

Scalable Design of Flameless Combustion Furnaces Based on Dimensionless Groups and Three-Dimensional Numerical Analysis for Preserving the Distributed Reaction Regime

Mohamad-Amin Zamani¹, Alireza Asgharzadeh Karamshahlu², Mohammad Hassan Saidi³

¹ Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, zamani.m_amin@mech.sharif.edu

² Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, alireza_asgharzadeh@mech.sharif.edu

³ **Corresponding author**, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, saman@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received: 2025.06.27

Received in revised form: 2025.07.27

Accepted: 2025.09.11

Available online: 2025/09/26

Keywords

Combustion scaling
Flameless combustion
Dimensional analysis
Energy–exergy analysis
Flue gas recirculation

ABSTRACT

In this study, a new unified framework for scaling flameless combustion furnaces is developed based on π -Buckingham dimensional analysis and an integrated energy–exergy evaluation. The objective of the framework is to preserve the distributed reaction regime during the scale-up from a 10 kW laboratory furnace to a 10 MW industrial system. Accordingly, a set of geometric, flow, heat-transfer, and reaction-kinetics parameters is selected, and six independent dimensionless groups are derived. Three-dimensional CFD simulations employing the EDC combustion model, the GRI-Mech 3.0 mechanism, and the DO radiation model indicate that the proposed scaling method can reproduce the peak temperature with only a 1.7% deviation and the mean temperature with 1.8% deviation. Furthermore, CO emissions decrease from 64 to 41 mg/kJ and NO emissions from 53 to 27 mg/kJ in the scaled-up configuration. Analysis of Ret and Da confirms that this method provides the closest match in reproducing turbulence-chemistry interaction. Energy and exergy assessments also show that the efficiencies remain nearly unchanged between the laboratory and industrial scales. Overall, the results demonstrate that the proposed framework offers a reliable approach for designing low-emission and thermally stable industrial furnaces operating in the flameless combustion regime.

Introduction

Conventional industrial combustion is constrained by high NO_x/CO emissions, non-uniform temperature fields, and limited efficiency, motivating the development of cleaner, more controllable combustion concepts. Flameless (distributed) combustion is attractive because it can inherently reduce emissions, homogenize temperature, and improve stability [1-3]. Stable operation generally requires reactant preheating above auto-ignition with the low temperature-rise condition assessed locally due to the role of local auto-ignition [4], oxidizer dilution to below ~10 vol.% O₂ [5], and strong, uniform mixing to avoid a distinct flame front. Flue-gas recirculation (FGR) is central because it simultaneously provides preheating, dilution, and mixing, enabling spatially distributed reactions and lower peak temperatures that suppress thermal NO_x.

Scaling flameless furnaces from laboratory to industrial size is challenging because regime stability is highly sensitive to local mixing, dilution, and thermal uniformity; small deviations can revert the system to conventional flame combustion. While various scaling strategies exist from comprehensive dimensionless frameworks to simplified rules (e.g., constant velocity or residence time) compared in prior work [6], their assumptions can alter mixing and emissions. To address this gap, the present study develops a Buckingham- π -based, physics-driven scaling framework to preserve flameless combustion while scaling a 10 kW laboratory furnace to a 10 MW industrial system, and validates similarity through regime criteria, temperature/pollutant fields, FGR behaviour, turbulence-chemistry metrics (turbulent Reynolds and Damköhler numbers), and energy/exergy performance.

Methodology

Following the generalized Spalding dimensional framework [7], an initially broad set of physical variables was screened to retain only those essential for preserving the flameless regime during scale-up. The retained set was then organized into five categories (geometry, fluid dynamics, thermodynamics, heat transfer, and chemical kinetics), and the key variables were selected to represent each category. The final set comprised 11 dimensional variables governed by 4 fundamental dimensions [M], [L], [T], [θ]. By the Buckingham π theorem, this yields 6

Cite This Paper

Zamani, Mohamad-Amin., Asgharzadeh Karamshahlu, Alireza., Saidi, Mohammad Hassan. (2025). Scalable Design of Flameless Combustion Furnaces Based on Dimensionless Groups and Three-Dimensional Numerical Analysis for Preserving the Distributed Reaction Regime. *Fuel and Combustion*, 18(3), 41-72. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.562641.1450> (In Persian)

ارجاعدهی به این مقاله



independent dimensionless groups (π_0 to π_5); using algebraic combinations, these were expressed in a compact form suitable for scale-up design.

- | | | |
|---|---|-----|
| (1) Equivalence ratio (already dimensionless): | $\pi_0 = \phi$ | (1) |
| (2) Geometric similarity (nozzle-to-length ratio): | $\pi_1 = d/l$ | (2) |
| (3) Flow (residence) time scale: | $\pi_2 = l\tau/V$ | (3) |
| (4) Species transport vs. convection: | $\pi_3 = l^2\tau/D$ | (4) |
| (5) Reaction–mixing balance: | $\pi_4 = \dot{q}'''l/\rho V c_p \Delta T$ | (5) |
| (6) Volumetric heat release vs. heat removal to boundaries: | $\pi_5 = \dot{q}'''d^2/k\Delta T$ | (6) |

In the manuscript, π_4 and π_5 are explicitly linked to \dot{q}''' . Conceptually, π_4 captures the relationship between volumetric heat release and temperature rise, whereas π_5 quantifies how the same volumetric heat release is balanced by heat transfer (conduction/convection) to the walls.

To make π_5 practical for turbulent internal flows, the manuscript rewrites it using cross-sectional geometry and the hydraulic diameter, then substitutes the Nusselt number definition:

$$Nu_d = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

and therefore π_5 is reduced to the compact design-oriented form reported as equation (8), i.e. a power-law dependence on the flow scale (via V) and material properties, with a constant coefficient C_2 :

$$\pi_5' = \dot{q}''' d^2 / C_2 k \Delta T V^{0.8} \quad (8)$$

In this study, the lab-scale furnace (10 kW) is scaled to an industrial furnace (10 MW) by enforcing similarity of the above π -groups π_0 - π_5 and carefully maintaining consistent boundary conditions. In addition, mesh-independence considerations are preserved by scaling the mesh element count with the scale factor to avoid numerical errors in the larger domain.

Results and Discussion

Combustion regime identification

A reliable identification of the flameless regime is essential, particularly in CFD-based studies. In this work, two independent criteria were used to classify the combustion regime: the Cavaliere thermal inequality [8] and the normalized spatial temperature variation index proposed by Kumar et al. [9]. Both the laboratory furnace and the scaled-up industrial furnace fall within the flameless combustion region when evaluated by the Cavaliere criterion. The selected parameter T'^2 was defined based on methane air combustion under the present operating conditions, and the “effective reactant temperature” was considered after mixing with recirculated flue gases, which is higher than the nominal inlet temperature.

The normalized spatial temperature variation further confirmed regime preservation: values below 15% indicate flameless combustion, while values above 51% correspond to conventional flame combustion [9]. The reported values for both furnaces remained well below 15%, demonstrating that the proposed scaling strategy preserves the original combustion regime without deviation.

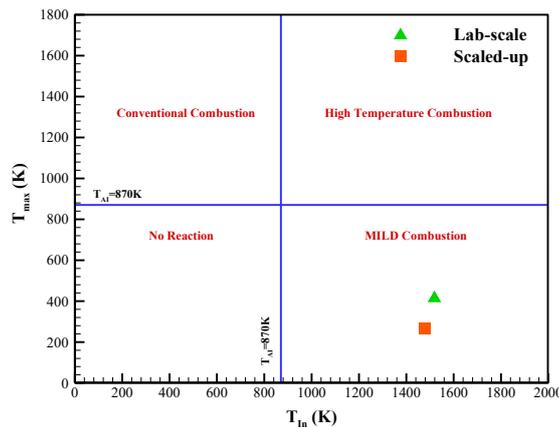


Figure 1. Cavaliere criterion [8] for identifying and comparing combustion regimes

Table 1. Normalized spatial temperature variation values for the laboratory-scale and scaled-up furnaces

Approaches	T'^2
Lab-scale	3.57 %
Scaled-up	0.91 %

Temperature and pollutant emission performance

Key performance indicators (maximum/mean temperatures and normalized emissions of NO and CO) were compared between scales. The scaled-up furnace predicted a maximum temperature of 1966 K, compared with 1933 K in the laboratory furnace (1.7% difference). The mean temperature was 1723 K for the scaled-up case versus 1754 K for the laboratory case (1.8% difference). These small deviations indicate that the proposed scaling approach preserves the thermal field with high fidelity.

Because direct pollutant comparisons across different thermal powers are not meaningful, emissions were reported in normalized form (mg/kJ). The scaled-up configuration predicted lower CO emissions (41 mg/kJ) than the laboratory furnace (64 mg/kJ), indicating improved overall oxidation completeness after scaling. For NO typically harder to predict due to strong sensitivity to detailed kinetics results remained acceptable: the laboratory value was reported as 53 mg/kJ, while the scaled-up furnace produced 27 mg/kJ, representing one of the closest and most favourable matches among scaled configurations discussed. Overall, the results highlight that the proposed scaling method can reproduce not only temperature trends but also pollutant-formation behaviour with strong reliability.

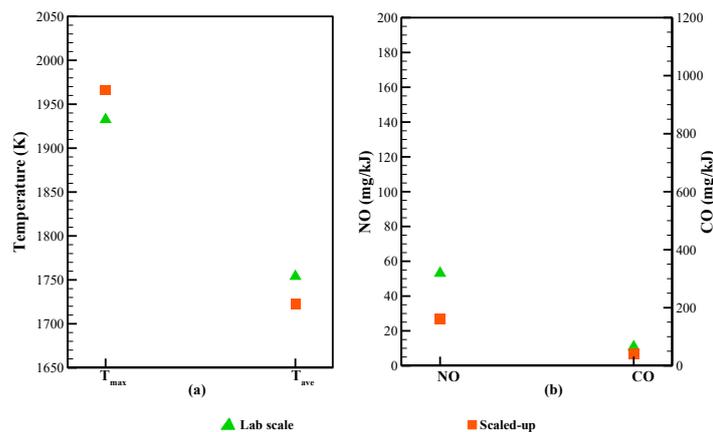


Figure 2. Comparison of key performance indicators between the laboratory-scale and industrial scaled-up furnaces: (a) maximum and average temperatures, and (b) NO and CO emissions

Turbulence-Chemistry interaction

To further assess distributed combustion preservation, the turbulent Reynolds number (Re_t), Damköhler number (Da), and their product ($Re_t \times Da$) were analyzed. Higher Re_t promotes mixing/recirculation, while lower Da implies longer ignition delay both favour flameless combustion [8]. The product $Re_t \times Da$ has been suggested as a dynamic similarity indicator for turbulence-chemistry balance in distributed combustion [10,11]. The scaled-up furnace produced the closest $Re_t \times Da$ to the laboratory case (10.985 vs. 10.844), indicating that the proposed scaling method best preserves the interaction between turbulent mixing and chemical time scales across orders of magnitude in power.

Table 2. Turbulent Reynolds number (Re_t), Damköhler number (Da), and their product ($Re_t \times Da$) for the laboratory-scale and industrial scaled-up furnaces

Approaches	Re_t	Da	$Re_t \times Da$
Lab-scale	200.814	0.054	10.844
Scaled-up	10984.558	0.001	10.985

Conclusions

A physics-based, dimensionless scaling framework was developed to scale flameless combustion furnaces from laboratory to industrial conditions. By selecting the dominant variables and deriving six independent dimensionless groups, the method inherently preserves the requirements for regime stability. Comparative assessments of temperature fields, pollutant distributions (CO/NO), streamlines, internal flue-gas recirculation (FGR), turbulence-chemistry indicators (Re_t , Da), and energy/exergy efficiencies confirm successful regime preservation during scale-up. The scaled furnace shows improved thermal uniformity, predicts mean and peak temperatures with less than 2% deviation, keeps CO and NO within EPA limits, increases internal FGR by more than 6 times, and yields a 36% reduction in reaction-zone thickness while maintaining first and second-law efficiencies.

The framework's performance is mainly attributed to preserving nozzle geometry and velocity profiles, which sustain effective mixing and distributed heat release, and to reproducing turbulence-chemistry similarity via the

closest match in $Re_t \times Da$ relative to the laboratory reference. Overall, stable flameless scale-up depends on: (i) sufficient FGR through appropriate diameter-to-length similarity (residence time/recirculation), (ii) maintaining Re_t and Da within stable ranges to balance mixing and kinetics, and (iii) ensuring thermal uniformity to suppress localized flame fronts. Unlike empirical scale-up approaches, the proposed method preserves these constraints intrinsically, providing a reliable design tool for low-emission, stable industrial flameless furnaces.

Author Contributions

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, M.Z.; methodology, M.Z.; software, M.Z.; validation, M.Z. and A.A.; formal analysis, M.Z.; investigation, A.A.; data curation, M.Z.; writing—original draft preparation, M.Z. and A.A.; writing—review and editing, M.S.; visualization, M.Z. and M.S.; supervision, M.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” Please turn to the [CRediT](#) taxonomy for the term explanation. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.

Data Availability Statement

Not applicable

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

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

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

طراحی مقیاس پذیر کوره های احتراق بدون شعله مبتنی بر گروه های بدون بُعد و تحلیل عددی سه بعدی برای حفظ رژیم واکنش توزیع شده

محمدامین زمانی^۱، علیرضا اصغرزاده کرشاهلو^۲، محمدحسن سعیدی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، zamani.m_amin@mech.sharif.edu

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، alireza_asgharzadeh@mech.sharif.edu

^۳ نویسنده مخاطب، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، saman@sharif.edu

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی	در این پژوهش یک چارچوب جدید و یکپارچه برای مقیاس گذاری کوره های احتراق بدون شعله، مبتنی بر تحلیل ابعادی π -باکینگهام و ترکیب تحلیلی انرژی-انرژی، توسعه داده شده است. هدف این چارچوب، حفظ رژیم احتراق توزیع شده در گذار از کوره آزمایشگاهی ۱۰ کیلووات به نمونه صنعتی ۱۰ مگاوات است. بر این اساس، مجموعه ای از پارامترهای هندسی، جریان، انتقال حرارت و واکنش های شیمیایی انتخاب و شش گروه بدون بُعد مستقل استخراج می شود. مدل سازی سه بعدی CFD با مدل EDC، مکانیزم GRI-Mech 3.0 و مدل تشعشعی DO نشان می دهد که روش مقیاس گذاری پیشنهادی قادر است دمای بیشینه را با اختلاف تنها ۱/۷٪ و دمای میانگین را با اختلاف ۱/۸٪ بازتولید کند. همچنین انتشار CO از ۶۴ mg/kJ به ۴۱ mg/kJ و انتشار NO از ۵۳ mg/kJ به ۲۷ mg/kJ کاهش می یابد. علاوه بر این، تحلیل Da و Re نشان می دهد که این روش بهترین تطابق را در بازتولید برهم کنش آشفتنگی-شیمی دارد. ارزیابی انرژی و انرژی نیز نشان می دهد که بازدهها در دو مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی تقریباً ثابت می ماند. این نتایج ثابت می کند که چارچوب پیشنهاد شده، رویکردی قابل اعتماد برای طراحی کوره های صنعتی کم آلاینده و پایدار در رژیم احتراق بدون شعله ارائه می دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴	
کلیدواژه ها: مقیاس گذاری احتراق احتراق بدون شعله تحلیل ابعادی تحلیل انرژی-انرژی بازچرخانی گاز دودکش	

مقدمه

سامانه های احتراقی متداول، با وجود استفاده گسترده در صنایع مختلف، ذاتاً با محدودیت های قابل توجهی همراه هستند؛ از مهم ترین این چالش ها می توان به انتشار بالای اکسیدهای نیتروژن (NOx) و مونوکسید کربن (CO)، وجود گرادیان های شدید دمایی و بازده کم انرژی اشاره کرد. طی دهه های اخیر، این مسائل زمینه ساز انجام پژوهش های گسترده ای با رویکرد توسعه فناوری پاک تر و کارآمدتر در حوزه احتراق شده است؛ به گونه ای که کاهش اثرات زیست محیطی و ارتقای عملکرد حرارتی به اهداف اصلی این مطالعات تبدیل شده اند. با افزایش سخت گیری های نظارتی و گسترش تلاش های جهانی در جهت کاهش انتشار کربن، توجه پژوهشگران بیش از پیش به رژیم های پیشرفته احتراق معطوف شده است؛ رژیم هایی که کنترل دقیق تری بر پایداری شعله، تولید آلاینده ها و بهره وری انرژی فراهم می کنند. در این میان، احتراق بدون شعله^۱ به عنوان یکی از نوآورانه ترین فناوری ها، جایگاه ویژه ای یافته است. شایان ذکر است که اگرچه روش های متعددی در چارچوب احتراق سنتی، از جمله احتراق مرحله ای، استفاده از مشعل های چرخشی و بازچرخانی گازهای خروجی برای کاهش آلاینده ها و بهبود بازده انرژی توسعه یافته اند، اما این رویکردها معمولاً موجب افزایش پیچیدگی عملیاتی می شوند. در مقابل، احتراق بدون شعله به صورت ذاتی امکان کاهش هم زمان آلاینده ها [۱]، یکنواخت سازی میدان حرارتی [۲]، و بهبود پایداری احتراق [۳]، را فراهم می آورد. این

^۱ Flameless combustion

Cite This Paper

Zamani, Mohamad-Amin., Asgharzadeh Karamshahlu, Alireza., Saidi, Mohammad Hassan. (2025). Scalable Design of Flameless Combustion Furnaces Based on Dimensionless Groups and Three-Dimensional Numerical Analysis for Preserving the Distributed Reaction Regime. *Fuel and Combustion*, 18(3), 41-72. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.562641.1450> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



رژیم می‌تواند هم در سامانه‌های پیش‌مخلوط^۱ و هم غیرپیش‌مخلوط^۲ شکل بگیرد. برای دستیابی به شرایط پایدار احتراق بدون شعله، رعایت مراحل زیر ضروری است:

۱. پیش‌گرمایش واکنش‌دهنده‌ها (شامل سوخت و اکسنده) تا دمایی بالاتر از نقطه خوداشتعالی سوخت، به طوری که دمای ورودی (T_{In}) از دمای خوداشتعالی (T_{AI}) فراتر رود:

$$\Delta T < T_{AI} < T_{In} \quad (1)$$

که در آن ΔT همان دمای احتراق یا اختلاف دمای بین واکنش‌دهنده‌ها و فرآورده‌ها است. باید تأکید نمود که شرط ($T_{In} > T_{AI}$) یا شرط کاهش اختلاف دما باید به دماهای موضعی در ناحیه واکنش اعمال شود، نه به دمای ورودی. این رویکرد به دلیل اهمیت خوداشتعالی موضعی در تثبیت و حفظ رژیم احتراق بدون شعله، حیاتی و تعیین‌کننده است [۳].

