

Functional Analysis of Combustion Products in Heating Systems Assisted by Non-Thermal Plasma Technology: An Experimental Study

Seyed Alireza Babae¹ , Hamidreza Rahmani¹ , Seyedeh Shabnam Azimi Hosseini² , Afshin Emami Bersari³ , Zahra Jahanbakhshi⁴ , Javad Latifi Poshtahani⁵

¹Assistant Prof., Department of Safety, Health and Environmental Engineering (HSE), Faculty of Engineering and Work Safety, Kar higher education institute, Qazvin, Iran. Email: s.alireza_babae@yahoo.com

²**Corresponding Author**, Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran. Email: hamidreza.rahmani5905@iau.ac.ir

³Assistant Prof., Department of Safety, Health and Environmental Engineering (HSE), Faculty of Engineering and Work Safety, Kar higher education institute, Qazvin, Iran. Email: azimi.hosseini@gmail.com

³M.Sc. Student in Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran; Engineering Department Manager, Chauffagekar Industrial Company, Takestan, Iran. Email: a.emami@chauffagekar.ir

⁴Department of Mechanical Engineering, Center of Applied Science and Technology, University of Applied Science and Technology, Qazvin, Iran. Email: ZahraJahanbakhshi13700@gmail.com

⁵M.Sc. Student in Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran. Email: j.latifi@chauffagekar.ir

ARTICLE INFO

Article type
Research Article

Article history
Received: 2026.02.01
Received in revised form: 2026.03.19
Accepted: 2026.03.24
Available online: 2026.03.27

Keywords
Cold plasma reactor
Combustion products
Heating systems
Reduction of environmental pollutants

ABSTRACT

Given the significant contribution of building heating systems to combustion-related pollutant emissions, the application of advanced post-combustion technologies to improve exhaust gas quality and mitigate environmental impacts has become increasingly important. In this study, the performance of a dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma reactor was experimentally investigated in two residential heating systems, including a cast-iron hot-water boiler and a wall-mounted gas water heater. The results demonstrated that the application of cold plasma technology reduced carbon monoxide emissions by 52% and 40% and unburned hydrocarbon emissions by 36% and 50% in the cast-iron boiler and wall-mounted gas water heater, respectively, while also enhancing the oxidation of combustion products. In contrast, nitrogen oxide emissions increased by 44% in the cast-iron boiler and 52% in the wall-mounted gas water heater. Although the findings confirm the high potential of cold plasma technology for reducing major combustion pollutants, they also identify the increase in nitrogen oxides as a critical challenge, highlighting the need to optimize reactor operating parameters to achieve simultaneous control of these pollutants.

Introduction

The widespread use of wall-mounted gas water heaters and cast-iron hot water boilers in residential buildings contributes significantly to urban air pollution through emissions such as carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and unburned hydrocarbons (HC). Despite advances in combustion efficiency, implementing conventional exhaust after-treatment systems in small-scale heating appliances remains challenging due to space limitations, low exhaust temperatures, and economic constraints. Non-thermal plasma (NTP) technology has emerged as a promising low-temperature emission control method because it generates highly reactive species, including atomic oxygen and hydroxyl radicals, without significantly increasing gas temperature. These reactive species can promote oxidation and decomposition of combustion pollutants under practical operating conditions.

In this study, a dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma reactor was experimentally integrated into the exhaust systems of a wall-mounted water heater and a cast-iron boiler operating under real conditions. The main objective was to evaluate the effectiveness of cold plasma technology in reducing combustion-related pollutants in residential heating systems without modifying the combustion chamber or burner structure.

Materials and Methods

A dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma reactor was installed in the exhaust pathway of a wall-mounted gas water heater and a cast-iron hot water boiler. Pollutant concentrations were measured before and after

Cite This Paper:

Babae, Seyed Alireza., Rahmani, Hamidreza., Azimi Hosseini, Seyedeh Shabnam., Emami Bersari, Afshin., Jahanbakhshi, Zahra., & Latifi Poshtahani, Javad. (2026). Functional Analysis of Combustion Products in Heating Systems Assisted by Non-Thermal Plasma Technology: An Experimental Study. *Fuel and Combustion*, 19 (1), 56-77. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.581191.1460> (In Persian)

© The author(s) retain the copyright.

Publisher: [Iranian Combustion Institute \(ICI\)](http://www.iraniancombustioninstitute.com).

ارجاع دهی به این مقاله:



plasma activation under stable operating conditions using a combustion gas analyzer. Experimental measurements were repeated five times to improve repeatability and reliability.

Results and Discussion

The experimental results demonstrated that cold plasma treatment significantly reduced carbon monoxide (CO) and unburned hydrocarbons (HC) in both heating systems. In the cast-iron boiler, CO and HC decreased by approximately 52% and 36%, respectively, while reductions of about 40% and 50% were observed in the wall-mounted water heater. However, unlike CO and HC, nitrogen oxide species increased after plasma activation. NO_x concentration increased by approximately 44% in the cast-iron boiler and 52% in the wall-mounted water heater. Similar increasing trends were observed for NO and NO₂ concentrations. The increase in nitrogen species can be attributed to plasma-induced activation of nitrogen and oxygen molecules inside the DBD reactor. High-energy electrons generated during the discharge process promote NO formation reactions, particularly under conditions of high specific plasma energy and short gas residence time. These findings indicate that NO_x behavior in non-thermal plasma systems strongly depends on operating parameters such as plasma energy density, oxygen concentration, reactor geometry, and residence time. Despite the increase in NO_x, the results confirm that non-thermal plasma effectively enhances oxidation pathways responsible for CO and HC reduction without causing noticeable deterioration in the thermal performance of the heating systems.

Conclusion

This study experimentally investigated the application of a dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma reactor for exhaust emission control in residential heating systems. The results showed that non-thermal plasma effectively reduced carbon monoxide and unburned hydrocarbons in both the cast-iron boiler and wall-mounted water heater. However, increases in NO_x species were also observed under the present operating conditions due to plasma-assisted nitrogen activation reactions. Overall, the findings demonstrate the potential of cold plasma technology as a compact and retrofit-compatible post-combustion treatment method for heating systems. Nevertheless, further optimization of reactor design and operating parameters is required to improve NO_x control performance.

CRedit Author Statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors sincerely thank Chauffagekar Industrial Company for their financial and spiritual support in conducting this research. Special gratitude is extended to Mr Alaei, the CEO of Chauffagekar Industrial Company, who has consistently supported research and scientific activities, contributing to the advancement of knowledge and technology in the country with his generous support. We also express our deepest appreciation to Mr Jafari, the Executive Deputy of the Chauffagekar Industrial Company, who has encouraged the team in scientific and research endeavors. Furthermore, the authors gratefully acknowledge the Higher Education Institute of Kar, Qazvin Branch, and the Applied Science and Technology Training Center of Qazvin, for providing the necessary facilities and conditions to carry out this research.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

Authors declare no conflict of interest.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, artificial intelligence tools were used solely for linguistic editing and structural refinement. The authors carefully reviewed and validated the content and assume full responsibility for the accuracy and integrity of the manuscript.

References

- [1] M. Mahmoud, M. Ramadan, S. Naher, K. Pullen, and A.-G. Olabi, "The impacts of different heating systems on the environment: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 766, Art. no. 142625, Apr. 2021.
- [2] A. Akinmoladun and O. S. Tomomewo, "Advances and future perspectives in post-combustion carbon capture technology using chemical absorption process: A review," *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 16, Art. no. 100461, 2025.
- [3] J.-D. Moon, G.-T. Lee, and S.-T. Geum, "Discharge and NOx removal characteristics of nonthermal plasma reactor with a heated corona wire," *Journal of Electrostatics*, vol. 50, no. 1, pp. 1–15, 2000.
- [4] Y. Liu, J.-W. Wang, J. Zhang, T.-T. Qi, G.-W. Chu, H.-K. Zou, and B.-C. Sun, "NOx removal by non-thermal plasma reduction: Experimental and theoretical investigations," *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 16, pp. 1476–1484, 2022.
- [5] Z. Zhang, Z. Sui, C. Song, W. Lu, X. Fan, H. Li, and P. Wang, "Research status of engine emissions treated by nonthermal plasma," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 29, Art. no. 103007, Feb. 2023.
- [6] J. W. Kim, S. Y. Lee, and H. J. Park, "Uncertainty analysis and repeatability assessment in non-thermal plasma experiments for emission control," *Measurement Science and Technology*, vol. 35, no. 5, Art. no. 055009, May 2024.
- [7] O. Molchanov, K. Krpec, and J. Horák, "NOx removal from small-scale biomass combustion in DC Corona: Influence of discharge polarity on plasma chemical kinetics," *Chemical Engineering Science*, vol. 300, Art. no. 120597, pp. 1–9, 2024.
- [8] D. Lacoste, "Flames with plasmas," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 5405–5428, 2023.
- [9] H. Zhang, Y. Wang, and L. Chen, "Specific energy density and its effect on pollutant removal efficiency in dielectric barrier discharge plasma reactors," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 57, no. 15, Art. no. 155202, Apr. 2024.
- [10] W. Li, A. Alagumalai, Z. Li, and H. Song, "Non-thermal plasma technology for air pollution control and bacterial deactivation," *Cell Reports Physical Science*, vol. 5, no. 7, Art. no. 102092, Jul. 2024.
- [11] Q. Malé, N. Barléon, S. Shcherbanev, B. Dharmaputra, and N. Noiray, "Numerical study of nitrogen oxides chemistry during plasma assisted combustion in a sequential combustor," *Combustion and Flame*, vol. 260, Art. no. 113206, 2024.
- [12] W. Zhao, H. Shen, H. Zhang, B. Li, R. Zhang, Y. Tan, and R. Sun, "Non-thermal plasma and modified catalysts: A synergistic approach to air purification," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 22, Art. no. 100748, May 2025.
- [13] R. Brandenburg, M. Schiorlin, and V. Brüser, "Reactive species generation in dielectric barrier discharges for environmental applications," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 44, no. 2, pp. 521–548, Mar. 2024.



