

Numerical Simulation of Non-Premixed Combustion and The Effect of Variations in The Mass Flow Rate Ratio of Air to Fuel on Flame Stability, Combustion Efficiency and Pollutant Indices

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

Mechanical Engineering Department, Hormozgan University, Bandar abbas, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: April 15, 2026
Revised: July 25, 2026
Accepted: August 22, 2026
ePublished: October 19, 2026

ABSTRACT

Optimizing the performance of non-premixed burners to simultaneously achieve high thermal efficiency, low pollutant emissions, and maintain robust operational stability requires computational fluid dynamics (CFD) predictive tools that accurately model turbulence-chemistry interactions (TCI) at the microscale. Conventional Reynolds-Averaging Navier-Stokes (RANS) models often suffer from poor capture of microscale effects for predicting thermal NO_x formation and near-quenching phenomena. This study, employing a dual numerical approach, couples an adapted RANS solver with a large eddy simulation (LES) framework equipped with a flame-generated manifold model (FGM) and the GRI-Mech 3.0 kinetic mechanism, and validates both against experimental data. This combined approach is used to predict the performance of a fuel-air coflow burner under systematic variations in the air-to-fuel mass flow ratio (MFR). Time-frequency analysis of fluid and thermodynamic oscillations identified a dominant low-frequency (10–50 Hz) hydrodynamic instability related to the collapse of vortices in the flow separation zone. Quantitative results showed that while co-current airflow-maintained carbon conversion efficiency (CCE) above 80% up to MFR=5 and strongly reduced NO_x emissions through thermal dilution, increasing the dilution ratio resulted in reduced thermal stability and increased risk of sustained hydrodynamic oscillations. This comparative modeling approach provides a robust predictive framework for the design of safer and more efficient industrial burners. The LES-FGM model demonstrated superior accuracy in capturing TCI, flame stability boundaries, and thermal NO_x sensitivity compared to RANS, especially in high-strain regions.

Keywords: Large Eddy Simulation (LES), RANS Combustion Modeling, Non-Premixed Flame Stability, Co-Flow Burner, Combustion Efficiency, Pollutant Emission Index, Numerical Validation.

How to cite this article

Helmi H, Bakhshan Y, Adibi P, Numerical Simulation of Non-Premixed Combustion and The Effect of Variations in The Mass Flow Rate Ratio of Air to Fuel on Flame Stability, Combustion Efficiency and Pollutant Indices. Modares Mechanical Engineering; 2027;27(01):65-77.

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

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



Copyright© 2027, 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.



شبیه‌سازی عددی احتراق غیرپیش‌آمیخته و تأثیر تغییرات نسبت دبی جرمی هوای همسو به سوخت بر پایداری شعله، راندمان احتراق و شاخص‌های آلاینده

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

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

بهینه‌سازی عملکرد مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته برای دستیابی همزمان به راندمان حرارتی بالا، انتشار پایین آلاینده‌ها و حفظ پایداری عملیاتی قوی، نیازمند ابزارهای پیش‌بینی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که تعاملات آشفته‌گی-شیمی (TCI) در ریز مقیاس را با دقت مدل‌سازی کنند. مدل‌های متداول میانگین‌گیری رینولدز ناویر-استوکس (RANS) اغلب در ثبت اثرات ریزمقیاس، برای پیش‌بینی تشکیل NO_x حرارتی و پدیده‌های نزدیک به خاموشی دچار ضعف هستند. این مطالعه با به‌کارگیری یک رویکرد دوگانه عددی، یک حل‌کننده RANS تطبیق‌یافته را با چارچوب شبیه‌سازی بزرگ گردابه‌ها (LES) مجهز به مدل منیفولد تولید شده توسط شعله (FGM) و مکانیسم سینتیک GRI-Mech 3.0 جفت کرده و هر دو را در برابر داده‌های تجربی اعتبارسنجی می‌کند. این روش ترکیبی برای پیش‌بینی عملکرد یک مشعل هم‌جریان سوخت-هوا تحت تغییرات سیستماتیک نسبت جریان جرمی هوا به سوخت (MFR) استفاده شده است. تجزیه و تحلیل زمان-فرکانس نوسانات سیالاتی و ترمودینامیکی، یک ناپایداری هیدرودینامیکی غالب با فرکانس پایین (۱۰-۵۰ هرتز) را شناسایی کرد که به ریزش گردابه‌ها در ناحیه جدایش جریان مربوط می‌شود. نتایج کمی نشان داد که در حالی که جریان هوای همسو، راندمان تبدیل کربن (CCE) را تا ۵٪ تا MFR=5 بالای ۸۰٪ حفظ می‌کند و انتشار NO_x را از طریق رقیق‌سازی حرارتی به شدت کاهش می‌دهد، افزایش نسبت رقیق‌سازی منجر به کاهش پایداری حرارتی و افزایش خطر نوسانات هیدرودینامیکی پایدار می‌شود. این رویکرد مدل‌سازی مقایسه‌ای، یک چارچوب پیش‌بینی قوی برای طراحی مشعل‌های صنعتی ایمن‌تر و کارآمدتر ارائه می‌دهد. مدل LES-FGM دقت برتری در ثبت TCI، مرزهای پایداری شعله و حساسیت NO_x حرارتی نسبت به RANS، به ویژه در نواحی با کرنش بالا، نشان داد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، مدل‌سازی احتراق RANS، پایداری شعله غیرپیش‌آمیخته، مشعل جریان همسو، راندمان احتراق، شاخص انتشار آلاینده، اعتبارسنجی عددی.

نحوه ارجاع به این مقاله

حلمی حامد، بخشان یونس، ادیبی پویان، شبیه‌سازی عددی احتراق غیرپیش‌آمیخته و تأثیر تغییرات نسبت دبی جرمی هوای همسو به سوخت بر پایداری شعله، راندمان احتراق و شاخص‌های آلاینده، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۷-۶۵: ۲۷(۰۱): ۱۴۰۵.

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

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



۱- مقدمه

مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته که در پیکربندی‌های جریان همسو کار می‌کنند، اجزای اساسی در بخش‌های مختلف صنعتی، از جمله تولید برق (توربین‌های گازی، دیگ‌های بخار)، فرآوری پتروشیمی (فلرها) و سیستم‌های گرمایشی هستند. جذابیت آنها ناشی از ایمنی عملیاتی ذاتی، انعطاف‌پذیری سوخت و مهار قوی شعله است. با این حال، الزامات صنعتی مدرن، به حداکثر رساندن راندمان احتراق در عین به حداقل رساندن انتشار گازهای مضر (CO ، NO_x) و حفظ حاشیه پایداری شعله در برابر فوران و برخاستن، سیستم‌هایی را ملزم به عملکرد نزدیک به محدودیت‌های ترمودینامیکی خود می‌کند. دستیابی به این بهینه‌سازی چند هدفه پیچیده است زیرا این سه هدف اغلب از طریق بده‌بستان‌های حیاتی مرتبط با دینامیک سیالات محلی و سینتیک واکنش شیمیایی به هم مرتبط هستند. تغییرات در پارامترهای عملیاتی، به ویژه تغییر نرخ جریان سوخت و هوا (که استوکیومتری جهانی و نسبت جریان جرمی هوا به سوخت بحرانی را تعیین می‌کند)، مستقیماً بر دینامیک لایه برشی که شعله در آن تثبیت می‌شود، تأثیر می‌گذارد. پیش‌بینی دقیق پاسخ شعله به این تغییرات جریان، به ویژه در نزدیکی شرایط سخت نرخ کرنش بالا و ناپایداری اولیه، همچنان یک چالش اساسی برای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است.

احتراق غیرپیش‌آمیخته در مشعل‌های هم‌جریان، پدیده‌ای چندفیزیکی است که از تعامل پیچیده اختلاط آشفته، سینتیک شیمیایی و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی ناشی می‌شود [۱-۳]. در این سیستم‌ها، ناپایداری کلون-هلمهولتز در لایه برشی میان سوخت و اکسیدان، نقشی کلیدی در شکل‌گیری ساختارهای شعله و تحریک نوسانات ترموآکوستیک ایفا می‌کند [۴-۸]. مطالعات نشان می‌دهند که برهم‌کنش میان ناپایداری‌های ذاتی و ترمودیفیوژن، به‌ویژه در شعله‌های هیدروژن‌سوز یا آمیخته‌های نوین نظیر آمونیاک-متان، تأثیر مستقیمی بر مرزهای پایداری شعله، چروکیدگی آن و مکانیسم‌های خاموشی دارد [۹-۱۵]. فرآیند پایداری شعله به‌شدت تحت تأثیر اثر متقابل اعداد رینولدز و دامکولر است و پارامترهای عملیاتی نظیر نسبت هم‌ارزی، هندسه مشعل و شدت جریان‌های چرخشی، دینامیک شعله را تعیین می‌کنند [۱۶-۱۸]. همچنین، تحقیقات تجربی بر روی مشعل‌های گاز طبیعی نشان داده‌اند که استفاده از جریان‌های هم‌جریان بخار یا هوا می‌تواند شاخص‌های کلیدی عملکرد نظیر راندمان تبدیل کربن و نرخ انتشار آلاینده‌ها را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد [۱۹-۲۰].