۲. رقیق‌سازی غلظت اکسیژن موجود در اکسنده به زیر ۱۰ درصد حجمی [۵].
۳. اختلاط کامل سوخت و اکسنده به‌گونه‌ای که از تشکیل نواحی موضعی از سوخت نسوخته یا هوای اضافی جلوگیری شود [۶].

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که بازچرخانی گازهای حاصل از احتراق^۳ نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری رژیم احتراق بدون شعله دارد [۸،۷]. این فرآیند به‌طور هم‌زمان موجب پیش‌گرمایش واکنش‌دهنده‌ها، رقیق‌سازی غلظت اکسیژن و ایجاد شرایط مناسب برای اختلاط کامل و یکنواخت سوخت و هوا می‌شود. در چنین حالتی، به‌جای آن‌که واکنش احتراقی به‌صورت موضعی میان سوخت و هوا اتفاق بیفتد، یک احتراق گسترده و توزیع‌شده در محفظه احتراق شکل می‌گیرد که در آن مخلوطی از سوخت، هوا و بخشی از محصولات نسوخته احتراق حضور دارند. این سازوکار نه تنها زمان ماند^۴ احتراق را افزایش می‌دهد، بلکه امکان بازیافت مؤثر انرژی حرارتی موجود در این گازها را نیز فراهم می‌سازد [۹]. بنابراین، بازچرخانی مناسب گازهای حاصل از احتراق می‌تواند به‌عنوان یکی از عوامل حیاتی در برآورد سه شرط اساسی لازم برای احتراق بدون شعله تلقی شود. با توجه به نقش تعیین‌کننده بازچرخانی در پایداری این رژیم و ایجاد شرایط واکنشی یکنواخت، توسعه روش‌های مقیاس‌گذاری که بتوانند این ویژگی‌های کلیدی را در گذار از کوره‌های آزمایشگاهی به مقیاس‌های بزرگ‌تر حفظ کنند، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

متخصصان تاکنون روش‌های مقیاس‌گذاری متنوعی از نمونه‌های آزمایشگاهی به سامانه‌های صنعتی یا نیمه‌صنعتی پیشنهاد داده‌اند که هدف اصلی آن‌ها، انطباق ویژگی‌های اساسی احتراق از جمله دینامیک سیالات، انتقال حرارت و جرم و سینتیک ترموشیمیایی بوده است [۱۰،۱۱]. مقیاس‌گذاری صحیح موجب می‌شود شاخص‌های عملکردی اصلی سامانه، مانند یکنواختی میدان دما، سطح انتشار آلاینده‌هایی نظیر NO_x و CO ، ساختار شعله و کیفیت اختلاط، در مقیاس صنعتی نیز همانند مقیاس آزمایشگاهی حفظ شود [۱۰]. اهمیت این موضوع در سامانه‌های احتراق بدون شعله دوچندان است، زیرا حتی انحرافی اندک در توزیع حرارتی یا غلظت محلی اکسنده می‌تواند سامانه را از رژیم واکنش توزیع‌شده خارج کرده و شرایط احتراق معمولی را ایجاد کند [۱۲].

برای مواجهه با این چالش، روش‌های متعددی برای مقیاس‌گذاری پیشنهاد شده‌اند که در میان آن‌ها، فرمول‌بندی اسپالدینگ [۱۳] جامع‌ترین و شناخته‌شده‌ترین چارچوب محسوب می‌شود. چارچوب تعمیم‌یافته اسپالدینگ، یک ساختار نظام‌مند برای مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراقی، شامل مشعل‌ها، کوره‌ها، بویلرها و تجهیزات وابسته، در ابعاد و شرایط عملیاتی مختلف فراهم می‌کند [۱۳]. این رویکرد مجموعه‌ای از اعداد بدون‌بعد را در قالب یک ماتریس بالامثلثی معرفی می‌کند که چهارده پدیده فیزیکی اصلی مرتبط با احتراق، نظیر انتقال حرارت، انتقال جرم، انتقال تکانه و سینتیک واکنش را دربرمی‌گیرد.

¹ Premixed

² Non-premixed

³ Flue gas recirculation (FGR)

⁴ Residence time

این پارامترها عوامل مختلف مانند هدایت حرارتی، نفوذ جرمی، نیروهای شناوری، نرخ واکنش و مشخصات جریان را شامل می‌شوند. برای ایجاد شباهت دینامیکی و حرارتی میان سامانه آزمایشگاهی و صنعتی، لازم است تمامی گروه‌های بدون‌بعد مرتبط در هر دو مقیاس تطابق یابند. با این حال، پیچیدگی بالا و تعداد زیاد این پارامترها سبب شد اسپالدینگ یک راهبرد سلسله‌مراتبی برای فیلترگذاری معرفی کند. در این راهبرد، ابتدا پارامترهای نامرتبط با پیکربندی مسئله حذف شده و سپس متغیرهایی با تأثیر ناچیز کنار گذاشته می‌شوند. این چارچوب تأثیر بسیاری بر پژوهش‌های حوزه مقیاس‌گذاری گذاشته و همچنان مرجعی برای ارزیابی روش‌های ساده‌شده‌تر به شمار می‌آید.

با وجود جامعیت روش اسپالدینگ، پیچیدگی ریاضیاتی و تعداد بالای گروه‌های بدون‌بعد، اغلب کاربرد عملی آن را دشوار می‌کند. از این‌رو، روش‌های ساده‌شده متعددی توسعه یافته‌اند که در آن‌ها هندسه کوره و ویژگی‌های جریان به‌صورت مستقیم با توان حرارتی ورودی مرتبط می‌شوند. این روش‌ها معمولاً بر پایه برقراری رابطه‌ی تجربی میان طول مشخصه، سرعت جریان و توان ورودی استوار هستند؛ رابطه‌ای که خود از شکل ساده‌شده موازنه انرژی استخراج شده است.

الگوریتم اصلی مقیاس‌گذاری در روش‌های پیشین به این صورت است که توان حرارتی کوره را به صورت معادله (۲) بیان کرده و از آنجایی که مساحت سطح، ارتباط مستقیمی با مربع طول دارد ($A \propto d^2$)، این تناسب به صورت معادله (۳) بیان می‌شود [۱۰]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{fuel} H_I = A \rho_{fuel} V_{fuel} H_I \quad (2)$$

$$\dot{Q} \propto d^2 V \quad (3)$$

در روابط فوق، \dot{Q} نشان‌دهنده توان حرارتی کوره است؛ H_I ارزش حرارتی پایین در واحد جرم، \dot{m}_{fuel} دبی جرمی سوخت، ρ_{fuel} چگالی سوخت، V_{fuel} سرعت ورودی سوخت، A مساحت سطح مقطع نازل سوخت و d قطر نازل سوخت است. تمامی روش‌های مقیاس‌گذاری با هدف ایجاد یک رابطه مشخص بین طول مشخصه کوره (d) و سرعت جریان (V) توسعه یافته‌اند. به این ترتیب، می‌توان نسبت مقیاس هندسی ($s = d_2/d_1$) را بر اساس نسبت توان ($n = \dot{Q}_2/\dot{Q}_1$) و با استفاده از معادله (۳) استخراج نمود. در نتیجه، اگر توان کوره به اندازه ضریبی مانند n افزایش یابد مقیاس طول متناظر (s) نیز متناسب با آن تعیین خواهد شد.

رویکردهای رایج در مقیاس‌گذاری

یکی از این روش‌ها، رویکرد سرعت ثابت ($V = \text{constant}$) است [۱۱، ۱۴، ۱۵]. در این روش فرض می‌شود که سرعت ورودی سوخت یا مخلوط سوخت و هوا در کوره آزمایشگاهی و مدل مقیاس‌گذاری‌شده یکسان باقی می‌ماند. با اعمال این فرض به معادله (۳)، رابطه میان توان حرارتی ورودی و مقیاس هندسی به صورت ساده‌شده زیر به دست می‌آید:

$$V = \text{constant} \xrightarrow{\text{Eq. (3)}} d \propto \dot{Q}^{1/2} \quad (4)$$

بر این اساس، اگر توان حرارتی کوره با ضریب n افزایش یابد، ابعاد مشخصه باید با ضریب $n^{1/2}$ مقیاس شوند تا تشابه هندسی و هیدرودینامیکی تحت فرض سرعت ثابت حفظ شود. با وجود سادگی و سهولت این روش، یک محدودیت اساسی وجود دارد: از آنجا که ابعاد هندسی افزایش می‌یابند اما سرعت جریان ثابت می‌ماند، زمان مشخصه اختلاط افزایش می‌یابد ($\tau \propto d/V$). افزایش زمان اختلاط موجب کاهش نرخ اختلاط می‌شود و این کاهش می‌تولند به‌طور نامطلوبی بر یکنواختی فرآیند احتراق تأثیر بگذارد. در چنین شرایطی احتمال شکل‌گیری نواحی موضعی داغ و در نتیجه افزایش تولید آلاینده‌هایی مانند NOx و CO بیشتر می‌شود [۱۶، ۱۷].

یکی دیگر از این روش‌ها، رویکرد زمان ماند ثابت [۱۴، ۱۵] است. در این روش، زمان ماند به‌عنوان یک شاخص کلیدی برای فرآیند اختلاط در کوره در نظر گرفته می‌شود. این مقیاس زمانی به‌صورت نسبت طول مشخصه به سرعت جریان تعریف می‌شود ($\tau \propto d/V$). برای آن‌که ویژگی‌های اختلاط و واکنش مشاهده‌شده در مقیاس آزمایشگاهی در نمونه مقیاس‌شده نیز حفظ شوند، مقدار τ در فرآیند مقیاس‌گذاری ثابت نگه داشته می‌شود. با اعمال شرط ($\tau = \text{constant}$) در معادله (۳)، رابطه

ساده شده زیر به دست می آید:

$$\tau = \text{constant} \Rightarrow d/V = \text{cte} \xrightarrow{\text{Eq. (3)}} d \propto \dot{Q}^{1/3} \quad (5)$$

بر این اساس، اگر توان ورودی کوره با ضریب n افزایش یابد، ابعاد مشخصه باید با ضریب $n^{1/3}$ مقیاس شوند تا زمان ماند ثابت باقی بماند. این رویکرد به‌ویژه برای رژیم‌هایی که به زمان اختلاط و تکمیل واکنش حساس هستند، از جمله احتراق بدون شعله، بسیار مناسب است؛ زیرا در این رژیم، واکنش‌های توزیع شده به پیش گرمایش یکنواخت و زمان ماند کافی واکنش دهنده‌ها وابسته‌اند و هرگونه کاهش در مقیاس زمانی اختلاط می‌تواند منجر به ناپایداری و افزایش آلاینده‌ها شود.

روش دیگری که به آن پرداخته می‌شود، رویکرد کول^۱ [۱۸] است. این روش در ابتدا با هدف بررسی پایداری آکوستیکی یک شعله جت غیر پیش مخلوط توسعه یافت. در این رویکرد فرض می‌شود که سرعت ورودی V و مربع طول مشخصه d^2 سهم برابری در تعیین توان حرارتی دارند. به بیان دیگر، سرعت می‌تواند متناسب با مربع نسبت مقیاس طول در نظر گرفته شود [۱۸]:

$$V \propto d^2 \xrightarrow{\text{Eq. (3)}} d \propto \dot{Q}^{1/4} \quad (6)$$

بر این اساس، افزایش توان حرارتی کوره با ضریب n ، مستلزم افزایش ابعاد مشخصه با ضریب $n^{1/4}$ است. نکته مهم در روش کول آن است که با افزایش توان، سرعت ورودی با آهنگ سریع‌تری نسبت به قطر مشعل رشد می‌کند. این شتاب‌گیری قابل توجه جت خروجی می‌تواند منجر به کاهش محسوس فشار سیستم شود. با وجود این، مشابه روش زمان ماند ثابت، رویکرد کول به دلیل مقیاس‌گذاری ملایم‌تر ابعاد هندسی در مقایسه با توان ورودی، افت فشار کلی کمتری را در سامانه احتراق ایجاد می‌کند [۱۶].

روش دیگر، رویکرد کومار^۲ [۱۶] است؛ این رویکرد با هدف حفظ نرخ بالای آزادسازی حرارت در عین اعمال بازچرخانی گسترده گاز دودکش تحت شرایط احتراق بدون شعله توسعه یافته است. در این روش، قطر مشخصه مشعل بر اساس ریشه سوم توان حرارتی ورودی مقیاس‌گذاری می‌شود ($d \propto \dot{Q}^{1/3}$). این رابطه کاملاً با معیار زمان ماند ثابت سازگار است. تمامی پارامترهای هندسی اصلی، از جمله قطر نازل مشعل و ابعاد کوره، بر اساس این همبستگی تعیین می‌شوند تا میزان آزادسازی حرارت، یکنواخت و پایدار باقی بماند. برای به حداقل رساندن افت فشار و در عین حال تضمین اختلاط مؤثر، سرعت تزریق هوای احتراق به صورت تجربی بهینه شده و در حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه است. افزون بر این، موقعیت و سرعت تزریق هوای ثانویه با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی تعیین می‌شود تا بازچرخانی داخلی تقویت شده و فرآیند اکسایش مونوکسید کربن باقی‌مانده تسهیل شود. در این روش، رژیم احتراقی بدون شعله، زمانی مطلوب تلقی می‌شود که زمان ماند مناسب ($\tau \sim d/V <$ 80) را برآورده کند. کاربرد گسترده روش کومار در دامنه وسیعی از ارزش‌های حرارتی سوخت، از ۴/۵ تا ۴۵ مگاژول بر کیلوگرم اثبات شده است؛ موضوعی که این روش را برای سوخت‌های گازی و مایع در سامانه‌های با بازده بالا و آلاینده‌گی کم، گزینه‌ای مناسب و کارآمد می‌سازد.

جدول ۱، خلاصه‌ای از عوامل مقیاس هندسی ($s = d_2/d_1$)، نسبت‌های سرعت (V_2/V_1)، زمان ماند (τ) و آزادسازی حرارت حجمی (\dot{q}''') را برای هر یک از روش‌های مقیاس‌گذاری مذکور، ارائه می‌کند.

جدول ۱- مقایسه روش‌های مختلف مقیاس‌گذاری، با توجه به قوانین ابعاد هندسی، سرعت، زمان ماند و نرخ آزادسازی حرارت [16]
Table 1- Comparison of different scaling methods with respect to geometric dimensions, velocity, residence time, and volumetric heat-release rate [16]

Scaling methods	Geometric scaling $s = d_2/d_1$	Velocity scaling $V = V_2/V_1$	τ	\dot{q}'''
CV	$\dot{Q}^{1/2}$	Constant	$\dot{Q}^{1/2}$	$\dot{Q}^{-1/2}$
CRT	$\dot{Q}^{1/3}$	$\dot{Q}^{1/3}$	Constant	Constant
Cole	$\dot{Q}^{1/4}$	$\dot{Q}^{1/2}$	$\dot{Q}^{-1/4}$	$\dot{Q}^{1/4}$
Kumar	$\dot{Q}^{1/3}$	100 m/s	$\dot{Q}^{1/3}$	Constant

¹ Cole method

² Kumar method

علی‌رغم انجام پژوهش‌های گسترده در حوزه مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراقی، از جمله کوره‌های زیست‌توده [۱۷،۱۹]، راکتورهای بستر سیال سان [۲۴-۲۰]، مشعل‌های زغال‌سنگ [۲۷-۲۵]، احتراق مافوق صوت [۲۹،۲۸] و مشعل‌های متداول گازی و مایع [۳۰،۳۱،۱۰]، همچنان یک شکاف تحقیقاتی اساسی در زمینه حفظ رژیم‌های بنیادی احتراق در فرآیند مقیاس‌گذاری وجود دارد. این شکاف نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مقیاس‌گذاری تجهیزات و فرآیندها، چالش تضمین پایداری و حفظ رژیم احتراق بدون شعله هنگام انتقال از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی همچنان به‌طور کامل حل نشده است. همچنین مطالعات پیشین عمدتاً بر اصلاحات تجربی تکیه داشته‌اند؛ اصلاحاتی که معمولاً شامل تغییر در طراحی نازل‌های ورودی و خروجی یا به‌کارگیری تزریق هوای ثانویه است تا عملکرد سامانه پس از مقیاس‌گذاری بهبود یابد. هرچند این راهبردها می‌توانند منجر به بهبودهای موضعی شوند، اما فاقد یک چارچوب نظری یکپارچه هستند که به‌طور ذاتی قادر به حفظ رژیم احتراقی مطلوب، به‌ویژه احتراق بدون شعله باشد. به منظور حل شکاف تحقیقاتی مطرح‌شده، پژوهش حاضر یک چارچوب مبتنی بر اصول فیزیکی را بر پایه قضیه π -باکینگهام توسعه داده است. هدف این چارچوب حفظ پایداری رژیم احتراق بدون شعله در گذار از کوره آزمایشگاهی با توان ۱۰ کیلووات به نمونه صنعتی با توان ۱۰ مگاوات است، به‌گونه‌ای که ویژگی‌های اصلی رژیم بدون شعله در هر دو مقیاس، پایدار باقی بماند. ابتدا سعی می‌شود با شناسایی مهم‌ترین پارامترهای مقیاس‌گذاری، گروه‌های بدون بعد قضیه π -باکینگهام تشکیل شده و پس از مقیاس‌گذاری هندسی، تحلیل جامع شیمیایی-ترمودینامیکی بر روی نتایج انجام شود. تحلیل انجام‌شده شامل شناسایی رژیم‌های احتراق، ارزیابی توزیع‌های دمایی و غلظت آلاینده‌ها، بررسی بازچرخش گازهای دودکش (FGR)، مشخصه‌سازی برهم‌کنش آشفتنگی-شیمی از طریق اعداد رینولدز آشفته و دامکوهلر، و در نهایت ارزیابی بازده‌های انرژی و انرژی است. این رویکرد ساخت‌یافته تضمین می‌کند که شاخص‌های عملکرد مبتنی بر قانون اول و قانون دوم ترمودینامیک به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند و در نتیجه، اعتبارسنجی جامع و قابل‌اتکایی از راهبردهای مقیاس‌گذاری پیشنهادی فراهم می‌شود.

