

Investigation of Combustion Instability in a Co-Flow Burner with Fuel and Air

Hamed Helmi, Younes Bakhshan^{*} , Pouyan Adibi

Mechanical Engineering Department, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History

Received: February 26, 2026
Revised: July 19, 2026
Accepted: July 20, 2026
ePublished: September 03, 2026

ABSTRACT

This paper introduces the multiscale coherent reaction front (MSRC) model, a predictive framework for the analysis of hydrodynamic and thermoacoustic instabilities in co-flow fuel-air burners. The MSRC model integrates nonlinear Ginzburg-Landau dynamics with acoustic coupling and large eddy simulation (LES). Model validation with experimental burner data from the University of Alberta (including flame structure, temperature, species concentration, velocity and vorticity fluctuations, and pollutant emissions) has been performed and confirms its accuracy. The MSRC framework captures complex transitions from stable combustion to limited cyclic oscillations (LCO) and chaotic behavior. Analysis of velocity and vorticity fluctuations reveals low-frequency (<200 Hz) coherent structures in the nozzle that correlate with the acoustic modes of the system and confirm shear layer instability. The model also distinguishes high-frequency shear layer instabilities (at high Reynolds numbers) from thermoacoustic coupling. Finally, it is shown that optimization of the aligned airflow can stabilize combustion and reduce pollutant emissions. These results provide a valuable tool for the design of stable and low-emission combustion systems.

Keywords: Combustion Instability, Co-Flow Burner, Air Dilution Flow, Large Eddies, Kelvin-Helmholtz Instability.

How to cite this article

Helmi H, Bakhshan Y, Adibi P, Investigation of Combustion Instability in a Co-Flow Burner with Fuel and Air. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(11):853-864.

*Corresponding author's email: Bakhshan@hormozgan.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-8066-9817



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی ناپایداری احتراق در مشعل جریان همسو سوخت و هوا

حامد حلمی، یونس بخشان* ^{ib}، پویان ادیبی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

این مطالعه، مدل جبهه واکنش همدوس چندمقیاسی (MSRC) را معرفی می‌کند، یک چارچوب پیش‌بینی‌کننده برای تحلیل ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و ترموآکوستیک در مشعل‌های سوخت-هوای جریان همسو بطوریکه مدل MSRC، دینامیک غیرخطی گینزبورگ-لاندائو را با کوپلینگ آکوستیک و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) ادغام می‌کند. اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی مشعل دانشگاه آبرتا (شامل ساختار شعله، دما، غلظت گونه‌ها، نوسانات سرعت و گردابه، و انتشار آلاینده‌ها) انجام شده است و دقت آن را تأیید می‌کند. چارچوب MSRC گذارهای پیچیده از احتراق پایدار به نوسانات چرخه‌ای محدود (LCO) و رفتار آشوبناک را ثبت می‌کند. تحلیل نوسانات سرعت و گردابه، ساختارهای همدوس با فرکانس پایین ($> 200 \text{ Hz}$) را در نازل نشان می‌دهد که با مدهای آکوستیک سیستم همبستگی دارند و ناپایداری لایه برشی را تأیید می‌کنند. مدل همچنین ناپایداری‌های لایه برشی فرکانس بالا (در اعداد رینولدز بالا) را از کوپلینگ ترموآکوستیک متمایز می‌کند. در نهایت، نشان داده می‌شود که بهینه‌سازی جریان هوای همسو می‌تواند احتراق را تثبیت کرده و انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد. این نتایج، ابزاری ارزشمند برای طراحی سیستم‌های احتراق پایدار و کم‌انتشار فراهم می‌کند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

کلیدواژه‌ها: ناپایداری احتراق، مشعل جریان همسو، جریان رقیق‌ساز هوا، گردابه‌های بزرگ، ناپایداری کلونین-هلمهولتز.

نحوه ارجاع به این مقاله

حلمی حامد، بخشان یونس، ادیبی پویان، بررسی ناپایداری احتراق در مشعل جریان همسو سوخت و هوا، مهندسی مکانیک مدرس. ۸۷۴-۱۴۰۵: ۲۶(۱۱): ۸۵۳

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Bakhshan@hormozgan.ac.ir

*شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۹۸۱۷-۸۰۶۶-۰۰۰۲-۰۰۰۰-۰۰۰۰



۱- مقدمه

سیستم‌های احتراق، ستون فقرات ضروری تبدیل انرژی را تشکیل می‌دهند و انرژی لازم را برای زیرساخت‌های حیاتی از توربین‌های گازی صنعتی و مشعل‌های پالایش گرفته تا کوره‌های فرآوری و واحدهای گرمایش خانگی فراهم می‌کنند. در این چشم‌انداز، مشعل‌های جریان همسو که توسط یک جت سوخت مرکزی احاطه شده توسط یک جریان اکسیدکننده هم محور تعریف می‌شوند به دلیل استحکام عملیاتی ذاتی، ویژگی‌های ایمنی برتر و انعطاف‌پذیری گسترده سوخت، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پیکربندی به طور گسترده در محیط‌های صنعتی مورد نیاز به کار گرفته می‌شود و با موفقیت ترکیبات سوخت متنوع را در حالی که احتراق پایدار را در رژیم‌های جریان متنوع حفظ می‌کند، در خود جای می‌دهد. با این حال، ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و ترموآکوستیک (مثل نوسانات فشار، سوسو زدن شعله، و بازگشت شعله) کارایی و ایمنی این سیستم‌ها را تهدید می‌کنند. این ناپایداری‌ها صرفاً اختلالات عملیاتی نیستند؛ آنها به شدت یکپارچگی سیستم را به خطر می‌اندازند و به صورت نوسانات فشار مخرب، سوسو زدن شعله و خطرات ناشی از بازگشت شعله یا انفجار فاجعه‌بار ظاهر می‌شوند. عواقب آن شامل کاهش راندمان حرارتی ناشی از اکسیداسیون ناقص، افزایش چشمگیر در انتشار آلاینده‌های بحرانی (مانند CO_2 و NO_x و دوده) به دلیل خاموشی موضعی و خستگی مکانیکی پیشرونده ناشی از نوسانات فشار با دامنه بالا است.

دلایل ریشه‌ای این ناپایداری‌های مضر ذاتاً پیچیده و چندمقیاسی هستند که شامل یک اتصال قوی و متقابل بین دینامیک سیالات، نوسانات آزادسازی حرارت موضعی و مکانیسم‌های بازخورد صوتی می‌شوند. ویژگی تعیین‌کننده پیکربندی جریان همسو - برهمکنش لایه برشی بین سوخت مرکزی و هوای همسو - ناپایداری‌های هیدرودینامیکی خاصی را ایجاد می‌کند، مانند مواردی که توسط دینامیک کلون-هلمهولتز کنترل می‌شوند. در حالی که مدل‌های پایداری خطی سنتی، مانند نظریه‌های داریوس-لاندائو (DL) و کلون-هلمهولتز (KH)، بینش بنیادی در مورد شروع ناپایداری ارائه می‌دهند، اما اساساً برای پیش‌بینی رفتار عملیاتی واقع‌بینانه ناکافی هستند. محیط‌های احتراق معاصر تحت سلطه گذارهای غیرخطی هستند، مانند تغییر از عملکرد پایدار به احتراق آشوبناک یا ظهور نوسانات چرخه حدی خودپایدار (LCO). محدودیت اساسی روش‌های پیش‌بینی فعلی در ناتوانی آنها در ثبت این اثرات غیرخطی نهفته است که پایداری و طول عمر مشعل‌های صنعتی، به ویژه آنهایی که در کاربردهای حیاتی مانند توربین‌های گازی و مشعل‌های کارخانه‌های شیمیایی استفاده می‌شوند را تعیین می‌کنند.

