

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

Mohamad-Amin Zamani<sup>1</sup>, Alireza Asgharzadeh Karamshahlu<sup>2</sup>, Mohammad Hassan Saidi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [zamani.m\\_amin@mech.sharif.edu](mailto:zamani.m_amin@mech.sharif.edu)

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [alireza\\_asgharzadeh@mech.sharif.edu](mailto:alireza_asgharzadeh@mech.sharif.edu)

<sup>3</sup> **Corresponding author**, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [saman@sharif.edu](mailto: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  $\pi$ -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<sub>x</sub>/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.% O<sub>2</sub> [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<sub>x</sub>.

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- $\pi$ -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], [ $\theta$ ]. By the Buckingham  $\pi$  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), 42-73. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.562641.1450> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



independent dimensionless groups ( $\pi_0$  to  $\pi_5$ ); 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,  $\pi_4$  and  $\pi_5$  are explicitly linked to  $\dot{q}'''$ . Conceptually,  $\pi_4$  captures the relationship between volumetric heat release and temperature rise, whereas  $\pi_5$  quantifies how the same volumetric heat release is balanced by heat transfer (conduction/convection) to the walls.

To make  $\pi_5$  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  $\pi_5$  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  $\pi$ -groups  $\pi_0$ – $\pi_5$  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.

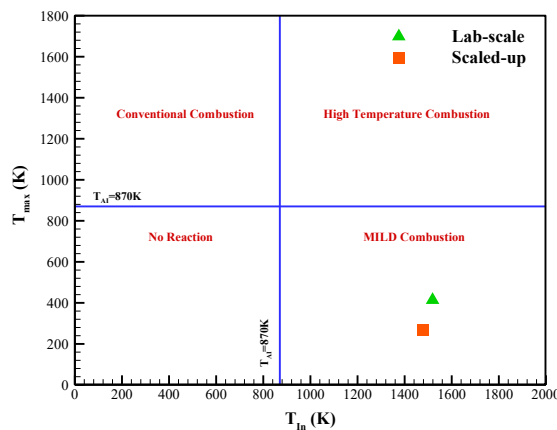


Figure 1. Cavaliere criterion [8] for identifying and comparing combustion regimes

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.

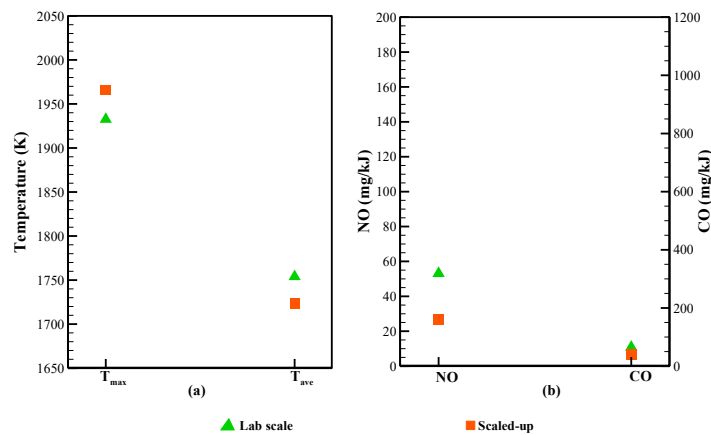


Figure 2. Comparison of key performance indicators between the laboratory-scale and industrial scaled-up furnaces: (a) maximum and average temperatures, and (b) NO and CO emissions

## 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<sup>۱</sup>، علیرضا اصغرزاده کرماشاهلو<sup>۲</sup>، محمدحسن سعیدی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، [zamani.m\\_amin@mech.sharif.edu](mailto:zamani.m_amin@mech.sharif.edu)

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، [alireza\\_asgharzadeh@mech.sharif.edu](mailto:alireza_asgharzadeh@mech.sharif.edu)

<sup>۳</sup> نویسنده مخاطب، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، [saman@sharif.edu](mailto: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 $\pi$ -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 $Re_i$ 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 بازده ها 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<sup>۱</sup> 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

<sup>۱</sup> 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), 42-73. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.562641.1450> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



رژیم می تواند هم در سامانه های پیش مخلوط<sup>۱</sup> و هم غیرپیش مخلوط<sup>۲</sup> شکل بگیرد.

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

۱. پیش گرمایش واکنش دهنده ها (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  $\Delta T$  همان دمای احتراق یا اختلاف دمای بین واکنش دهنده ها و فرآورده ها 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 تعیین کننده است [۳].

۲. رقیق سازی غلظت اکسیژن موجود در اکسنده به زیر ۱۰ درصد حجمی [۵].

۳. اختلاط کامل سوخت و اکسنده به گونه ای که از تشکیل نواحی موضعی از سوخت نسوخته یا هوای اضافی جلوگیری شود [۶].

پژوهش های پیشین نشان می دهند که بازچرخانی گازهای حاصل از احتراق<sup>۳</sup> نقش اساسی و تعیین کننده ای در شکل گیری رژیم احتراق بدون شعله دارد [۸،۷]. این فرآیند به طور هم زمان موجب پیش گرمایش واکنش دهنده ها، رقیق سازی غلظت اکسیژن و ایجاد شرایط مناسب برای اختلاط کامل و یکنواخت سوخت و هوا می شود. در چنین حالتی، به جای آن که واکنش احتراقی به صورت موضعی میان سوخت و هوا اتفاق بیفتد، یک احتراق گسترده و توزیع شده در محفظه احتراق شکل می گیرد که در آن مخلوطی از سوخت، هوا و بخشی از محصولات نسوخته احتراق حضور دارند. این سازوکار نه تنها زمان ماند<sup>۴</sup> احتراق را افزایش می دهد، بلکه امکان بازیافت مؤثر انرژی حرارتی موجود در این گازها را نیز فراهم می سازد [۹]. بنابراین، بازچرخانی مناسب گازهای حاصل از احتراق می تواند به عنوان یکی از عوامل حیاتی در برآورد سه شرط اساسی لازم برای احتراق بدون شعله تلقی شود. با توجه به نقش تعیین کننده بازچرخانی در پایداری این رژیم و ایجاد شرایط واکنشی یکنواخت، توسعه روش های مقیاس گذاری که بتوانند این ویژگی های کلیدی را در گذار از کوره های آزمایشگاهی به مقیاس های بزرگ تر حفظ کنند، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

متخصصان تاکنون روش های مقیاس گذاری متنوعی از نمونه های آزمایشگاهی به سامانه های صنعتی یا نیمه صنعتی پیشنهاد داده اند که هدف اصلی آن ها، انطباق ویژگی های اساسی احتراق از جمله دینامیک سیالات، انتقال حرارت و جرم و سینتیک ترموشیمیایی بوده است [۱۰،۱۱]. مقیاس گذاری صحیح موجب می شود شاخص های عملکردی اصلی سامانه، مانند یکنواختی میدان دما، سطح انتشار آلاینده های نظیر  $NO_x$  و  $CO$ ، ساختار شعله و کیفیت اختلاط، در مقیاس صنعتی نیز همانند مقیاس آزمایشگاهی حفظ شود [۱۰]. اهمیت این موضوع در سامانه های احتراق بدون شعله دوچندان است، زیرا حتی انحرافی اندک در توزیع حرارتی یا غلظت محلی اکسنده می تواند سامانه را از رژیم واکنش توزیع شده خارج کرده و شرایط احتراق معمولی را ایجاد کند [۱۲].

