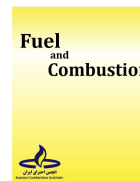




Iranian Combustion Institute



Impact of Diluent Flow Rate on Flame Stability and Pollutant Emission in Coaxial Non-Premixed Burner: A Large Eddy Simulation Study

Hamed Helmi¹ , Younes Bakhshan^{2✉} , Pouyan Adibi³

¹ Mechanical Engineering Department, University of Hormozgan, Bandar abbas, Iran. Email: hamed.helmi.phd@hormozgan.ac.ir

² **Corresponding author**, Mechanical Engineering Department, University of Hormozgan, Bandar abbas, Iran. Email: bakhshan@hormozgan.ac.ir

³ Mechanical Engineering Department, University of Hormozgan, Bandar abbas, Iran. Email: adibi@hormozgan.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received 2026.04.22

Received in revised form 2026.06.17

Accepted 2026.06.23

Available online 2026.06.25

Keywords

Coaxial Burner

Combustion Instability

Steam Dilution

Large Eddy Simulation (LES)

NOx Emissions

ABSTRACT

Flame stabilization in coaxial burners using steam dilution is an effective strategy for reducing pollutants and stabilizing combustion systems. This study numerically investigates the effect of the steam dilution mass flow rate (SFR) on dynamic stability and pollutant profiles in a coaxial burner configuration using large eddy simulation. The results indicate that increasing the dilution rate directly influences the shear layer structure and hydrodynamic instabilities including the Darrieus-Landau instability by modulating the local Lewis number and the thermal expansion ratio. Simulations confirm that within specific SFR ranges, increased dilution attenuates pressure oscillations and drives the system from a limit-cycle regime to a stable state. While this approach yields significant NO_x reduction, analyses reveal that exceeding critical dilution thresholds leads to increased concentrations of unburned hydrocarbons and a risk of flame extinction due to local cooling and impacts on chemical kinetics. The findings of this research provide a numerical framework for determining the optimal burner operating range to achieve a balance between flame stability and environmental performance.

Introduction

Given the necessity of transitioning to sustainable, low-emission combustion systems, managing flame stability through the use of diluents has become a key challenge in optimizing combustion processes. In coaxial and co-flow burner geometries, the interaction between the reactive jet and the surrounding flow field creates a complex environment where hydrodynamic instabilities specifically the Darrieus–Landau (D-L) mechanism can trigger thermoacoustic oscillations, leading to structural damage and inefficient combustion.

Classical combustion theory, as established by Clavin and Searby, posits that the flame front acts as a gas dynamic discontinuity. the expansion of gases across the reaction zone ($\sigma > 1$) inherently destabilizes the flame, a phenomenon known as the Darrieus–Landau instability governed by the coupling of density changes and flow velocity. In concentric-tube configurations, this is further complicated by the shear layer between the central jet and the annular diluent, which can trigger Kelvin–Helmholtz (K-H) instabilities, creating a multi-scale interaction between chemical-thermal effects and fluid dynamics.

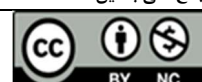
To mitigate these instabilities and reduce nitrogen oxide (NO_x) emissions, steam or water-vapor dilution is proposed as a dual-purpose strategy. Steam injection modifies the local thermophysical properties of the mixture, including the Lewis number (Le), thermal diffusivity, density (ρ), specific heat capacity (cp), and viscosity (μ). By adjusting the diluent flow rate, it is theoretically possible to stabilize the flame front and dampen the growth of unsteady fluctuations. However, the nonlinear relationship among dilution, flame-front wrinkling, and pollutant formation remains poorly understood in the context of complex co-flow flows.

This study aims to bridge this gap by performing a detailed numerical investigation using Large Eddy Simulation (LES). We focus on how the diluent flow rate affects the spectral characteristics of pressure and temperature fluctuations, the morphological evolution of the flame surface, and the resulting emission profiles. The findings contribute to the designing more stable and environmentally friendly non-premixed combustion systems.

Cite This Paper

Helmi, Hamed., Bakhshan, Younes., & Adibi, Pouyan, (2026). Impact of Diluent Flow Rate on Flame Stability and Pollutant Emission in Coaxial Non-Premixed Burner: A Large Eddy Simulation (LES) Study. Fuel and Combustion, 19 (2), 20-38. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.593583.1467> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



Methodology

The numerical investigation is conducted using a high-fidelity Large Eddy Simulation (LES) framework to capture the transient, multi-scale nature of combustion instabilities. The governing equations are the filtered Navier-Stokes equations, coupled with a species transport model to account for the multi-component mixture of CH_4 , O_2 , N_2 , and H_2O (diluent).

1. Turbulence and Combustion Modeling:

The sub-grid scale (SGS) stresses are modeled using the Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (WALE) model to accurately capture the shear-induced turbulence in the co-flow annular gap. To account for the finite-rate chemistry, a filtered Arrhenius-type reaction mechanism is implemented, capturing the heat release rate ($\dot{Q}$) essential for the coupling between fluid motion and chemical kinetics.

2. Numerical Domain and Boundary Conditions:

The computational domain represents a concentric-tube burner. The central tube delivers the steam diluent, while the annular space provides the fuel non-premixed jet. Non-reflective boundary conditions are applied at the outlet to prevent artificial pressure wave reflections, which are critical for studying acoustic-flame coupling.

3. Governing Parameters:

The study systematically evaluates the impact of diluent mass flow rate on thermo-acoustic stability by modulating key dimensionless numbers:

- Reynolds Number ($Re = \rho u L / \mu$): Governs the shear layer development and the energy cascade to smaller scales.
- Lewis Number ($Le = \alpha / D = \frac{\lambda}{\rho C_p D_i}$): Dictates the thermo-diffusive stability of flame front. Steam dilution increases the effective Le , enhancing diffusive-thermal stabilization.
- Damköhler Number ($Da = \tau_{flow} / \tau_{chem} = \frac{L / U_{ref}}{\delta_L / S_L}$): Characterizes the combustion regime. High Da values in the current configuration suggest that local extinction is less likely, as the chemical time scales are shorter than the flow time scales, despite intense turbulent strain.

The mesh resolution is validated to ensure that flame-front wrinkling, Kolmogorov scales, and the characteristic wavelengths of D–L and K–H instabilities are sufficiently resolved.

Results and Discussion

The analysis of the LES data reveals a direct quantitative impact of the diluent flow rate (SFR) on both the stability and chemical output of the burner within the investigated operating range.

1. Stability and Spectral Analysis:

Although D-L instability is inherently defined for premixed flame fronts, in coaxial burners operating under non-premixed combustion conditions, initial mixing between the fuel and the oxidizer occurs near the burner rim, leading to the formation of layers that exhibit premixed-like behavior. Fast Fourier Transform (FFT) analysis of pressure (p') and velocity (u') signals indicates that at low diluent flow rates ($SFR < 1.0$), the flame exhibits strong periodic oscillations characteristic of a limit-cycle, driven by the coupling of D-L instability and acoustic resonance. Increasing SFR induces a broadening of the power spectral density (PSD) peaks and a significant reduction in the magnitude of dominant frequencies. This confirms that steam dilution acts as a quantifiable damping mechanism, transitioning the system from coherent thermoacoustic instability to a stable, low-amplitude turbulent state.

2. Flame Morphology and Hydrodynamics:

Increased dilution modifies the shear layer, suppressing Kelvin–Helmholtz vortex growth. Quantitative analysis (Table 6) demonstrates that this stabilization is driven by an increased effective Lewis number (Le) and a reduced thermal expansion ratio (σ). This modification of non-dimensional parameters mathematically correlates with the observed reduction in flame-front wrinkling and proves that the central recirculation zone (CRZ) acts as a reservoir of hot products that stabilizes the flame front against fluctuations.

3. Emission Profiles:

Data presented establish a clear correlation between dilution and pollutant reduction. The rise in steam concentration increases the specific heat capacity of the mixture and lowers the adiabatic flame temperature. Consequently, NO_x production, which is exponentially dependent on temperature, is drastically reduced. However, the data show that at excessively high diluent flow rates, an increase in unburned hydrocarbons, a reduction in CO_2 oxidation efficiency occurs, which is attributed to local thermal quenching where the flame temperature drops below the autoignition threshold.

Conclusions

This study quantitatively assesses the role of steam dilution in controlling flame stability, emission profiles, and propagation characteristics in non-premixed concentric flames using Large Eddy Simulation (LES). The results demonstrate that increasing the steam-to-fuel mass flow ratio (SFR) is an efficient mechanism for suppressing combustion instabilities. Spectral analysis confirms that at low dilution, the flame exhibits strong limit-cycle oscillations at a characteristic frequency of 20 Hz; however, increasing $SFR > 1.0$ enhances thermo-diffusive damping—driven by modifications in the local Lewis number (Le) and thermal expansion ratio (σ)—thereby transitioning the system from a high-amplitude fluctuating regime to a stable, acoustically damped state. Furthermore, the data indicate that steam injection strengthens the Central Recirculation Zone (CRZ) and modifies shear layer dynamics, which significantly reduces flame-front wrinkling. While this approach effectively regulates the peak flame temperature to suppress NO_x formation, the results highlight a critical operating window: dilution levels exceeding $SFR > 2.1$ lead to local thermal quenching, characterized by an increase in unburned hydrocarbons, a reduction in CO_2 oxidation efficiency, and an increased risk of local extinction.

Based on these findings, the following directions are proposed for future research and development:

- Optimal Burner Operation: Development of stability maps based on non-dimensional parameters (Reynolds, Lewis, and Damköhler numbers) to define optimal operating points for industrial applications.
- Active Control Strategies: Investigation of active control for thermoacoustic oscillations, specifically through pulsed steam injection techniques.
- Feedback Control Systems: Implementation and evaluation of real-time feedback control systems based on oscillation indices, such as the Prandtl number or density fluctuations, in both experimental and numerical studies.
- Geometric Optimization: Improvement of burner and concentric nozzle geometries to reinforce the CRZ structure and extend the flame stability limits under high-dilution conditions.