برای ثبت دقیق این فیزیک پیچیده، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) به دلیل توانایی در تفکیک ساختارهای آشفته در مقیاس بزرگ و مدل‌سازی اثرات زیرشبکه، به ابزاری استاندارد تبدیل شده است [۲۱-۲۴]. ادغام LES با مدل‌های احتراق پیشرفته مانند

منی‌فولد تولید شده توسط شعله (FGM) و متغیر پیشرفت شعله (FPV)، پیش‌بینی‌های دقیقی از میدان‌های دما، غلظت گونه‌ها و آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد [۲۵-۳۱]. پژوهش‌های اخیر با بهره‌گیری از این رویکردهای عددی، به تحلیل دقیق‌تر برهم‌کنش‌های شعله-گردابه، انتقال حرارت و پاسخ‌های نرخ آزاد سازی گرما در شرایط ناپایداری‌های خودانگیخته پرداخته‌اند [۳۲-۳۶]. علاوه بر این، ترکیب مدل‌های عددی با روش‌های شناسایی سیستم و مدل‌های شبکه مرتبه پایین، توانایی پیش‌بینی آستانه‌های ناپایداری‌های ترموآکوستیک در مشعل‌های صنعتی را ارتقا داده است [۳۷-۴۰]. به‌طور کلی، توسعه مدل‌های عددی مبتنی بر LES در کنار اعتبارسنجی‌های تجربی، بستری مطمئن برای بهینه‌سازی طراحی مشعل‌ها جهت دستیابی به احتراق کم‌صدا و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی فراهم کرده است.

شبیه‌سازی احتراق غیرپیش‌آمیخته آشفته به مدل‌سازی دقیق برهم‌کنش بسیار غیرخطی بین آشفستگی و نرخ واکنش شیمیایی (TCI) متکی است. مدل‌سازی RANS (میانگین رینولدز-ناویر-استوکس) فقط برای مقادیر میانگین زمانی حل می‌شود و کارایی محاسباتی مناسبی را برای طراحی اولیه و تجزیه و تحلیل صنعتی در مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد. با این حال، RANS برای در نظر گرفتن عبارات منبع واکنش بسته نشده، به مدل‌های بسته (مانند مفهوم اتلاف گردابی، EDC یا PDF) نیاز دارد. نکته مهم این است که RANS ذاتاً نوسانات لحظه‌ای دما و سرعت را هموار می‌کند. تشکیل NO_x حرارتی توانی است به طور خاص به نوسانات دما حساس است، که RANS قادر به حل آن نیست. خاموش شدن و خاموش شدن شعله، رویدادهای گذرا و در مقیاس کوچک هستند که توسط تعادل آنی بین نرخ کرنش محلی و مقیاس‌های زمانی شیمیایی کنترل می‌شوند. RANS اغلب به معیارهای بسیار تجربی برای پیش‌بینی این محدودیت‌های پایداری نیاز دارد و فاقد جامعیت در خارج از دامنه کالیبره شده خود است. مدل‌های LES به صراحت گردابه‌های بزرگ و حامل انرژی را حل می‌کنند، در حالی که تنها کوچکترین حرکات در مقیاس زیر شبکه (SGS) را مدل‌سازی می‌کنند. این چارچوب ماهیت گذرای جریان را در نظر می‌گیرد و نمایش بسیار دقیق‌تری از میدان‌های دمایی لحظه‌ای و نرخ‌های اتلاف اسکالر محلی ارائه می‌دهد. هنگامی که LES با زیر مدل‌های احتراق پیشرفته (به عنوان مثال، تابع چگالی فیلتر شده یا جدول‌بندی دقیق شیمی) همراه می‌شود، پیش‌بینی TCI، مکانیسم‌های مهار شعله و آلاینده‌های حساس به دما را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. در حالی که از نظر محاسباتی دشوار است، LES برای تجزیه و تحلیل دقیق در نزدیکی مرزهای عملیاتی بحرانی ضروری است.

این مطالعه با هدف تحلیل عددی جامع از اثرات تغییرات سیستماتیک نسبت جریان جرمی هوا به سوخت (MFR) بر

عبارات همرفتی را حذف کند و معادله پیوستگی را در شکل فشرده خود حفظ کند. میانگین‌گیری رینولدز برای فشار و چگالی استفاده می‌شود، زیرا آنها متغیرهای حالت هستند که توسط معادله حالت کنترل می‌شوند، که در آن $\bar{p}$ چگالی فیلتر شده و $\bar{p}$ فشار ترمودینامیکی فیلتر شده است. معادله پیوستگی فرم میانگین فاور (Favre-averaged) برای (RANS/LES) یک جریان تراکم‌پذیر و واکنشی به صورت زیر داده می‌شود:

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

که در آن $\bar{\rho}$ چگالی میانگین فاور و $\mathbf{u}$ سرعت میانگین فاور و t زمان است.

معادله ممنتوم: معادله بقای ممنتوم برای یک سیال نیوتنی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tilde{\tau}_{ij} - \tau_{ij}^{sgs})}{\partial x_j} + \bar{\rho} \tilde{g}_i \quad (2)$$

در اینجا $\bar{p}$ فشار میانگین (ترکیبی از فشار ترمودینامیکی و فشار آشفته)، $\tilde{\tau}_{ij}$ تانسور تنش ویسکوز مولکولی و τ_{ij}^{sgs} تانسور تنش زیرشبکه است. که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی، δ_{ij} دلتای کرونکر g بردار شتاب گرانشی و t زمان است. ویسکوزیته μ معمولاً به دمای میانگین فاور وابسته است، لذا استفاده از $\bar{\mu}$ دقیق‌تر است. با استفاده از میانگین‌گیری فاور برای نرخ کرنش داریم:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \bar{\mu} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

در RANS تانسور تنش رینولدز از طریق فرضیه بوسینسک مدل‌سازی شده است. در رویکرد LES تانسور تنش در مقیاس زیرشبکه (SGS) با استفاده از مدل‌های اسماکورینسکی یا دینامیکی مدل‌سازی شده است.

در رویکرد RANS: تانسور تنش رینولدز (τ_{ij}^{RANS}) با استفاده از فرضیه بوسینسک و ویسکوزیته گردابی (μ_t) مدل می‌شود:

$$\tau_{ij}^{RANS} = -\bar{\rho} \tilde{u}_i' \tilde{u}_j' \approx \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (4)$$

در رویکرد LES: تانسور تنش زیرشبکه (τ_{ij}^{sgs}) نشان‌دهنده اثرات گردابه‌های زیر فیلتر است که با استفاده از مدل اسماکورینسکی یا مدل‌های دینامیکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij}^{sgs} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \quad (5)$$

معادله انرژی: معادله پایستگی انرژی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u} H) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \sum_k \nabla \cdot (\rho D_k h_k \nabla Y_k) + \sum_k \dot{\omega}_k h_k + \Phi_{diss} \quad (6)$$

$$H = h + \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \quad (7)$$

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

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

$$\frac{\partial (\bar{\rho} Y_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u} Y_k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla Y_k) + \dot{\omega}_k \quad (8)$$

اصطلاح منبع شیمیایی:

معیارهای عملکرد یک مشعل غیرپیش‌آمیخته جریان همسو انجام شده است. اهداف اصلی این تحقیق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱. اعتبارسنجی مدل‌های RANS و LES-FGM در برابر داده‌های تجربی با استفاده از معیارهای کمی

۲. بررسی تأثیر MFR بر پایداری شعله، راندمان احتراق (CCE) و شاخص‌های آلاینده

۳. تحلیل ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و تأثیر آن‌ها بر دینامیک شعله و تشکیل آلاینده‌ها.

۴. مقایسه بین مدل‌های RANS و LES-FGM در پیش‌بینی مرزهای پایداری و حساسیت NOx حرارتی به دما.

۵. ارائه یک چارچوب پیش‌بینی برای طراحی مشعل‌های صنعتی با راندمان بالا و آلاینده‌ی پایین.

در حالی که مطالعات تجربی متعددی بر روی مشعل‌های هم‌جریان غیرپیش‌آمیخته انجام شده‌اند، کمبود مطالعات عددی با استفاده از LES-FGM برای بررسی تأثیر MFR بر پایداری شعله و تشکیل آلاینده‌ها مشهود است. این مطالعه با استفاده از رویکرد ترکیبی RANS-LES-FGM و اعتبارسنجی در برابر داده‌های تجربی، به پر کردن این شکاف می‌پردازد. LES-FGM قادر است TCI را با دقت بالا ثبت کند، در حالی که RANS برای پیش‌بینی میانگین‌ها کافی است، اما در ثبت نوسانات لحظه‌ای و پدیده‌های گذرا دچار ضعف است.

بخش‌های بعدی این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده‌اند: بخش ۲ معادلات حاکم، بسته‌های آشفتگی خاص RANS و LES و مدل‌های احتراق انتخاب شده را شرح می‌دهد. بخش ۳ هندسه فیزیکی مشعل جریان مشترک، دامنه محاسباتی، تحلیل حساسیت مش و شرایط مرزی را شرح می‌دهد. بخش ۴ اعتبارسنجی عددی هر دو رویکرد مدل‌سازی را در برابر داده‌های تجربی ارائه می‌دهد. بخش ۵ شامل نتایج اصلی و بحث جامع در مورد تأثیر تغییرات جریان بر راندمان، پایداری و تشکیل آلاینده‌ها، از جمله مقایسه دقیق بین پیش‌بینی‌های RANS و LES است. در نهایت، بخش ۶ یافته‌های کلیدی را خلاصه کرده و مسیرهایی را برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌دهد.

۲- معادلات حاکم برای احتراق جریان همسو

۲-۱ معادلات جریان گاز قابل تراکم

شبیه‌سازی جریان‌های آشفته و واکنشی نیازمند کاربرد و بسته شدن معادلات بقا همراه با مدل‌های پیچیده برای آشفتگی، شیمی و برهمکنش آنهاست. با توجه به هدف تحلیل پایداری و دینامیک شعله، یک رویکرد شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ گذرا (LES) ضروری است که با یک راه‌حل RANS پایدار مقارنه اولیه می‌شود.

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. میانگین‌گیری رینولدز ($\bar{\phi} = \bar{\rho} \bar{\phi} / \bar{\rho}$) برای سرعت و مقادیر اسکالر اعمال می‌شود تا همبستگی‌های چگالی-سرعت در

شاخص تمام هیدروکربن شعله

$$EI_{THC} = \frac{\dot{m}_{THC}}{\dot{m}_f} \left[\frac{g}{kg \text{ fuel}} \right] \quad (21)$$

شاخص اکسید نیتروژن یا ناکس شعله

$$NO_x \text{ حرارتی (مکانیسم زلدوویچ)} \quad (22)$$

$$\frac{d[NO]}{dt} \propto 2k_{f1}[N_2][O] \left(1 - \frac{[NO]^2}{K_{eq}[N_2][O_2]} \right)$$

$$NO_x \text{ سریع (مکانیسم فنیمر)} \quad (23)$$

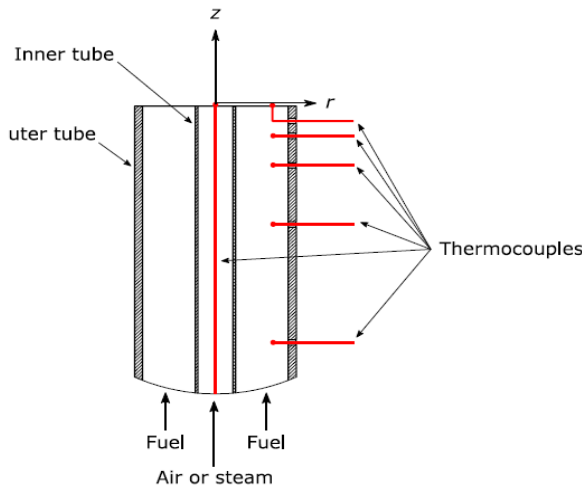
$$\frac{d[NO]}{dt} \propto [N_2][CH] + [N][OH]$$

شاخص دوده یا کربن شعله

$$EI_{soot} = \frac{\dot{m}_{soot}}{\dot{m}_f} \left[\frac{g}{kg \text{ fuel}} \right] \quad (24)$$

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، 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 [۲۰].

Fig.5 University of Alberta laboratory combustion burner [20].

جدول ۱ مشخصات هندسی مشعل و شرایط سوخت و هوا

Table 1 Burner geometric specifications and fuel and air conditions

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

$$\dot{\omega}_k = M_k \sum_{r=1}^{N_R} (v''_{k,r} - v'_{k,r}) [k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_S} [X_j]^{v'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_S} [X_j]^{v''_{j,r}}] \quad (9)$$

برهمکنش آشفته-شیمی مدل‌ها: مدل اتلاف گردابی (EDM)، مدل‌های Flamelet، مدل‌های PDF.

۲-۲ معادلات دینامیک شعله و مدل منیفلد (FGM)

در زمینه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) احتراق آشفته و غیرپیش‌آمیخته، نرخ واکنش شیمیایی فیلتر شده، که با $(\dot{\omega}_k)$ نشان داده می‌شود، یکی از چالش‌برانگیزترین اصطلاحات برای مدل‌سازی دقیق است. این چالش به این دلیل ایجاد می‌شود که نرخ واکنش‌های شیمیایی بسیار غیرخطی هستند و اغلب از وابستگی دمایی نوع آرنیوس پیروی می‌کنند:

$$\dot{\omega}_k = AT^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [C]^n \quad (1)$$

که در آن A ضریب پیش‌نمایی، Ti دما، β توان دما، E_a انرژی فعال‌سازی، R ثابت جهانی گاز و [C] غلظت واکنش‌دهنده‌ها را نشان می‌دهد. هنگامی که معادلات حاکم برای LES فیلتر می‌شوند، همبستگی‌های مقیاس زیرشبکه (SGS) بین غلظت گونه‌ها و دما حل نمی‌شوند و در صورت عدم مدل‌سازی صحیح، منجر به خطاهای قابل توجهی می‌شوند. این به عنوان مشکل بسته شدن در احتراق آشفته شناخته می‌شود. مفهوم FGM یک رویکرد قدرتمند برای مدل‌سازی احتراق غیرپیش‌آمیخته است. این مدل فرض می‌کند که مقیاس‌های زمانی شیمیایی بسیار کوتاه‌تر از مقیاس‌های زمانی اختلاط آشفته هستند و این امر امکان پارامتری کردن حالت شیمیایی پیچیده را با مجموعه‌ای کاهش‌یافته از متغیرهای اسکالر فراهم می‌کند.

معادله برگشت شعله:

$$\kappa_s = \frac{\partial \tilde{u}_x}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{u}_r}{\partial r}, \quad \kappa_s \geq \kappa_{crit} \quad (15)$$

معادله پایداری جنبشی شعله:

$$K_{stable} = \frac{\tilde{\chi}_{max, stabilization}}{\chi_{crit, Z_{st}}}, \text{ Stability if } K_{stable} < 1 \quad (16)$$

۲-۳ معادلات راندمان شعله

راندمان حرارتی شعله:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{useful}}{\dot{m}_f LHV_f}, \quad \dot{Q}_{useful} = \sum_k \dot{m}_k \tilde{h}_{k,out} - \sum_k \dot{m}_k \tilde{h}_{k,in} - \dot{Q}_{loss} \quad (17)$$

راندمان احتراق شعله: معیاری برای سنجش میزان کامل بودن احتراق است که از نسبت انرژی از دست رفته به دلیل عدم احتراق کامل (ناشی از وجود CO و هیدروکربن‌های نسوخته) به کل انرژی ورودی سوخت محاسبه می‌شود:

$$\eta_c = 1 - \frac{(\dot{m}_{CO} \cdot LHV_{CO}) + (\dot{m}_{THC} \cdot LHV_{THC})}{\dot{m}_f \cdot LHV_f} \quad (18)$$

راندمان تخریب شعله:

$$\eta_{loss} = 1 - \eta_{th} - \eta_c \quad (19)$$

۲-۴ شاخص‌های انتشار شعله

شاخص‌های انتشار برای توصیف تأثیر زیست‌محیطی احتراق استفاده می‌شوند که معمولاً به صورت جرم آلاینده در هر جرم سوخت سوزانده شده بیان می‌شوند.

شاخص موناکسید کربن شعله

$$EI_{CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_f} \left[\frac{g}{kg \text{ fuel}} \right] \quad (20)$$

۴- روش‌شناسی عددی

این بخش به تفصیل روش‌شناسی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) قوی مورد استفاده برای شبیه‌سازی میدان جریان واکنشی آشفته پیچیده را شرح می‌دهد. این رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) با دقت بالا است تا پدیده‌های فیزیکی گذرا و غیرخطی را به طور دقیق ثبت کند، به طور خاص بر ناپایداری‌های جریان و سینتیک شیمیایی دقیق تمرکز دارد.

۴-۱ دامنه محاسباتی و گسسته‌سازی تطبیقی

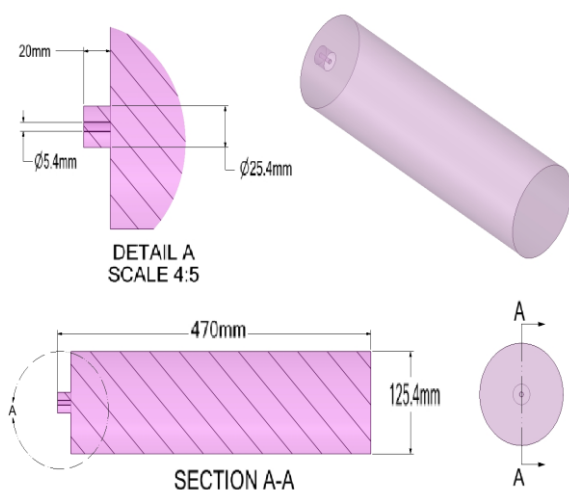
مطالعه حاضر با بهره‌گیری از قابلیت‌های پیشرفته نرم‌افزار ANSYS CFD، به بررسی دقیق فرآیندهای احتراق پیچیده، آشفته و غیرپیش‌آمیخته در یک مشعل هم‌جریان می‌پردازد. یکی از چالش‌های اساسی در تحلیل عددی مشعل‌ها، موازنه میان دقت در ثبت مقیاس‌های کوچک آشفته و هزینه‌های بالای محاسباتی است. برای غلبه بر این چالش، پژوهش حاضر از یک رویکرد ترکیبی (RANS-LES) استفاده می‌کند که در آن مزایای همگرایی سریع روش RANS با دقت بالای شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) تلفیق شده است.