ناپایداری احتراق، که با نوسانات ناخواسته در فشار و آزادسازی گرما مشخص می‌شود، چالش‌های قابل توجهی را در طراحی و

بهره‌برداری از سیستم‌های احتراق مختلف، از کوره‌های صنعتی گرفته تا موتورهای توربین گازی ایجاد می‌کند [۱-۴]. یکی از جنبه‌های اساسی این ناپایداری‌ها، تعامل بین دینامیک سیالات و واکنش‌های شیمیایی است که منجر به پدیده‌هایی مانند ناپایداری هیدرودینامیکی شعله می‌شود. کارهای نظری اولیه توسط داریوس [۵] و لاندائو [۶] زمینه را برای درک ناپایداری ذاتی جبهه‌های شعله چروکیده فراهم کرد و پیش‌بینی کردند که انتشار شعله می‌تواند ذاتاً در برابر اختلالات ناپایدار باشد و منجر به ساختارهای شعله سلولی شود [۷]. پیچیدگی‌ها در رژیم‌های آشفته تشدید می‌شوند، جایی که تعامل بین آشفته‌گی و احتراق به طور قابل توجهی تشکیل آلاینده و رفتار شعله را تغییر می‌دهد [۸-۱۳]. درک کامل این مکانیسم‌های اساسی در پیکربندی‌های ایده‌آل، مانند مشعل‌های سوخت-هوا با جریان همسو، برای توسعه فناوری‌های احتراق قوی، کارآمد و کم‌آلاینده بسیار مهم است. ظهور منابع محاسباتی قدرتمند، تکنیک‌های عددی پیشرفته، به ویژه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، را قادر ساخته است تا دینامیک پیچیده جریان‌های واکنشی آشفته را بررسی کنند [۱۴-۱۶]. LES، که مستقیماً گردابه‌های آشفته در مقیاس بزرگ را در حین مدل‌سازی اثرات در مقیاس زیرشبکه حل می‌کند، مصالحه‌ای بین هزینه محاسباتی شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) و محدودیت‌های روش‌های میانگین‌گیری رینولدز ناویر-استوکس (RANS) ارائه می‌دهد [۱۷، ۱۸]. این رویکرد امکان بینش دقیق در مورد برهمکنش‌های شعله-آشفته‌گی، تثبیت شعله غیرپیش‌آمیخته و فوران [۱۹] و توصیف ناپایداری‌های شعله [۲۰]، از جمله در هندسه‌های پیچیده مانند مشعل‌های تثبیت‌شده با چرخش [۲۱-۲۴] و روی مانع Bluff body [۲۵] را فراهم می‌کند. اعتبارسنجی عددی مدل‌های LES در برابر داده‌های تجربی برای اطمینان از قابلیت‌های پیش‌بینی‌کننده آنها برای پدیده‌هایی مانند انتشار شعله و پایداری در شرایط مختلف، از جمله فشار بالا، بسیار مهم است [۲۶، ۲۷]. شبیه‌سازی‌های گردابه‌های بزرگ (LES) برای بررسی محدودیت‌های پایداری شعله انتشار متان-هوا با استفاده از یک مدل شعله ضخیم پویا [۲۸] و همچنین برای تجزیه و تحلیل ناپایداری ترموآکوستیک در توربین‌های گازی [۲۹] به کار گرفته شده‌اند. همزمان، تلاش‌ها به سمت بهینه‌سازی فرآیندهای احتراق، مانند تنظیم پروفیل‌های سرعت تزریق سوخت برای به حداقل رساندن انتشار NO_x و CO در شعله‌های انتشار آشفته [۳۰]، هدایت می‌شوند. این پیشرفت‌ها اغلب توسط بررسی‌های جامعی پشتیبانی می‌شوند که پیشرفت در زمینه‌هایی مانند مدل‌سازی RANS برای احتراق غیر پیش‌آمیخته و استراتژی‌های کم NO_x را خلاصه می‌کنند [۳۱]. پیشرفت‌های اخیر در LES همچنین شامل رویکردهای ترکیبی RANS-LES [۳۲]، مکانیسم‌های سینتیکی شیمیایی بهبود یافته [۳۳، ۳۴] و ادغام تکنیک‌های یادگیری ماشین (ML) در مقیاس زیرشبکه و مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده در

محفظه‌های احتراق توربین گازی، که در آن‌ها کاهش بی‌ثباتی برای حفظ راندمان، کنترل انتشار آلاینده‌ها و تضمین ایمنی عملیاتی حیاتی است، ارائه می‌دهد. این کار با پرداختن مؤثر به چالش‌های اساسی کوپلینگ چندفیزیکی و دینامیک چندمقیاسی، گامی اساسی در جهت توسعه نسل بعدی سیستم‌های احتراق است.

این مقاله، مطالعه‌ای جامع در مورد شناسایی و کاهش ناپایداری‌های احتراق در مشعل‌های هم‌سو را شرح می‌دهد. این تحقیق از تعیین اهداف و پیشینه نظری (معادلات حاکم، مکانیسم‌های ناپایداری) تا توصیف تنظیمات تجربی دقیق و روش‌شناسی عددی پیش می‌رود. بخش‌های کلیدی به اعتبارسنجی دقیق شبیه‌سازی‌ها در برابر داده‌های تجربی مربوط به ارتفاع شعله، دما و نوسانات فشار اختصاص داده شده است. تحلیل نهایی، میدان‌های جریان، نقشه‌های پایداری را مورد بحث قرار می‌دهد و پیام‌های عملی و توصیه‌های طراحی را با هدف بهبود راندمان و ایمنی احتراق ارائه می‌دهد و در نهایت یک چارچوب پیش‌بینی‌کننده برای بهینه‌سازی مشعل‌های صنعتی و کنترل انتشار آلاینده‌ها ایجاد می‌کند.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

۲-۱ معادلات پایستگی و ناویر استوکس جریان گاز قابل تراکم

معادله پیوستگی: این معادله بیان می‌کند که نرخ تغییر جرم در داخل یک حجم کنترل با شار جرم خالص عبوری از مرزهای آن متعادل می‌شود. معادله پیوستگی برای یک جریان تراکم‌پذیر و واکنشی به صورت زیر داده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی، $\mathbf{u}$ بردار سرعت و t زمان است. معادله ممنتوم: معادله بقای مومنتم برای یک سیال نیوتنی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau + \tau_t) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

که در آن P فشار، τ تانسور تنش ویسکوز، τ_t تانسور تنش رینولدز برای جریان‌های آشفته، $\mathbf{g}$ بردار شتاب گرانشی و t زمان است.

برای یک سیال نیوتنی، τ تانسور تنش ویسکوز برابر است با:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \delta_{ij} \quad (3)$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی، δ_{ij} دلتای کرونکر است. در جریان‌های آشفته، τ_t تانسور تنش رینولدز انتقال تکانه آشفته را در نظر می‌گیریم:

$$\tau_{t,ij} = -\rho u'_i u'_j \quad (4)$$

که در آن u'_i مؤلفه‌های سرعت نوسانی هستند. معادله انرژی: معادله پایستگی انرژی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \sum_k \nabla \cdot (\rho D_k h_k \nabla Y_k) + \sum_k \dot{\omega}_k h_k + \Phi_{diss} \quad (5)$$

که در آن E انرژی کل به ازای واحد جرم، H آنتالپی کل، κ رسانایی حرارتی، T دما، D_k ضریب انتشار برای گونه‌ها k ، h_k آنتالپی

احتراق آشفته [۳۵-۳۹] می‌شود. این استراتژی‌های مدل‌سازی پیشرفته، از جمله تحقیقات مداوم و چالش‌های آینده در LES جریان‌های واکنشی [۴۰،۴۱]، برای پرداختن به چالش‌های شعله‌های پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته آشفته، به ویژه در درک چین‌خوردگی جبهه شعله و بی‌ثباتی ذاتی در عدد کارلویتز بالا [۴۲] و در نهایت توسعه سیستم‌های احتراق پایدارتر و تمیزتر ضروری هستند.

این تحقیق به چالش‌های مهم در مدل‌سازی دقیق ناپایداری‌های احتراق می‌پردازد که از تعامل پیچیده مقیاس‌های فیزیکی مختلف و پدیده‌های بسیار غیرخطی ناشی می‌شوند. مشکل اصلی در حل برهمکنش آشفتگی-شیمی (TCI) است، جایی که فرآیندهای واکنش از انتشار مولکولی تا گرداب‌های بزرگ آشفته امتداد دارند. مدل‌های محاسباتی فعلی مانند RANS و LES ناکافی هستند، یا نوسانات گذرای حیاتی (RANS) را نادیده می‌گیرند یا به مدل‌های زیرشبکه نامشخص برای مقیاس‌های شیمیایی (LES) متکی هستند. علاوه بر این، عملکرد مشعل به تغییرات جزئی در پارامترهای عملیاتی بسیار حساس است که منجر به گذارهای ناگهانی بین رژیم‌های پایدار و ناپایدار می‌شود و پیش‌بینی تشکیل آلاینده را پیچیده می‌کند. بنابراین، یک چارچوب پیش‌بینی‌کننده برای ادغام سینتیک شیمیایی دقیق با دینامیک سیالات با دقت بالا ضروری است.

