

Experimental Evaluation of Burner Geometry Performance and its Flame Structure on Heating Rate of a MILD Steel Reheating Furnace

Ali Ashouri¹, Soroush Sarrafan Sadeghi², Mohammad Zabetian Targhi^{3*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: aliashouri@modares.ac.ir

² Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran Email: s.sarrafan@modares.ac.ir

³ **Corresponding author.** Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran Email: zabetian@modares.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type
Research Article

Article history
Received 2025.11.27
Received in revised form 2025.12.28
Accepted 2026.01.05
Available online 2026.01.07

Keywords
Swirl burner;
Perforated lining burner;
Co-flow burner;
Steel reheating furnace;
Furnace Heating Time

ABSTRACT

MILD combustion has emerged as a promising technology for achieving uniform temperature distribution, reduced pollutant formation, and improved thermal efficiency in industrial reheating furnaces. However, the performance of different burner geometries under MILD conditions—particularly in full-scale steel-heating scenarios—has not been adequately characterized. In this study, the thermal behavior of three burner configurations, namely a co-flow axial burner, a swirl burner, and a perforated lining burner, was experimentally investigated in a laboratory-scale MILD furnace developed at Tarbiat Modares University. The primary objective was to compare the capability of these burners in providing stable and uniform heating for steel ingots, as well as to assess the furnace heat-up time required to reach an initial target temperature of 600 °C as a common operational benchmark. Results indicate that the swirl burner provides the most uniform temperature field and the lowest spatial temperature gradient, demonstrating superior mixing and enhanced internal recirculation. In contrast, the perforated lining burner exhibits the fastest heating rate, reaching the target temperature in approximately 153 minutes, though with high local temperature oxidations. The co-flow axial burner delivers moderate uniformity and heating performance. Overall, the findings indicate that burner type plays a critical role in combustion stability, thermal uniformity, and furnace start-up time in MILD combustion systems, with the swirling burner exhibiting superior reliability and operational stability under high-temperature conditions.

Introduction

Steel reheating furnaces are critical in metallurgical industries for preparing billets or slabs prior to hot forming. Conventional combustion systems in these furnaces often create large temperature gradients and emit high levels of nitrogen oxides (NO_x). Flameless oxidation, also known as Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD) combustion, has emerged as a promising alternative. By strongly diluting fuel and oxidizer with recirculated combustion products before ignition, MILD combustion suppresses visible flame formation, reduces peak temperatures, and promotes a more uniform thermal field within the furnace volume.

Despite these advantages, the performance of MILD combustion systems is highly sensitive to burner geometry and the resulting mixing characteristics of fuel and oxidizer streams. Different burner configurations can produce distinct flow structures, internal recirculation rates, and temperature distributions. Therefore, systematic experimental evaluation of burner designs is essential for optimizing industrial reheating furnaces operating under MILD conditions.

The present work addresses this need by experimentally comparing three burner types—co-flow axial, swirl, and perforated lining—in a purpose-built laboratory-scale MILD furnace. The study focuses on both heating rate and flame stability, providing practical insights for burner selection in steel reheating applications.

Methodology

Laboratory-Scale MILD Furnace

Experiments were conducted in a laboratory-scale flameless oxidation furnace designed and constructed at the National Combustion Laboratory of Tarbiat Modares University. The furnace was scaled down from a 7 MW industrial steel reheating furnace using the constant residence time (CRT) scaling method, resulting in a 10 kW laboratory model. Key dimensions of the scaled furnace are 919 mm (length) × 513 mm (width) × 293 mm (height). The furnace walls and roof were insulated with multi-layer refractory materials (cordierite-mullite, lightweight firebrick, and perlite) to maintain external surface temperatures below 80 °C during operation up to 1600 °C.

Cite This Paper

Ashouri, Ali., Sarrafan Sadeghi, Soroush., & Zabetian Targhi, Mohammad. (2025). Experimental Evaluation of Burner Geometry Performance and its flame structure on Heating Rate of a MILD Steel Reheating Furnace. *Fuel and Combustion*, 18 (4), 103-123. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.579786.1457> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



Burner Configurations

Three distinct burner geometries were fabricated and tested:

- Co-flow axial burner: A 1-inch diameter burner with an axially adjustable fuel tube. The fuel nozzle could be positioned upstream or downstream of the air exit to control premixing and flame stability. Optimal stability was achieved with the fuel tube retracted by 2.5 cm relative to the air outlet.
- Swirl burner: A 1-inch burner featuring a helical swirler (4 cm pitch) along the fuel tube. Air flowing over this spiral acquires a tangential velocity component, inducing a swirling motion at approximately 45° relative to the burner axis. This enhances mixing, flame volume, and stability.
- Perforated lining burner: A 1-inch burner consisting of a perforated inner tube (½-inch, 16 holes of 3 mm diameter) enclosed within a perforated outer casing (1-inch, holes of ~1.5 mm, porosity ≈ 0.26). The design promotes distributed, multi-point injection for uniform heating and increased power capacity (up to 30 kW).

Instrumentation and Procedure

Each burner was installed separately in the furnace, and tests were performed under comparable firing rates and air preheating conditions. Fuel (natural gas) and air flow rates were controlled via calibrated rotameters and pressure regulators. Temperatures were measured using S-type thermocouples (for high-temperature regions up to 1600 °C) and J-type thermocouples (for stack and lower-temperature zones). Thermocouples were arranged in a 9-column, 3-row grid on the sidewall to capture spatial temperature distributions. A CCD camera recorded flame behavior, and RGB image analysis was employed to assess flame uniformity and thermal structure.

Results and Discussion

Flame Structure and Stability

The co-flow axial burner produced a long, narrow flame (≈ 35 cm) with relatively low momentum. The flame exhibited sensitivity to hot gas recirculation from the furnace rear wall, leading to intermittent instabilities. Due to insufficient mixing at an equivalence ratio of ~ 1.1 , unburned gases were observed in the furnace.

In contrast, the swirl burner generated a voluminous, helical flame (≈ 40 cm) with significantly enhanced mixing and momentum. The swirling motion stabilized the flame, prevented lift-off, and improved heat transfer to the furnace walls. However, increased turbulence led to moderate flame oscillations over time.

The perforated lining burner, when operated at 18.4 kW, produced a uniform, continuous flame sheet across its surface. During initial startup, distinct flame plumes were visible, but as the burner body heated up, the plumes diminished, and combustion transitioned toward a distributed, nearly flameless regime—characteristic of high-temperature air combustion (HiCOT). Unfortunately, prolonged exposure to high temperatures caused severe surface oxidation and eventual localized fracture of the burner tube, as shown in Figure 12 of the full manuscript.

Thermal Performance and Heating Rate

Figure 14 of the original study illustrates the temporal response of furnace roof temperature for each burner:

- The co-flow axial burner (10 kW) required approximately 450 minutes (7.5 hours) to reach 500 °C and exhibited no further temperature increase, indicating limited thermal capacity.
- The perforated lining burner (18.4 kW) rapidly heated the furnace, reaching 550 °C in just 150 minutes (2 hours 33 minutes). However, the test was terminated prematurely due to burner structural failure.
- The swirl burner (10 kW) achieved 550 °C after approximately 7 hours and surpassed 600 °C after 10 hours, with a continuing upward trend. This demonstrates reliable and sustained heating capability.

Stack gas temperature measurements (Figure 15) corroborated these trends: the swirl burner achieved the highest exhaust temperature (~ 213 °C) with an ongoing rising trend, whereas the co-flow burner plateaued at lower values.

RGB Image Analysis

RGB intensity scatter plots (Figure 13) provided quantitative insight into flame uniformity. The co-flow burner displayed the most concentrated and consistent color distribution, suggesting a homogeneous thermal field at the captured moment, though long-term stability remained problematic. The swirl burner showed increased scatter—particularly in the blue channel—indicating the presence of turbulent, multi-temperature zones. The perforated lining burner exhibited the widest dispersion, reflecting significant local temperature fluctuations inherent to its multi-jet design.

Conclusions

This experimental investigation compared the performance of co-flow axial, swirl, and perforated lining burners in a laboratory-scale MILD furnace for steel reheating. The following conclusions are drawn:

- Co-flow axial burner: Produces an elongated flame but suffers from low momentum and instability when exposed to recirculating hot gases. Its heating capacity is insufficient for reaching target temperatures within a reasonable timeframe.
- Perforated lining burner: Offers the fastest heating rate, achieving 550 °C in 2 hours 33 minutes. However, severe oxidation and structural failure at elevated temperatures render it unsuitable for long-term industrial use without expensive alloy upgrades.
- Swirl burner: Provides the most stable and uniform heating performance. Although its heating rate is slower than that of the linear burner, it reliably attains and exceeds 600 °C without structural degradation. Scaling this design to larger diameters (e.g., 1.5–2 inches) could further improve heating rate while maintaining stability.

Overall, the swirl burner emerges as the most practical and robust option for industrial MILD furnaces, balancing thermal uniformity, operational safety, and long-term durability. The findings underscore the critical influence of burner geometry on furnace startup time and temperature distribution, offering valuable guidance for optimizing burner selection in steel reheating applications.

Author Contributions

Ali Ashouri: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization, Project administration.

Soroush Sarrafan Sadeghi: Investigation, Formal analysis, Data curation, Writing – review & editing, Visualization.

Mohammad Zabetian Targhi: Supervision, Conceptualization, Resources, Writing – review & editing, Funding acquisition.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors. The study was conducted entirely at Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, using the facilities of the National Combustion Laboratory.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

ارزیابی تجربی عملکرد هندسه مشعل و ساختار شعله آن در سرعت گرمایش کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولادی

علی عاشوری^۱، سروش صرافان صادقی^۲، محمد ضابطیان طرقي^۳

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، aliashouri@modares.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، s.sarrafan@modares.ac.ir

^۳ نویسنده مخاطب، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، zabetian@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷ کلیدواژه‌ها: مشعل چرخشی مشعل خطی سوراخدار مشعل جریان همسو کوره گرمایش فولاد زمان گرمایش کوره	احتراق بدون شعله (MILD) به عنوان یک فناوری نوظهور و کارآمد است که باعث توزیع یکنواخت دما، کاهش تشکیل آلاینده‌ها و بهبود بازدهی حرارتی در کوره‌های صنعتی پیش گرم می‌شود. با این حال، عملکرد هندسه‌های مختلف مشعل در شرایط احتراق بدون شعله مخصوصاً برای گرمایش کوره عملیات حرارتی قطعات فولادی بررسی نشده است. در این پژوهش، عملکرد سه نوع مشعل جریان همسو محوری، چرخشی و خطی سوراخدار در یک کوره آزمایشگاهی احتراق بدون شعله در دانشگاه تربیت مدرس به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی، مقایسه توانایی این مشعل‌ها در ایجاد گرمایش پایدار برای قطعات فولادی و نیز بررسی زمان گرمایش کوره تا رسیدن به دمای هدف اولیه ۶۰۰ درجه سلسیوس بود. نتایج نشان داد که مشعل جریان همسو محوری به دلیل تکانه پایین و اختلاط محدود، شعله‌ای کشیده و کم‌پایدار ایجاد کرد و در برابر بازگشت گازهای داغ حساس بود. در مقابل، مشعل چرخشی با ایجاد مؤلفه گردابه‌ای، اختلاط سوخت و هوا را بهبود داد، شعله‌ای حجیم‌تر و پایدارتر شکل داد و عملکرد حرارتی بهتری نسبت به مشعل همسو محوری ارائه کرد. مشعل خطی سوراخدار یکنواخت‌ترین ساختار شعله را ایجاد کرد و سریع‌ترین گرمایش را به دست آورد. با این حال، این مشعل در دماهای بالا با اکسایش شدید سطحی و شکست موضعی بدنه مواجه شد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نوع مشعل نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری احتراق، یکنواختی حرارتی و زمان راه‌اندازی کوره‌های MILD دارد و مشعل چرخشی از نظر عملکرد ایمن و پایدار برتری بیشتری نشان داد.