برای مواجهه با این چالش، روش های متعددی برای مقیاس گذاری پیشنهاد شده اند که در میان آن ها، فرمول بندی اسپالدینگ [۱۳] جامع ترین و شناخته شده ترین چارچوب محسوب می شود. چارچوب تعمیم یافته اسپالدینگ، یک ساختار نظام مند برای مقیاس گذاری سامانه های احتراقی، شامل مشعل ها، کوره ها، بویلرها و تجهیزات وابسته، در ابعاد و شرایط عملیاتی مختلف فراهم می کند [۱۳]. این رویکرد مجموعه ای از اعداد بدون بُعد را در قالب یک ماتریس بالامثلثی معرفی می کند که چهارده پدیده فیزیکی اصلی مرتبط با احتراق، نظیر انتقال حرارت، انتقال جرم، انتقال تکانه و سینتیک واکنش را دربرمی گیرد.

<sup>1</sup> Premixed

<sup>2</sup> Non-premixed

<sup>3</sup> Flue gas recirculation (FGR)

<sup>4</sup> 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 بدون بُعد 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 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،  $\rho_{fuel}$  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 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 به صورت 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  $\tau$  در فرآیند مقیاس‌گذاری ثابت نگه داشته می‌شود. با اعمال شرط ( $\tau = \text{constant}$ ) در معادله (۳)، رابطه ساده‌شده زیر به دست می‌آید:

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

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<sup>۱</sup> [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<sup>۲</sup> [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 مقیاس‌هندسی ( $s = d_2/d_1$ )، نسبت‌های سرعت ( $V_2/V_1$ )، زمان ماند ( $\tau$ ) 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 $V = V_2/V_1$	$\tau$	$\dot{q}'''$
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	$\dot{Q}^{1/4}$	$\dot{Q}^{1/2}$	$\dot{Q}^{-1/4}$	$\dot{Q}^{1/4}$

<sup>1</sup> Cole method

<sup>2</sup> Kumar method

Kumar	$\dot{Q}^{1/3}$	100 m/s	$\dot{Q}^{1/3}$	Constant
-------	-----------------	---------	-----------------	----------

علی‌رغم انجام پژوهش‌های گسترده در حوزه مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراقی، از جمله کوره‌های زیست‌توده [۱۷، ۱۹]، راکتورهای بستر سیال‌سان [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  $\pi$ -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  $\pi$ -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 آشفته‌گی-شیمی از طریق اعداد رینولدز آشفته و دامکوهلر، و در نهایت ارزیابی بازده‌های انرژی و انرژی‌های دودکش 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، پایداری 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> و هم غیر پیش‌مخلوط<sup>۳</sup> شکل بگیرد.

<sup>1</sup> Flameless combustion

<sup>2</sup> Premixed

<sup>3</sup> Non-premixed

برای دستیابی به شرایط پایدار احتراق بدون شعله، رعایت مراحل زیر ضروری است:  
 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  $\Delta T$  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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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

<sup>1</sup> Flue gas recirculation (FGR)

<sup>2</sup> Residence time

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 بدون بُعد، اغلب کاربرد عملی آن را دشوار می‌کند. از این رو، 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]:

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

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

در روابط فوق،  $\dot{Q}$  نشان‌دهنده توان حرارتی کوره است؛  $H_l$  ارزش حرارتی پایین در واحد جرم،  $\dot{m}_{fuel}$  دبی جرمی سوخت،  $\rho_{fuel}$  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 به طور 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 به عنوان یک شاخص کلیدی برای فرآیند اختلاط در کوره در نظر گرفته می‌شود. این مقیاس زمانی به صورت نسبت طول مشخصه به سرعت جریان تعریف می‌شود ( $\tau \propto d/V$ ). برای آن که ویژگی‌های اختلاط و واکنش مشاهده‌شده در مقیاس آزمایشگاهی در نمونه مقیاس‌شده نیز حفظ شوند، مقدار  $\tau$  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<sup>۱</sup> [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<sup>۲</sup> [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 ( $\tau$ ) 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 $V = V_2/V_1$	$\tau$	$\dot{q}'''$
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

<sup>1</sup> Cole method

<sup>2</sup> Kumar method

علی‌رغم انجام پژوهش‌های گسترده در حوزه مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراقی، از جمله کوره‌های زیست‌توده [۱۷،۱۹]، راکتورهای بستر سیال‌سان [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  $\pi$ -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  $\pi$ -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 آشفته‌گی-شیمی از طریق اعداد رینولدز آشفته و دامکوهرلر، 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.

## 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<sup>۱</sup> 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 ( $AP$ )، ویسکوزیته سینماتیکی ( $\nu$ ) و چگالی ( $\rho$ ). از این مجموعه  $V$  و  $\rho$

<sup>1</sup> Filtering

به عنوان متغیرهای اصلی مقیاس‌گذاری انتخاب می‌شوند.

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

۴) پارامترهای انتقال حرارت: اختلاف دما ( $\Delta T$ )، هدایت حرارتی ( $k$ )، ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $h$ )، نفوذپذیری حرارتی ( $\alpha$ )، عدد ناسلت ( $Nu$ ) و نرخ تولید حرارت حجمی ( $\dot{q}'''$ ). از این میان  $\Delta T$  و  $k$  و  $\dot{q}'''$  انتخاب می‌شوند.

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

$l$	$d$	$\tau$	$V$	$D$	$\rho$	$c_p$	$\Delta T$	$k$	$\dot{q}'''$	$\phi$
$L$	$L$	$T^{-1}$	$LT^{-1}$	$L^2 T^{-1}$	$ML^{-3}$	$L^2 T^{-2} \theta^{-1}$	$\theta$	$ML T^{-3} \theta^{-1}$	$ML^{-1} T^{-3}$	-

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  $\pi$ -باکینگهام، این منجر به تشکیل هفت گروه مستقل بدون بُعد ( $\beta - \gamma = 7$ ) می‌شود که در ادامه معرفی می‌شوند.

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

بنابراین در این مطالعه، شش عدد بدون بُعد  $\pi_0$  تا  $\pi_5$  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 مقیاس‌گذاری شده، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به نتایج معتبر دارد و باید با دقت کامل رعایت شود. همچنین با در نظر گرفتن اصل استقلال شبکه<sup>۱</sup>، همان‌گونه که در بخش نتایج تشریح خواهد شد، تعداد المان‌های شبکه در مدل مقیاس‌گذاری شده باید دست‌کم برابر با حاصل ضرب تعداد اولیه المان‌ها در ضریب مقیاس باشد. این موضوع تضمین می‌کند که دقت عددی

<sup>1</sup> Mesh independence

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)،  $\pi_4$  و  $\pi_5$  را تعریف می‌کنند که  $\dot{q}'''$  در آن‌ها، معرف مقدار حرارت تولید شده در واحد حجم در اثر واکنش‌های شیمیایی است. عدد بدون بُعد  $\pi_4$  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  $\pi_5$  را با استفاده از رابطه زیر بنویسی کرد:

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

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،  $\pi_5$  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]،  $\pi_5$  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<sup>۱</sup> 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.

