

تأثیر غلظت اکسیژن و عدد رینولدز سوخت در ساختار شعله متان- هیدروژن تحت شرایط MILD با استفاده از روش LES

یاشار آفرین* و صادق تابع جماعت**

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت: ۱۳۹۰/۹/۱۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۷/۳، پذیرش: ۹۱/۷/۵)

در این مقاله، از روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) به منظور بررسی ساختار شعله متان- هیدروژن در شرایط MILD استفاده شده است. همچنین، اثر متغیرهای عدد رینولدز فواره سوخت و غلظت اکسیژن در جریان اکسیدکننده به منظور مطالعه ساختار شعله بررسی شده است. بدین منظور، شبیه‌سازی به ازای دو عدد رینولدز ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ و سه درصد اکسیژن ۳، ۶ و ۹ درصد صورت گرفته است. نتایج آزمایشگاهی انجام‌شده توسط دالی جهت ارزیابی دقت حل استفاده شده است. برای ارتباط بین جمله‌های اغتشاشی و احتراقی از مدل PaSR موجود در کد اپن‌فوم، که به نحوی توسعه یافته مدل EDC است، و همچنین از سازوکار کامل GRI-2.11، به منظور محاسبه دقیق سینتیک شیمیایی احتراق، استفاده شده است. معیارهای مختلفی برای ارزیابی صحت نتایج به دست آمده استفاده شده که همگی آن‌ها دقت حل را تایید می‌کنند. نتایج ارائه شده حاکی از این مطلب است که افزایش غلظت اکسیژن منجر به نازک شدن ضخامت شعله، محدود شدن نوسانات موجود در توزیع جزءهای شیمیایی در ناحیه کوچک‌تری در اطراف نازل، کاهش خاموش شدن موضعی در ساختار شعله، محدود شدن ناحیه پیش‌مخلوط جزئی برای اجزای شرکت‌کننده در واکنش و به عبارت کامل‌تر پایدارتر شدن شعله در ناحیه نزدیک نازل می‌شود. همچنین، کاهش عدد رینولدز، به دلیل افزایش مدت زمان اقامت عناصر شرکت‌کننده در واکنش، نقش مؤثری در تقویت شعله ایفا می‌کند.

کلیدواژه: احتراق MILD، متان/هیدروژن، غلظت اکسیژن، رینولدز سوخت، LES

مقدمه

رشد سریع صنعت در طول سالیان گذشته، به‌علاوه مشکلات ناشی از گرمایش زمین و در کنار آن کاهش شدید منابع ذخیره‌سازی انرژی فسیلی، شرایطی را پدید آورده است که در آن استفاده از تکنولوژی جدید به منظور کاهش گازهای آلاینده و افزایش کارایی سیستم‌های مصرف‌کننده انرژی به شدت لازم به نظر می‌رسد. تکنولوژی احتراقی MILD^[۱] به دلیل قابلیت‌های بالای آن در این زمینه می‌تواند جایگزین خوبی برای سیستم‌های احتراقی قدیمی باشد. این تکنولوژی با موفقیت در صنایع مختلف نصب و بهره‌برداری شده است [۲] ولیکن انجام تحقیقات بیشتر جهت بررسی مشخصات احتراقی آن نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

دالی و همکارانش [۳] مشعلی را طراحی و مورد استفاده قرار دادند تا بواسطه آن مشخصات احتراق در شرایط MILD را ایجاد کنند و به مطالعه آن بپردازند. این مشعل از یک نازل سوخت (متان/هیدروژن با نسبت حجمی برابر) تشکیل شده که درون جریان اکسیدکننده‌ای قرار داده شده است. کل مجموعه نیز داخل تونل بادی جای داده شده است. هوا در تونل باد با

* دانشجوی دکترا (ایمیل: Yashar-afarin@aut.ac.ir)

** دانشیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: Sadegh@aut.ac.ir)

سرعتی برابر سرعت جریان اکسیدکننده جریان دارد. این گروه به اثر غلظت اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده در ساختار شعله در فواصل مختلف از دهانه‌های نازل پرداخته‌اند. نتایج آزمایشگاهی این گروه توسط محققان زیادی به منظور مقایسه با شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به کریستو و همکارش [۴] اشاره کرد. در تحقیق انجام‌شده توسط آن‌ها، روش‌های مختلف ترکیب اغتشاش میدان جریان و احتراق در شرایط MILD مورد بررسی قرار گرفته و همچنین مدل کی-اپسیلون نیز تحت این شرایط بهینه‌سازی شده است. آن‌ها همچنین گزارش داده‌اند که مدل‌هایی که بر پایه تک متغیر اسکالر^۱ بنا نهاده شده‌اند، قابلیت مدل‌سازی این نوع رژیم احتراقی را ندارند [۴]. فراسولداتی و همکارانش [۵] روش‌های مختلف برای پیش‌بینی رفتار شعله در این رژیم احتراقی را بررسی کرده‌اند. این گروه برای این منظور از نرم‌افزار فلوئنت استفاده کرده‌اند. بر مبنای این تحقیق [۵] دقت حل، به‌ویژه به واسطه شدت اغتشاش جریان، به‌شدت تحت تاثیر شرایط مرزی است. مردانی و همکارش [۶] به اهمیت استفاده از ضرایب نفوذ مولکولی متفاوت برای اجزای شرکت‌کننده در واکنش در شرایط MILD پرداخته‌اند. تحقیق این گروه نشان داد که استفاده از ضرایب نفوذ مولکولی متفاوت می‌تواند تاثیر زیادی روی نتایج شبیه‌سازی عددی در صورت استفاده از مدل کی-اپسیلون داشته باشد. شبیه‌سازی با استفاده از روش LES^۲ در شرایط MILD توسط ایهمه و همکارانش [۷] به منظور بررسی قابلیت این مدل اغتشاش در این رژیم احتراقی انجام شد. این گروه از ترکیب تابع چگالی احتمال^۳ و شبیه‌سازی LES به منظور حل عددی و ترکیب اغتشاش جریان و احتراق استفاده کردند. این گروه به بررسی اهمیت وارد کردن تغییرات لحظه‌ای جمله‌های اسکالر در ورودی حل به عنوان شرایط مرزی پرداختند. بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده توسط آن‌ها، روش شبیه‌سازی LES از قابلیت بالایی در زمینه مدل‌سازی در شرایط MILD برخوردار است، ولیکن اهمیت شرایط مرزی مناسب نباید به‌هیچ‌وجه نادیده گرفته شود. حلاجی و همکارش [۸] به مقایسه دو روش RANS^۴ و LES جهت مدل‌سازی احتراق MILD در شعله متان-هیدروژن پرداختند. در تحقیق صورت‌گرفته توسط این گروه، سازوکار تک‌مرحله‌ای احتراق متان استفاده شد. نتایج ارائه‌شده توسط آن‌ها حاکی از این مطلب است که استفاده از روش LES می‌تواند تاثیر چشمگیری در افزایش دقت حل داشته باشد، ولیکن استفاده از این ابزار ضمن استفاده از سازوکار تک‌مرحله‌ای احتراق نمی‌تواند به‌درستی نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی کند. مردانی و همکارش [۹] به بررسی نحوه تولید دو گاز CO و CO₂ در شعله متان-هیدروژن در شرایط MILD پرداختند. آن‌ها از روش RANS به منظور مدل‌سازی جمله‌های اغتشاشی و از سازوکار کاهش‌یافته DRM-22 به منظور محاسبه سینتیک شیمیایی استفاده کردند. بر مبنای نتایج ارائه‌شده توسط آن‌ها، کاهش درصد اکسیژن از ۹ درصد به ۳ درصد کاهش دمای محفظه احتراق و کاهش غلظت دو گاز CO و CO₂ را در پی خواهد داشت [۹]. به منظور بررسی علت این کاهش هم‌زمان، از نرم‌افزار کمکین برای شبیه‌سازی صفربعدی احتراق در شرایط WSR^۵ استفاده شد. بر مبنای نتایج ارائه‌شده، علت این کاهش را می‌توان تغییر در شدت واکنش‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده دو جزء شیمیایی CO و CO₂ ضمن کاهش دما با کاهش غلظت اکسیژن دانست [۹].