مقدمه

عملیات حرارتی فولاد یکی از ارکان حیاتی زنجیره تأمین صنعتی و توسعه اقتصادی به شمار می‌رود؛ به گونه‌ای که فولاد با تولید سالانه حدود ۱/۹ میلیارد تن، به عنوان سومین ماده حجیم پرمصرف در جهان شناخته می‌شود [۱]. تنوع کاربرد و دوام بالای فولاد، آن را به عنصری ضروری در طیف گسترده‌ای از حوزه‌ها از جمله زیرساخت، حمل و نقل، ماشین‌آلات و ساختمان‌سازی تبدیل کرده است. در این میان، کوره‌های بازگرم فولاد نقش محوری در صنعت فولاد ایفا می‌کنند و دمای بهینه را برای فرآیندهای فورجینگ و عملیات تولیدی فراهم می‌سازند. تحقیقات گسترده‌ای به منظور ارتقای عملکرد حرارتی کوره‌های بازگرم فولاد و هم‌زمان توجه به ملاحظات مهم حرارتی و زیست‌محیطی انجام شده است. به طور مشخص، کوره باید دو الزام اساسی حرارتی را تضمین کند [۲-۴]. برآورده‌سازی هم‌زمان این الزامات باید به گونه‌ای باشد که خواص مطلوب متالورژیکی حفظ شود، مصرف سوخت به حداقل برسد و انتشار آلاینده‌ها به طور مؤثر کنترل شود. علاوه بر این، کنترل اکسیداسیون فولاد در دماهای بالا همچنان یکی از چالش‌های اساسی در طراحی به شمار می‌آید.

پژوهش‌های متعددی تاکنون با هدف بهبود عملکرد حرارتی کوره‌های بازگرم فولاد انجام شده است. در این مطالعات، راهبردهای گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ از جمله می‌توان به کارگیری احتراق غنی از اکسیژن [۵، ۶]، استفاده از مخلوط‌های زیست‌گاز-گاز طبیعی [۵]، تغییر در شرایط ترموفیزیکی دیواره کوره [۶]، اعمال دمای اولیه متفاوت برای نواحی پیش‌گرمایش، گرمایش و پخت [۷] و نیز

Cite This Paper

Ashouri, Ali., Sarrafan Sadeghi, Soroush., & Zabetian Targhi, Mohammad. (2025). Experimental Evaluation of Burner Geometry Performance and its flame structure on Heating Rate of a MILD Steel Reheating Furnace. Fuel and Combustion, 18 (4), 103-123. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.579786.1457> (In Persian)

ارجاع‌دهی به این مقاله



اصلاح پیکربندی ورودی‌های سوخت و هوا [۸-۱۰] اشاره کرد. از این رو، استفاده از رژیم احتراق MILD (احتراق با رقیق‌سازی کم اکسیژن در شدت یا دمای متوسط و بالا) به عنوان رویکردی پیشرفته می‌تواند راهکاری مؤثر برای غلبه بر چالش‌های حرارتی موجود و برآورده‌سازی الزامات عملکردی کوره‌های صنعتی محسوب شود [۱۱].

رژیم احتراق MILD به عنوان یکی از دستاوردهای نوین در حوزه احتراق، مزایای چشمگیری را به‌ویژه از طریق بازگشت گسترده گازهای داغ فراهم می‌کند. این مزایا شامل افزایش بازده حرارتی، کاهش غلظت اکسیژن در ناحیه احتراق، و کاهش قابل توجه آلاینده‌ها است [۱۴، ۱۵].؛ ویژگی‌هایی که این رژیم را برای کاربرد در کوره‌های صنعتی عملیات حرارتی به‌ویژه مناسب می‌سازد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر روی شرایط ورودی و خروجی [۱۲، ۱۳]، شرایط مشعل [۹، ۱۴]، اعمال نیروهای خارجی [۱۵، ۱۶] و نیز اصلاح هندسه کوره انجام شده است تا کیفیت احتراق بدون شعله ارتقا یافته، انتشار آلاینده‌ها کاهش یابد و توزیع دما درون کوره یکنواخت‌تر شود. تحقق کامل این مزایا به‌شدت به هندسه مشعل، الگوی اختلاط سوخت و اکسیدکننده و شرایط جریان درون کوره وابسته است.

با این حال، بر اساس دانش نویسندگان، تاکنون مطالعه جامعی که عملکرد مشعل‌های مختلف را در مرحله راه‌اندازی کوره احتراق بدون شعله به‌صورت تطبیقی بررسی کرده باشد، گزارش نشده است و در این زمینه یک خلأ پژوهشی قابل توجه وجود دارد. زمان راه‌اندازی کوره تا رسیدن به شرایط پایا یکی از متغیرهای کلیدی در طراحی مشعل برای کوره‌های صنعتی گرمایش قطعات فولادی است. این زمان تأثیر مستقیمی بر عملکرد اقتصادی و بهره‌برداری کوره دارد، به‌ویژه در مواردی که راه‌اندازی‌های مکرر یا دوره‌های کاری کوتاه‌مدت مورد نیاز است.

با وجود این، برخی پژوهش‌ها تنها زمان راه‌اندازی کوره احتراق بدون شعله با مشعل مورد نظر خود را گزارش کرده‌اند، بدون آنکه آن را با سایر آرایش‌های مشعل مقایسه کنند. برای نمونه، تیان و همکاران [۱۷] از دو مشعل چرخشی به‌طور همزمان استفاده کردند و توان این دو مشعل را طی فرایند گرمایش از ۶ کیلووات به ۱۰ کیلووات افزایش دادند. آن‌ها گزارش کردند که زمان رسیدن دمای کوره به 600°C حدود ۵ دقیقه و زمان دستیابی به شرایط MILD در دمای 1200°C برابر با ۸۸ دقیقه بوده است.

همچنین در کوره MILD دانشگاه آدلاید که با یک مشعل غیرپیش‌آمیخته محوری با توان ۱۵ کیلووات کار می‌کرد، زمان گرم کردن حدود ۱/۵ ساعت گزارش شد [۱۸]. در همان کوره و با به‌کارگیری مشعل‌های تک‌جت و چندجت موازی، این زمان به حدود ۲ تا ۳ ساعت افزایش یافت [۱۹، ۲۰]. علاوه بر این، استفاده از مشعل مشابه مشعل دانشگاه آدلاید در یک کوره چینی منجر به افزایش زمان دستیابی به MILD تا حدود ۶ ساعت شد [۲۱، ۲۲]. در پژوهشی دیگر نیز، برای احتراق زغال‌سنگ تحت شرایط MILD با توان ۶۰ کیلووات، زمان گرم کردن حدود ۲ ساعت ثبت شد [۲۳، ۲۴]. جمع‌بندی این مطالعات نشان می‌دهد که زمان راه‌اندازی و دستیابی به حالت پایدار به‌طور مستقیم به نوع مشعل، هندسه کوره و ویژگی‌های عایق‌کاری وابسته است و نمی‌توان یک مقدار عمومی برای همه سامانه‌ها در نظر گرفت.

در پرتو این خلأ پژوهشی، هدف این مقاله بررسی آزمایشگاهی و مقایسه‌ای عملکرد سه نوع مشعل جریان همسو محوری، چرخشی و خطی سوراخ‌دار در یک کوره احتراق بدون شعله به‌منظور گرمایش قطعات فولادی است. به‌منظور ایجاد یک معیار کمی و قابل اتکا برای مقایسه عملکرد حرارتی مشعل‌ها، زمان گرمایش کوره تا رسیدن به دمای 550°C به عنوان شاخص اصلی ارزیابی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هدف اولیه ۶۰۰ درجه بود اما با توجه به شکست مشعل خطی، مقایسه در دمای ۵۵۰ درجه انجام شد. این آزمایش‌ها در کوره آزمایشگاهی طراحی و ساخته‌شده در آزمایشگاه ملی احتراق دانشگاه تربیت مدرس انجام می‌شوند تا شرایط یکسان و کنترل‌شده برای مقایسه دقیق فراهم شود.

نوآوری این پژوهش در ارائه یک ارزیابی جامع از عملکرد مشعل‌ها نه‌تنها از منظر پایداری شعله و الگوی انتقال حرارت، بلکه از دیدگاه زمان راه‌اندازی کوره است. مقایسه سیستماتیک این سه آرایش مشعل در یک بستر آزمایشگاهی واحد، امکان شناسایی مزایا و محدودیت‌های هر یک را فراهم کرده و یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی کاربردی برای انتخاب و بهینه‌سازی طراحی مشعل در کوره‌های صنعتی گرمایش فولاد، با هدف کاهش زمان راه‌اندازی، بهبود بازده حرارتی و افزایش یکنواختی دما مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه، ابتدا کوره آزمایشگاهی و مشخصات مشعل‌ها معرفی می‌شود، سپس نتایج آزمایش‌ها ارائه و مقایسه شده و در پایان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولادی در مقیاس آزمایشگاهی

شکل ۱، نمایی از پیکربندی نهایی کوره آزمایشگاهی توسعه‌یافته برای پیش گرمایش قطعات فولادی تحت شرایط احتراق بدون شعله را نشان می‌دهد. کوره‌های فولاد به دو گونه در صنعت وجود دارند. یک نوع از کوره‌های فولاد، فرآیند ذوب و گرمایش فولاد بر روی ریل‌هایی انجام می‌شود [۲۵، ۲۶]. در نوع دیگر، فولاد را در کوره قرار می‌دهند، فولاد را تا نزدیک دمای ذوب آن گرم می‌کنند (معمولاً حدود 1200°C) و سپس از کوره خارج می‌کنند. تعداد قطعات فولاد در نوع ریلی می‌تواند ده‌ها قطعه باشد ولی تعداد آنان در نوع ثابت محدود و خیلی کم‌تر

است. زمان ماندن قطعات فولادی به کیفیت مطلوب گرمایش و مشخصات فیزیک حرارتی و ابعادی قطعات ارتباط دارد [۲۷]. در پژوهش حاضر، تمرکز بر کوره‌های ثابت است.

این کوره بر اساس یک طراحی مکانیکی دقیق و با اتکا به مدل هندسی بهینه‌شده و الزامات عملکردی تعریف‌شده در آزمایشگاه ملی احتراق دانشگاه تربیت مدرس [۲۸] ساخته شده است. نسخه صنعتی این کوره، که نمونه‌هایی از آن در صنعت فولاد از جمله در کوره‌های شرکت ماشین‌سازی اراک به‌کار گرفته شده است، با توان نامی حدود ۶۰۹۷ مگاوات برای گرمایش ۹ شمش فولادی تا دمای حدود ۱۲۵۰°C گرم فعالیت می‌کنند. این مشخصات به‌عنوان مبنای اصلی تعیین الزامات طراحی نسخه آزمایشگاهی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در طراحی بستر آزمون کوره، ملاحظات نظیر پایداری حرارتی، یکپارچگی سازه‌ای، سهولت بهره‌برداری و امکان نصب تجهیزات اندازه‌گیری و پایش فرآیند به‌دقت مدنظر قرار گرفته است. همچنین، به‌منظور دستیابی به شرایط احتراق MILD در کاربردهای پیش‌گرمایش قطعات فولادی، آرایش ورودی‌ها و خروجی‌های کوره بر اساس نتایج مطالعات پیشین، شامل بهینه‌سازی توزیع و تزریق سوخت، تعیین موقعیت درگاه‌های خروجی و تنظیم قطر خروجی و نسبت معادل، پیاده‌سازی شده است که جزئیات آن در مراجع [۱۲، ۱۳] ارائه شده است. در این طرح، ضمن حفظ هندسه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، ملاحظات عملی همچون دوام حرارتی، سهولت تعمیر و نگهداری، ایمنی اپراتور و امکان دسترسی مناسب به تجهیزات آزمون نیز به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. ساختار کلی کوره به‌گونه‌ای انتخاب شده است که بتواند دامنه گسترده‌ای از بارهای حرارتی و نسبت‌های هم‌ارزی را پوشش دهد و شرایط لازم برای ارزیابی تجربی عملکرد مشعل‌های جریان همسو محوری، چرخشی و خطی سوراخ‌دار را در رژیم‌های احتراق شعله‌ای و احتراق MILD فراهم سازد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سامانه آزمایشگاهی نهایی کاملاً با اهداف پژوهش همخوانی داشته و آماده انجام آزمون‌های پیش‌گرمایش قطعات فولادی در سناریوهای مختلف عملیاتی است.



