

## مطالعه اثر غلظت اکسیژن و عدد رینولدز در ساختار شعله متان-هیدروژن تحت شرایط MILD با استفاده از روش LES

یاشار آفرین<sup>۱</sup>، صادق تابع جماعت<sup>۲</sup>

تهران - خیابان حافظ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی هوافضا

(\* نویسنده مخاطب: Yashar-afarin@aut.ac.ir)

### چکیده

از روش شبیه سازی گردابه بزرگ (LES) به منظور بررسی ساختار شعله متان-هیدروژن در شرایط MILD استفاده شده است. همچنین اثر پارمترهای عدد رینولدز جت سوخت و غلظت اکسیژن در جریان اکسیدکننده به منظور مطالعه ساختار شعله مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور شبیه سازی به ازای دو عدد رینولدز ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ و سه درصد اکسیژن ۳، ۶ و ۹ درصد صورت گرفته است. نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط دالی جهت ارزیابی دقت حل مورد استفاده قرار گرفته است. جهت ارتباط بین ترم های توربولانسی و احتراقی از مدل CPaSR که به نحوی توسعه یافته مدل EDC می باشد و همچنین از مکانیزم کامل GRI-2.11 به منظور محاسبه دقیق سینتیک شیمیایی احتراق، استفاده شده است. معیار های مختلفی جهت ارزیابی صحت نتایج بدست آمده استفاده شده که همگی آنها دقت حل را تایید می نمایند. نتایج ارائه شده حاکی از این مطلب است که افزایش غلظت اکسیژن منجر به نازک شدن ضخامت شعله، محدود شدن نوسانات موجود در توزیع جزء های شیمیایی در ناحیه کوچکتری در اطراف نازل، کاهش خاموش شدن موضعی در ساختار شعله، محدود شدن ناحیه پیش مخلوط جزئی برای اجزای شرکت کننده در واکنش در ناحیه shear layer و به عبارت کامل تر پایدارتر شدن شعله در ناحیه نزدیک نازل می گردد. همچنین کاهش عدد رینولدز بدلیل افزایش مدت زمان اقامت عناصر شرکت کننده در واکنش نقش موثری در تقویت شعله و کاهش خاموش شدن های موضعی ایفا می نماید.

واژه های کلیدی: احتراق MILD-LES-متان-هیدروژن - پیش گرم- ناپایداری

### ۱- مقدمه

رشد سریع صنعت در طول سالیان گذشته بعلاوه مشکلات ناشی از گرمایش زمین و در کنار آن کاهش شدید منابع ذخیره سازی انرژی فسیلی، شرایطی را منجر شده است که در آن استفاده از تکنولوژی جدید به منظور کاهش گازهای آلاینده و افزایش کارایی سیستم های مصرف کننده انرژی شدیداً لازم به نظر می رسد. تکنولوژی احتراقی MILD<sup>۱</sup> [۱] به دلیل قابلیت های بالای آن در این زمینه می تواند جایگزین خوبی برای سیستم های احتراقی قدیمی باشد. این تکنولوژی با موفقیت در صنایع مختلف نصب و بهره برداری شده است [۲] ولیکن انجام تحقیقات بیشتر جهت بررسی مشخصات احتراقی آن نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