تحلیل عملکردی محصولات احتراق در سامانه‌های گرمایشی تحت تأثیر فناوری پلاسما سرد: یک رویکرد تجربی

سید علیرضا بابایی^۱، حمیدرضا رحمانی^{۲*}، سیده شبنم عظیمی حسینی^۱، افشین امامی برسری^۳، زهرا جهان بخشی^۴
جواد لطیفی پشتهانی^۵

^۱ استادیار، گروه مهندسی ایمنی بهداشت محیط زیست، دانشکده مهندسی و ایمنی کار، موسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران. پست الکترونیکی: s.alireza_babae@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران، پست الکترونیکی: hamidreza.rahmani5905@iau.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی ایمنی بهداشت محیط زیست، دانشکده مهندسی و ایمنی کار، موسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران. پست الکترونیکی: azimi.hosseini@gmail.com

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، مدیر واحد مهندسی، شرکت صنعتی شوافز کار، تاکستان، ایران، پست الکترونیکی: a.emami@chauffagekar.ir

^۵ کارشناسی مهندسی مکانیک، مرکز آموزش علمی کاربردی علوم و فنون، دانشگاه جامع علمی کاربردی، قزوین، ایران. پست الکترونیکی: ZahraJahanbakshi13700@gmail.com

^۵ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران، رییس واحد تحقیق و توسعه، شرکت صنعتی شوافز کار، تاکستان، ایران، پست الکترونیکی: j.latifi@chauffagekar.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
با توجه به سهم قابل توجه سامانه‌های گرمایشی ساختمان در انتشار آلاینده‌های احتراقی، استفاده از فناوری‌های نوین پس احتراقی به منظور بهبود کیفیت گازهای خروجی و کاهش اثرات زیست محیطی ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، عملکرد یک راکتور پلاسما سرد از نوع تخلیه سد دی الکتریک به صورت تجربی در دو سامانه گرمایشی شامل دیگ آب گرم چدنی و آبگرمکن دیواری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از فناوری پلاسما سرد در سامانه‌های دیگ آب گرم چدنی و آبگرمکن دیواری به ترتیب موجب کاهش ۵۲ و ۴۰ درصد انتشار مونوکسید کربن، ۳۶ و ۵۰ درصدی هیدروکربن‌های نسوخته و بهبود نسبی فرآیند اکسیداسیون محصولات احتراق شد. در مقابل، بررسی اکسیدهای نیتروژن حاکی از افزایش ۴۴ درصدی در دیگ آب گرم چدنی و ۵۲ درصدی در آبگرمکن دیواری بود. این پژوهش ضمن اثبات پتانسیل بالای پلاسما سرد در کاهش آلاینده‌های اصلی احتراق، چالش افزایش اکسیدهای نیتروژن را به عنوان یک یافته مهم شناسایی کرده و بر ضرورت بهینه سازی پارامترهای عملیاتی راکتور جهت کنترل همزمان این آلاینده‌ها تأکید می‌کند.	نوع مقاله مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۱۱/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۷ کلیدواژه‌ها: راکتور پلاسما سرد محصولات احتراق سامانه‌های گرمایشی کاهش آلاینده‌ها زیست محیطی

مقدمه

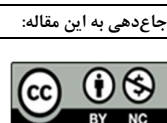
تولید آلاینده‌های حاصل از احتراق در سامانه‌های گرمایش ساختمان یکی از معضلات مهم زیست محیطی در شهرهای بزرگ و پرجمعیت است. پکیج شوافز و آبگرمکن‌های دیواری به دلیل کاربرد گسترده در مجتمع‌های مسکونی و تجاری منبع قابل توجهی از انتشار آلاینده‌های هوا مانند مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربن‌های نسوخته و ذرات معلق هستند [۱]. این آلاینده‌ها در کنار اثرات مخرب زیست محیطی، موجب افزایش هزینه‌های سلامت، تشدید اثرات گلخانه‌ای و کاهش کیفیت

Cite This Paper:

Babae, Seydeh Alireza., Rahmani, Hamidreza., Azimi Hosseini, Seydeh Shabnam., Emami Bersari, Afshin., Jahanbakshi, Zahra., & Latifi Poshtahani, Javad. (2026). Functional Analysis of Combustion Products in Heating Systems Assisted by Non-Thermal Plasma Technology: An Experimental Study. *Fuel and Combustion*, 19 (1), 56-77. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.581191.1460> (In Persian)

© The author(s) retain the copyright.

Publisher: [Iranian Combustion Institute \(ICI\)](http://www.iraniancombustioninstitute.com).



هوای شهری می‌شوند. مقررات جدید زیست‌محیطی در کشورهای صنعتی، استفاده از فناوری‌های پاک‌سازی پس‌احتراق را ضروری کرده است [۲].

در تحقیقات سال‌های دور، مون، لی و گیوم در سال ۲۰۰۰، طی بررسی‌ای با عنوان ویژگی‌های تخلیه و حذف اکسیدهای نیتروژن در راکتور پلاسمای غیرحرارتی با سیم کرونی گرم‌شده، بر روی یک راکتور پلاسمای سرد از نوع تخلیه کرونی در راکتور استوانه به این نتیجه رسیدند که گرم کردن سیم کرونی یک پارامتر کنترلی حیاتی است و با تنظیم دمای سیم در زیر دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، می‌توان راندمان حذف اکسیدهای نیتروژن را برای غلظت‌های پایین تا ۹۶ درصد افزایش داد. [۳]. در پژوهش‌های سال‌های اخیر، لیو و همکاران در سال ۲۰۲۲، در یک بررسی تجربی و نظری با تمرکز بر کاهش اکسیدهای نیتروژن با پلاسمای غیرحرارتی در راکتور تخلیه سد دی‌الکتریک، تأکید کردند که دستیابی به حذف اکسیدهای نیتروژن در دمای پایین ضروری است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شرایط بی‌هوازی و توان تخلیه بالاتر برای حذف مستقیم اکسیدهای نیتروژن مفید است و می‌توان تحت شرایط بهینه به راندمان حذف تا ۹۸/۵ درصد دست یافت [۴]. مولچانوف و همکاران در سال ۲۰۲۴، در مطالعه‌ای بر روی یک بویلر زیست‌توده ۱۵ کیلوواتی به این نتیجه رسیدند که استفاده از تخلیه کرونی جریان مستقیم برای حذف اکسیدهای نیتروژن از احتراق کوچک‌مقیاس زیست‌توده، راندمان حذفی در حدود ۷۸ درصد را به دنبال دارد. [۵]. ژانگ و همکاران در یک مطالعه مروری در سال ۲۰۲۴، کاربرد پلاسمای غیرحرارتی را در کنترل آلاینده‌های خروجی موتورهای احتراقی بررسی کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که حضور گونه‌های فعال نظیر اکسیژن اتمی و رادیکال هیدروکسیل در محیط پلاسما می‌تواند موجب تسریع فرآیند اکسیداسیون و کاهش آلاینده‌هایی نظیر مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و ترکیبات آلی فرار شود. همچنین گزارش شد که ترکیب فناوری پلاسما با کاتالیست‌ها می‌تواند بازده حذف آلاینده‌ها را بهبود دهد [۶]. در پژوهشی دیگر، چاوو و همکاران در سال ۲۰۲۳ عملکرد سامانه‌های احتراقی تحت تأثیر با پلاسما را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از پلاسمای غیرحرارتی می‌تواند موجب بهبود پایداری شعله، تسریع اشتعال و افزایش کیفیت فرآیند احتراق شود. نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که استفاده از پلاسما به‌ویژه در شرایط احتراق رقیق می‌تواند منجر به کاهش برخی آلاینده‌های احتراقی شود [۷].

در مقابل، برخی پژوهش‌ها به چالش‌های مرتبط با تشکیل اکسیدهای نیتروژن در محیط پلاسما اشاره کرده‌اند. مال و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی عددی سینتیک شیمیایی اکسیدهای نیتروژن در احتراق کمک‌گرفته با پلاسما پرداختند آن‌ها گزارش کردند که در برخی شرایط عملیاتی، فعال‌سازی مولکول‌های نیتروژن توسط الکترون‌های پرانرژی می‌تواند موجب افزایش تشکیل مونوکسید نیتروژن شود. آنان بیان کردند که در شرایطی با انرژی ویژه بالای پلاسما و زمان ماند محدود، مسیرهای تشکیل اکسیدهای نیتروژن ممکن است بر فرآیند حذف آن غلبه کند [۸]. نام و همکاران در سال ۲۰۲۴ عملکرد پلاسمای غیرحرارتی را در اکسیداسیون دوده کربنی و بهبود فرآیند حذف آلاینده‌ها بررسی کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که افزایش دمای گاز و حضور گونه‌های فعال تولیدشده در محیط پلاسما می‌تواند فرآیند اکسیداسیون آلاینده‌های کربنی را تسریع کند. همچنین این مطالعه نشان داد که گونه‌های فعال نظیر اکسیژن اتمی و رادیکال‌های آزاد نقش مهمی در تجزیه ترکیبات آلاینده و بهبود راندمان حذف آن‌ها دارند [۹]. علاوه بر کاربردهای احتراقی، پژوهش‌های جدید به استفاده از پلاسمای غیرحرارتی در فرآیندهای زیست‌محیطی و کاهش آلاینده‌های صنعتی نیز پرداخته‌اند. مولتنی و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان دادند که استفاده از راکتورهای پلاسمای غیرحرارتی در سامانه‌های صنعتی می‌تواند ضمن کاهش مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌های کربنی را نیز به میزان قابل توجهی کاهش دهد. نتایج آنان بیانگر ظرفیت بالای فناوری پلاسما در سامانه‌های کنترل آلاینده‌گی نسل جدید بود [۱۰]. پانگ