Figure 1 - Flameless steel heat treatment furnace in lab-scale

شکل ۱- کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولاد در مقیاس آزمایشگاهی

ابعاد واقعی و مقیاس‌شده فضای داخلی طرح نهایی کوره توسعه‌یافته (بدون عایق‌ها) برای ارزیابی احتراق MILD در شکل ۲ ارائه شده است. ورودی‌های هوا و سوخت نمایش داده شده در این شکل مربوط به آرایش نهایی کوره در حالت MILD هستند. با این حال، در چارچوب پژوهش حاضر که به بررسی عملکرد مشعل‌های مورد استفاده در فرایند پیش‌گرمایش کوره اختصاص دارد، از چهار ورودی هوای جانبی کوره استفاده نشده و جریان هوای احتراقی صرفاً از طریق ورودی هر یک از مشعل‌ها تأمین می‌شود. کوره صنعتی مرجع شامل ۹ شمش فولادی

با مجموع جرم ۲۸ تن است که در آرایشی مشخص قرار گرفته‌اند؛ در نسخه مقیاس شده مورد استفاده برای مطالعه احتراق MILD، این ۹ شمش در یک ردیف و با فاصله یکنواخت ۲۰ میلی‌متر چیدمان شده‌اند تا شرایط هندسی مناسب برای ارزیابی تجربی مشعل‌ها فراهم شود.

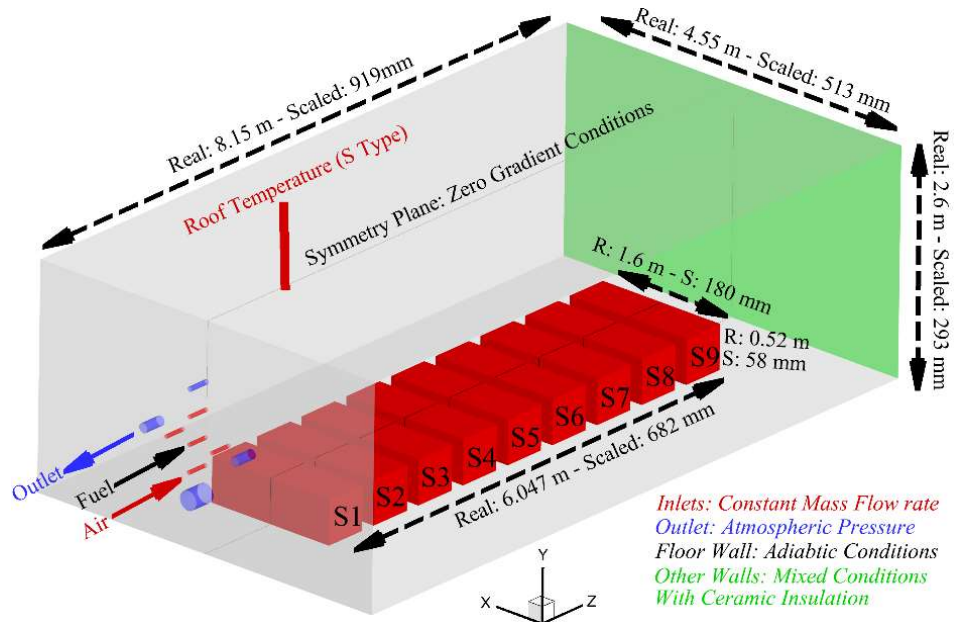


Figure 2 - Schematic and dimensions of inside the flameless steel heat treatment furnace in lab-scale

شکل ۲- طرح‌واره و ابعاد داخلی کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولاد در مقیاس آزمایشگاهی

به‌منظور انجام آزمون‌های تجربی متعدد با هزینه کمتر و فراهم کردن امکان ارزیابی دقیق مشعل‌ها در شرایط کنترل شده، نسخه صنعتی کوره به یک مدل مقیاس شده با توان حرارتی ۱۰ کیلووات تبدیل شد، در حالی که ویژگی‌های عملیاتی اصلی آن حفظ شده است. این مدل کوچک‌مقیاس، مبنای انجام آزمایش‌های این پژوهش قرار گرفته و امکان بررسی رفتار حرارتی کوره و عملکرد مشعل‌ها را در رژیم احتراق بدون شعله فراهم می‌کند.

مطالعات مختلفی به بررسی روش‌های مقیاس‌گذاری کوره‌ها برای انتقال از مقیاس آزمایشگاهی به کاربردهای صنعتی پرداخته‌اند. وبر [۲۹] یک مشعل زغال‌سنگ را از ۷ کیلووات به ۱۴ مگاوات مقیاس‌گذاری کرد، در حالی که اسمارت و همکاران [۳۰] از مشعل‌هایی با توان ۲/۵ و ۲۵ مگاوات استفاده کردند و تأیید نمودند که روش زمان اقامت ثابت^۱ (CRT) به‌طور مؤثری می‌تواند انتشار آلاینده NOx را در مقیاس‌های مختلف پیش‌بینی کند. به‌طور مشابه، سوکسام و چارونسوک [۳۱] یک محفظه احتراق MILD را از ۵۸۰ کیلووات به ۵/۸ مگاوات مقیاس‌گذاری کردند. در تکنولوژی احتراق بدون شعله، بازچرخشی گازهای داغ احتراقی اهمیت بیشتری نسبت به دیگر متغیرها دارد؛ بنابراین، زمان ماندن محصولات در کوره باید در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس صنعتی برابر باشد. با توجه به این یافته‌ها، روش زمان ماند ثابت به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای مقیاس‌گذاری کوره‌های احتراق MILD معرفی می‌شود، همان‌گونه که در معادله (۱) [۳۲] بیان شده است. در روابط زیر، مقیاس آزمایشگاهی با LS و مقیاس واقعی با RS نمایش داده شده است.

$$\frac{\tau_{RS}}{\tau_{LS}} = \text{ثابت} \Rightarrow \frac{L_{RS}}{L_{LS}} = \frac{U_{f_{RS}}}{U_{f_{LS}}} = \left(\frac{P_{RS}}{P_{LS}} \right)^{\frac{1}{3}} = S \quad (1)$$

در این رابطه، L طول کوره، U سرعت مخلوط، و P توان حرارتی هستند. S ضریب مقیاس است. بر اساس اطلاعات رسیده از شرکت محترم ماشین‌سازی اراک، کوره ۶۰ تنی گرمایش فولاد دارای ظرفیت ۷ مگاواتی است. همچنین، ظرفیت اولیه هدف نیز بر اساس کوره‌های متداول احتراق بدون شعله برابر ۱۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. لذا، با استفاده از روش زمان باقی‌مانده ثابت، نسبت مقیاس ۸/۸۶۸ به ۱ بدست آمد. بر این اساس، ابعاد اصلی و مقیاس شده کوره مطابق جدول ۱ است.

¹ Constant Residence Time (CRT)

جدول ۱- ابعاد کوره ۶۰ تنی گرمایش فولاد شرکت ماشین‌سازی به همراه ابعاد مقیاس شده

Table 1- Dimensions of industrial steel heat treatment furnace of the Machinsazi Company along with its lab-scaled dimensions

Item	Real Dims	Scaled Dims
Power (kW)	6973.3	10
Scaling Coefficient	8.868	1
Furnace Length (mm)	8150	919
Furnace Width (mm)	4550	513
Furnace Height (mm)	2600	293

به‌منظور تأمین پایداری حرارتی و حداقل‌سازی اتلاف انرژی در کوره آزمایشگاهی، یک ساختار چندلایه عایق برای دیوارها و سقف کوره طراحی و اجرا شد. آرایش نهایی لایه‌ها، که در شکل ۳ نمایش داده شده است، شامل چهار لایه عایق حرارتی با ویژگی‌های مکمل است. برای دیوار کوره، دو لایه ابتدایی از کوردیریت-موالیت (هر یک با ضخامت ۲۵ میلی‌متر) به‌عنوان سد حرارتی اولیه و تقویت‌کننده استحکام مکانیکی به‌کار گرفته شده‌اند. لایه سوم از آجر سبک نسوز به ضخامت ۴۰ میلی‌متر وظیفه اصلی عایق‌کاری در دماهای بالا را بر عهده دارد. در لایه چهارم، یک لایه ۳۰ میلی‌متری از پرلیتاز شمس مواد سازگار جهت افزایش پایداری سازه‌ای و کاهش اتلاف حرارت استفاده شده است. مجموعه این لایه‌ها با پوشش فلزی خارجی از ورق فولادی تکمیل شده و ضخامت کل عایق‌کاری را به ۱۲۰ میلی‌متر می‌رساند. این ساختار عایق‌بندی به‌گونه‌ای طراحی شده است که دمای سطح خارجی کوره را در شرایط کاری تا دمای 1600°C در محدوده‌ای کمتر از 80°C حفظ کند.

برای سقف نیز از این چهار لایه استفاده شده‌است:

- (۱) لایه داخلی از آلومینا (۲۰ میلی‌متر) با مقاومت حرارتی بالا و ضریب هدایت حرارتی بین 5 W/mK و 16 W/mK
- (۲) لایه دوم از کوردیریت موالیت (۲۵ میلی‌متر) با عایق‌کاری حرارتی و ضریب هدایت حرارتی بین 31 W/mK ، ۰،
- (۳) لایه سوم از آجر سفید سبک (۴۰ میلی‌متر) برای بهبود کارایی حرارتی با ضریب هدایت حرارتی بین 46 W/mK ، ۰،
- (۴) لایه چهارم از پرلیتاز سنگین شمس مواد سازگار (۳۰ میلی‌متر) برای استحکام مکانیکی و کاهش اتلاف حرارت و ضریب هدایت حرارتی 26 W/mK ، ۰.
- (۵)

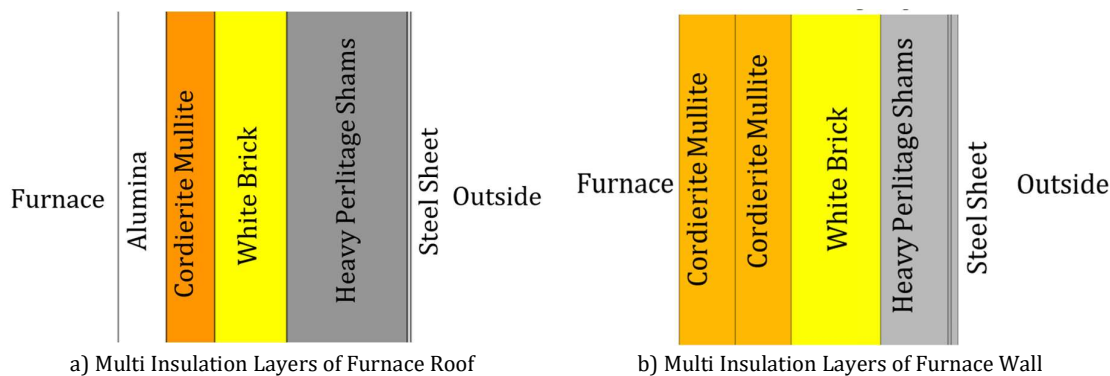


Figure 3 - Multilayers of the insulation for the roof and walls of the designed steel heat treatment furnace.

شکل ۳- لایه‌های مختلف عایق سقف و دیوار کوره عملیات حرارتی قطعات فولادی طراحی شده.

در شکل ۴، طرح‌واره نمای کامل از ساختار لایه‌ای عایق حرارتی دیواره جانبی و سقف کوره نمایش داده شده است.

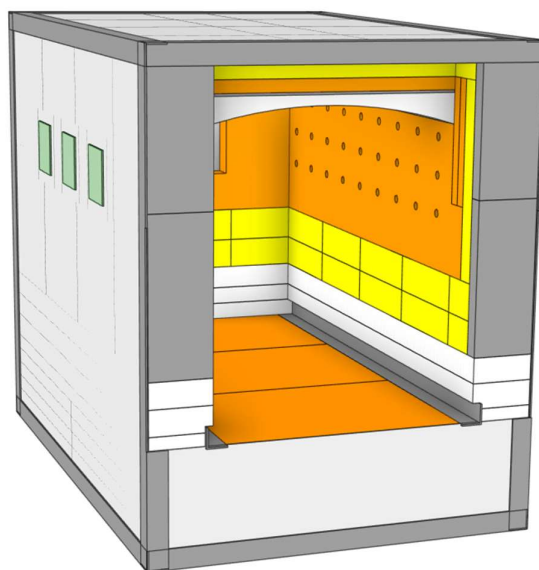


Figure 4 - Schematic of the flameless steel heat treatment furnace along with its multi insulation layers without the small and big gates.