<sup>3</sup> Moderate or Intense Low-oxygen Dilution

دالی<sup>۱</sup> و همکارانش [۳] مشعلی را طراحی و مورد استفاده قرار دادند تا بواسطه آن مشخصات احتراق در شرایط MILD را ایجاد و به مطالعه آن بپردازند. این مشعل از یک نازل سوخت (متان/هیدروژن با نسبت حجمی برابر) و یک نازل اکسید کننده تشکیل شده است که این ترکیب درون تونل بادی قرار داده شده است. مشخصات جریان سوخت و اکسید کننده با دمای بالا در جدول (۱) آورده شده است. هوا در تونل باد با سرعتی برابر سرعت جریان اکسید کننده جریان دارد. این گروه به اثر غلظت اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده در ساختار شعله در فواصل مختلف از دهانه های نازل پرداخته اند. نتایج آزمایشگاهی این گروه، توسط محققان زیادی به منظور مقایسه با شبیه سازی های عددی مورد استفاده قرار گرفته است. از آن نمونه می توان به، کریستو<sup>۲</sup> [۴] و همکارش اشاره کرد. در تحقیق انجام شده توسط آنها، روش های مختلف ترکیب توربولانس<sup>۳</sup> میدان جریان و احتراق در شرایط MILD مورد بررسی قرار گرفته و همچنین مدل کی-اپسیلون نیز تحت این شرایط بهینه سازی شده است. آنها [۴] همچنین گزارش داده اند که مدل های موسوم به single scalar based قابلیت مدل سازی این نوع رژیم احتراقی را ندارند. فراسولداتی<sup>۴</sup> و همکارانش [۵] روش های مختلف برای پیش بینی رفتار شعله در این رژیم احتراقی را مورد بررسی قرار داده اند. بدین منظور نرم افزار فلونت<sup>۵</sup> توسط این گروه مورد استفاده قرار گرفته شده است. بر مبنای این تحقیق [۵] دقت حل خصوصاً بواسطه شدت توربولانس جریان بشدت تحت تاثیر شرایط مرزی است. توسط مردانی و همکارش [۶]، به اهمیت استفاده از ضرایب دیفیوژن مولکولی متفاوت برای اجزای شرکت کننده در واکنش در شرایط MILD پرداخته شده است. تحقیق این گروه نشان داد که استفاده از ضرایب دیفیوژن مولکولی متفاوت می تواند تاثیر زیادی روی نتایج شبیه سازی عددی در صورت استفاده از مدل کی-اپسیلون ایفا نماید [۶]. شبیه سازی با استفاده از روش LES در شرایط MILD توسط ایهمه<sup>۶</sup> و همکارانش [۷] به منظور بررسی قابلیت این مدل توربولانس در این رژیم احتراقی انجام شد. این گروه از ترکیب تابع چگالی احتمال<sup>۷</sup> و شبیه سازی LES به منظور حل عددی و ترکیب توربولانس جریان و احتراق استفاده نمودند. توسط این گروه به بررسی در زمینه اهمیت وارد کردن تغییرات لحظه ای ترم های اسکالر در ورودی حل به عنوان شرایط مرزی پرداخته شدو بر مبنای نتایج بدست آمده، روش شبیه سازی LES از قابلیت بالایی در زمینه مدل سازی در شرایط MILD برخوردار است ولیکن اهمیت شرایط مرزی مناسب نباید به هیچ وجه نادیده گرفته شود.

کوبایاشی<sup>۸</sup> و همکارانش [۸] بطور آزمایشگاهی به مطالعه ساختار شعله در شرایط احتراق با دمای بالا<sup>۹</sup> پرداختند. طبق مطالعات این گروه توربولانس جریان نقش بسیار مهم و تاثیر گذاری در کاهش NOx ایفا می نماید [۸]. همچنین بر مبنای نتایج ارائه شده توسط این گروه [۸]، نقش توربولانس میدان حل به عنوان عامل مهم و تاثیرگذار روی خاموش شدن موضعی و کاهش شدید غلظت OH در نزدیکی دهانه نازل اثبات شد. در این ارتباط توسط مدول<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۹] بصورت 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 فورمالدئید (H<sub>2</sub>CO) بعلاوه توزیع دما ارائه شده است. مقایسه، بین اعداد رینولدز مختلف و دو درصد اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده متفاوت صورت گرفته است. مطابق نتایج ارائه شده توسط این گروه، کاهش غلظت اکسیژن، ضخیم تر شدن توزیع OH و همچنین کاهش مقطعی در غلظت این رادیکال را در پی خواهد داشت. همچنین افزایش عدد رینولدز ضعیفتر شدن توزیع OH و همچنین اعوجاج بیشتر شعله را منجر می گردد [۹].

<sup>1</sup> Dally

<sup>2</sup> Christo

<sup>3</sup> Turbulence

<sup>4</sup> Frassoldati

<sup>5</sup> Fluent

<sup>6</sup> Ihme

<sup>7</sup> Presumed probability Density Function (PDF)