و همکاران در سال ۲۰۲۵، حذف هم‌زمان ذرات معلق، مونوکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد از گازهای دودکش را با استفاده از پلاسمای غیرحرارتی تخلیه سد دی‌الکتریک بررسی کردند. آنان یک سامانه آزمایشگاهی شامل راکتور پلاسمای هم‌محور و غبارگیر الکترواستاتیکی دومرحله‌ای طراحی و ساخته و عملکرد آن را به روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که گونه‌های فعال تولیدشده در محیط پلاسما، به‌ویژه رادیکال‌های اکسیژن و هیدروکسیل و همچنین ازن، نقش مؤثری در اکسیداسیون و حذف آلاینده‌ها دارند. در شرایط بهینه، با انرژی ویژه ورودی ۸۰۰ ژول بر لیتر و رطوبت نسبی ۴۵ درصد، راندمان حذف ذرات معلق ریز، دی‌اکسید گوگرد و مونوکسید نیتروژن به‌ترتیب به ۹۹/۳، ۹۸/۴ و ۸۶/۷ درصد رسید. همچنین مشخص شد که افزایش کنترل‌شده رطوبت، به دلیل افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، موجب بهبود راندمان حذف آلاینده‌ها می‌شود. [۱۱]. نیمیو و همکاران در سال ۲۰۲۶ به بررسی عملکرد هم‌زمان پلاسمای غیرحرارتی و فوم متخلخل نیکل در کاهش ذرات معلق و آلاینده‌های گازی خروجی موتورهای بنزینی تزریق مستقیم پرداختند. در این پژوهش، راکتور پلاسمای غیرحرارتی همراه با فوم نیکل در ضخامت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت و اثر ولتاژ تخلیه بر کاهش آلاینده‌ها و سازوکار اکسیداسیون ذرات معلق ارزیابی شد. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری، تغییرات ساختاری ذرات دوده در فرآیند اکسیداسیون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فوم نیکل به دلیل سطح ویژه بالا و ویژگی‌های کاتالیستی، موجب افزایش تماس آلاینده‌ها با گونه‌های فعال تولیدشده در پلاسما شده و راندمان به دام‌اندازی و اکسیداسیون ذرات معلق را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ولتاژ تخلیه در محدوده ۶ تا ۸ کیلوولت بهترین عملکرد را در کاهش ذرات معلق و هیدروکربن‌ها با حداقل تولید محصولات جانبی نشان داد. با این حال، در ولتاژهای بالاتر، تشکیل آلاینده‌های ثانویه، به‌ویژه اکسید نیتروژن دوظرفیتی و اکسید نیتروژن تک‌ظرفیتی، افزایش یافت که بیانگر ضرورت بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی راکتور پلاسما برای دستیابی به حداکثر راندمان و حداقل تولید آلاینده‌های ثانویه است. [۱۲]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۵ در یک مقاله مروری، پیشرفت‌های اخیر در زمینه ترکیب پلاسمای غیرحرارتی و کاتالیست‌های اصلاح‌شده برای پالایش آلاینده‌های هوا را بررسی کردند. در این پژوهش، اصول تولید پلاسما، سازوکار برهم‌کنش پلاسما و کاتالیست، تغییرات فیزیکی و شیمیایی ایجادشده در سطح کاتالیست‌ها و نقش این تغییرات در افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که پلاسمای غیرحرارتی با تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن، موجب افزایش فعالیت، انتخاب‌پذیری و پایداری کاتالیست‌ها شده و راندمان حذف آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات آلی فرار و ذرات معلق را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین نویسندگان بیان کردند که ترکیب پلاسما و کاتالیست نسبت به استفاده مستقل از هر یک، مصرف انرژی کمتر، عملکرد بهتر در دماهای پایین و تولید آلاینده‌های ثانویه کمتری داشته و یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌ها برای پالایش هوای آلوده در آینده به شمار می‌رود. با این حال، بهینه‌سازی نوع راکتور، انتخاب کاتالیست مناسب و درک دقیق سازوکارهای هم‌افزایی میان پلاسما و کاتالیست، همچنان از مهم‌ترین چالش‌های این حوزه محسوب می‌شود. [۱۳].

در این پژوهش، تأثیر نصب یک راکتور پلاسمای سرد از نوع تخلیه سد دی‌الکتریک در مسیر خروجی دودکش دو سامانه گرمایشی شامل پکیج شوفاژ دیواری و آبگرمکن دیواری بر کاهش آلاینده‌ها به‌صورت تجربی بررسی و نتایج آن با توجه به سینتیک واکنش‌های پلاسما تحلیل شد. طی دو دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاربرد پلاسما سرد در علوم مختلف صورت گرفته است. با وجود این پژوهش‌ها، بررسی‌های میدانی بر روی تجهیزات حرارتی غیرصنعتی مانند دیگ‌های آب‌گرم چدنی و پکیج‌های دیواری چگالشی و غیرچگالشی و آبگرمکن دیواری بسیار محدود است و اغلب پژوهش‌ها بر دودکش‌های

صنعتی یا موتورهای درون سوز متمرکز بوده اند. اهمیت این پژوهش در ارائه یک کاربرد عملی و مهندسی شده با هزینه بسیار پایین برای سامانه های گرمایشی ساختمان ها است.

مواد و روش تحقیق

تجهیزات مورد استفاده

دیگ آب گرم چدنی ۹ پره با ظرفیت ۹۷ کیلووات (شکل ۱).



Figure 1 - Cast iron hot water boiler with 9 fins, capacity 97 kW

شکل ۱- دیگ آب گرم چدنی ۹ پره با ظرفیت ۹۷ کیلووات

مشخصات فنی دیگ آب گرم چدنی در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات فنی دیگ آب گرم چدنی با ظرفیت ۹۷ کیلووات

Table 1- Technical specifications of cast iron hot water boiler with capacity 97 kW

Description	Unit	Value
Boiler model	—	S300-9
Number of fins	Pcs	9
Thermal power	kw	97
Water volume of boiler	lit	40.3
Boiler flue outlet diameter	mm	124
Combustion chamber volume	m ³	0.726
Burner port diameter	mm	110
Boiler length (A)	mm	961
Maximum allowable operating temperature	°C	105
Maximum allowable operating pressure	bar	4
Gaseous fuel type	Natural gas	—

مشعل گازسوز با ظرفیت ۱۲۰ کیلووات در شکل ۲ قابل مشاهده است.



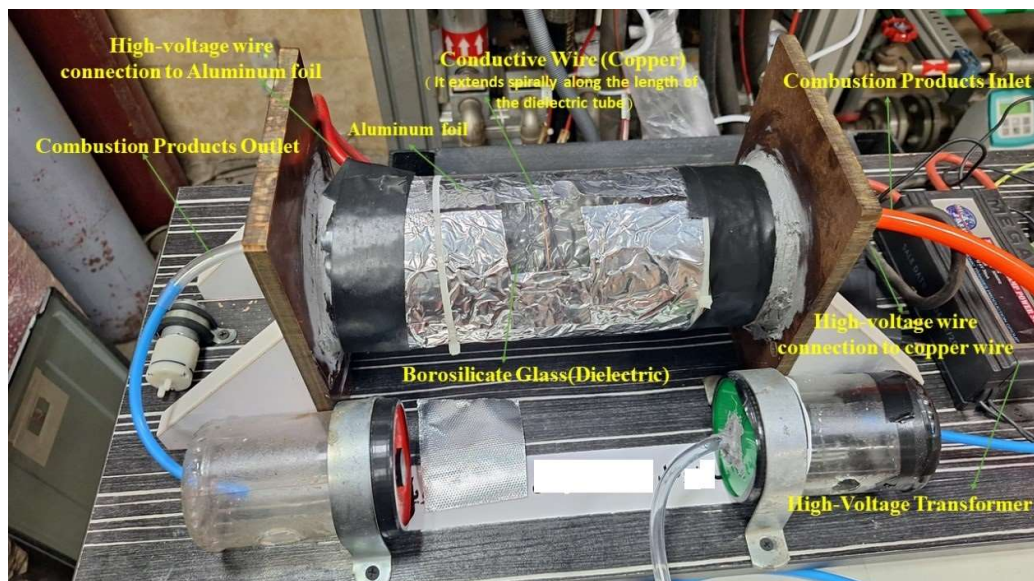
شکل ۲- مشخصات فنی مشعل گازسوز با ظرفیت ۱۲۰ کیلووات
Figure 2 - Technical specifications of gas burner with capacity 120 kW

مشخصات فنی مشعل مورد تست در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فنی مشعل گازسوز ۱۲۰ کیلووات
Table 2- Technical specifications of gas burner, 120 kW

Specifications	Unit	Value
Burner model	-	CKI-G120
Minimum capacity	kw	47
Maximum capacity (at sea level)	kw	124
Gas type and heating value range	kcal/m ³	(Natural Gas) 7900 – 9450
Suitable gas pressure	mbar	15 – 40
Voltage, operating frequency, and power consumption	V- Hz- W	220 – 50 – 140
Motor speed	RPM	2800
Maximum gas consumption	m ³ /h	13

نمای کلی راکتور پلاسمای سرد از نوع تخلیه سد دی‌الکتریک و اجزای مهم آن در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- نمای کلی راکتور پلاسمای سرد از نوع تخلیه با سد دی‌الکتریک و اجزای مهم آن
Figure 3 – A view of cold plasma reactor of dielectric barrier discharge type and its main components

گاز سنج (آنالایزر گاز) کالیبره شده مورد استفاده در این مطالعه، دستگاه Testo مدل ۳۴۰ با خطای اندازه‌گیری $\pm 2\%$ ppm است. به منظور اندازه‌گیری دبی ورودی دود به پلاسما می‌بایست سرعت دود را محاسبه کنیم که به همین منظور از دستگاه اندازه‌گیری سرعت هوا Testo مدل ۴۲۵ کالیبره شده استفاده شد.

مشخصات راکتور

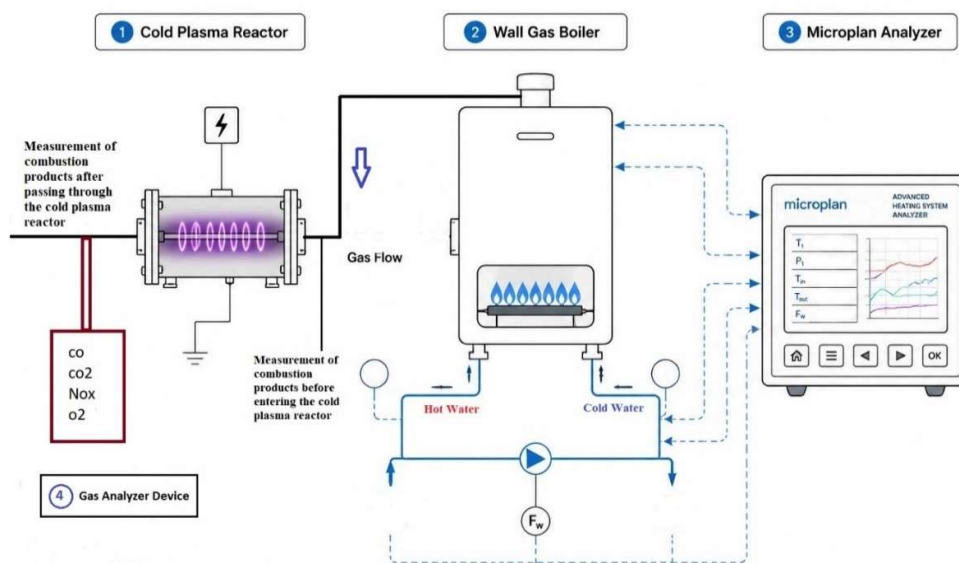
در جدول ۳ مشخصات راکتور قابل مشاهده است.