Funding

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

Conflict of Interest

Authors should declare any conflict of interest or state: Authors declare no conflict of interest.

References

- [1] J. Rodriguez Camacho, D. Le, J. Blust, and J. O'connor, "Impact of diluents on flame stability with blends of natural gas and hydrogen," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 147, no. 1, p. 011017, 2025.
- [2] S. Izadi, O. Kislal, J. Zanger, H. Seliger-Ost, P. Kutne, and M. Aigner, "Investigating the impact of steam enhancement on combustion in a swirl-assisted jet-stabilized gas turbine combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 147, no. 1, p. 011001, 2025.
- [3] A. Kavoori and A. Keshavarz, "Simulating Natural Gas Combustion with Steam Injection to Reduce NOx Emissions," *Cleaner Chemical Engineering*, p. 100212, 2025.
- [4] Q. Yao, O. Shi, L. Song, W. Jin, J. Li, H. Liu, and L. Yuan, "An experimental study of thermoacoustic instabilities in a RP-3 fueled multi-swirl stabilized lean direct injection combustor," *Applied Thermal Engineering*, vol. 255, p. 124034, 2024.
- [5] L. Ji, J. Wang, W. Zhang, Y. Wang, Z. Huang, and X. Bai, "Structure and thermoacoustic instability of turbulent swirling lean premixed methane/hydrogen/air flames in a model combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 60, pp. 890–901, 2024.
- [6] G. Troiani, P. E. Lapenna, R. Lamioni, and F. Creta, "Self-wrinkling induced by Darrieus-Landau instability in turbulent premixed Bunsen flames from low to moderately high Reynolds numbers," *Physical Review Fluids*, vol. 7, no. 5, p. 053202, 2022.
- [7] Y. Guan, B. Yin, Z. Yang, and L. K. B. Li, "Forced synchronization of self-excited chaotic thermoacoustic oscillations," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 982, p. A9, 2024.

- [8] P. E. Buschmann, N. A. Worth, and J. P. Moeck, "Thermoacoustic oscillations in a can-annular model combustor with asymmetries in the can-to-can coupling," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 5707–5715, 2023.
- [9] P. Clavin and G. Searby, *Combustion Waves and Fronts in Flows*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [10] L. Berger, M. Grinberg, B. Jürgens, P. E. Lapenna, F. Creta, A. Attili, and H. Pitsch, "Flame fingers and interactions of hydrodynamic and thermodiffusive instabilities in laminar lean hydrogen flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 2, pp. 1525–1534, 2023.
- [11] Y. Zhou, *Hydrodynamic Instabilities and Turbulence: Rayleigh–Taylor, Richtmyer–Meshkov, and Kelvin–Helmholtz Mixing*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2024.
- [12] C. A. Fugger, R. A. Forlines, B. T. Paxton, A. W. Caswell, and B. A. Rankin, "Freestream and shear layer effects in bluff-body-stabilized turbulent premixed flames," *Combustion and Flame*, vol. 263, p. 113378, 2024.
- [13] C. Lu, L. Zhang, C. Xing, L. Liu, and P. Qiu, "Effects of characteristic diameter, steam dilution, and equivalence ratio on NO formation for a H₂/Air micromix design," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 61, pp. 1133–1141, 2024.
- [14] R. Palulli, K. Zhang, S. Dybe, M. Yasir, C. O. Paschereit, and C. Duwig, "Investigation of NO formation in non-premixed, swirl-stabilised, wet hydrogen/air gas turbine combustor," *Fuel*, vol. 378, p. 132943, 2024.
- [15] Ahsan, A., Aydin, M., Mansour, M. S., & Al-Qaydi, A. A., Quantifying the carbon conversion efficiency and emission indices of a lab-scale natural gas flare with internal coflows of air or steam, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 103 133–142, 2019.
- [16] H. Dai, J. Wang, X. Cai, S. Su, H. Zhao, and Z. Huang, "Lewis number effects on laminar and turbulent expanding flames of NH₃/H₂/air mixtures at elevated pressures," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 2, pp. 1689–1697, 2023.



تأثیر نرخ جریان رقیق کننده بر پایداری شعله و انتشار آلاینده‌ها در مشعل غیرپیش مخلوط جریان هم‌محور: مطالعه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)

حامد حلمی^۱، یونس بخشان^۲، پویان ادیبی^۳

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، پست الکترونیکی: hamed.helmi.phd@hormozgan.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، پست الکترونیکی: bakhshan@hormozgan.ac.ir

^۳ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، پست الکترونیکی: adibi@hormozgan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی	
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴	پایداری شعله در مشعل‌های هم‌محور با استفاده از رقیق‌سازی بخار، راهکاری موثر برای کاهش آلاینده‌ها و پایداری سیستم‌های احتراقی است. این مطالعه به بررسی عددی اثر نرخ جرمی رقیق‌ساز بخار (SFR) بر پایداری دینامیکی و پروفیل‌های آلاینده‌ها در یک پیکربندی مشعل هم‌محور با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ رقیق‌سازی با تعدیل عدد لوئیس محلی (Le) و نسبت انبساط حرارتی (α)، بر ساختار لایه برشی و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی (از جمله ناپایداری داریوس-لاندو ($D-L$)) تأثیر مستقیم دارد. شبیه‌سازی‌ها تأیید می‌کنند که در بازه‌های مشخصی از SFR ، افزایش رقیق‌سازی منجر به تضعیف نوسانات فشار و گذار سیستم از رژیم چرخه حدی به وضعیت پایدار می‌شود. در حالی که این رویکرد کاهش قابل توجه NO_x را به همراه دارد، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که عبور از آستانه‌های بحرانی رقیق‌سازی، به دلیل خنک‌سازی موضعی و تأثیر بر سینتیک شیمیایی، منجر به افزایش غلظت هیدروکربن‌های نسوخته و خطر خاموشی شعله می‌شود. یافته‌های این پژوهش، چارچوبی عددی برای تعیین محدوده عملیاتی بهینه مشعل جهت دستیابی به تعادل میان پایداری شعله و عملکرد زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.
کلیدواژه‌ها: مشعل جریان هم‌محور ناپایداری احتراق رقیق‌ساز بخار شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) انتشار NO_x	

مقدمه

با توجه به ضرورت گذار به سیستم‌های احتراق پایدار و کم‌آلاینده، مدیریت پایداری شعله با استفاده از رقیق‌کننده‌ها به یکی از چالش‌های کلیدی در بهینه‌سازی فرآیندهای احتراق تبدیل شده است. فراهانی و طاهری‌نیا [۱] نشان دادند که این سوخت‌ها، علی‌رغم پتانسیل بالای کاهش انتشار کربن، با چالش‌های فنی عمده در فرآیند احتراق مواجه هستند. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، ظهور ناپایداری‌های احتراقی در مشعل‌های هم‌محور است که می‌تواند منجر به کاهش راندمان، افزایش انتشار آلاینده‌های NO_x ، و آسیب‌های ساختاری ناشی از لرزش‌های آکوستیک گردد. لیو و همکاران [۲] و وان و همکاران [۳] نیز در مطالعات خود بر این چالش‌ها تأکید کرده‌اند. کلاوین و سربی [۴] در نظریه کلاسیک خود، جبهه شعله را به عنوان یک ناپیوستگی گازی معرفی کردند که ذاتاً مستعد ناپایداری هیدرودینامیکی داریوس-لاندو ($D-L$) است. این ناپایداری، که ناشی از انبساط حرارتی سیال در عبور از جبهه شعله است، در صورت عدم کنترل، با ناپایداری‌های ترموآکوستیک کوپل شده و رفتار سیستم را به سمت نوسانات چرخه‌حدی سوق می‌دهد [۵، ۶]. لوی و همکاران [۷] و گاوچراند و همکاران [۸] نیز در مطالعات خود، تأثیر این ناپایداری‌ها را بر پایداری شعله‌های هیدروژنی بررسی کرده‌اند.

در دهه‌های اخیر، تمرکز تحقیقات به سمت استفاده از روش‌های فعال و غیرفعال برای کنترل ناپایداری‌ها معطوف شده است. رودریگز کاماچو و همکاران [۹] و ایزادی و همکاران [۱۰] نشان دادند که رقیق‌سازی با بخار آب به عنوان یک راهبرد دوگانه

Cite This Paper

Helmi, Hamed., Bakhshan, Younes., & Adibi, Pouyan, (2026). Impact of Diluent Flow Rate on Flame Stability and Pollutant Emission in Coaxial Non-Premixed Burner: A Large Eddy Simulation (LES) Study. Fuel and Combustion, 19 (2), 20-38. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.593583.1467> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



برای کاهش دمای شعله و سرکوب ناپایداری‌ها عمل می‌کند. خسروانی و کشاورز [۱۱] و پالولی و همکاران [۱۲] نیز در مطالعات خود، تأثیر رقیق‌سازی با بخار را بر کاهش تشکیل NOx در مشعل‌های توربینی بررسی کردند. تائو و همکاران [۱۳] ویژگی‌های دینامیکی غیرخطی نوسانات صوتی اجباری را در یک موتور ترموآکوستیک بررسی نمودند. تحقیقات نشان می‌دهند که حضور بخار، علاوه بر تغییرات ترموشیمیایی (مانند افزایش ظرفیت حرارتی ویژه و کاهش دمای شعله)، با اصلاح عدد لوئیس (Le) و تعدیل اثرات نفوذی، می‌تواند رفتار ساختاری شعله را از حالت سلولی به حالت پایدار تغییر دهد [۱۴]. الکلاوی و همکاران [۱۵] نیز در مطالعه‌ای جامع، تأثیر شرایط عملیاتی بر پایداری شعله‌های آشفته را بررسی کردند.