کوبایاشی و همکارانش [۱۰] به طور آزمایشگاهی به مطالعه ساختار شعله در شرایط احتراق با دمای بالا^۶ پرداختند. طبق مطالعات این گروه، اغتشاش جریان نقش بسیار مهم و تاثیرگذاری در کاهش NO_x دارد [۱۰]. همچنین، بر مبنای نتایج ارائه‌شده توسط این گروه [۱۰]، نقش اغتشاش به عنوان عامل مهم و تاثیرگذار روی خاموش‌شدن موضعی و کاهش شدید غلظت OH در نزدیکی دهانه نازل اثبات شد. در این ارتباط توسط مدول و همکارانش [۱۱]، به صورت آزمایشگاهی، بررسی در زمینه اثر عدد رینولدز ورودی در ساختار شعله در رژیم احتراقی MILD انجام شده است. در این تحقیق توزیع کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل (OH) و فرمالدئید (H₂CO) به‌علاوه توزیع دما ارائه شده است. مقایسه، بین اعداد رینولدز مختلف و دو درصد

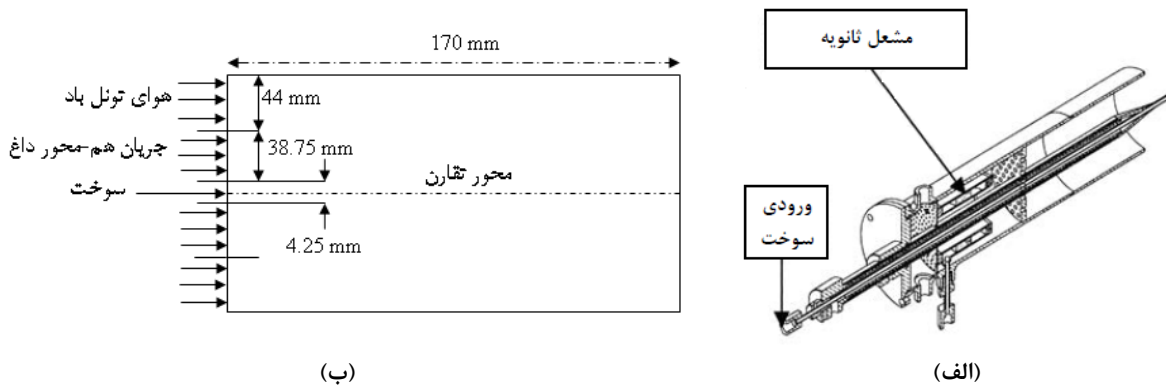
1. Single scalar based
2. Large Eddy Simulation
3. Presumed probability Density Function (PDF)
4. Reynolds Averaged Navier Stokes
5. Well Stirred Reactor
6. High Temperature Air Combustion (HiTAC)

اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده متفاوت، صورت گرفته است. مطابق نتایج ارائه شده توسط این گروه، کاهش غلظت اکسیژن ضخیم‌تر شدن توزیع OH و همچنین کاهش مقطعی در غلظت این رادیکال را در پی خواهد داشت. همچنین، افزایش عدد رینولدز منجر به ضعیف‌تر شدن توزیع OH و اعوجاج بیشتر جبهه شعله می‌شود [۱۱].

در تحقیق حاضر، به مطالعه ساختار شعله در شرایط MILD، به منظور بررسی دقیق‌تر نقش عدد رینولدز و کسر جرمی اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده در فرایند خاموش‌شدن موضعی، پرداخته شده است. ترکیب شبیه‌سازی LES جهت مدل‌سازی جمله‌های اغتشاش و نمونه توسعه‌یافته‌ای از مدل EDC^۱ [۱۲]، به نام PaSR^۲ [۱۳]، مورد استفاده قرار گرفته است. از نتایج آزمایشگاهی دالی [۳] همراه با نتایج عددی کریستو [۴]، به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از حل عددی، استفاده شده است.

مدل فیزیکی و روش حل عددی

طرحواره مشعل دالی [۳] به همراه نمایی دوبعدی از مدل سه‌بعدی فیزیکی مورد استفاده در شکل ۱، به ترتیب از چپ به راست، ارائه شده است. این مشعل از یک نازل سوخت با قطر ۴/۲۵ میلی‌متر و لوله هم‌محور مربوط به جریان اکسیدکننده با دمای بالا (۱۳۰۰ کلوین) با قطر خروجی ۸۲ میلی‌متر تشکیل شده است که درون تونل بادی با دمای ۳۰۰ کلوین و سرعت ۳/۲ متر بر ثانیه قرار داده شده است. فواره سوخت از ۲۰ درصد جرمی هیدروژن و ۸۰ درصد جرمی متان تشکیل شده است که با دمای ۳۰۵ کلوین و بیشینه سرعت تقریبی ۱۳۲ متر بر ثانیه از آن خارج می‌شود. مشخصات کامل‌تر در جدول ۱ و مرجع [۳] ارائه شده است. شایان ذکر است که در حل عددی دو محور مختصات x و y در راستای عمود بر خط محور و محور مختصات z در راستای موازی با خط محور در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ - (الف) طرحواره مشعل دالی [۳]، (ب) مدل عددی استفاده شده در تحقیق حاضر

از فیلتر تاپ-هت^۴ [۱۴] برای تقسیم کمیت‌ها به فیلتر شده و فیلتر نشده و متوسط‌گیری فاور [۱۴] برای متوسط‌گیری از کمیت‌های فیلتر شده در معادلات تراکم‌پذیر ناویر استوکس [۱۴] استفاده شده است. برای حل معادلات فیلتر شده و متوسط‌گیری شده ناویر استوکس با استفاده از شبیه‌سازی روش LES از مجموعه کدهای اپن‌فوم^۵ [۱۵] بهره برده شده است. از

1. Eddy Dissipation Concept
2. Partially Stirred Reactor
3. Jet
4. Top-hat
5. Open Foam

از روش PISO^۱ با دو مرحله تصحیح فشار و دو مرحله تصحیح تکانه^۲ استفاده شده است. گام زمانی به طور تقریبی برابر 10^{-6} ثانیه در نظر گرفته شده است که با شروع احتراق تا 10^{-8} ثانیه کاهش می‌یابد. برای جداسازی جمله‌های جابه‌جایی و نفوذی به ترتیب از روش NVD [۱۶ و ۱۷] و گسسته‌سازی مرکزی و برای مدل‌سازی جمله‌های فیلتر نشده، از مدل دینامیکی اسماگورینسکی [۱۴] استفاده شده است. روش PaSR [۱۳] برای ارتباط دادن بین جمله‌های مربوط به اغتشاش جریان و احتراق استفاده شده است. در این روش، هر سلول محاسباتی به دو قسمت واکنشی و غیرواکنشی تقسیم می‌شود. در قسمت واکنشی فرض می‌شود که اجزای شرکت‌کننده در واکنش به خوبی مخلوط شده‌اند که همان فرض اصلی در روش PSR^۳ است. مخلوط نهایی ترکیبی از گازهای سوخته شده حاصل از قسمت واکنشی و گازهای نسوخته حاصل از قسمت غیرواکنشی خواهد بود. نسبت دو قسمت واکنشی و غیرواکنشی در روش PaSR با جمله کاپا (κ) نشان داده می‌شود که برای محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\kappa = \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_{mix}} \quad (1)$$

در رابطه بالا، زمان اختلاط (τ_{mix}) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{mix} = C_{mix} \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\rho \tilde{\mathcal{E}}_{SGS}}} \quad (2)$$

در این رابطه C_{mix} مطابق مقدار استاندارد مدل برابر واحد در نظر گرفته شده است. مقدار گام زمانی واکنش شیمیایی (τ_c)، بر مبنای مقدار کامل غلظت مولی داخل هر سلول محاسباتی و مقدار متوسط تغییرات آن محاسبه می‌شود [۱۳]. مقدار نرخ استهلاک مربوط به گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه ($\tilde{\mathcal{E}}_{SGS}$) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{\mathcal{E}}_{SGS} = \frac{C_\varepsilon k \sqrt{k}}{\Delta} \quad (3)$$

در رابطه بالا، مقدار ضریب ثابت معادل مقدار استاندارد مدل $1/0.48$ در نظر گرفته شده است [۱۳]. با استفاده از مدل PaSR، نرخ تغییر غلظت مولی جزءهای شیمیایی مطابق رابطه (۴) است. در این رابطه، C_0^i و C_1^i به ترتیب مقدار غلظت نهایی و اولیه جزء i است.

$$\frac{\partial C^i}{\partial t} = \frac{C_1^i - C_0^i}{\tau_{res}} = \kappa RR_i(C_1^i) \quad (4)$$

در رابطه بالا، زمان اقامت (τ_{res}) برابر گام زمانی حل است. همچنین، جمله RR_i معرف نرخ انجام واکنش است. اطلاعات بیشتر در خصوص مدل احتراقی در مراجع [۱۳]، [۱۹] و [۲۰] ارائه شده است. جهت انجام محاسبات از مرکز پردازش فوق سریع دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده است. بدین نحو که با استفاده از ۱۶ عدد پردازشگر که به صورت کلاستر^۴ متصل شده‌اند در حدود یک ماه زمان لازم است تا حل به دقت مورد نظر برسد. در ادامه، ضمن معرفی شرایط مرزی و صحت‌سنجی نتایج، به مطالعه اثرات تغییر عدد رینولدز و درصد اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده در ساختار شعله و خاموش شدن‌های موضعی در نزدیکی نازل سوخت پرداخته شده است.