<sup>8</sup> Kobayashi

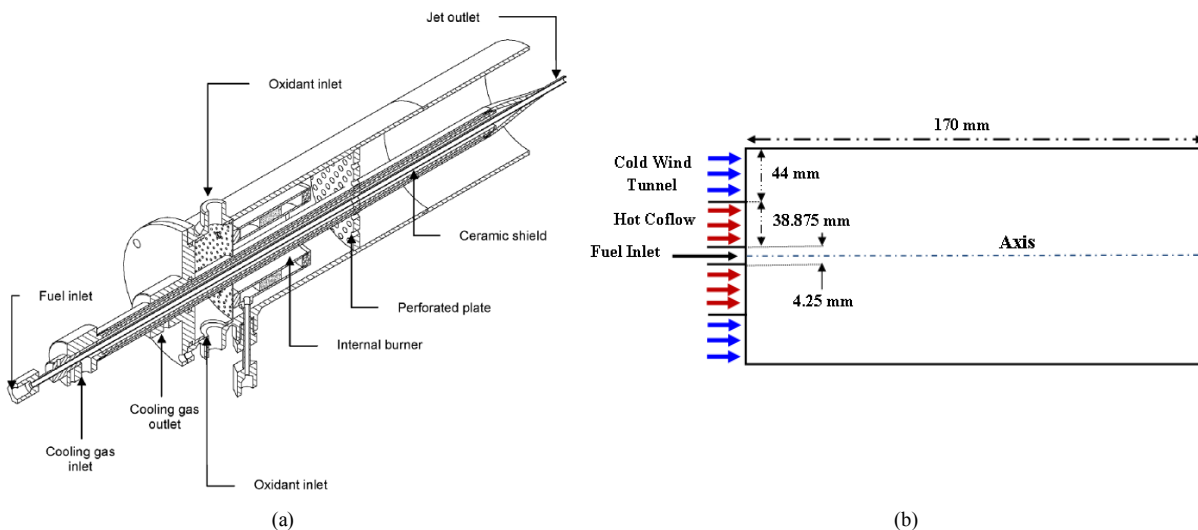
<sup>9</sup> High Temperature Air Combustion (HiTAC)

<sup>10</sup> Medwell

در تحقیق حاضر، به مطالعه ساختار شعله در شرایط MILD به منظور بررسی دقیق تر نقش عدد رینولدز و کسر جرمی اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده در فرآیند خامش شدن موضعی پرداخته شده است. ترکیب شبیه سازی LES جهت مدلسازی ترم های توربولانس و نمونه توسعه یافته ای از مدل EDC [۱۰] بنام CPaSR [۱۱] مورد استفاده قرار گرفته است. از نتایج آزمایشگاهی دالی [۳] همراه با نتایج عددی کریستو [۴] به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از حل عددی استفاده شده است.

## ۲- مدل فیزیکی و روش حل عددی

مدل شماتیک مشعل دالی [۳] به همراه نمایی دو بعدی از مدل سه بعدی 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 نازل 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. جت 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 می شود. مشخصات کامل تر در جدول (۱) و مرجع [۳] ارائه شده است.



شکل ۱- نمای (a) شماتیک مشعل دالی [۳]، (b) مدل عددی استفاده شده در تحقیق حاضر

از فیلتر top-hat [۱۲] جهت تقسیم کمیت ها به فیلتر شده و فیلتر نشده و متوسط گیری فاور<sup>۱</sup> [۱۲] برای متوسط گیری از کمیت های فیلتر شده در معادلات تراکم پذیر ناویر استوکس [۱۲] استفاده شده است. برای حل معادلات فیلتر شده و متوسط گیری شده ناویر استوکس با استفاده از شبیه سازی روش LES از مجموعه کدهای OpenFOAM [۱۳] بهره برده شده است. از متد PISO<sup>۲</sup> با دو مرحله تصحیح فشار و دو مرحله تصحیح مومنتم استفاده شده است. گام زمانی بطور تقریبی برابر  $10^{-6}$  ثانیه در نظر گرفته شده است که با شروع احتراق تا  $10^{-8}$  ثانیه کاهش می یابد. برای جدا سازی ترم های جابجایی و دیفیوژن به ترتیب از متد NVD [۱۴] و [۱۵] و بسط دومین مرتبه مرکزی استفاده شده است. متد CPaSR [۱۱] جهت ارتباط دادن بین ترم های مربوط به توربولانس جریان و