با ظهور قابلیت‌های محاسباتی نوین، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) به ابزاری استاندارد برای بررسی این پدیده‌ها تبدیل شده است [۱۶، ۱۷]. برخلاف روش‌های مبتنی بر معادلات شبه‌یک‌بعدی، LES قادر است اندرکنش میان گردابه‌های لایه برشی (K-H) و جبهه شعله را با دقت بالا ثبت کند [۱۸، ۱۹]. دای و همکاران [۲۰] و برگر و همکاران [۲۱] نشان دادند که کوپلینگ میان آشفستگی و شیمی در حال واکنش، به شدت به نحوه مدل‌سازی زیرشبکه‌ای (SGS) وابسته است. لیو و همکاران [۲۲] و گوان و همکاران [۲۳] نیز در مطالعات خود، تأثیر دبی جریان رقیق‌ساز را بر تغییر مکان مرکز جرم آزادسازی حرارت و فرکانس‌های نوسانی بررسی کردند. با این حال، شکاف علمی قابل توجهی در تبیین دقیق اثر همزمان رقیق‌سازی بر ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در پیکربندی‌های هم‌محور وجود دارد. اکثر مطالعات یا بر شیمی سوخت‌های هیدروژنی متمرکز بوده‌اند [۲۴-۲۶] و یا به طور مجزا به آکوستیک پرداخته‌اند [۲۷، ۲۸]. پالیس [۲۹] و گو و همکاران [۳۰] نیز بر لزوم بررسی سیستماتیک نقش جریان رقیق‌ساز به عنوان یک پارامتر کنترلی فعال در مشعل‌های هم‌محور تأکید کرده‌اند.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی عددی اثر نرخ جرمی رقیق‌ساز بر پایداری دینامیکی و مشخصات انتشار آلاینده‌ها در یک مشعل هم‌محور است. مشارکت علمی این مقاله در موارد زیر است:

۱. تبیین مکانیسم اثر متقابل ناپایداری‌های داریوس-لاندو (D-L) و گردابه‌های لایه برشی (K-H) تحت تأثیر رقیق‌سازی با بخار.
۲. شناسایی پارامترهای کلیدی و شاخص‌های نوسانی که می‌توانند به عنوان پیش‌گام برای تشخیص گذار از رژیم پایدار به ناپایداری ترموآکوستیک مورد استفاده قرار گیرند.

ساختار این مقاله در شش بخش تدوین شده است؛ به‌طوری‌که در بخش اول مقدمه و بیان مسئله، روش‌شناسی پژوهش در بخش دوم و معادلات حاکم، چارچوب ریاضی در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) در بخش سوم تشریح می‌شوند. در ادامه، تنظیمات عددی و اعتبارسنجی مدل در بخش چهارم آمده و نتایج حاصل از تحلیل طیف‌های فرکانسی، ساختار گردابه‌ها و آلاینده‌ها در بخش پنجم مورد بررسی قرار می‌گیرد، و در نهایت، بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده اختصاص دارد.

روش‌شناسی

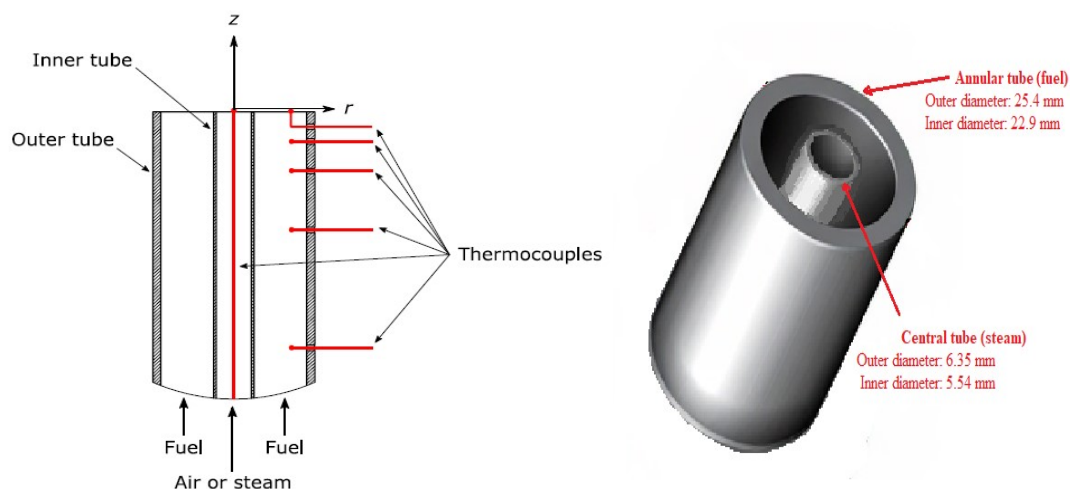
در این مطالعه، برای شبیه‌سازی دقیق میدان جریان واکنشی و ثبت پدیده‌های فیزیکی گذرا، از رویکرد پیشرفته شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) استفاده شده است. این مدل محاسباتی با هدف حل معادلات ناویر-استوکس فیلترشده، قادر است اندرکنش‌های میان ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و سینتیک شیمیایی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف به‌طور هم‌زمان مدل‌سازی کند. استفاده از LES در این تحقیق به ویژه برای ثبت پدیده‌های غیرخطی مانند نوسانات فشار و تکامل ساختارهای گردابه‌ای که در روش‌های مبتنی بر میانگین‌گیری رینولدز (RANS) به‌طور میانگین‌گیری زمانی و نادیده گرفته می‌شوند، ضرورت دارد.

هندسه مورد استفاده در این پژوهش، بر پایه مشعل احتراق آزمایشگاهی دانشگاه آلبرتا طراحی شده است که شامل دو لوله از جنس استنلس استیل به صورت هم‌محور^۱ یا هم‌سو^۲ است. در این پیکربندی، صفحه خروجی لوله داخلی و لوله خارجی بر هم

¹ Coaxial

² Co-flow

منطبق شده‌اند (خروجی دو لوله در یک صفحه قرار دارد) تا جریان سوخت و رقیق‌ساز (بخار آب) در یک ساختار منظم از هم جدا شوند. مشخصات هندسی دقیق نازل‌ها و شرایط مرزی ورودی سوخت و هوا در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است. برای اطمینان از دقت نتایج و حذف اثرات مرزی، دامنه محاسباتی به گونه‌ای تنظیم شده است که از خروجی مشعل تا شعاع ۲۵/۴ میلی‌متر و در راستای محور جریان تا طول ۱۲۵ میلی‌متر امتداد می‌یابد. این ابعاد گسترده در طراحی دامنه، اثر شرایط مرزی خروجی بر ناحیه واکنش را کاهش می‌دهد و امکان ثبت دقیق ساختارهای میدان دور، از جمله دینامیک گردابه‌های مقیاس بزرگ و پدیده سوسو زدن شعله، فراهم می‌کند.



شکل ۱- نمای هندسی دو بعدی و سه بعدی مشعل احتراق آزمایشگاهی دانشگاه آلبرتا [۳۱].

Figure 1- Two- and three-dimensional views of the University of Alberta laboratory combustion burner [31].

جدول ۱- مشخصات هندسی مشعل و شرایط سوخت و بخار و هوای محیط

Table 1- Burner geometric specifications and fuel, steam, and ambient air conditions.

Concentric double-tube nozzle specifications	
Central steam jet of inner diameter: 5.54 mm	Central steam jet of outer diameter: 6.35 mm
Annular fuel jet of inner diameter: 22.9 mm	Annular fuel jet of outer diameter: 25.4 mm
Fuel composition and inlet conditions	
Molar composition of natural gas	CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ , CO ₂ and N ₂ 91.5%, 6.1%, 0.1%, 0.01%, 1% and 1.3%
Steam inlet conditions	23.1-35.8 gr/min and 110-120 °C
Fuel inlet conditions	14.2 gr/min and 50-136 °C
Oxidizer (Ambient air)	
Air (21% O ₂ , 79% N ₂)	22-24° C

چارچوب نظری و معادلات حاکم

در این مطالعه، برای تحلیل دقیق دینامیک شعله و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) استفاده شده است. در این رویکرد، متغیرهای جریان (مانند سرعت، فشار و دما) توسط یک عملگر فیلتر به دو بخش تقسیم می‌شوند: مقیاس‌های تفکیک‌پذیر که توسط شبکه محاسباتی حل می‌شوند و مقیاس‌های زیرشبکه^۳ (SGS) که توسط مدل‌سازی ریاضی بازسازی می‌شوند.

³ Sub-grid scales

معادلات حاکم فیلترشده

معادلات حاکم بر جریان آشفته و واکنشی، شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت فیلترشده در ادامه ارائه شده‌اند:

معادله پیوستگی^۴

برای یک سیال تراکم‌پذیر، معادله بقای جرم به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

این معادله بقای جرم را برای سیال تراکم‌پذیر توصیف می‌کند، جایی که $\bar{\rho}$ چگالی فیلترشده و $\tilde{u}_i$ سرعت فیلترشده در جهت i است.

معادله تکانه^۵

معادله ناویر-استوکس فیلترشده که اثرات نیروهای فشاری و ویسکوزیته را شامل می‌شود:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\sigma}_{ij} - \tau_{ij}^{sgs}] \quad (۲)$$

در این معادله، $\bar{p}$ فشار فیلترشده، $\bar{\sigma}_{ij}$ تنش ویسکوز فیلترشده، τ_{ij}^{sgs} تنش‌های رینولدز زیرشبکه^۶ است که ناشی از اختلاف میان سرعت فیلترشده و سرعت واقعی است.