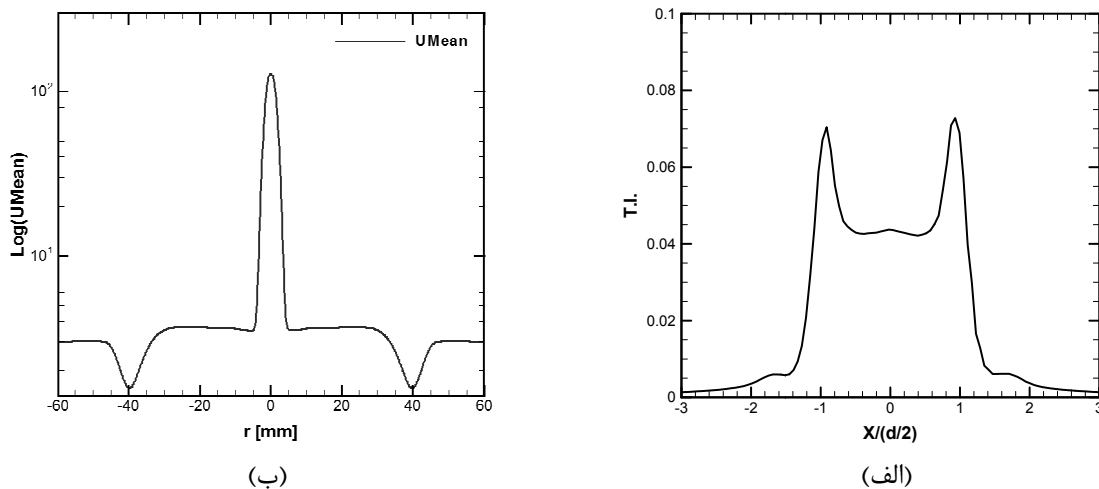
1. Pressure Implicit with Splitting of Operators
2. Momentum
3. Perfectly Stirred Reactor
4. Cluster

بررسی نتایج

به دلیل عدم ارائه مشخصات سرعت جریان ورودی توسط مرجع [۳]، تعیین شرایط مرزی ورودی برای حل با استفاده از شبیه‌سازی LES دشوار است. محققان مختلف، که معمولاً از مدل‌های RANS برای محاسبه جمله‌های اغتشاش استفاده کرده‌اند، بیان کرده‌اند که در صورتی که از مقدار شدت اغتشاش ورودی^۱ (رابطه ۱) برابر ۷ درصد استفاده شود، جواب‌ها با نتایج حاصل از آزمایش تطابق بهتری خواهد داشت [۷، ۴، ۵، ۶]. بر این مبنا در این تحقیق نیز مقدار شدت اغتشاش در مرز ورودی برابر ۷ درصد در نظر گرفته شد.

$$T.I. = \left(\sum_{i=1}^3 (u_i'' u_i'') \right)^{1/2} / u_0 \quad (5)$$

در رابطه بالا u_i'' نوسانات سرعت نسبت به سرعت متوسط در راستای i و u_0 حداکثر سرعت در محور مشعل است. شکل ۲ توزیع سرعت متوسط به صورت کاملاً توسعه‌یافته و شدت اغتشاش ورودی را در حالت رینولدز برابر ۱۰۰۰۰ نشان می‌دهد. برای به دست آوردن توزیع^۲ سرعت متوسط ورودی به مشعل از فرایند مستقلی استفاده شده است که در آن از لوله‌های با قطر برابر با نازل سوخت و ورودی اکسیدکننده استفاده شده است. با برابر قرار دادن مقدار رینولدز در هر کدام از جریان‌ها با مقدار رینولدز در حالت اصلی، مقدار سرعت ورودی محاسبه و به صورت یکنواخت به هر کدام از ورودی‌ها اعمال شده است. همچنین، دمای ورودی در هر کدام از ورودی‌های مستقل برابر دمای فواره سوخت و جریان هوای هم‌محور با آن در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- (الف) شدت اغتشاش ورودی (T.I. برابر ۷٪)، (ب) توزیع سرعت متوسط برای عدد رینولدز ۱۰،۰۰۰ بر حسب $(X/d/2)$

از میان روش‌های مختلف تولید اغتشاش ورودی که می‌توان از آن در روش LES استفاده کرد، روش موسوم به ترکیبی^۳ [۲۰] استفاده شده است. سیگنال سرعت تولیدشده با استفاده از این روش باید یک سری از مشخصات آماری مورد نظر را ارضاء کند. این مشخصات آماری می‌توانند توزیع سرعت متوسط، مقدار تنش رینولدز، مقدار اسپکتروم انرژی، مقدار مقیاس‌های زمانی و مکانی و یا تکانه‌های از مرتبه بالاتر باشند. در تحقیق حاضر، معیار صحت اغتشاش تولیدی مقدار شدت اغتشاش برابر ۷ درصد و مقدار میانگین سرعت مطابق توزیع سرعت متوسط مورد نظر در نظر گرفته شده است.

1. Inlet Turbulence Intensity
2. Profile
3. Synthesis

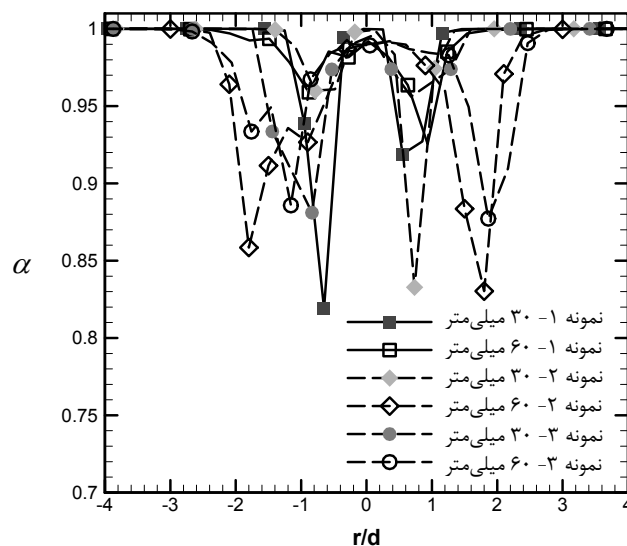
به منظور میرا کردن اغتشاشات از شرط مرزی غیرانعکاسی [۲۱] به همراه ناحیه بافر^۱ در نزدیکی مرزهای خروجی بهره برده شده است. مقدار فشار در خروجی ثابت و برابر یک بار در نظر گرفته شده است. همچنین، برای به دست آوردن بهترین شبکه محاسباتی که علاوه بر کارایی بالا در هزینه محاسباتی نیز صرفه جویی کند، مطالعه در شبکه‌های محاسباتی از 8×10^5 تا 1×10^6 صورت گرفت و نهایتاً 1×10^6 سلول محاسباتی برای شبکه بندی فضای محاسباتی با ابعاد $30d \times 15d \times 2\pi$ به ترتیب در راستاهای محوری، شعاعی و زاویه‌ای مورد استفاده قرار گرفت (d همان قطر نازل سوخت است). جدول ۱ مشخصات نمونه‌های شبیه‌سازی شده را ارائه نموده است. برای بررسی بهتر ساختار شعله در جریان MILD و همچنین پدیده خاموش شدن شعله، سه مقدار غلظت اکسیژن برابر ۳، ۶ و ۹ درصد مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های عددی

نمونه	ترکیب جریان اکسیدکننده دما بالا	عدد رینولدز	سازوکار شیمیایی
۱	$N_2 \text{ } \%.85 + CO_2 \text{ } \%.5 / .5 + H_2O \text{ } \%.6 / .5 + O_2 \text{ } \%.3$	۱۰۰۰۰	GRI-2.11
۲	$N_2 \text{ } \%.82 + CO_2 \text{ } \%.5 / .5 + H_2O \text{ } \%.6 / .5 + O_2 \text{ } \%.6$	۱۰۰۰۰	GRI-2.11
۳	$N_2 \text{ } \%.79 + CO_2 \text{ } \%.5 / .5 + H_2O \text{ } \%.6 / .5 + O_2 \text{ } \%.9$	۱۰۰۰۰	GRI-2.11
۴	$N_2 \text{ } \%.85 + CO_2 \text{ } \%.5 / .5 + H_2O \text{ } \%.6 / .5 + O_2 \text{ } \%.3$	۵۰۰۰	GRI-2.11

