که الکتروفیلتر بازدهی بالایی در حذف ذرات معلق دارد و با در نظر داشتن به این مسئله که ۱۵ سال از بهره برداری الکتروفیلتر کارخانه سیمان می‌گذرد باید بیان کرد که با کاهش ۷۶/۰ درصدی، عملکرد الکتروفیلتر نسبت به عمر مفید الکتروفیلترها (۱۵ سال) کاهش چشمگیری نداشته است و در واقع آزمون فرضیه مرتبط با عملکرد الکتروفیلتر پذیرفته می‌شود. به گفته کارشناسان واحد تأسیسات کارخانه سیمان زاوه علت اصلی کاهش عملکرد سیستم الکتروفیلتر خوردگی صفحات می‌باشد. نمودار ۸ نشان می‌دهد که در دمای بالا غلظت غبار به بیش از ۸۰۰ میلی گرم بر متر مکعب هم می‌رسد. این در حالی است که در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد مقدار غبار به حدود ۱۰۰ میلی گرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد.

چگونگی فرآیند غبارگیری در سیستم ESP سیمان، علاوه بر فاکتورهای مورد بررسی با پارامترهایی مانند غلظت غبار، مقاومت الکتریکی ذرات، مقدار و نوع سوخت، مقدار مواد خام ورودی، و حجم گاز ارتباط مستقیم دارند. با توجه به پارامترهای ذکر شده فرآیند غبارگیری در الکتروفیلتر به منظور تضمین کمترین میزان غبار خروجی کنترل می‌شوند. در فرآیند تولید سیمان شرایط همیشه یکسان نیست و تغییرات رطوبت غبار، خاصیت مواد معدنی، خروج آسیاب مواد از مدار و غیره سبب می‌گردد که خاصیت گاز حاوی غبار ورودی به الکتروفیلتر نیز از حالت نرمال خارج گردد که در اینجا سیستم الکتروفیلتر مانند قبل قادر نیست به حالت بهینه در جذب ذرات عمل کند. بنابراین باید سیستم الکتروفیلتر و پارامترهای دیگر را مطابق با شرایط جدید جهت افزایش کارایی الکتروفیلتر، مجدداً تنظیم کرد. پارامترهای داخلی الکتروفیلتر فشار، دما، و ولتاژ است که منحصر به شرایط داخل الکتروفیلتر هستند و از آنجا که تمرکز این مطالعه بر عملکرد الکتروفیلتر تحت تأثیر پارامترهای اصلی و داخلی بوده، در این مطالعه بررسی شده‌اند. اما پارامترهایی که در بالا اشاره شد عمدتاً خارج از سیستم الکتروفیلتر تغییر کرده و بر غبار خروجی از الکتروفیلتر اثر می‌گذارند که می‌توان در یک مدل شبکه عصبی تأثیرات آنها را نیز بررسی نمود. با توجه به مطالعه انجام شده موارد زیر قابل نتیجه گیری است:

۱- در این پژوهش با سه پارامتر در دسترس (ولتاژ، فشار، و دما) ضریب همبستگی و خطای مورد قبول از طریق شبکه عصبی MLP به دست آمد و این یک نتیجه موفق است. اگر شبکه عصبی به درستی آموزش داده شود، می‌تواند روشی بسیار خوب و دقیق و سریع برای حل مسائل پیچیده و زمان بر باشد. آنالیز حساسیت نشان داد که تغییرات ولتاژ تأثیر مهمی بر میزان غبار تولیدی نسبت به سایر پارامترها می‌گذارد. کارشناسان صنایع سیمان با به کارگیری شبکه عصبی ارائه شده در این پژوهش می‌توانند کمترین میزان غبار خروجی را عملیاتی نمایند.

۲- با توجه به این مسئله که شرکت سیمان در هر ساعت از واحد ESP یک تن غبار استحصال می‌کند و با کاهش عملکرد این سیستم حجم به سزایی غبار را از دست می‌دهد موضوع کنترل غبار ابتدا از لحاظ محیط زیست و سلامت کارکنان این شرکت و در مرحله بعد از نظر اقتصادی حائز اهمیت بوده و کنترل غبار را کاملاً ضروری می‌نماید.

۳- در صورتی که جنس ذرات، مقاومت الکتریکی ذرات، رطوبت و نقطه شبنم تغییر کند پیش بینی و حالت بهینه برای تنظیم پارامترهای کلیدی مثل درجه حرارت، ولتاژ و فشار جهت عملکرد مناسب الکتروفیلتر که از حالت نرمال و طبیعی خود خارج شده سخت خواهد بود.

بررسی تأثیر پارامترهای سرعت ذرات، مقاومت الکتریکی ذرات، رطوبت و نقطه شبنم بر میزان غبار خروجی الکتروفیلتر در انواع شبکه های عصبی و ارائه بهترین مدل از طریق مقایسه آنها پیشنهاد این پژوهش است. مقدار و نوع سوخت، مقدار مواد خام ورودی، و حجم گاز نیز می توانند بر میزان غبار خروجی تأثیر گذار باشند که می توان در تحقیقات بعدی این پارامترها را نیز بهینه نمود.