<sup>1</sup> Coaxial

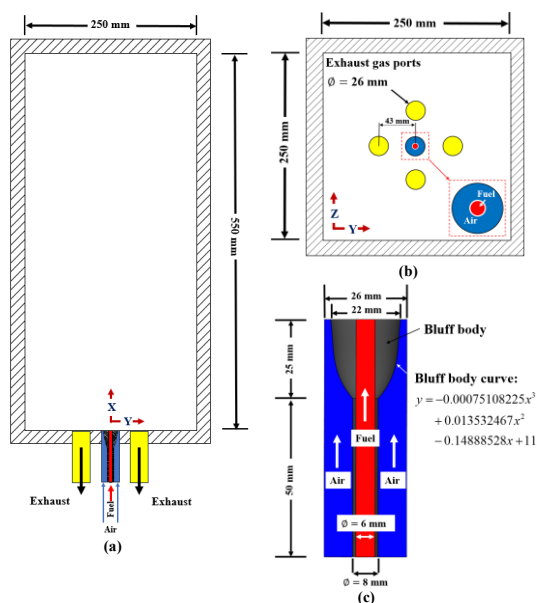


Figure 1- Geometry of the laboratory-scale furnace: (a) side view, (b) bottom view, and (c) bluff body positioned at the inlet nozzle  
 شکل ۱- هندسه کوره آزمایشگاهی: (الف) نمای جانبی، (ب) نمای از پایین، و (ج) جسم پُر<sup>۱</sup> قرار داده شده در نازل ورودی

جدول ۳ خلاصه ای از پارامترهای ورودی کلیدی را که برای اعتبارسنجی و شبیه سازی کوره مقیاس آزمایشگاهی به کار رفته اند، نشان می دهد.

جدول ۳- پارامترهای ورودی برای شبیه سازی های عددی

Table 3- Input parameters used for the numerical simulations

Parameters	Fuel	Air
Chemical compounds	CH <sub>4</sub>	79% N <sub>2</sub> + 21% O <sub>2</sub>
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 دیواره ها، به جز نازل های سوخت و هوا عایق شده و نیز دودکش، به عنوان سطوح دارای جابجایی طبیعی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده اند. با توجه به تقارن هندسی کوره، تنها یک چهارم از دامنه سه بعدی کل برای مدل سازی انتخاب شد. شرایط مرزی تقارن در هر دو صفحه میانی، افقی و عمودی، اعمال شد تا ضمن حفظ دقت فیزیکی شبیه سازی، هزینه محاسباتی نیز به میزان قابل توجهی کاهش یابد. شکل ۲ نمایی کلی از بخش جانبی دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی سه بعدی را نشان می دهد. علاوه بر این، جدول ۴ خلاصه ای جامع از تنظیمات مرزی اعمال شده را ارائه می کند.

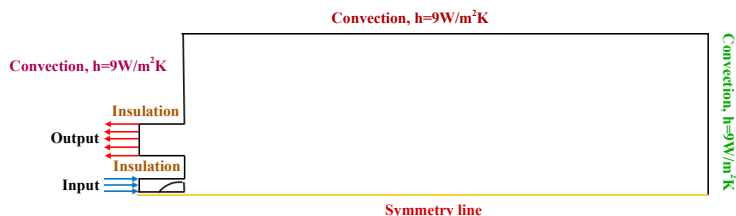


Figure 2- Schematic representation of the boundary conditions applied to the furnace geometry

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

<sup>1</sup> Bluff body

<sup>2</sup> Natural convective surfaces

جدول ۴- شرایط مرزی به کار رفته در شبیه‌سازی عددی، با تعیین سرعت، فشار، دما و غلظت گونه‌ها در ورودی‌ها، خروجی‌ها و دیواره‌ها

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 ( $V$ )	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 مقایسه‌ای از ابعاد هندسی کوره مقیاس‌گذاری شده (۱۰ MW) و کوره آزمایشگاهی (۱۰ kW) ارائه می‌کند.

جدول ۵- مقایسه ابعاد هندسی و تعداد مش کوره‌های آزمایشگاهی و مقیاس‌گذاری 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 <sup>a</sup> (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

<sup>a</sup> Width=Height

## فرضیات و مدل‌های عددی

مدل توربولانسی<sup>۱</sup>: آشفتگی جریان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری‌شده‌ی رینولدزی (RANS)<sup>۲</sup> و مدل استاندارد  $k-\epsilon$  شبیه‌سازی شده است. اگرچه این مدل در پیش‌بینی دقیق رفتار جت‌های گرد با محدودیت‌هایی همراه است، اما مطالعات پیشین [۳۵،۳۴،۹] نشان داده‌اند که تنظیم پارامتر  $C_{\epsilon 1}$  بر مقدار  $1/60$  منجر به تطابق بهتر با داده‌های تجربی در جریان‌های جت گرد خودهمسان می‌شود. بر همین اساس، این اصلاح در تمام شبیه‌سازی‌ها اعمال شد تا دقت مدل‌سازی برهم‌کنش 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<sup>۳</sup> حل می‌شود. این الگوریتم به دلیل پایداری عددی و کارایی مناسب در همگرایی، کاربرد گسترده‌ای در شبیه‌سازی جریان‌های پایا و تراکم‌ناپذیر دارد. مدل احتراقی: فرآیند احتراق با بهره‌گیری از مدل مفهوم اتلاف گردابه‌ای (EDC)<sup>۴</sup> شبیه‌سازی شد. این مدل با تخمین نرخ واکنش به‌عنوان تابعی از مقیاس‌های زمانی توربولانسی موضعی، امکان کوپل مؤثر اختلاط توربولانسی و سینتیک واکنش را فراهم می‌کند.

مکانیزم شیمیایی و مدل سینتیک: 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 می‌شود.

مدل تشعشع: انتقال حرارت تشعشعی با روش مرتبه‌های گسسته (DO)<sup>۵</sup> برای حل معادله انتقال تشعشع مدل‌سازی می‌شود. برای ارزیابی ضرایب جذب گاز نیز مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری<sup>۶</sup> به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، مدل DO از سه تقسیم‌بندی زاویه‌ای در هر دو جهت قطبی ( $\theta$ ) و آزیموتال ( $\phi$ ) گسسته شده و در مجموع ۷۲ جهت تشعشعی گسسته برای هر سلول ایجاد شده و دقت حل تشعشع را تضمین می‌نماید.

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

<sup>1</sup> Turbulence model

<sup>2</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes

<sup>3</sup> Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

<sup>4</sup> Eddy Dissipation Concept

<sup>5</sup> Discrete Ordinates

<sup>6</sup> Weighted Sum of Gray Gases Models

- باقیمانده های عددی برای معادلات انرژی، تکانه و تابش به کمتر از  $10^{-6}$  و برای سایر متغیرها به کمتر از  $10^{-5}$  برسد.
- 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  $\pm 0.001$  پایدار می شوند.

راهبرد کوپلینگ انرژی-تابش: به منظور دستیابی به کوپلینگ پایدار میان میدان های انرژی حرارتی و تشعشعی که در احتراق بدون شعله و در حضور آزادسازی حرارت حجمی با گرادیان های اندک اهمیت ویژه ای دارد، یک راهبرد تکرار متوالی مورد استفاده قرار می گیرد. به طور مشخص، برای هر تکرار<sup>۱</sup> تشعشعی، ۲۰ تکرار از معادله انرژی حل می شود. این راهبرد، تعادلی مناسب میان دقت محاسباتی و سرعت همگرایی ایجاد کرده و موجب حفظ یکنواختی و سازگاری انرژی-تابش در سراسر دامنه می شود.

### بررسی استقلال حل از شبکه

به منظور ارزیابی دقت نتایج عددی و اطمینان از استقلال حل نسبت به شبکه، شبیه سازی های اولیه با استفاده از متان خالص و هوا به ترتیب به عنوان سوخت و اکسنده مرجع انجام شد. دامنه محاسباتی با یک شبکه ی ساختاریافته شامل حدود ۹۸۰۰۰۰ سلول گسسته سازی شد (همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است). انتخاب این شبکه ساختاریافته با هدف بهبود هم راستایی سلول ها و افزایش پایداری عددی در سراسر دامنه صورت گرفت.