شکل ۴- طرح‌واره کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولادی همراه با لایه‌های مختلف عایق‌ها بدون درب‌های بزرگ و کوچک.

پیکربندی مشعل‌های مورد مطالعه

در این بخش، سه مشعل به کار رفته در این پژوهش شامل مشعل جریان همسو محوری، مشعل چرخشی و مشعل خطی سوراخ‌دار معرفی می‌شوند. این سه هندسه با هدف ارزیابی چالش‌هایی نظیر ناپایداری شعله، طول شعله، زمان گرمایش کوره و پدیده برخاستگی شعله طراحی و مقایسه شده‌اند.

این مقایسه و ارزیابی سه‌گانه، مبنای انتخاب هندسه بهینه برای دستیابی به احتراق یکنواخت و پایدار همراه با دستیابی به کمترین زمان گرمایش کوره تا بیشترین ظرفیت هر مشعل در کوره مورد مطالعه را فراهم می‌سازد.

مشعل جریان همسو محوری

اولین مشعل بررسی شده در این پژوهش، یک مشعل جریان همسو محوری است. این مشعل مطابق شکل ۵ از یک لوله ۱ اینچ به طول ۲۰ سانتی‌متر تشکیل شده است که یک سهراهی ۱ اینچ به آن متصل می‌شود. یکی از انشعابات سهراهی به عنوان ورودی هوا در نظر گرفته شده و در انشعاب دیگر، یک تبدیل کاهنده ۱ اینچ به ۱/۲ اینچ نصب شده است. لوله ۱/۲ اینچ به طول ۳۰ سانتی‌متر که ۱۵ سانتی‌متر از آن رزوه‌دار است، به این تبدیل متصل شده و در انتهای آن نیز یک بوشن کوپلینگ ۱/۲ اینچ و سپس یک سرشیلنگی ۱/۴ اینچ قرار گرفته است. جریان سوخت از طریق این سرشیلنگی وارد لوله ۱/۲ اینچ شده و تا انتهای آن پیش می‌رود.

به دلیل رزوه‌دار بودن لوله ۱/۲ اینچ، امکان جابه‌جایی محوری آن در داخل مشعل فراهم است و در نتیجه می‌توان محل خروج سوخت را در موقعیت‌های جلوتر، هم‌سطح یا عقب‌تر نسبت به خروجی هوا تنظیم کرد. ایده اصلی آن بود که در صورت قرارگیری لوله سوخت در موقعیت جلوتر، جریان هوا پس از انبساط درون کوره با جت سوخت برخورد کرده و احتمال برخاستگی شعله کاهش یابد [۳۳]؛ اگرچه این آرایش ممکن است فرآیند اولیه تشکیل شعله را مختل کند. در مقابل، قرارگیری لوله سوخت در موقعیت عقب‌تر نسبت به لوله هوا موجب ایجاد یک جریان پیش‌مخلوط اولیه می‌شود که به افزایش پایداری شعله کمک می‌کند. ساختار مشعل به گونه‌ای طراحی شده است که این فاصله تا حدود ۱۵ سانتی‌متر قابل تنظیم باشد.

نتایج آزمایش‌های اولیه نشان دادند که لوله سوخت باید در موقعیت عقب‌تر از لوله هوا قرار گیرد تا با ایجاد یک پیش‌مخلوط اولیه، شعله‌ای پایدار شکل گیرد؛ زیرا در حالت هم‌سطح یا جلوتر بودن لوله سوخت، ناپایداری شعله به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. همچنین آزمایش‌های تکمیلی مشخص کردند که مناسب‌ترین فاصله میان لوله سوخت و هوا حدود ۲/۵ سانتی‌متر است؛ به‌طوری‌که افزایش این فاصله موجب خاموشی شعله و کاهش پایداری آن می‌شود. حداکثر توان کاری این مشعل ۱۰ کیلووات است و به‌صورت غنی‌سوز عمل می‌کند. در شرایط رقیق‌سوزی، به دلیل افزایش سرعت جریان هوا، پدیده برخاستگی شعله رخ داده که در نهایت منجر به ناپایداری و خاموشی شعله می‌شود.

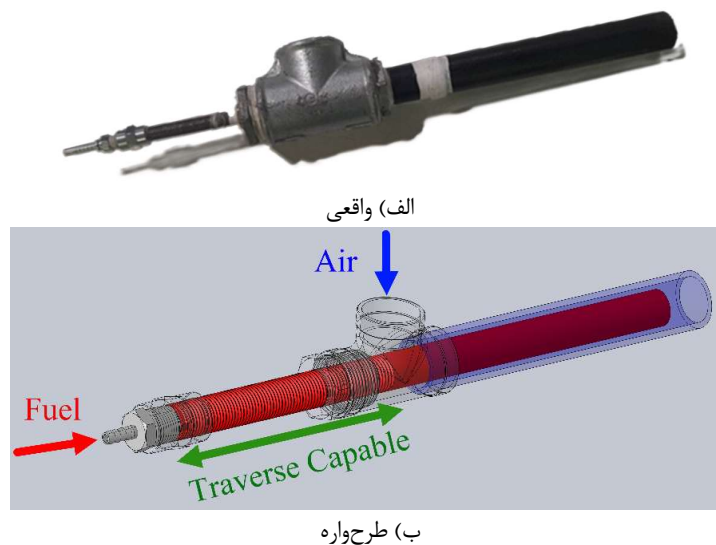


Figure 5 - 1-inch coflow burner with the variable length: a) real and b) schematic

شکل ۵- مشعل جریان همسو محوری ۱ اینچ با طول متغیر، الف) واقعی و ب) طرح‌واره

مشعل چرخشی

مشعل‌های چرخشی در مقایسه با مشعل‌های جریان همسو محوری قادرند شعله‌ای حجیم‌تر، پایدارتر و دارای تکانه بالاتر تولید کنند [۳۴، ۳۵]؛ مزیتی که منجر به بهبود فرآیند آمیختگی اولیه و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت به دیواره‌ها و محیط داخلی کوره می‌شود. اما با این وجود، چرخشی کردن جریان باعث افزایش تلاطم و نوسان شعله در طول زمان می‌شود [۳۶-۳۸]. بر این اساس، مطابق شکل ۶، یک مشعل چرخشی با ورودی ۱ اینچ طراحی و ساخته شد. در این طراحی، یک مسیر چرخشی با گام ۴ سانتی‌متر به صورت مارپیچ بر روی لوله سوخت و در امتداد مسیر جریان هوای ورودی ایجاد شد. عبور جریان هوا از روی این مارپیچ باعث القای مؤلفه چرخشی قابل توجهی در جریان شده و در نهایت جت هوا با زاویه‌ای در حدود ۴۵ درجه نسبت به محور طولی مشعل وارد محفظه کوره می‌شود. این ساختار چرخشی علاوه بر افزایش تکانه محوری، موجب گسترش شعله و بهبود اختلاط سوخت-هوا در محدوده توان‌های بالا می‌شود هرچند که تلاطم را افزایش می‌دهد. همچنین مشاهدات تجربی نشان داد که در این پیکربندی، شعله از نظر شکل، طول و پایداری عملکرد بسیار یکنواخت‌تری نسبت به مشعل جریان همسو دارد و پدیده‌هایی نظیر افت تکانه، ناپایداری شدید و کاهش نرخ انتقال حرارت در توان نزدیک به ۱۰ کیلووات و بالاتر که در مشعل‌های ۱ اینچ معمول مشاهده می‌شود، تا حد زیادی برطرف شده‌اند. حداکثر توان کاری این مشعل ۱۰ کیلووات است و قادر است هم در شرایط غنی‌سوزی و هم رقیق‌سوزی به صورت پایدار عمل کند. چرخشی شدن جریان در این مشعل موجب افزایش پایداری شعله، کاهش احتمال بروز پدیده برخاستگی شعله (lift-off) و جلوگیری از خاموشی آن می‌شود؛ بنابراین، این ویژگی امکان عملکرد مطمئن مشعل در حالت رقیق‌سوزی را نیز فراهم می‌سازد.



الف) چرخش ایجاد شده در مسیر هوا بر روی لوله ۱/۴ اینچ سوخت



ب) مجموعه مشعل و لوله سوخت دارای مسیر چرخشی برای هوا

Figure 6 - 1-inch Swirl burner: a) the swirler inside the air flow path and b) the entire burner

شکل ۶- تصویر مشعل چرخشی الف) چرخش ایجاد شده در مسیر هوا و ب) مجموعه کل مشعل

مشعل خطی سوراخ‌دار

مشعل‌های متداول با قطر ۱ اینچ معمولاً تنها قادر به تولید شعله‌ای پایدار تا توان حدود ۱۰ کیلووات هستند؛ به‌طوری که در توان‌های بالاتر، به دلیل افزایش سرعت خروجی، افت تکانه و تشدید پدیده برخاستگی شعله، ناپایداری رخ داده و شعله خاموش می‌شود. برای رفع این محدودیت، یک مشعل خطی سوراخ‌دار با قطر ۱ اینچ طراحی و ساخته شد که قادر است پایداری شعله را در توان‌های بالاتر تضمین کند. در این مشعل، مطابق شکل ۷، هوا و سوخت ابتدا داخل یک سهراهی با یکدیگر مخلوط شده و سپس وارد یک لوله داخلی ۱/۲ اینچ سوراخ‌دار به طور ۷۰ سانتی‌متر می‌شوند. مخلوط پس از عبور از سوراخ‌های این لوله، وارد لوله مشبک ۱ اینچ شده به طول ۹۰ سانتی‌متر و نهایتاً از مجموعه سوراخ‌های صفحه مشبک بیرونی وارد محفظه کوره می‌شود. حضور لوله داخلی ۱/۲ اینچ درون لوله مشبک ۱ اینچ دو نقش کلیدی دارد: (۱) افزایش شدت و یکنواختی اختلاط اولیه، و (۲) ایجاد توزیع همگن‌تر شعله در سطح خروجی مشعل.

تحلیل‌های طراحی نشان داد که تعداد، قطر و آرایش سوراخ‌ها بر روی هر دو سطح داخلی و خارجی مشعل، از عوامل اصلی تعیین‌کننده در پایداری شعله هستند؛ زیرا این پارامترها سرعت محلی خروج جریان، شدت تلاطم و الگوی شکل‌گیری جت‌های واکنش‌دهنده را کنترل می‌کنند. در مشعل‌هایی با تزریق چندنقطه‌ای، اگر فاصله میان نقاط خروجی زیاد باشد، شعله‌ها به‌صورت سلولی و گسسته تشکیل شده و این ساختار سلولی می‌تواند منجر به ناپایداری، تلاطم ناهمگون و افزایش احتمال جدایش شعله شود. بنابراین، لازم بود تعداد خروجی‌ها افزایش یافته و فاصله میان آن‌ها کاهش یابد تا هسته‌های شعله به یکدیگر متصل شده و یک نوار شعله پیوسته و پایدار شکل گیرد؛ نوار پیوسته‌ای که در عین جلوگیری از برخاستگی شعله، از برگشت شعله نیز جلوگیری می‌کند.

در طراحی نهایی، تعداد ۱۶ سوراخ با قطر ۳ میلی‌متر بر روی لوله داخلی ۱/۲ اینچ ایجاد شد و لوله ۱ اینچ بیرونی با یک صفحه سوراخ‌دار دارای سوراخ‌هایی با قطر حدود ۱/۵ میلی‌متر و تخلخل تقریبی ۲۶٪ تجهیز شد. این صفحه مشبک نقش مهمی در تعدیل فشار تزریق، یکنواخت‌سازی توزیع مخلوط و کاهش سرعت محلی تا محدوده مناسب برای تشکیل شعله پایدار دارد. علاوه بر این، تراکم مناسب سوراخ‌ها باعث می‌شود که شعله به‌صورت یک سطح پیوسته و همگن ایجاد شود، نه مجموعه‌ای از شعله‌های مجزا، که این موضوع یکی از کلیدی‌ترین عوامل در دستیابی به پایداری مناسب شعله در توان‌های بالا است. این مشعل می‌تواند تا توان ۳۰ کیلووات نیز کارایی داشته باشد.