جدول ۳- مشخصات ابعادی و فنی راکتور

Table 3- Dimensional and technical specifications of the reactor

Parameter	Unit	Value
Voltage	kv	12
Current	mA	30
Input Power	W	90
Reactor Type	—	Dielectric Barrier Discharge (DBD)
Dielectric Material	—	Borosilicate Glass
High-Voltage Electrode Material	—	Copper
Outer Coating Material	—	Aluminum Foil
Reactor Chamber Volume	L	2.12
Borosilicate Pipe Diameter	mm	100
Borosilicate Pipe Length	mm	270
Copper Wire Diameter	mm	1
Gas Inlet/Outlet Diameter	mm	20
Copper wire spacing	mm	22
Dielectric thickness	mm	5
Type of power supply	—	high-voltage neon transformer

شکل ۴ طرح شماتیک راکتور پلاسمای سرد و آبگرمکن دیواری مورد استفاده را نشان می‌دهد:



شکل ۴- طرح شماتیک راکتور پلاسمای سرد و آبگرمکن دیواری

Figure 4 - Schematic diagram of the cold plasma reactor and heater water

در جدول ۴ مشخصات فنی آبگرمکن دیواری مورد آزمایش ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی آبگرمکن دیواری
Table 4- Technical specifications of the wall-mounted water heater

Parameter	Value
Model	W118IF
Product Classification	H2H3B/P
Product Type	B52
Fuel Type	Natural Gas
Gas Pressure Rate	20 mbar
Flow Rate Range	5–18 L/min
Minimum Water Inlet	3 L/min
Input Power	34 kW
Domestic Hot Water Pressure Range	0.025–0.8 MPa
Specific Hot Water Flow Rate	18 L/min ($\Delta t=25^{\circ}\text{C}$)
Thermal Efficiency	93%

انرژی ویژه پلاسما

با توجه به محدودیت ابعاد راکتور پلاسمای سرد، کل جریان گاز خروجی دودکش از ناحیه تخلیه عبور داده نشد و تنها بخشی از آن به صورت جریان فرعی از طریق یک لوله انشعابی با قطر ۳۰ میلی‌متر وارد راکتور شد. از این رو، تمامی محاسبات دبی حجمی و انرژی ویژه بر اساس جریان فرعی انجام شد [۱۴]. انرژی ویژه پلاسما از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$SED = \frac{P}{Q} \quad (1)$$

که در آن

P = توان ورودی پلاسما (W)

Q = دبی گاز (L/s)

مقدار انرژی ویژه ۶۰/۳۳ kJ/m^3 به دست آمد که در محدوده مقادیر گزارش شده برای سامانه‌های پلاسمای غیرحرارتی قرار دارد [۱۵–۱۹].

همچنین توان حرارتی دیگ مورد بررسی ۹۷ کیلووات است، در حالی که توان الکتریکی مصرفی راکتور تخلیه سد دی‌الکتریک ۹۰ وات است که نسبت توان پلاسما به توان حرارتی مشعل کمتر از چند درصد است. بنابراین تغییرات مشاهده شده در ترکیب شیمیایی گاز خروجی را نمی‌توان به افزایش کلی انرژی سیستم نسبت داد. در نتیجه، عملکرد تخلیه سد دی‌الکتریک را می‌توان به عنوان یک فرآیند تحریک شیمیایی غیرحرارتی در نظر گرفت که بدون افزایش محسوس دمای حجمی، موجب تقویت مسیرهای اکسیداسیون مونوکسید کربن شده است. به منظور بررسی مقیاس‌پذیری سامانه، توان الکتریکی موردنیاز برای پردازش کل گازهای خروجی یک مشعل ۱۲۰ کیلوواتی نیز به صورت تقریبی محاسبه شد. با فرض ثابت بودن انرژی ویژه و تعمیم مستقیم شرایط آزمایشگاهی به کل جریان دودکش، توان موردنیاز حدود ۲/۶۵ کیلووات برآورد شد. این مقدار نشان می‌دهد که هندسه و شرایط بهره‌برداری راکتور حاضر صرفاً برای مطالعات آزمایشگاهی طراحی شده است و استفاده از آن در مقیاس واقعی مستلزم کاهش انرژی ویژه، افزایش بازده انتقال انرژی، افزایش زمان ماند مؤثر و بهینه‌سازی هندسه راکتور خواهد بود. انرژی ویژه به دست آمده موجب افزایش تولید گونه‌های فعال نظیر اکسیژن و هیدروکسید شده و کاهش مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های

نسوخته را تسهیل می‌کند. در مقابل، افزایش چگالی گونه‌های اکسیدکننده در این محدوده انرژی می‌تواند تشکیل بخشی از اکسیدهای نیتروژن را نیز تقویت کند که با نتایج تجربی این پژوهش مطابقت دارد.

روند انجام آزمایش و شرایط آزمایشگاهی

- راه‌اندازی سامانه‌های گرمایشی در توان ثابت طبق استاندارد ملی ایران [۲۰، ۲۱] با شماره 4472 INSO و 1828
 - ثبت آلاینده‌ها در حالت بدون پلاسما قبل از ورود محصولات احتراق به محفظه‌ی راکتور
 - فعال‌سازی راکتور پلاسما
 - اندازه‌گیری مجدد آلاینده‌ها بعد از خروج از محفظه‌ی راکتور و تحت تأثیر قرار گرفتن پلاسمای سرد
 - مقایسه و تحلیل داده‌ها
- زمان ماند محصولات احتراق ورودی در محفظه‌ی پلاسما با توجه به شرایط و هندسه راکتور ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در شرایط محیطی منطبق با الزامات استاندارد ملی ایران برای سامانه‌های گرمایشی مورد آزمایش انجام شد. مطابق این استاندارد، دمای محیط آزمون باید در محدوده ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی در محدوده ۲۵ تا ۴۷ درصد قرار گیرد. در این پژوهش، با استفاده از سامانه تهویه مطبوع، شرایط محیطی اتاق آزمون در این بازه‌ها نگه داشته شد. در زمان انجام آزمون، دمای محیط حدود ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی حدود ۲۹ درصد ثبت شد.
- در این پژوهش، دستگاه‌های گرمایشی با استفاده از دستگاه پیشرفته شبیه‌ساز و آزمون سامانه‌های گرمایشی ساخت شرکت میکروپلن ایتالیا در شرایط پایدار مورد بررسی قرار گرفتند. وجود چنین دستگاهی در آزمایشگاه‌های تحقیق و توسعه تمامی شرکت‌های سازنده سامانه‌های گرمایشی در جهان ضروری است، زیرا این سامانه قابلیت شبیه‌سازی کامل عملکرد دستگاه‌های گرمایشی در شرایطی مشابه محیط واقعی، مانند خانه‌های مصرف‌کنندگان، را در محیط آزمایشگاه فراهم می‌کند.
- این دستگاه قادر است تمامی پارامترهای کنترلی مهم از جمله دما، فشار و دبی آب، فشار و دمای گاز، میزان مصرف گاز، ظرفیت گرمایی و سایر پارامترهای مؤثر در عملکرد سامانه‌های گرمایشی را اندازه‌گیری و ثبت کند. علاوه بر این، سامانه مذکور امکان محاسبه راندمان دستگاه‌های مورد آزمایش را نیز فراهم می‌سازد.
- در این آزمایش دمای آب مصرفی در حداکثر خروجی ۶۰ درجه سلسیوس و حداکثر نرخ جرم جریان خروجی قرار داده شد. در مورد آزمایش دیگ و مشعل نیز با توجه به استاندارد ملی ایران دیگ بعد از روشن شدن با تنظیم در دمای رفت ۸۰ درجه سلسیوس و دمای برگشت ۶۰ درجه سلسیوس به‌صورت پایدار مورد آزمایش قرار گرفت. طبق استاندارد ملی ایران در رابطه با اندازه‌گیری راندمان و داده‌های محصولات احتراق می‌بایست سه تکرار انجام شود ولی برای افزایش دقت اندازه‌گیری در هر بار آزمایش تعداد پنج بار داده‌ها اندازه‌گیری شدند.

نقش مکانیکی و عدم تأثیر بر راندمان احتراق

از آنجا که راکتور پلاسما در مسیر خروجی و پس از پایان احتراق نصب شده است، پلاسما هیچ تأثیر مستقیمی بر مکانیسم احتراق، اختلاط هوا- سوخت، دمای شعله یا راندمان دیگ بخار ندارد. عملکرد پلاسما تنها بر روی آلاینده‌های تشکیل‌شده در مرحله‌ی پس‌احتراق اعمال می‌شود. به همین دلیل کاهش آلاینده‌گی بدون تغییر محسوس در راندمان حرارتی و پایداری

احتراق مشاهده می‌شود. تمامی این موارد به صورت مستمر با استفاده از دستگاه میکروپلن رصد شد. کاهش مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته در راکتور با سد دی‌الکتریک ی مستقیم چهار پدیده ی کلیدی است:

- تولید الکترون‌های پرانرژی و ایجاد گونه‌های فعال (اکسیژن اتمی، رادیکال هیدروکسیل، ازن).
- اکسیداسیون شیمیایی آلاینده‌ها از مسیرهای رادیکالی سریع.
- تبدیل آلاینده‌ها بدون نیاز به دمای بالا (غیرحرارتی).
- انجام کلیه ی واکنش‌ها در مرحله ی پس‌احتراق، بدون تغییر در فرآیند اصلی احتراق.

تحلیل عدم قطعیت و تکرارپذیری آزمایش‌ها

به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌های تجربی، تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط عملیاتی یکسان و برای هر حالت حداقل پنج بار تکرار شدند. مقادیر گزارش شده در جداول و نمودارها میانگین این اندازه‌گیری‌ها بوده و انحراف معیار آن‌ها نیز محاسبه شد [۲۲].

عدم قطعیت کل اندازه‌گیری‌ها با ترکیب عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری و عدم قطعیت ناشی از تکرارپذیری و با استفاده از روش مجموع مربعات ریشه^۱ مطابق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$U_{total} = \sqrt{U_{inst}^2 + U_{rep}^2} \quad (2)$$

که در آن U_{total} عدم قطعیت کل اندازه‌گیری‌ها، U_{inst} عدم قطعیت سیستماتیک مرتبط با دقت دستگاه اندازه‌گیری و U_{rep} عدم قطعیت تصادفی که مرتبط با تکرارپذیری است.

ضریب تغییرات تمامی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده کمتر از ۵ درصد به‌دست آمد که بیانگر تکرارپذیری مناسب آزمایش‌ها و قابلیت اعتماد مطلوب داده‌های تجربی است. همچنین عدم قطعیت کل تمامی اندازه‌گیری‌ها کمتر از ۳/۵ درصد بود که نشان‌دهنده دقت مناسب سامانه اندازه‌گیری است (جدول ۵).