در فاز نخست، از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ Realizable در چارچوب RANS برای تولید میدان جریان اولیه و پایدار استفاده شده است. این گام، ضمن فراهم آوردن شرایط اولیه فیزیکی سازگار، به توزیع دقیق ویسکوزیته آشفته کمک می‌کند که در نهایت منجر به تسریع همگرایی در گذار به فاز LES می‌گردد. در فاز LES، با هدف ثبت ناپایداری‌های گذرا و دینامیک لایه برشی بین جریان سوخت و هوا، از مدل اسماغورینسکی پویا (Dynamic Smagorinsky) برای بستن معادلات آشفتگی در مقیاس زیرشبکه (SGS) استفاده شده است. این انتخاب به دلیل توانایی مدل در تنظیم خودکار ضرایب بر اساس ویژگی‌های محلی جریان، دقت شبیه‌سازی را در مناطق برشی که پایداری شعله و تشکیل آلاینده‌ها را تعیین می‌کنند، به میزان قابل توجهی ارتقا می‌دهد.

با توجه به اینکه جریان هوا با عدد رینولدز ($Re \approx 1450$) در رژیم لامینار/گذار و جریان سوخت با ($Re \approx 4950$) در رژیم آشفته وارد محفظه می‌شوند، تولید نوسانات ورودی با طیف انرژی مناسب اهمیت حیاتی دارد. بدین منظور، از روش «فیلتر دیجیتال» (Digital Filter) استفاده شد تا نوسانات آشفته با ویژگی‌های فیزیکی واقعی به دامنه محاسباتی تزریق شوند.

در بخش مدل‌سازی احتراق، از رویکرد منیفولد تولید شده توسط شعله (FGM) با استفاده از مکانیسم سینتیکی GRI-Mech 3.0 برای گاز طبیعی استفاده شده است. در این مدل، برای در نظر گرفتن نوسانات آشفته دما و غلظت گونه‌ها، از تابع چگالی احتمال (PDF) به صورت β -PDF برای کسر اختلاط (Z) و Dirac PDF برای متغیر پیشرفت (C) استفاده شده و ۵۳ گونه شیمیایی در منیفولد لحاظ شده است. از نظر محاسباتی، گسسته‌سازی زمانی با طرح ضمنی مرتبه دوم و گسسته‌سازی مکانی معادلات مونتوم با روش

تفاضل مرکزی (به دلیل اتلاف عددی کم و وضوح بالای ساختارهای آشفته) انجام شده است. در نهایت، طراحی دامنه محاسباتی با امتداد ۱۲۵ میلی‌متر در پایین‌دست و ۲۵/۴ میلی‌متر به صورت شعاعی (مطابق شکل ۲)، به گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که ضمن جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی خروجی بر منطقه واکنش، امکان ثبت دقیق پدیده‌هایی نظیر سوسو زدن شعله دینامیک گردابه‌های بزرگ را فراهم می‌آورد. این رویکرد یکپارچه، تحلیل دقیق تعامل میان ساختارهای جریان و شیمی احتراق را در مشعل‌های صنعتی میسر می‌سازد



شکل ۲ مقاطع فضای محاسباتی استوانه ای مشعل احتراق آزمایشگاهی.

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

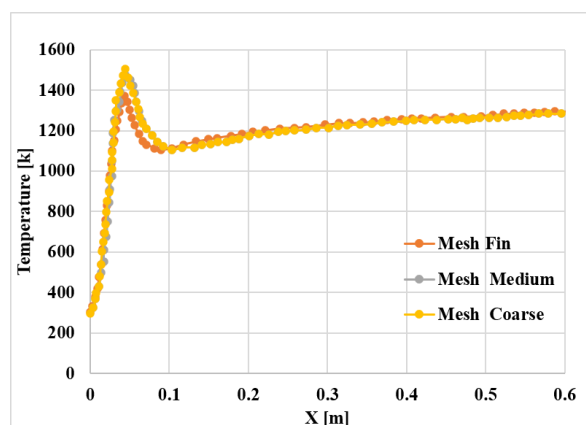
۴-۲- اعتبارسنجی مدل

مدل LES با مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی، با تمرکز بر ارتفاع و ساختار شعله، پروفیل‌های دما و غلظت گونه‌ها اعتبارسنجی می‌شود. ارتفاع شعله، که توسط سطح ایزو $T=1500\text{ K}$ در شبیه‌سازی تعریف می‌شود، با مرز کمیلومینسانس شیمیایی OH از آزمایش‌ها مقایسه می‌شود. این مدل، ارتفاع شعله را در محدوده مقادیر تجربی برای شرایط جریان همسو هوا پیش‌بینی می‌کند، نمودارهای دمای شعاعی در $z=20$ میلی‌متر (نزدیک پایه شعله) که برای اندازه‌گیری دقیق NO_x بسیار مهم است. غلظت گونه‌ها و شاخص‌های آلاینده، مانند CO، CO_2 ، از اندازه‌گیری‌های تجربی پیش‌بینی می‌شوند که نشان‌دهنده قابلیت پیش‌بینی عالی مدل است. ناپایداری هیدرودینامیکی غالب با فرکانس پایین، مرتبط با ریزش گردابه در مقیاس بزرگ ثبت شده است و فرکانس‌های نوسان فشار با داده‌های تجربی مطابقت نزدیکی دارند. فرکانس و دامنه کمی بالاتر مشاهده شده با جریان هوای مشترک، به افزایش ناپایداری لایه برشی نسبت داده می‌شود.

جدول ۳ خطای اعتبارسنجی شبکه و دقت مدل عددی برای پیش‌بینی دما، NOx و CO

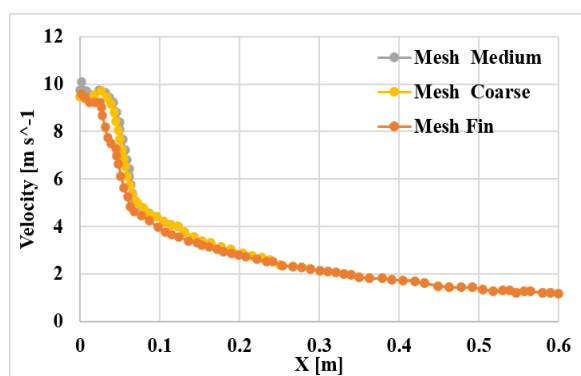
Table 3 Network validation error and numerical model accuracy for temperature, CO and NOx prediction

Variable	RMSE (%)	NMBE (%)	Simulated	Experimental
Temperature (K)	1.2	0.8	1505 ± 20	1490 ± 30
CO ₂ (g/min)	2.0	1.5	31 ± 5	35 ± 4
NOx (g/min)	1.8	1.2	8.8×10 ⁻⁴ ± 2.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻³ ± 4.0×10 ⁻⁴



شکل ۳ مقایسه بیشینه دما در سه شبکه با چگالی سلولی مختلف در خط محوری نازل

Fig. 3 Comparison of maximum temperature in three networks with different cell densities on the nozzle axis line



شکل ۴ مقایسه بیشینه سرعت در سه شبکه با چگالی سلولی مختلف در خط محوری نازل

Fig. 4 Comparison of the maximum speed in three grids with different cell density in the axial line of the nozzle

در راستای اطمینان از صحت محاسبات، یک مطالعه جامع همگرایی و استقلال از شبکه نتایج شبیه‌سازی LES با استفاده از سه سطح شبکه (درشت، متوسط و ریز) و با ضریب پالایش $r \geq 1.4$ انجام شد. همان‌طور که در جدول ۲ خلاصه شده است، شاخص همگرایی شبکه (GCI) بر اساس روش برون‌یابی ریچاردسون محاسبه گردید. نتایج، همگرایی یکنواخت را برای هر دو متغیر دما ($GCI_T \leq 0.28\%$) و سرعت ($GCI_U \leq 0.22\%$) در شبکه ریز نشان می‌دهد که حاکی از به حداقل رسیدن مؤثر خطای گسسته‌سازی است. علاوه بر این، کیفیت شبیه‌سازی LES با استفاده از معیار پوپ ($M = k_{\text{resolved}}/k_{\text{total}}$) ارزیابی شد؛ نتایج نشان می‌دهد که مقدار $M > 0.8$ در ۹۰٪ از دامنه محاسباتی محقق شده است که تأیید می‌کند حداقل ۸۰٪ انرژی جنبشی آشفتگی حل شده است. رزولوشن نزدیک دیواره به‌طور دقیق در تمامی مرزها در سطح $y^+ < 1$ حفظ شد تا نیاز به مدل‌های تجربی دیواره برطرف گردد.

گسسته‌سازی زمانی تحت حاکمیت شرط پایداری CFL ($CFL < 0.5$) قرار داشت. در طول شبیه‌سازی‌ها، مقدار متوسط CFL برابر ۰.۳ و مقدار بیشینه آن ۰.۴۵ مشاهده شد که پایداری طرح زمانی را تضمین می‌کند. برای دستیابی به حالت ایستانی آماری در این شبیه‌سازی‌های ناپایا، کل زمان انتگرال‌گیری تا ۲۰ برابر زمان عبور جریان ($T_{\text{sim}} = 20 \times T_{\text{flow}} \approx 2.0 \text{ s}$) افزایش یافت. در این بازه، نوسانات دما و سرعت در نقاط کلیدی پایش شدند تا اطمینان حاصل شود که آمارهای میانگین‌گیری‌شده زمانی به یک تعادل پایدار رسیده‌اند.