برای غلبه بر این چالش‌ها، این مطالعه با هدف توسعه یک چارچوب قوی، با دقت بالا و پیش‌بینی‌کننده برای درک و کاهش ناپایداری‌های احتراق در مشعل‌های جریان مشترک انجام شده است. این تحقیق شامل چندین هدف کلیدی است: اول، توسعه و اعتبارسنجی دقیق یک مدل عددی با دقت بالا در برابر داده‌های تجربی، با استفاده از معیارهایی مانند ارتفاع شعله، پروفیل‌های دما، غلظت گونه‌ها و نوسانات فشار. دوم، این مطالعه به طور سیستماتیک مکانیسم‌های ایجاد ناپایداری هیدرودینامیکی و تأثیر شرایط عملیاتی بر دامنه و فرکانس آن را بررسی خواهد کرد. نوآوری اصلی، مدل جبهه واکنش چند مقیاسی (MSRC) بر اساس تئوری غیرخطی گینزبورگ-لاندائو توسعه یافته است تا با ادغام دینامیک لایه برشی، بازخورد صوتی و هندسه مشعل، گذارهای دینامیکی از حالت پایدار به حالت دوره‌ای و آشوبناک را ثبت کند. این رویکرد جایگزین قدرتمندی برای نظریه‌های خطی مرسوم ارائه می‌دهد که در نهایت منجر به نقشه‌های پایداری پیش‌بینی‌کننده برای بهینه‌سازی مشعل می‌شود.

این تحقیق با پر کردن شکاف بین مشاهدات تجربی و پیش‌بینی دینامیکی غیرخطی قوی، اهمیت صنعتی قابل توجهی دارد. چارچوب یکپارچه، با ترکیب اعتبارسنجی تجربی با مدل نوآورانه MSRC، هم صحت نظری و هم کاربرد مستقیم در نیازهای صنعتی را تضمین می‌کند. این یافته‌ها، بینش‌های فوری و عملی برای طراحی مشعل‌های صنعتی، به ویژه در کاربردهای حیاتی مانند

بازخورد آکوستیک: عبارت بازخورد صوتی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Psi_{\text{acoustic}} = \Gamma |\psi|^2 P' \quad (11)$$

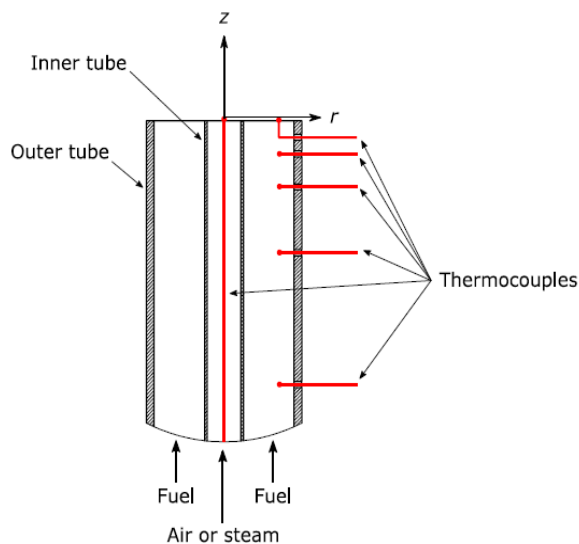
که در آن Γ ضریب بهره، P' نوسان فشار آکوستیک است.

$$\frac{\partial^2 P'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 P' = (\gamma - 1) \frac{\partial \dot{q}'}{\partial t} \quad (12)$$

که در آن c_0 سرعت صوت، γ نسبت ظرفیت گرمایی، $\dot{q}'$ نوسان نرخ آزادسازی گرما متناسب با $\frac{\partial |\psi|^2}{\partial t}$ است.

۳- مشخصات مشعل و پیکربندی جریان

در این مطالعه مشعل احتراق آزمایشگاهی دانشگاه آلبرتا جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این مشعل شامل دو لوله از جنس استنلس استیل متحدالمرکز است. که صفحات خروجی آنها بر هم منطبق است. در جدول ۱ نیز مشخصات هندسی مشعل و شرایط سوخت و هوا شرح داده شده است.



شکل ۱ مشعل احتراق آزمایشگاهی دانشگاه آلبرتا [۲۶].

Fig. 1 University of Alberta laboratory combustion burner [26].

جدول ۱ مشخصات هندسی مشعل و شرایط سوخت و هوا

Table 1 Burner geometric specifications and fuel and air conditions

Concentric twin-tube nozzle specifications		
Inner tube (center jet)	Outer diameter: 6.35 mm	Inner diameter: 5.54 mm
Outer tube (fuel flow)	Outer diameter: 25.4 mm	Inner diameter: 22.9 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%	
Air inlet conditions	59.2-11.8 gr/min and 22-24 °C	
Fuel inlet conditions	14.2 gr/min and 50-121 °C	

ویژه گونه‌ها، Y_k کسر جرمی گونه‌ها k ، $\dot{\omega}_k$ نرخ تولید خالص گونه k ، Φ_{diss} اتلاف ویسکوز و h آنتالپی محسوس است.

$$H = h + \frac{1}{2} u \cdot u \quad (16)$$

معادله انتقال گونه‌ها: این معادله، همرفت، انتشار و واکنش هر گونه را توصیف می‌کند. معادله انتقال گونه‌ها به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla Y_k) + \dot{\omega}_k \quad (17)$$

۲-۲ معادلات دینامیک شعله

ناپایداری داریوس-لاندائو (DL): معادله داریوس-لاندائو، چین‌خوردگی جبهه شعله را به دلیل جهش‌های چگالی در سراسر شعله توصیف می‌کند. نرخ رشد یک اختلال با عدد موج k برابر است با:

$$\sigma_{\text{DL}}(k) = k S_L \left[\frac{2A_T}{1+A_T} - \frac{1-A_T}{2} k \delta_L \right] \quad (18)$$

که در آن S_L سرعت شعله آرام، $A_T = \frac{\rho_u - \rho_b}{\rho_u + \rho_b}$ عدد اتوود، δ_L ضخامت شعله آرام است. عبارت اول $\frac{2A_T}{1+A_T}$ نشان دهنده اثر ناپایداری‌کننده اختلاف چگالی است. عبارت دوم $-\frac{1-A_T}{2} k \delta_L$ نشان دهنده اثر پایداری‌سازی ضخامت شعله است.

ناپایداری کلین-هلمهولتز (KH): ناپایداری کلین-هلمهولتز در لایه برشی بین جت سوخت و هوای هم-جریان رخ می‌دهد. نرخ رشد آن برابر است با:

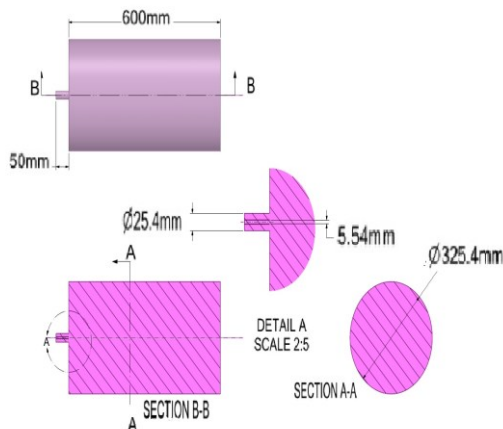
$$\sigma_{\text{KH}}(k) = k \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2 (U_1 - U_2)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} - \frac{kg(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_1 + \rho_2)} - \frac{Tk^3}{(\rho_1 + \rho_2)}} \quad (19)$$

که در آن U_1, U_2 سرعت دو جریان، ρ_1, ρ_2 چگالی دو جریان g شتاب گرانش، T کشش سطحی برای گازها ناچیز است. عبارت اول $\frac{\rho_1 \rho_2 (U_1 - U_2)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2}$ نشان دهنده اثر ناپایداری‌کننده اختلاف سرعت است. عبارت دوم $-\frac{kg(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_1 + \rho_2)}$ نشان دهنده اثرات شناوری است. عبارت سوم $-\frac{Tk^3}{(\rho_1 + \rho_2)}$ نشان دهنده اثرات کشش سطحی برای جریان‌های گاز ناچیز است.