صحت‌سنجی شبیه‌سازی LES

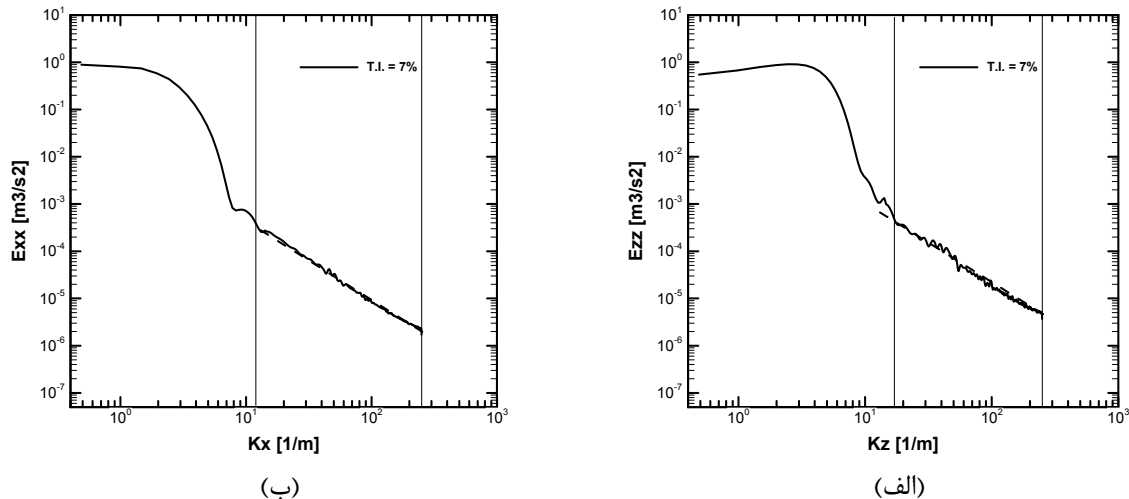
پوپ [۲۳] پیشنهاد کرد در صورتی می‌توان شبیه‌سازی صورت گرفته با روش LES را حلی با دقت کافی دانست که نسبت انرژی جنبشی حل شده به صورت مستقیم به کل انرژی جنبشی (α) بیشتر از ۸۰ درصد باشد. در شکل ۳ تغییرات α در دو مقطع ۳۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر از دهانه نازل برای نمونه‌های با شماره ۱ تا ۳ در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی موارد نسبت α بالاتر از ۸۰ درصد است و بنابراین می‌توان دقت شبیه‌سازی به وسیله روش LES را بدین طریق مورد تایید قرار داد.



شکل ۳- نمودار تغییرات شعاعی α (r/d) در دو مقطع ۳۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر از دهانه نازل برای نمونه‌های ۱ تا ۳ در جدول ۱

1. Buffer zone

در شکل ۴-الف) و (ب) طیف انرژی اغتشاشی یک‌بعدی مربوط به مقیاس‌های کوچک‌تر از مقیاس شبکه محاسباتی به‌ترتیب در دو راستای محور (x معادل ۲/۱۲۵ میلی‌متر) و شعاعی (z برابر ۴ میلی‌متر) و به ازای نقطه آماری نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است، تطبیق طیف انرژی با خط با شیب ۵/۳- را می‌توان ملاک دیگری از صحت محاسبات انجام‌شده و مناسب بودن شبکه محاسباتی دانست [۲۳]. با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان از مناسب بودن اندازه شبکه محاسباتی که بر مبنای آن فیلترگیری کمیت‌ها صورت می‌گیرد و صحت حل با استفاده از روش LES اطمینان یافت.



شکل ۴-الف) طیف یک‌بعدی انرژی جنبشی در خط $x=2.125\text{ mm}$ و (ب) در فاصله $z=4\text{ mm}$ از نازل خروجی در راستای خروجی (خط نقطه‌چین نشان داده شده خط با شیب ۵/۳- است)

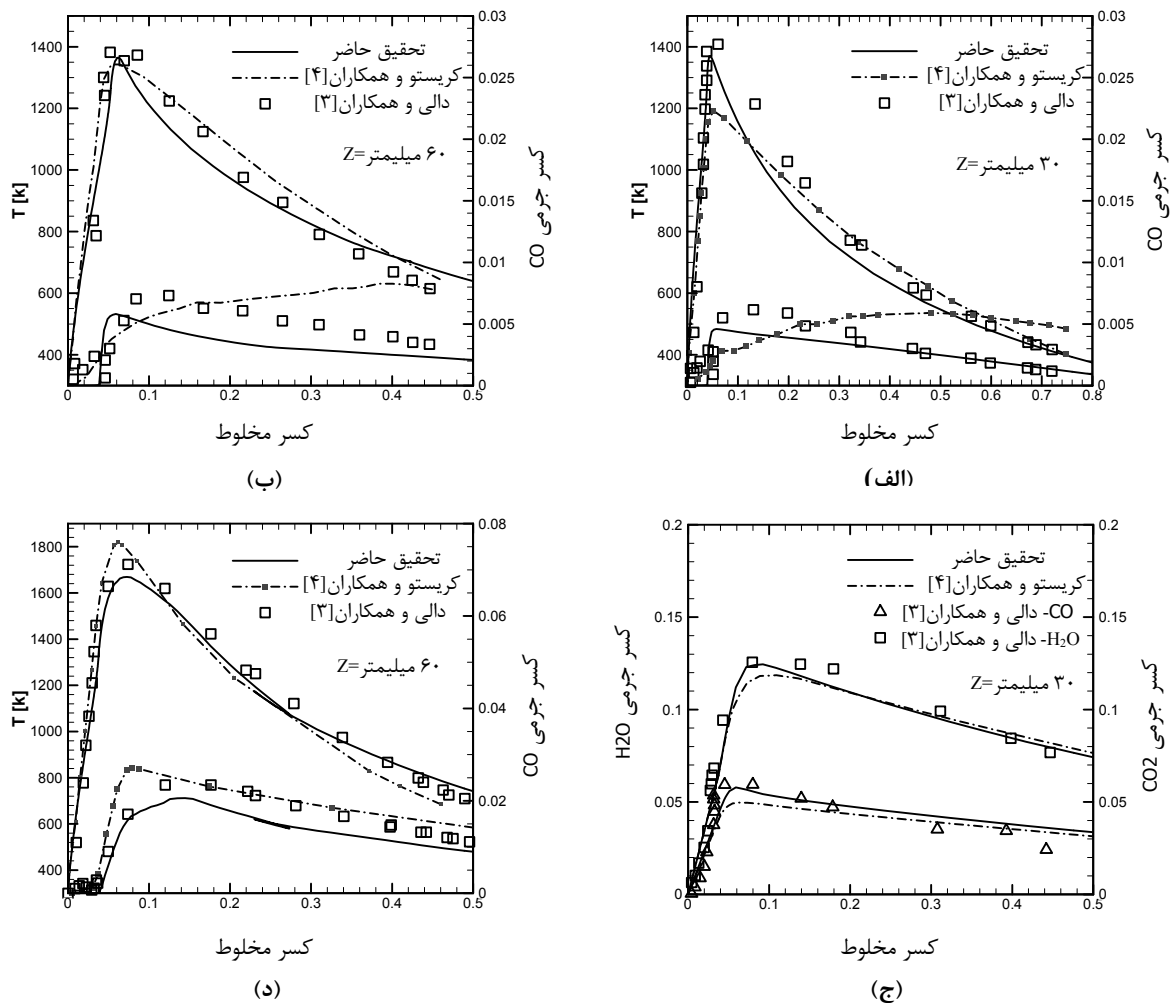
پیش از بررسی ساختار شعله، لازم است تا مقایسه بین نتایج محاسبه‌شده با استفاده از روش LES و RANS [۴] صورت گیرد. شکل ۵ به مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با استفاده از شبیه‌سازی به روش LES (تحقیق حاضر) با نتایج آزمایشگاهی [۳] و نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از RANS پرداخته است. بدین منظور توزیع دما و کسر جرمی مونوکسید کربن بر مبنای کسر مخلوط^۱ در دو فاصله از نازل برابر ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر برای نمونه شماره ۱ جدول ۱، به‌ترتیب در شکل ۵ الف) و (ب)، ارائه شده است. همچنین، به منظور بررسی و مقایسه این دو روش در کسر جرمی اکسیژن بالاتر در جریان اکسیدکننده، شکل ۵ ج) و (د) به‌ترتیب توزیع کسر جرمی آب و دی اکسید کربن در فاصله ۳۰ میلی‌متری و توزیع دما و کسر جرمی مونوکسید کربن در فاصله ۶۰ میلی‌متری را نشان داده است. برای محاسبه کسر مخلوط از رابطه ارائه‌شده توسط بیلگر [۲۴] استفاده شده است.