جدول ۵- عدم قطعیت کل در اندازه‌گیری پارامترها

Table 5- Total measurement uncertainty of parameters

Measurement Parameter	Unit	Total Uncertainty
CO Concentration	ppm	±2.5%
NOx Concentration	ppm	±3.2%
HC Concentration	ppm	±2.8%
Flue Gas Temperature	°C	±1.5%

نتایج و بحث

عملکرد راکتور پلاسما سرد در دیگ آب‌گرم چدنی

برای ارزیابی اثر راکتور پلاسما سرد، غلظت آلاینده‌ها و ترکیبات اصلی محصولات احتراق دیگ آب‌گرم چدنی پیش و پس از فعال‌سازی راکتور اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

¹ Root-Sum-of-Squares

جدول ۶- مقایسه آلاینده‌ها قبل و بعد از پلاسما برای دیگ چدنی

Table 6- Comparison of pollutants before and after plasma for cast iron boiler

Pollutant	Before Plasma	After Plasma	Percentage Change
CO (ppm)	19	9	-52%
NOx (ppm)	34	49	+44%
NO ₂ (ppm)	9	14	+55%
NO (ppm)	29	37	+27%
HC (ppm)	50	32	-36%
CO ₂ (%)	12	12.2	-1.6%
O ₂ (%)	4.3	4.31	+0.23%

مطابق جدول ۶، فعال‌سازی راکتور موجب کاهش غلظت مونوکسیدکربن از ۱۹ به ۹ قسمت در میلیون شد که معادل کاهش ۵۲ درصدی است. این کاهش را می‌توان به تولید گونه‌های فعال اکسیژنی، به‌ویژه اکسیژن اتمی و رادیکال هیدروکسیل، در تخلیه با سد دی‌الکتریک نسبت داد. این گونه‌ها می‌توانند اکسیداسیون مونوکسیدکربن را از مسیرهایی مانند واکنش ۳ تسريع کنند:

$$\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H} \quad (3)$$

کاهش محسوس مونوکسیدکربن در حالی رخ داد که غلظت اکسیژن تنها از ۴/۳۰ به ۴/۳۱ درصد تغییر کرد. بنابراین، این کاهش را نمی‌توان به ورود هوای اضافی یا تغییر قابل توجه نسبت هوا به سوخت نسبت داد و تقویت واکنش‌های اکسیداسیون در ناحیه پلاسما، توضیح محتمل‌تری برای آن است.

کاهش غلظت مونوکسید کربن در این پژوهش با نتایج برخی مطالعات پیشین همخوانی دارد، اگرچه میزان کاهش مشاهده‌شده در این تحقیق بیشتر بوده است خانی و همکاران [۲۳] با استفاده از پلاسمای غیرحرارتی برای پالایش گازهای خروجی واقعی موتور دیزل، حداکثر کاهش ۱۶/۳ درصدی مونوکسید کربن را در فرآیند پلاسمای مستقیم و حدود ۴ درصد را در فرآیند پلاسمای غیرمستقیم گزارش کردند. آنان بیان کردند که اگرچه پلاسما قادر به اکسیداسیون مونوکسید کربن است، اما رسوب دوده و کربن روی سطح راکتور در فرآیند مستقیم و همچنین زمان ماند محدود گونه‌های فعال در فرآیند غیرمستقیم، راندمان حذف مونوکسید کربن را کاهش می‌دهد.

در مقابل، در پژوهش حاضر کاهش مونوکسید کربن به‌طور محسوسی بیشتر است. این اختلاف را می‌توان به تفاوت در ماهیت سامانه‌های احتراق، ترکیب شیمیایی گازهای خروجی، نوع راکتور پلاسمایی، شرایط تخلیه الکتریکی و زمان برهم‌کنش گاز با گونه‌های فعال نسبت داد. در موتور دیزل، حضور دوده، ذرات معلق و هیدروکربن‌های سنگین، بخشی از گونه‌های فعال تولیدشده در پلاسما را مصرف کرده و همچنین موجب افت عملکرد راکتور در اثر رسوب‌گذاری می‌شود، در حالی که در سامانه‌های گازسوز مورد استفاده در این پژوهش، گازهای خروجی فاقد دوده بوده و محیط مناسب‌تری برای اکسیداسیون مونوکسید کربن توسط گونه‌های فعالی نظیر اتم اکسیژن، رادیکال هیدروکسیل و ازن فراهم می‌شود. علاوه بر این، سوخت گاز طبیعی ذاتاً احتراق پاک‌تری نسبت به سوخت دیزل دارد و احتمال تشکیل محصولات جانبی مزاحم برای واکنش‌های اکسیداسیون کمتر است؛ بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد پلاسمای غیرحرارتی در سامانه‌های احتراق گاز طبیعی می‌تواند از نظر کاهش مونوکسید کربن مؤثرتر از کاربرد آن در موتورهای دیزل باشد، هرچند مقایسه مستقیم این دو سامانه باید با در نظر گرفتن تفاوت‌های بنیادی در شرایط احتراق و ترکیب گازهای خروجی انجام شود.

غلظت هیدروکربن‌های نسوخته نیز از ۵۰ به ۳۲ قسمت در میلیون کاهش یافت که بیانگر کاهش حدود ۳۶ درصدی است. واکنش هیدروکربن‌ها با گونه‌های فعال پلاسما شامل گسست پیوندهای کربن-هیدروژن، تشکیل رادیکال‌های آلی و اکسیداسیون مرحله‌ای محصولات میانی است. شروع این فرآیند را می‌توان به صورت کلی با رابطه (۴) نشان داد:



رادیکال‌های آلی حاصل در ادامه با اکسیژن واکنش داده و به ترکیبات اکسیژن‌دار، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌شوند. بنابراین، کاهش هیدروکربن‌های نسوخته را می‌توان به تجزیه مولکول‌های آلی و اکسیداسیون بعدی آن‌ها به وسیله گونه‌های فعال نسبت داد. این نتیجه از نظر جهت تغییر با نتایج مینگ و همکاران همخوانی دارد. این پژوهشگران با نصب یک راکتور پلاسماي غیرحرارتی در مسیر خروجی موتور احتراق داخلی نشان دادند که بیشترین راندمان حذف هیدروکربن‌های نسوخته به حدود ۳۴/۵ درصد می‌رسد [۲۴]. برخلاف مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته، غلظت اکسیدهای نیتروژن پس از فعال‌سازی راکتور از ۳۴ به ۴۹ قسمت در میلیون افزایش یافت. همچنین غلظت مونوکسید نیتروژن از ۲۹ به ۳۷ و دی‌اکسید نیتروژن از ۹ به ۱۴ قسمت در میلیون رسید. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش، مسیرهای تشکیل و اکسیداسیون گونه‌های نیتروژنی بر مسیرهای حذف آن‌ها غلبه داشته‌اند.

فعال‌سازی مولکول‌های نیتروژن در میدان پلاسما می‌تواند موجب تشکیل اتم‌های نیتروژن و در ادامه تولید مونوکسید نیتروژن شود:



از سوی دیگر، گونه‌های فعال اکسیژنی می‌توانند تبدیل مونوکسید نیتروژن به دی‌اکسید نیتروژن را نیز تسریع کنند:



پائولاسکاس و همکاران، عملکرد پلاسماي غیرحرارتی را در محصولات واقعی احتراق متان و در شرایط مشابه سامانه‌های احتراقی کوچک بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در غلظت‌های اکسیژن برابر یا بیشتر از حدود ۶ درصد، تولید اکسیژن فعال و ازن در ناحیه تخلیه، تبدیل مونوکسید نیتروژن به دی‌اکسید نیتروژن را تقویت می‌کند. همچنین، افزایش اکسیژن می‌تواند بازده اکسیداسیون مونوکسید نیتروژن را افزایش دهد [۲۵].

باین‌حال، در پژوهش پائولاسکاس و همکاران، افزایش دی‌اکسید نیتروژن عمدتاً با کاهش مونوکسید نیتروژن همراه بود و مجموع اکسیدهای نیتروژن تغییر محدودی داشت. در مقابل، در پژوهش حاضر، مونوکسید نیتروژن و دی‌اکسید نیتروژن به‌طور هم‌زمان افزایش یافتند. این تفاوت نشان می‌دهد که در شرایط عملیاتی راکتور حاضر، پدیده مشاهده‌شده تنها ناشی از تبدیل مونوکسید نیتروژن به دی‌اکسید نیتروژن نبوده و احتمال فعال‌شدن مسیرهای تشکیل گونه‌های جدید نیتروژنی نیز وجود دارد. این اختلاف می‌تواند به تفاوت در انرژی ویژه، هندسه راکتور، زمان ماند، دمای گاز، غلظت اکسیژن و ترکیب محصولات احتراق مربوط باشد. در مطالعه پائولاسکاس و همکاران، انرژی ویژه لازم برای دستیابی به حذف زیاد مونوکسید نیتروژن کمتر از ۳۰ ژول بر لیتر گزارش شد، درحالی‌که انرژی ویژه پژوهش حاضر حدود ۶۰/۳۳ ژول بر لیتر بود. بنابراین، انرژی ورودی بیشتر در سامانه حاضر ممکن است ضمن تقویت اکسیداسیون آلاینده‌های کربنی، باعث افزایش برانگیختگی یا گسست مولکول‌های نیتروژن و در نتیجه تشکیل بیشتر اکسیدهای نیتروژن شده باشد.

از سوی دیگر، نویسندگان آن پژوهش تأکید کردند که عملکرد پلاسما در برابر اکسیدهای نیتروژن به غلظت اکسیژن، بخار آب، هیدروکربن‌ها و ترکیب کلی گاز وابسته است. بنابراین، افزایش اکسیدهای نیتروژن در پژوهش حاضر را نمی‌توان صرفاً به

یک واکنش منفرد نسبت داد، بلکه این رفتار حاصل رقابت میان مسیرهای اکسیداسیون، احیا و تشکیل گونه‌های نیتروژنی در محیط واقعی محصولات احتراق است.

همچنین، لاگوست و همکاران وابستگی رفتار اکسیدهای نیتروژن به انرژی ویژه، زمان ماند، غلظت اکسیژن، رطوبت و ترکیب گاز را گزارش کردند [۲۶].

غلظت دی‌اکسیدکربن تنها از ۱۲ به ۱۲/۲ درصد و اکسیژن از ۴/۳۰ به ۴/۳۱ درصد تغییر کرد. محدود بودن این تغییرات نشان می‌دهد که شرایط کلی احتراق و نسبت هوا به سوخت در طول اندازه‌گیری‌ها تقریباً ثابت بوده است. افزایش جزئی دی‌اکسیدکربن نیز با اکسیداسیون بخشی از مونوکسیدکربن و ترکیبات آلی سازگار است، هرچند به دلیل پایین بودن غلظت این آلاینده‌ها نسبت به دی‌اکسیدکربن کل دود، انتظار تغییر قابل توجهی در درصد حجمی دی‌اکسیدکربن وجود ندارد.