شبکه بندی لایه مرزی در نزدیکی نواحی ورودی و خروجی اعمال شد تا توزیع  $Y^+$  بهینه شود. این ریزسازی شبکه، گرادیان های سرعت را در مناطق نزدیک دیواره به حداقل رسانده و سازگاری با شرایط مرزی فشار را تضمین می نماید. در کل دامنه، مقادیر  $Y^+$  در محدوده زیر ۱ حفظ شده، که این امر امکان تفکیک دقیق زیرلایه ویسکوز و انطباق با الزامات مدل سازی اغتشاش در اعداد رینولدز پایین را فراهم می آورد. خلاصه ای از شاخص های شبکه، شامل کیفیت سلول و میزان کج بودن<sup>۲</sup>، در جدول ۶ ارائه شده است.

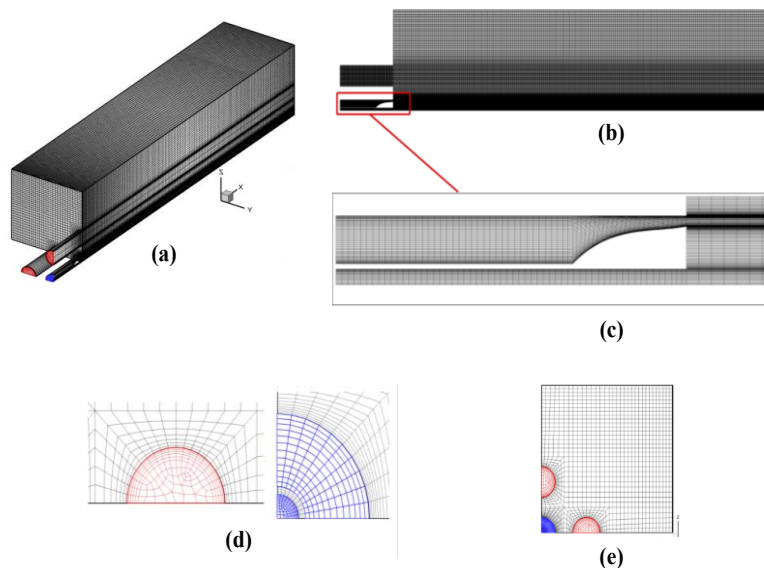


Figure 3- Mesh configuration in different regions of the computational domain: (a) one-quarter of the 3D furnace cross-section, (b) side view of the furnace, (c) inlet nozzles, (d) boundary-layer mesh at the inlets and outlet, and (e) floor section

<sup>1</sup> Iteration

<sup>2</sup> Skewness

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

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	$6.2355 \times 10^{-2}$	1	0.55355	0.31271
Skewness	$1.3057 \times 10^{-10}$	0.45095	$1.0789 \times 10^{-3}$	$1.4938 \times 10^{-2}$

برای ارزیابی دقیق‌تر حساسیت شبکه، شبیه‌سازی‌ها با چهار شبکه ۲۴۴۰۸۸۰، ۴۸۹۰۷۶۰، ۹۷۹۰۵۲۰ و ۱۰۹۵۹۰۰۴۰ سلول انجام شد. اگرچه ریزترین شبکه (با حدود ۱/۹۶ میلیون المان) تنها بهبود اندکی در دقت نتایج ایجاد می‌کرد، اما هزینه محاسباتی آن بیش از دو برابر شبکه ۹۸۰ هزار سلولی بود.

نتایج نشان داد که میدان‌های دما و سرعت در دو شبکه ریزتر تقریباً یکسان هستند و اختلافات مشاهده شده ناچیز بوده و تنها به نواحی کاملاً موضعی محدود می‌شوند. شکل‌های ۴(ا) و ۴(ب) به ترتیب توزیع‌های سرعت شعاعی و محوری را نمایش می‌دهند و حداقل تفاوت میان دو شبکه ریزتر را تأیید می‌کنند. به‌طور مشابه، پروفیل‌های دمای شعاعی (شکل‌های ۴(ج) تا ۴(ز)) و پروفیل دمای محوری (شکل ۴(ح)) نیز همخوانی بسیار خوبی را در سطوح مختلف شبکه نشان می‌دهند.

همگرایی عددی با استفاده از روش شاخص همگرایی شبکه (GCI) [۳۷] و بر اساس پروفیل‌های واقع بر خط مرکزی در  $x=125\text{mm}$  کمی‌سازی شد. مقدار GCI میان شبکه‌های 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 به‌طور 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؛ موضوعی که با گرادین‌های فضایی نرم‌تر 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 به‌عنوان نقطه‌ای بهینه میان دقت عددی و هزینه محاسباتی توجیه می‌کند.

## بررسی اعتبارسنجی مدل عددی

قابلیت اطمینان مدل CFD با مقایسه پروفیل‌های دمای محوری، غلظت‌های خروجی  $\text{O}_2$ ،  $\text{CO}$  و  $\text{NO}$  با داده‌های 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٪ پیش‌بینی می‌کند. به همین ترتیب، مقادیر پیش‌بینی شده برای کسر مولی  $\text{O}_2$  و غلظت  $\text{NO}$  به ترتیب دارای حداکثر انحراف ۴/۷٪ و ۵٪ می‌باشند. در حالی که پیش‌بینی  $\text{CO}$  اختلاف بیشتری داشته و تا ۷/۲٪ انحراف را نشان داد. این میزان اختلاف در محدوده قابل قبول مدل‌سازی احتراق، به‌ویژه پژوهش‌های پیشین گزارش شده توسط هی و همکاران [۹]، قرار دارد. بنابراین، نتایج به‌دست آمده دقت و قابلیت اتکای مدل CFD به‌کاررفته در این تحقیق را تأیید کرده و زمینه را برای انجام تحلیل‌های مقیاس‌گذاری بعدی فراهم می‌سازد.