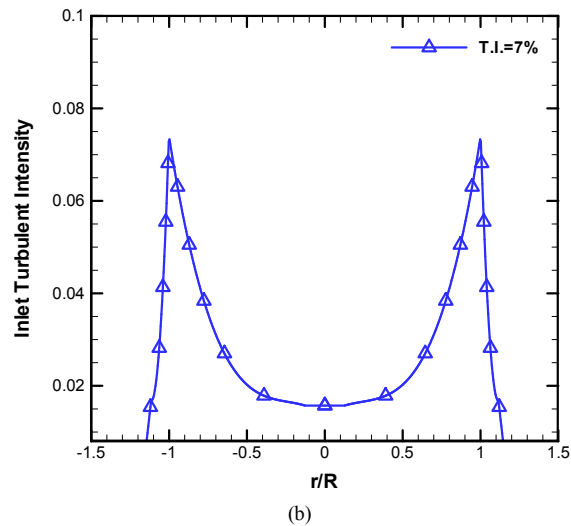
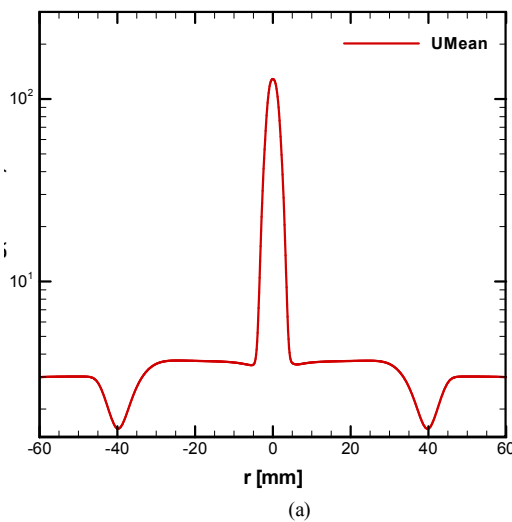
<sup>1</sup> Favre

<sup>2</sup> Pressure Implicit with Splitting of Operators

احتراق مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین مدل دینامیکی اسماگورینسکی [۱۲] برای مدل سازی ترم های فیلتر نشده مورد استفاده قرار گرفته شده است. در ادامه ضمن معرفی شرایط مرزی و صحت سنجی نتایج به مطالعه اثرات تغییر عدد رینولدز و درصد اکسیژن موجود در جریان اکسید کننده در ساختار شعله و خاموش شدن های موضعی در نزدیکی نازل سوخت پرداخته شده است.

#### ۴- بررسی نتایج

بدلیل عدم ارائه مشخصات سرعت جریان ورودی توسط مرجع [۳]، تعیین شرایط مرزی ورودی برای حل با استفاده از شبیه سازی LES دشوار است. محققان مختلف که معمولاً از مدل‌های RANS برای محاسبه ترم های توربولانس استفاده کرده اند، بیان داشتند که در صورتی که از مقدار شدت توربولانس ورودی<sup>۱</sup> (رابطه (۱)) برابر ۷ درصد استفاده گردد، جواب ها با نتایج حاصل از آزمایش تطابق بهتری خواهد داشت [۴، ۵، ۶ و ۷]. بر این مبنا در این تحقیق نیز مقدار شدت توربولانس در مرز ورودی برابر ۷ درصد در نظر گرفته شد.



شکل ۲- توزیع سرعت متوسط (a) و شدت توربولانس ورودی (b) به ازای عدد رینولدز برابر ۱۰،۰۰۰

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

در رابطه بالا  $u_i''$  نوسانات سرعت نسبت به سرعت متوسط در راستای  $i$  و  $u_0$  حداکثر سرعت در محور مشعل می باشد. شکل ۲ توزیع سرعت متوسط بصورت کاملاً توسعه یافته و شدت توربولانس ورودی را در حالت رینولدز برابر ۱۰،۰۰۰ نشان می دهد. برای بدست آوردن پروفیل سرعت متوسط در فرآیند مستقری جریان داخل لوله با قطر برابر با قطر نازل ها در مشعل مورد نظر شبیه سازی شده است. از تابع وزنی برای تمرکز دادن شدت توربولانس ورودی در محل ایجاد shear layers که همان محل تماس جت سوخت با جت اکسید کننده می باشد، استفاده شده است به نحوی که انتگرال مقدار توزیع شده برابر ۷ درصد گردد.