معادله انرژی^۷

با توجه به ماهیت واکنشی جریان، معادله انرژی برای حفظ پتانسیل حرارتی به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h})}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_{sgs}}{Pr_{sgs}} \right) \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right] + \dot{Q}_{chem} \quad (۳)$$

در این معادله، $\tilde{h}$ آنتالپی فیلترشده، $\tilde{T}$ دما فیلترشده، μ ویسکوزیته مولکولی، Pr عدد پرانتل مولکولی، μ_{sgs} ویسکوزیته گردابه‌ای زیرشبکه، Pr_{sgs} عدد پرانتل زیرشبکه، و $\dot{Q}_{chem}$ نرخ تولید حرارت ناشی از واکنش‌های شیمیایی است.

مدل‌سازی زیرشبکه^۸

از آنجایی که اثرات گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه بر انتقال تکانه و حرارت تعیین‌کننده پایداری شعله هستند، از مدل WALE برای محاسبه گرانروی گردابه‌ای (ν_{sgs}) استفاده شده است. ویژگی اصلی این مدل، توانایی آن در بازسازی خودکار رفتار لایه مرزی بدون نیاز به اصلاحات اضافی است. محاسبه گرانروی گردابه‌ای در مدل WALE از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$\nu_{sgs} = (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij} S_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (۴)$$

که در آن Δ اندازه فیلتر^۹ وابسته به اندازه سلول‌های شبکه، S_{ij} نرخ کرنش^{۱۰}، S_{ij}^d نرخ کرنش مشتق شده^{۱۱} است. S_{ij} تانسور نرخ کرنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (۵)$$

S_{ij}^d تانسور نرخ کرنش مشتق شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

^۴ Continuity Equation

^۵ Momentum Equation

^۶ SGS Reynolds Stresses

^۷ Energy Equation

^۸ SGS Modeling

^۹ Filter width

^{۱۰} Strain rate tensor

^{۱۱} Deviatoric strain rate tensor

$$S_{ij}^d = S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \quad (۶)$$

جایی که δ_{ij} دلتای کرونکر است.

همچنین از مکانیزم واکنش GRI-Mech 3.0 برای مدل سازی سینتیک شیمیایی گاز طبیعی استفاده شده است. این مکانیزم شامل ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش است و برای شبیه سازی احتراق گاز طبیعی در شرایط آشفته مناسب می باشد.

پایداری شعله

برای تبیین اثر پارامترهای بی بعد بر پایداری شعله، رابطه ای برای آستانه پایداری پیشنهاد می شود:

$$Le = \alpha/D \quad (۷)$$

افزایش رقیق سازی با بخار منجر به کاهش ضریب نفوذ (α) و تعدیل عدد لوئیس (Le) می شود. با افزایش عدد دامکولر محلی (Da) (نسبت زمان اقامت به زمان واکنش شیمیایی)، مانع از فروپاشی ساختار شعله در اثر ناپایداری D-L می شود.

ناپایداری داریوس لاندو (D-L) Darrieus-Landau

این ناپایداری ذاتی شعله های پیش مخلوط است که ناشی از انبساط حرارتی (تفاوت چگالی) در عبور از جبهه شعله است. نرخ رشد (ω) این ناپایداری در حد خطی برابر است با:

$$\omega = k \cdot S_L \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) \Phi(\theta, \rho_u/\rho_b) \quad (۸)$$

که در آن k عدد موج اختلال، S_L سرعت شعله آرام، ρ_u/ρ_b نسبت چگالی سوخت به محصولات (شدت انبساط حرارتی) و Φ تابعی که اثرات خمش شعله را نشان می دهد. رقیق سازی با بخار باعث کاهش ρ_u/ρ_b می شود، که مستقیماً ناپایداری D-L را سرکوب می کند.

ناپایداری کلین هلمهولتز (K-H) Kelvin-Helmholtz

ناپایداری لایه برشی ناشی از گرادیان سرعت میان جت مرکزی و جریان محیطی است. نرخ رشد برای یک لایه برشی با ضخامت δ به صورت زیر است:

$$\omega_{KH} \approx 0.2 \frac{\Delta U}{\delta} \quad (۹)$$

که در آن ΔU اختلاف سرعت میان دو جریان است. بخار با تغییر ویسکوزیته و پروفیل چگالی، δ (ضخامت لایه برشی) را افزایش می دهد که باعث کاهش نرخ رشد ناپایداری K-H می شود.

نسبت دبی جرمی جریان رقیق ساز به جریان سوخت

در این مطالعه، نسبت دبی جرمی جریان رقیق ساز به جریان سوخت (Steam-to-Fuel Ratio, SFR) به عنوان پارامتر بی بعد اصلی برای ارزیابی تأثیر رقیق سازی بر پایداری شعله و انتشار آلاینده ها تعریف می شود. این نسبت به صورت زیر تعریف می شود:

$$(SFR) = \frac{\dot{m}_{\text{steam}}}{\dot{m}_{\text{fuel}}} \quad (۱۰)$$

که در آن $\dot{m}_{\text{steam}}$ دبی جرمی بخار آب تزریقی به نازل مرکزی و $\dot{m}_{\text{fuel}}$ دبی جرمی سوخت (گاز طبیعی) در جریان حلقوی است. در این تحقیق، SFR در محدوده ۰ تا ۲/۵ بررسی شده است، که معادل دبی جرمی بخار از ۰ تا ۳۵.۸ g/min و دبی ثابت سوخت ۱۴/۲ g/min است.

استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج شبیه‌سازی LES به شبکه محاسباتی، تحلیل استقلال از شبکه بر روی سه شبکه با تراکم‌های متفاوت (درشت، متوسط و ریز) انجام شد. مشخصات و نتایج این تحلیل در جدول ۲ و شکل ۲ ارائه شده‌اند. با گذار از شبکه درشت به شبکه متوسط و در نهایت شبکه ریز، و با افزایش تعداد سلول‌ها از ۲.۵ میلیون به ۸/۸ میلیون، سرعت از ۹/۰۳ به ۸/۸۱ و تغییرات سرعت از ۰/۱۵ به ۰/۰۷ تغییر می‌کند. درصد خطای نسبی در شبکه ریز به ۰/۸٪ می‌رسد، که دستیابی به خطای کمتر از یک درصد، نشان‌دهنده استقلال از شبکه است. در تکمیل اعتبارسنجی و اطمینان از دقت نتایج، شاخص همگرایی شبکه (GCI) برای پارامترهای دمای اوج، غلظت NOx، و غلظت CO₂ محاسبه شده است. نتایج در جدول ۳ ارائه شده‌اند. GCI شبکه ۱٪ < برای تمام پارامترها نشان‌دهنده همگرایی مناسب و خطای گسسته‌سازی کم است. معیار پوپ ($M > 0.8$) در ۹۰٪ از دامنه محاسباتی تأیید کرد که ۸۰٪ از انرژی جنبشی آشفتنی در شبکه ریز حل شده است. بنابراین شبکه ریز با $GCI < 0.5\%$ برای تمام پارامترهای کلیدی انتخاب شد، زیرا این مقدار نشان‌دهنده استقلال کامل از شبکه و توانایی ثبت دقیق گردابه‌های کوچک مقیاس و ساختارهای پیچیده میدان دور است.

جدول ۲- بررسی استقلال از شبکه برای پارامتر تغییرات سرعت (RMS)

Table 2- Grid independence check for velocity variation parameter (RMS)

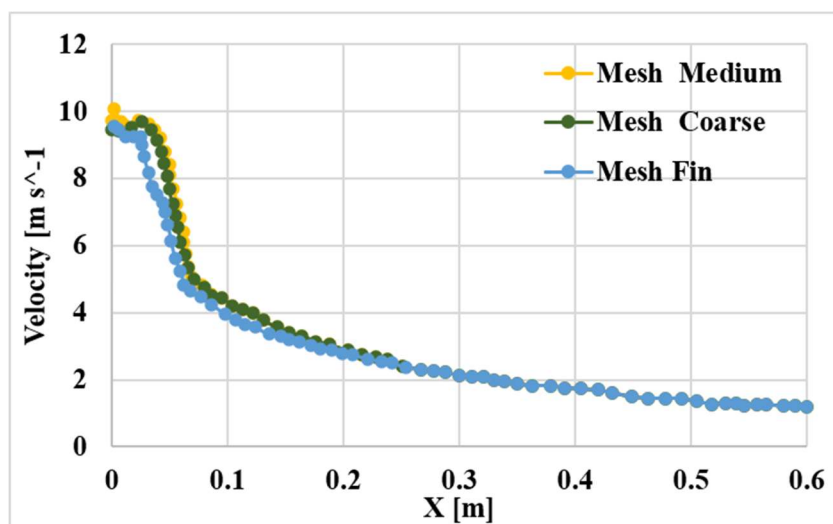
Grid Name	Number of Cells (million)	Velocity [m/s]	RMSE Velocity [%]	GCI V [%]
Coarse	2.5	9.03	-	-
Medium	5.2	8.88	3.1%	0.88
Fine	8.8	8.81	0.8%	0.22

جدول ۳- دقت مدل عددی برای پیش‌بینی دما، CO₂ و NOx

Table 3- numerical model accuracy for temperature, CO₂ and NOx prediction

Variable	Coarse	Medium	Fine	GCI [%]
Temperature [K]	1830	1845	1850	0.2
CO ₂ [g/min]	7.270	7.280	7.284	0.1
NOx [g/min]	0.00028	0.00026	0.00025	0.4

مدل عددی توسعه یافته، از طریق مقایسه مستقیم با داده‌های تجربی مشعل دانشگاه آلبرتا مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. برای اعتبارسنجی ساختار شعله، ارتفاع شعله که در شبیه‌سازی توسط سطح ایزو-دما ($T=1500\text{ K}$) تعریف شده است، با مرز کمی لومینسانس شیمیایی گونه OH در داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل قادر است ارتفاع شعله را در محدوده دقیق مقادیر تجربی برای شرایط جریان همسو بخار پیش‌بینی کند. علاوه بر این، پروفیل‌های شعاعی دما در مقطع $z=20\text{ mm}$ (نزدیک به پایه شعله) که برای محاسبه دقیق نرخ تولید NOx حیاتی است، انطباق خوبی با داده‌های تجربی داشتند. همچنین، قابلیت مدل در پیش‌بینی غلظت گونه‌های اصلی و شاخص‌های آلاینده‌گی نظیر NOx و CO₂ مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده توانایی مدل در بازسازی سینتیک شیمیایی و انتقال جرم است.