در مجموع، راکتور تخلیه با سد دی‌الکتریک در شرایط آزمایش توانست غلظت مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته را به‌طور محسوسی کاهش دهد؛ اما افزایش اکسیدهای نیتروژن نشان داد که بهینه‌سازی راکتور باید با در نظر گرفتن هم‌زمان انرژی ویژه، دبی گاز، زمان ماند و شرایط تخلیه انجام شود.

عملکرد راکتور پلاسمای سرد در آبگرمکن دیواری

به‌منظور بررسی عملکرد راکتور پلاسمای سرد در یک سامانه گرمایشی با شرایط احتراق متفاوت، آزمایش‌های مشابه بر روی آبگرمکن دیواری انجام شد. نتایج اندازه‌گیری آلاینده‌ها و ترکیب محصولات احتراق پیش و پس از فعال‌سازی راکتور در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- مقایسه آلاینده‌ها قبل و بعد از پلاسما برای آبگرمکن دیواری

Table 7- Comparison of pollutants before and after plasma for a wall-mounted water heater

Pollutant	Before Plasma	After Plasma	Percentage Change
CO (ppm)	121	72	40%
NOx (ppm)	21	32	+52%
NO ₂ (ppm)	6	10	+56%
NO (ppm)	18	27	+50%
HC (ppm)	65	32	-51%
CO ₂ (%)	4.6	4.4	-4%
O ₂ (%)	12.93	13.12	+1%

همان‌گونه که در بخش قبل توضیح داده شد، کاهش مونوکسیدکربن نتیجه اکسیداسیون آن توسط گونه‌های فعال اکسیژنی و رادیکال‌های هیدروکسیل تولیدشده در ناحیه تخلیه است. در آبگرمکن دیواری نیز این روند مشاهده شد، به‌طوری‌که غلظت مونوکسیدکربن از ۱۲۱ به ۷۲ قسمت در میلیون کاهش یافت. با این حال، میزان کاهش ۴۰ درصدی کمتر از دیگ چدنی (۵۲ درصد) بود. این اختلاف نشان می‌دهد که اگرچه مکانیزم شیمیایی حذف مونوکسیدکربن در هر دو سامانه یکسان است، اما بازده نهایی به شرایط عملکردی سامانه نیز وابسته است. یکی از عوامل مؤثر می‌تواند تفاوت در شرایط احتراق و الگوی جریان گازهای خروجی باشد. در آبگرمکن دیواری، سرعت بیشتر گازهای خروجی و زمان تماس کوتاه‌تر با ناحیه تخلیه می‌تواند فرصت انجام کامل واکنش‌های اکسیداسیون را کاهش دهد. علاوه بر این، اختلاف در ترکیب اولیه محصولات احتراق و میزان رقیق‌شدگی

گازها نیز احتمال برخورد گونه‌های فعال با مولکول‌های مونوکسیدکربن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، کاهش کمتر مونوکسیدکربن در آبگرمکن را نمی‌توان ناشی از کاهش فعالیت راکتور دانست، بلکه بیشتر بیانگر تفاوت شرایط عملکرد دو سامانه است.

برخلاف مونوکسیدکربن، کاهش هیدروکربن‌های نسوخته در آبگرمکن دیواری از دیگ چدنی بیشتر بود و غلظت آن‌ها از ۶۵ به ۳۲ قسمت در میلیون رسید که معادل حدود ۵۱ درصد کاهش است. این مقدار در مقایسه با کاهش ۳۶ درصدی دیگ چدنی نشان می‌دهد که راکتور در حذف ترکیبات آلی موجود در محصولات احتراق آبگرمکن عملکرد مؤثرتری داشته است.

یکی از دلایل احتمالی این رفتار، غلظت اولیه بیشتر هیدروکربن‌های نسوخته در آبگرمکن است. افزایش غلظت اولیه این ترکیبات، احتمال برخورد آن‌ها با رادیکال‌های فعال تولیدشده در پلاسما را افزایش داده و در نتیجه، نرخ واکنش‌های اکسیداسیون نیز بیشتر می‌شود. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی هیدروکربن‌های نسوخته در محصولات احتراق آبگرمکن ممکن است با دیگ چدنی متفاوت باشد و برخی از این ترکیبات واکنش‌پذیری بیشتری نسبت به گونه‌های فعال اکسیژنی داشته باشند. این موضوع با نتایج گزارش‌شده توسط لی و همکاران [۲۷] همخوانی دارد که نشان دادند بازده حذف ترکیبات آلی علاوه بر انرژی ویژه، به نوع آلاینده، غلظت اولیه و شرایط جریان نیز وابسته است.

رفتار اکسیدهای نیتروژن در آبگرمکن دیواری نیز مشابه دیگ چدنی بود و پس از فعال‌سازی راکتور، غلظت اکسیدهای نیتروژن حدود ۵۲ درصد افزایش یافت. از آنجا که مکانیزم تشکیل و حذف گونه‌های نیتروژنی در بخش قبل به‌طور کامل تشریح شد، از تکرار آن خودداری می‌شود. با این حال، افزایش هم‌زمان مونوکسید نیتروژن و دی‌اکسید نیتروژن نشان می‌دهد که در این سامانه نیز مسیرهای تشکیل گونه‌های نیتروژنی بر فرآیندهای حذف آن‌ها غلبه داشته‌اند.

نکته قابل توجه آن است که اگرچه مقدار اولیه اکسیدهای نیتروژن در آبگرمکن کمتر از دیگ چدنی بود، درصد افزایش آن بیشتر گزارش شد. این موضوع نشان می‌دهد که درصد تغییرات به مقدار اولیه آلاینده نیز وابسته است و نباید تنها بر اساس درصد‌ها درباره شدت تشکیل اکسیدهای نیتروژن قضاوت کرد. از دیدگاه مقدار مطلق، اختلاف دو سامانه چندان زیاد نیست، اما از دیدگاه نسبی، آبگرمکن حساسیت بیشتری به فعال‌سازی پلاسما نشان داده است. این رفتار با نتایج طالبی زاده و همکاران [۲۸] مطابقت دارد. آن‌ها در یک مقاله مروری بیان کردند که تعادل میان تشکیل و حذف اکسیدهای نیتروژن در سامانه‌های پلاسما غیرحرارتی به چگالی انرژی ویژه، زمان ماند گاز، غلظت اکسیژن و ترکیب شیمیایی گازهای خروجی وابسته است؛ به‌گونه‌ای که تغییر این پارامترها می‌تواند مسیر واکنش‌ها را از تشکیل اکسیدهای نیتروژن به سمت اکسیداسیون یا کاهش آن تغییر دهد.

بررسی اجزای اصلی محصولات احتراق نیز نشان داد که درصد اکسیژن تنها حدود یک درصد افزایش یافته و دی‌اکسیدکربن حدود چهار درصد کاهش یافته است. این تغییرات در مقایسه با کاهش قابل توجه مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته بسیار محدود است و بیانگر آن است که راکتور پلاسما سرد بدون ایجاد تغییر اساسی در فرآیند اصلی احتراق، توانسته است ترکیب آلاینده‌های خروجی را اصلاح کند. در نتیجه، عملکرد راکتور در آبگرمکن نیز همانند دیگ چدنی را می‌توان به فرآیندهای پس‌احتراقی نسبت داد، نه تغییر در نسبت هوا به سوخت یا شرایط احتراق مشعل.

در مجموع، نتایج آبگرمکن دیواری نشان داد که راکتور تخلیه با سد دی‌الکتریک اگرچه رفتار کیفی مشابهی با دیگ چدنی دارد، اما شدت پاسخ آلاینده‌ها یکسان نیست. کاهش کمتر مونوکسیدکربن، کاهش بیشتر هیدروکربن‌های نسوخته و افزایش نسبی بیشتر اکسیدهای نیتروژن نشان می‌دهد که عملکرد راکتور علاوه بر ویژگی‌های الکتریکی آن، به شرایط احتراق، ترکیب محصولات خروجی، زمان تماس گاز با ناحیه تخلیه و انرژی ویژه نیز وابسته است. این موضوع بیان می‌کند که استفاده از یک

طراحی ثابت راکتور برای سامانه‌های مختلف گرمایشی الزاماً به نتایج یکسان منجر نخواهد شد و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی باید متناسب با ویژگی‌های هر سامانه انجام گیرد.

نکته قابل توجه دیگر آن است که در هر دو سامانه تغییرات غلظت اکسیژن و دی‌اکسیدکربن بسیار محدود بود. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد راکتور عمدتاً به اصلاح ترکیب شیمیایی محصولات احتراق پس از خروج از محفظه احتراق مربوط بوده و تغییر محسوسی در نسبت هوا به سوخت یا کیفیت احتراق مشعل ایجاد نکرده است. از این رو، کاهش آلاینده‌ها را می‌توان به واکنش‌های شیمیایی القاشده توسط پلاسما نسبت داد، نه به تغییر شرایط احتراق اولیه.

از دیدگاه طراحی صنعتی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب پارامترهای عملیاتی راکتور نباید تنها بر مبنای بیشترین کاهش یک آلاینده انجام شود. افزایش انرژی ویژه اگرچه می‌تواند تولید رادیکال‌های اکسیدکننده را تقویت کند، اما هم‌زمان احتمال تشکیل گونه‌های نیتروژنی را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین، طراحی راکتورهای پلاسمای سرد برای سامانه‌های گرمایشی نیازمند یافتن نقطه‌ای بهینه است که در آن، بیشترین کاهش مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته همراه با حداقل تشکیل اکسیدهای نیتروژن حاصل شود. دستیابی به این هدف مستلزم بهینه‌سازی هم‌زمان انرژی ویژه، زمان ماند گاز، دبی عبوری از راکتور و هندسه ناحیه تخلیه است.

تحلیل آماری

به‌منظور ارزیابی قابلیت تکرارپذیری داده‌های آزمایش و همچنین بررسی معنی‌داری آماری اثر نوع سامانه گرمایشی و فعال‌سازی راکتور پلاسمای سرد بر آلاینده‌های خروجی، ابتدا شاخص‌های آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار برای تمامی اندازه‌گیری‌ها محاسبه شد. [۲۹]. سپس، به‌منظور تعیین سهم هر یک از عوامل مستقل و اثر متقابل آن‌ها بر تغییرات آلاینده‌ها، از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه^۱ با سطح معنی‌داری ۰/۰۵ استفاده شد (جدول ۸).

جدول ۸- میانگین و انحراف معیار غلظت آلاینده‌ها پیش و پس از فعال‌سازی پلاسما

Table 8- Mean $\pm$ standard deviation of pollutant concentrations before and after plasma activation.