بر این اساس، مطالعه حاضر نه تنها به چالش دیرینه حفظ رژیم احتراق در فرآیند مقیاس‌گذاری پاسخ می‌دهد، بلکه یک روش‌شناسی قابل‌انتقال ارائه می‌کند که ملاحظات هندسی، ترمودینامیکی و دینامیک سیالات را در قالب یک چارچوب نظری یکپارچه گردآورده است. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش زمینه‌ساز طراحی سامانه‌های احتراق بدون شعله در مقیاس بزرگ با عملکردی پاک‌تر، پایدارتر و قابل‌اطمینان‌تر در کاربردهای صنعتی باشد.

سامانه‌های احتراقی متداول، با وجود استفاده گسترده در صنایع مختلف، ذاتاً با محدودیت‌های قابل‌توجهی همراه هستند؛ از مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به انتشار بالای اکسیدهای نیتروژن (NOx) و مونوکسید کربن (CO)، وجود گرادیان‌های شدید دمایی و بازده کم انرژی اشاره کرد. طی دهه‌های اخیر، این مسائل زمینه‌ساز انجام پژوهش‌های گسترده‌ای با رویکرد توسعه فناوری پاک‌تر و کارآمدتر در حوزه احتراق شده است؛ به‌گونه‌ای که کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارتقای عملکرد حرارتی به اهداف اصلی این مطالعات تبدیل شده‌اند. با افزایش سخت‌گیری‌های نظارتی و گسترش تلاش‌های جهانی در جهت کاهش انتشار کربن، توجه پژوهشگران بیش از پیش به رژیم‌های پیشرفته احتراق معطوف شده است؛ رژیم‌هایی که کنترل دقیق‌تری بر پایداری شعله، تولید آلاینده‌ها و بهره‌وری انرژی فراهم می‌کنند. در این میان، احتراق بدون شعله^۱ به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین فناوری‌ها، جایگاه ویژه‌ای یافته است. شایان ذکر است که اگرچه روش‌های متعددی در چارچوب احتراق سنتی، از جمله احتراق مرحله‌ای، استفاده از مشعل‌های چرخشی و بازچرخانی گازهای خروجی برای کاهش آلاینده‌ها و بهبود بازده انرژی توسعه یافته‌اند، اما این رویکردها معمولاً موجب افزایش پیچیدگی عملیاتی می‌شوند. در مقابل، احتراق بدون شعله به‌صورت ذاتی امکان کاهش هم‌زمان آلاینده‌ها [۱]، یکنواخت‌سازی میدان حرارتی [۲]، و بهبود پایداری احتراق [۳] را فراهم می‌آورد. این رژیم می‌تواند هم در سامانه‌های پیش‌مخلوط^۲ و هم غیر پیش‌مخلوط^۳ شکل بگیرد.

برای دستیابی به شرایط پایدار احتراق بدون شعله، رعایت مراحل زیر ضروری است:

¹ Flameless combustion

² Premixed

³ Non-premixed

۴. پیش‌گرمایش واکنش‌دهنده‌ها (شامل سوخت و اکسنده) تا دمایی بالاتر از نقطه خوداشتعالی سوخت، به طوری که دمای ورودی (T_{In}) از دمای خوداشتعالی (T_{AI}) فراتر رود:

$$\Delta T < T_{AI} < T_{In} \quad (1)$$

که در آن ΔT همان دمای احتراق یا اختلاف دمای بین واکنش‌دهنده‌ها و فرآورده‌ها است. باید تأکید نمود که شرط ($T_{In} > T_{AI}$) یا شرط کاهش اختلاف دما باید به دماهای موضعی در ناحیه واکنش اعمال شود، نه به دمای ورودی. این رویکرد به دلیل اهمیت خوداشتعالی موضعی در تثبیت و حفظ رژیم احتراق بدون شعله، حیاتی و تعیین‌کننده است [۴].

۵. رقیق‌سازی غلظت اکسیژن موجود در اکسنده به زیر ۱۰ درصد حجمی [۵].
۶. اختلاط کامل سوخت و اکسنده به‌گونه‌ای که از تشکیل نواحی موضعی از سوخت نسوخته یا هوای اضافی جلوگیری شود [۶].

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که بازچرخانی گازهای حاصل از احتراق^۱ نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری رژیم احتراق بدون شعله دارد [۷، ۸]. این فرآیند به‌طور هم‌زمان موجب پیش‌گرمایش واکنش‌دهنده‌ها، رقیق‌سازی غلظت اکسیژن و ایجاد شرایط مناسب برای اختلاط کامل و یکنواخت سوخت و هوا می‌شود. در چنین حالتی، به‌جای آن‌که واکنش احتراقی به‌صورت موضعی میان سوخت و هوا اتفاق بیفتد، یک احتراق گسترده و توزیع‌شده در محفظه احتراق شکل می‌گیرد که در آن مخلوطی از سوخت، هوا و بخشی از محصولات نسوخته احتراق حضور دارند. این سازوکار نه تنها زمان ماند^۲ احتراق را افزایش می‌دهد، بلکه امکان بازیافت مؤثر انرژی حرارتی موجود در این گازها را نیز فراهم می‌سازد [۹]. بنابراین، بازچرخانی مناسب گازهای حاصل از احتراق می‌تواند به‌عنوان یکی از عوامل حیاتی در برآورد سه شرط اساسی لازم برای احتراق بدون شعله تلقی شود. با توجه به نقش تعیین‌کننده بازچرخانی در پایداری این رژیم و ایجاد شرایط واکنشی یکنواخت، توسعه روش‌های مقیاس‌گذاری که بتوانند این ویژگی‌های کلیدی را در گذار از کوره‌های آزمایشگاهی به مقیاس‌های بزرگ‌تر حفظ کنند، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

متخصصان تاکنون روش‌های مقیاس‌گذاری متنوعی از نمونه‌های آزمایشگاهی به سامانه‌های صنعتی یا نیمه‌صنعتی پیشنهاد داده‌اند که هدف اصلی آن‌ها، انطباق ویژگی‌های اساسی احتراق از جمله دینامیک سیالات، انتقال حرارت و جرم و سینتیک ترموشیمیایی بوده است [۱۰، ۱۱]. مقیاس‌گذاری صحیح موجب می‌شود شاخص‌های عملکردی اصلی سامانه، مانند یکنواختی میدان دما، سطح انتشار آلاینده‌هایی نظیر NOx و CO، ساختار شعله و کیفیت اختلاط، در مقیاس صنعتی نیز همانند مقیاس آزمایشگاهی حفظ شود [۱۰]. اهمیت این موضوع در سامانه‌های احتراق بدون شعله دوچندان است، زیرا حتی انحرافی اندک در توزیع حرارتی یا غلظت محلی اکسنده می‌تواند سامانه را از رژیم واکنش توزیع‌شده خارج کرده و شرایط احتراق معمولی را ایجاد کند [۱۲].

برای مواجهه با این چالش، روش‌های متعددی برای مقیاس‌گذاری پیشنهاد شده‌اند که در میان آن‌ها، فرمول‌بندی اسپالدینگ [۱۳] جامع‌ترین و شناخته‌شده‌ترین چارچوب محسوب می‌شود. چارچوب تعمیم‌یافته اسپالدینگ، یک ساختار نظام‌مند برای مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراقی، شامل مشعل‌ها، کوره‌ها، بویلرها و تجهیزات وابسته، در ابعاد و شرایط عملیاتی مختلف فراهم می‌کند [۱۳]. این رویکرد مجموعه‌ای از اعداد بدون‌بُعد را در قالب یک ماتریس بالامثلثی معرفی می‌کند که چهارده پدیده فیزیکی اصلی مرتبط با احتراق، نظیر انتقال حرارت، انتقال جرم، انتقال تکانه و سینتیک واکنش را دربرمی‌گیرد. این پارامترها عوامل مختلف مانند هدایت حرارتی، نفوذ جرمی، نیروهای شناوری، نرخ واکنش و مشخصات جریان را شامل می‌شوند. برای ایجاد شباهت دینامیکی و حرارتی میان سامانه آزمایشگاهی و صنعتی، لازم است تمامی گروه‌های بدون‌بُعد مرتبط در هر دو مقیاس تطابق یابند. با این حال، پیچیدگی بالا و تعداد زیاد این پارامترها سبب شد اسپالدینگ یک راهبرد

¹ Flue gas recirculation (FGR)

² Residence time

سلسله‌مراتبی برای فیلترگذاری معرفی کند. در این راهبرد، ابتدا پارامترهای نامرتب با پیکربندی مسئله حذف شده و سپس متغیرهایی با تأثیر ناچیز کنار گذاشته می‌شوند. این چارچوب تأثیر بسیاری بر پژوهش‌های حوزه مقیاس‌گذاری گذاشته و همچنان مرجعی برای ارزیابی روش‌های ساده‌شده‌تر به شمار می‌آید.

با وجود جامعیت روش اسپالدینگ، پیچیدگی ریاضیاتی و تعداد بالای گروه‌های بدون بُعد، اغلب کاربرد عملی آن را دشوار می‌کند. از این‌رو، روش‌های ساده‌شده متعددی توسعه یافته‌اند که در آن‌ها هندسه کوره و ویژگی‌های جریان به صورت مستقیم با توان حرارتی ورودی مرتبط می‌شوند. این روش‌ها معمولاً بر پایه برقراری رابطه‌ی تجربی میان طول مشخصه، سرعت جریان و توان ورودی استوار هستند؛ رابطه‌ای که خود از شکل ساده‌شده موازنه انرژی استخراج شده است.

الگوریتم اصلی مقیاس‌گذاری در روش‌های پیشین به این صورت است که توان حرارتی کوره را به صورت معادله (۲) بیان کرده و از آنجایی که مساحت سطح، ارتباط مستقیمی با مربع طول دارد ($A \propto d^2$)، این تناسب به صورت معادله (۳) بیان می‌شود [۱۰]:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{fuel} H_I = A \rho_{fuel} V_{fuel} H_I \quad (2)$$

$$\dot{Q} \propto d^2 V \quad (3)$$

در روابط فوق، \dot{Q} نشان‌دهنده توان حرارتی کوره است؛ H_I ارزش حرارتی پایین در واحد جرم، \dot{m}_{fuel} دبی جرمی سوخت، ρ_{fuel} چگالی سوخت، V_{fuel} سرعت ورودی سوخت، A مساحت سطح مقطع نازل سوخت و d قطر نازل سوخت است. تمامی روش‌های مقیاس‌گذاری با هدف ایجاد یک رابطه مشخص بین طول مشخصه کوره (d) و سرعت جریان (V) توسعه یافته‌اند. به این ترتیب، می‌توان نسبت مقیاس هندسی ($s = d_2/d_1$) را بر اساس نسبت توان ($n = \dot{Q}_2/\dot{Q}_1$) و با استفاده از معادله (۳) استخراج نمود. در نتیجه، اگر توان کوره به اندازه ضربی مانند n افزایش یابد مقیاس طول متناظر (s) نیز متناسب با آن تعیین خواهد شد.

رویکردهای رایج در مقیاس‌گذاری

یکی از این روش‌ها، رویکرد سرعت ثابت ($V = \text{constant}$) است [۱۱، ۱۴، ۱۵]. در این روش فرض می‌شود که سرعت ورودی سوخت یا مخلوط سوخت و هوا در کوره آزمایشگاهی و مدل مقیاس‌گذاری شده یکسان باقی می‌ماند. با اعمال این فرض به معادله (۳)، رابطه میان توان حرارتی ورودی و مقیاس هندسی به صورت ساده‌شده زیر به دست می‌آید:

$$V = \text{constant} \xrightarrow{\text{Eq. (3)}} d \propto \dot{Q}^{1/2} \quad (4)$$

بر این اساس، اگر توان حرارتی کوره با ضریب n افزایش یابد، ابعاد مشخصه باید با ضریب $n^{1/2}$ مقیاس شوند تا تشابه هندسی و هیدرودینامیکی تحت فرض سرعت ثابت حفظ شود. با وجود سادگی و سهولت این روش، یک محدودیت اساسی وجود دارد: از آنجا که ابعاد هندسی افزایش می‌یابند اما سرعت جریان ثابت می‌ماند، زمان مشخصه اختلاط افزایش می‌یابد ($\tau \propto d/V$). افزایش زمان اختلاط موجب کاهش نرخ اختلاط می‌شود و این کاهش می‌تواند به‌طور نامطلوبی بر یکنواختی فرآیند احتراق تأثیر بگذارد. در چنین شرایطی احتمال شکل‌گیری نواحی موضعی داغ و در نتیجه افزایش تولید آلاینده‌هایی مانند NOx و CO بیشتر می‌شود [۱۶، ۱۷].

یکی دیگر از این روش‌ها، رویکرد زمان ماند ثابت [۱۴، ۱۵] است. در این روش، زمان ماند به‌عنوان یک شاخص کلیدی برای فرآیند اختلاط در کوره در نظر گرفته می‌شود. این مقیاس زمانی به‌صورت نسبت طول مشخصه به سرعت جریان تعریف می‌شود ($\tau \propto d/V$). برای آن‌که ویژگی‌های اختلاط و واکنش مشاهده‌شده در مقیاس آزمایشگاهی در نمونه مقیاس‌شده نیز حفظ شوند، مقدار τ در فرآیند مقیاس‌گذاری ثابت نگه داشته می‌شود. با اعمال شرط ($\tau = \text{constant}$) در معادله (۳)، رابطه ساده‌شده زیر به دست می‌آید:

$$\tau = \text{constant} \Rightarrow d/V = \text{cte} \xrightarrow{\text{Eq. (3)}} d \propto \dot{Q}^{1/3} \quad (5)$$

بر این اساس، اگر توان ورودی کوره با ضریب n افزایش یابد، ابعاد مشخصه باید با ضریب $n^{1/3}$ مقیاس شوند تا زمان ماند ثابت باقی بماند. این رویکرد به‌ویژه برای رژیم‌هایی که به زمان اختلاط و تکمیل واکنش حساس هستند، از جمله احتراق بدون شعله، بسیار مناسب است؛ زیرا در این رژیم، واکنش‌های توزیع‌شده به پیش‌گرمایش یکنواخت و زمان ماند کافی واکنش‌دهنده‌ها وابسته‌اند و هرگونه کاهش در مقیاس زمانی اختلاط می‌تواند منجر به ناپایداری و افزایش آلاینده‌ها شود.

روش دیگری که به آن پرداخته می‌شود، رویکرد کول^۱ [۱۸] است. این روش در ابتدا با هدف بررسی پایداری آکوستیکی یک شعله جت غیر پیش‌مخلوط توسعه یافت. در این رویکرد فرض می‌شود که سرعت ورودی V و مربع طول مشخصه d^2 سهم برابری در تعیین توان حرارتی دارند. به بیان دیگر، سرعت می‌تواند متناسب با مربع نسبت مقیاس طول در نظر گرفته شود [۱۸]:

$$V \propto d^2 \xrightarrow{\text{Eq. (3)}} d \propto \dot{Q}^{1/4} \quad (6)$$

بر این اساس، افزایش توان حرارتی کوره با ضریب n ، مستلزم افزایش ابعاد مشخصه با ضریب $n^{1/4}$ است. نکته مهم در روش کول آن است که با افزایش توان، سرعت ورودی با آهنگ سریع‌تری نسبت به قطر مشعل رشد می‌کند. این شتاب‌گیری قابل توجه جت خروجی می‌تواند منجر به کاهش محسوس فشار سیستم شود. با وجود این، مشابه روش زمان ماند ثابت، رویکرد کول به دلیل مقیاس‌گذاری ملایم‌تر ابعاد هندسی در مقایسه با توان ورودی، افت فشار کلی کمتری را در سامانه احتراق ایجاد می‌کند [۱۶].

روش دیگر، رویکرد کومار^۲ [۱۶] است؛ این رویکرد با هدف حفظ نرخ بالای آزادسازی حرارت در عین اعمال بازچرخانی گسترده گاز دودکش تحت شرایط احتراق بدون شعله توسعه یافته است. در این روش، قطر مشخصه مشعل بر اساس ریشه سوم توان حرارتی ورودی مقیاس‌گذاری می‌شود ($d \propto \dot{Q}^{1/3}$). این رابطه کاملاً با معیار زمان ماند ثابت سازگار است. تمامی پارامترهای هندسی اصلی، از جمله قطر نازل مشعل و ابعاد کوره، بر اساس این همبستگی تعیین می‌شوند تا میزان آزادسازی حرارت، یکنواخت و پایدار باقی بماند. برای به حداقل رساندن افت فشار و در عین حال تضمین اختلاط مؤثر، سرعت تزریق هوای احتراق به صورت تجربی بهینه‌شده و در حدود ۱۰۰ متربرثانیه است. افزون بر این، موقعیت و سرعت تزریق هوای ثانویه با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی تعیین می‌شود تا بازچرخانی داخلی تقویت شده و فرآیند اکسایش مونوکسیدکربن باقی‌مانده تسهیل شود. در این روش، رژیم احتراقی بدون شعله، زمانی مطلوب تلقی می‌شود که زمان ماند مناسب ($\tau \sim d/V <$ 80) را برآورده کند. کاربرد گسترده روش کومار در دامنه وسیعی از ارزش‌های حرارتی سوخت، از ۴/۵ تا ۴۵ مگاژول بر کیلوگرم اثبات شده است؛ موضوعی که این روش را برای سوخت‌های گازی و مایع در سامانه‌های با بازده بالا و آلاینده‌گی کم، گزینه‌ای مناسب و کارآمد می‌سازد.

جدول ۱، خلاصه‌ای از عوامل مقیاس هندسی ($s = d_2/d_1$)، نسبت‌های سرعت (V_2/V_1)، زمان ماند (τ) و آزادسازی حرارت حجمی (\dot{q}''') را برای هر یک از روش‌های مقیاس‌گذاری مذکور، ارائه می‌کند.