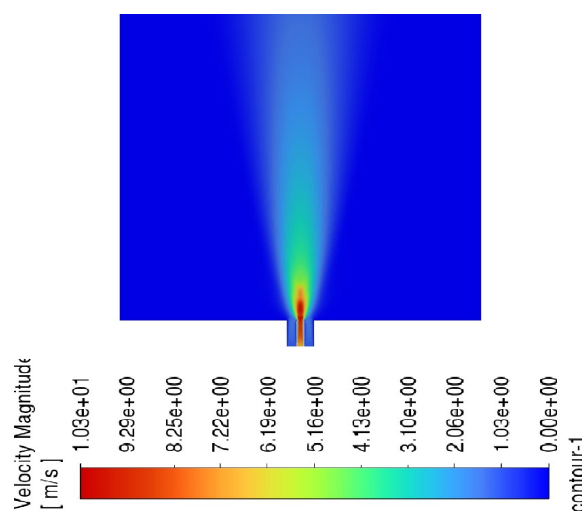


شکل ۲- مقایسه بیشینه سرعت در سه شبکه با چگالی سلولی مختلف در خط محوری نازل

Figure 2- Comparison of the maximum velocity in three grids with different cell density in the axial line of the nozzle

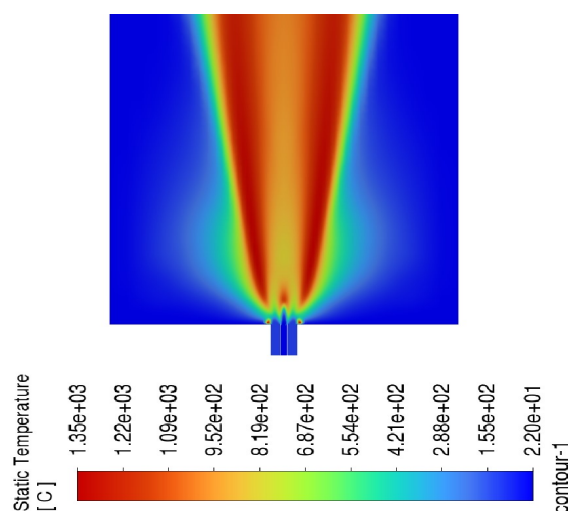
نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از شبیه‌سازی LES، تأثیر نرخ جریان رقیق‌ساز (SFR) بر پایداری دینامیکی و رفتار آکوستیکی و خروجی‌های شیمیایی و حرارتی مشعل را آشکار می‌سازد. شکل ۳ کانتورهای سرعت جریان سوخت و بخار در فضای محاسباتی استوانه‌ای سه بعدی و همچنین شکل ۴ تحلیل کانتورهای دمای جریان واکنشی، اطلاعات دقیقی درباره الگوی توزیع جریان و نواحی واکنش در اختیار قرار می‌دهند.



شکل ۳ - کانتور اندازه سرعت و خطوط جریان در خروجی جت‌های بخار مرکزی و سوخت حلقوی

Figure 3- Velocity-magnitude contours and streamlines at the outlet of the central steam jet and annular fuel jet.



شکل ۴ - کانتور دمای لحظه‌ای میدان جریان واکنشی در دامنه محاسباتی

Figure 4- Instantaneous temperature contours of the reacting flow in the computational domain.

نوسانات پارامترهای کلیدی ترمودینامیکی و سیالاتی، از جمله عدد پرانتل مولکولی، عمدتاً در فرکانس ۲۰ هرتز متمرکز هستند که نشان‌دهنده تعامل پیچیده میان فرآیندهای انتقال حرارت و مومنتوم است. همچنین نوسانات چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه ارتباط مستقیمی با تغییرات فشار و دما دارند؛ پدیده‌هایی که در نواحی بحرانی، به‌ویژه در پایه شعله و دهانه نازل مشعل، به اوج خود می‌رسند. تحلیل تبدیل فوریه سریع (FFT) بر روی سیگنال‌های فشار (p') و سرعت (u') نشان می‌دهد که در نرخ‌های پایین رقیق‌ساز، شعله دچار نوسانات دوره‌ای شدیدی است که بیانگر رفتار چرخه حدی^{۱۲} می‌باشد. عامل اصلی بروز این ناپایداری، کوپلینگ قوی میان ناپایداری‌های آیرودینامیکی و حرارتی، نظیر ناپایداری داریوس-لاندو^{۱۳} (D-L) و رزونانس آکوستیک در محفظه احتراق است که می‌تواند پایداری و کارایی سیستم را تهدید می‌کند. با این حال، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش نرخ جریان بخار ($SFR > 1.0$)، تغییرات قابل توجهی در رفتار سیستم رخ می‌دهد. بررسی چگالی طیفی توان (PSD) گویای پهن شدن قله‌های طیفی و کاهش دامنه فرکانس‌های غالب است؛ پدیده‌ای که تأیید می‌کند حضور بخار به عنوان یک مکانیزم میراکننده (Damping) عمل کرده و سیستم را از وضعیت بحرانی ناپایداری ترموآکوستیک به سمت رژیم آشفته با نوسانات کنترل‌شده و پایدار سوق می‌دهد.

برای بررسی دقیق‌تر این مکانیزم‌ها، شکل ۵ نمودار زمانی و تحلیل طیفی چگالی را در ارتباط با ناپایداری‌های D-L به نمایش می‌دهد. مکمل این تحلیل در شکل ۶ ارائه شده که با نمایش نوسانات عدد پرانتل در لبه‌ها و دهانه نازل، تأثیر تغییرات ترکیب شیمیایی و نوسانات دمایی را بر فرآیندهای انتقال حرارت و مومنتوم تبیین می‌کند. اثر رقیق‌سازی با بخار بر پارامترهای فیزیکی و پایداری شعله در جدول ۴ به‌صورت کمی خلاصه شده است. با افزایش نسبت دبی جریان بخار به سوخت SFR ، تغییرات هدمندی در پارامترهای بی‌بعد رخ می‌دهد:

- عدد لوئیس (Le)، به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی ویژه و تغییر در ضرایب نفوذ، کاهش می‌یابد.
- عدد دامکولر (Da)، به سبب افزایش زمان اقامت جریان (τ_{flow})، افزایش می‌یابد.
- نسبت (ρ_u/ρ_b)، به دلیل کاهش چگالی گاز تازه (ρ_u)، روند نزولی دارد.

این تغییرات، مکانیزم‌های کنترل ناپایداری را فعال می‌کنند؛ به نحوی که با کاهش نسبت چگالی، نرخ رشد ناپایداری D-L (ω_{D-L}) سرکوب شده و با افزایش ضخامت لایه برشی (δ) ناشی از تغییرات دبی، نرخ رشد ناپایداری کلون-هلمهولتز (ω_{KH}) نیز کاهش می‌یابد. در شکل ۷، برای اثبات کاهش کوپلینگ ترموآکوستیک، طیف فرکانسی فشار و نرخ آزادسازی حرارت (HRR)