$$\xi = \left(\frac{2(\Gamma_C - \Gamma_{C,O})}{W_C} + \frac{(\Gamma_H - \Gamma_{H,O})}{2W_H} - \frac{(\Gamma_O - \Gamma_{O,O})}{W_O} \right) / \left(\frac{2(\Gamma_{C,F} - \Gamma_{C,O})}{W_C} + \frac{(\Gamma_{H,F} - \Gamma_{H,O})}{2W_H} - \frac{(\Gamma_{O,F} - \Gamma_{O,O})}{W_O} \right) \quad (6)$$

در رابطه بالا، Γ نسبت کسر جرمی عناصر کربن (C)، هیدروژن (H) و یا اکسیژن (O) است. همچنین زیرنویس دوم O معرف جریان اکسیدکننده و اندیس دوم F معادل جریان سوخت است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، شبیه‌سازی با استفاده از LES در مقایسه با روش RANS نتایج دقیق‌تری را به‌دست آورده است. این تفاوت به‌ویژه به ازای اکسیژن با غلظت

1. Mixture fraction

پایین‌تر بیشتر قابل مشاهده است، به نحوی که خطای محاسبه در مورد توزیع دما از ۱۶ درصد در حل با استفاده از RANS به ۲/۹ درصد کاهش یافته است. این بهبود در شبیه‌سازی عددی ضمن استفاده از شبیه‌سازی LES را می‌توان در هر دو فاصله ۳۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر و هر دو نسبت اکسیژن ۳ درصد و ۹ درصد مشاهده کرد. این نتایج را می‌توان به عنوان ملاکی برای قابلیت به‌کارگیری روش LES در رژیم احتراقی MILD دانست، به نحوی که در شرایط برابر با حل با استفاده از روش RANS و در حالی که روش RANS عملاً در پیش‌بینی کسر جرمی مونوکسیدکربن در فاصله ۳۰ میلی‌متری ناکارآمد نشان داده شده است، پیش‌بینی عددی با استفاده از روش LES از دقت قابل قبول‌تری برخوردار است. با وجود دقت حل بهتر روش LES نسبت به شبیه‌سازی با استفاده از RANS، کماکان مقداری اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی وجود دارد که در تحقیقات آتی صورت‌گرفته توسط این گروه روش‌های کاهش‌دهنده این مقدار خطا بررسی شده است.

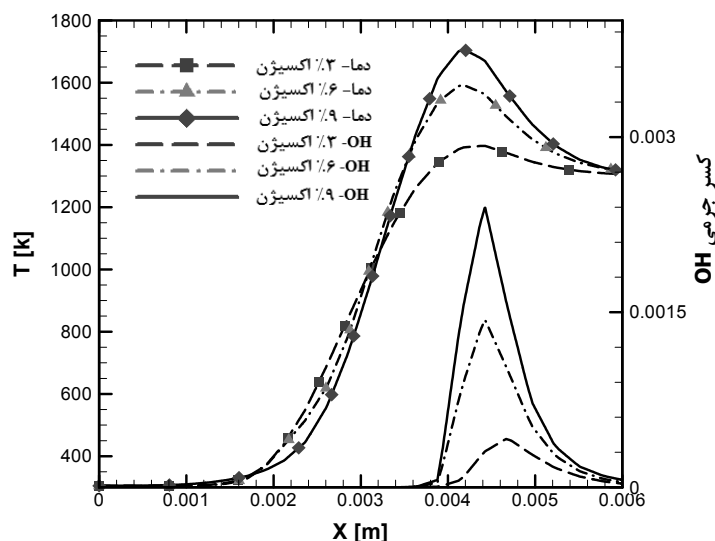


شکل ۵- مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش [۳] و حل عددی توسط مرجع [۴] با نتایج حاصل از تحقیق حاضر: (الف) نمونه شماره ۱ از جدول ۱ در Z برابر ۳۰ میلی‌متر، (ب) نمونه شماره ۱ از جدول شماره ۱ در Z برابر ۶۰ میلی‌متر، (ج) نمونه شماره ۳ از جدول ۱ در Z برابر ۳۰ میلی‌متر و (د) نمونه شماره ۳ از جدول ۱ در Z برابر ۶۰ میلی‌متر

در ادامه به بررسی اثر دو متغیر عدد رینولدز فواره سوخت و غلظت اکسیژن در جریان اکسیدکننده روی ساختار شعله در شرایط MILD پرداخته شده است.

مطالعه اثر غلظت اکسیژن

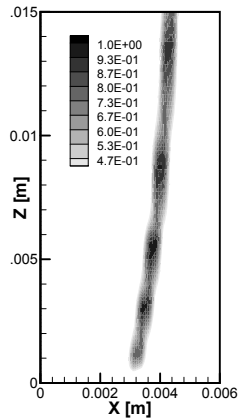
در شکل ۶ توزیع شعاعی دما و کسر جرمی OH در فاصله ۰/۰۱۵ متری از دهانه نازل و به ازای سه درصد اکسیژن ۳، ۶ و ۹ درصد نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۵ قابل پیش‌بینی بود، افزایش غلظت اکسیژن افزایش چشمگیر در دمای شعله، میزان OH و بالطبع تقویت ناحیه احتراقی را در پی داشته است. مطابق این شکل، همچنین محل وقوع حداکثر دما در فاصله کمتری تا محور قرار دارد.



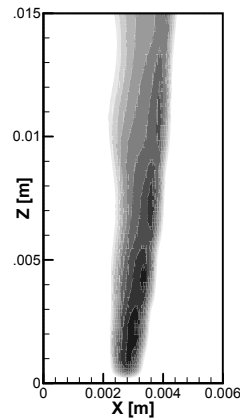
شکل ۶- توزیع کسر جرمی OH و دما در فاصله ۰/۰۱۵ متر از دهانه نازل به ازای درصد اکسیژن ۳، ۶ و ۹

به منظور بررسی ساختار شعله در نزدیکی نازل و در شرایط MILD، تغییرات سه رادیکال HCO ، CH_2O و OH به صورت بی‌بعد در شکل ۷ ارائه شده است. برای بی‌بعدسازی این مقادیر، از حداکثر مقدار هر کدام از جزءهای شیمیایی در ناحیه مورد بررسی استفاده شده است. این مقادیر حداکثر در جدول ۲ ارائه شده است. این سه رادیکال میانی بدین دلیل انتخاب شده‌اند که هر کدام از این رادیکال‌ها را می‌توان معرف یکی از مشخصات شعله دانست. رادیکال OH میزان نرخ انجام واکنش، رادیکال CH_2O احتراق پیش‌مخلوط و در نهایت رادیکال HCO تغییرات در نرخ تولید حرارت را نشان می‌دهند [۱۱ و ۱۲]. ناحیه مورد بررسی در فاصله صفر تا ۱۵ سانتی‌متری از دهانه نازل در راستای محور مشعل و صفر تا ۶ میلی‌متری در راستای شعاعی است. یادآوری این نکته لازم است که در راستای شعاع و تا طول ۲/۲۵ میلی‌متری نازل سوخت و از آن فاصله به بعد نازل اکسیدکننده با دمای بالا قرار دارد. در ابتدا لازم است به این نکته توجه شود که در هر سه درصد غلظت اکسیژن، رادیکال CH_2O نسبت به سایر رادیکال‌های آزاد زودتر پدید می‌آید و این خود اثبات‌کننده این موضوع است که این رادیکال یکی از رادیکال‌های شروع‌کننده واکنش است، به نحوی که محل پدیدار شدن آن تقریباً در ناحیه سوخت غنی قرار می‌گیرد. میزان رادیکال OH ضمن افزایش مقدار غلظت اکسیژن در حال افزایش است. همچنین، همان‌گونه که می‌توان دید، افزایش درصد اکسیژن در ناحیه احتراقی شروع زودتر احتراق را در راستای محور دربر داشته است، به نحوی که به طرز کاملاً چشمگیری برخاستگی شعله در حالت ۹ درصد نسبت به حالت ۳ درصد کاهش یافته است. توجه به این نکته قابل اهمیت است که در تمامی حالات ارائه‌شده در شکل ۷ کاهش غلظت OH در نتیجه ضعیف شدن شعله با افزایش شدید غلظت CH_2O همراه است که این افزایش در غلظت ۳ درصد اکسیژن نمایان‌تر است. شایان ذکر است که ضعیف شدن جبهه شعله، به هر دلیلی، حضور گازهای نسوخته بیشتر در دو طرف جبهه شعله را در پی خواهد داشت؛ در نتیجه نواحی پیش‌مخلوط پدید می‌آید که به دلیل