جدول ۱- مقایسه روش‌های مختلف مقیاس‌گذاری، با توجه به قوانین ابعاد هندسی، سرعت، زمان ماند و نرخ آزادسازی حرارت (۱۶)

Table 1- Comparison of different scaling methods with respect to geometric dimensions, velocity, residence time, and volumetric heat-release rate [16]

Scaling methods	Geometric scaling $s = d_2/d_1$	Velocity scaling $V = V_2/V_1$	τ	\dot{q}'''
CV	$\dot{Q}^{1/2}$	Constant	$\dot{Q}^{1/2}$	$\dot{Q}^{-1/2}$
CRT	$\dot{Q}^{1/3}$	$\dot{Q}^{1/3}$	Constant	Constant
Cole	$\dot{Q}^{1/4}$	$\dot{Q}^{1/2}$	$\dot{Q}^{-1/4}$	$\dot{Q}^{1/4}$
Kumar	$\dot{Q}^{1/3}$	100 m/s	$\dot{Q}^{1/3}$	Constant

¹ Cole method

² Kumar method

علی‌رغم انجام پژوهش‌های گسترده در حوزه مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراقی، از جمله کوره‌های زیست‌توده [۱۷،۱۹]، راکتورهای بستر سیال سان [۲۰-۲۴]، مشعل‌های زغال‌سنگ [۲۵-۲۷]، احتراق مافوق صوت [۲۸،۲۹] و مشعل‌های متداول گازی و مایع [۳۰،۳۱]، همچنان یک شکاف تحقیقاتی اساسی در زمینه حفظ رژیم‌های بنیادی احتراق در فرآیند مقیاس‌گذاری وجود دارد. این شکاف نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در مقیاس‌گذاری تجهیزات و فرآیندها، چالش تضمین پایداری و حفظ رژیم احتراق بدون شعله هنگام انتقال از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی همچنان به‌طور کامل حل نشده است. همچنین مطالعات پیشین عمدتاً بر اصلاحات تجربی تکیه داشته‌اند؛ اصلاحاتی که معمولاً شامل تغییر در طراحی نازل‌های ورودی و خروجی یا به‌کارگیری تزریق هوای ثانویه است تا عملکرد سامانه پس از مقیاس‌گذاری بهبود یابد. هرچند این راهبردها می‌توانند منجر به بهبودهای موضعی شوند، اما فاقد یک چارچوب نظری یکپارچه هستند که به‌طور ذاتی قادر به حفظ رژیم احتراقی مطلوب، به‌ویژه احتراق بدون شعله باشد. به منظور حل شکاف تحقیقاتی مطرح‌شده، پژوهش حاضر یک چارچوب مبتنی بر اصول فیزیکی را بر پایه قضیه π -باکینگهام توسعه داده است. هدف این چارچوب حفظ پایداری رژیم احتراق بدون شعله در گذار از کوره آزمایشگاهی با توان ۱۰ کیلووات به نمونه صنعتی با توان ۱۰ مگاوات است، به‌گونه‌ای که ویژگی‌های اصلی رژیم بدون شعله در هر دو مقیاس، پایدار باقی بماند. ابتدا سعی می‌شود با شناسایی مهم‌ترین پارامترهای مقیاس‌گذاری، گروه‌های بدون بعد قضیه π -باکینگهام تشکیل شده و پس از مقیاس‌گذاری هندسی، تحلیل جامع شیمیایی-ترمودینامیکی بر روی نتایج انجام شود. تحلیل انجام‌شده شامل شناسایی رژیم‌های احتراق، ارزیابی توزیع‌های دمایی و غلظت آلاینده‌ها، بررسی بازچرخش گازهای دودکش (FGR)، مشخصه‌سازی برهم‌کنش آشفستگی-شیمی از طریق اعداد رینولدز آشفته و دامکولر، و در نهایت ارزیابی بازده‌های انرژی و انرژی‌های این رویکرد ساخت‌یافته تضمین می‌کند که شاخص‌های عملکرد مبتنی بر قانون اول و قانون دوم ترمودینامیک به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند و در نتیجه، اعتبارسنجی جامع و قابل‌اتکایی از راهبردهای مقیاس‌گذاری پیشنهادی فراهم می‌شود.

بر این اساس، مطالعه حاضر نه تنها به چالش دیرینه حفظ رژیم احتراق در فرآیند مقیاس‌گذاری پاسخ می‌دهد، بلکه یک روش‌شناسی قابل‌انتقال ارائه می‌کند که ملاحظات هندسی، ترمودینامیکی و دینامیک سیالات را در قالب یک چارچوب نظری یکپارچه گردآورده است. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش زمینه‌ساز طراحی سامانه‌های احتراق بدون شعله در مقیاس بزرگ با عملکردی پاک‌تر، پایدارتر و قابل‌اطمینان‌تر در کاربردهای صنعتی باشد.

روش‌شناسی

فرمول‌بندی مقیاس‌گذاری ابعادی برای طراحی کوره بدون شعله

بر اساس چارچوب ابعادی اسپالدینگ [۱۳]، در ابتدا مجموعه‌ای گسترده از متغیرهای فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. برای ساده‌سازی تحلیل، مجموعه‌ای از غربال‌ها^۱ به کار گرفته شد تا تنها پارامترهایی حفظ شوند که برای پایداری رژیم احتراق بدون شعله ضروری‌اند. این پارامترهای کلیدی شامل حفظ بازچرخانی گازهای حاصل از احتراق از طریق نسبت قطر به طول، تعریف یک پارامتر مقیاس زمانی به‌منظور ایجاد تعادل میان سینتیک واکنش و اختلاط توربولانسی و در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی مهم، نظیر دما، سرعت، هدایت حرارتی و نفوذ مولکولی برای تضمین یکنواختی حرارتی و کنترل مؤثر آلاینده‌ها می‌باشند. به‌منظور سازمان‌دهی سیستماتیک این متغیرها، مجموعه نهایی پارامترهای منتخب در قالب پنج گروه اصلی به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

(۱) پارامترهای هندسی: شامل طول کوره (l)، ارتفاع (h)، عرض (w) و قطر نازل‌های ورودی و خروجی (d) از میان این متغیرها، دو پارامتر l و d به‌عنوان عوامل کلیدی در تحلیل مقیاس‌گذاری انتخاب می‌شوند.

(۲) پارامترهای دینامیک سیالات: سرعت (V)، افت فشار (ΔP)، ویسکوزیته سینماتیک (ν) و چگالی (ρ). از این مجموعه V و ρ

¹ Filtering

به عنوان متغیرهای اصلی مقیاس گذاری انتخاب می‌شوند.

۳) پارامترهای ترمودینامیکی: فشار (P)، دما (T)، گرمای ویژه در فشار ثابت (c_p)، آنتالپی (H) و نسبت هم‌ارزی (ϕ). از این موارد c_p و ϕ انتخاب می‌شوند.

۴) پارامترهای انتقال حرارت: اختلاف دما (ΔT)، هدایت حرارتی (k)، ضریب انتقال حرارت جابجایی (h)، نفوذپذیری حرارتی (α)، عدد ناسلت (Nu) و نرخ تولید حرارت حجمی (\dot{q}'''). از این میان ΔT ، k و \dot{q}''' انتخاب می‌شوند.

۵) پارامترهای واکنش شیمیایی: نفوذ مولکولی (D)، ثابت زمانی واکنش شیمیایی (τ)، غلظت گونه‌ها ($[X_i]$)، گرمای واکنش (Q) و انرژی فعال‌سازی (Ea). از این مجموعه D و τ انتخاب شدند.

جدول ۲ متغیرهای فیزیکی انتخاب‌شده را همراه با ابعاد بنیادی متناظرشان، جرم $[M]$ ، طول $[L]$ ، زمان $[T]$ و دما $[\theta]$ ارائه می‌کند.

جدول ۲- تحلیل ابعادی متغیرهای انتخابی

Table 3- Dimensional analysis of the selected variables

l	d	τ	V	D	ρ	c_p	ΔT	k	\dot{q}'''	ϕ
L	L	T^{-1}	LT^{-1}	$L^2 T^{-1}$	ML^{-3}	$L^2 T^{-2} \theta^{-1}$	θ	$MLT^{-3} \theta^{-1}$	$ML^{-1} T^{-3}$	-

در مجموع، یازده متغیر ابعادی ($\beta = 11$) انتخاب شدند که همگی توسط چهار بعد اصلی: جرم $[M]$ ، طول $[L]$ ، زمان $[T]$ و دما $[\theta]$ ، ($\gamma = 4$) کنترل می‌شوند. بر اساس قضیه π -باکینگهام، این منجر به تشکیل هفت گروه مستقل بدون بُعد ($\beta - \gamma = 7$) می‌شود که در ادامه معرفی می‌شوند.

$$\pi_0 = \phi \quad (7)$$

$$\pi_1 = d/l \quad (8)$$

$$\pi_2 = l\tau/V \quad (9)$$

$$\pi_3 = D/lV \quad (10)$$

$$\pi_4 = c_p \Delta T / V^2 \quad (11)$$

$$\pi_5 = k \Delta T / \rho l V^3 \quad (12)$$

$$\pi_6 = \dot{q}''' l / \rho V^3 \quad (13)$$

بر اساس این اصل که هرگونه عملیات جبری روی اعداد بدون بُعد، منجر به یک کمیت بدون بُعد دیگر می‌شود، اعداد بدون بُعد، به صورت روابط (۱۴) تا (۱۹) بازنویسی می‌شوند.

$$\pi_0 = \phi \quad (14)$$

$$\pi_1 = d/l \quad (15)$$

$$\pi_2 = l\tau/V \quad (16)$$

$$\pi_3 = l^2 \tau / D \quad (17)$$

$$\pi_4 = \dot{q}''' l / \rho V c_p \Delta T \quad (18)$$

$$\pi_5 = \dot{q}''' d^2 / k \Delta T \quad (19)$$

بنابراین در این مطالعه، شش عدد بدون بُعد π_0 تا π_5 برای مقیاس‌گذاری کوره آزمایشگاهی با توان ۱۰ کیلووات به نمونه صنعتی با توان ۱۰ مگاوات مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، حفظ یکسانی شرایط مرزی میان مدل آزمایشگاهی و مدل مقیاس‌گذاری‌شده، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به نتایج معتبر دارد و باید با دقت کامل رعایت شود. همچنین با در نظر گرفتن اصل استقلال شبکه^۱، همان‌گونه که در بخش نتایج تشریح خواهد شد، تعداد المان‌های شبکه در مدل مقیاس‌گذاری‌شده

¹ Mesh independence

باید دست‌کم برابر با حاصل‌ضرب تعداد اولیه المان‌ها در ضریب مقیاس باشد. این موضوع تضمین می‌کند که دقت عددی شبیه‌سازی در نمونه صنعتی حفظ شده و از ایجاد خطاهای ناشی از اندازه شبکه جلوگیری می‌شود. در ارتباط با استفاده از اعداد بدون بُعد فوق‌الذکر، باید به نکته زیر توجه داشت:

روابط (۱۸) و (۱۹)، π_4 و π_5 را تعریف می‌کنند که \dot{q}''' در آن‌ها، معرف مقدار حرارت تولید شده در واحد حجم در اثر واکنش‌های شیمیایی است. عدد بدون بُعد π_4 رابطه میان \dot{q}''' و انتقال حرارت محسوس با افزایش دما را به تصویر می‌کشد. برای تعیین سهم \dot{q}''' در انتقال حرارت از طریق رسانش یا جابجایی به کوره یا دیواره‌های آن، می‌توان عدد بدون بُعد π_5 را با استفاده از رابطه زیربازنویسی کرد:

$$\dot{q}'''(A_c) = h(pl) \Delta T \quad (20)$$

که در آن A_c سطح مقطع کوره عمود بر جریان، p محیط سطح مقطع کوره، l طول کوره و h ضریب انتقال حرارت جابجایی است. علاوه بر این، با معرفی قطر هیدرولیکی به صورت $d_h = 4A_c/p$ معادله (۲۰) می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$\dot{q}''' = 4hd_h \Delta T \quad (21)$$

در نهایت، با توجه به تعریف عدد ناسلت ($Nu = h d / k$) و اینکه $d_h \sim d$ رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q}''' d^2 / k \Delta T = 4hd/k = 4Nu_d \quad (22)$$

در نتیجه، π_5 را می‌توان به صورت زیر تغییر داد:

$$\pi_5' = \dot{q}''' d^2 / k \Delta T Nu_d \quad (23)$$

در انتها، بر اساس رابطه عدد ناسلت برای جریان داخلی آشفته (رابطه (۲۴)) [۳۲]، π_5 را می‌توان به صورت رابطه (۲۵) بیان کرد:

$$Nu_d = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (24)$$

$$\pi_5' = \dot{q}''' d^2 / C_2 k \Delta T V^{0.8} \quad (25)$$

باید توجه داشت که در رابطه (۲۵)، C_2 یک ضریب ثابت است.

مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

هندسه و شرایط مرزی

این بخش به تشریح هندسه محاسباتی و شرایط مرزی به کاررفته در شبیه‌سازی کوره آزمایشگاهی می‌پردازد که پیش‌تر توسط سزگو و همکاران [۳۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. این کوره دارای یک ورودی هم‌محور^۱ برای تزریق هم‌زمان سوخت و هوا است و محصولات احتراق نیز از همان سمت تخلیه می‌شوند. چنین پیکربندی با تسهیل بازچرخانی گازهای حاصل از احتراق، موجب پیش‌گرمایش مؤثر و رقیق‌سازی واکنش‌دهنده‌ها پیش از خروج آن‌ها می‌شود (رجوع شود به شکل ۱).

در این مطالعه، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تری از احتراق درون کوره، از شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی استفاده شده است. اگرچه شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی هزینه محاسباتی بیشتری به همراه دارند، اما در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر، مبنای بسیار قابل‌اتکاتری را برای ارزیابی تاثیر روش مقیاس‌گذاری فراهم می‌کنند؛ به‌ویژه زمانی که هدف، برون‌یابی نتایج از مدل آزمایشگاهی به نمونه صنعتی است. بر همین اساس، در مطالعه حاضر تمامی تحلیل‌های عددی با بهره‌گیری از مدل‌های کاملاً سه‌بعدی و تحت شرایط عملیاتی مشخص شده انجام شده است.

¹ Coaxial

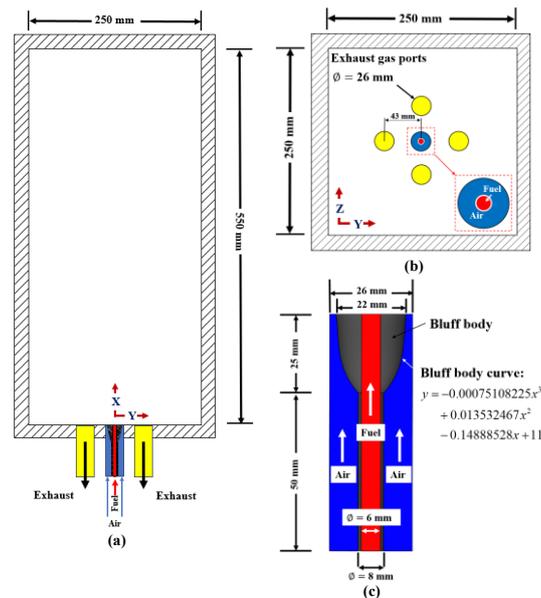


Figure 1- Geometry of the laboratory-scale furnace: (a) side view, (b) bottom view, and (c) bluff body positioned at the inlet nozzle
 شکل ۱- هندسه کوره آزمایشگاهی: (الف) نمای جانبی، (ب) نمای از پایین، و (ج) جسم پر^۱ قرار داده شده در نازل ورودی

جدول ۳ خلاصه‌ای از پارامترهای ورودی کلیدی را که برای اعتبارسنجی و شبیه‌سازی کوره مقیاس آزمایشگاهی به کار رفته‌اند، نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی‌های عددی

Table 3- Input parameters used for the numerical simulations

Parameters	Fuel	Air
Chemical compounds	CH ₄	79% N ₂ + 21% O ₂
Temperature (K)	306	306
Mass flow rate (kg/h)	0.68	13.62
Velocity (m/s)	9.32	22.38
Equivalence ratio	$\phi = 0.85$	

شرط مرزی فشار ثابت در بخش خروجی کوره اعمال شده، تمامی دیواره‌ها، به جز نازل‌های سوخت و هوا عایق شده و نیز دودکش، به عنوان سطوح دارای جابجایی طبیعی^۲ در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تقارن هندسی کوره، تنها یک‌چهارم از دامنه سه‌بعدی کل برای مدل‌سازی انتخاب شد. شرایط مرزی تقارن در هر دو صفحه‌ی میانی، افقی و عمودی، اعمال شد تا ضمن حفظ دقت فیزیکی شبیه‌سازی، هزینه محاسباتی نیز به میزان قابل توجهی کاهش یابد. شکل ۲ نمایی کلی از بخش جانبی دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی سه‌بعدی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جدول ۴ خلاصه‌ای جامع از تنظیمات مرزی اعمال شده را ارائه می‌کند.

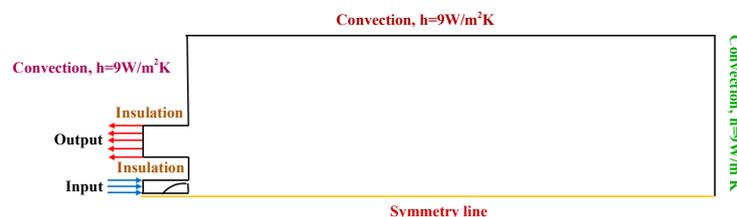


Figure 2- Schematic representation of the boundary conditions applied to the furnace geometry

شکل ۲- شماتیک شرایط مرزی اعمال شده بر روی هندسه کوره

¹ Bluff body

² Natural convective surfaces

جدول ۴- شرایط مرزی به کار رفته در شبیه سازی عددی، با تعیین سرعت، فشار، دما و غلظت گونه ها در ورودی ها، خروجی ها و دیواره ها

Table 4- Boundary conditions applied in the numerical simulations, specifying velocity, pressure, temperature, and species concentrations at inlets, outlets, and walls

Parameters	Input	Output	Walls
Velocity (U)	known (Table 4)	calculated by continuity equation	no-slip boundary condition and wall functions
Thermal boundary condition	(Table 4) known	must be calculated	known (Figure 2)
Pressure (P)	calculated by Bernoulli's equation	known (Atmospheric)	zero gradient ($\nabla P = 0$)
Species (X_i)	known (Table 4)	zero gradient ($\nabla X_i = 0$)	zero gradient ($\nabla X_i = 0$)

جدول ۵ مقایسه ای از ابعاد هندسی کوره مقیاس گذاری شده (۱۰ MW) و کوره آزمایشگاهی (۱۰ kW) ارائه می کند.

جدول ۵- مقایسه ابعاد هندسی و تعداد مش کوره های آزمایشگاهی و مقیاس گذاری شده صنعتی

Table 5- Comparison of geometric dimensions and mesh numbers for the laboratory-scale and scaled-up industrial furnaces

Approaches	Scale ratio	Length (m)	Width ^a (m)	Diameter (m)	Mesh number
Lab-scale	1	0.55	0.25	0.026	979,520
Scaled-up	7.21	3.97	1.80	0.187	7,224,773

^a Width=Height

فرضیات و مدل های عددی

مدل توربولانسی^۱: آشفتگی جریان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس میانگین گیری شده ی رینولدزی (RANS)^۲ و مدل استاندارد $k-\epsilon$ شبیه سازی شده است. اگرچه این مدل در پیش بینی دقیق رفتار جت های گرد با محدودیت هایی همراه است، اما مطالعات پیشین [۳۵،۳۴،۹] نشان داده اند که تنظیم پارامتر $C_{\epsilon 1}$ بر مقدار $1/60$ منجر به تطابق بهتر با داده های تجربی در جریان های جت گرد خودهمسان می شود. بر همین اساس، این اصلاح در تمام شبیه سازی ها اعمال شد تا دقت مدل سازی برهم کنش اغتشاش-شیمی افزایش یابد، بدون آنکه هزینه محاسباتی قابل توجهی ایجاد کند.