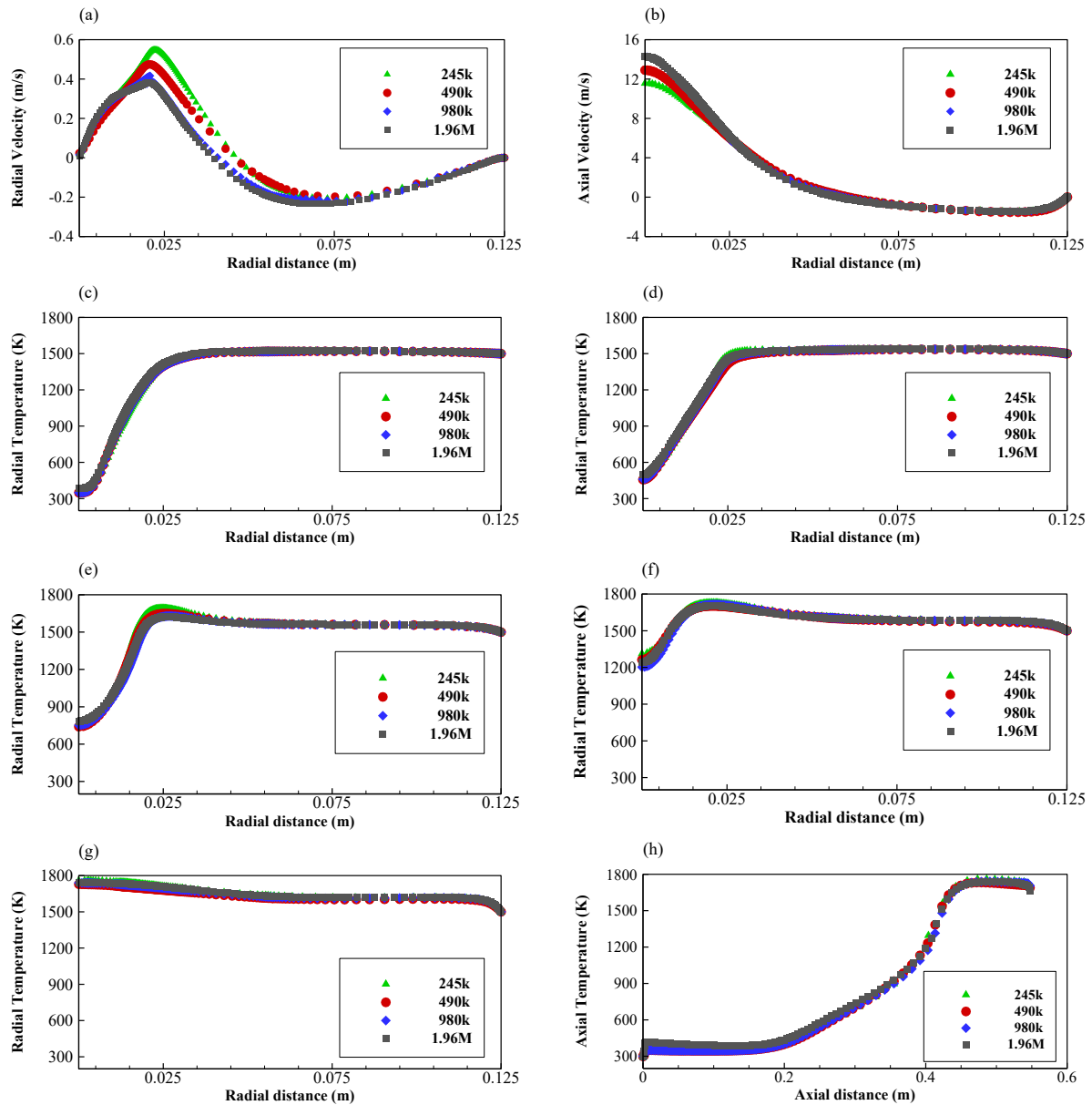


Figure 4- Grid-independence analysis based on comparisons of velocity and temperature profiles for different mesh resolutions: (a) radial velocity distribution at a transverse section, (b) axial velocity distribution, (c-g) radial temperature profiles at axial positions 135, 225, 315, 405, and 495 mm,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

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

عرضی، (ب) توزیع سرعت محوری، (ج تا ز) پروفایل های دمای شعاعی به ترتیب در موقعیت های محوری ۱۳۵، ۲۲۵، ۳۱۵، ۴۰۵ و ۴۹۵

میلی متر و (ح) توزیع دمای محوری در امتداد خط مرکزی کوره

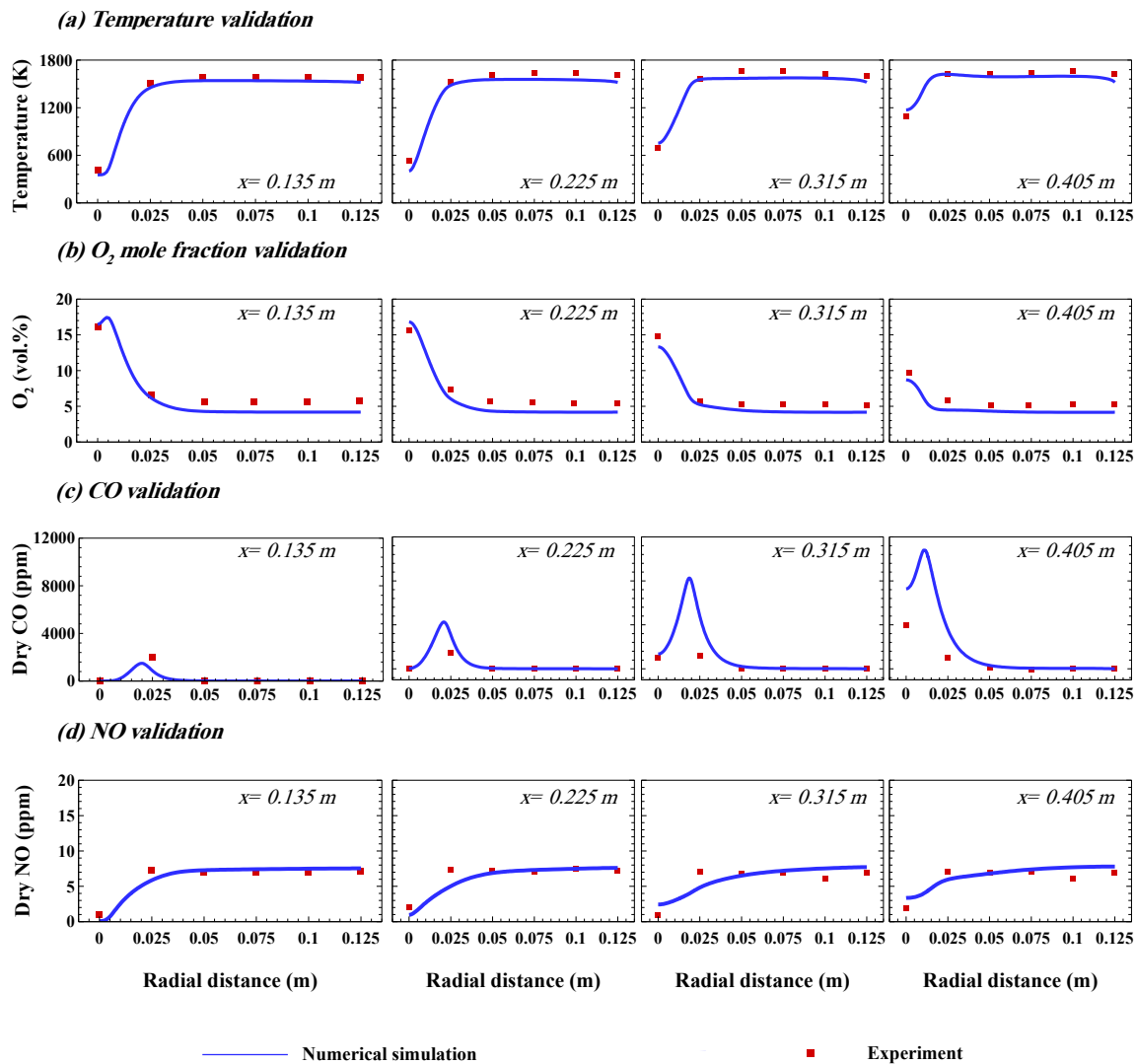


Figure 5- Comparison between numerical and experimental results [9] at various axial positions: (a) temperature, (b)  $O_2$  mole fraction, (c) CO mole fraction, and (d) NO mole fraction

شکل ۵- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی [9] بر حسب موقعیت‌های 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 قابل‌اعتماد رژیم احتراق بدون شعله، یکی از چالش‌های اساسی در پژوهش‌های مرتبط با احتراق محسوب می‌شود؛ به‌ویژه هنگامی که این موضوع از طریق مدل‌سازی محاسباتی مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعه حاضر، برای تشخیص این رژیم، از دو معیار شناخته‌شده استفاده شده است: نخست، نامساوی حرارتی معرفی‌شده 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 می‌دهد. بر اساس این معیار، کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌گذاری‌شده صنعتی در ناحیه احتراق بدون شعله قرار می‌گیرند.