الف) واقعی



ب) طرح‌واره



ج) از نمای نزدیک

Figure 7 - linch perforated lining burner: a) real, b) schematic, and c) close-view

شکل ۷- مشعل خطی سوراخ‌دار ۱ اینچ طرح صفحه مشبک، الف) واقعی و ب) طرح‌واره و ج) از نمای نزدیک

سیستم اندازه‌گیری و رویه آزمایش

شکل ۸ نمایی کلی از سامانه تأمین و کنترل سوخت و هوا در کوره آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. این سامانه به‌گونه‌ای طراحی شده است که جریان گاز طبیعی و هوای احتراق به‌صورت مجزا، پایدار و قابل تنظیم وارد مشعل‌ها شوند، تا شرایط نسبت سوخت به هوا و جریان کلی برای دستیابی به احتراق MILD به دقت کنترل شود.

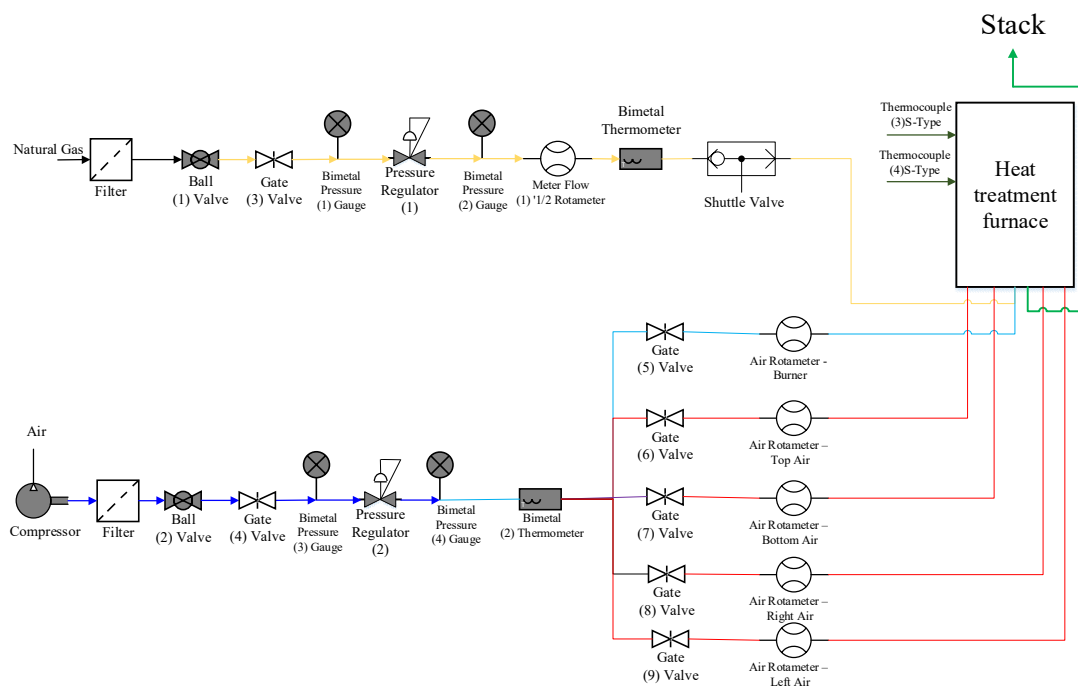
مسیر سوخت شامل فیلتر گاز، رگولاتور فشار، روماتر و شیرهای کنترلی است. فیلترها ذرات معلق و ناخالصی‌های گاز را حذف کرده و از انسداد و ناپایداری جریان جلوگیری می‌کنند، در حالی که رگولاتورها فشار ورودی را تثبیت کرده و دبی سوخت را پایدار نگه می‌دارند. دبی حجمی گاز با روماترهای کالیبره‌شده اندازه‌گیری شده و داده‌های آن برای شرایط واقعی فشار و دما تصحیح می‌شوند [۳۹]. همچنین ترموکوپل‌ها در نقاط کلیدی مسیر و در خروجی مشعل نصب شده‌اند تا پایش دمای خط و کنترل حلقه بسته نسبت سوخت/هوا از طریق سیستم کنترل PID یا PLC انجام شود.



ب) بستر مدار هوا



الف) بستر مدار سوخت



ج) طرح‌واره بستر آزمون

Figure 8 - Schematic of the experimental setup of the flameless steel heat treatment furnace in lab-scale.

شکل ۸- طرح‌واره بستر آزمون کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولاد در مقیاس آزمایشگاهی.

مسیر هوای ورودی نیز شامل فیلتر، رگولاتور، روتامتر و شیرهای کنترلی است. در طراحی حاضر، جریان هوا ابتدا به یک شاخه پیش گرم متمرکز هدایت می شود تا دمای کوره قبل از رسیدن به حالت بدون شعله به حد مورد نظر برسد و سپس با باز کردن انشعابات کناری مشعل، هوا به صورت یکنواخت و با اختلاط مناسب وارد ناحیه احتراق می شود. این تفکیک مسیر و کنترل دبی هوا موجب حذف شعله نقطه ای و ایجاد شرایط لازم برای احتراق بدون شعله (MILD) با توزیع انرژی یکنواخت در کوره می شود.

استفاده از فیلترها، روتامترها و رگولاتورها در کنار شیرهای ایمنی و کنترل کننده ها، یک سامانه پایدار و قابل اعتماد برای تنظیم دقیق نسبت سوخت به هوا فراهم می کند [۴۰]. این ساختار امکان اجرای آزمایش های کنترل شده، ثبت داده های دقیق و تحلیل عملکرد مشعل های جریان همسو محوری، چرخشی و خطی سوراخدار در شرایط واقعی پیش گرمایش قطعات فولادی را فراهم می آورد.

شکل ۹ نمایی از آرایش تجهیزات اندازه گیری در اطراف کوره آزمایشگاهی را نشان می دهد. دوربین CCD در موقعیتی نصب شده است که دید مستقیم و پایدار به ناحیه احتراق داشته باشد تا امکان ثبت رفتار شعله، بررسی گذار به احتراق بدون شعله (MILD) و تحلیل پدیده های تشعشعی فراهم شود. ترموکوپل ها در نقاط کلیدی شامل دیواره ها، سقف و دودکش نصب شده اند تا پروفیل دمایی دقیق در طول آزمایش ها ثبت شود. برای جانمایی ترموکوپل ها، چند محدودیت فنی و عملیاتی از جمله جلوگیری از اتلاف بیش از حد حرارت، پوشش نواحی با گرادیان حرارتی بالا و تناسب با ابعاد فیزیکی حسگرها مدنظر قرار گرفت [۴۱].

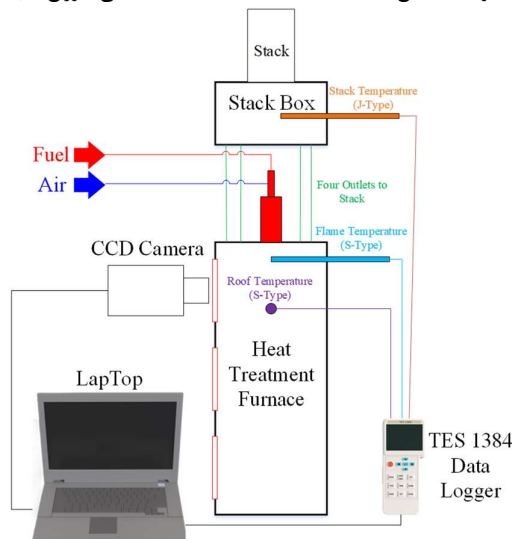
بر اساس تحلیل حساسیت دمایی و شبیه سازی عددی میدان دما، ترموکوپل ها در قالب ۹ ستون و در سه ردیف افقی روی دیواره جانبی کوره قرار گرفتند؛ فاصله عمودی میان سوراخ ها ۷/۵ سانتی متر و فاصله افقی حدود ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. این آرایش بهینه، بیشترین دقت اندازه گیری دما را در نواحی بحرانی با کمترین تلفات حرارتی ممکن فراهم می کند. طیف سنج نیز در زاویه ای مشخص نسبت به پنجره مشاهده نصب شده است تا تابش ناشی از گونه های فعال شیمیایی و محصولات احتراق با حداقل اغتشاش ثبت شود. این مجموعه امکان استخراج پارامترهای کلیدی شامل دمای گاز، شدت تابش و حضور گونه های رادیکالی در مراحل مختلف احتراق و اعتبارسنجی شبیه سازی های عددی را فراهم می کند.



ب) جانمایی سوراخ های ترموکوپل با بوشن



الف) جانمایی دوربین CCD، ترموکوپل ها و طیف سنج



ج) طرحواره تجهیزات اندازه گیری

Figure 9 - Measurement equipment for the flameless steel heat treatment furnace in lab-scale.

شکل ۹- تجهیزات اندازه گیری کوره احتراق بدون شعله گرمایش قطعات فولاد در مقیاس آزمایشگاهی.

در شکل ۹ ج)، شکل طرحواره آرایش تجهیزات اندازه‌گیری در کوره حرارت‌دهی را نشان می‌دهد. مسیرهای ورودی سوخت و هوا به‌صورت مجزا آورده شده‌اند تا کنترل دقیق نسبت اختلاط و دبی جریان‌ها امکان‌پذیر باشد. ترموکوپل‌ها در نقاط کلیدی شامل سقف کوره، شعله و دودکش (Stack) نصب شده‌اند تا دمای محلی و خروجی گازها با دقت بالا اندازه‌گیری شود. در این آزمایش از ترموکوپل‌های نوع K و J استفاده شده است: ترموکوپل نوع S برای اندازه‌گیری دمای بالا) تا 1600°C در سقف و شعله به کار رفته، در حالی که ترموکوپل نوع J برای اندازه‌گیری دمای دودکش و پایش جریان خروجی گازها مناسب است. داده‌های ترموکوپل‌ها به سیستم ثبت و پایش منتقل شده و امکان کنترل حلقه‌ای دبی سوخت و هوا، تحلیل توزیع حرارت و بررسی گذار به احتراق MILD را فراهم می‌کند. این آرایش، پایش دقیق پروفیل دمایی و استخراج پارامترهای کلیدی عملکرد کوره را امکان‌پذیر می‌سازد.

نتایج و بحث

ساختار و پایداری شعله

تصاویر مربوط به شعله مشعل جریان‌همسو و مشعل چرخشی در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند که هر دو مشعل در توان ۱۰ کیلووات کار می‌کنند. شعله حاصل از مشعل جریان‌همسو به‌صورت کشیده و با طول تقریبی ۳۵ سانتی‌متر تشکیل شد، اما این شعله به‌دلیل تکانه پایین، پایداری کافی نداشت. با توجه به آرایش هندسی کوره در شکل ۲، که در آن خروجی دودکش و ورودی مشعل در یک سمت قرار دارند، گازهای داغ پس از برخورد به دیواره انتهایی کوره به سمت ورودی باز می‌گردند. این بازگشت جریان داغ، در حضور تکانه پایین شعله جریان‌همسو، موجب ناپایداری شعله و کاهش اثربخشی گرمایش کوره می‌شود. علاوه بر این، با توجه به نسبت هم‌ارزی حدود ۱.۱ و اختلاط ناکافی سوخت و هوا در این مشعل، مقدار قابل توجهی از گازهای نسوخته در محفظه کوره مشاهده شد.

در مقابل، مطابق (ب)، در مشعل چرخشی، مؤلفه چرخشی القاشده به جریان هوا در بخش ورودی به‌طور کامل به ساختار شعله منتقل شده و یک شعله مارپیچی پایدار شکل گرفته است. این ساختار چرخشی موجب افزایش قابل توجه اختلاط اولیه سوخت و هوا، بزرگ‌تر شدن حجم شعله، افزایش تکانه خروجی و اختلاط بهتر گازهای درون کوره نسبت به مشعل جریان‌همسو شده است. در نتیجه، پایداری شعله افزایش یافته، احتمال برخاستگی کاهش پیدا کرده و طول شعله به حدود ۴۰ سانتی‌متر رسیده است. این افزایش طول و حجم شعله سبب ارتقای نرخ انتقال حرارت و بهبود فرآیند پیش‌گرمایش کوره شده و از نظر عملکرد حرارتی مزیت قابل‌توجهی نسبت به مشعل‌های همسو محوری ایجاد می‌کند. اما با این وجود، تلاطم شعله نیز افزایش می‌یابد که باعث افزایش نوسانات شعله در طول زمان می‌شود.