¹² Limit-Cycle

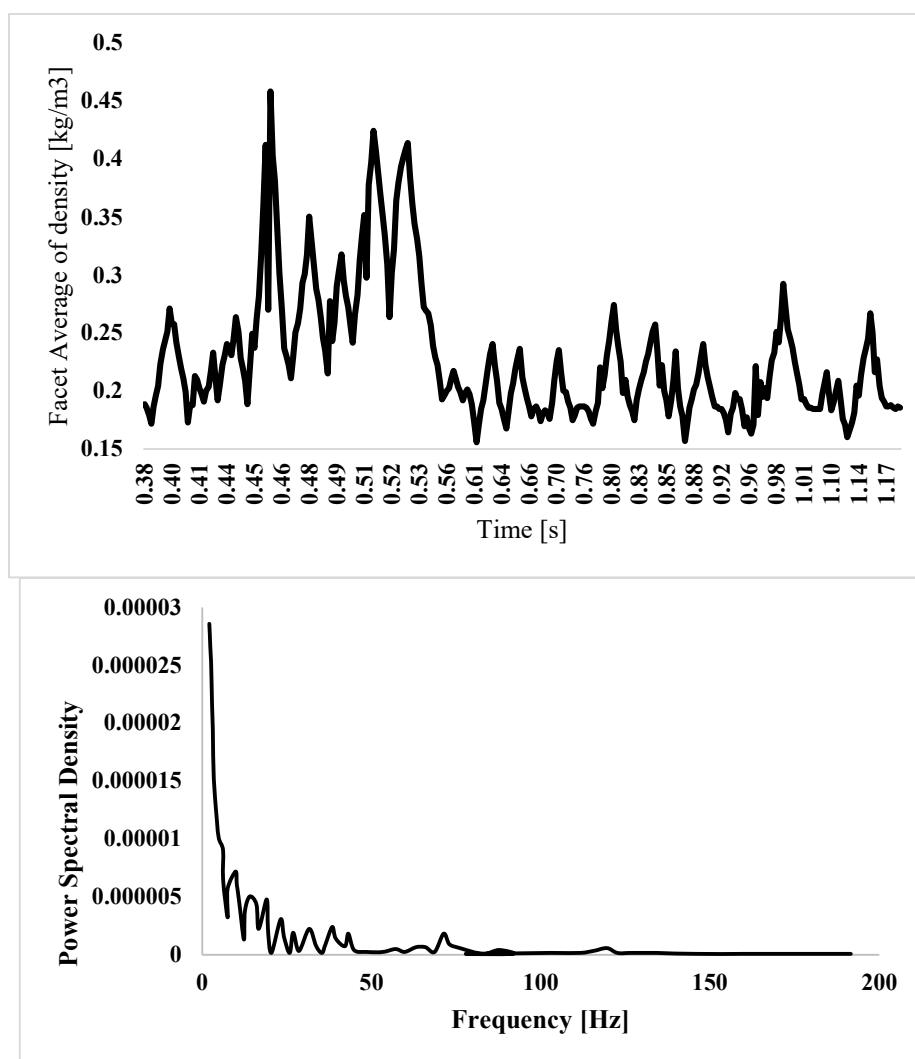
¹³ Darrieus-Landau

مقایسه شده است. در حالت بدون رقیق سازی ($SFR = 0$)، نوسانات با دامنه بالا و فرکانس غالب ۲۰ هرتز، نشان دهنده کوپلینگ قوی و رفتار چرخه حدی است؛ در حالی که در $SFR = 2.5$ ، قله‌ها پهن‌تر شده و دامنه آن‌ها کاهش می‌یابد، که نشان دهنده کاهش کوپلینگ ترموآکوستیک است.

جدول ۴- مقایسه پارامترهای ناپایداری شعله با تغییرات نسبت دبی بخار به سوخت (SFR)

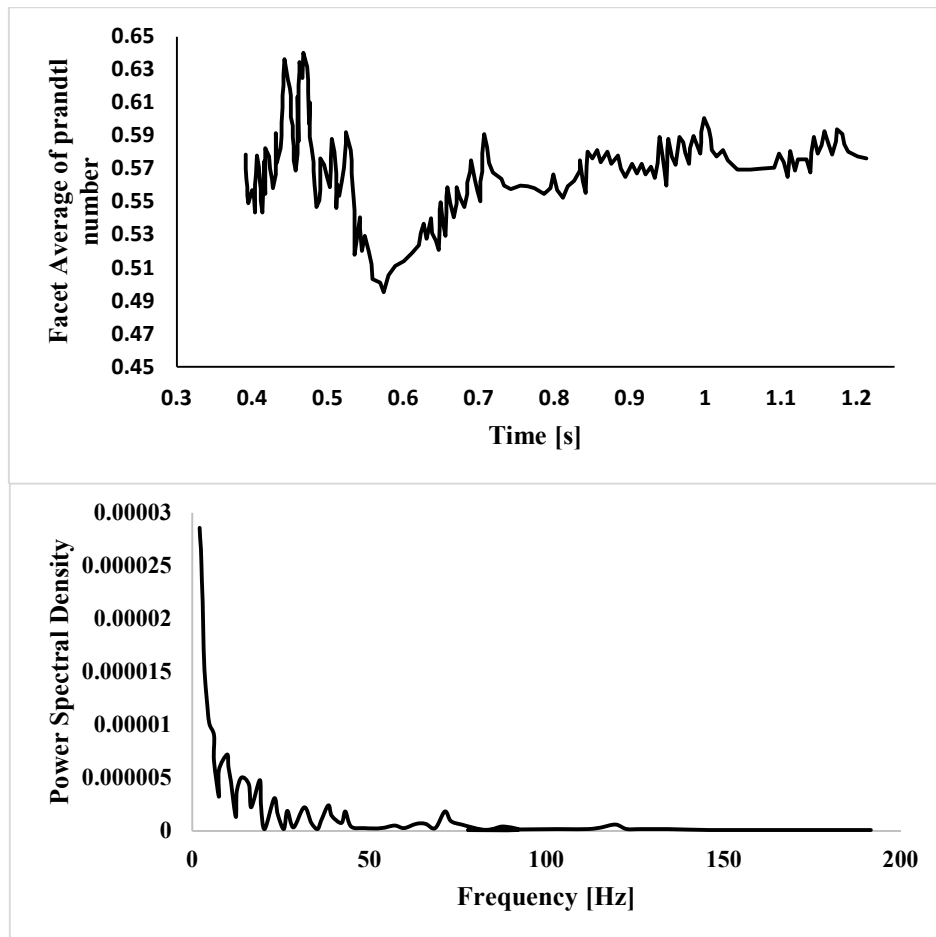
Table 4 - Comparison of flame instability parameters with variations in the steam-to-fuel mass flow rate ratio (SFR)

SFR	Le	Da	ρ_u/ρ_b	$\omega_{D-L}(1/s)$	$\Delta U(m/s)$	$\delta(mm)$	$\omega_{KH}(1/s)$
0	1.12	0.45	7.2	1250	12.0	1.2	20.0
1.6	1.08	0.52	6.8	1120	11.5	1.3	17.7
1.9	1.02	0.68	6.1	950	10.8	1.5	14.4
2.1	0.98	0.75	5.7	820	10.2	1.7	12.0
2.4	0.93	0.85	5.2	680	9.5	2.0	9.5
2.5	0.90	0.90	5.0	620	9.0	2.1	8.6



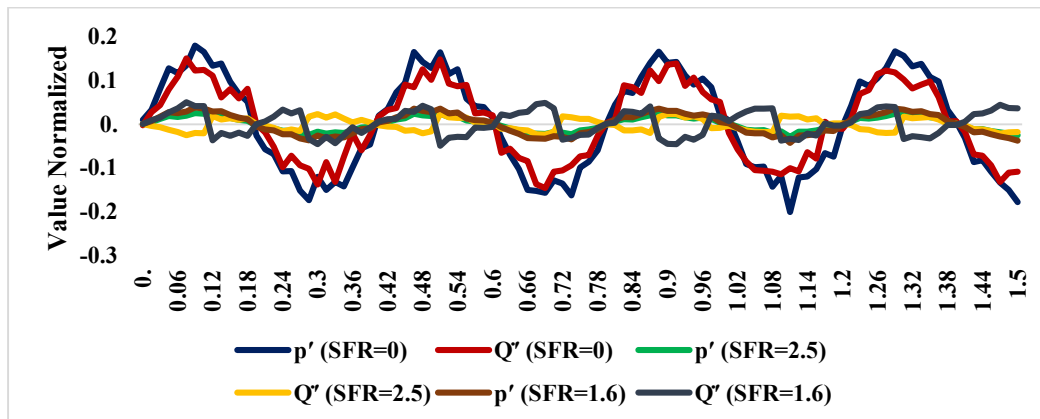
شکل ۵- نمودار زمانی و تحلیل طیف فرکانسی چگالی در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل

Figure 5- Time diagram and analysis of density frequency spectrum in the combustion flow instability domain near the edges and the burner nozzle opening



شکل ۶- نمودار زمانی و تحلیل طیف فرکانسی عدد پرانتل در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل

Figure 6- Time diagram and analysis of Prandtl number frequency spectrum in the combustion flow instability domain near the edges and the burner nozzle opening



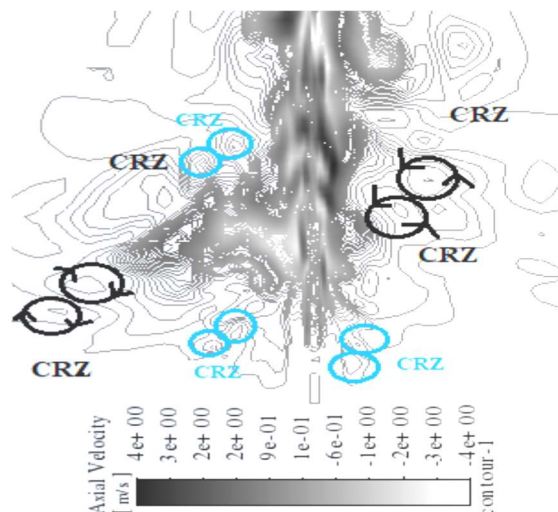
شکل ۷- مقایسه نمودار زمانی نوسانات فشار و نرخ آزادسازی حرارت با تغییرات دبی جریان رقیق ساز (SFR=0, SFR=1.6, SFR=2.5)

Figure 7- Comparison of the time diagram of pressure fluctuations and Heat release rate with changes in the mass flow rate of the diluent stream (SFR=0, SFR=1.6, SFR=2.5).

دبی جرمی نازل مرکزی نقشی تعیین کننده در شکل دهی میدان گردابه دارد. شعله‌ی آشفته در این شرایط مقاومت قابل توجهی در برابر فوران از خود نشان می‌دهد که علت آن حفظ عدد دامکولر بالا ($Da = \tau_{flow}/\tau_{chem}$) در ناحیه بازچرخش

است. مقادیر بالای دامکولر موجب می‌شود که مقیاس‌های زمانی شیمیایی (τ_{chem}) به طور قابل توجهی کوتاه‌تر از مقیاس‌های زمانی جریان آشفته محلی (τ_{flow}) باقی بمانند و از خاموشی موضعی در طول نوسانات گذرا در نسبت هم‌ارزی اولیه جلوگیری شود.

در تحلیل‌های عددی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) به خوبی دینامیک این جریان را آشکار می‌سازد. مطابق شکل ۸، مناطق بازچرخش جریان گازهای داغ در فضای محاسباتی استوانه‌ای به تصویر کشیده شده است که نشان می‌دهد چگونه تغییرات دبی جرمی بخار خروجی از نازل مرکزی، الگوهای جریان و میدان‌های سرعت را تغییر می‌دهد.



شکل ۸ - کانتورهای مناطق بازچرخش جریان گازهای حاصل از احتراق در فضای محاسباتی استوانه‌ای مشعل (نتایج شبیه‌سازی LES).