<sup>1</sup> 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،  $T_{Im}$  بیانگر دمای مؤثر واکنش‌دهنده‌هایی است که پس از اختلاط با گازهای دودکش بازچرخانی شده وارد ناحیه واکنش می‌شوند؛ این دما به‌طور قلیل‌توجهی از دمای ورودی درج‌شده در جدول ۳ بالاتر است.

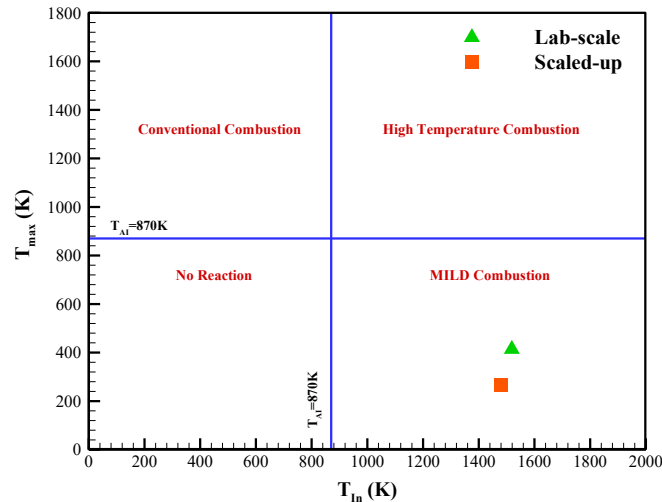


Figure 6- Cavalieri criterion [38] for identifying and comparing combustion regimes

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؛ به طوری که 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.

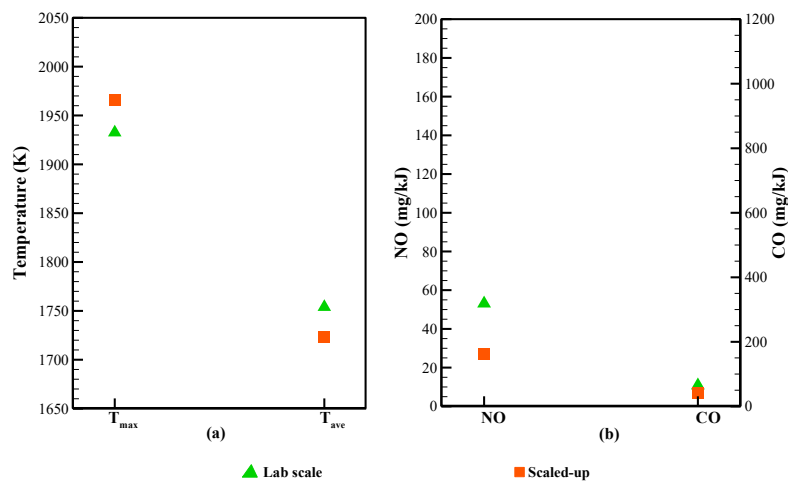


Figure 7- Comparison of key performance indicators between the laboratory-scale and industrial scaled-up furnaces: (a) maximum and average temperatures, and (b) NO and CO emissions

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 بدون بُعد 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

نسبت های هم ارزی 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 مدل سازی ویژه برای هر سامانه را برجسته می سازد. در صورتی که نرخ های سینتیکی یا انتقال گونه ها تحت شرایط حرارتی و جریانی متفاوت با دقت کافی مدل سازی نشوند، خطاهای پیش بینی غلظت آلاینده ها در مقیاس های مختلف می تواند به طور چشمگیری افزایش یابد. بنابراین، حساسیت سینتیک شیمیایی یکی از عوامل اصلی ایجاد ناهمبندی میان مدل های مقیاس گذاری و عملکرد واقعی سامانه های احتراقی است.

۳. تأثیر رژیم/احتراق بر مقیاس گذاری: در رژیم احتراق بدون شعله، نبود گرادیان های حرارتی و شیمیایی تند موجب ایجاد نواحی واکنش یکنواخت و توزیع پایدار حرارت می شود. این ویژگی باعث می شود پیش بینی آلاینده ها در فرآیند مقیاس گذاری، ثبات بیشتری داشته باشد. در مقابل، احتراق معمولی معمولاً همراه با گرادیان های شدید دما و تشکیل نقاط داغ موضعی است؛ شرایطی که حساسیت تشکیل آلاینده ها را نسبت به کوچک ترین نوسانات جریان یا دما افزایش می دهد. به همین دلیل، پیش بینی ها در چنین رژیم هایی معمولاً انحراف بیشتری نشان می دهند و پایداری کمتری دارند.

به طور خلاصه، افزایش خطا در پیش بینی غلظت آلاینده ها عمدتاً ناشی از وابستگی شدید آن ها به سینتیک شیمیایی غیرخطی، انتقال چندجزئی گونه ها و حساسیت بالای آن ها به نوع رژیم احتراق است. از این رو، دستیابی به تخمین دقیق آلاینده ها مستلزم به کارگیری مدل های سینتیکی با جزئیات بیشتر و توجه دقیق به برهم کنش های وابسته به مقیاس راکتور است؛ الزاماتی که فراتر از نیازهای معمول برای پیش بینی میدان دما قرار می گیرند.

### توزیع فضایی<sup>۱</sup> دما و آلاینده ها

شکل ۸ کانتورهای دمایی کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس گذاری شده صنعتی را نمایش می دهد. در مدل آزمایشگاهی، ناحیه دما بالا نسبتاً فشرده بوده و در نزدیکی خروجی مشعل متمرکز است؛ وضعیتی که نشان دهنده یک ناحیه واکنش شدید اما محدود از نظر فضایی است. با افزایش مقیاس سامانه، این ناحیه به تدریج گسترده تر شده و توزیع آن یکنواخت تر می شود؛ پدیده ای که بیانگر گسترش ناحیه واکنش حجمی و کاهش تمرکز موضعی حرارت است.

در کوره مقیاس شده طول اختلاط به مراتب کوتاه تر مشاهده می شود؛ به طوری که فرآیند اختلاط تنها ۴۹ درصد از طول محفظه احتراق را در بر می گیرد، در حالی که این مقدار در مدل آزمایشگاهی حدود ۷۳ درصد است. روش مقیاس گذاری حاضر توانسته است یکنواختی فضایی میدان دما را با دقت بالایی بازتولید کند و رفتار آن به طور قابل توجهی به ویژگی های احتراق توزیع شده در مدل آزمایشگاهی نزدیک است. این عملکرد مطلوب به دلیل حفظ بهتر مومنتوم ورودی و هندسه نازل در این روش است؛ عواملی که به طور مستقیم بر دینامیک اختلاط و ضخامت ناحیه واکنش اثر می گذارند. نکته حائز اهمیت آن است که در مدل مقیاس شده، ضخامت ناحیه واکنش تقریباً سراسر محفظه احتراق را پوشش می دهد؛ در نتیجه، آزادسازی انرژی به صورت یکنواخت انجام شده و گرادیان های دمایی به حداقل می رسند. چنین یکنواختی حرارتی یکی از الزامات بنیادی برای حفظ رژیم احتراق بدون شعله در مقیاس های متفاوت است.