ب) مشعل چرخشی



الف) مشعل جریان همسو محوری

Figure 10 - Flame image of a) the coflow burner and b) the swirl burner

شکل ۱۰- تصویر شعله از الف) مشعل جریان همسو و ب) مشعل چرخشی

شعله مربوط به مشعل خطی سوراخ‌دار در دو بازه زمانی، مرحله اولیه روشن‌سازی و لحظه شکست شعله، در توان ۱۸/۴ کیلووات در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. استفاده از ساختار مشبک در این مشعل موجب شکل‌گیری شعله‌ای پایدار، یکنواخت و بدون الگوهای سلولی پراکنده شد. چنین آرایشی نه تنها یکنواختی میدان دمایی در ناحیه احتراق را افزایش می‌دهد، بلکه انتقال حرارت به دیواره‌های داخلی کوره را نیز منظم‌تر و مؤثرتر می‌سازد.

مشاهدات نشان داد که در لحظات ابتدایی پس از راه‌اندازی، به دلیل پایین بودن دمای اولیه بدنه مشعل، واکنش‌های احتراقی عمدتاً در نواحی نزدیک به خروجی سوراخ‌ها متمرکز شده و پلوم‌های نسبتاً بزرگ و پرشدتی تشکیل می‌شود. با گرم شدن تدریجی بدنه فلزی مشعل، این پلوم‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و طول شعله‌ها نیز کوتاه‌تر می‌شود؛ روندی که به‌وضوح در شکل ۱۱ (الف) مشاهده می‌شود. کاهش پلوم ناشی از افزایش تدریجی دمای سطح مشعل است؛ فرایندی که منجر به پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوا شده و در نتیجه ساختار شعله به سمت پایداری بالاتر حرکت می‌کند.

با تداوم فرآیند گرمایش و افزایش دمای مخلوط ورودی در طول لوله ۱ اینچ با طول ۹۰ سانتی‌متر، شدت تابش شعله کاهش یافته و سازوکار احتراق به سمت حالت گسترده و حجمی گذار کرد (شکل ۱۱-ب). در این آزمایش، مدت زمان لازم برای رسیدن دمای سقف کوره به ۵۵۰ درجه سلسیوس حدود ۲ ساعت و ۳۳ دقیقه (۱۵۳ دقیقه) ثبت شد. این رفتار با افزایش دمای هوای ورودی هم‌خوانی داشته و در منابع به‌عنوان احتراق با هوای دما بالا (HiCOT) شناخته می‌شود.



(ب) در زمان شکست حرارتی در مشعل



(الف) در زمان اولیه

Figure 11 - Flame image of the perforated lining burner for a) the initial operating time and b) the moment of burner fracture

شکل ۱۱- تصویر شعله مشعل خطی سوراخ‌دار (الف) در زمان اولیه عملیات و (ب) در زمان شکست حرارتی در مشعل

افزایش دمای مشعل در طول فرآیند، منجر به تشدید پدیده اکسایش در سطح لوله مشعل شده و در نهایت باعث تضعیف ساختار مکانیکی و شکست آن شد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ناحیه شکست با تخریب شدید سطحی، پوسته‌پوسته شدن و کاهش ضخامت موضعی همراه است که بیانگر اکسایش شدید در دماهای بالا است. در مشعل خطی سوراخ‌دار، به‌دلیل عبور مداوم جریان داغ و تمرکز تنش‌های حرارتی در نواحی دارای سوراخ، نرخ انتقال حرارت به دیواره فلزی افزایش یافته و این موضوع در کنار حضور اکسیژن، شرایط را برای اکسایش تسریع‌شده فراهم می‌کند. در نتیجه، کاهش استحکام مکانیکی و ایجاد حفره‌های موضعی در ساختار لوله رخ داده که در نهایت به شکست موضعی مشعل منجر شده است (شکل ۱۲). این پدیده علاوه بر کاهش عمر کاری مشعل، از منظر ایمنی نیز حائز اهمیت است؛ به‌طوری‌که شکست در بدنه مشعل می‌تواند منجر به نشت گاز، برگشت شعله و در نهایت خاموشی ناگهانی یا شرایط نایمن در کوره شود.



Figure 12 - Location of the burner fracture as a result of the high-temperature oxidation

شکل ۱۲- محل شکست مشعل در اثر اکسایش دما بالا

عملکرد حرارتی و نرخ گرمایش

شکل ۱۳ پاسخ زمانی دمای سقف کوره گرمایش فولاد را برای سه نوع مشعل شامل مشعل جریان همسومحوری، مشعل چرخشی و مشعل خطی سوراخدار نشان می‌دهد. مشعل همسومحوری با توان حداکثری ۱۰ کیلووات، پس از حدود ۴۵۰ دقیقه (۷.۵ ساعت) تنها توانست دمای سقف کوره را به ۵۰۰ درجه سلسیوس برساند و با افزایش بیشتر زمان، هیچ رشد محسوسی در دما مشاهده نشد. این رفتار بیانگر محدودیت قابل توجه ظرفیت حرارتی این مشعل و عدم توانایی آن در پیش گرمایش کوره تا دماهای بالاتر است.

مشعل خطی سوراخدار، با توان عملیاتی حدود ۱۸ کیلووات، قادر بود دمای سقف کوره را طی ۱۵۰ دقیقه به حدود ۵۵۰°C برساند. با این حال، به دلیل اکسایش شدید لوله مشعل و وقوع شکست حرارتی، فرآیند آزمایش پیش از تکمیل منحنی پاسخ حرارتی متوقف شد. بنابراین، علیرغم عملکرد حرارتی سریع، پایداری ساختاری این مشعل در دماهای بالا ناکافی بود.

در مقابل، مشعل چرخشی با توان کاری ۱۰ کیلووات و حداکثری ۱۵ کیلووات توانست طی حدود ۷ ساعت دمای سقف کوره را به ۵۵۰°C رسانده و پس از ده ساعت (۶۰۰ دقیقه) از ۶۰۰°C نیز عبور کند؛ ضمن اینکه روند افزایشی دما همچنان ادامه داشت. این نتایج حاکی از توان حرارتی قابل‌اتکاتر و عملکرد پایدارتر مشعل چرخشی در مقایسه با مشعل همسومحوری است. برای حفظ شرایط برابر و امکان مقایسه، آزمایش در این مرحله متوقف شد.

بر اساس این یافته‌ها، عملکرد مشعل همسومحوری ۱ اینچ در پیش گرمایش کوره مطلوب نیست. این ضعف عمدتاً ناشی از ناپایداری شعله در مواجهه با جریان گازهای داغ برگشتی از انتهای کوره است. هرچند افزایش قطر و توان حرارتی این مشعل می‌تواند حدی از بهبود ایجاد کند، اما در مقایسه با مشعل‌های چرخشی و خطی هم‌سایز همچنان عملکرد پایین‌تری دارد.

مشعل خطی سوراخدار، با وجود دستیابی سریع به دمای هدف، برای کاربرد در کوره‌های صنعتی مناسب نیست. این موضوع عمدتاً به محدودیت‌های هندسی آن بازمی‌گردد، زیرا استفاده از یک مشعل خطی در طول‌های چندمتری (حدود ۸ متر یا بیشتر) با چالش‌هایی نظیر افت فشار، عدم یکنواختی توزیع حرارت و دشواری در نصب و نگهداری همراه است. علاوه بر این، اکسایش در دماهای بالا یک چالش کلیدی در کاهش عمر مفید مشعل‌ها است. برای مقابله با این پدیده، نیاز به استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی و حرارت، مانند برخی گریدهای اینکونل است. با این حال، این آلیاژها به دلیل هزینه ساخت بالا و محدودیت‌های دمایی عملیاتی (که برای دماهای بسیار بالا نیاز به طراحی‌های پیچیده‌تر مانند خنک‌کاری فعال یا پوشش‌های سرامیکی دارد)، در نهایت استفاده از این طراحی مشعل را در مقیاس صنعتی بزرگ مقیاس، از نظر اقتصادی و فنی، کمتر توجیه‌پذیر می‌سازد.

در مجموع، مشعل چرخشی کارآمدترین و پایدارترین عملکرد حرارتی را در میان سه مشعل مورد بررسی ارائه داد. تنها نقطه‌ضعف آن، زمان گرمایش نسبتاً طولانی است که با افزایش قطر مشعل به ۱.۵ یا ۲ اینچ و ارتقای توان حرارتی به بیش از ۲۰ کیلووات، به‌طور کامل قابل جبران خواهد بود.

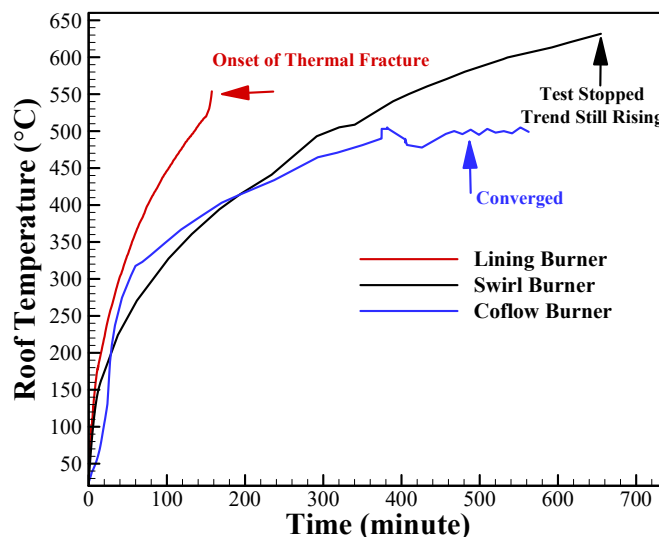


Figure 13 - Temporal response of the roof temperature for the coflow burner, swirl burner, and perforated lining burner

شکل ۱۳- پاسخ زمانی دمای سقف کوره گرمایش فولاد برای سه مشعل جریان همسو، مشعل چرخشی و مشعل خطی سوراخدار

برای مقایسه عادلانه بازده گرمایش مستقل از توان ورودی، نرخ گرمایش نرمال شده (افزایش دما بر دقیقه به ازای هر کیلووات) برای هر مشعل محاسبه شد. نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲ - مقایسه نرخ گرمایش نرمال شده

Table 2 - Normalized heating rate comparison

Type	Thermal Power (kW)	Time to reach 550°C (min)	Temperature Increase (°C)	Normalized Heating Rate (°C/min/kW)
Axial CoFlow	10	~450 (reached 500°C)	500	≈ 0.011
Swirler	10	≈ 420	550	≈ 0.013
Perforated Lineaing	18.4	150	550	≈ 0.020

مشعل خطی سوراخدار همچنان بالاترین نرخ گرمایش نرمال شده را نشان می‌دهد، اما اختلاف آن با مشعل چرخشی کمتر از مقایسه زمانی خام است. پایداری robust مشعل چرخشی همراه با نرخ گرمایش نرمال شده قابل قبول، آن را به گزینه‌ای متعادل برای کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند.

در شکل ۱۴، پاسخ زمانی دمای گازهای خروجی دودکش کوره گرمایش فولاد برای سه مشعل شامل مشعل جریان همسومحوری، مشعل چرخشی و مشعل خطی سوراخدار ارائه شده است. همان‌گونه که در تحلیل شکل قبل نیز اشاره شد، رفتار حرارتی این مشعل‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر کیفیت اختلاط، پایداری شعله و توان حرارتی آن‌ها قرار دارد. در این میان، مشعل همسومحوری به دلیل محدودیت توان و ناپایداری نسبی شعله، افزایش محدودی در دمای گازهای خروجی ایجاد کرده و روند آن به حالت تقریباً پایا در دماهای پایین‌تر منتهی می‌شود.