Figure 8- Recirculation zones of combustion gas flow in the cylindrical computational space of the burner in LES simulation

در ادامه بررسی عملکرد سیستم، رقیق‌سازی جریان از طریق تنظیم دقیق دما و کاهش دمای اوج شعله، به عنوان راهکاری کلیدی برای کنترل انتشار آلاینده‌های خطرناکی نظیر اکسیدهای نیتروژن (NO_x) مطرح می‌شود. با این حال، دستیابی به این هدف مستلزم رعایت تعادلی دقیق است؛ چرا که رقیق‌سازی بیش از حد می‌تواند پیامدهای نامطلوبی از قبیل افزایش فرار سوخت (انتشار هیدروکربن‌های نسوخته) و کاهش دی‌اکسید کربن CO_2 یا بروز خاموشی موضعی شعله را به همراه داشته باشد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های LES و شاخص‌های تجربی (مربوط به نرخ تبدیل و انتشار آلاینده‌ها) که با اعمال تغییرات در دبی جرمی بخار (SFR) به دست آمده‌اند، در جدول ۵ و شکل ۹ ارائه شده‌اند. این داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که چگونه تنظیم نسبت دبی بخار به سوخت بر عملکرد نهایی مشعل تأثیر می‌گذارد. در این میان، تحلیل عدد لوئیس (Le) نشان می‌دهد که تغییرات در کوپلینگ انتشار حرارتی، مورفولوژی جبهه شعله را دگرگون می‌کند. در نواحی که $Le \neq 1$ باشد، انتشار تفاضلی گرما و جرم، سرعت شعله محلی را تغییر داده و پتانسیل بروز ناپایداری‌های انتشار حرارتی را افزایش می‌دهد.

به منظور درک عمیق‌تر مکانیزم‌های کنترل پایداری و آلاینده‌گی، جدول ۶ به بررسی کیفی اثر پارامترهای کلیدی نظیر نرخ رقیق‌سازی، عدد دامکولر (Da)، نسبت انبساط حرارتی (α) و نقش ناحیه گردش مرکزی (CRZ) می‌پردازد. این جدول تبیین می‌کند که چگونه هر یک از این پارامترها با تغییر در نفوذ حرارتی-جرمی، ظرفیت گرمایی ویژه و زمان‌های اقامت واکنش، نقش مستقیمی در پایداری شعله و کاهش NO_x و CO_2 ایفا می‌کنند.

علاوه بر این، شکل ۱۰ با نمایش کانتور شدت تشعشع لحظه‌ای در فضای محاسباتی استوانه‌ای سه بعدی و مقایسه آن با تصویربرداری‌های تجربی، تغییرات ساختاری جریان گازهای حاصل از احتراق را در شرایط مختلف نسبت بخار به سوخت، به خوبی به نمایش می‌گذارد. تلفیق این راهکارهای علمی و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی ذکر شده، مشعل‌های صنعتی را قادر می‌سازد

تا ضمن حفظ پایداری عملیاتی، به‌طور همزمان به افزایش راندمان احتراق و کاهش میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی دست یابند. نقش ساختاری ناحیه گردش مرکزی (CRZ) در حضور جریان بخار همسو برای پایداری مشعل حیاتی است. این ناحیه با حفظ محصولات احتراق داغ و رادیکال‌های فعال، بازگشت کارآمد آن‌ها به ریشه شعله را موجب می‌شود. این فرآیند، فراتر از افزایش زمان اقامت، با تزریق مداوم گرما و گونه‌های فعال، حساسیت جبهه شعله را به تغییرات دبی رقیق کننده کاهش داده و حاشیه پایداری سیستم را گسترش می‌دهد. این قابلیت، جریان بخار همسو را به راهکاری قدرتمند برای جلوگیری از ورود به ناحیه نوسانات چرخه حدی (LCO) و دستیابی همزمان به راندمان بالا و کاهش آلاینده‌گی تبدیل کرده است.

جدول ۵- مقایسه نرخ انتشار آلاینده‌ها NOx و CO₂ در نتایج مدل عددی (LES) و تجربی (EXP) با تغییرات نسبت دبی بخار به سوخت (SFR)

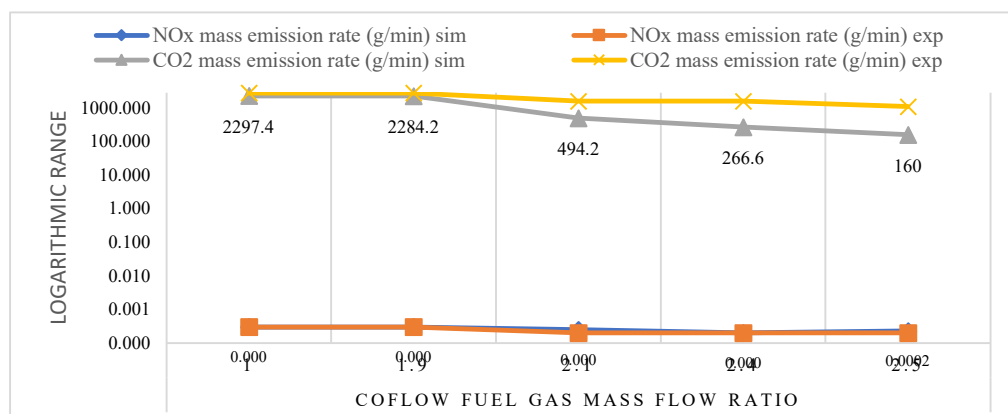
SFR	NOx mass emission rate [g/min]		CO ₂ mass emission rate [g/min]		Carbon Conversion Efficiency [%]	
	LES	EXP	LES	EXP	LES	EXP
1.6	0.0003	0.0003	32	39	88	100
1.9	0.0003	0.0003	31	38	87	98
2.1	0.00025	0.0002	7	8.5	14	22
2.4	0.0002	0.0002	4	4.5	4	10
2.5	0.000225	0.0002	2	2.5	2	5

جدول ۶- روند کیفی اثر پارامترهای کلیدی بر پایداری شعله و انتشار آلاینده‌ها

Table 6 - Qualitative trend of the effect of key parameters on flame stability and pollutant emissions

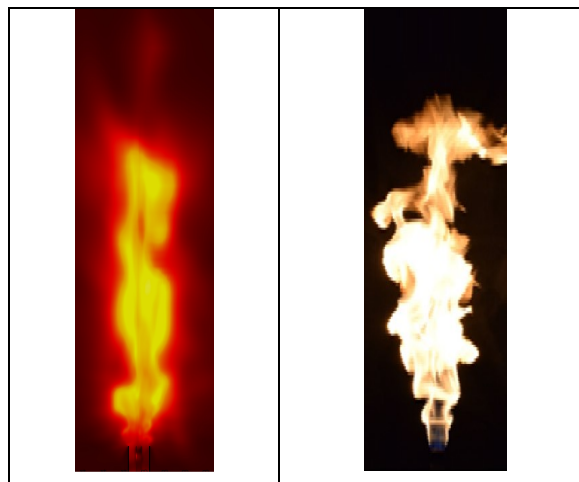
Parameter	Effect on Stability	Effect on NO _x	Effect on CO ₂	Physical Mechanism
Dilution Rate	↑ ↑	↓ ↓	↑ ↓	Thermal mass increase & T peak reduction
Lewis Number (Le)	↓ ↓	↓ ↓	↑	Thermal-diffusive coupling
Thermal Expansion (α)	↑ ↑	↓ ↓	↓	Flame speed-flow interaction
Damköhler Number (Da)	↑ ↑	↓ ↓	↓	Chemical reaction-residence time ratio
CRZ	↑ ↑	↓ ↓	↓	Radical entrainment & heat recirculation

Note: ↑ ↑ = Strong positive effect, ↑ = Moderate positive effect, ↓ ↓ = Strong negative effect, ↓ = Moderate negative effect.



شکل ۹- مقایسه شاخص انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق NOx و CO₂ بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی با تغییرات نسبت دبی جرمی بخار به سوخت [۳۱].

Figure 9- Emission index of combustion pollutants NOx and CO₂ resulting from changes in the mass flow rate of steam to fuel ratio [31].



شکل ۱۰ - مقایسه کانتور شدت تشعشع لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق در فضای محاسباتی استوانه‌ای مشعل و تصویربرداری لحظه‌ای جریان ناشی از تغییرات نسبت دبی جرمی بخار به سوخت [۳۱].

Figure 10- Comparison of instantaneous radiation intensity contour of the combustion gas flow in the cylindrical computational space of the burner and instantaneous imaging of the flow resulting from steam-to-fuel ratio changes [31].

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، نقش رقیق‌سازی با بخار را بر پایداری و مشخصات شعله‌های غیرپیش‌مخلوط هم‌مرکز، با استفاده از تغییر نرخ جرمی بخار (SFR) به عنوان متغیر کنترلی مستقل، کمی‌سازی کرده است. داده‌های عددی نشان می‌دهد که افزایش SFR به‌طور مستقیم منجر به کاهش دمای اوج شعله و تغییر در تعاملات حرارتی-نفوذی می‌گردد. نتایج کمی به‌دست‌آمده بیانگر آن است که با تغییر نرخ SFR در بازه عملیاتی مورد بررسی، پارامترهای بی‌بعد (Da , Le) تغییر یافته و به‌تبع آن، جبهه شعله و نرخ تولید آلاینده‌ها تعدیل می‌شود.