<sup>1</sup> Inlet Turbulence Intensity

به منظور دمپ کردن اغتشاشات از شرط مرزی غیر-انعکاسی<sup>۱</sup> [۱۶] به همراه buffer zone در نزدیکی مرزهای خروجی بهره برده شده است. مقدار فشار در خروجی ثابت و برابر یک بار در نظر گرفته شده است. همچنین برای بدست آوردن بهترین شبکه محاسباتی که علاوه بر کارایی بالا در هزینه محاسباتی نیز صرفه جویی نماید، مطالعه در زمینه تعداد شبکه های محاسباتی از  $10^5 \times 8$  تا  $10^6 \times 1/1$  صورت گرفت و نهایتاً  $10^6 \times 1$  شبکه محاسباتی برای شبکه بندی فضای محاسباتی با ابعاد  $30 d \times 15 d \times 2\pi$  به ترتیب در راستاهای محوری، شعاعی و زاویه ای مورد استفاده قرار گرفت که  $d$  همان قطر نازل سوخت می باشد.

جدول (۱) مشخصات نمونه های انجام شده را ارائه نموده است. برای بررسی بهتر ساختار شعله در جریان MILD و همچنین پدیده خاموش شدن شعله نمونه ها به نحوی در نظر گرفته شده اند تا علاوه بر عدد رینولدز در سه مقدار غلظت اکسیژن برابر ۳، ۶ و ۹ درصد مقایسه صورت گیرد.

جدول ۱- مشخصات نمونه های عددی

نمونه	ترکیب جریان اکسید کننده دما بالا	عدد رینولدز	مکانیزم شیمیایی
۱	3%O <sub>2</sub> +6.5%H <sub>2</sub> O +5.5%CO <sub>2</sub> +85%N <sub>2</sub>	10000	GRI-2.11 [۱۷]
۲	6% O <sub>2</sub> +6.5% H <sub>2</sub> O +5.5% CO <sub>2</sub> +82% N <sub>2</sub>	10000	GRI-2.11
۳	9% O <sub>2</sub> +6.5% H <sub>2</sub> O +5.5% CO <sub>2</sub> +79% N <sub>2</sub>	10000	GRI-2.11
۴	3% O <sub>2</sub> +6.5% H <sub>2</sub> O +5.5% CO <sub>2</sub> +85% N <sub>2</sub>	5000	GRI-2.11

#### ۴-۱- صحت سنجی شبیه سازی LES

پوپ<sup>۲</sup> [۱۸] اثبات کرد، در صورتی میتوان شبیه سازی صورت گرفته با روش LES را حلی با دقت کافی دانست که نسبت انرژی جنبشی حل شده بصورت مستقیم به کل انرژی جنبشی ( $\alpha$ ) بیشتر از ۸۰ درصد باشد. در شکل ۳ تغییرات  $\alpha$  در دو مقطع ۳۰ میلیمتر و ۶۰ میلیمتر از دهانه نازل برای نمونه های با شماره ۱ تا ۳ در جدول (۱) ارائه شده است. همانگونه که قابل مشاهده است، در تمامی موارد نسبت  $\alpha$  بالاتر از ۸۰ درصد قرار دارد و به نحوی می توان دقت شبیه سازی به وسیله روش LES را بدین طریق مورد تأیید قرار داد. در شکل ۴ اسپکتروم انرژی توربولانسی مربوط به مقیاس های کوچکتر از مقیاس شبکه محاسباتی روی خط shear layer و در امتداد محور مشعل نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل قابل مشاهده است، به روشنی inertial sub-range بین دو طول موج ۵/۰ و ۲ ارائه شده است. در این ناحیه همچنین تطبیق اسپکتروم انرژی با شیب ۵/۳- را می توان ملاک دیگری از صحت محاسبات انجام شده و مناسب بودن شبکه محاسباتی دانست. مطابق نتایج ارائه شده توسط دومارادزکی<sup>۳</sup> و همکاران [۱۹] جریان به خوبی توسط روش LES شبیه سازی شده است زیرا که نسبت بیشینه انرژی جنبشی بیشتر از چهار برابر بیشینه طول موجی است که در آن فرایند استهلاک بوقوع می پیوندد. همچنین بدلیل استفاده از فیلتر top-hat در قسمت انتهایی اسپکتروم انرژی شاهد کاهش تدریجی نمودار می باشیم [۲۰].