مدل همدوسی جبهه واکنش چندمقیاسی (MSRC): این مدل از یک پارامتر نظم مختلط ψ استفاده می‌کند. که در آن $|\psi|^2$ نشان دهنده همدوسی شعله است. معادله تعمیم‌یافته گینزبورگ-لاندائو برای ψ برابر است با:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \psi(\lambda - |\psi|^2) + A \nabla^2 \psi + \Lambda \left[\frac{\nabla \cdot u}{|\nabla G|} \right]_{\text{shear}} + \Psi_{\text{acoustic}} \quad (10)$$

که در آن λ پارامتر رشد تابعی از نسبت هم‌ارزی و جهش چگالی، A ضریب انتشار (مربوط به ضخامت شعله)، Λ ثابت کوپلینگ برشی (وابسته به هندسه مشعل و عدد رینولدز)، Ψ_{acoustic} عبارت بازخورد صوتی (متناسب با نوسانات فشار) است. عبارت اول $\psi(\lambda - |\psi|^2)$ رشد موضعی و اشباع همدوسی شعله را توصیف می‌کند. عبارت دوم $A \nabla^2 \psi$ گسترش نفوذی جبهه شعله را توجیه می‌کند. عبارت سوم $\Lambda \left[\frac{\nabla \cdot u}{|\nabla G|} \right]_{\text{shear}}$ نشان دهنده کوپلینگ القایی برشی است. که در آن $\nabla \cdot u$ واگرایی سرعت و $|\nabla G|$ گرادیان یک کمیت هندسی (مثلاً شکل شعله) است. عبارت چهارم Ψ_{acoustic} بازخورد صوتی از نوسانات فشار را ثبت می‌کند.



شکل ۲ مقاطع فضای محاسباتی استوانه ای مشعل احتراق آزمایشگاهی

Fig.2 Cylindrical computational space sections of a laboratory combustion burner

در مدل سازی آشفته گی، ماهیت گذرای سیستم، استفاده از شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) را ضروری می سازد، که امکان تفکیک گردابه های بزرگ و حامل انرژی آشفته که مسئول اختلاط و ناپایداری احتراق هستند را فراهم می کند، در حالی که اثرات مقیاس زیرشبکه (SGS) بر انتقال تکانه و انرژی توسط مدل های مناسب جایگزین می شوند. مدل زیرشبکه اسمالگورینسکی به دلیل استحکام و پایداری آن در جریان های برشی بالا مورد استفاده قرار گرفت. ضریب اسمالگورینسکی استاندارد اعمال شد، که با رویه های تثبیت شده برای شبیه سازی های جریان جت و برشی سازگار است. احتراق و سینتیک شیمیایی: احتراق با استفاده از یک رویکرد شیمی با نرخ محدود همراه با مکانیسم دقیق GRI-Mech 3.0، که شامل ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش است، بررسی می شود. این سطح از جزئیات برای پیش بینی دقیق تشکیل آلاینده ها (مانند NOx و CO) و ساختار شعله پویا ضروری است. تعامل بین آشفته گی در مقیاس بزرگ و نرخ محدود واکنش های شیمیایی مدل سازی می شود. مدل به طور مؤثر اثرات محدودیت های اختلاط میکرووی آشفته بر نرخ واکنش، یک عامل حیاتی در سیستم های شعله غیر پیش آمیخته و نیمه پیش آمیخته را در نظر می گیرد. مدل سازی تابش: انتقال حرارت تابشی حرارتی، که به ویژه برای پایداری شعله و پیش بینی شار حرارتی مهم است، با استفاده از مدل تابش DO گنجانده شده است. این مدل از نظر محاسباتی کارآمد و مناسب برای مدیریت انتقال انرژی تابشی در شعله های نازک نوری است، جایی که ضریب جذب متوسط نسبتاً کوچک است.

۴-۳ شرایط مرزی و تنظیمات محاسباتی

پایداری و صحت عددی به شدت به تعریف شرایط مرزی که به طور دقیق شرایط آزمایش را تکرار می کنند، وابسته است. ورودی با پارامترهای جریان اندازه گیری شده، شامل نرخ جریان جرمی ثابت

۴-۲ روش شناسی عددی

این بخش به تفصیل روش شناسی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) قوی مورد استفاده برای شبیه سازی میدان جریان واکنشی آشفته پیچیده را شرح می دهد. این رویکرد مبتنی بر شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) با دقت بالا است تا پدیده های فیزیکی گذرا و غیرخطی را به طور دقیق ثبت کند، به طور خاص بر ناپایداری های جریان و سینتیک شیمیایی دقیق تمرکز دارد.

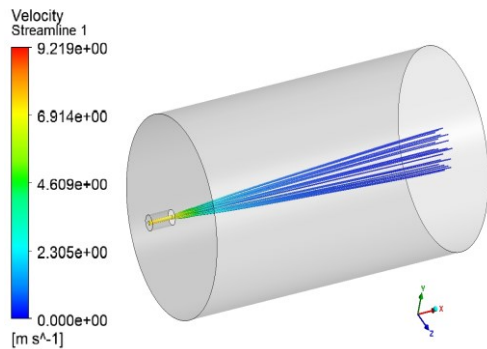
۴-۱ دامنه محاسباتی و گسسته سازی تطبیقی

در شکل ۲ برشی از مقاطع فضای محاسباتی استوانه ای مشعل احتراقی که بصورت سازمان یافته مش بندی شده است نشان داده شده است. این شبیه سازی از یک دامنه محاسباتی تعریف شده هندسی ساخته شده برای به حداقل رساندن تأثیر شرایط مرزی مصنوعی بر فیزیک جریان اولیه استفاده می کند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود این دامنه به طور قابل توجهی در پایین دست گسترش می یابد و طول محوری ۰/۶ متر و قطر استوانه ۳۲/۵ سانتیمتر را پوشش می دهد و تضمین می کند که توسعه و فروپاشی کامل ستون احتراق ثبت شود. دامنه جریان متقاطع با یک امتداد شعاعی تعریف می شود. این امتداد شعاعی مانع از تأثیر امواج فشاری منعکس شده یا اثرات محصورشدگی مصنوعی بر دینامیک جت مرکزی می شود. استراتژی گسسته سازی از یک شبکه ساختاریافته استفاده می کند که تقریباً شامل ۵ میلیون سلول است، و چگالی لازم برای پشتیبانی از الزامات وضوح بالای LES دارد.

استراتژی اصلاح شبکه بسیار موضعی و برای اطمینان از دقت عددی در مناطق جریان متفاوت حیاتی است. در نزدیکی دیواره های جامد، اصلاح لایه مرزی دقیق است، با حداقل اندازه المان ۰/۱ میلیمتر برای حفظ $Y^+ < 1$ در سراسر دامنه، در نتیجه امکان حل مستقیم گردان های سرعت نزدیک دیواره بدون تکیه بر توابع استاندارد دیواره را فراهم می کند. علاوه بر این، برای حل ویژگی های کلیدی اختلاط و آشفته گی، مناطق اصلاح موضعی ایجاد شدند. ناحیه خروجی نازل مشعل به قطر ۰/۲۵ متر اصلاح می شود تا جداسازی جریان اولیه و پدیده های ریزش گردابه ای ناشی از انبساط ناگهانی را به طور دقیق حل کند. لایه برشی حیاتی در مجاورت نازل حل می شود تا توسعه و تکامل ناپایداری های لازم کلوین-هلمهولتز را که باعث اختلاط در مقیاس بزرگ می شوند، ثبت کند. ناحیه دورتر از المان های درشت تر استفاده شده است، تا یک تعادل ضروری برای کاهش هزینه محاسباتی کلی بدون کاهش دقت در ناحیه واکنش هسته ایجاد شود.

۴-۲ مدل های فیزیکی

برای اطمینان از پیش بینی دقیق جریان ناپایدار و دینامیک احتراق، مجموعه ای جامع از مدل های فیزیکی پیاده سازی شد.