مشعل خطی سوراخدار با توجه به توان حرارتی بالاتر، توانست دمای گازهای دودکش را در مدت زمان کوتاه‌تری تا حدود ۱۸۷°C افزایش دهد و به یک مقدار تقریباً ثابت برساند. با این حال، ادامه فرآیند به دلیل اکسایش شدید و وقوع شکست حرارتی در حدود ۱۹۰°C امکان‌پذیر نبوده و آزمایش متوقف شد. این رفتار نشان می‌دهد که اگرچه این مشعل از نظر نرخ انتقال حرارت عملکرد مطلوبی دارد، اما پایداری ساختاری آن در دماهای بالا محدودکننده است.

در مقابل، مشعل چرخشی عملکرد بهتری از خود نشان داده و توانست دمای گازهای خروجی دودکش را تا حدود ۲۱۳°C افزایش دهد، در حالی که روند افزایش دما همچنان ادامه‌دار بوده و به شرایط پایا نرسیده بود. این موضوع بیانگر انتقال حرارت مؤثرتر، احتراق کامل‌تر و پایداری بالاتر شعله ناشی از افزایش اختلاط گازهای احتراقی درون کوره در این مشعل است. به‌طور کلی، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مشعل چرخشی علاوه بر تأمین دمای بالاتر در دودکش، از نظر پایداری عملکرد نیز برتری محسوسی نسبت به دو مشعل دیگر دارد.

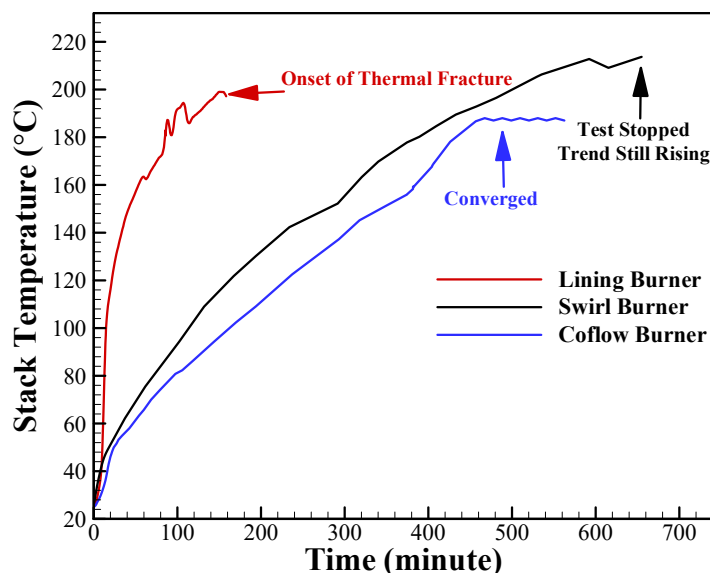


Figure 14 - Temporal response of the stack temperature for the coflow burner, swirl burner, and perforated lining burner

شکل ۱۴- پاسخ زمانی دمای دودکش کوره گرمایش فولاد برای سه مشعل جریان همسو، مشعل چرخشی و مشعل خطی سوراخدار

تحلیل تصاویر RGB شعله

شکل ۱۵ پراکندگی شدت سه مؤلفه رنگی R ، G و B را بر حسب شدت کانال G برای سه نوع مشعل شامل مشعل جریان همسومحوری (الف)، مشعل چرخشی (ب) و مشعل خطی سوراخدار (ج) نشان می‌دهد. این نمایش، ابزاری کمی برای تحلیل ویژگی‌های تابشی شعله و ارزیابی یکنواختی دمایی و کیفیت اختلاط سوخت-هوا فراهم می‌سازد. بررسی و تحلیل تصاویر RGB به‌عنوان ابزاری کم‌هزینه و کارآمد برای ارزیابی کیفی یکنواختی حرارتی شعله در مطالعات پیشین نیز به‌کار رفته است [۴۲-۴۴]. در هر سه مشعل، مؤلفه R در بازه‌های بالاتر شدت (عمدتاً ۲۰۰ تا ۲۵۰) متمرکز است که بیانگر غلبه تابش نواحی داغ شعله و حضور قوی‌تر گونه‌های تابشی در دماهای بالا است. در مقابل، مؤلفه B در شدت‌های پایین‌تر قرار گرفته و با افزایش شدت G روند افزایشی ملایم‌تری نشان می‌دهد که این امر به وابستگی آن به نواحی سردتر یا واکنش‌های کمتر کامل مرتبط است. خط قطری مرجع نیز وضعیت برابری شدت‌ها را نشان می‌دهد و فاصله نقاط از این خط، میزان عدم‌تقارن طیفی شعله را مشخص می‌کند.

در مشعل جریان همسومحوری (الف)، پراکندگی نقاط نسبتاً متمرکز بوده و تغییرات مؤلفه‌های رنگی محدود است. اگرچه عکس‌برداری لحظه‌ای حاکی از همگنی مشعل همسو است، اما پایش چشمی و داده‌های ترموکوپلی نشان‌دهنده نوسانات زمانی شدید و ناپایداری دینامیکی آن در مقایسه با مشعل چرخشی است. با این وجود، مشاهدات تجربی حین آزمایش نشان داد که این مشعل در طول زمان مستعد ناپایداری و برخاستگی شعله، به‌ویژه در مواجهه با جریان برگشتی گازهای داغ، است. در این حالت، نسبت‌های شدت رنگی تغییرات محدودی داشته و بیانگر ساختار حرارتی همگن‌تر شعله است. در مشعل چرخشی (ب)، گستره پراکندگی نقاط به‌ویژه در مؤلفه B افزایش یافته است که ناشی از حضور ساختارهای گردابه‌ای و لایه‌بندی حرارتی در اثر چرخش جریان است. این ویژگی موجب ایجاد نواحی با دماهای متفاوت شده و در نتیجه دامنه تغییرات رنگی افزایش می‌یابد، هرچند هنوز روند کلی نسبتاً پیوسته حفظ شده است. در مشعل خطی سوراخدار (ج)، بیشترین میزان پراکندگی و عدم یکنواختی در توزیع نقاط مشاهده می‌شود. تمرکز هم‌زمان نقاط در نواحی با شدت‌های بسیار بالا برای R و بسیار پایین برای B ، همراه با پراکندگی وسیع در کل دامنه، نشان‌دهنده نوسانات شدید دمایی، تشکیل ساختارهای موضعی احتراق و چندجیتی مشعل و همچنین تداخل تابش بدنه داغ مشعل و دیواره کوره در پس‌زمینه تصویر نسبت داد که تحلیل یکنواختی ذاتی شعله را با چالش مواجه می‌سازد.

به طور کلی، تحلیل نمودارهای RGB نشان می‌دهد که مشعل همسومحوری دارای یکنواخت‌ترین ساختار حرارتی و تابشی است در لحظه تصویر با امکان ناپایداری شعله آن در طول زمان است. در حالی که مشعل خطی سوراخدار بیشترین اختلاف دمایی در تصویر آن وجود داشت. ولی با این وجود، مشعل چرخشی رفتاری مابین داشت که به دلیل تلاطم زیاد، نوسانات رنگی مشاهده می‌شد ولی پایداری شعله همچنان برقرار بود.

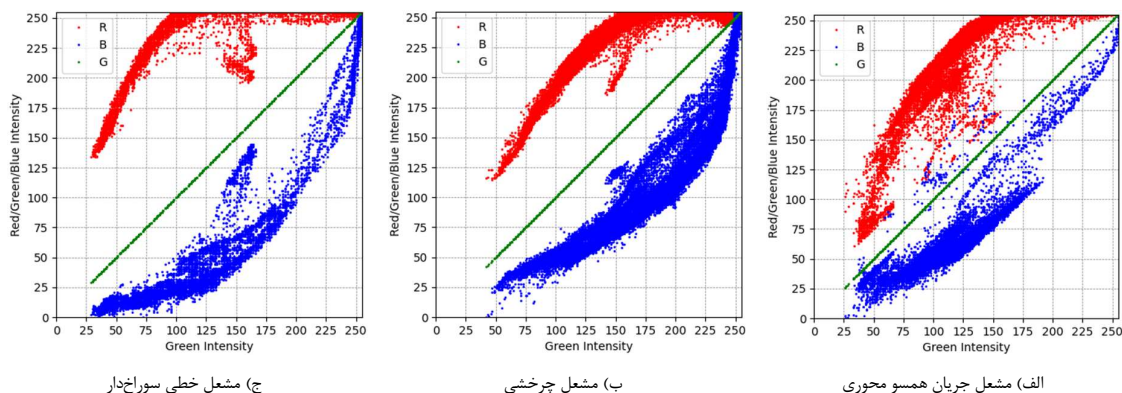


Figure 15 - RGB image of flame for the coflow burner, swirl burner, and perforated lining burner

شکل ۱۵- عکس RGB از شعله سه مشعل جریان همسومحوری، مشعل چرخشی و مشعل خطی سوراخدار

نتیجه‌گیری

کوره‌های احتراق بدون شعله (MILD) به دلیل ایجاد میدان دمایی یکنواخت، کاهش شدت شعله، تقویت بازچرخش گازهای داغ و کاهش آلاینده‌ها، یکی از گزینه‌های مهم برای گرمایش قطعات فولادی در کاربردهای صنعتی به‌شمار می‌روند. در این پژوهش، یک کوره آزمایشگاهی

احتراق بدون شعله در آزمایشگاه ملی احتراق دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شد و عملکرد سه نوع مشعل جریان همسو محوری، چرخشی و خطی سوراخدار در یک بستر آزمون یکسان و تحت شرایط کنترل شده مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی این مطالعه، مقایسه قابلیت مشعل‌ها در دستیابی به گرمایش پایدار، یکنواخت و کم‌ناپایدار، و نیز بررسی زمان گرمایش کوره تا رسیدن به دمای 600°C به عنوان یک شاخص عملیاتی مشترک بود.

- مشعل جریان همسو محوری شعله‌ای کشیده و کم‌تکانه ایجاد کرد، اما به دلیل اختلاط محدود و حساسیت بالا به بازگشت گازهای داغ، پایداری آن در مقایسه با سایر مشعل‌ها کمتر بود و در مدت ۷.۵ ساعت دمای کوره در 500°C پایدار شد.
 - مشعل جریان همسو محوری به دلیل تکانه پایین‌تر و اختلاط کمتر، طول شعله کشیده‌تری ایجاد کرد و در برخی حالات با ناپایداری، بازگشت گازهای داغ و کاهش کارایی گرمایش مواجه شد.
 - مشعل خطی سوراخدار یکنواخت‌ترین ساختار شعله را در میان سه مشعل ایجاد کرد و به دلیل توزیع چند نقطه‌ای خروج مخلوط، گرمایش متعادل‌تری را در حجم کوره فراهم ساخت. در مراحل اولیه، پلوم‌های شعله‌ای بزرگ‌تری مشاهده شد، اما با گرم شدن بدنه مشعل، شعله به تدریج به ساختاری پایدارتر و حجمی‌تر تبدیل شد.
 - مشعل خطی سوراخدار شعله‌ای سطحی، یکنواخت و پیوسته تولید کرد که به توزیع حرارت مناسب کمک نمود و در دستیابی به سرعت گرمایش بالا نسبت به دو مشعل دیگر بهتر عمل کرد و زمان لازم گرمایش کوره حدود ۲ ساعت و ۳۳ دقیقه اندازه‌گیری شد.
 - در عین حال، این مشعل در دماهای بالاتر با پدیده اکسایش شدید سطحی مواجه شد و در نهایت شکست موضعی در بدنه آن رخ داد. این مشاهده نشان می‌دهد که هرچند ساختار سوراخدار برای ایجاد شعله یکنواخت و پایدار مناسب است، اما در کاربردهای طولانی مدت و دماهای بالا، پایداری حرارتی و مقاومت اکسیداسیونی بدنه مشعل باید به‌دقت مورد توجه قرار گیرد.
 - مشعل چرخشی به واسطه ایجاد مؤلفه گردابه‌ای در جریان ورودی، اختلاط سوخت و هوا و اختلاط گازهای احتراقی درون کوره را بهبود داد، شعله‌ای حجیم‌تر و پایدارتر ایجاد کرد، و نسبت به مشعل جریان همسو عملکرد حرارتی بهتری نشان داد. این مشعل توانست یکنواختی دمایی مطلوب‌تری در محفظه کوره فراهم کند و زمان رسیدن به 500°C را کاهش دهد و ضمن ثابت نگه‌داشتن روند افزایشی خود، دمای کوره بعد از ۱۰ ساعت به بالاتر از 600°C نیز برسد.
 - ساختار شعله در مشعل چرخشی به صورت حجیم، مارپیچی و پایدار شکل گرفت؛ درحالی‌که شعله در مشعل محوری کشیده و کم‌تکانه و در مشعل سوراخدار پهن و یکنواخت مشاهده شد. افزایش اختلاط اولیه و افزایش نرخ چرخش هوا در مشعل چرخشی باعث افزایش راندمان حرارتی، افزایش حجم شعله و کاهش حساسیت شعله به اغتشاشات ورودی شد.
- در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب مشعل مناسب، عامل کلیدی در عملکرد کوره‌های MILD برای گرمایش فولاد است و میان سه آرایش بررسی شده، مشعل چرخشی از نظر دستیابی ایمن، پایدار و گرمایش یکنواخت برتری بیشتری داشت، هرچند محدودیت‌های حرارتی ناشی از ابعاد آن نیز باید در طراحی صنعتی لحاظ شود.