در نهایت، دقت مدل عددی با استفاده از شاخص‌های آماری کمی در برابر داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. جدول ۳، خطای متوسط مربعات (RMSE) و خطای میانگین نرمال‌شده (NMBE) را برای پارامترهای کلیدی احتراق ارائه می‌دهد. خطاهای مشاهده‌شده با مقادیر $RMSE < 2.0\%$ و $NMBE < 1.5\%$ ، نشان‌دهنده انطباق بالایی میان نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های تجربی است؛ در نتیجه، این امر توانمندی مدل در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده احتراقی را تأیید می‌کند. همچنین، در شکل ۳ و شکل ۴، مقایسه مقادیر بیشینه دما و سرعت در امتداد خط محوری نازل برای سه سطح شبکه با چگالی سلولی متفاوت، نشان داده شده است.

جدول ۲ تحلیل استقلال از شبکه مدل عددی

Table 2 Independence analysis of the numerical model network

Grid Level	Cells	Δx (mm)	r	T (K)	U (m/s)	GCI T (%)	GCI U (%)
Coarse	500K	1.00	-	1505	9.02	-	-
Medium	1.2M	0.7	1.43	1475	8.85	1.05	0.88
Fine	2.5M	0.5	1.4	1468	8.81	0.28	0.22

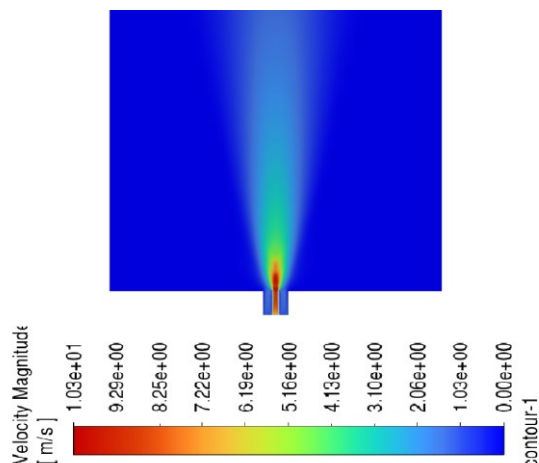
۵- روش حل و تجزیه و تحلیل داده‌ها

۵-۱- اختلاط آشفته و دینامیک شعله

ورود جریان هوای همسو در سیستم‌های احتراق غیر پیش‌آمیخته، اساساً اختلاط آشفته و دینامیک شعله را تغییر می‌دهد. شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) نشان می‌دهد که جریان هوای همسو باعث ریزش دوره‌ای گردابه‌ها در لبه مشعل با فرکانس‌های غالب در محدوده ۱۰ تا ۵۰ هرتز و پیک‌های قابل توجه در ۲۰ هرتز و ۴۰ هرتز می‌شود، با توجه به عدد اشتروهل ($St \approx 0.3$) و در نظر گرفتن هندسه مشعل ($D \approx 25$ mm) و محدوده سرعت جریان‌های سوخت و هوا در نازل مشعل ($U \approx 8-15$ m/s)، نوسانات فیلپکر شناوری (ناپایداری ریلی-تیلور) مشاهده می‌شوند که ناشی از اثرات گرانش و قطر مشعل (g/D) است. جهت تأیید این مکانیسم، اعداد بی‌بعد ریچاردسون ($Ri \approx 0.1-0.5$) و فرود ($Fr \approx 0.5-1.5$) محاسبه شدند که به ترتیب نشان‌دهنده غلبه نیروهای شناوری و اینرسی هستند.

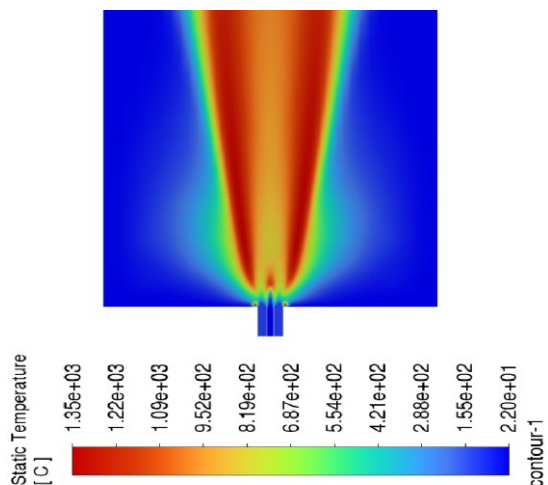
این گردابه‌ها هوای محیط را با نرخ بالایی به درون جت سوخت می‌کشند که منجر به افزایش مساحت سطح شعله و بهبود نرخ اختلاط محلی می‌شود. تحلیل میدان‌های سرعت میانگین، همبستگی بسیار قوی بین انحنای شعله و نرخ اتلاف اسکالر فیلترشده را نشان می‌دهد؛ این موضوع تأیید می‌کند که نرخ واکنش‌های لحظه‌ای در این سیستم، کاملاً توسط فرآیندهای اختلاط آشفته کنترل می‌شود. در واقع، این ریزش‌های گردابه‌ای، موتور محرک تقویت اختلاط بوده و عامل کلیدی در رسیدن به پایداری و یکنواختی در مشعل‌های مجهز به جریان همسو هستند. شکل‌های ۵ و ۶ شواهد بصری برهمکنش بین جریان‌های سوخت و هوا را نشان می‌دهد، به طوری که گرادیان‌های سرعت بالا و نواحی برشی مستقیماً ساختار شعله و راندمان احتراق را شکل می‌دهند.

جریان هوای همسو، هم اختلاط و هم پایداری شعله را در مقایسه با پیکربندی‌های بدون رقیق‌ساز افزایش می‌دهد، زیرا ورود هوای محیط، مناطق واکنش را تشدید کرده و احتراق یکنواخت‌تری را ایجاد می‌کند. تجزیه و تحلیل جزئیات دینامیک جریان، بر اهمیت برهمکنش‌های سرعت در ساختار شعله تأکید دارد. میدان‌های سرعت لحظه‌ای، ریزش‌های قوی و متناوب گردابه‌ها را در نزدیکی لبه مشعل نشان می‌دهند که مستقیماً مساحت سطح شعله و نرخ اختلاط را افزایش می‌دهند. شکل ۵ کانتورهای سرعت جریان‌های سوخت و هوای خروجی از نازل مشعل را نمایش می‌دهد که تعامل قوی بین جت سوخت و هوای اطراف را از طریق مناطق دارای گرادیان سرعت بالا و برش بالا آشکار می‌سازد. شکل ۶ نیز کانتور دمای محصولات احتراق شبیه‌سازی شده با RANS را ارائه می‌دهد که ساختار حرارتی و مناطق واکنش را مشخص می‌کند. این شواهد بصری در کنار داده‌های کمی، نقش حیاتی اختلاط آشفته، که توسط دینامیک گردابه‌ای هدایت می‌شود، را در تعیین نهایی ساختار شعله و راندمان کلی احتراق تثبیت می‌کند.



شکل ۵ کانتور سرعت جریانی سوخت و هوای خروجی از نازل مشعل در فضای محاسباتی استوانه‌ای

Fig. 5 Fuel and air flow velocity contour exiting the burner nozzle in a cylindrical computational space



شکل ۶ کانتور دمای محصولات احتراق مشعل در فضای محاسباتی استوانه‌ای با شبیه‌سازی RANS

Fig. 6 Temperature contour of burner combustion products in cylindrical computational space with RANS simulation

۵-۲ ویژگی‌های دینامیک جریان و پایداری احتراق

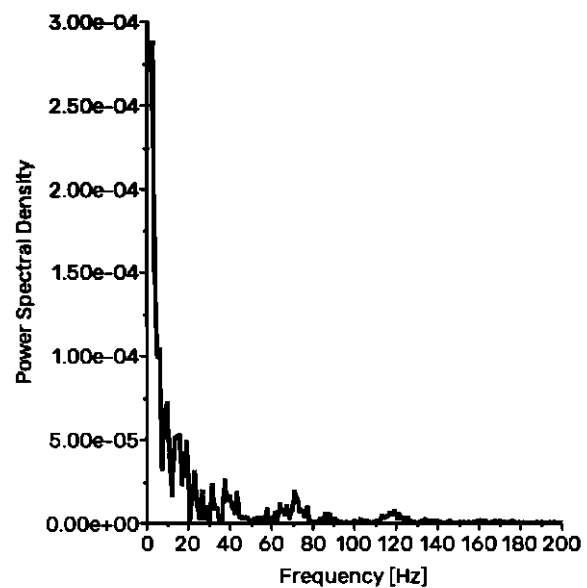
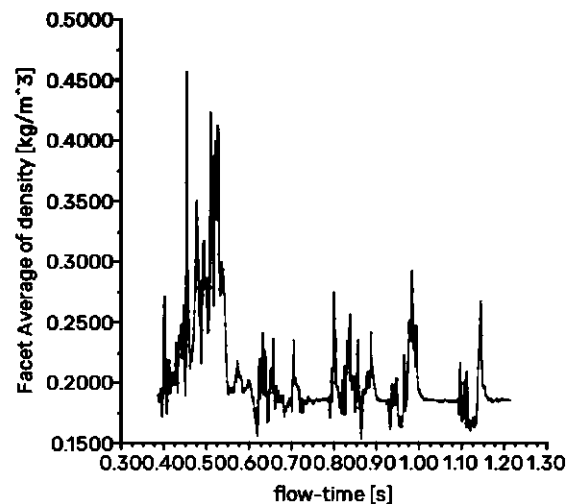
مدل LES به خوبی توانایی بالایی در ثبت مشخصه‌های دینامیکی جریان فرکانس پایین ناشی از ریزش‌های گردابه‌ای در جریان همسو-سوخت دارد. تحلیل چگالی طیفی توان (PSD) میدان فشار دینامیکی، نشان می‌دهد که انرژی جریان در فرکانس‌های پایین متمرکز شده است. ورود جریان هوای همسو، با کاهش نسبت چگالی میان دو جریان و افزایش انرژی موجود در لایه برشی، دامنه نوسانات را در مقایسه با شرایط جریان آرام تغییر می‌دهد. نمودارهای زمان-فرکانس نوسانات سرعت در دهانه نازل، پیک‌های غالب ۲۰ و ۴۰ هرتز را تأیید کرده‌اند که تأثیر مستقیمی بر تشکیل آلاینده‌ها و پایداری شعله دارند.