شکل ۳ خطوط جریانی سوخت و هوای خروجی از نازل مشعل در فضای محاسباتی استوانه‌ای

Fig.3 Fuel and air flow lines exiting the burner nozzle in a cylindrical computational space

نتایج اعتبارسنجی، مدل را در طیف وسیعی از پدیده‌ها نشان می‌دهد. برای ارتفاع و ساختار شعله، مقایسه تصویربرداری لومینسانس شیمیایی OH با سرعت بالا/فلورسانس القایی لیزری مسطح (PLIF) توافق عالی را در میانگین و توپولوژی شعله نوسانی نشان می‌دهد. دقت پروفیل‌های دما نیز به همان اندازه قانع‌کننده بود، به طوری که پروفیل‌های شعاعی اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌های نوع K با پیش‌بینی‌های LES مطابقت داشتند. این دقت، پیش‌بینی مدل از آزادسازی گرما و انتقال حرارت را تأیید می‌کند. علاوه بر این، توانایی مدل در پیش‌بینی غلظت گونه‌ها و شاخص‌های انتشار برای ارزیابی زیست‌محیطی بسیار مهم است. مقایسه با داده‌های آنالیزور گاز، پیش‌بینی‌های CO را تأیید می‌کند. علاوه بر اعتبارسنجی ویژگی‌های احتراق، این مدل همچنین در برابر داده‌های تجربی برای انتشار و رفتار دینامیکی اعتبارسنجی شده است. پیش‌بینی‌های شاخص‌های انتشار، از جمله CO_2 ، THC و NO_x ، با تحلیل‌های تجربی تطابق خوبی نشان می‌دهند. پیش‌بینی‌های شاخص‌های انتشار قابلیت اطمینان مدل را در تعیین کمیت آلاینده‌های کلیدی تأیید می‌کند. به طور کلی، اعتبارسنجی جامع مدل در برابر داده‌های تجربی، وفاداری و قابلیت اطمینان آن را در پیش‌بینی طیف وسیعی از ویژگی‌های احتراق و انتشار نشان می‌دهد. شکل ۴ کانتور سرعت لحظه‌ای (m.s^{-1}) در داخل دامنه محاسباتی استوانه‌ای، الگوی ریزش گردابه در پایین‌دست نازل را نشان می‌دهد. در این مشعل در مقیاس آزمایشگاهی، خروجی نازل در لبه پایین‌دست نگهدارنده شعله قرار دارد، بنابراین جت پرسرعتی که از روزنه خارج می‌شود، بلافاصله یک لایه برشی نازک ایجاد می‌کند که به صورت ساختارهای گردابه منسجم درمی‌آید. این گردابه‌ها به سمت پایین‌دست جریان همرفتی دارند، بین دو طرف بالایی و پایینی جت جابجا می‌شوند و با ناحیه‌ی برگشت جریان در تعامل هستند و در نتیجه به صورت دوره‌ای جبهه‌ی شعله را تعدیل می‌کنند.

سوخت و هوا با پروفیل دمای غیر یکنواخت مشتق شده از داده‌های تجربی تعریف می‌شود. شدت آشفته‌گی واقع‌بینانه ۵٪ مشخص شد که منعکس‌کننده شرایط ورودی اندازه‌گیری شده مربوط به تنظیمات مشعل آزمایشگاهی است. در خروجی، شرط فشار اتمسفر استاندارد (۱۰۱۳۲۵ پاسکال) اعمال شد. برای جلوگیری از خطاهای عددی، شرط گرادیان صفر برای همه متغیرها همراه با یک روش جریان برگشتی و مرزهای دیواره به شرط سرعت بدون لغزش اعمال شد.

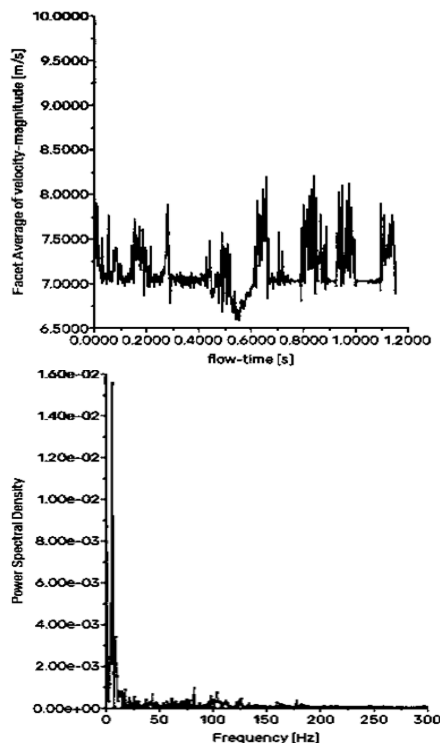
۵- روش حل و تجزیه و تحلیل داده‌ها

روش محاسباتی از یک رویکرد دو مرحله‌ای ساختاریافته برای پایداری عددی و همگرایی آماری استفاده می‌کند و از نرم‌افزار Ansys Fluent با یک مدل احتراق واکنش-نفوذی چندمقیاسی بهبودیافته و سفارشی استفاده می‌کند. شبیه‌سازی در ابتدا با استفاده از روش حالت پایدار رینولدز-ناویر-استوکس (RANS) از طریق الگوریتم SIMPLE برای ایجاد یک میدان جریان میانگین همگرا و کاهش زمان گذرا، تثبیت می‌شود. این روند به طور یکپارچه با یک شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ گذرا (LES) با دقت بالا دنبال می‌شود که به مدت ۰/۵ ثانیه (تقریباً ۵۰ عبور جریان) با استفاده از یک گام زمانی مناسب برای اطمینان از پایداری آماری و ثبت مقیاس‌های زمانی آشفته‌گی مربوطه اجرا می‌شود. معیارهای اعتبارسنجی کلیدی استخراج شده از نتایج گذرا شامل ارتفاع شعله (تعیین شده توسط سطح ایزو غلظت رادیکال OH یا دمای ۱۵۰۰ کلوین)، پایداری دینامیکی (ارزیابی شده از طریق تجزیه و تحلیل تبدیل فوری سریع سیگنال‌های فشار برای تعیین کمیت ناپایداری‌های احتراق) و شاخص‌های انتشار (محاسبه شده از کسر جرمی گونه‌های میانگین) است. در شکل ۳ خطوط جریان سوخت و هوای خروجی از نازل مشعل در فضای محاسباتی استوانه‌ای نشان داده شده است.

۱-۵ معیار جامع تجربی و اعتبارسنجی چندمقیاسی

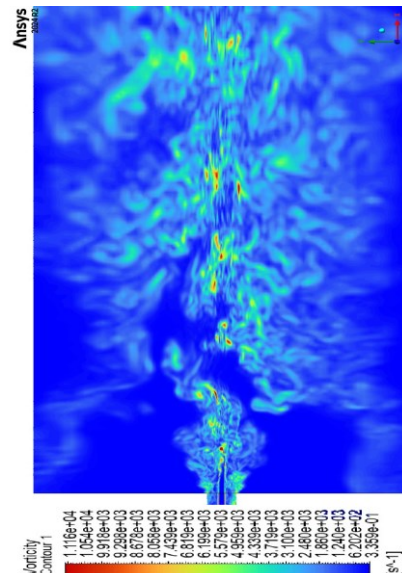
اعتبارسنجی یک مدل احتراق، کار پیچیده‌ای است که نیاز به مقایسه دقیق با داده‌های تجربی گسترده دارد. در این مطالعه، مشعل همسو دانشگاه آلبرتا [۲۶] معیار قابل اعتمادی را ارائه می‌دهد که پیش‌بینی‌های عددی با دقت در برابر آن ارزیابی می‌شوند. استراتژی اعتبارسنجی چندبعدی است و طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های احتراق، از جمله ارتفاع و ساختار شعله، پروفیل‌های دما، غلظت گونه‌ها (CO_2) و نوسانات فشار را پوشش می‌دهد. دو معیار کلیدی برای کمی‌سازی عملکرد مدل استفاده شده است: همبستگی بین روندهای شبیه‌سازی شده و تجربی.