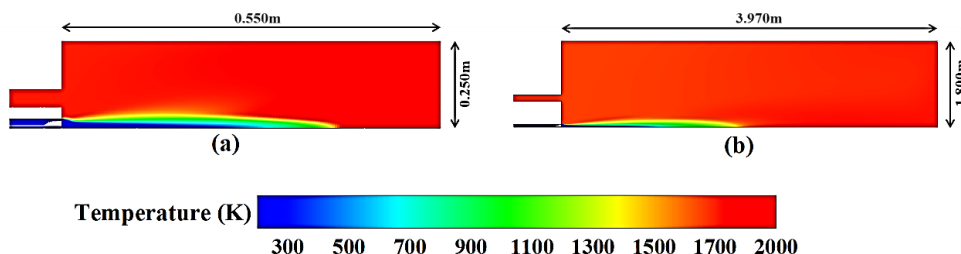


Figure 8- Temperature contours: (a) laboratory-scale furnace and (b) industrial-scale furnace

<sup>1</sup> Contour

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

شکل ۹ توزیع غلظت CO را در کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس شده 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 مقیاس شده، بیشترین شباهت را به مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد و یک ناحیه اختلاط متمرکز و نسبتاً محدود را ایجاد می‌کنند. به‌طور خاص، در این روش، ناحیه تشکیل CO بیانگر اختلاط بهبود یافته 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 مشاهده شده 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 قابل توجهی 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 توزیع شده 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 مقیاس شده 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.

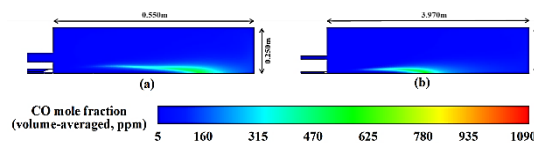


Figure 9- CO concentration contours: (a) laboratory-scale furnace and (b) industrial-scale furnace

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

شکل ۱۰ کانتورهای کسر مولی NO را برای کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس شده 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 شناخته شده زلدوویچ [۴۰] سازگار است؛ سازوکاری که در آن NO عمدتاً از طریق تفکیک حرارتی پیوندهای سه‌گانه مولکول‌های N<sub>2</sub> در دماهای بالا شکل می‌گیرد.

در مورد متوسط انتشار NO، نتایج نشان می‌دهد که کوره مقیاس شده صنعتی با ۷/۲ mg/kJ به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از حد استاندارد (EPA-HQ-OAR-2009-0234; EPA-HQ-OAR-2011-0044; FRL-9611-4) معادل ۸۶ mg/kJ است. به‌طور مشابه، کوره آزمایشگاهی با ۱۵ mg/kJ نیز بسیار پایین‌تر از این آستانه است. بنابراین روش مقیاس گذاری 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 توزیع شده ذاتاً تشکیل NO حرارتی را کاهش می‌دهد.

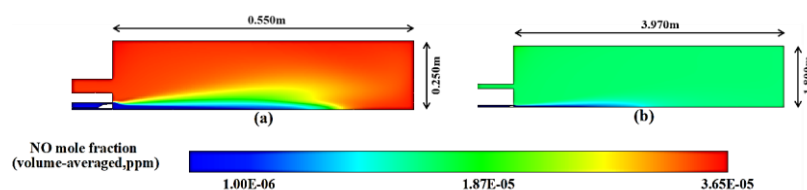


Figure 10- NO concentration contours: (a) laboratory-scale furnace and (b) industrial-scale furnace

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

به طور کلی، مقایسه نتایج با استانداردهای EPA نشان می دهد 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 سامانه های احتراق بدون شعله تأکید می نماید؛ به ویژه از آن جهت که می تواند ضمن رعایت الزامات زیست محیطی، پایداری رژیم احتراق توزیع شده را نیز حفظ کند. این مقایسه همچنین نشان می دهد که کنترل انتشار CO در فرآیند مقیاس گذاری، نسبت به NO چالش برانگیزتر است، مگر آن که 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 سامانه های مقیاس شده برجسته می کند.

نقشه های کانتور دما، CO و NO (شکل های ۸ تا ۱۰) نشان می دهند که هرچند روش مقیاس گذاری شده توانسته است عملکرد بدون شعله را حفظ کند، اما تا حد امکان ساختارهای داخلی شعله را نیز بازتولید می نماید. در این روش، دو عامل کلیدی (هدایت حرارتی و نسبت های هندسی) به کار گرفته شده اند که به صورت همزمان، کوپلینگ انتقال حرارت رسانشی و جابجایی را تقویت می کنند. افزایش نسبت ارتفاع محفظه به قطر، همراه با مقیاس گذاری کاهش ناژل، موجب افزایش سرعت جت و ایجاد مسیره های اختلاط طولانی تر می شود. از سوی دیگر، هدایت حرارتی حساس به دما، انتشار هموارتر حرارت را در نواحی دمای بالا تضمین می کند. ترکیب این دو اثر، نرخ های واکنش را در حجم گسترده تری توزیع کرده و یک ساختار شعله با شدت پایین و سینتیک تعدیل شده ایجاد می کند. به این ترتیب، در رژیم احتراق بدون شعله، این روش نه تنها به حذف جبهه شعله کمک می کند، بلکه توپولوژی ناحیه واکنش را نیز بهینه سازی کرده و کاهش آلاینده ها را با اکسیداسیون کارآمد گازهای واکنش ندیده هم راستا می سازد.

یکی از ویژگی های قابل توجه در تمامی مدل ها، تجمع محسوس NO در گوشه بالایی سمت چپ کوره است (شکل ۱۰). برای تبیین این رفتار، شکل ۱۱ خطوط جریان را نمایش می دهد و نشان می دهد که ناحیه مشخص شده با مربع خط چین، تراکم بسیار کمی از خطوط جریان دارد. این کاهش تراکم بیانگر ضعف در بازچرخانی گازها است. بازچرخانی ضعیف محصولات احتراق در این ناحیه، فرایندهای رقیق سازی محلی و پیش گرمایش را محدود می کند و در نتیجه دماهای بالاتری ایجاد می شود؛ شرایطی که بروز تشکیل NO را تسهیل می کند. این پدیده عمدتاً ناشی از ناکارآمدی بازچرخانی و کنترل حرارتی در نواحی پیرامونی محفظه است. با وجود این، روش پیشنهادی متعادل ترین الگوی بازچرخانی را میان مدل ها ارائه می دهد. این الگو قادر است پیک های حرارتی را به طور مؤثری کاهش داده و در نتیجه، تولید NO را در سطح بسیار پایین تری نگه دارد. این تحلیل بار دیگر بر اهمیت حیاتی طراحی بهینه سیستم بازچرخانی گازهای احتراق در کاهش آلاینده ها، به ویژه تحت شرایط رژیم بدون شعله، تأکید می کند.

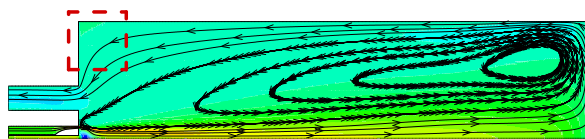


Figure 11- Streamlines within the combustion chamber illustrating their effect on recirculation and mixing

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

### تحلیل بازچرخانی گازهای احتراق (FGR)

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

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

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 مقیاس گذاری شده به بالاترین سطوح FGR در سراسر محفظه دست می‌یابد. مقدار باز چرخانی بیشینه در این مدل در نزدیکی سقف کوره به ۱۱/۷۶ می‌رسد، که به طور قابل توجهی بالاتر از مقدار متناظر ۱/۸ 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.