مدل کوپلینگ فشار-سرعت: ارتباط میان فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم SIMPLE^۳ حل می شود. این الگوریتم به دلیل پایداری عددی و کارایی مناسب در همگرایی، کاربرد گسترده ای در شبیه سازی جریان های پایا و تراکم ناپذیر دارد. مدل احتراقی: فرآیند احتراق با بهره گیری از مدل مفهوم اتلاف گردابه ای (EDC)^۴ شبیه سازی شد. این مدل با تخمین نرخ واکنش به عنوان تابعی از مقیاس های زمانی توربولانسی موضعی، امکان کوپل مؤثر اختلاط توربولانسی و سینتیک واکنش را فراهم می کند.

مکانیزم شیمیایی و مدل سینتیکی: برای نمایش دقیق احتراق متان در شرایط احتراق بدون شعله، از مکانیزم شیمیایی GRI-Mech 3.0 [۳۶] شامل ۵۳ گونه شیمیایی و ۳۲۵ زیرواکنش استفاده می شود.

مدل تشعشع: انتقال حرارت تشعشعی با روش مرتبه های گسسته (DO)^۵ برای حل معادله انتقال تشعشع مدل سازی می شود. برای ارزیابی ضرایب جذب گاز نیز مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری^۶ به کار گرفته می شود. در این مطالعه، مدل DO از سه تقسیم بندی زاویه ای در هر دو جهت قطبی (θ) و آزیموتال (ϕ) گسسته شده و در مجموع ۷۲ جهت تشعشعی گسسته برای هر سلول ایجاد شده و دقت حل تشعشع را تضمین می نماید.

معیارهای همگرایی: برای افزایش دقت عددی، تقریب مرتبه دوم برای تمام معادلات انتقال اسکالر اعمال می شود. همگرایی، زمانی تحقق می یابد که شرایط زیر برآورده شود:

- باقیمانده های عددی برای معادلات انرژی، تکانه و تابش به کمتر از 10^{-6} و برای سایر متغیرها به کمتر از 10^{-5} برسد.

¹ Turbulence model

² Reynolds-Averaged Navier-Stokes

³ Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

⁴ Eddy Dissipation Concept

⁵ Discrete Ordinates

⁶ Weighted Sum of Gray Gases Models

- محدوده تغییرات دما حداکثر به $\pm 1K$ محدود شود.

افزون بر این، مقادیر بیشینه و میانگین حجمی دما با دقت $\pm 1K$ ، سرعت میانگین سطحی خروجی با دقت $\pm 0.1 \frac{m}{s}$ ، کسر مولی میانگین حجمی اکسیژن با دقت ± 0.01 پایدار می‌شوند. راهبرد کوپلینگ انرژی-تابش: به منظور دستیابی به کوپلینگ پایدار میان میدان‌های انرژی حرارتی و تشعشعی که در احتراق بدون شعله و در حضور آزادسازی حرارت حجمی با گرادیان‌های اندک اهمیت ویژه‌ای دارد، یک راهبرد تکرار متوالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور مشخص، برای هر تکرار^۱ تشعشعی، ۲۰ تکرار از معادله انرژی حل می‌شود. این راهبرد، تعادلی مناسب میان دقت محاسباتی و سرعت همگرایی ایجاد کرده و موجب حفظ یکنواختی و سازگاری انرژی-تابش در سراسر دامنه می‌شود.

بررسی استقلال حل از شبکه

به‌منظور ارزیابی دقت نتایج عددی و اطمینان از استقلال حل نسبت به شبکه، شبیه‌سازی‌های اولیه با استفاده از متان خالص و هوا به ترتیب به‌عنوان سوخت و اکسنده مرجع انجام شد. دامنه محاسباتی با یک شبکه‌ی ساختاریافته شامل حدود ۹۸۰۰۰۰۰ سلول گسسته‌سازی شد (همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است). انتخاب این شبکه ساختاریافته با هدف بهبود هم‌راستایی سلول‌ها و افزایش پایداری عددی در سراسر دامنه صورت گرفت. شبکه‌بندی لایه مرزی در نزدیکی نواحی ورودی و خروجی اعمال شد تا توزیع Y^+ بهینه شود. این ریزسازی شبکه، گرادیان‌های سرعت را در مناطق نزدیک دیواره به حداقل رسانده و سازگاری با شرایط مرزی فشار را تضمین می‌نماید. در کل دامنه، مقادیر Y^+ در محدوده زیر ۱ حفظ شده، که این امر امکان تفکیک دقیق زیرلایه ویسکوز و انطباق با الزامات مدل‌سازی اغتشاش در اعداد رینولدز پایین را فراهم می‌آورد. خلاصه‌ای از شاخص‌های شبکه، شامل کیفیت سلول و میزان کج بودن^۲، در جدول ۶ ارائه شده است.

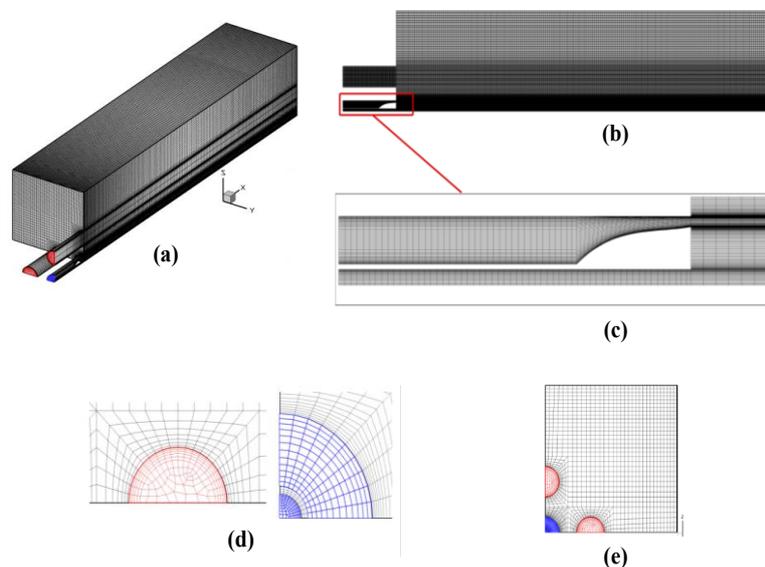


Figure 3- Mesh configuration in different regions of the computational domain: (a) one-quarter of the 3D furnace cross-section, (b) side view of the furnace, (c) inlet nozzles, (d) boundary-layer mesh at the inlets and outlet, and (e) floor section

شکل ۳- پیکربندی شبکه در مناطق مختلف دامنه محاسباتی: (الف) یک چهارم از مقطع کوره سه‌بعدی، (ب) نمای جانبی کوره، (ج) نازل‌های ورودی، (د) شبکه لایه مرزی در ورودی‌ها و خروجی‌ها، و (ه) کف کوره

¹ Iteration
² Skewness

جدول ۶- کیفیت شبکه و آمارهای انحراف برای دامنه محاسباتی

Table 6- Mesh quality metrics and deviation statistics for the computational domain

Mesh metric	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation
Quality	6.2355×10^{-2}	1	0.55355	0.31271
Skewness	1.3057×10^{-10}	0.45095	1.0789×10^{-3}	1.4938×10^{-2}

برای ارزیابی دقیق تر حساسیت شبکه، شبیه سازی ها با چهار شبکه ۲۴۴،۸۸۰، ۴۸۹،۷۶۰، ۹۷۹،۵۲۰ و ۱،۹۵۹،۰۴۰ سلول انجام شد. اگرچه ریزترین شبکه (با حدود ۱/۹۶ میلیون المان) تنها بهبود اندکی در دقت نتایج ایجاد می کرد، اما هزینه محاسباتی آن بیش از دو برابر شبکه ۹۸۰ هزار سلولی بود.

نتایج نشان داد که میدان های دما و سرعت در دو شبکه ریزتر تقریباً یکسان هستند و اختلافات مشاهده شده ناچیز بوده و تنها به نواحی کاملاً موضعی محدود می شوند. شکل های ۴(آ) و ۴(ب) به ترتیب توزیع های سرعت شعاعی و محوری را نمایش می دهند و حداقل تفاوت میان دو شبکه ریزتر را تأیید می کنند. به طور مشابه، پروفیل های دمای شعاعی (شکل های ۴(ج) تا ۴(ز)) و پروفیل دمای محوری (شکل ۴(ح)) نیز همخوانی بسیار خوبی را در سطوح مختلف شبکه نشان می دهند.

همگرایی عددی با استفاده از روش شاخص همگرایی شبکه (GCI) [۳۷] و بر اساس پروفیل های واقع بر خط مرکزی در $x=125\text{mm}$ کمی سازی شد. مقدار GCI میان شبکه های ۹۸۰ هزار و ۱ میلیون و ۹۶۰ هزار سلولی برای دما برابر ۲/۸٪ و برای سرعت محوری برابر ۱/۳٪ محاسبه شد. هر دو مقدار به طور کامل در بازه قابل قبول مهندسی (کمتر از ۵٪) قرار دارند. نکته قابل توجه آن است که مقدار GCI مربوط به دما اندکی کمتر از مقدار متناظر برای سرعت است؛ موضعی که با گردان های فضایی نرم تر میدان دما در رژیم احتراق بدون شعله سازگاری دارد. این نتایج، استقلال حل از شبکه را تأیید کرده و انتخاب شبکه ۹۸۰ هزار سلولی را به عنوان نقطه ای بهینه میان دقت عددی و هزینه محاسباتی توجیه می کند.

بررسی اعتبارسنجی مدل عددی

قابلیت اطمینان مدل CFD با مقایسه پروفیل های دمای محوری، غلظت های خروجی O_2 ، CO و NO با داده های تجربی گزارش شده توسط هی و همکاران [۹] در شرایط عملیاتی مشابه ارزیابی شد.

مدل حاضر دمای خروجی را با بیشترین خطای ۳/۵٪ و میانگین انحراف ۱/۶٪ پیش بینی می کند. به همین ترتیب، مقادیر پیش بینی شده برای کسر مولی O_2 و غلظت NO به ترتیب دارای حداکثر انحراف ۴/۷٪ و ۵٪ می باشند. در حالی که پیش بینی CO اختلاف بیشتری داشته و تا ۷/۲٪ انحراف را نشان داد. این میزان اختلاف در محدوده قابل قبول مدل سازی احتراق، به ویژه پژوهش های پیشین گزارش شده توسط هی و همکاران [۹]، قرار دارد. بنابراین، نتایج به دست آمده دقت و قابلیت اتکای مدل CFD به کاررفته در این تحقیق را تأیید کرده و زمینه را برای انجام تحلیل های مقیاس گذاری بعدی فراهم می سازد.

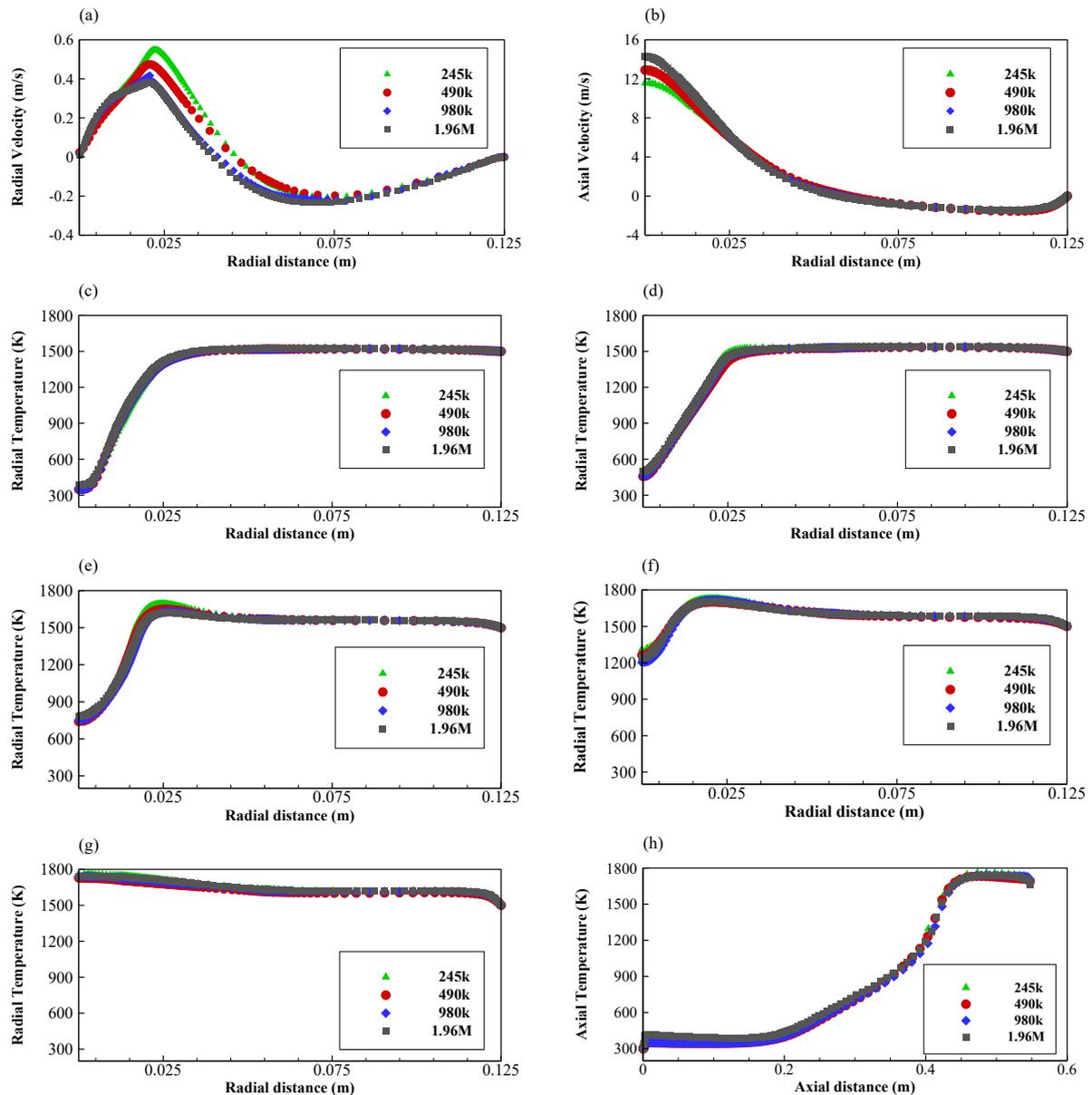


Figure 4- Grid-independence analysis based on comparisons of velocity and temperature profiles for different mesh resolutions: (a) radial velocity distribution at a transverse section, (b) axial velocity distribution, (c-g) radial temperature profiles at axial positions 135, 225, 315, 405, and 495 mm, respectively, and (h) axial temperature distribution along the furnace centerline

شکل ۴- تحلیل استقلال از شبکه با مقایسه پروفایل‌های سرعت و دما برای شبکه‌های مختلف: (الف) توزیع سرعت شعاعی در یک مقطع

عرضی، (ب) توزیع سرعت محوری، (ج تا ز) پروفایل‌های دمای شعاعی به ترتیب در موقعیت‌های محوری ۱۳۵، ۲۲۵، ۳۱۵، ۴۰۵ و ۴۹۵ میلی‌متر و (ح) توزیع دمای محوری در امتداد خط مرکزی کوره

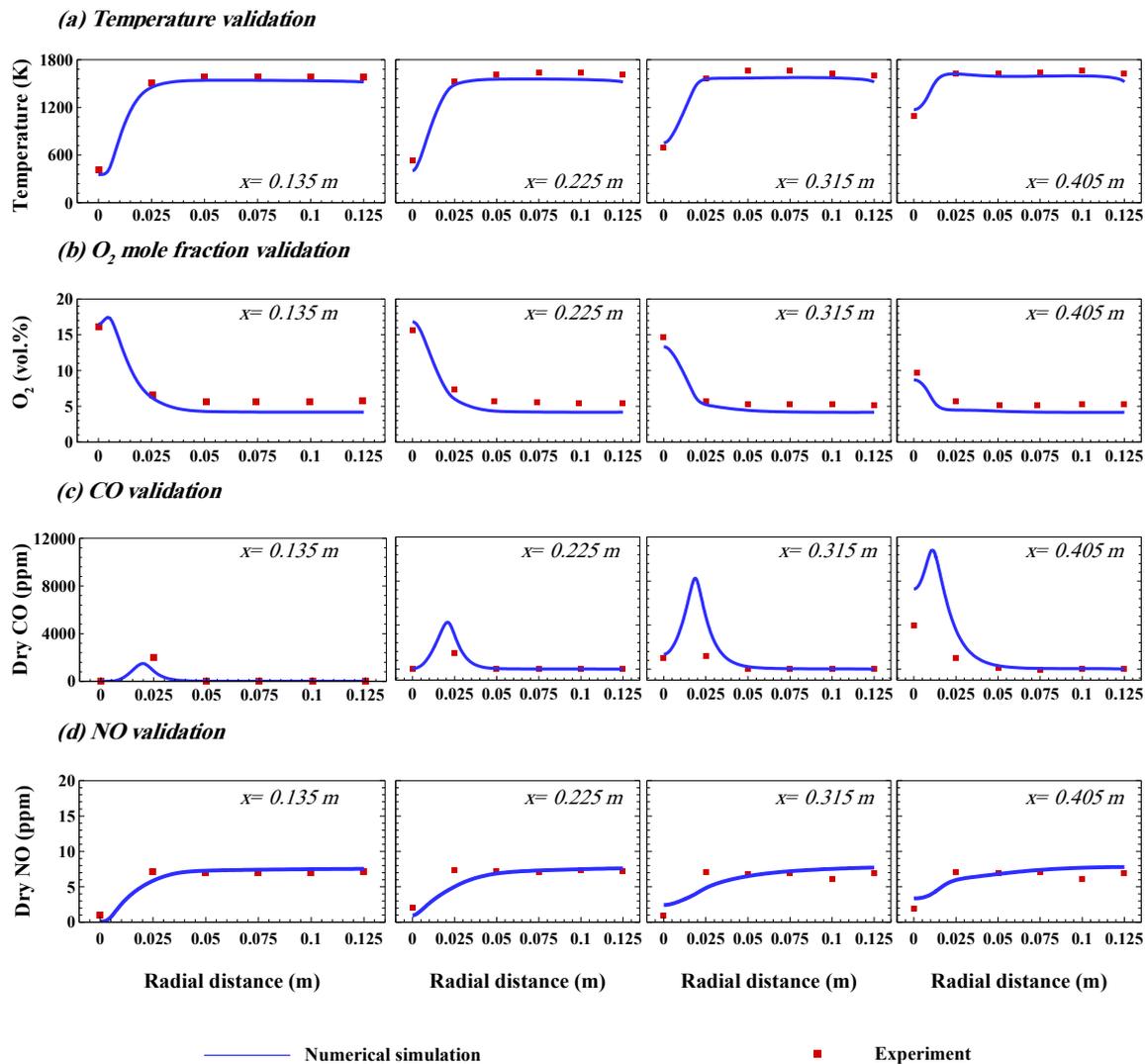


Figure 5- Comparison between numerical and experimental results [9] at various axial positions: (a) temperature, (b) O_2 mole fraction, (c) CO mole fraction, and (d) NO mole fraction

شکل ۵- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی [9] بر حسب موقعیت های محوری مختلف: (الف) دما، (ب) کسر مولی O_2 ، (ج) کسر مولی CO و (د) کسر مولی NO

نتایج و تحلیل

شناسایی رژیم احتراق

شناسایی دقیق و قابل اعتماد رژیم احتراق بدون شعله، یکی از چالش های اساسی در پژوهش های مرتبط با احتراق محسوب می شود؛ به ویژه هنگامی که این موضوع از طریق مدل سازی محاسباتی مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعه حاضر، برای تشخیص این رژیم، از دو معیار شناخته شده استفاده شده است: نخست، نامساوی حرارتی معرفی شده توسط کوالیر [۳۸] (مطابق معادله (۱)) و دوم، معیار دمای فضای نرمالایز شده $1 (T''^2)$ که نخستین بار توسط کومار و همکاران [۳۹] پیشنهاد شده است. شکل ۶، نقشه رژیم احتراق را بر اساس نامساوی حرارتی کوالیر [۳۸]، مطابق معادله (۱)، نمایش می دهد. بر اساس این معیار، کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس گذاری شده صنعتی در ناحیه احتراق بدون شعله قرار می گیرند.