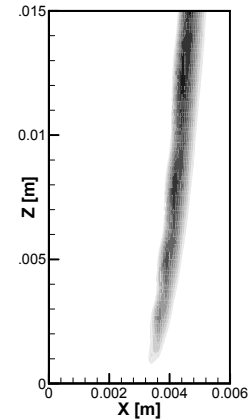
مجاورت با دمای بالا محترق می‌شوند. جزء شیمیایی CH_2O را می‌توان معیاری برای حضور نواحی پیش‌مخلوط دانست. در نتیجه می‌توان با استناد بر این نتایج این گونه بیان داشت که توزیع گسترده‌تر CH_2O نشان‌دهنده نفوذ بیشتر سوخت مصرف‌نشده به درون جریان اکسیدکننده است که مطابق نتایج ارائه‌شده بیشترین مقدار توزیع این رادیکال به ازای ۳ درصد اکسیژن ایجاد می‌شود.



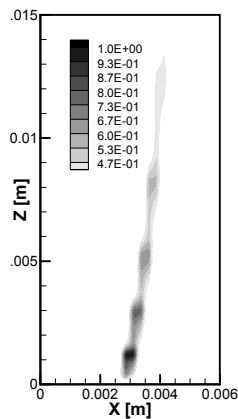
توزیع HCO ، ۳ درصد اکسیژن



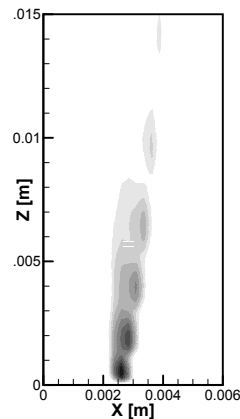
توزیع CH_2O ، ۳ درصد اکسیژن



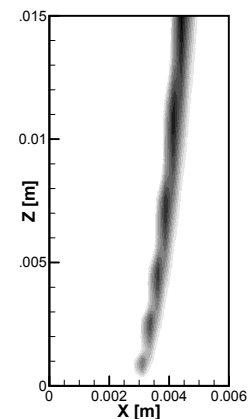
توزیع OH، ۳ درصد اکسیژن



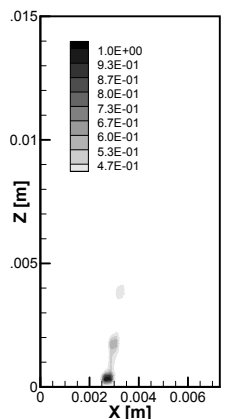
توزیع HCO ، ۶ درصد اکسیژن



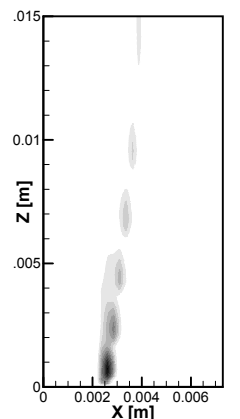
توزیع CH_2O ، ۶ درصد اکسیژن



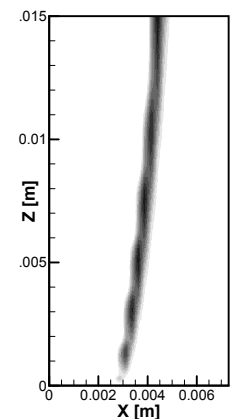
توزیع OH، ۶ درصد اکسیژن



توزیع HCO ، ۹ درصد اکسیژن



توزیع CH_2O ، ۹ درصد اکسیژن



توزیع OH، ۹ درصد اکسیژن

شکل ۷- اثر تغییر غلظت اکسیژن موجود در اکسیدکننده در توزیع کسر جرمی HCO ، CH_2O و OH

جدول ۲- مقادیر حداکثر رادیکال‌های میانی در نمونه‌های مورد بررسی

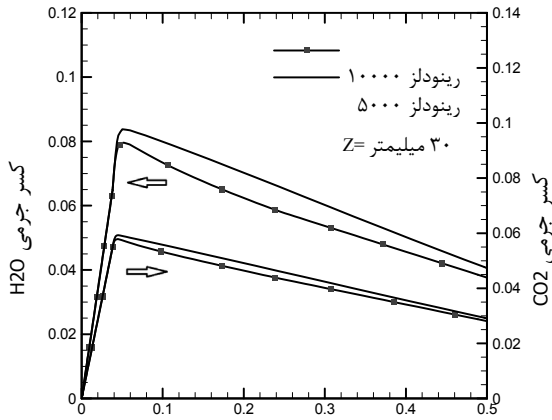
حداکثر مقدار غلظت			شماره نمونه
HCO	CH ₂ O	OH	
2×10^{-6}	1.7×10^{-4}	4.3×10^{-4}	۱
6×10^{-6}	3.4×10^{-4}	1.4×10^{-3}	۲
1.1×10^{-5}	4.5×10^{-4}	2.4×10^{-3}	۳
2.1×10^{-6}	1.6×10^{-4}	4.6×10^{-4}	۴

در واقع ضعیف‌بودن ناحیه واکنشی، که خاص این رژیم است، با افزایش درصد اکسیژن کاهش یافته و کاهش مقدار سوخت مصرف‌نشده عبوری از جبهه شعله را در پی خواهد داشت. این کاهش، مقدار نواحی پیش‌مخلوط درون ناحیه احتراقی را کاهش می‌دهد و در نتیجه آن نواحی کمتری وجود خواهند داشت که در معرض دمایی بیشتر از دمای خوداشتعالی محترق می‌شوند. اثر این کاهش را همچنین می‌توان از توزیع کسر جرمی HCO، که معرف تغییرات در نرخ انجام واکنش است، نیز مشاهده کرد. به نحوی که، به دلیل کاهش نواحی پیش‌مخلوط در غلظت‌های بالای اکسیژن، حضور این رادیکال به نواحی نزدیک دهانه نازل محدود شده است.

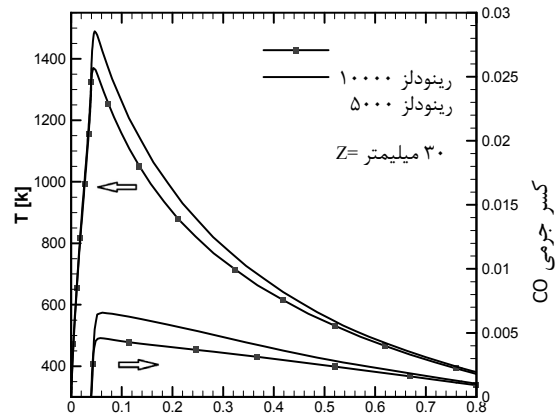
مطالعه اثر عدد رینولدز فواره سوخت

جهت کامل‌ساختن مطالعه در زمینه ساختار شعله در شرایط احتراقی MILD، عدد رینولدز جت سوخت از ۱۰۰۰۰ به ۵۰۰۰ کاهش داده شده و در ادامه به اثر این تغییر پرداخته شده است. شکل ۸ به مقایسه تغییرات دما و کسر جرمی CO، CO₂ و H₂O در دو فاصله ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر از نازل پرداخته است. همان‌گونه که از این شکل قابل مشاهده است، تمام نمودارها با کاهش مقدار عدد رینولدز افزایش می‌یابند و تاثیر این افزایش در فاصله ۶۰ میلی‌متر بیشتر از فاصله ۳۰ میلی‌متر خود را نشان می‌دهد، به نحوی که مقدار بیشینه دما و کسر جرمی CO ضمن کاهش رینولدز در فاصله ۶۰ میلی‌متری افزایشی بیشتر از ۱۵ درصد داشته است. از افزایش دما می‌توان این‌گونه برداشت کرد که کاهش عدد رینولدز نقش موثری در بالابردن نرخ واکنش داشته است. دلیل این افزایش را می‌توان افزایش زمان حضور سوخت و اکسیدکننده در مجاورت یکدیگر با کاهش عدد رینولدز و همچنین نفوذ کمتر سوخت مصرف‌نشده از جبهه شعله دانست. بالارفتن نرخ واکنش طبیعتاً افزایش غلظت CO₂ و H₂O را در پی خواهد داشت، ولیکن نکته تامل‌برانگیز افزایش CO ضمن تقویت ناحیه واکنشی است. نتایج مشابه با این موضوع توسط مردانی [۹] به ازای افزایش غلظت اکسیژن و تقویت ناحیه احتراقی در رژیم احتراقی MILD گزارش شده است. بر مبنای نتایج ارائه‌شده در مرجع [۹]، دمای محفظه احتراق می‌تواند عامل بسیار تعیین‌کننده‌ای در واکنش‌های تولیدکننده و یا مصرف‌کننده CO و CO₂ باشد، به نحوی که، بر مبنای محاسبات صفربعدی صورت‌گرفته، تغییر دما از بیشتر از ۱۵۰۰ کلوین به کمتر از آن می‌تواند روند تولید این دو جزء را با تغییرات زیادی مواجه سازد [۹]. بنابراین، می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که عامل اصلی در افزایش هم‌زمان CO و CO₂ در این نوع رژیم احتراقی را می‌توان تغییر در دمای محفظه احتراق ضمن تقویت جبهه شعله دانست.