فرآیند رقیق‌سازی که توسط جریان هوای هم‌سو تقویت می‌شود، به عنوان یک شمشیر دولبه در ترمودینامیک و دینامیک شعله شناخته می‌شود. از یک سو، رقیق‌سازی مؤثر با کاهش دمای اوج احتراق، نقشی کلیدی در کنترل و کاهش انتشار آلاینده‌های حرارتی، به‌ویژه اکسیدهای نیتروژن (NO_x) ایفا می‌کند. با این حال، استفاده نامطلوب از این راهکار نیز چالش‌برانگیز است؛ به‌طوری‌که تزریق بیش از حد هوای سرد می‌تواند میدان هیدرودینامیکی جریان را دستخوش بی‌ثباتی کرده و با افزایش دامنه نوسانات فشار، ریسک ناپایداری حرارتی و خاموشی شعله را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

در تحلیل مشعل‌های هم‌جریان بدون چرخش، ناپایداری‌های مشاهده‌شده در نزدیکی نازل سوخت، عمدتاً ناشی از تشکیل ناحیه بیداری (Wake Region) در پشت دیواره لبه لوله داخلی است. این ناحیه، در واقع به عنوان مکانیسم اصلی پایداری شعله در مشعل‌های هم‌جریان عمل می‌کند. ناحیه بیداری با ایجاد یک منطقه چرخش معکوس و کاهش سرعت محلی، موجب بهبود فرآیند اختلاط سوخت و هوا در ریشه شعله شده و پایداری آن را در سرعت‌های بالای جریان تضمین می‌کند.

از سوی دیگر، ماهیت نوسانات ثبت‌شده در این سیستم‌ها، مستقیماً به فرآیند ریزش گردابه‌های بزرگ در لایه برشی میان جریان سوخت و اکسیدان وابسته است. نتایج مطالعات پیشرفته تأیید می‌کنند که در غیاب مدل‌سازی‌های آکوستیکی پیچیده، نوسانات هیدرودینامیکی به عنوان عامل اصلی در برقراری پایداری یا تحریک ناپایداری جریان محسوب می‌شوند. این پدیده تحت عنوان نوسانات هیدرودینامیکی خودپایدار شناخته می‌شود که در آن، ریزش گردابه‌ها به صورت چرخه‌ای منجر به تغییر مداوم میدان سرعت و فشار می‌گردد. در واقع، تعامل میان ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و واکنش‌های شیمیایی، تعیین‌کننده نهایی رفتار شعله است؛ لذا در طراحی مشعل‌های صنعتی، مدیریت دقیق ناحیه بیداری و کنترل دقیق نرخ رقیق‌سازی برای دستیابی به احتراق کم‌آلاینده و در عین حال پایدار، یک ضرورت مهندسی است. این رویکرد به‌ویژه در بهینه‌سازی مشعل‌های کم‌نویز و سیستم‌های احتراقی با نرخ بازدهی بالا نقشی بنیادین دارد.

در این مطالعه، مقادیر کمی پارامترهای CO ، NO_x و CCE و کربن سیاه برای مقادیر مختلف MFR بررسی شده است که جزئیات آن در جدول زیر آورده شده است. تحلیل داده‌ها نشان‌دهنده یک تناقض ظاهری در $\text{MFR}=5$ است؛ به‌طوری‌که با وجود CCE بالای ۹۵ درصد (که دلالت بر مجموع غلظت CO ، THC و دوده کمتر از ۵ درصد دارد)، افزایش غلظت CO در نواحی با کرنش بالا مشاهده می‌شود. این پدیده ناشی از احتراق ناقص موضعی است و نشان می‌دهد در شرایط کرنش شدید، امکان وقوع احتراق ناقص موضعی وجود دارد، در حالی که بازده احتراق کلی (CCE) همچنان در سطح مطلوبی باقی می‌ماند.



شکل ۷ نمودار زمانی و تحلیل طیف فرکانسی چگالی در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل

Fig. 7 Time diagram and analysis of density frequency spectrum in the combustion flow instability domain near the edges and the burner nozzle opening

نوسانات پارامترهای ترمودینامیکی و سیالاتی مانند عدد پرانتل مولکولی (نوسان در ۲۰ هرتز)، که نشان‌دهنده تعامل بین انتشار حرارتی و مومنتوم است، و همچنین نوسانات چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه، ارتباط مستقیمی با نوسانات فشار و دما، به‌ویژه در نزدیکی پایه شعله، دارند. در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار زمانی و تحلیل طیف فرکانسی چگالی و عدد پرانتل در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل نمایش داده شده است. این داده‌ها نشان می‌دهند که تغییرات خواص ترموفیزیکی سیال در نزدیکی دهانه نازل، چگونه با نوسانات نرخ واکنش جفت شده و پایداری شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

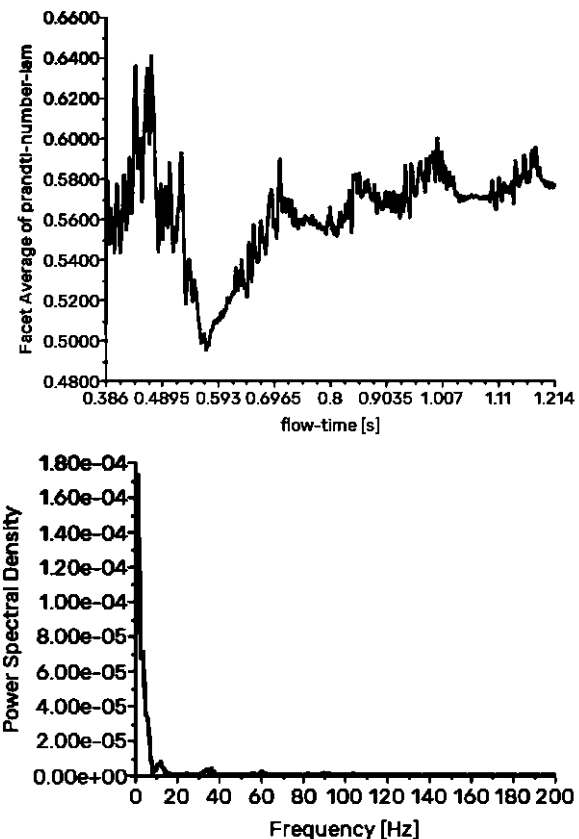
۳-۵ تعادل رقیق‌سازی، پایداری و تشکیل آلاینده‌ها

محدوده عملیاتی $MFR=4.2-5.0$ به عنوان ناحیه بهینه شناسایی می‌شود که در آن ضمن دستیابی به کمترین سطح آلاینده‌گی NO_x ، راندمان احتراق در سطح قابل قبولی ($CCE \approx 81\%$) حفظ می‌شود. از منظر طراحی، مقایسه مدل‌های RANS و LES ضروری است؛ در حالی که RANS برای پیش‌بینی راندمان متوسط کافی است، LES دقت برتری در نقشه‌برداری دقیق از مرزهای پایداری فوران و پیش‌بینی حساسیت NO_x نسبت به دما (به ویژه در مرزهای کرنش بالا) از خود نشان می‌دهد. تعادل بهینه بین راندمان بالا و انتشار پایین، در سطوح رقیق‌سازی متوسط حاصل می‌شود. این امر اطمینان می‌دهد که مشعل‌های مجهز به جریان همسو می‌توانند همزمان با دستیابی به راندمان عملیاتی بالا، الزامات سختگیرانه مقررات زیست‌محیطی مانند استاندارد EPA برای ذرات و محدودیت‌های NO_x در مشعل‌های صنعتی را برآورده سازند. در شکل ۹ کانتور تشعشع لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق ناشی از تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل و تصویربرداری لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق مشعل داده شده است. در شکل ۱۰ شاخص راندمان تجربی و شبیه‌سازی LES تبدیل کربن ناشی از احتراق با تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مشعل و شکل ۱۱ شاخص تجربی و شبیه‌سازی LES انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق با تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مشعل نمایش داده شده‌اند.



شکل ۹ کانتور تشعشع لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق در فضای محاسباتی استوانه‌ای مشعل و تصویربرداری لحظه‌ای جریان گازهای حاصل از احتراق ناشی از تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مرکزی مشعل [۴۱].

Fig. 9 Instantaneous radiation contour of the flow of combustion gases in the cylindrical computational space of the burner and 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 [41].