¹ Normalized spatial temperature variation

لازم به ذکر است که مقدار $T_{AI} = 870/22K$ با استناد به خصوصیات احتراق متان خالص در هوا و تحت شرایط خاص این مطالعه، شامل دما، فشار و نسبت هم‌ارزی، انتخاب شده است. در این ارزیابی، T_{In} بیانگر دمای مؤثر واکنش‌دهنده‌هایی است که پس از اختلاط با گازهای دودکش بازچرخانی شده وارد ناحیه واکنش می‌شوند؛ این دما به‌طور قلیل توجهی از دمای ورودی درج‌شده در جدول ۳ بالاتر است.

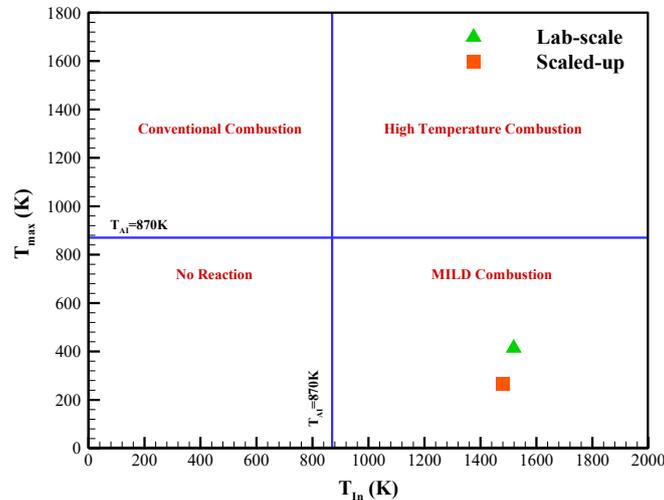


Figure 6- Cavalieri criterion [38] for identifying and comparing combustion regimes

شکل ۶- معیار کاوالیر [۳۸] برای تعیین و مقایسه رژیم‌های احتراق

هم‌زمان با معیار نامساوی حرارتی، از معیار دما فضا نرمالایز شده (T'^2) ارائه‌شده توسط کومار [۳۹] نیز برای طبقه‌بندی رژیم‌های احتراقی استفاده می‌شود. این شاخص که بر اساس معادلات (۲۶) و (۲۷) محاسبه می‌شود، میزان یکنواختی دما را در دامنه واکنش اندازه‌گیری می‌کند؛ به‌طوری‌که اگر مقدار T'^2 کمتر از ۱۵٪ باشد، نشان‌دهنده رژیم احتراق بدون شعله و اگر مقدار آن بیش از ۵۱٪ باشد، نمایانگر احتراق معمولی است. نتایج ارائه‌شده در جدول ۷ نشان می‌دهند که مقدار T'^2 در کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌گذاری شده صنعتی کمتر از ۱۵٪ است. بدین ترتیب، این دو معیار مستقل، یعنی نامساوی حرارتی و دمای فضای نرمالایز شده، نشان می‌دهند که روش مقیاس‌گذاری پیشنهادی قادر است رژیم احتراق اصلی را در مدل آزمایشگاهی و صنعتی بدون انحراف حفظ کند.

$$T_{mean} = \int T d\tau / \int d\tau \quad (26)$$

$$T'^2 = \int (T - T_{mean}/T_{mean})^2 dv / \int dv \quad (27)$$

جدول ۷- مقادیر دمای فضای نرمالایز شده در کوره‌های آزمایشگاهی و مقیاس‌گذاری شده

Table 7- Normalized spatial temperature variation values for the laboratory-scale and scaled-up furnaces

Approaches	T'^2
Lab-scale	3.57 %
Scaled-up	0.91 %

پیش‌بینی دما و انتشار آلاینده‌ها

شکل ۷، دمای بیشینه و میانگین شعله را به‌همراه میزان انتشار آلاینده‌های CO و NO، میان کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌گذاری شده صنعتی مقایسه می‌کند. دمای بیشینه پیش‌بینی شده برای کوره مقیاس‌گذاری شده برابر با ۱۹۶۶K است که در مقایسه با مقدار گزارش‌شده برای کوره آزمایشگاهی (۱۹۳۳K)، تنها اختلافی معادل ۱/۷٪ دارد. برای دمای میانگین نیز مقدار ۱۷۲۳K به‌دست آمده است که نسبت به مقدار متناظر آزمایشگاهی (۱۷۵۴K)، ۱/۸٪ اختلاف را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه میزان انتشار آلاینده‌های NO و CO میان کوره‌هایی با ظرفیت‌های حرارتی متفاوت ذاتاً قابل مقایسه نیست، مقدار آن‌ها بر اساس توان ورودی نرمالایز شده (mg/kJ) گزارش می‌شود. بر مبنای این معیار، کوره مقیاس‌گذاری شده مقدار ۴۱ mg/kJ را برای انتشار CO پیش‌بینی می‌کند که در مقایسه با مقدار آزمایشگاهی ۶۴ mg/kJ، کاهش چشمگیری داشته و کاملاً قابل قبول ارزیابی می‌شود. اگرچه انتظار می‌رود پیش‌بینی انتشار NO به دلیل حساسیت شدید این آلاینده به سینتیک واکنش دچار انحرافات بزرگ‌تری شود، نتایج همچنان دقت قابل توجهی نشان می‌دهند. برخلاف دما که یک تابع حالت بوده و عمدتاً تحت کنترل شرایط مرزی است، تشکیل NO به‌طور مستقیم به مسیرهای واکنش و دینامیک گونه‌های میانی وابسته است؛ از این رو پیش‌بینی آن چالش‌برانگیزتر است. با این وجود، مقدار NO در کوره آزمایشگاهی ۵۳ mg/kJ گزارش شده بود، در حالی که روش مقیاس‌گذاری حاضر مقدار ۲۷ mg/kJ را به دست آورد؛ نتیجه‌ای که بهترین تطابق را در میان تمامی مدل‌های مقیاس‌شده ارائه می‌دهد. این یافته مهم، قدرت و قابلیت اتکای روش پیشنهادی را در بازتولید روندهای مرتبط با تشکیل آلاینده‌ها در فرآیند مقیاس‌گذاری برجسته می‌سازد.

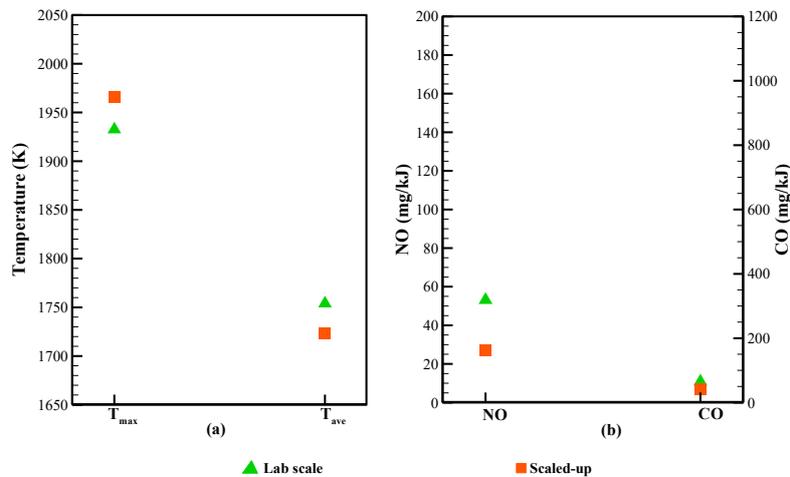


Figure 7- Comparison of key performance indicators between the laboratory-scale and industrial scaled-up furnaces: (a) maximum and average temperatures, and (b) NO and CO emissions

شکل ۷- مقایسه شاخص‌های کلیدی عملکرد بین کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌گذاری شده صنعتی: (الف) حداکثر و میانگین دما؛ (ب) انتشار آلاینده‌های NO و CO

پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در سامانه‌های احتراقی، به‌مراتب پیچیده‌تر از برآورد توزیع دما است؛ زیرا فرآیند تشکیل آلاینده‌ها تحت تأثیر برهم‌کنش‌های چندمقیاسی و بسیار حساس شیمی، اختلاط و انتقال حرارت قرار دارد. همان‌گونه که در این مطالعه نیز مشاهده شد، میزان انحراف در پیش‌بینی آلاینده‌ها، بالاتر از خطای مربوط به دما است. در ادامه، مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد این ناهماهنگی‌ها تشریح می‌شوند.

۱. تأثیر پارامترهای انتقال حرارت و پیچیدگی شیمیایی: متغیرهای ترمودینامیکی مانند دما (T)، نرخ تولید حرارت حجمی (\dot{q}''') و هدایت حرارتی (k) مستقیماً بر انتقال انرژی حاکم هستند و در قالب گروه‌های بدون‌بعد به‌خوبی اعمال شده‌اند. به همین دلیل، پیش‌بینی دما در مقیاس‌های مختلف معمولاً از دقت بالایی برخوردار است. در مقابل، غلظت آلاینده‌هایی نظیر CO و NO به ترکیب شیمیایی موضعی و برهم‌کنش هم‌زمان مسیرهای متعدد واکنش وابسته‌اند. با توجه به حضور گونه‌های شیمیایی متنوع و کوپلینگ شدید و غیرخطی سینتیک واکنش‌ها، حتی تغییرات بسیار کوچک در شرایط محلی می‌تواند منجر به اختلافات قابل توجه در غلظت پیش‌بینی‌شده آلاینده‌ها شود. این حساسیت ذاتی، مدل‌سازی آلاینده‌ها را به‌طور بنیادین پیچیده‌تر از تخمین میدان دما می‌سازد.

۲. تنوع در مسیرهای واکنش در مقیاس‌های مختلف: سینتیک شیمیایی به‌شدت نسبت به ابعاد راکتور، دینامیک اختلاط و نسبت‌های هم‌ارزی موضعی حساس است. برای نمونه، یک سامانه احتراق در مقیاس آزمایشگاهی با توان ۱۰ کیلووات ممکن

است با وجود حفظ شباهت هندسی از مسیرهای واکنش متفاوتی نسبت به نمونه صنعتی با ظرفیت ۱۰ مگاوات پیروی کند. این وابستگی رفتار شیمیایی به مقیاس، ضرورت استفاده از راهکارهای مدل‌سازی ویژه برای هر سامانه را برجسته می‌سازد. در صورتی که نرخ‌های سینتیکی یا انتقال گونه‌ها تحت شرایط حرارتی و جریانی متفاوت با دقت کافی مدل‌سازی نشوند، خطاهای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در مقیاس‌های مختلف می‌تواند به‌طور چشمگیری افزایش یابد. بنابراین، حساسیت سینتیک شیمیایی یکی از عوامل اصلی ایجاد ناهماهنگی میان مدل‌های مقیاس‌گذاری و عملکرد واقعی سامانه‌های احتراقی است.

۳. تأثیر رژیم احتراق بر مقیاس‌گذاری: در رژیم احتراق بدون شعله، نبود گرادیان‌های حرارتی و شیمیایی تند موجب ایجاد نواحی واکنش یکنواخت و توزیع پایدار حرارت می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود پیش‌بینی آلاینده‌ها در فرآیند مقیاس‌گذاری، ثبات بیشتری داشته باشد. در مقابل، احتراق معمولی معمولاً همراه با گرادیان‌های شدید دما و تشکیل نقاط داغ موضعی است؛ شرایطی که حساسیت تشکیل آلاینده‌ها را نسبت به کوچک‌ترین نوسانات جریان یا دما افزایش می‌دهد. به همین دلیل، پیش‌بینی‌ها در چنین رژیم‌هایی معمولاً انحراف بیشتری نشان می‌دهند و پایداری کمتری دارند.

به‌طور خلاصه، افزایش خطا در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها عمدتاً ناشی از وابستگی شدید آن‌ها به سینتیک شیمیایی غیرخطی، انتقال چندجزئی گونه‌ها و حساسیت بالای آن‌ها به نوع رژیم احتراق است. از این رو، دستیابی به تخمین دقیق آلاینده‌ها مستلزم به‌کارگیری مدل‌های سینتیکی با جزئیات بیشتر و توجه دقیق به برهم‌کنش‌های وابسته به مقیاس راکتور است؛ الزاماتی که فراتر از نیازهای معمول برای پیش‌بینی میدان دما قرار می‌گیرند.

توزیع فضایی^۱ دما و آلاینده‌ها

شکل ۸ کانتورهای دمایی کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌گذاری شده صنعتی را نمایش می‌دهد. در مدل آزمایشگاهی، ناحیه دما بالا نسبتاً فشرده بوده و در نزدیکی خروجی مشعل متمرکز است؛ وضعیتی که نشان‌دهنده یک ناحیه واکنش شدید اما محدود از نظر فضایی است. با افزایش مقیاس سامانه، این ناحیه به تدریج گسترده‌تر شده و توزیع آن یکنواخت‌تر می‌شود؛ پدیده‌ای که بیانگر گسترش ناحیه واکنش حجمی و کاهش تمرکز موضعی حرارت است.

در کوره مقیاس‌شده طول اختلاط به مراتب کوتاه‌تری مشاهده می‌شود؛ به طوری که فرآیند اختلاط تنها ۴۹ درصد از طول محفظه احتراق را در بر می‌گیرد، در حالی که این مقدار در مدل آزمایشگاهی حدود ۷۳ درصد است. روش مقیاس‌گذاری حاضر توانسته است یکنواختی فضایی میدان دما را با دقت بالایی بازتولید کند و رفتار آن به‌طور قابل توجهی به ویژگی‌های احتراق توزیع‌شده در مدل آزمایشگاهی نزدیک است. این عملکرد مطلوب به دلیل حفظ بهتر مومنتوم ورودی و هندسه نازل در این روش است؛ عواملی که به‌طور مستقیم بر دینامیک اختلاط و ضخامت ناحیه واکنش اثر می‌گذارند. نکته حائز اهمیت آن است که در مدل مقیاس‌شده، ضخامت ناحیه واکنش تقریباً سراسر محفظه احتراق را پوشش می‌دهد؛ در نتیجه، آزادسازی انرژی به‌صورت یکنواخت انجام شده و گرادیان‌های دمایی به حداقل می‌رسند. چنین یکنواختی حرارتی یکی از الزامات بنیادی برای حفظ رژیم احتراق بدون شعله در مقیاس‌های متفاوت است.

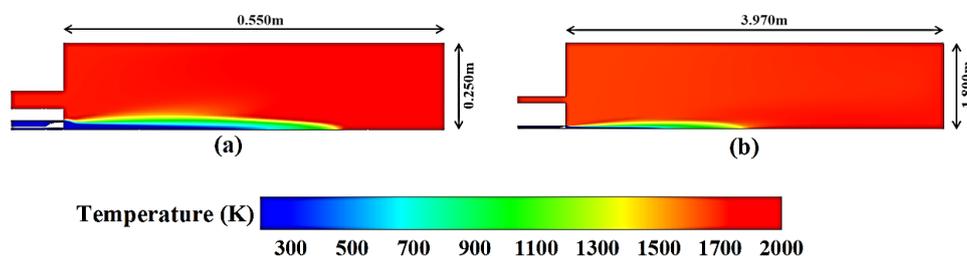


Figure 8- Temperature contours: (a) laboratory-scale furnace and (b) industrial-scale furnace

شکل ۸- کانتورهای دما: (الف) کوره آزمایشگاهی و (ب) کوره صنعتی

¹ Contour

شکل ۹ توزیع غلظت CO را در کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌شده صنعتی نشان می‌دهد. در هر دو، مونوکسید کربن عمدتاً در نواحی اختلاط سوخت و هوا تجمع می‌یابد؛ همان مناطقی که احتمال وقوع احتراق ناقص بالاتر است و در نتیجه، تشکیل CO بیشتر رخ می‌دهد.