چگالی طیف توانی نوسانات سرعت پایین‌تر از ۱۲۰ هرتز و فرکانس‌های غالب نوسانات سرعت در محدوده ۱۰، ۸۰، ۱۵ و ۱۰ هرتز می‌باشد. همچنین نوسانات ورتیسیت در دهانه نازل در محدوده ۱۶۰۰ تا ۳۶۰۰ (s^{-1}) است و محدوده فرکانسی در نمودار چگالی طیف توانی نوسانات ورتیسیت پایین‌تر از ۲۰۰ هرتز و فرکانس‌های غالب نوسانات ورتیسیت در محدوده ۸۰، ۴۰، ۲۰ و ۱۰ هرتز می‌باشد. حضور این مؤلفه‌های فرکانسی همدوس، بیانگر وجود ناپایداری‌های برهم‌کنش سرعت و گردابه در ناحیه اختلاط سوخت و هوا در مشعل کواکسیال است. در دهانه نازل، دینامیک لایه برشی ناپایدار که باعث ناپایداری می‌شود، نشان داده شده است. فرکانس‌های غالب شناسایی شده با حالت‌های صوتی سیستم همبستگی دارند. حد آستانه‌های چگالی توان پایین‌تر (> 120 هرتز برای سرعت، > 200 هرتز برای گردابه) ناپایداری ساختارهای همدوس با فرکانس پایین تأیید می‌کنند. تفکیک ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و آکوستیکی در سامانه‌های احتراقی دشوار و بررسی برهم‌کنش‌های ترموآکوستیکی برای درک آن‌ها ضروری می‌باشد. ورتیسیت به دلیل ماهیت مشتق‌پذیر خود حساسیت بالایی به ناپایداری‌های کوچک مقیاس هیدرودینامیکی دارد، در حالی که نوسانات سرعت رفتار ترکیبی جریان و مدهای صوتی را بازتاب می‌دهد. فرکانس‌های غالب سیستم حاصل کوپلینگ غیرخطی میان دینامیک لایه برشی هیدرودینامیکی و پاسخ‌های صوتی محفظه احتراق هستند.



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

Fig.5 Time series diagram and frequency spectrum analysis of velocity in the combustion flow instability domain near the edges and the burner nozzle opening



شکل ۴ کانتور سرعت لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق در فضای محاسباتی استوانه‌ای مشعل

Fig.4 Instantaneous velocity contour of combustion gas flow in the cylindrical computational space of the burner

فرکانس ریزش زمانی که با قطر نازل و سرعت خروجی مقیاس‌بندی می‌شود، که نشان‌دهنده ناپایداری کلاسیک کلون-هلمهولتز است. این ریزش گردابه‌های ناپایدار، اختلاط آشفته را افزایش می‌دهد، انتقال حرارت به هوای اطراف را افزایش می‌دهد و می‌تواند بر پایداری شعله، به ویژه تحت فشارهای ورودی متغیر، تأثیر بگذارد.

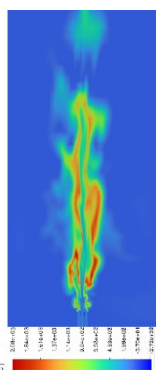
۲-۵ انتشار و رفتار دینامیکی

توانایی مدل در پیش‌بینی انتشار و رفتار دینامیکی برای درک فرآیند احتراق بسیار مهم است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل می‌تواند فرکانس ریزش گردابه را که یک ویژگی کلیدی فرآیند احتراق است، به طور دقیق پیش‌بینی کند. سرعت‌سنجی تصویر-ذره (PIV)، ریزش گردابه را در فرکانس ۱۵ تا ۲۰ هرتز تأیید می‌کند که با پیش‌بینی‌های LES در فرکانس ۱۸ هرتز مطابقت نزدیکی دارد. این موضوع، توانایی مدل را در ثبت ناپایداری‌های لایه برشی بحرانی که دینامیک شعله را هدایت می‌کنند، تأیید می‌کند. علاوه بر این، مدل نوسانات سرعت را که یک جنبه کلیدی فرآیند احتراق هستند، به طور دقیق پیش‌بینی می‌کند. این مدل در مقایسه با داده‌های مبدل فشار دینامیکی، درک بهتری از فرکانس‌های غالب دارد. با این حال، مدل نوسانات سرعت را کمی کمتر از حد پیش‌بینی می‌کند که نشان‌دهنده حوزه‌های بالقوه برای اصلاح مدل در آینده است.

در شکل‌های ۵ و ۶ نمودار سری زمانی و تحلیل طیف فرکانسی سرعت و ورتیسیت در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل ارائه شده است. نوسانات سرعت در دهانه نازل در محدوده ۶/۵ تا ۸ ($m.s^{-1}$) است و محدوده فرکانسی در نمودار

ضرایب همبستگی بالا، بازتولید می‌کند. این فرآیند اعتبارسنجی قابلیت اطمینان مدل را برای پیش‌بینی‌های پیشرفته در دینامیک احتراق پیچیده، ویژگی‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای و مکانیسم‌های ناپایداری اساسی، نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل دقیق میدان‌های جریان، با تحلیل دقیق میدان‌های سرعت لحظه‌ای، ساختارهای گردابی و ضخامت لایه برشی توسط LES مطابقت نزدیکی با اندازه‌گیری‌های PIV نشان می‌دهد و صحت مدل را بیشتر تأیید می‌کند.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب کانتورهای دمای لحظه‌ای حاصل از شبیه‌سازی عددی (LES) و تصویربرداری تجربی متناظر [۴۳] را از میدان جریان واکنش‌دهنده، تحت تأثیر تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل به نمایش می‌گذارند. ساختارهای دمایی در این دو شکل، توانایی مدل را در پیش‌بینی تغییرات توپولوژی شعله در اثر تغییرات دبی هوا به اثبات می‌رساند. علاوه بر این، شکل ۹ نمودار شاخص‌های انتشار جریان گازهای حاصل از احتراق ناشی از تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل نشان می‌دهد.



شکل ۷ کانتور دمای لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق ناشی از تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل

Fig.7 Instantaneous temperature contour of the combustion gas flow due to changes in the mass flow rate of the air exiting the central nozzle of the burner

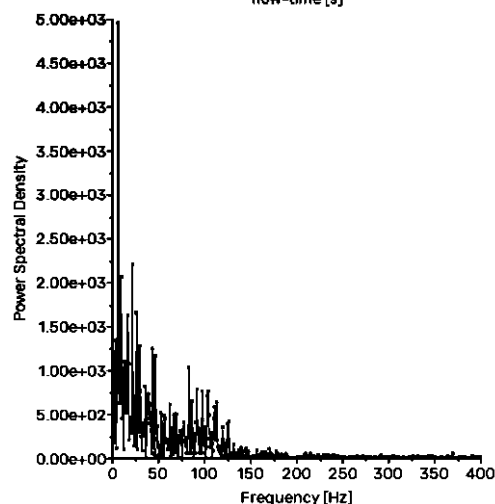
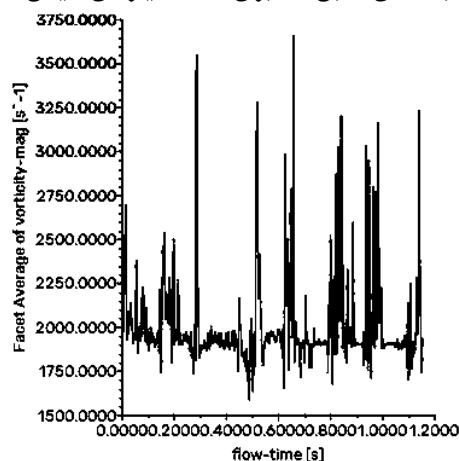


شکل ۸ تصویربرداری لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق ناشی از تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل [۴۳]

Fig.8 Instantaneous imaging of the flow of combustion gases resulting from changes in the mass flow rate of the air exiting the central nozzle of the burner [43].

پیش‌بینی دقیق غلظت گونه‌ها و شاخص‌های انتشار برای درک جامع فرآیند احتراق ضروری است. مقایسه با داده‌های آنالیزور گاز، پیش‌بینی‌های CO را با خطای نسبی کم نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که مدل قادر به پیش‌بینی نرخ واکنش‌های شیمیایی مؤثر است. شاخص‌های انتشار، از جمله CO_2 ، NO_x و BC ، تطابق خوبی با تحلیل‌های تجربی نشان می‌دهند. پیش‌بینی‌های این شاخص‌های انتشار در محدوده خطای مجاز قرار دارند که قابلیت اطمینان مدل را در تعیین کمیت آلاینده‌های کلیدی تأیید می‌کند. اعتبارسنجی مدل در برابر داده‌های تجربی، توانایی آن را در پیش‌بینی دقیق رفتار انتشار و دینامیکی، و همچنین غلظت گونه‌ها و شاخص‌های انتشار نشان می‌دهد. این نتایج، حساسیت مدل به شرایط ورودی را برجسته کرده و بر اهمیت تنظیم دقیق آشفستگی و مکانیسم‌های شیمیایی برای بهبود دقت در رژیم‌های عملیاتی و کاربردها تأکید می‌کند.