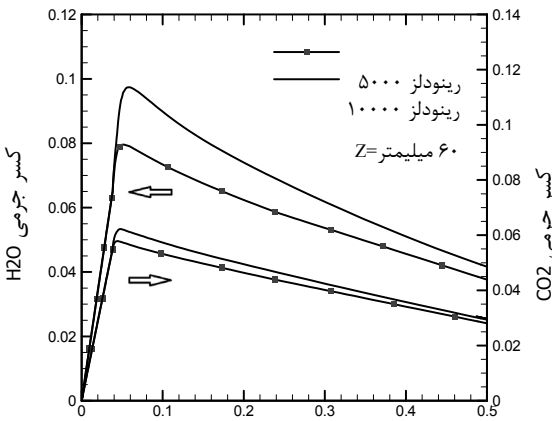
به منظور بررسی دقیق‌تر اثر تغییر عدد رینولدز جت سوخت در ساختار شعله، در شکل ۹ کانتور سه رادیکال HCO، OH و CH₂O نشان داده شده است. همان‌گونه که با توجه به شکل ۸ قابل پیش‌بینی بود، کاهش عدد رینولدز پایدارتر شدن بیشتر شعله را در پی داشته است که اثر آن را می‌توان در افزایش غلظت رادیکال OH، کاهش نوسانات این جزء شیمیایی و همچنین کاهش نوسانات جزء CH₂O و HCO یافت. به نحوی که، بر مبنای نتایج ارائه‌شده در شکل ۹، نوسانات جزء HCO به نواحی نزدیک‌تر به نازل سوخت محدودتر می‌شود.



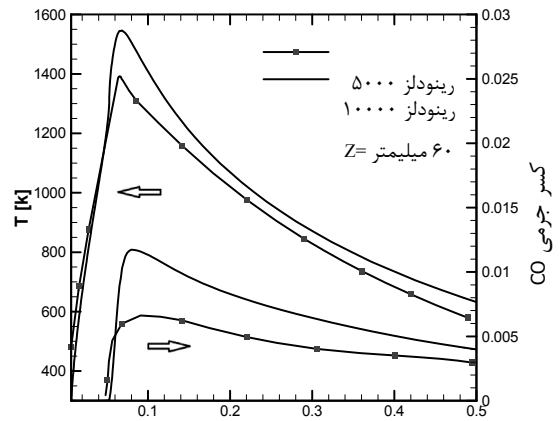
(ب)



(الف)

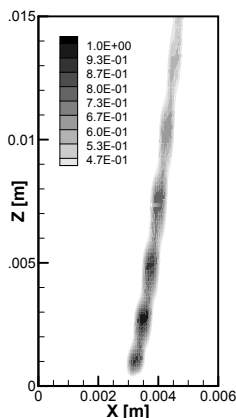


(د)

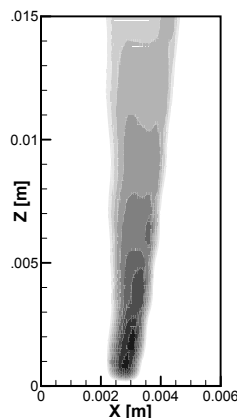


(ج)

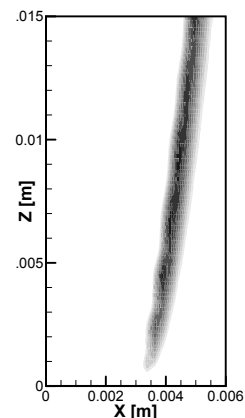
شکل ۸- مقایسه توزیع دما و کسر جرمی CO, CO₂ و H₂O در ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر از نازل برای نمونه‌های شماره ۱ و ۴ در جدول ۱



(ج) توزیع HCO، رینولدز ۵۰۰۰



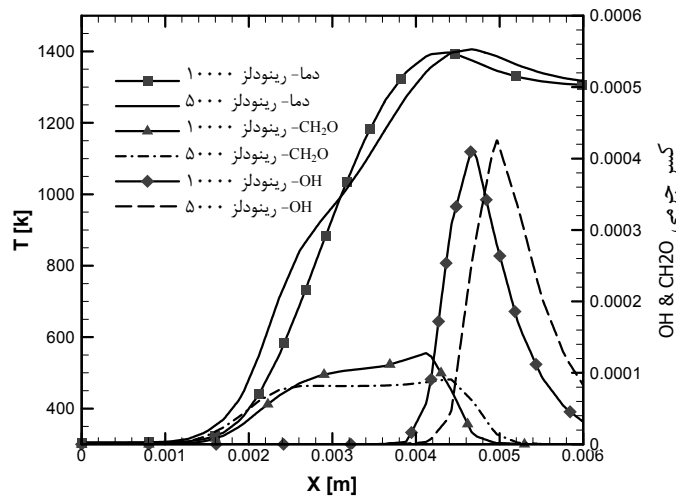
(ب) توزیع CH₂O، رینولدز ۵۰۰۰



(الف) توزیع OH، رینولدز ۵۰۰۰

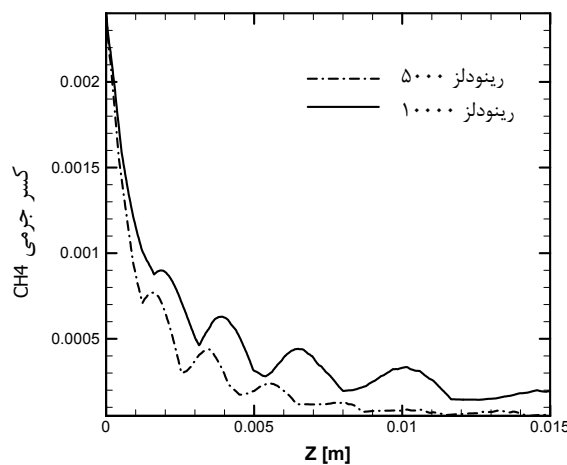
شکل ۹- توزیع کسر جرمی HCO و CH₂O و OH در رینولدز سوخت برابر ۵۰۰۰

نتایج تکمیلی نسبت به نتایج شکل ۹ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. در شکل ۱۰ توزیع شعاعی سه رادیکال میانی در فاصله ۰/۰۱۵ متری از دهانه نازل نشان داده شده است. مشخص است که کاهش عدد رینولدز سوخت تقویت شعله را در پی داشته است، زیرا این کاهش منجر به افزایش مقدار حداکثر دما و کسر جرمی OH شده است. همچنین کاملاً مشخص است که با کاهش عدد رینولدز سوخت مقدار تولید کسر جرمی CH_2O ، که معرف سوخت مصرف‌نشده عبوری از جبهه شعله است، نیز کاهش یافته است.



شکل ۱۰- اثر تغییر عدد رینولدز سوخت در توزیع کسر جرمی OH، CH_2O و دما در فاصله ۰/۰۱۵ متر از دهانه نازل

شکل ۱۱ تغییرات کسر جرمی متان روی خط استوکیومتریکی (ξ برابر ۰/۲۵۹) در فواصل مختلف از دهانه نازل را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که، به دلیل تشکیل شدن حداکثر دما و OH در ناحیه سوخت غنی (شکل ۵ و ۸)، این مقدار متان در واقع سوخت مصرف‌نشده‌ای است که از جبهه شعله عبور کرده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، مقدار سوخت مصرف‌نشده عبوری از جبهه شعله با کاهش مقدار رینولدز سوخت به طور محسوسی کاهش یافته است. همچنین، کاهش عدد رینولدز سوخت کم‌شدن نوسانات از نظر دامنه و فرکانس نوسانات را در پی داشته است. بدین ترتیب می‌توان قوی‌شدن جبهه شعله را با توجه به نتایج ارائه‌شده در این شکل ضمن کاهش عدد رینولدز سوخت مشاهده کرد.