شکل ۸ نمودار زمانی و تحلیل طیف فرکانسی عدد پرانتل در حوزه ناپایداری جریان احتراق نزدیک لبه‌ها و دهانه نازل مشعل

Fig. 8 Time diagram and analysis of Prandtl number frequency spectrum in the combustion flow instability domain near the edges and the burner nozzle opening

۵-۴- پیامدهای عملیاتی و محیط‌زیستی برای بهینه‌سازی کارایی

اهمیت عملیاتی جریان هوای همسو با بررسی نسبت جریان جرمی هوا به سوخت (MFR) کاملاً نمایان می‌شود. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که راندمان تبدیل کربن (CCE) در شرایط رقیق‌سازی متوسط، مثلاً تا $MFR=5$ ، به بالای ۸۰٪ حفظ می‌شود. فراتر از این نقطه، کاهش راندمان به دلیل برتری مکانیسم‌های خاموشی حرارتی و احتراق ناقص مشهود است. به طور موازی، شاخص انتشار NO_x در MFR های پایین‌تر از ۳.۵ نسبتاً ثابت است، اما در MFR های بالاتر، پیش از فروپاشی CCE ، کاهش قابل توجهی را تجربه می‌کند که این امر به مکانیسم زل‌وویچ در دماهای زیر ۱۸۰۰ کلوین نسبت داده می‌شود. در منظر محیط زیستی، بهترین رژیم عملیاتی برای به حداقل رساندن آلاینده‌ها، اغلب در محدوده $MFR=4-5$ قرار دارد؛ مطابق جدول ۵، نرخ انتشار NO_x تا $MFR=4.6$ روند کاهشی چشمگیری نشان می‌دهد (از ۰/۰۱۵۵ به ۰/۰۰۰۸۸ گرم بر دقیقه)، که ناشی از رقیق‌سازی مؤثر و کاهش دمای شعله است. با این حال، در $MFR>5.3$ ، افت ناگهانی راندمان تبدیل کربن (CCE) از ۸۱٪ به کمتر از ۱۰٪ مشاهده می‌شود که حاکی از پدیده خاموشی (Blow-off) یا احتراق بسیار ناپایدار در این رژیم است. بنابراین،

جدول ۵ نتایج مقادیر شاخص‌های راندمان و آلاینده‌ها در مدل عددی با نسبت جرمی هوا به سوخت متفاوت

Table 5 The results of the values of efficiency indices and pollutants in the numerical model with different mass ratio of air to fuel

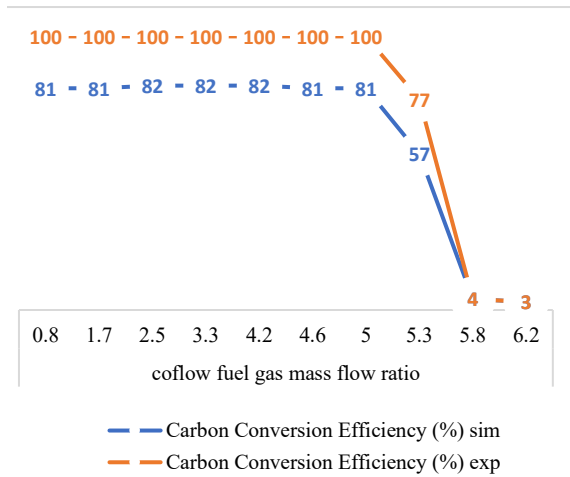
MFR	NOx mass emission rate (g/min)		CO2 mass emission rate (g/min)		BC Mass Emission Rate (g/min)		Carbon Conversion Efficiency (%)	
	LES	EXP	LES	EXP	LES	EXP	LES	EXP
0.8	0.015555	0.0183	31	38	0.00025	0.00001	81	100
1.7	0.015834	0.0182	30	38	0.00033	0.000014	81	100
2.5	0.01649	0.0194	32	39	0.00034	0.000014	82	100
3.3	0.015189	0.0183	32	39	0.00034	0.000014	82	100
4.2	0.001215	0.0015	32	39	0.00035	0.000014	82	100
4.6	0.00088	0.001	31	38	0.00035	0.000014	81	100
5	0.00088	0.001	30	35	0.00035	0.000014	81	100
5.3	0.001232	0.0014	20	24	0.00035	0.000014	57	77
5.8	0.001144	0.0013	2	2	0.00035	0.000014	4	4
6.2	0.001157	0.0013	2	2	0.00035	0.000014	3	3

نتایج عددی نشان می‌دهد که رقیق‌سازی تا $MFR=5.0$ منجر به کاهش بیش از ۹۴٪ در انتشار NO_x می‌گردد. اگرچه افزایش فراتر از این مقدار، نرخ انتشار را در سطح پایینی نگه می‌دارد، اما منجر به افت CCE و وقوع احتراق ناقص می‌شود. لذا محدوده $MFR=4.2-5.0$ برای کارکرد پایدار سیستم پیشنهاد می‌گردد. به طور خلاصه، در محدوده $MFR=4-5$ ، بهترین تعادل بین راندمان و کاهش آلاینده‌ها حاصل می‌شود که الزامات سختگیرانه محیط زیستی را برآورده می‌سازد. مسیر تحقیقات آینده باید بر استفاده از این مدل LES اعتبارسنجی‌شده برای طراحی استراتژی‌های کنترل فعال تمرکز کند، مانند سیستم‌های القایی چرخشی یا تزریق پالسی در فرکانس‌های خارج از محدوده ناپایداری غالب، تا بتوان به طور همزمان به حداقل‌سازی آلاینده‌ها و تضمین پایداری عملیاتی در بالاترین سطح دست یافت.

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

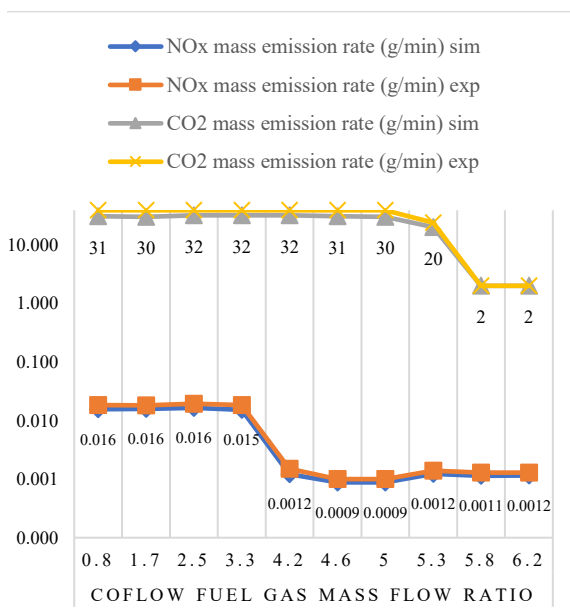
تعارض منافع: هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد. **حامی مالی:** این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

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)



شکل ۱۰ شاخص راندمان تجربی و شبیه‌سازی LES تبدیل کربن ناشی از احتراق با تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مشعل [۲۰].

Fig. 10 Carbon conversion efficiency index resulting from combustion with changes in the mass flow rate of air exiting the burner nozzle. [۲۰]



شکل ۱۱ شاخص انتشار آلاینده‌های ناشی از احتراق با تغییرات دبی جرمی هوای خروجی از نازل مشعل [۲۰].

Fig. 11 Emission index of pollutants resulting from combustion with changes in the mass flow rate of air exiting the burner nozzle. [۲۰]

۶- نتیجه و جمع بندی

این پژوهش با موفقیت یک چارچوب مدل‌سازی عددی دوگانه (RANS-LES) را با یک مدل شیمیایی پیشرفته (LES-FGM) در ANSYS CFD پیاده‌سازی و اعتبارسنجی کرد تا دینامیک پیچیده احتراق آشفته در مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته تحت تأثیر جریان هوای همسو بررسی شود. اعتبارسنجی گسترده تأیید کرد که مدل LES، برتری قابل توجهی نسبت به RANS در ثبت تعاملات ریزمقیاس ترمودینامیک-شیمیایی (TCI)، نقشه‌برداری دقیق مرزهای پایداری و پیش‌بینی حساسیت NO_x حرارتی دارد.

[13] A. Morel and T. Boushaki, "Combustion of NH₃/CH₄ mixtures in a swirl burner: Study of non-premixed flames with radial fuel injection," *Experimental Thermal and Fluid Science*, p. 111630, 2025. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2025.111630.

[14] R. Santhosh and R. Yadav, "Flame Stabilization Modes in Non-Premixed NH₃/H₂/N₂ swirling flames-A numerical study," *Combustion Science and Technology*, pp. 1-23, 2025. doi: 10.1080/00102202.2025.2509855.

[15] M. Biebl, J. Leicher, A. Giese, and C. Wieland, "A comprehensive study of non-premixed combustion of ammonia and its blends: Flame stability and emission reduction," *Fuel*, vol. 386, p. 134501, 2025. doi: 10.1016/j.fuel.2024.134501.

[16] Y. M. Al-Abdeli and A. R. Masri, "Stability characteristics and flowfields of turbulent non-premixed swirling flames," *Combustion Theory and Modelling*, vol. 7, no. 4, p. 731, 2003. doi: 10.1088/1364-7830/7/4/005

[17] M. Safavi and E. Amani, "A comparative study of turbulence models for non-premixed swirl-stabilized flames," *Journal of Turbulence*, vol. 19, no. 11-12, pp. 1017-1050, 2018. doi: 10.1080/14685248.2018.1527033

[18] A. Asadifard, S. Tabe-Jamaat, A. Zandilak, and B. Karimi, "Measurement and Analysis of Combustion Performance Parameters by Adding a Chamber to a Two-Spiral Burner," *Fuel and Combustion*, vol. 18, no. 4, pp. 50-80, 2026. doi: 10.22034/jfnc.2026.564242.1452.