به طور کلی، اعتبارسنجی تأیید می‌کند که مدل عددی داده‌های تجربی را با خطای نسبی ۱۰٪ برای همه معیارهای حیاتی، همراه با



شکل ۶ نمودار سری زمانی و تحلیل طیف فرکانسی ورتیسیته در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل

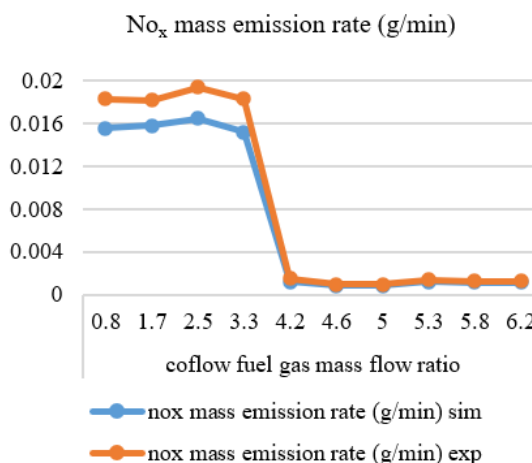
Fig.6 Time series diagram and frequency spectrum analysis of vorticity in the combustion flow instability domain near the edges and orifice of the burner nozzle

فرکانس بالا است. بینش‌های عملی برای بهینه‌سازی مشعل صنعتی از تجزیه و تحلیل جریان مشترک به دست آمد. زیرا جریان همسو هوا به طور قابل توجهی راندمان احتراق را بهینه می‌کند و انتشار نامطلوب را کاهش می‌دهد، و با استراتژی‌های کم NO_x همسو است. برای کارهای آینده، پیشنهاد می‌شود از مدل‌های یادگیری ماشینی (ML) برای شبیه‌سازی زیرشبکه SGS به منظور بهبود دقت پیش‌بینی در شرایط احتراق آشفته استفاده شود و با به‌کارگیری رویکردهای هیبرید، هزینه محاسباتی شبیه‌سازی‌های دینامیکی در مشعل‌های صنعتی به شکل مؤثری کاهش یابد. همچنین اندازه‌گیری‌های غیرتهاجمی، به‌ویژه با استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری ذرات PIV و فلورسانس القایی لیزری PLIF را برای ثبت مستقیم پارامتر همدوسی شعله در اولویت قرار گیرد. هدف نهایی، تبدیل این دیدگاه‌های بنیادی به راهبردهای کنترل پیشرفته و بلادرنگ است. این رویکرد شامل توسعه سیستم‌های کنترل بازخورد فعال با استفاده از مدولاسیون پویای سوخت و هوا است که به‌طور بالقوه توسط الگوریتم‌های یادگیری ماشینی که قادر به پیش‌بینی بی‌ثباتی بلادرنگ هستند، تقویت می‌شوند. مقیاس‌پذیری صنعتی، با هدف پیاده‌سازی در توربین‌های گازی و مشعل‌های پالایشگاهی، مدل MSRC را به عنوان ابزاری برای تضمین احتراق ایمن، کارآمد و کم‌انتشار در سراسر بخش انرژی تبدیل خواهد کرد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.
حامی مالی: این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش و مسئولیت نویسندگان: نویسنده اول: ایده‌پردازی (Conceptualization)، روش‌شناسی (Methodology)، نرم‌افزار (Software)، تحلیل رسمی (Formal Analysis)، انجام پژوهش (Investigation)، اعتبارسنجی (Validation)، مدیریت داده‌ها (Data Curation)، تهیه پیش‌نویس اولیه مقاله (Writing – Original Draft) و تهیه شکل‌ها و نمودارها (Visualization). نویسنده دوم: ایده‌پردازی (Conceptualization)، نظارت (Supervision)، بازبینی و ویرایش مقاله (Writing – Review & Editing)، مدیریت پروژه (Project Administration) و تأمین مالی (Funding Acquisition). نویسنده سوم: نظارت (Supervision)، بازبینی و ویرایش مقاله (Writing – Review & Editing) و مدیریت پروژه (Project Administration).



شکل ۹ نمودار شاخص انتشار ناکس در جریان گازهای حاصل از احتراق ناشی از تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل [۲۶].
Fig.9 Diagram of the NO_x emission index in the combustion gas flow resulting from changes in the mass flow rate of the air exiting the central nozzle of the burner [26].

۶- نتیجه‌گیری

اعتبارسنجی مدل احتراق در برابر داده‌های تجربی، دقت و قابلیت اطمینان آن را در پیش‌بینی ویژگی‌های احتراق و انتشار آلاینده‌ها تایید می‌کند. این مدل با دقت بالایی ارتفاع و ساختار شعله، پروفیل‌های دما، غلظت گونه‌ها و نوسانات فشار را محاسبه می‌کند. توانایی آن در برآورد نرخ انتشار و رفتار دینامیکی نیز برای درک مکانیزم‌های احتراق بسیار حیاتی است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل می‌تواند فرکانس ریزش گردابه، نوسانات فشار و غلظت گونه‌ها را به طور دقیق پیش‌بینی کند.

این مطالعه نشان می‌دهد که مدل می‌تواند طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های احتراق و انتشار آلاینده‌ها را با دقت پیش‌بینی کند و مبنای محکمی برای طراحی سیستم‌های احتراق کارآمدتر و سازگار با محیط زیست فراهم کند. علاوه بر این، این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی طیف گسترده‌ای از سناریوهای احتراق، استفاده شود. این تحقیق اعتبارسنجی دقیقی از مدل جبهه واکنش همدوس چندمقیاسی (MSRC) است و یک چارچوب پیش‌بینی‌کننده یکپارچه برای دینامیک احتراق غیرخطی ایجاد می‌کند. این مطالعه شکاف تحلیلی بین نظریه‌های پایداری خطی کلاسیک و رژیم‌های دینامیکی پیچیده و غیرخطی را پر می‌کند. مدل MSRC تمام پارامترهای کلیدی آزمایش (ارتفاع شعله، دما، غلظت گونه‌ها، نوسانات فشار و انتشار آلاینده‌ها) را با انحراف $\geq 15\%$ در کل پوشش عملیاتی شبیه‌سازی می‌کند. نکته مهم این است که چارچوب MSRC به دقت گذارهای ناپایداری پیچیده را از عملکرد پایدار تا شروع نوسانات چرخه محدود (LCO) و تا رفتار آشوبناک ردیابی می‌کند. تحلیل‌های انجام‌شده بینش‌های فیزیکی عمیقی پیرامون محرک‌های اصلی ناپایداری فراهم آوردند. یافته‌ها مکانیسم‌های حاکم بر شرایط عملیاتی را متمایز می‌کنند: در اعداد رینولدز بالا (Re)، سیستم تحت تأثیر مدهای ناپایداری‌های لایه برشی با