Parameter	Cast-Iron Boiler		Wall-Mounted Water Heater	
	Before	After	Before	After
CO (ppm)	19.30 $\pm$ 0.84	9.02 $\pm$ 0.19	120.64 $\pm$ 0.72	72.00 $\pm$ 1.58
NOx (ppm)	33.90 $\pm$ 0.46	49.00 $\pm$ 1.22	21.36 $\pm$ 1.03	32.40 $\pm$ 1.14
HC (ppm)	50.00 $\pm$ 0.73	31.80 $\pm$ 0.84	64.52 $\pm$ 0.64	31.80 $\pm$ 1.10

مطابق نتایج ارائه‌شده در جدول ۸، انحراف معیار تمامی اندازه‌گیری‌ها بسیار کوچک بوده و در تمامی موارد کمتر از ۲ واحد اندازه‌گیری است. این موضوع بیانگر تکرارپذیری مناسب آزمون‌ها، پایداری شرایط احتراق و قابلیت اعتماد داده‌های آزمایش است. علاوه بر این، اختلاف قابل توجه میان مقادیر میانگین قبل و بعد از فعال‌سازی راکتور پلاسمای سرد نسبت به دامنه تغییرات ناشی از خطای آزمایش، نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده‌شده ناشی از عملکرد راکتور بوده و نمی‌توان آن‌ها را به نوسانات تصادفی نسبت داد. به‌منظور بررسی معنی‌داری این تغییرات، آزمون تحلیل واریانس دوطرفه [۳۰] انجام شد که نتایج آن در جدول‌های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است.

¹ Two-Way ANOVA

جدول ۹- نتایج تحلیل واریانس دوطرفه برای بررسی اثر نوع سامانه گرمایشی، فعال‌سازی پلاسما و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آلاینده‌ها (مونوکسیدکربن)

Table 9- Two-way ANOVA results for the effects of heating system type, plasma activation and their interaction on pollutant concentrations (CO)

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Partial η^2
Heating system	33751.328	1	33751.328	36886.697	<0.0001	0.9996
Plasma activation	4339.458	1	4339.458	4742.577	<0.0001	0.9966
Interaction (System $\times$ Plasma)	1839.362	1	1839.362	2010.232	<0.0001	0.9921
Error	14.640	16	0.915	—	—	—

جدول ۱۰- نتایج تحلیل واریانس دوطرفه برای بررسی اثر نوع سامانه گرمایشی، فعال‌سازی پلاسما و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آلاینده‌ها (اکسیدهای نیتروژن)

Table 10- Two-way ANOVA results for the effects of heating system type, plasma activation and their interaction on pollutant concentrations (NOx)

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Partial η^2
Heating system	1061.425	1	1061.425	896.095	<0.0001	0.9825
Plasma activation	854.125	1	854.125	721.084	<0.0001	0.9783
Interaction (System $\times$ Plasma)	20.605	1	20.605	17.395	0.00072	0.5209
Error	18.952	16	1.1845	—	—	—

جدول ۱۱- نتایج تحلیل واریانس دوطرفه برای بررسی اثر نوع سامانه گرمایشی، فعال‌سازی پلاسما و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آلاینده‌ها (هیدروکربن‌های نسوخته)

Table 11- Two-way ANOVA results for the effects of heating system type, plasma activation and their interaction on pollutant concentrations (HC)

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Partial η^2
Heating system	263.538	1	263.538	409.857	<0.0001	0.9624
Plasma activation	3241.058	1	3241.058	5040.526	<0.0001	0.9968
Interaction (System $\times$ Plasma)	263.538	1	263.538	409.857	<0.0001	0.9624
Error	10.288	16	0.643	—	—	—

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که برای هر سه آلاینده بررسی‌شده، دو عامل نوع سامانه گرمایشی و فعال‌سازی راکتور پلاسما سرد، اثر آماری معنی‌داری دارند؛ به‌طوری‌که سطح معنی‌داری در همه موارد کمتر از پنج صدم بود. اثر متقابل این دو عامل نیز برای تمامی آلاینده‌ها معنی‌دار به دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که میزان تأثیر راکتور پلاسما سرد بر غلظت آلاینده‌ها، به نوع سامانه گرمایشی وابسته است.

در مورد مونوکسیدکربن، بیشترین سهم تغییرات به نوع سامانه گرمایشی مربوط بود. مقدار آماره فیشر برای این عامل برابر با $36886/70$ و مجذور اتای جزئی^۱ برابر با $0/9996$ به دست آمد که نشان می‌دهد بخش عمده تغییرات مونوکسیدکربن ناشی از تفاوت میان دو سامانه گرمایشی است. فعال‌سازی راکتور پلاسما سرد نیز با آماره فیشر $4742/58$ اثر بسیار معنی‌داری بر کاهش مونوکسیدکربن داشت. باین‌حال، مقایسه مقادیر آماره فیشر نشان می‌دهد که تفاوت ذاتی شرایط احتراق در دو سامانه، نقش بیشتری در تغییرات این آلاینده داشته است. همچنین، معنی‌دار بودن اثر متقابل با آماره فیشر $2010/23$ نشان داد که میزان کاهش مونوکسیدکربن در دو سامانه یکسان نبوده است.

برای اکسیدهای نیتروژن، آماره فیشر مربوط به نوع سامانه گرمایشی و فعال‌سازی راکتور پلاسما سرد به‌ترتیب برابر با $896/09$ و $721/08$ بود. این مقادیر بیانگر تأثیر قابل‌توجه هر دو عامل بر تغییرات غلظت اکسیدهای نیتروژن است. در مقابل، آماره فیشر اثر متقابل برابر با $17/39$ به دست آمد که نسبت به دو عامل اصلی بسیار کمتر بود؛ باین‌حال، این اثر با سطح

¹ Partial η^2

معنی‌داری ۰/۰۰۰۷۲/ همچنان از نظر آماری معنی‌دار بود. بنابراین، تغییرات اکسیدهای نیتروژن بیشتر تحت تأثیر مستقل نوع سامانه و فعال‌سازی پلاسما قرار داشته و وابستگی کمتری به اثر متقابل آن‌ها داشته است.

در مورد هیدروکربن‌های نسوخته، بیشترین مقدار آماره فیشر به فعال‌سازی راکتور پلاسمای سرد اختصاص داشت و برابر با ۵۰۴۰/۵۳ بود. این نتیجه نشان می‌دهد که پلاسما نقش اصلی را در کاهش غلظت هیدروکربن‌های نسوخته ایفا کرده است. مقدار مجذور اتای جزئی نیز برابر با ۰/۹۹۶۸ به دست آمد که بیانگر سهم بسیار زیاد فرآیند پلاسمایی در ایجاد تغییرات این آلاینده است. علاوه بر این، نوع سامانه گرمایشی و اثر متقابل دو عامل نیز با آماره فیشر ۴۰۹/۸۶ و سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۰۰۱، اثر آماری معنی‌داری داشتند. این موضوع نشان می‌دهد که ویژگی‌های احتراقی هر سامانه نیز بر میزان کاهش هیدروکربن‌های نسوخته مؤثر بوده است.

به‌طور کلی، مقادیر بالای مجذور اتای جزئی که برای بیشتر عوامل بیش از ۰/۹۶ بود، نشان می‌دهد که عوامل بررسی‌شده سهم بسیار زیادی در توضیح تغییرات داده‌ها داشته‌اند و سهم خطای تصادفی در مقایسه با اثر عوامل اصلی ناچیز بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مشاهده‌شده در غلظت آلاینده‌ها ناشی از تأثیر واقعی راکتور پلاسمای سرد و تفاوت شرایط احتراقی دو سامانه بوده و از نظر آماری قابل استناد است.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود نتایج قابل توجه به‌دست‌آمده در این پژوهش، برخی محدودیت‌ها وجود دارد که لازم است در تفسیر و تعمیم نتایج مورد توجه قرار گیرند. نخست آنکه داده‌های ارائه‌شده در این مطالعه مبتنی بر شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده بوده و ممکن است رفتار سامانه در شرایط بهره‌برداری بلندمدت و واقعی ساختمان‌ها متفاوت باشد. دوم، اثرات طولانی‌مدت پلاسما سرد بر خوردگی اجزای دودکش، تغییر خواص سطحی و تشکیل ترکیبات جانبی نظیر اوزون یا نیتريت‌ها به‌صورت کامل بررسی نشده است. سوم، تنوع محدود در نوع سوخت (گاز طبیعی) و عدم بررسی سوخت‌های جایگزین مانند گاز مایع یا گازوئیل می‌تواند دامنه کاربرد نتایج را محدود کند. همچنین، اثر نوسانات شدید بار حرارتی، تغییرات رطوبت گازهای خروجی و شرایط اقلیمی مختلف در این پژوهش به‌طور جامع مطالعه نشده است. در نهایت، تحلیل اقتصادی و ارزیابی هزینه-فایده در مقیاس تجاری نیازمند مطالعات تکمیلی است. در این پژوهش، به دلیل محدودیت‌های طراحی و ابعاد راکتور، کل جریان گاز خروجی دودکش وارد ناحیه پلاسما نشد و تنها بخشی از جریان به صورت جریان فرعی به داخل راکتور هدایت شد. همچنین با توجه به موجود نبودن دستگاه اندازه‌گیری اوزن میزان و اثرات این گاز بررسی نشد.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- بررسی اثر انواع مختلف پلاسما
- افزودن کاتالیست همراه پلاسما
- آزمون بلندمدت جهت ارزیابی دوام تجهیزات
- تغییر ولتاژ و جریان پلاسما و تأثیر آن بر آزمایش‌ها
- تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و مقایسه آن با روش تجربی
- بررسی دقیق‌تر رفتار گونه‌های نیتروژنی شامل مونوکسید نیتروژن، دی‌اکسید نیتروژن و اکسیدهای نیتروژن در

شرایط مختلف کاری راکتور پلاسمای سرد

- طراحی راکتور با هندسه واقعی و عبور کل جریان دودکش به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد پلاسما در کنترل اکسیدهای نیتروژن
- تحلیل اقتصادی و ارزیابی هزینه-فایده در مقیاس تجاری
- بررسی میزان اوزن و تأثیرات آن

نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد یک راکتور پلاسمای سرد از نوع تخلیه با سد دی‌الکتریک در پالایش آلاینده‌های گازهای خروجی دو سامانه گرمایشی متداول شامل دیگ آب گرم چدنی و آبگرمکن دیواری به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از این فناوری به عنوان یک سامانه پس احتراقی، موجب کاهش قابل توجه مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته در هر دو سامانه شد که بیانگر نقش مؤثر گونه‌های فعال تولیدشده در فرآیند تخلیه الکتریکی در تسریع واکنش‌های اکسیداسیون محصولات احتراق است. در مقابل، افزایش غلظت اکسیدهای نیتروژن در هر دو سامانه نشان داد که اگرچه پلاسما مسیرهای اکسیداسیون آلاینده‌های حاصل از احتراق ناقص را تقویت می‌کند، اما هم‌زمان می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای تشکیل گونه‌های نیتروژنی فراهم آورد. این موضوع نشان می‌دهد که دستیابی به کاهش هم‌زمان مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن، مستلزم بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر انرژی ویژه، زمان ماند گاز، هندسه راکتور و شرایط بهره‌برداری است. تحلیل آماری نتایج نیز نشان داد که نوع سامانه گرمایشی، فعال‌سازی راکتور پلاسمای سرد و اثر متقابل این دو عامل، تأثیر معنی‌داری بر تغییرات آلاینده‌های خروجی دارند. ($P < 0.05$) همچنین مقادیر پایین انحراف معیار، ضریب تغییرات کمتر از ۵ درصد و عدم قطعیت محدود اندازه‌گیری‌ها، تکرارپذیری مناسب آزمایش‌ها و قابلیت اعتماد مطلوب داده‌های تجربی را تأیید کرد. از جنبه کاربردی، این پژوهش نشان داد که راکتور قابلیت استفاده در سامانه‌های گرمایشی با شرایط احتراقی متفاوت را دارد و می‌تواند بدون ایجاد تغییرات اساسی در ساختار سامانه احتراق، به عنوان یک فناوری پس احتراقی برای کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مقایسه عملکرد راکتور در دو سامانه گرمایشی با ویژگی‌های احتراقی متفاوت نشان داد که میزان اثربخشی پلاسما به شرایط احتراق و مشخصات جریان گازهای خروجی وابسته است؛ موضوعی که ضرورت طراحی و بهینه‌سازی اختصاصی راکتور برای هر سامانه را آشکار می‌سازد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که راکتور پلاسمای سرد از نوع تخلیه با سد دی‌الکتریک، ظرفیت قابل توجهی به عنوان یک فناوری پس احتراقی کم‌مصرف برای کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق در سامانه‌های گرمایشی ساختمان دارد. هرچند افزایش اکسیدهای نیتروژن همچنان یکی از چالش‌های اصلی این فناوری محسوب می‌شود، اما یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی شرایط بهره‌برداری و طراحی راکتور، می‌توان زمینه استفاده مؤثرتر از فناوری پلاسمای غیرحرارتی را در سامانه‌های گرمایشی و کاربردهای صنعتی فراهم کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت صنعتی شوفاژکار به دلیل حمایت‌های مالی و معنوی در انجام این تحقیق، صمیمانه سپاس‌گزاری کنند. همچنین، مراتب قدردانی ویژه‌ی خود را از جناب آقای مهندس علائی، مدیرعامل محترم شرکت صنعتی

شواژکار، که همواره با حمایت‌های بی‌دریغ خود در مسیر فعالیت‌های پژوهشی، علمی و ارتقای دانش و فناوری کشور گام برداشته‌اند، ابراز می‌دارند. از جناب آقای مهندس جعفری، معاونت محترم اجرایی شرکت، که همواره مشوق این مجموعه در انجام امور علمی و پژوهشی بوده‌اند، نهایت سپاس و امتنان را داریم. همچنین از موسسه آموزش عالی کار واحد قزوین و مرکز آموزش علمی کاربردی علوم و فنون قزوین که زمینه‌های لازم را برای انجام این تحقیق فراهم نمودند، صمیمانه سپاسگزاریم.

References

- [1] M. Mahmoud, M. Ramadan, S. Naher, K. Pullen, and A.-G. Olabi, "The impacts of different heating systems on the environment: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 766, Art. no. 142625, Apr. 2021.
- [2] A. Akinmoladun and O. S. Tomomewo, "Advances and future perspectives in post-combustion carbon capture technology using chemical absorption process: A review," *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 16, Art. no. 100461, 2025.
- [3] J.-D. Moon, G.-T. Lee, and S.-T. Geum, "Discharge and NOx removal characteristics of nonthermal plasma reactor with a heated corona wire," *Journal of Electrostatics*, vol. 50, no. 1, pp. 1–15, 2000.
- [4] Y. Liu, J.-W. Wang, J. Zhang, T.-T. Qi, G.-W. Chu, H.-K. Zou, and B.-C. Sun, "NOx removal by non-thermal plasma reduction: Experimental and theoretical investigations," *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 16, pp. 1476–1484, 2022.
- [5] O. Molchanov, K. Krpec, and J. Horák, "NOx removal from small-scale biomass combustion in DC Corona: Influence of discharge polarity on plasma chemical kinetics," *Chemical Engineering Science*, vol. 300, Art. no. 120597, pp. 1–9, 2024.
- [6] Z. Zhang, Z. Sui, C. Song, W. Lu, X. Fan, H. Li, and P. Wang, "Research status of engine emissions treated by nonthermal plasma," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 29, pt. D, Art. no. 103007, Feb. 2023.
- [7] Y. H. Choi and J. Hwang, "Review on plasma-assisted ignition systems for internal combustion engine application," *Energies*, vol. 16, no. 4, Art. no. 1604, Feb. 2023.
- [8] Q. Malé, N. Barléon, S. Shcherbanev, B. Dharmaputra, and N. Noiray, "Numerical study of nitrogen oxides chemistry during plasma assisted combustion in a sequential combustor," *Combustion and Flame*, vol. 260, Art. no. 113206, 2024.
- [9] J. Nam, S. Kim, and J. Hwang, "Effect of gas temperature on carbon soot oxidation via non-thermal plasma: Two-dimensional numerical study integrating reactive flow and discharge models," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 10, pp. 15580–15596, 2024.
- [10] M. Molteni, G. Walker, D. Parmar, M. Sutton, P. Licence, and S. Woodward, "Can 'Electric Flare Stacks' Reduce CO₂ Emissions, A Case Study with Nonthermal Plasma," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 62, no. 46, pp. 19649–19657, Nov. 2023.
- [11] X. Pang, S. Ge, S. Liu, X. Liu, X. Zhang, X. Chen, C. Yue, and D. Sha, "Experimental and simulation research on particulate matter, NO, and SO₂ removal using dielectric barrier discharge non-thermal plasma," *Chemical Engineering Journal*, vol. 511, Art. no. 168411, 2025.
- [12] P. Neamy, K. Theinnoi, B. Sawatmongkhon, S. Sittichompoo, and N. Theinnoi, "Evaluation of oxidative mechanisms and reduction of particulate matter within emission gases through the utilization of non-thermal plasma and porous nickel foam in gasoline direct injection engine systems," *Fuel*, vol. 406, pt. D, Art. no. 137258, Feb. 2026.
- [13] W. Zhao, H. Shen, H. Zhang, B. Li, R. Zhang, Y. Tan, and R. Sun, "Non-thermal plasma and modified catalysts: A synergistic approach to air purification," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 22, Art. no. 100748, May 2025.
- [14] H. Zhang, Y. Wang, and L. Chen, "Specific energy density and its effect on pollutant removal efficiency in dielectric barrier discharge plasma reactors," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 57, no. 15, Art. no. 155202, Apr. 2024.
- [15] S. H. Park, M. H. Lee, and J. H. Kim, "Optimization of specific input energy for NOx removal in non-thermal plasma systems: A comparative study," *Chemical Engineering Journal*, vol. 480, Art. no. 148322, Jan. 2024.
- [16] T. Wang, B. Sun, and X. Zhang, "Energy efficiency analysis of dielectric barrier discharge for volatile organic compound removal," *Journal of Environmental Management*, vol. 352, Art. no. 120045, Feb. 2024.
- [17] R. A. Silva, P. T. Nguyen, and K. Tanaka, "A review of specific energy density in non-thermal plasma for air pollution control: From fundamentals to applications," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 44, no. 3, pp. 823–856, May 2024.
- [18] L. M. González, C. H. Liu, and M. R. Hernández, "Scale-up strategies for non-thermal plasma reactors in industrial flue gas treatment: Challenges and opportunities," *Chemical Engineering Science*, vol. 291, Art. no. 119945, Jun. 2024.
- [19] R. Brandenburg, M. Schiorlin, and V. Brüser, "Reactive species generation in dielectric barrier discharges for environmental applications," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 44, no. 2, pp. 521–548, Mar. 2024.
- [20] Iranian National Standards Organization, "Central heating and hot water boilers, Methods of test for thermal performance," ISIRI Standard No. 4472, 2nd Revision, 2023.
- [21] Iranian National Standards Organization, "Instantaneous gas-fired water heaters for domestic hot water production," ISIRI Standard No. 1828, 3rd Revision, 2024.
- [22] J. W. Kim, S. Y. Lee, and H. J. Park, "Uncertainty analysis and repeatability assessment in non-thermal plasma experiments for emission control," *Measurement Science and Technology*, vol. 35, no. 5, Art. no. 055009, May 2024.
- [23] M. R. Khani, E. Barzideh Pour, S. Rashnoo, X. Tu, B. Ghobadian, B. Shokri, A. Khadem, and S. I. Hosseini, "Real diesel engine exhaust emission control: Indirect non-thermal plasma and comparison to direct plasma for NOx, THC, CO, and CO₂," *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 743–754, Dec. 2020.

- [24] X. Li, Y. Zhao, M. Zhang, and L. Chen, "Degradation of volatile organic compounds using non-thermal plasma technology: Recent developments and energy efficiency analysis," *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, pp. 131–140, 2022.
- [25] R. Paulauskas, I. Jõgi, N. Striūgas, D. Martuzevičius, K. Erme, J. Raud, and M. Tichonovas, "Application of non-thermal plasma for NO_x reduction in the flue gases," *Energies*, vol. 12, no. 20, Art. no. 3955, 2019.
- [26] D. Lacoste, "Flames with plasmas," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 5405–5428, 2023.
- [27] W. Li, A. Alagumalai, Z. Li, and H. Song, "Non-thermal plasma technology for air pollution control and bacterial deactivation," *Cell Reports Physical Science*, vol. 5, no. 7, Art. no. 102092, Jul. 2024.
- [28] P. Talebizadeh, M. Babaie, R. Brown, H. Rahimzadeh, Z. Ristovski, and M. Arai, "The role of non-thermal plasma technique in NO_x treatment: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 886–901, Dec. 2014.
- [29] D. C. Montgomery, G. C. Runger, and N. F. Hubele, *Engineering Statistics*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [30] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2019.