الگوهای کانتور CO در روش مقیاس‌شده، بیشترین شباهت را به مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد و یک ناحیه اختلاط متمرکز و نسبتاً محدود را ایجاد می‌کند. به‌طور خاص، در این روش، ناحیه تشکیل CO بیانگر اختلاط بهبودیافته و کنترل فضایی دقیق‌تر بر واکنش‌های اکسیداسیون است. شایان ذکر است که ناحیه اختلاط در این روش محدودتر بوده و تنها ۴۰ تا ۵۰ درصد بخش مرکزی طول محفظه را دربر می‌گیرد؛ رفتاری که شباهت زیادی به الگوی مشاهده‌شده در مقیاس آزمایشگاهی دارد. این محدودسازی، از گسترش تشکیل CO به مناطق پیرامونی محفظه احتراق جلوگیری کرده و در نتیجه، انتشار کلی CO را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. بهبود چشمگیر رفتار اختلاط در این روش، فضای لازم را برای حفظ شرایط احتراق بدون شعله فراهم می‌سازد؛ رژیمی که در آن واکنش‌دهنده‌ها پیش از اشتعال، به‌طور یکنواخت رقیق و پیش‌گرم می‌شوند و بدین ترتیب، احتراق توزیع‌شده و پایدار تضمین می‌شود.

حد مجاز انتشار آلاینده CO استاندارد (EPA-HQ-OAR-2002-0058; FRL-6312-02-OAR) برابر با ۱۳۰ ppm است و از این نظر هر دو کوره آزمایشگاهی (۴۲/۱ ppm) و کوره مقیاس‌شده صنعتی (۲۶/۶ ppm) به خوبی در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرند که این امر اهمیت حفظ صحیح شباهت هندسی و حرارتی برای مهار مؤثر اکسیداسیون ناقص توسط احتراق بدون شعله را برجسته می‌سازد.

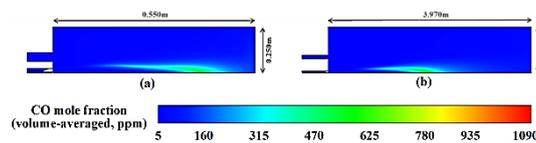


Figure 9- CO concentration contours: (a) laboratory-scale furnace and (b) industrial-scale furnace

شکل ۹- کانتورهای غلظت CO: (الف) کوره آزمایشگاهی و (ب) کوره صنعتی

شکل ۱۰ کانتورهای کسر مولی NO را برای کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌شده صنعتی نمایش می‌دهد و به‌وضوح یک همبستگی قوی میان تشکیل NO و نواحی با دمای بالا در محفظه احتراق مشاهده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، توزیع NO به‌طور چشمگیری الگوی میدان دما را بازتاب می‌دهد (رجوع شود به شکل ۸). این رفتار کاملاً با سازوکار شناخته‌شده زلدوویچ [۴۰] سازگار است؛ سازوکاری که در آن NO عمدتاً از طریق تفکیک حرارتی پیوندهای سه‌گانه مولکول‌های N_2 در دماهای بالا شکل می‌گیرد.

در مورد متوسط انتشار NO، نتایج نشان می‌دهد که کوره مقیاس‌شده صنعتی با $7/2 \text{ mg/kJ}$ به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر از حد استاندارد (EPA (EPA-HQ-OAR-2009-0234; EPA-HQ-OAR-2011-0044; FRL-9611-4) معادل 86 mg/kJ است. به‌طور مشابه، کوره آزمایشگاهی با 15 mg/kJ نیز بسیار پایین‌تر از این آستانه است. بنابراین روش مقیاس‌گذاری شده بیشترین شباهت را در مهار تشکیل NO نسبت به نمونه آزمایشگاهی دارد. چنین مقادیر بسیار پایینی برای NO با مشاهدات پیشین در احتراق بدون شعله [۳۸،۴۱] سازگار است، جایی که رژیم توزیع‌شده ذاتاً تشکیل NO حرارتی را کاهش می‌دهد.

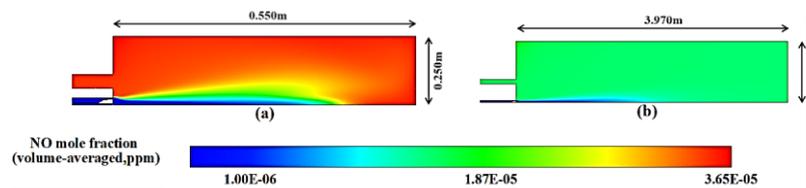


Figure 10- NO concentration contours: (a) laboratory-scale furnace and (b) industrial-scale furnace

شکل ۱۰- کانتورهای غلظت NO: (الف) کوره آزمایشگاهی و (ب) کوره صنعتی

به طور کلی، مقایسه نتایج با استانداردهای EPA نشان می‌دهد که روش نوآورانه ارائه شده برای مقیاس گذاری کوره، بهترین انطباق را با مدل آزمایشگاهی فراهم کرده و همزمان قادر است غلظت CO را زیر ۱۳۰ ppm و میزان انتشار بسیار پایین NO را کمتر از ۸۶ mg/kJ تضمین کند. این موضوع بر اهمیت و ضرورت به کارگیری این روش در مقیاس گذاری سامانه‌های احتراق بدون شعله تأکید می‌نماید؛ به‌ویژه از آن جهت که می‌تواند ضمن رعایت الزامات زیست‌محیطی، پایداری رژیم احتراق توزیع شده را نیز حفظ کند. این مقایسه همچنین نشان می‌دهد که کنترل انتشار CO در فرآیند مقیاس گذاری، نسبت به NO چالش برانگیزتر است، مگر آن‌که شباهت هندسی سامانه و شدت بازچرخانی گازهای دودکش (FGR) با دقت بسیار بالا حفظ شوند. این یافته اهمیت نقش FGR و طراحی صحیح هندسی را در تضمین عملکرد پایدار سامانه‌های مقیاس شده برجسته می‌کند.

نقشه‌های کانتور دما، CO و NO (شکل‌های ۸ تا ۱۰) نشان می‌دهند که هرچند روش مقیاس گذاری شده توانسته است عملکرد بدون شعله را حفظ کند، اما تا حد امکان ساختارهای داخلی شعله را نیز بازتولید می‌نماید. در این روش، دو عامل کلیدی (هدایت حرارتی و نسبت‌های هندسی) به کار گرفته شده‌اند که به صورت هم‌زمان، کوپلینگ انتقال حرارت رسانشی و جابجایی را تقویت می‌کنند. افزایش نسبت ارتفاع محفظه به قطر، همراه با مقیاس گذاری کاهش نازل، موجب افزایش سرعت جت و ایجاد مسیره‌های اختلاط طولانی‌تر می‌شود. از سوی دیگر، هدایت حرارتی حساس به دما، انتشار هموارتر حرارت را در نواحی دمای بالا تضمین می‌کند. ترکیب این دو اثر، نرخ‌های واکنش را در حجم گسترده‌تری توزیع کرده و یک ساختار شعله با شدت پایین و سینتیک تعدیل شده ایجاد می‌کند. به این ترتیب، در رژیم احتراق بدون شعله، این روش نه تنها به حذف جبهه شعله کمک می‌کند، بلکه توپولوژی ناحیه واکنش را نیز بهینه‌سازی کرده و کاهش آلاینده‌ها را با اکسیداسیون کارآمد گازهای واکنش ندیده هم‌راستا می‌سازد.

یکی از ویژگی‌های قابل توجه در تمامی مدل‌ها، تجمع محسوس NO در گوشه بالایی سمت چپ کوره است (شکل ۱۰). برای تبیین این رفتار، شکل ۱۱ خطوط جریان را نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که ناحیه مشخص شده با مربع خط‌چین، تراکم بسیار کمی از خطوط جریان دارد. این کاهش تراکم بیانگر ضعف در بازچرخانی گازها است. بازچرخانی ضعیف محصولات احتراق در این ناحیه، فرایندهای رقیق‌سازی محلی و پیش‌گرمایش را محدود می‌کند و در نتیجه دماهای بالاتری ایجاد می‌شود؛ شرایطی که بروز تشکیل NO را تسهیل می‌کند. این پدیده عمدتاً ناشی از ناکارآمدی بازچرخانی و کنترل حرارتی در نواحی پیرامونی محفظه است. با وجود این، روش پیشنهادی متعادل‌ترین الگوی بازچرخانی را میان مدل‌ها ارائه می‌دهد. این الگو قادر است پیک‌های حرارتی را به طور مؤثری کاهش داده و در نتیجه، تولید NO را در سطح بسیار پایین‌تری نگه دارد. این تحلیل بار دیگر بر اهمیت حیاتی طراحی بهینه سیستم بازچرخانی گازهای احتراق در کاهش آلاینده‌ها، به‌ویژه تحت شرایط رژیم بدون شعله، تأکید می‌کند.

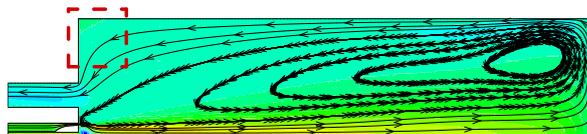


Figure 11- Streamlines within the combustion chamber illustrating their effect on recirculation and mixing

شکل ۱۱- خطوط جریان میدان احتراق و تاثیر آن بر بازچرخانی و اختلاط داخل کوره

تحلیل بازچرخانی گازهای احتراق (FGR)

شکل ۱۲ پروفایل‌های بازچرخانی گازهای احتراق را بین کوره آزمایشگاهی و کوره‌ی مقیاس گذاری شده صنعتی، که برحسب طول کوره نرمالایز شده (x/l) ، مقایسه می‌کند. بازچرخانی داخلی، همانطور که توسط وونینگ [۴۲] پیشنهاد شده است، به صورت نسبت دبی جرمی بازچرخانی شده (\dot{m}_r) به کل دبی جرمی ورودی $(\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air})$ تعریف می‌شود:

$$FGR = \dot{m}_r / (\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air}) \quad (28)$$

FGR نقشی حیاتی در حفظ احتراق بدون شعله ایفا می‌کند؛ با ورود مجدد گازهای خروجی با دمای بالا به ناحیه واکنش، پیک‌های دمای موضعی را کاهش داده و توزیع حرارت یکنواخت را ممکن می‌سازد. با افزایش توان ورودی کوره، میزان بازچرخانی داخلی به طور متناسب رشد می‌کند و منجر به یک محیط احتراق همگن‌تر می‌شود. این بهبود به گسترش ناحیه واکنش کمک کرده و استقرار رژیم بدون شعله را تسریع می‌بخشد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، روش مقیاس‌گذاری شده به بالاترین سطوح FGR در سراسر محفظه دست می‌یابد. مقدار بازچرخانی بیشینه در این مدل در نزدیکی سقف کوره به $11/76$ می‌رسد، که به طور قابل توجهی بالاتر از مقدار متناظر $1/8$ مشاهده شده در مدل آزمایشگاهی است. این الگوی بازچرخانی بهبودیافته مستقیماً با عملکرد برتر این روش در پیش‌بینی دما و غلظت آلاینده‌ها ارتباط دارد. این یافته‌ها بر اهمیت نقش بازچرخانی مناسب در طول مقیاس‌گذاری تأکید می‌کند، زیرا به طور چشمگیری بر یکنواختی حرارتی، کاهش آلاینده‌ها و پایداری رژیم در پیکربندی‌های احتراق تأثیر می‌گذارد.

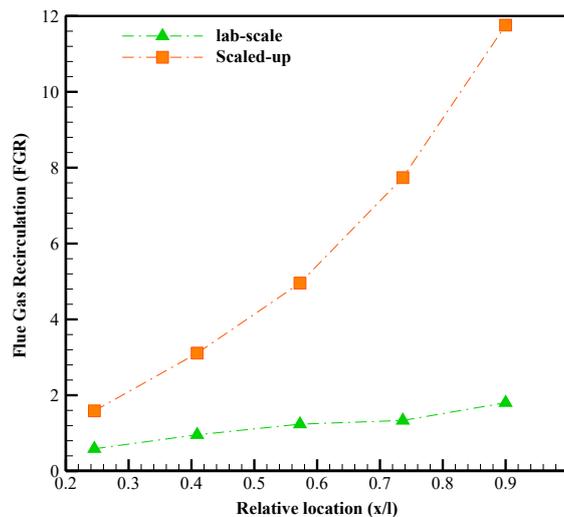


Figure 12- Comparison of flue-gas recirculation (FGR) profiles between the laboratory-scale and industrial-scale furnaces along the normalized axial direction

شکل ۱۲- مقایسه پروفایل‌های بازچرخانی گازهای داغ بین کوره آزمایشگاهی و کوره صنعتی در امتداد طول کوره

برهم‌کنش‌های آشفته‌گی-شیمی: ارزیابی اعداد Re_t و Da

یکی از اهداف کلیدی در مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراق، حفظ رژیم احتراق توزیع‌شده است که با میدان‌های دمایی یکنواخت و حذف اثر جبهه‌های شعله مشخص می‌شود. برای ارزیابی اثربخشی روش‌های مقیاس‌گذاری در نگهداری این شرایط، عدد رینولدز توربولانسی (Re_t)، عدد دامکوهلر (Da) و حاصل‌ضرب آن‌ها ($Re_t \times Da$) برای دوهندسه آزمایشگاهی و مقیاس‌شده صنعتی تحلیل شدند، که نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- عدد رینولدز توربولانسی (Re_t)، عدد دامکوهلر (Da) و حاصل‌ضرب آن‌ها ($Re_t \times Da$) برای کوره‌های آزمایشگاهی و

مقیاس‌گذاری شده صنعتی

Table 8- Turbulent Reynolds number (Re_t), Damköhler number (Da), and their product ($Re_t \times Da$) for the laboratory-scale and industrial scaled-up furnaces

Approaches	Re_t	Da	$Re_t \times Da$
Lab-scale	200.814	0.054	10.844
Scaled-up	10984.558	0.001	10.985

به خوبی مشخص شده است که اعداد رینولدز توربولانسی بالاتر، اختلاط و بازچرخانی داخلی را افزایش می‌دهد، در حالی که اعداد دامکوهلر پایین‌تر، تأخیر در اشتعال را طولانی‌تر می‌کند. هر دو این عوامل، ایجاد احتراق بدون شعله را تسهیل

می‌کنند [۳۸]. حاصل ضرب $Re_t \times Da$ به عنوان یک شاخص دینامیک برای تعادل بین مقیاس‌های زمانی جریان و واکنش شیمیایی، پیشنهاد شده است که یک عامل حیاتی برای حفظ احتراق توزیع شده است [۴۱، ۴۳]. همانطور که مشهود است، روش بکاربرده شده در مقیاس گذاری، نزدیک‌ترین مقدار $Re_t \times Da$ (۱۰/۹۸۵) را نسبت به کوره آزمایشگاهی (۱۰/۸۴۴) نشان می‌دهد. این شباهت حاکی از آن است که روش مقیاس گذاری پیشنهادی برهم کنش میان مقیاس‌های زمانی اختلاط توربولانسی و شیمیایی کوره آزمایشگاهی را به بهترین شکل بازتولید می‌کند. علاوه بر این، Re_t بالای آن (۱۰۹۸۴/۵۵۸) از بازچرخانی داخلی بالا پشتیبانی می‌کند، در حالی که Da پایین (۰/۰۰۱) نشان‌دهنده تأخیر مؤثر در شروع واکنش است. هر دوی این عوامل به حفظ ویژگی‌های احتراق بدون شعله در مقیاس بزرگتر کمک می‌کنند. نتایج این بخش نشان می‌دهد که روش ابداعی به منسجم‌ترین مقیاس گذاری فیزیکی دست می‌یابد و یک استراتژی قابل اطمینان برای انتقال عملکرد مقیاس آزمایشگاهی به طراحی‌های صنعتی بدون تغییر در رژیم احتراق ارائه می‌دهد.

ارزیابی بازده انرژی و انرژی

در این بخش، عملکرد سامانه احتراق با استفاده از دو بازده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ بازده حرارتی مبتنی بر قانون اول ترمودینامیک، نسبتی از انرژی شیمیایی ورودی را بیان می‌کند که به گرمای مفید تبدیل شده است. در مقابل، بازده انرژی بر پایه قانون دوم ترمودینامیک تعریف می‌شود و تلفات ناشی از برگشت‌ناپذیری فرایندها را در نظر گرفته و میزان بهره‌وری سامانه از پتانسیل انرژی موجود در سوخت را نشان می‌دهد. ترکیب این دو شاخص، یک چارچوب ارزیابی جامع و دقیق را برای سنجش عملکرد ترمودینامیکی کوره‌های مقیاس گذاری شده فراهم می‌کند. راندمان انرژی کوره را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\eta_{energy} = (1 - lost/input) \times 100 \quad (29)$$

در این تحلیل، عبارت $lost$ بیانگر بخشی از حرارت است که به‌طور مؤثر در محفظه احتراق بازیابی نمی‌شود. این مقدار عمدتاً شامل آنتالپی خارج شده توسط گازهای دودکش (H_{outlet}) و نیز حرارت رسانشی و تشعشعی است که مطابق با معادله (۳۰) از طریق دیواره‌ها و لایه‌های عایق تلف می‌شود (Q_j).

$$lost = H_{outlet} + Q_{inlet} + Q_{left} + Q_{roof} + Q_{floor} \quad (30)$$

با توجه به اینکه دیواره دودکش عایق است ($Q_{outlet} = 0$)، هیچ انتقال حرارتی از طریق این مرز رخ نمی‌دهد و بنابراین از معادله (۳۰) حذف می‌شود.

راندمان انرژی سامانه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۴۴]:

$$\eta_{exergy} = \{1 - [T_0 S_{gen} / [(H_{outlet} - H_{fuel} - H_{oxidizer}) - T_0 (S_{outlet} - S_{fuel} - S_{oxidizer})]]\} \times 100 \quad (31)$$

عبارت تولید آنتروپی (S_{gen}) از قانون دوم ترمودینامیک محاسبه می‌شود [۵۱]:

$$S_{fuel} + S_{oxidizer} - S_{outlet} + \sum Q_j/T_j + S_{gen} = 0 \quad (32)$$

$$\sum Q_j/T_j = (Q_{inlet}/T_{inlet}) + (Q_{left}/T_{left}) + (Q_{roof}/T_{roof}) + (Q_{floor}/T_{floor}) \quad (33)$$

علاوه بر این، آنتالپی کل (H) که در معادلات (۳۰) و (۳۱) به کار رفته است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H_i = \dot{m}_i (h_i + V_i^2/2) \quad (34)$$

شکل ۱۳ بازده انرژی (میله‌های نارنجی) و بازده انرژی (میله‌های سبز) را برای کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس گذاری شده صنعتی مقایسه می‌کند. یک نکته برجسته آن است که هم در کوره آزمایشگاهی و هم در کوره مقیاس گذاری پیشنهادی، مقدار بازده انرژی بالاتر از بازده انرژی است؛ رفتاری که کاملاً با اصول بنیادین ترمودینامیک سازگار است. این وضعیت نشان می‌دهد که کنترل بهتر برگشت‌ناپذیری‌ها در رژیم احتراق توزیع شده، بهره‌گیری مؤثر از پتانسیل انرژی موجود در سوخت را افزایش می‌دهد [۴۴].