مطابق یافته‌های کمی حاصل از تحلیل‌های طیفی و زمانی، در مقادیر پایین رقیق‌ساز، نوسانات در فرکانس ۲۰ هرتز منجر به تشکیل چرخه حدی (LCO) می‌شود. در مقابل، شواهد نشان می‌دهد که با افزایش $SFR > 1.0$ ، افزایش عدد دامکولر (Da) و تغییر در ضریب نفوذ حرارتی (α)، سیستم از رژیم ناپایدار به سمت جریانی با نوسانات کنترل‌شده و میرای آکوستیک سوق می‌یابد. این داده‌ها همچنین یک محدوده پایداری را مشخص می‌کنند؛ به طوری که رقیق‌سازی فراتر از آستانه ($SFR > 2.1$) اگرچه میزان NO_x را کاهش می‌دهد، اما با افزایش خطر خاموشی موضعی، افزایش هیدروکربن نسوخته و کاهش (CO_2) همراه است. در نهایت، تحلیل‌های عددی تأیید می‌کنند که تغییر در پایداری سیستم ناشی از اثر میراکنندگی بخار بر لایه برشی و تقویت ناحیه گردش مرکزی (CRZ) است. این یافته‌ها مرز میان پایداری عملیاتی و ناپایداری‌های نفوذی را به‌صورت کمی تبیین کرده و چارچوبی دقیق برای بهره‌برداری از بخار ارائه می‌دهند. با توجه به یافته‌های این پژوهش، جهت مطالعات و توسعه‌های آتی پیشنهاد می‌شود، نرخ جریان رقیق‌ساز با استفاده از نقشه‌های پایداری مبتنی بر اعداد بی‌بعد (مانند رینولدز، لویی و دامکولر) به منظور دستیابی به نقاط کارکردی بهینه‌سازی شود. پتانسیل کنترل فعال ناپایداری‌ها از طریق تزریق بخار پالسی جهت تعدیل نوسانات ترموآکوستیک بررسی شود. سیستم‌های کنترل بازخوردی بر اساس شاخص‌های نوسانی مانند عدد پرانتل یا تغییرات چگالی در مطالعات تجربی و عددی آتی توسعه یافته و ارزیابی شود. هندسه مشعل و نازل‌های هم‌محور جهت تقویت ناحیه گردش مرکزی (CRZ) و افزایش حاشیه پایداری شعله در حضور جریان سطوح بالای رقیق‌سازی بهبود و توسعه یابد.

منابع

- [1] H. V. Farahani and A. M. Tahsini, "Equivalence ratio and fuel type impacts on limit cycle and beating oscillations in combustion instability," *International Journal of Engine Research*, vol. 2026, p. 14680874251401336, 2026.
- [2] Z. Liu, Y. Xiong, X. Wei, N. Yang, Y. Ben, S. Zhang, and X. Xu, "Flame stability and emissions of a multi-nozzle array combustor fueled hydrogen enriched fuel under fuel staging conditions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 102, pp. 996–1009, 2025.
- [3] Z. Wan, J. Niu, T. Huang, Y. Liu, Y. Sun, C. Yang, and Y. Chen, "Study on the mechanism of flame instability and pollutant formation in porous diffusion combustion of hydrogen enriched natural gas for domestic burner," *Fuel*, vol. 398, p. 135546, 2025.
- [4] P. Clavin and G. Searby, *Combustion Waves and Fronts in Flows*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [5] Q. Yao, O. Shi, L. Song, W. Jin, J. Li, H. Liu, and L. Yuan, "An experimental study of thermoacoustic instabilities in a RP-3 fueled multi-swirl stabilized lean direct injection combustor," *Applied Thermal Engineering*, vol. 255, p. 124034, 2024.
- [6] L. Ji, J. Wang, W. Zhang, Y. Wang, Z. Huang, and X. Bai, "Structure and thermoacoustic instability of turbulent swirling lean premixed methane/hydrogen/air flames in a model combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 60, pp. 890–901, 2024.
- [7] C. Lu, L. Zhang, C. Xing, L. Liu, and P. Qiu, "Effects of characteristic diameter, steam dilution, and equivalence ratio on NO formation for a H₂/Air micromix design," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 61, pp. 1133–1141, 2024.
- [8] J. Gaucherand, D. Laera, C. Schulze-Netzer, and T. Poinso, "Intrinsic instabilities of hydrogen and hydrogen/ammonia premixed flames: Influence of equivalence ratio, fuel composition and pressure," *Combustion and Flame*, vol. 256, p. 112986, 2023.
- [9] J. Rodriguez Camacho, D. Le, J. Blust, and J. O'connor, "Impact of diluents on flame stability with blends of natural gas and hydrogen," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 147, no. 1, p. 011017, 2025.
- [10] S. Izadi, O. Kislat, J. Zanger, H. Seliger-Ost, P. Kutne, and M. Aigner, "Investigating the impact of steam enhancement on combustion in a swirl-assisted jet-stabilized gas turbine combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 147, no. 1, p. 011001, 2025.
- [11] A. Kavooosi and A. Keshavarz, "Simulating Natural Gas Combustion with Steam Injection to Reduce NO_x Emissions," *Cleaner Chemical Engineering*, p. 100212, 2025.
- [12] R. Palulli, K. Zhang, S. Dybe, M. Yasir, C. O. Paschereit, and C. Duwig, "Investigation of NO formation in non-premixed, swirl-stabilised, wet hydrogen/air gas turbine combustor," *Fuel*, vol. 378, p. 132943, 2024.
- [13] S. Tao, Z. Li, X. Li, J. Xu, E. Luo, and G. Chen, "On the nonlinear dynamic characteristics of forced acoustic oscillations in a heat-driven thermoacoustic engine," *Nonlinear Dynamics*, vol. 112, no. 11, p. 9001, 2024.
- [14] G. Troiani, P. E. Lapenna, R. Lamioni, and F. Creta, "Self-wrinkling induced by Darrieus-Landau instability in turbulent premixed Bunsen flames from low to moderately high Reynolds numbers," *Physical Review Fluids*, vol. 7, no. 5, p. 053202, 2022.
- [15] M. Elkelawy, E. A. El Shenawy, H. A. E. Bastawissi, I. A. Mousa, and M. M. Abdel-Raouf Ibrahim, "Analyzing the influence of design and operating conditions on combustion and emissions in premixed turbulent flames: A comprehensive review," *Journal of Engineering Research*, vol. 8, no. 1, p. 34, 2024.
- [16] P. Palies, "The flame displacement speed: a key quantity for turbulent combustion and combustion instability," *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, vol. 14, no. 1-2, pp. 4–16, 2022.
- [17] Y. Zhou, *Hydrodynamic Instabilities and Turbulence: Rayleigh–Taylor, Richtmyer–Meshkov, and Kelvin–Helmholtz Mixing*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2024.
- [18] C. A. Fugger, R. A. Forlines, B. T. Paxton, A. W. Caswell, and B. A. Rankin, "Freestream and shear layer effects in bluff-body-stabilized turbulent premixed flames," *Combustion and Flame*, vol. 263, p. 113378, 2024.
- [19] B. Barker, J. B. Bell, and A. L. Garcia, "Fluctuating hydrodynamics and the Rayleigh–Plateau instability," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 120, no. 30, p. e2306088120, 2023.
- [20] H. Dai, J. Wang, X. Cai, S. Su, H. Zhao, and Z. Huang, "Lewis number effects on laminar and turbulent expanding flames of NH₃/H₂/air mixtures at elevated pressures," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 2, pp. 1689–1697, 2023.
- [21] L. Berger, M. Grinberg, B. Jürgens, P. E. Lapenna, F. Creta, A. Attili, and H. Pitsch, "Flame fingers and interactions of hydrodynamic and thermodiffusive instabilities in laminar lean hydrogen flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 2, pp. 1525–1534, 2023.
- [22] Y. Liu, P. Liu, Z. Wang, W. Ao, G. Xu, and Y. Guan, "Numerical investigation of combustion instability in a liquid rocket engine: Interaction effect between hydrodynamics and acoustic mode," *Aerospace Science and Technology*, vol. 143, p. 108711, 2023.
- [23] Y. Guan, B. Yin, Z. Yang, and L. K. B. Li, "Forced synchronization of self-excited chaotic thermoacoustic oscillations," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 982, p. A9, 2024.
- [24] C. Liu, H. Yang, C. Ruan, L. Yu, and X. Lu, "Influence of swirl intensity on combustion dynamics and emissions in an ammonia-enriched methane/air combustor," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 3, 2024.
- [25] J. Cheng and B. Zhang, "Experimental study on the explosion characteristics of ammonia-hydrogen-air mixtures," *Fuel*, vol. 363, p. 131046, 2024.
- [26] A. G. H. Saif, M. I. Ahmed, Q. Talal, and E. M. A. Mokheimer, "Effects of hydrogen enrichment on flame stability, thermoacoustic oscillations, and combustion characteristics in premixed propane swirl flames: An experimental study," *Fuel*, vol. 404, p. 136373, 2026.

- [27] P. E. Buschmann, N. A. Worth, and J. P. Moeck, "Thermoacoustic oscillations in a can-annular model combustor with asymmetries in the can-to-can coupling," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, pp. 5707–5715, 2023.
- [28] H. S. Gopalakrishnan, A. Gruber, and J. P. Moeck, "Computation and prediction of intrinsic thermoacoustic oscillations associated with autoignition fronts," *Combustion and Flame*, vol. 254, p. 112844, 2023.
- [29] P. Palies, "Flow and flame mechanisms for swirl-stabilized combustors," *Aerospace*, vol. 12, no. 5, p. 430, 2025.
- [30] R. Guo, Y. Su, and Y. Jiang, "Large eddy simulation of turbulent swirl-stabilized flames using the front propagation formulation: impact of the resolved flame thickness," *arXiv preprint arXiv:2602.21940*, 2026.
- [31] Ahsan, A., Aydin, M., Mansour, M. S., & Al-Qaydi, A. A., Quantifying the carbon conversion efficiency and emission indices of a lab-scale natural gas flare with internal coflows of air or steam, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 103 133–142, 2019.