[19] 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.2023.09.289.

[20] A. Ahsan, H. Ahsan, J. S. Olfert, and L. W. Kostiuik, "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, 2019. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.01.018.

[21] H. Pitsch, "Large-eddy simulation of turbulent combustion," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 38, no. 1, pp. 453-482, 2006. doi: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092133.

[22] T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, 2nd ed. Philadelphia, PA: RT Edwards, Inc., 2005.

[23] H. Liu, Z. Yin, J. Le, and H. Liu, "On the subgrid dissipation concept for large eddy simulation of turbulent combustion," *Combustion and Flame*, vol. 258, p. 113099, 2023. doi: 10.1016/j.combustflame.2023.113099.

[24] J.-P. Legier, T. Poinso, and D. Veynante, "Dynamically thickened flame LES model for premixed and non-premixed turbulent combustion," in *Proceedings of the Summer Program*, vol. 12, Stanford, CA: Center for Turbulence Research, 2000, pp. 157-168.

[25] T. Zhou and F. Li, "Large eddy simulation of non-premixed flame behavior and NO_x emission characteristics in a staged combustor with multi-swirling flows," *Applied Thermal Engineering*, vol. 246, p. 123020, 2024. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123020.

[26] B. Cuenot, "The flamelet model for non-premixed combustion," in *Turbulent Combustion Modeling: Advances, New Trends and Perspectives*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, pp. 43-61.

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).

منابع

[1] R. S. Barlow and J. H. Frank, "Piloted CH₄/Air Flames C, D, E, and F-Release 2.0, 20-JAN-2003," in *TNF Workshop*, Sandia National Laboratories, 1998.

[2] R. Cabra, J. Y. Chen, R. W. Dibble, A. N. Karpetis, and R. S. Barlow, "Lifted methane-air jet flames in a vitiated coflow," *Combustion and Flame*, vol. 143, no. 4, pp. 491-506, 2005. doi: 10.1016/j.combustflame.2005.07.008.

[3] R. Cabra, T. Myhrvold, J. Y. Chen, R. W. Dibble, A. N. Karpetis, and R. S. Barlow, "Simultaneous laser Raman-Rayleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted turbulent H₂/N₂ jet flame in a vitiated coflow," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, no. 2, pp. 1881-1888, 2002. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80228-0.

[4] M. Matalon, "Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 39, no. 1, pp. 163-191, 2007. doi: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092153.

[5] J. Buckmaster, "Edge-flames and their stability," *Combustion Science and Technology*, vol. 115, no. 1-3, pp. 41-68, 1996. doi: 10.1080/00102209608935543.

[6] X. Zhang, S. Wang, and Y. Liu, "Heat release rate responses in self-excited thermoacoustic instabilities of tangential swirling non-premixed flames," *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 3, 2025. doi: 10.1063/5.0256646.

[7] P. Palies, "Flow and flame mechanisms for swirl-stabilized combustors," *Aerospace*, vol. 12, no. 5, p. 430, 2025. doi: 10.3390/aerospace12050430.

[8] Y. Dagan, E. Arad, and Y. Tambour, "The evolution of local instability regions in turbulent non-premixed flames," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 803, pp. 18-50, 2016. doi: 10.1017/jfm.2016.488.

[9] D. Li and M. Ihme, "Stability diagram and blow-out mechanisms of turbulent non-premixed combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, no. 4, pp. 6337-6344, 2021. doi: 10.1016/j.proci.2020.06.331.

[10] M. Kazemi, S. Brennan, and V. Molkov, "Stability of non-premixed turbulent methane flames: Numerical simulations of the critical diameter and flame stability limits," *Fuel Processing Technology*, vol. 275, p. 108249, 2025. doi: 10.1016/j.fuproc.2024.108249.

[11] Z. Liu, Y. Tu, H. Zhang, H. Liu, Z. Luo, and S. Zhang, "Comparison of combustion, emission and flame stabilization characteristics for NH₃/CH₄ mixtures between premixed and non-premixed modes: A joint experimental and LES investigation," *Fuel*, vol. 405, p. 136797, 2026. doi: 10.1016/j.fuel.2025.136797.

[12] J. Guo, P. Liu, R. Serrano-Bayona, E. Es-sebbar, X. Gao, W. L. Roberts, and H. G. Im, "Stability and NO formation of ammonia/methane non-premixed flames under O₂/CO₂ environments," *Combustion and Flame*, vol. 283, p. 114621, 2026. doi: 10.1016/j.combustflame.2025.114621.

- p. 113916, 2025. doi: [10.1016/j.combustflame.2024.113916](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113916).
- [35] Z. Zhang, C. Ji, D. Pan, C. Zong, J. Bao, B. Deng, and T. Zhu, "Large eddy simulation combined with system identification method to analyze non-premixed flame transfer function," *Combustion Science and Technology*, vol. 197, no. 10, pp. 2433-2458, 2025. doi: [10.1080/00102202.2024.2320675](https://doi.org/10.1080/00102202.2024.2320675).
- [36] N. Papafilippou, F. Pignatelli, A. A. Subash, M. A. Chishty, and R. Gebart, "LES of biomass syngas combustion in a swirl stabilised burner: model validation and predictions," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 113, no. 4, pp. 1189-1214, 2024. doi: [10.1007/s10494-024-00558-y](https://doi.org/10.1007/s10494-024-00558-y).
- [37] S. Marragou, "Flow structure, mixing, flame stabilization and pollutant emissions from a coaxial dual swirl CH₄/H₂/air injector," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2023.
- [38] 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 *ASME Turbo Expo 2017*, 2017. doi: [10.1115/GT2017-63247](https://doi.org/10.1115/GT2017-63247).
- [39] D. Fredrich, W. P. Jones, and A. J. Marquis, "A combined oscillation cycle involving self-excited thermoacoustic and hydrodynamic instability mechanisms," *Physics of Fluids*, vol. 33, no. 8, p. 084102, 2021. doi: [10.1063/5.0057521](https://doi.org/10.1063/5.0057521).
- [40] K. Wu, Y. Zhang, B. Pang, J. Liu, L. Yang, and J. Li, "Dual-mode coupling of hydrodynamic and thermoacoustic instabilities in a self-excited diffusion flame array," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 42, p. 106034, 2026. doi: [10.1016/j.proci.2024.106034](https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.106034).
- [41] Ahsan, Hamza. "Experimental Study on the Carbon Conversion Efficiency and Emission Indices of a Lab-Scale Air-Assisted Flare." 2019
- [27] S. Zadsirjan, S. Tabejamaat, E. Abtahizadeh, and J. van Oijen, "Large eddy simulation of turbulent diffusion jet flames based on novel modifications of flamelet generated manifolds," *Combustion and Flame*, vol. 216, pp. 398-411, 2020. doi: [10.1016/j.combustflame.2020.03.007](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.03.007).
- [28] C. D. Pierce and P. Moin, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 504, pp. 73-97, 2004. doi: [10.1017/S0022112004008213](https://doi.org/10.1017/S0022112004008213).
- [29] P. P. Singh and R. N. Roy, "Evaluation of flow and flame characteristics of turbulent bluff-body CH₄-H₂ flame using LES-FPV approach," *Journal of Turbulence*, vol. 25, no. 4-6, pp. 2352490, 2024. doi: [10.1080/14685248.2024.2352490](https://doi.org/10.1080/14685248.2024.2352490).
- [30] A. Toloui and A. Ghareghani, "Investigation of the Effect of Dimensionless Parameters on the Combustion of Carbon-Free Ammonia/Methane Fuel Mixture in Porous Environment," *Fuel and Combustion*, vol. 18, no. 1, pp. 1-28, 2025. doi: [10.22034/jfnc.2025.499984.1421](https://doi.org/10.22034/jfnc.2025.499984.1421).
- [31] J. He, R. Yi, C.-p. Chen, and L. Wang, "Progress variable based filtered turbulent flame model and its application to a swirl-stabilised flame," *Combustion Theory and Modelling*, vol. 29, no. 6, pp. 675-694, 2025. doi: [10.1080/13647830.2024.2427670](https://doi.org/10.1080/13647830.2024.2427670).
- [32] N. Peters and F. A. Williams, "Coherent structures in turbulent combustion," in *The Role of Coherent Structures in Modelling Turbulence and Mixing*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, pp. 364-393. doi: [10.1007/BFb0028247](https://doi.org/10.1007/BFb0028247).
- [33] A. Giusti, H. Zhang, A.-M. Kypraiou, P. M. Allison, and E. Mastorakos, "Numerical investigation of the response of turbulent swirl non-premixed flames to air flow oscillations," *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, vol. 14, no. 3-4, pp. 229-237, 2022. doi: [10.1177/17568277221114944](https://doi.org/10.1177/17568277221114944).
- [34] L. Gaipf, T. Jaravel, Q. Douasbin, and T. Poinso, "LES of the combustion efficiency of wake stabilized methane jet flames in crossflow," *Combustion and Flame*, vol. 273,