شکل ۱۱- تغییر کسر جرمی متان روی خط استوکیومتریکی در راستای محور

جمع‌بندی

در این تحقیق، مدل‌سازی شعله اغتشاش نفوذی متان-هیدروژن در شرایط MILD به وسیله روش LES انجام شده است. مقایسه نتایج با نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت‌گرفته توسط گروه دالی [۳] و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی کریستو [۴] حاکی از صحت جواب‌های به‌دست آمده است. به منظور بررسی ساختار شعله، به‌ویژه در نزدیکی خروجی نازل، اثر دو متغیر عدد رینولدز فواره سوخت و غلظت اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده بررسی شده است. بدین منظور کانتور OH، HCO و CH₂O در ناحیه نزدیک نازل به ازای سه کسر جرمی ۳ درصد، ۶ درصد و ۹ درصد و دو عدد رینولدز ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ بررسی شده است. بر مبنای نتایج به‌دست آمده، افزایش غلظت اکسیژن از ۳ درصد تا ۹ درصد، قوی‌شدن جبهه شعله را در پی خواهد داشت. اثرات ناشی از این تقویت را می‌توان علاوه بر افزایش دما و مقدار کسر جرمی OH، در ضعیف‌شدن حضور CH₂O و HCO در جبهه شعله نیز مشاهده کرد. مشابه این نتایج در تحقیقات کوبایاشی [۱۰] و مدول [۱۱] نیز ارائه شده است. همچنین، بر مبنای نتایج به‌دست آمده کاهش عدد رینولدز سوخت، به دلیل افزایش دادن مدت زمان حضور عوامل موثر در احتراق و همچنین کاهش نفوذ سوخت مصرف‌نشده از جبهه شعله، بهبود شرایط احتراق را در پی خواهد داشت. همچنین، این کاهش بیشتر شدن کسر جرمی H₂O، CO و CO₂ را نیز ناشی می‌شود.

مراجع

1. A. Cavalier and M. de Joannon, "Mild Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 30, 2004, pp. 329-366.
2. B. B. Dally, "Laminar Nonpremixed Flame Calculations of Methane with Highly Preheated Air," *Australian Symposium on Combustion & Sixth Australian Flame Days*, Newcastle, Australia, 1999.
3. B. B. Dally, A. N. Karpetis and R. S. Barlow, "Structure of Turbulent Non-Premixed Jet Flames in a Diluted Hot Coflow," *Proc. Combust. Inst.*, 29, 2002, pp. 1147-1154.
4. F. C. Christo and B. B. Dally, "Modeling Turbulent Reacting Jets Issuing into a Hot and Diluted Coflow," *Comb. and Flame*, 142, 2005, pp. 117-129.
5. A. Frassoldati, P. Sharma, A. Cuoci, T. Faraveli and E. Ranzi, "Kinetic and Fluid Dynamics Modeling of Methane/Hydrogen Jet Flames in Diluted Coflow," *Applied Thermal Engineering*, 30, 2010, pp. 376-383.
6. A. Mardani and S. Tabejamaat, "A Numerical Study of the Effect of Flow Dynamics and Oxygen Concentration on Methane-Hydrogen Non-Premixed Flame in a Mild Combustion Regime," *Fuel and Combustion*, 12, No. 2, 2010, pp. 69-83 (in Farsi).
7. M. Ihme and C. Y. See, "LES Flamelet Modeling of a Three-Stream MILD Combustor: Analysis of Flame Sensitivity To Scalar Inflow Conditions," *Proc. Combust. Inst.*, 33, 2011, pp. 1309-1317.
8. M. Hallaji and K. Mazaheri, "Comparison of LES and RANS in Numerical Simulation of Turbulent Non-Premixed Flame under MILD Combustion Condition," *7th Mediterranean Combustion Symposium*, Italy, Sep. 2011.
9. A. Mardani and S. Tabejamaat, "Study of CO and CO₂ Production In Hydrogen-Methane Flame under the MILD Condition," *4th Iranian Fuel And Combustion Conference*, Kashan, Iran, Feb. 2012, (in Farsi).
10. H. Kobayashi, K. Oono, E. S. Cho, H. Hagiwara, Y. Ogami and T. Niioka, "Effects of Turbulence on Flame Structure and NO_x Emission of Turbulent Jet Non-Premixed Flames in High-Temperature Air Combustion," *JSME International Journal Series B*, 48, No. 2, 2005, pp. 286-292.
11. P. R. Medwell, P. A. M. Kalt and B. B. Dally, "Influence of Fuel Type on Turbulent Nonpremixed Jet Flames under MILD Combustion Conditions," *16th Australian Fluid Mechanics Conference*, 2007, pp. 1350-1355.
12. B. F. Magnussen, "On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction In Turbulent Flow," *19th AIAA Meeting*, St. Louis, MO, 1981.
13. J. Chomiak and J. Karlsson, "New Observations Concerning Diesel Combustion," *Proceeding of the 22nd CIMAC*, 2, 1998, pp. 431-441.
14. S. B. Pope, *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 2000.
15. H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, and C. Fureby, "A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics using Object-Oriented Techniques," *Computer in Physics*, 12, No. 6, 1998, pp. 620-631.

16. B. P. Leonard, "Simple High-Accuracy Resolution Program for Convective Modeling of Discontinuities," *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 8, 1988, pp.1291-1318.
17. M. S. Darwish, "A New High-Resolution Scheme Based on the Normalized Variable Formulation," *Numerical Heat Transfer*, part B, 24, 1993, pp.353-371.
18. P. A. N. Nordin, "Complex Chemistry Modeling of Diesel Spray Combustion," PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2001.
19. F. P. Karrholm, "Numerical Modeling of Diesel Spray Injection, Turbulence Interaction and Combustion," PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2008.
20. L. di Mare, M. Klein, W. P. Jones and J. Janicka, "Synthesis Turbulence Inflow Conditions for Large-Eddy Simulation," *Physics of Fluids*, 18, pp. 025107-1-11, 2006.
21. G. Lodato, P. Domingo and L. Vervisch, "Three-Dimensional Boundary Conditions for Direct and Large-Eddy Simulation of Compressible Viscous Flows," *J. Compute. Phys.*, 227, No. 10, 2008, pp. 5105-5143.
22. http://www.me.berkeley.edu/gri_mesh/(1995).
23. S. Pope, "Ten Questions Concerning the Large Eddy Simulation of Turbulent Flows," *New J. Phys.*, 6, 2004, pp. 1-24.
24. R. W. Bilger, S. H. Starner and R. J. Kee, "On Reduced Mechanisms for Methane-Air Combustion in Non-Premixed Flames," *Combust. Flame*, 809, 1990, pp. 135-14.

English Abstract

Effect of Oxygen Mass Fraction and Reynolds Number on Methane-Hydrogen Flame in MILD Regime using LES Method

Y. Afarin and S. Tabejamaat

Department of Aerospace Engineering, Amir Kabir University of Technology

(Received: 2011.12.2, Received in revised form: 2012.9.24, Accepted: 2012.9.26)

Large eddy simulation (LES) was used to investigate the H₂/CH₄ flame structure under MILD condition. Effects of the fuel inlet Reynolds number and the oxygen mass fraction in the oxidizer stream on the flame structure were studied. In this regard, the simulation was performed for two Reynolds numbers of 5000 and 10,000 and three oxygen mass fractions of 3, 6 and 9%. Numerical results were compared with experimental measurements of Dally. The turbulence-chemistry interaction in numerically unresolved scales was modeled using the PaSR model and the full mechanism GRI-2.11 was used to precisely represent the methane-hydrogen reactions. Accuracy of the LES simulation results was evaluated by a set of criteria indicating acceptable predictions. The results show that increasing the oxygen mass fraction in the oxidizer stream decreases the flame thickness, limits the species fluctuations to a smaller zone near the nozzle's exit plane, decreases local extinctions in the flame structure and limits the partially premixed to a zone near the shear layer line and in summary improves the flame stability especially near the nozzle exit zone. Since decreasing the Reynolds number increases the residence time of fuel and oxidizer elements, it has a favorable effect on flame stability and decreasing its susceptibility to combustion instability.

Keywords: MILD Combustion, CH₄/H₂, Oxygen Concentration, Fuel Reynolds Number, LES