منابع

- [1] P. Compais, J. Arroyo, F. Tovar, V. Cuervo-Piñera, and A. Gil, "Promoting the valorization of blast furnace gas in the steel industry with the visual monitoring of combustion and artificial intelligence," *Fuel*, vol. 362, p. 130770, 2024.
- [2] A. M. García, A. F. Colorado, J. E. Obando, C. E. Arrieta, and A. A. Amell, "Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beam type reheating furnace," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 153, pp. 633–645, 2019.
- [3] Y. Khalid *et al.*, "Oxygen enrichment combustion to reduce fossil energy consumption and emissions in hot rolling steel production," *J. Clean. Prod.*, vol. 320, p. 128714, 2021.
- [4] H. Liu, M. Saffaripour, P. Mellin, C.-E. Grip, W. Yang, and W. Blasiak, "A thermodynamic study of hot syngas impurities in steel reheating furnaces-Corrosion and interaction with oxide scales," *Energy*, vol. 77, pp. 352–361, 2014.
- [5] S. H. Han, Y. S. Lee, J. Cho, and K. H. Lee, "Efficiency analysis of air-fuel and oxy-fuel combustion in a reheating furnace," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 121, pp. 1364–1370, 2018.
- [6] Y. Hu *et al.*, "Modelling and simulation of steel reheating processes under oxy-fuel combustion conditions-Technical and environmental perspectives," *Energy*, vol. 185, pp. 730–743, 2019.
- [7] P. Jóźwiak, J. Hercog, A. Kiedrzyńska, and K. Badyda, "CFD analysis of natural gas substitution with syngas in the industrial furnaces," *Energy*, vol. 179, pp. 593–602, 2019.
- [8] A. Emadi, A. Saboonchi, M. Taheri, and S. Hassanpour, "Heating characteristics of billet in a walking hearth type reheating furnace," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 63, no. 1, pp. 396–405, 2014.

- [9] J.-Y. Jang and J.-B. Huang, "Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 85, pp. 313–321, 2015.
- [10] Y. Liu, J. Wang, C. Min, G. Xie, and B. Sundén, "Performance of fuel-air combustion in a reheating furnace at different flowrate and inlet conditions," *Energy*, vol. 206, p. 118206, 2020.
- [11] M. Zourazmai, M. Z. Targhi, and A. Ashouri, "Enhancing Temperature Uniformity and Recirculation in MILD Combustion Furnace: A Study on Angle of Burner's Bluff Body," *Case Studies in Thermal Engineering*, p. 106561, 2025.
- [12] A. Ashouri, M. Zabetian Targhi, and K. Mazaheri, "Design Desirable Conditions for Inlet and Outlet Ports to Establish MILD Regime in a Heat Treatment Furnace," presented at the Tenth Fuel and Combustion Conference of Iran, Tehran, 2024.
- [13] A. Cavaliere and M. de Joannon, "Mild Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 4, pp. 329–366, 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.
- [14] R. Fuse, H. Kobayashi, Y. Ju, K. Maruta, and T. Niioka, "NO_x emission from high-temperature air/methane counterflow diffusion flame," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 41, no. 7, pp. 693–698, 2002.
- [15] J. Wünnig and J. Wünnig, "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation," *Progress in energy and combustion science*, vol. 23, no. 1, pp. 81–94, 1997.
- [16] A. Ashouri, M. Z. Targhi, and S. Karami, "Inlet/outlet design and equivalence ratio adjustment of an industrial MILD steel furnace," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 169, p. 109549, 2025.
- [17] A. Ashouri, M. Z. Targhi, and K. Mazaheri, "Enhancing thermal performance and reducing pollutant emissions in a steel reheating furnace through MILD combustion: A study on air distribution and outlet design," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 161, p. 108535, 2025.
- [18] A. Ashouri and K. Mazaheri, "Effects of Burner Configuration Modification on CH₄-H₂ Fueled Industrial Steam Cracking Furnaces: Heat Transfer, Pollutant Emission, and Furnace Performance," *Energy*, p. 138023, 2025.
- [19] A. Ashouri and M. Z. Targhi, "Role of magnetic fields and flue gas recirculation (FGR) in a practical MILD heat treatment furnace: Mitigating CO and NO emissions," *Energy*, vol. 333, p. 137298, 2025.
- [20] A. Ashouri, M. Z. Targhi, K. Zarei, and K. Mazaheri, "Performance improvement, flame control, and NO emission reduction in MILD combustion: The role of magnetic fields in a Jet-Hot Coflow burner," *Energy*, p. 136268, 2025.
- [21] J. Tian *et al.*, "Experimental study on MILD combustion of methane under non-preheated condition in a swirl combustion furnace," *Applied Energy*, vol. 363, p. 123109, 2024.
- [22] P. Li *et al.*, "Mechanisms of NO formation in MILD combustion of CH₄/H₂ fuel blends," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 33, pp. 19187–19203, 2014.
- [23] G. Szegő, B. Dally, and G. Nathan, "Scaling of NO_x emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace," *Combust. Flame*, vol. 154, no. 1-2, pp. 281–295, 2008.
- [24] G. Szegő, B. Dally, and G. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system," *Combust. Flame*, vol. 156, no. 2, pp. 429–438, 2009.
- [25] S. Cao, C. Zou, Q. Han, Y. Liu, D. Wu, and C. Zheng, "Numerical and experimental studies of NO formation mechanisms under methane moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion without heated air," *Energy Fuels*, vol. 29, no. 3, pp. 1987–1996, 2015.
- [26] S. Xu *et al.*, "Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-preheated air," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, p. 115282, 2020.
- [27] M. Saha, B. B. Dally, P. R. Medwell, and A. Chinnici, "Burning characteristics of Victorian brown coal under MILD combustion conditions," *Combust. Flame*, vol. 172, pp. 252–270, 2016.
- [28] M. Saha, B. B. Dally, P. R. Medwell, and A. Chinnici, "Effect of particle size on the MILD combustion characteristics of pulverised brown coal," *Fuel Process. Technol.*, vol. 1, 55pp. 74–87, 2017.
- [29] P. W. Griffin and G. P. Hammond, "Industrial energy use and carbon emissions reduction in the iron and steel sector: A UK perspective," *Applied Energy*, vol. 249, pp. 109–125, 2019.
- [30] M. Si, S. Thompson, and K. Calder, "Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 6, pp. 2904–2908, 2011.
- [31] M. Ghadamgahi, P. Ölund, T. Ekman, N. Andersson, and P. Jönsson, "Numerical and experimental study on flameless oxy-fuel combustion in a pilot-scale and a real-size industrial furnace," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 141, pp. 788–797, 2018.
- [32] M. Kavand, M. M. Heyhat, and M. Z. Targhi, "Energy efficient design of a domestic porous burner using alumina ball packing," *Energy*, vol. 342, p. 139561, 2026.
- [33] R. Weber and F. Breussin, "Scaling properties of swirling pulverized coal flames: From 180 kW to 50 MW thermal input," in *Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, no. 2: Elsevier, pp. 2957–2964.

- [34] J. Smart, D. Morgan, and P. Roberts, "The effect of scale on the performance of swirl stabilised pulverised coal burners," in *Symposium (International) on Combustion*, 1992, vol. 24, no. 1: Elsevier, pp. 1365–1372.
- [35] N. Suksam and J. Charoensuk, "Numerical investigation of the effect of constant velocity and constant residence time scaling criteria on the natural gas MILD combustion," *J. Therm. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. JTST0022–JTST0022, 2019.
- [36] C. E. Baukal Jr, *Industrial combustion testing*. Taylor and Francis, 2010.
- [37] M. Kavand, M. M. Heyhat, and M. Zabetian Targhi, "The effect of equivalence ratio on the combustion characteristics and CO emissions of a porous burner used for cooking applications," *Fuel and Combustion*, vol. 18, no. 3, pp. 1–17, 2025.
- [38] A. Javareshkian, S. Tabejamaat, S. Sarrafan Sadeghi, and M. Baigmohammadi, "An Experimental Study on the Effects of Swirling Oxidizer Flow and Diameter of Fuel Nozzle on Behaviour and Light Emittance of Propane-Oxygen Non-Premixed Flame," *Thermal Science*, vol. 21, no. 3, pp. 1453–1462, 2017, doi: <https://doi.org/10.2298/TSCI140706210J>.
- [39] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, and A. Javareshkian, "Experimental Study on the Effect of Swirling Flow and Oxidizer Type on the Stability, Light Emission, and Pollutant Emissions of Non-Premixed Propane Flames," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 12, 2025, doi: <https://doi.org/10.22055/jacm.2025.48481.5262>.
- [40] Y. M. Al-Abdeli and A. R. Masri, "Stability characteristics and flowfields of turbulent non-premixed swirling flames," *Combustion Theory and Modelling*, vol. 7, no. 4, pp. 731–766, 2003, doi: <https://doi.org/10.1007/4/7/7830-1364/88>
- [41] Y. M. Al-Abdeli and A. R. Masri, "Turbulent swirling natural gas flames: Stability characteristics, unsteady behavior and vortex breakdown," *Combustion Science and Technology*, vol. 179, no. 1-2, pp. 207–225, 2007, doi: <https://doi.org/10.1080/00102200600809092>.
- [42] Y. Huang and V. Yang, "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 4, pp. 293–364, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.01.002>
- [43] S. M. Bagheri, M. Z. Targhi, M. M. Heyhat, and A. Ashouri, "Thermal analysis with extracting performance map in structured porous ceramic burners: A study for domestic cooking applications," *Energy*, p. 138822, 2025.
- [44] H. Soltanian, M. Z. Targhi, A. Ashouri, and M. Maerefat, "Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer Modes on Pot Surfaces in a Power Range of a Cooking Porous Burner," *J. Clean. Prod.*, p. 143952, 2024.
- [45] S. Mohammadbagheri, M. Zabetian Targhi, M. M. Heyhat, and A. Ashouri, "Experimental Investigation of Flame Stability and Examination of Performance Map in a Structural Ceramic Porous Burner in Cooking Application," *Fuel and Combustion*, vol. 16, no. 4, pp. 1–15, 2024.
- [46] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. Narimani Asl, "Effects of wall temperature on non-premixed micro-combustion: A comparative experimental study of copper and aluminum in Swiss-roll chambers," *Fuel Processing Technology*, vol. 274, p. 108237, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108237>.
- [47] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. Narimani Asl, "A Novel Swiss-Roll Counterflow Micro-Combustor: Experimental Investigation of Methane-Oxygen Flame Behavior over Time," *Applied Thermal Engineering*, vol. 255, p. 123978, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123978>.
- [48] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, A. Ghahremani, and S. Narimani Asl, "A Novel Swiss-Roll Counterflow Micro-Combustor: Experimental Investigation of Flame Dynamic Characteristics by Spectroscopy and RGB Image Processing Methods," *Energy*, vol. 299, p. 131495, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131495>.