منابع

- [18] S. B. Pope, "The probability approach to the modelling of turbulent reacting flows," *Combustion and Flame*, vol. 27, pp. 299–312, 1976. doi: 10.1016/0010-2180(76)90035-3
- [19] R. Santhosh and R. Yadav, "Flame Stabilization Modes in Non-Premixed $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ swirling flames—A numerical study," *Combustion Science and Technology*, vol. 198, no. 9, pp. 2543–2565, 2026. doi: 10.1080/00102202.2025.2509855
- [20] L. Berger, A. Attili, and H. Pitsch, "Intrinsic instabilities in premixed hydrogen flames: Parametric variation of pressure, equivalence ratio, and temperature. Part 1—Dispersion relations in the linear regime," *Combustion and Flame*, vol. 240, pp. 111935, 2022. doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111935
- [21] A. Palies, "Flow and Flame Mechanisms for Swirl-Stabilized Combustors," *Aerospace*, vol. 12, no. 5, p. 430, 2025. doi: 10.3390/aerospace12050430
- [22] R. C. Aldredge and B. Zuo, "Flame acceleration associated with the Darrieus-Landau instability," *Combustion and Flame*, vol. 127, no. 3, pp. 2091–2101, 2001. doi: 10.1016/S0010-2180(01)00312-1
- [23] I. Verma et al., "Numerical Investigation of Lean Hydrogen-Air Flame Stabilization Regimes Using Large-Eddy Simulations," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 87936, p. V002T03A041, American Society of Mechanical Engineers, 2024. doi: 10.1115/GT2024-129230
- [24] C. J. Rising et al., "Numerical investigation of turbulent flame-vortex interaction in premixed cavity stabilized flames," *Aerospace Science and Technology*, vol. 129, p. 107805, 2022. doi: 10.1016/j.ast.2022.107805
- [25] R. Franco, C. Celis, and L. F. F. da Silva, "Numerical simulation of bluff body turbulent flows using hybrid RANS/LES turbulence models," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 4, p. 217, 2023. doi: 10.1007/s40430-023-04148-3
- [26] A. Ahsan, M. Aydin, M. S. Mansour, and A. A. Al-Qaydi, "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*, vol. 103, pp. 133–142, May 2019. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.01.013
- [27] F. Garnier, T. Jaravel, A. Boudin, D. Laera, and T. Poinso, "Influence of turbulent inflow conditions on the large-eddy simulation of a non-premixed hydrogen-air jet flame," in *Low-Carbon Combustion Meeting*, 2024.
- [28] K. Zheng, J. Jiang, Z. Xing, Y. Hao, M. Yu, X. Yang, and Y. Tao, "Application of large eddy simulation in methane-air explosion prediction using thickening flame approach," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 159, pp. 662–673, 2022. doi: 10.1016/j.psep.2022.01.044
- [29] Y. Xia, A. S. Morgans, W. P. Jones, J. Rogerson, G. Bulat, and X. Han, "Predicting thermoacoustic instability in an industrial gas turbine combustor: Combining a low order network model with flame LES," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 50848, p. V04AT04A017, American Society of Mechanical Engineers, 2017. doi: 10.1115/GT2017-63247
- [30] F.-c. Zhao, B.-g. Sun, S. Yuan, L.-z. Bao, H. Wei, and Q.-h. Luo, "Experimental and modeling investigations to improve the performance of the near-zero NO_x emissions direct-injection hydrogen engine by injection optimization," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 713–724, 2024. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.039
- [1] F. E. Culick and P. Kuentzmann, "Unsteady motions in combustion chambers for propulsion systems," No. AC323AVT039TP103, 2006.
- [2] T. Lieuwen, "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience," *Fundamental Mechanisms, and Modeling*. Reston, VA, USA: AIAA, 2005. doi: 10.2514/4.866807
- [3] S. Candel, D. Durox, and T. Schuller, "Perturbed Flame Dynamics and Thermo-Acoustic Instabilities," in *Combustion Phenomena*, 2009, p. 80.
- [4] J. O'Connor, S. Hemchandra, and T. Lieuwen, "Combustion instabilities in lean premixed systems," in *Lean Combustion*, Academic Press, 2016, pp. 231–259. doi: 10.1016/B978-0-12-804557-2.00007-9
- [5] C. Clanet and G. Searby, "First experimental study of the Darrieus-Landau instability," *Physical Review Letters*, vol. 80, no. 17, p. 3867, 1998. doi: 10.1103/PhysRevLett.80.3867
- [6] S. I. Blinnikov and P. V. Sasorov, "Landau-Darrieus instability and the fractal dimension of flame fronts," *Physical Review E*, vol. 53, no. 5, p. 4827, 1996. doi: 10.1103/PhysRevE.53.4827
- [7] G. I. Sivashinsky, "Diffusional-thermal theory of cellular flames," *Combustion Science and Technology*, vol. 15, no. 3-4, pp. 137–145, 1977. doi: 10.1080/00102207708946779
- [8] N. Peters, "Turbulent Combustion." Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000. doi: 10.1017/S0022112000002676
- [9] S. B. Pope, "Turbulent premixed flames," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 19, no. 1, pp. 237–270, 1987.
- [10] F. A. Williams, "Combustion Theory," 2nd ed. Menlo Park, CA, USA: Addison-Wesley, 1985. doi: 10.1201/9780429494055
- [11] S. B. Pope, "Turbulent Flows." Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [12] Jones, WPa, and J. H. Whitelaw. "Calculation methods for reacting turbulent flows: a review." *Combustion and flame* 48 (1982): 1-26. doi: 10.1016/0010-2180(82)90112-2
- [13] T. Poinso and D. Veynante, "Theoretical and Numerical Combustion," 2nd ed. Philadelphia, PA, USA: RT Edwards Inc., 2005.
- [14] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," in *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*, Pergamon, 1983, pp. 96–116. doi: 10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7
- [15] B. H. Hjertager, "Simulation of transient compressible turbulent reactive flows," *Combustion Science and Technology*, vol. 27, no. 5–6, pp. 159–170, 1982. doi: 10.1080/00102208208946985
- [16] E. R. Hawkes and R. S. Cant, "A flame surface density approach to large-eddy simulation of premixed turbulent combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 1, pp. 51–58, 2000. doi: 10.1016/S0082-0784(00)80194-0
- [17] W. P. Jones, A. J. Marquis, and K. Vogiatzaki, "Large-eddy simulation of spray combustion in a gas turbine combustor," *Combustion and Flame*, vol. 161, no. 1, pp. 222–239, 2014. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.07.016

- [31] M. Jamshidiha, M. M. Kamal, L. Giuntini, A. Coussement, M. Lubrano Lavadera, and A. Parente, "Comparative effects of N₂ and CO₂ fuel dilution on NOx suppression in non-premixed hydrogen combustion," *Applied Thermal Engineering*, 2025, 129508. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2025.129508](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.129508)
- [32] K. Duraisamy, "Perspectives on machine learning-augmented Reynolds-averaged and large eddy simulation models of turbulence," *Physical Review Fluids*, vol. 6, no. 5, p. 050504, 2021. doi: [10.1103/PhysRevFluids.6.050504](https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.050504)
- [33] M. Rahmati, "Applications and Analysis Methods of Turbulent Combustion: A Review," *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 51, no. 2, 2024. doi: [10.1615/InterJFluidMechRes.2024047803](https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.2024047803)
- [34] M. N. Nejaamtheen and J.-Y. Choi, "A Comprehensive Review of Flamelet Methods: Future Directions and Emerging Challenges," *Energies*, vol. 18, no. 1, p. 45, 2024. doi: [10.3390/en18010045](https://doi.org/10.3390/en18010045)
- [35] M. E. Shejan, S. M. Y. Bhuiyan, M. P. Schoen, and R. Mahamud, "Assessment of machine learning techniques for simulating reacting flow: From plasma-assisted ignition to turbulent flame propagation," *Energies*, vol. 17, no. 19, p. 4887, 2024. doi: [10.3390/en17194887](https://doi.org/10.3390/en17194887)
- [36] J. Wu, X. Wang, G. Zhang, J. Liu, X. Li, Y. Zhang, H. Zhang, J. Lyu, B. Wang, and Y. Wu, "Physics-informed machine learning for combustion: A review," *arXiv preprint arXiv:2509.03347*, 2025. doi: [10.48550/arXiv.2509.03347](https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.03347)
- [37] S. Iavarone, H. Yang, Z. Li, Z. X. Chen, and N. Swaminathan, "On the use of machine learning for subgrid scale filtered density function modelling in large eddy simulations of combustion systems," in *Machine Learning and Its Application to Reacting Flows: ML and Combustion*, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 209–243. doi: [10.1007/978-3-031-16248-0_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16248-0_8)
- [38] V. Xing, "Deep learning for subgrid-scale modeling in large eddy simulations of turbulent premixed combustion," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2022.
- [39] M. Ihme, W. T. Chung, and A. A. Mishra, "Combustion machine learning: Principles, progress and prospects," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 91, 2022, Art. no. 101010, doi: [10.1016/j.pecs.2022.101010](https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101010)
- [40] H. Pitsch, "Large-eddy simulation of turbulent combustion," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, no. 1, pp. 453–482, 2006. doi: [10.1146/annurev.fluid.38.050304.092133](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092133)
- [41] N. Padmanabhan, "Recent advancements in large eddy simulations of compressible real gas flows," in *Computational Fluid Dynamics-Analysis, Simulations, and Applications*, IntechOpen, 2024. doi: [10.5772/intechopen.1005573](https://doi.org/10.5772/intechopen.1005573)
- [42] T. Nilsson, H. Carlsson, R. Yu, and X.-S. Bai, "Structures of turbulent premixed flames in the high Karlovitz number regime-DNS analysis," *Fuel*, vol. 216, 2018, pp. 627–638, doi: [10.1016/j.fuel.2017.12.046](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.046)
- [43] H. Ahsan, "Experimental study on the carbon conversion efficiency and emission indices of a lab-scale air-assisted flare," 2019. doi: [10.7939/r3-e04y-tz30](https://doi.org/10.7939/r3-e04y-tz30)