از نظر کمی، کوره آزمایشگاهی و روش مقیاس گذاری پیشنهادی به ترتیب به بازده های انرژی ۴۵ درصد و ۴۷ درصد دست می یابند و بازده انرژی آنها نیز به ترتیب ۶۸ درصد و ۷۰ درصد محاسبه می شود. این هم خوانی چشمگیر نشان می دهد که روش مقیاس گذاری نه تنها رژیم احتراق توزیع شده را حفظ می کند، بلکه بازده قانون اول و دوم ترمودینامیک کوره آزمایشگاهی را نیز در مقیاس صنعتی با دقت بسیار بالا باز تولید می نماید. اهمیت این نتیجه در آن است که تحلیل انرژی، به عنوان معیاری دقیق تر و از نظر فیزیکی معنادارتر برای سنجش عملکرد سامانه های احتراقی شناخته می شود [۴۵،۴۶]. موضوعی که مناسب بودن این رویکرد را به عنوان گزینه برتر مقیاس گذاری تأیید می کند که این روش قادر است رفتار ترمودینامیکی احتراق توزیع شده را، و نه صرفاً موازنه حرارتی آن، با دقت باز تولید کند. چنین انطباقی، پایه ای قابل اعتماد برای مقیاس گذاری سامانه های احتراق بدون شعله به مقیاس صنعتی را فراهم می سازد، بدون آن که عملکرد مبتنی بر قانون اول یا قانون دوم ترمودینامیک دچار افت شود.

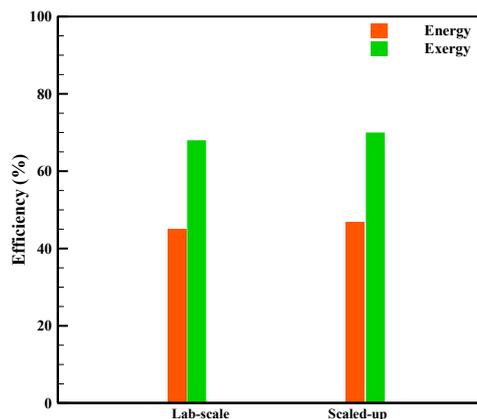


Figure 13- Comparison of energy (orange bars) and exergy (green bars) efficiencies for the laboratory-scale and industrial furnaces
 شکل ۱۳- مقایسه بازده های انرژی (میله های نارنجی) و انرژی (میله های سبز) برای کوره های آزمایشگاهی و صنعتی

به طور خلاصه، تحلیل مقیاسه ای میدان دما، توزیع آلاینده ها، الگوهای خطوط جریان، پروفایل های باز چرخانی داخلی، اعداد رینولدز و دامکوهلر توربولانسی، و همچنین راندمان های انرژی-انرژی-انرژی در روش مقیاس گذاری ارائه شده نشان می دهد که این روش قادر است ضمن اینکه رژیم احتراق بدون شعله را در گذار از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی با موفقیت حفظ کند، یکنواختی دما را بهبود بخشد، انتشار CO و NO را به حداقل می رساند و شدت باز چرخانی داخلی گازهای احتراق (FGR) را افزایش می دهد. این برتری عمدتاً ناشی از حفظ مطلوب پروفایل های سرعت و هندسه نازل در این روش است که در کنار یکدیگر، اختلاط مؤثر سوخت و هوا و آزادسازی حرارت به صورت توزیع شده را تضمین می کنند. علاوه بر این، ارزیابی اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر تأیید می کند که روش ارائه شده به نزدیک ترین مقدار $Re_i \times Da$ به معیار آزمایشگاهی دست می یابد و بدین ترتیب تعادل صحیح میان مقیاس های زمانی اختلاط و شیمیایی را باز تولید می کند.

این یافته ها تأیید می کنند که روش مقیاس گذاری مبتنی بر تحلیل بدون بُعد، در ترکیب با طراحی آگاهانه ساختارهای جریان و باز چرخانی، برای دستیابی به پایداری رژیم در سامانه های احتراق بدون شعله مقیاس گذاری شده، ضروری است. به طور کلی، نتایج نشان می دهند که حفظ احتراق بدون شعله در فرایند مقیاس گذاری به طور حیاتی به سه عامل حاکم بستگی دارد:

۱. دستیابی به FGR کافی از طریق تناسب قطر به طول، و بدین ترتیب حفظ زمان ماند و افزایش شدت باز چرخانی.

۲. حفظ اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر در محدوده های پایدار برای ایجاد تعادل در برهم کنش های اغتشاش-شیمی.

شیمی.

۳. تضمین یکنواختی حرارتی، برای مهار ایجاد گرادیان در جبهه های موضعی شعله.

در حالی که روش های تجربی مرسوم اغلب این پارامترها را نادیده می گیرند، چارچوب پیشنهادی π -باکینگهام به طور ذاتی آن ها را حفظ می کند که عملکرد برتر روش ارائه شده را توضیح می دهد. مجموع بهبودهای کمی از جمله کاهش ۳۶ درصدی

در ضخامت ناحیه واکنش، افزایش بیش از شش برابری در نرخ FGR، و حفظ راندمان قانون اول و دوم ترمودینامیک عملکرد برتر این روش در مقیاس گذاری را اعتبارسنجی می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک چارچوب نوآورانه و مبتنی بر اصول فیزیکی برای مقیاس گذاری کوره‌های احتراق بدون شعله از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی ارائه شد. این چارچوب با تعریف مجموعه‌ای از متغیرهای کلیدی و استخراج شش عدد بدون بُعد مستقل توانست شرایط لازم برای حفظ رژیم احتراق توزیع شده را در ابعاد مختلف تضمین کند. به طور خلاصه، تحلیل مقایسه‌ای میدان دما، توزیع آلاینده‌ها، الگوهای خطوط جریان، پروفایل‌های بازچرخانی داخلی، اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر و همچنین بازده‌های انرژی-اگرژی در روش مقیاس گذاری ارائه شده نشان می‌دهد که این روش قادر است ضمن اینکه رژیم احتراق بدون شعله را در گذار از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی با موفقیت حفظ کند، یکنواختی دما را بهبود بخشیده، توزیع دمای میانگین و بیشینه را با اختلاف کمتر از ۲٪ پیش‌بینی نموده، انتشار CO و NO را در محدوده مجاز استاندارد آلاینده‌ها EPA به حداقل رسانده و شدت بازچرخانی داخلی گازهای احتراق (FGR) را بیش از شش برابر افزایش می‌دهد. همچنین کاهش ۳۶٪ در ضخامت ناحیه واکنش و حفظ بازده قانون اول و دوم ترمودینامیک، عملکرد برتر این روش در مقیاس گذاری را اعتبارسنجی می‌کند. این برتری عمدتاً ناشی از حفظ مطلوب پروفایل‌های سرعت و هندسه نازل در این روش است که در کنار یکدیگر، اختلاط مؤثر سوخت و هوا و آزادسازی حرارت را به صورت توزیع شده تضمین می‌کند. علاوه بر این، ارزیابی اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر تأیید می‌کند که روش مقیاس گذاری ارائه شده به نزدیک‌ترین مقدار $Re_t \times Da$ در کوره آزمایشگاهی دست می‌یابد و بدین ترتیب تعادل صحیح میان مقیاس‌های زمانی اختلاط و شیمیایی را بازتولید می‌کند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که روش مقیاس گذاری مبتنی بر تحلیل بدون بُعد، در ترکیب با طراحی آگاهانه ساختارهای جریان و بازچرخانی، برای دستیابی به پایداری رژیم در سامانه‌های احتراق بدون شعله، ضروری است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که حفظ احتراق بدون شعله در فرایند مقیاس گذاری به طور حیاتی به سه عامل کلیدی بستگی دارد:

۱. دستیابی به FGR کافی از طریق تناسب قطر به طول و بدین ترتیب حفظ زمان ماند و افزایش شدت بازچرخانی.
 ۲. حفظ اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر در محدوده‌های پایدار برای ایجاد تعادل در برهم کنش‌های آشفستگی-شیمی.
 ۳. تضمین یکنواختی حرارتی برای مهار ایجاد گرادیان در جبهه‌های موضعی شعله.
- در حالی که روش‌های تجربی مرسوم اغلب این پارامترها را نادیده می‌گیرند، چارچوب پیشنهادی به طور ذاتی آن‌ها را حفظ کرده که عملکرد برتر این روش را توضیح می‌دهد. در مجموع، چارچوب ارائه شده ابزاری قدرتمند و قابل اتکا برای طراحی و توسعه کوره‌های صنعتی کم‌آلاینده و پایدار در رژیم احتراق بدون شعله بوده و می‌تواند پایه‌ای برای گسترش فناوری‌های پاک و کارآمد در کاربردهای صنعتی آینده فراهم آورد.

منابع

- [1] S. Sharma, R. Kumar, A. Chowdhury, Y. Yoon, and S. Kumar, "On the effect of spray parameters on CO and NOx emissions in a liquid fuel fired flameless combustor," *Fuel*, vol. 199, pp. 229–238, 2017.
- [2] K.-P. Cheong, G. Wang, J. Si, and J. Mi, "Nonpremixed MILD combustion in a laboratory-scale cylindrical furnace: Occurrence and identification," *Energy*, vol. 216, p. 119295, 2021.
- [3] J. Tian, X. Liu, H. Shi, Y. Yao, Zh. Ni, K. Meng, P. Hu, and Q. Lin, "Experimental study on MILD combustion of methane under non-preheated condition in a swirl combustion furnace," *Appl. Energy*, vol. 363, p. 123109, 2024.
- [4] S. Zhou, X. Zhu, B. Yan, Q. Gao, G. Chen, and B. Li, "Role of a hot coflow on establishment of MILD combustion of biomass gasified gas," *Fuel*, vol. 314, p. 123142, 2022.
- [5] H. M. Gad, A. M. Salman, T. M. Farag, and I. A. Ibrahim, "Gaseous fuel diffusion flame with low oxygen concentrations," *Results Eng.*, vol. 19, p. 101359, 2023.
- [6] S. Zhou et al., "MILD combustion of low calorific value gases," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 104, p.

- 101163, 2024.
- [7] J. Mi, P. Li, B. B. Dally, and R. A. Craig, "Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace," *Energy & Fuels*, vol. 23, no. 11, pp. 5349–5356, 2009.
- [8] J. Mi, P. Li, F. Wang, K.-P. Cheong, and G. Wang, "Review on MILD combustion of gaseous fuel: its definition, ignition, evolution, and emissions," *Energy & Fuels*, vol. 35, no. 9, pp. 7572–7607, 2021.
- [9] D. He, Y. Yu, Y. Kuang, and C. Wang, "Analysis of EDC constants for predictions of methane MILD combustion," *Fuel*, vol. 324, p. 124542, 2022.
- [10] E. Drubetskoi, S. Eckart, and H. Krause, "Short overview on combustion systems scale-up with emphasis on NO_x emissions of gas-fired furnaces," *Energy Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 621–629, 2022.
- [11] C. Meraner, T. Li, M. Ditaranto, and T. Løvås, "Effects of scaling laws on the combustion and NO_x characteristics of hydrogen burners," *Combust. Flame*, vol. 214, pp. 407–418, 2020.
- [12] A. Mardani and A. Nazari, "Dynamic adjustment of the Eddy Dissipation Concept model for turbulent/combustion interactions in mixed combustion regimes," *Combust. Flame*, vol. 241, p. 111873, 2022.
- [13] D. B. Spalding, H. C. Hottel, S. L. Bragg, A. H. Lefebvre, D. G. Shepherd, and A. C. Scurlack, "The art of partial modeling," in Symposium (International) on Combustion, Elsevier, 1963, pp. 833–843.
- [14] Di Nardo, A., Giacomazzi, E., Cimini, M., Troiani, G., Scaccia, S., Calchetti, G., and Cecere, D. "Development of a Low-NO_x Fuel-Flexible and Scalable Burner for Gas Turbines.," *Energies (19961073)*, vol. 18, no. 7, 2025.
- [15] S. Pramanik and R. V Ravikrishna, "Investigation of novel scaling criteria on a reverse-flow combustor," *Energy*, vol. 206, p. 118156, 2020.
- [16] S. Kumar, P. J. Paul, and H. S. Mukunda, "Investigations of the scaling criteria for a mild combustion burner," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30, no. 2, pp. 2613–2621, 2005.
- [17] G. Barroso, T. Nussbaumer, M. Ulrich, T. Reiterer, and S. Feldmeier, "Scale-up methodology for automatic biomass furnaces," *J. Energy Inst.*, vol. 93, no. 2, pp. 591–604, 2020.
- [18] J. A. Cole, T. P. Parr, N. C. Widmer, K. J. Wilson, K. C. Schadow, and W. M. R. Seeker, "Scaling criteria for the development of an acoustically stabilized dump combustor," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 28, no. 1, pp. 1297–1304, 2000.
- [19] K. Asimakopoulos, M. Kaufmann-Elfang, Ch. Lundholm-Höffner, N. B.K. Rasmussen, A. Grimalt-Aleman, H. N. Gavala, and I. V. Skiadas, "Scale up study of a thermophilic trickle bed reactor performing syngas biomethanation," *Appl. Energy*, vol. 290, p. 116771, 2021.
- [20] N. Ellis and A. Mahecha-Botero, "Scale-up of fluidized beds," *Essentials Fluid. Technol.*, pp. 405–429, 2020.
- [21] P. M. Witt and D. A. Hickman, "Fluidized-bed reactor scale-up: Reaction kinetics required.," *AIChE J.*, vol. 68, no. 9, 2022.
- [22] J. Koornneef, M. Junginger, and A. Faaij, "Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 33, no. 1, pp. 19–55, 2007.
- [23] R. A. Cocco and J. W. Chew, "Fluidized bed scale-up for sustainability challenges. 1. tomorrow's tools," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 63, no. 6, pp. 2519–2533, 2024.
- [24] Y. Cui, W. Zhong, X. Liu, and J. Xiang, "Study on scale-up characteristics in supercritical CO₂ circulating fluidized bed boiler by 3D CFD simulation," *Powder Technol.*, vol. 394, pp. 103–119, 2021.
- [25] R. Chaiyo, J. Wongwiwat, and Y. Sukjai, "Numerical and Experimental Investigation on Combustion Characteristics and Pollutant Emissions of Pulverized Coal and Biomass Co-Firing in a 500 kW Burner," *Fuels*, vol. 6, no. 1, p. 9, 2025.
- [26] J. M. Beer, "Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 26, no. 4–6, pp. 301–327, 2000.
- [27] M. Richter, J. Ströhle, and B. Eppe, "Up-scaling of a laboratory-scale pulverised oxyfuel burner to semi-industrial-scale through a flow similarity approach," *Fuel*, vol. 371, p. 131809, 2024.
- [28] G. Zhao, Ch. Zhao, F. Li, G. Ma, M. Liu, Y. Yang, H. Wang, and M. Sun, "On scale effect of supersonic combustion in axisymmetric combustor," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 155, p. 109566, 2024.
- [29] D. McCormick, L. S. Hultgren, and J. M. Mendoza, "Impact of future low-emissions combustor technology on acoustic scaling laws," *J. Propuls. Power*, vol. 40, no. 6, pp. 806–817, 2024.
- [30] J. Berger, "Scaling of an aviation hydrogen micromix injector design for industrial GT combustion applications," *Aerotec. Missili Spaz.*, vol. 100, no. 3, pp. 239–251, 2021.
- [31] W. Xie, T. Shi, B. Ge, and S. Zang, "Numerical study on similarity performance of geometric scaling of lean premixed swirl combustor," *Phys. Fluids*, vol. 35, no. 9, 2023.
- [32] B. K. Dutta, *Heat transfer: principles and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2023.
- [33] G. G. Szegő, B. B. Dally, G. J. Nathan, and F. Christo, "Performance characteristics of a 20kW MILD

- combustion furnace,” 2007.
- [34] G. Khabbazian, J. Aminian, and R. H. Khoshkhoo, “Experimental and numerical investigation of MILD combustion in a pilot-scale water heater,” *Energy*, vol. 239, p. 121888, 2022.
- [35] S. Xu, Y. Tu, P. Huang, C. Luan, Z. Wang, B. Shi, H. Liu, and Z. Liu, “Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-preheated air,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, p. 115282, 2020.
- [36] Q. Cazerres, P. Pepiot, E. Riber, and B. Cuenot, “A fully automatic procedure for the analytical reduction of chemical kinetics mechanisms for computational fluid dynamics applications,” *Fuel*, vol. 303, p. 121247, 2021.
- [37] P. J. Roache, “Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies,” 1994.
- [38] A. Cavaliere and M. De Joannon, “Mild combustion,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 329–366, 2004.
- [39] S. Kumar, P. J. Paul, and H. S. Mukunda, “Studies on a new high-intensity low-emission burner,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 29, no. 1, pp. 1131–1137, 2002.
- [40] A. Ortolani, J. Yeadon, B. Ruane, M. C. Paul, and M. S. Campobasso, “Numerical and experimental analysis of the formation of nitrogen oxides in a non-premixed industrial gas burner,” *Results Eng.*, vol. 23, p. 102392, 2024.
- [41] D. B. Proud, M. J. Evans, Q. N. Chan, and P. R. Medwell, “Characteristics of turbulent flames in a confined and pressurised jet-in-hot-coflow combustor,” *J. Energy Inst.*, vol. 105, pp. 103–113, 2022.
- [42] J. A. Wüning and J. G. Wüning, “Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation,” *Prog. energy Combust. Sci.*, vol. 23, no. 1, pp. 81–94, 1997.
- [43] M. Yan, J. Wang, D. Hantoko, and E. Kanchanatip, “Numerical investigation of MSW combustion influenced by air preheating in a full-scale moving grate incinerator,” *Fuel*, vol. 285, p. 119193, 2021.
- [44] A. Bejan, “Advanced engineering thermodynamics”. John Wiley & Sons, 2016.
- [45] R. Hassan, H. Barua, and B. K. Das, “Energy, exergy, exergo-environmental, and exergetic sustainability analyses of a gas engine-based CHP system,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 9, no. 12, pp. 2232–2251, 2021.
- [46] L. Zhou, Jianwei. Hang, Ling. Bai, Zbigniew. Krzemianowski, Mahmoud A. El-Emam, Eman. Yasser, and Ramesh. Agarwal, “Application of entropy production theory for energy losses and other investigation in pumps and turbines: A review,” *Appl. Energy*, vol. 318, p. 119211, 2022.