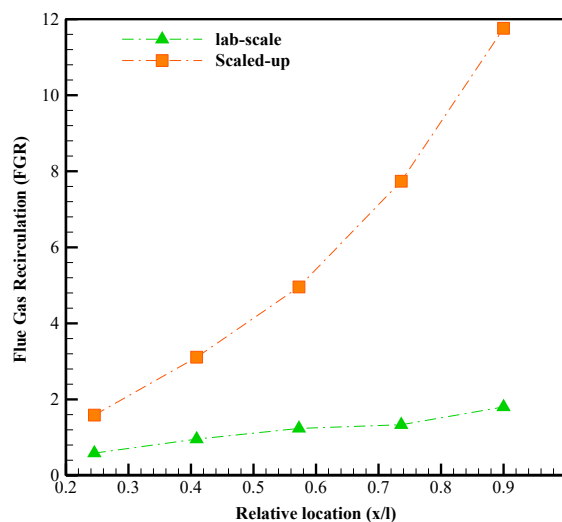


Figure 12- Comparison of flue-gas recirculation (FGR) profiles between the laboratory-scale and industrial-scale furnaces along the normalized axial direction

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 توزیع شده 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]. حاصل‌ضرب  $Re_t \times Da$  به عنوان یک شاخص دینامیک برای تعادل بین مقیاس‌های زمانی جریان و واکنش شیمیایی، پیشنهاد شده است که یک عامل حیاتی برای حفظ احتراق توزیع‌شده است [۴۱، ۴۳]. همانطور که مشهود است، روش بکاربرده شده در مقیاس‌گذاری، 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 مقیاس‌گذاری پیشنهادی برهم‌کنش 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 مقیاس‌گذاری 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 آگرژی

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 آگرژی 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 مقیاس‌گذاری‌شده 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 آگرژی 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 (میل‌های نارنجی) و بازده آگرژی (میل‌های سبز) را برای کوره آزمایشگاهی و کوره مقیاس‌گذاری‌شده صنعتی مقایسه می‌کند. یک نکته برجسته آن است که هم در کوره آزمایشگاهی و هم در کوره مقیاس‌گذاری پیشنهادی، مقدار بازده آگرژی 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 توزیع‌شده، بهره‌گیری مؤثر از پتانسیل انرژی موجود در سوخت را افزایش می‌دهد [۴۴].

از نظر کمی، کوره آزمایشگاهی و روش مقیاس‌گذاری پیشنهادی به ترتیب به بازده‌های انرژی ۴۵ درصد و ۴۷ درصد دست می‌یابند و بازده انرژی آن‌ها نیز به ترتیب ۶۸ درصد و ۷۰ درصد محاسبه می‌شود. این هم‌خوانی چشمگیر نشان می‌دهد که روش مقیاس‌گذاری نه‌تنها رژیم احتراق توزیع‌شده را حفظ می‌کند، بلکه بازده قانون اول و دوم ترمودینامیک کوره آزمایشگاهی را نیز در مقیاس صنعتی با دقت بسیار بالا بازتولید می‌نماید. اهمیت این نتیجه در آن است که تحلیل انرژی، به عنوان معیاری دقیق‌تر و از نظر فیزیکی معنادارتر برای سنجش عملکرد سامانه‌های احتراقی شناخته می‌شود [۴۵،۴۶]. موضوعی که مناسب بودن این رویکرد را به‌عنوان گزینه برتر مقیاس‌گذاری تأیید می‌کند که این روش قادر است رفتار ترمودینامیکی احتراق توزیع‌شده را، و نه صرفاً موازنه حرارتی آن، با دقت بازتولید کند. چنین انطباقی، پایه‌ای قابل‌اعتماد برای مقیاس‌گذاری سامانه‌های احتراق بدون شعله به مقیاس صنعتی را فراهم می‌سازد، بدون آن‌که عملکرد مبتنی بر قانون اول یا قانون دوم ترمودینامیک دچار افت شود.

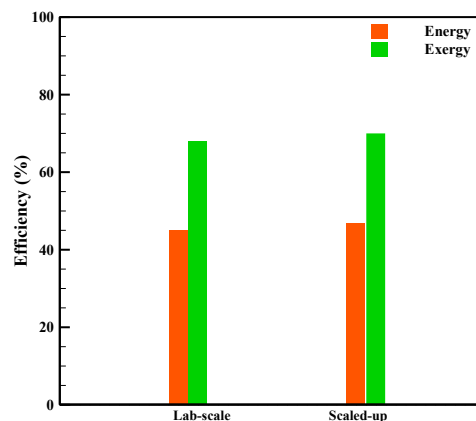


Figure 13- Comparison of energy (orange bars) and exergy (green bars) efficiencies for the laboratory-scale and industrial furnaces  
 شکل ۱۳- مقایسه بازده‌های انرژی (میله‌های نارنجی) و انرژی‌های سبز (میله‌های سبز) برای کوره‌های آزمایشگاهی و صنعتی

به طور خلاصه، تحلیل مقایسه‌ای میدان دما، توزیع آلاینده‌ها، الگوهای خطوط جریان، پروفایل‌های بازچرخانی داخلی، اعداد رینولدز و دامکوهلر توربولانسی، و همچنین راندمان‌های انرژی-انرژی در روش مقیاس‌گذاری ارائه‌شده 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 بخشد، انتشار CO و NO را به حداقل می‌رساند و شدت بازچرخانی داخلی گازهای احتراق (FGR) را افزایش می‌دهد. 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 به‌صورت توزیع‌شده را تضمین می‌کنند. علاوه بر این، ارزیابی اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر تأیید می‌کند که روش ارائه‌شده به نزدیک‌ترین مقدار  $Re_i \times Da$  به معیار آزمایشگاهی دست می‌یابد و بدین ترتیب تعادل صحیح میان مقیاس‌های زمانی اختلاط و شیمیایی را بازتولید می‌کند.

این یافته‌ها تأیید می‌کنند که روش مقیاس‌گذاری مبتنی بر تحلیل بدون بُعد، در ترکیب با طراحی آگاهانه ساختارهای جریان و بازچرخانی، برای دستیابی به پایداری رژیم در سامانه‌های احتراق بدون شعله مقیاس‌گذاری‌شده، ضروری است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که حفظ احتراق بدون شعله در فرایند مقیاس‌گذاری 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 بازچرخانی.
۲. حفظ اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر در محدوده‌های پایدار برای ایجاد تعادل در برهم‌کنش‌های اغتشاش-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  $\pi$ -باکینگهام به طور ذاتی آن‌ها را حفظ می‌کند که عملکرد برتر روش ارائه شده را توضیح می‌دهد. 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 مقیاس‌گذاری را اعتبارسنجی می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک چارچوب نوآورانه و مبتنی بر اصول فیزیکی برای مقیاس‌گذاری کوره‌های احتراق بدون شعله از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس صنعتی ارائه شد. این چارچوب با تعریف مجموعه‌ای از متغیرهای کلیدی و استخراج شش عدد بدون‌بعد مستقل توانست شرایط لازم برای حفظ رژیم احتراق توزیع‌شده 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 مقیاس‌گذاری ارائه‌شده 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 بخشد، 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 مقیاس‌گذاری 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 توزیع‌شده تضمین می‌کند. علاوه بر این، ارزیابی اعداد رینولدز توربولانسی و دامکوهلر تأیید می‌کند که روش مقیاس‌گذاری 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 مقیاس‌گذاری مبتنی بر تحلیل بدون‌بعد، 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 مقیاس‌گذاری 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 برهم‌کنش‌های آشفته‌گی-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 ارائه‌شده ابزاری قدرتمند و قابل‌اتکا 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 NO<sub>x</sub> 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 NOx 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 NOx 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. Scurluck, "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<sub>x</sub> 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-Alemany, 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. Koorneef, 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 CO<sub>2</sub> circulating fluidized bed boiler by 3D CFD simulation," *Powder Technol.*, vol. 394, pp. 103–119, 2021.
- [25] R. Chaiyo, J. Wongwivat, 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. Epple, "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. Cazerès, 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. Wünnig and J. G. Wünnig, "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.