## References

- Anwar, Kh., Deshmukh, S., 2018. Assessment and mapping of solar energy potential using artificial neural network and GIS technology in the Southern part of India. *International Journal of Renewable Energy Research* 8(2), 974-985.
- Atabati, A., Adab, H., Zolfaghari, G., Nasrabadi, M., 2022. Modeling groundwater nitrate concentrations using spatial and non-spatial regression models in a semi-arid environment. *Water Science and Engineering* 15(3), 218-227.
- Chehregani, H., 2003. *Environmental engineering in the cement industry*. Hazeq Publications, Tehran, 1026 pages.
- Chiu, M., Lin, G., 2004. Collaborative supply chain planning using the artificial neural network. *Journal of Manufacturing Technology Management* 15(8), 787-796.
- Dorffner, G., 1996. Neural networks for time series processing. *Neural Network World*.
- Esmaili Sari, A., Zolfaghari, G., Ghasempouri, S.M., Shayegh, S.S., Hasani Tabatabaei, M., 2007. Effect of age, gender, years of practice, specialty and number of amalgam restorations on mercury concentration in nails of dentists practicing in Tehran. *Journal of Iranian Dental Association* 19(1), 97-104. (in Persian with English abstract).
- Faradars, 2024. <https://blog.faradars.org> (accessed February 2024).
- Gardner, M., Dorling, S., 1998. Artificial neural networks (the multilayer perceptron) a review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment* 32(14), 2627-2636.
- Haq Moradkhani, H.R., Issaie, A., Shahu, A., 2013. Measuring and investigating the amount of pollutant suspended particles exiting from Ardabil cement factory and providing its control solutions. The 6th Transregional Conference on New Developments in Engineering Sciences.
- Hosseini Shahpariyan, N., Firozi, M.A., Hosseini Kahnoj, S.R., 2021. Application of Artificial Neural Network and Regression Model to Predict the Phenomenon of Dust in the City of Ahvaz. *Human and Environment* 18(3), 13-24. (In Persian)
- Huang, M., Terng, J., Chen, L., 2014. Predicting air pollutant emissions from a medical incinerator using grey model and neural network. *Applied Mathematical Modelling* 39, 1513-1525.
- Ilamathi, p., Selladurai, V., Balamurugan, K., 2012. Predictive modelling and optimization of power plant nitrogen oxides emission. *Institute of Advanced Engineering and Science* 1(1), 11-18.
- Khodaparast Shirazi, J., Sadeghi, Z., 2016. Forecasting seafood production in Iran using the ARIMA and Artificial Neural Networks. *Journal of Agricultural Economics Research* 8(31), 145-166. (In Persian)
- Kia, M., 2011. *Neural networks in MATLAB*. Kian University Press, Tehran, 412 p.
- Kolehmainen, M., Martikainen, H., Ruuskanen, J., 2001. Neural networks and periodic components in air quality forecasting. *Atmospheric Environment* 35(5), 815-825.
- Messikh, N., Bougdah, N., Bousba, S., Djazi F., 2020. Modeling the adsorption of chlorobenzene on modified bentonite using an artificial neural network. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 3, 100026.
- Noorani, V., Karimzadeh, H., Najafi, H., Hosseini, A., 2019. Predicting the concentration of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> pollutants in the air of Tabriz using artificial neural network and adaptive neural-fuzzy inference system and comparing the obtained results. Conference: The 5th International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Planning with Sustainable development approach, Shiraz, Iran. (In Persian)
- Noori, R., Ashrafi, Kh., Azhdarpoor, A., 2008. Comparison of ANN and PCA based multivariate linear regression applied to predict the daily average concentration of CO: a case study of Tehran. *Journal of the Earth and Space Physics* 34(1), 135-152. (In Persian)
- Noorpoor, A., Kazemi Shahabi, N., 2014. Dispersion modeling of air pollutants from the Ilam cement factory stack. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 44(1), 107-116.

- Onsori, H., Guderzai, G., Alavi, N.A., 2013. Investigation of air pollutants caused by elements of steam production cycle of Ramin thermal power plant using neural network model. The first national and specialized conference on environmental research in Iran.
- Sadr Mousavi, M.S., Rahimi, A., 2010. Comparison of the results of multilayer perceptron neural networks and multiple linear regressions for prediction of ozone concentration in Tabriz city. *Physical Geography Research* 42(71), 65-72.
- Shokati, H., Kaffash Charandabi, N., 2021. Evaluation and comparison of FFB, CFB, and MLP artificial neural networks for the identification of potential sites for the construction of photovoltaic solar power plants in East Azarbaijan province. *Journal of Geography and Environmental Planning* 31(4), 71-94. (In Persian)
- Sivaneasan, B., Yu, C.Y., Goh, K.P., 2017. Solar forecasting using ANN with fuzzy logic pre-processing. *Energy Procedia* 143, 727-732.
- Taghavi, H., Danesh, S., Mosaedi, A., 2011. Comparison of the effectiveness of artificial neural network and linear regression models in predicting daily carbon monoxide concentration based on meteorological parameters. National conference on air flow and pollution.
- Zolfaghari, G., 2018. Risk assessment of mercury and lead in fish species from Iranian international wetlands. *MethodsX* 5, 438-447.
- Zolfaghari, G., 2023. The first ecological contamination study of avian mercury and lead in southeast Iran, Hamun International Wetlands. *Environmental Science and Pollution Research* 30(42), 96575-96590.
- Zolfaghari, G., Delsooz, M., Rajaei, S., 2016. Study of mercury pollution in water, sediments, and fish from Hamoon International Wetland. *Journal of Water and Wastewater* 27(5), 25-37. (In Persian)
- Zolfaghari, G., Esmaili Sari, A., Ghsempoori, S.M., Ghorbani, F., Ahmadifard, N., Shokri, Z., 2006. The comparison of relation between age, sex and weight with mercury concentration in different tissues of *Chalcalburnus Chalcalburnus* from Anzali wetland, Iran. *Journal of Marine Science and Technology* 5(4-3), 23-31. (In Persian)
- Zolfaghari, G., Kargar, M., 2019. Nanofiltration and microfiltration for the removal of chromium, total dissolved solids, and sulfate from water. *MethodsX* 6, 549-557.