شکل ۵ به مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با استفاده از شبیه سازی 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 مونوکسیدکربن بر مبنای mixture fraction در دو فاصله از نازل برابر ۳۰ و ۶۰ میلیمتر برای نمونه شماره ۱ در جدول (۱)، ارائه شده است. برای محاسبه mixture fraction از رابطه ارائه شده توسط بیلگر<sup>۴</sup> [۲۱] استفاده شده است. همانگونه که قابل مشاهده است، شبیه سازی با استفاده از LES در

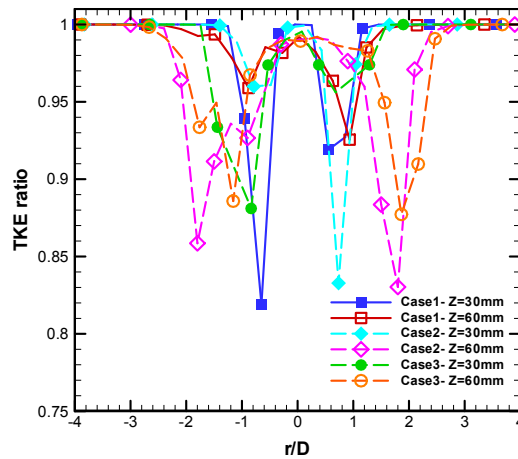
<sup>1</sup> Non-reflecting

<sup>2</sup> Pope

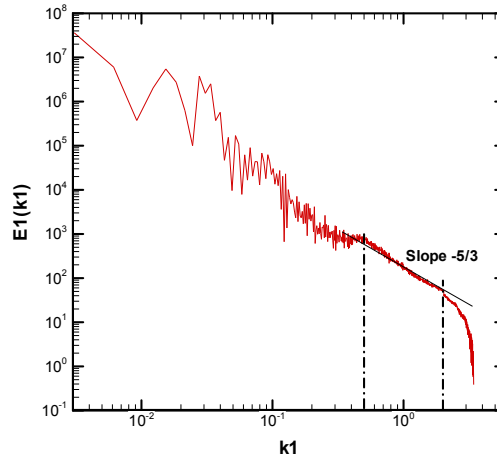
<sup>3</sup> Domaradzki

<sup>4</sup> Bilger

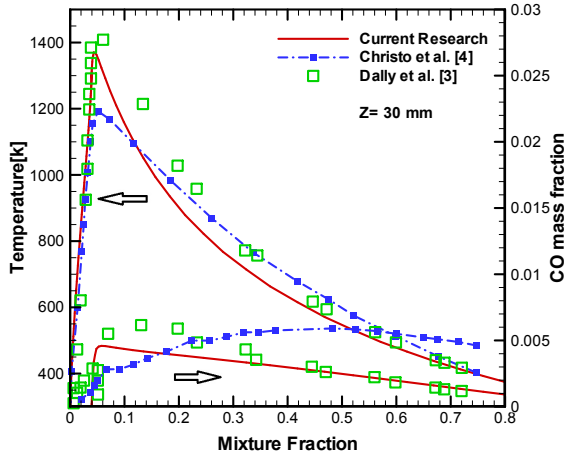
مقایسه با روش RANS نتایج دقیق تری را بدست آورده است. این تفاوت خصوصاً با ازای اکسیژن با غلظت پائین تر بیشتر قابل مشاهده است. به نحوی که خطا محاسبه در خصوص توزیع دما از ۱۶ درصد در حل با استفاده از RANS به ۲/۹ درصد کاهش یافته است. این بهبود در شبیه سازی عددی ضمن استفاده از شبیه سازی LES را می توان در هر دو فاصله ۳۰ میلیمتر و ۶۰ میلیمتر و هر دو نسبت اکسیژن ۳ درصد و ۹ درصد مشاهده کرد.



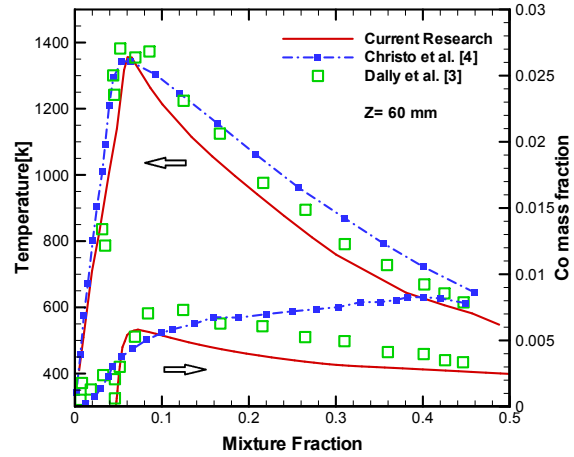
شکل ۳- نمودار تغییرات شعاعی  $\alpha$  در دو مقطع ۳۰ میلیمتر و ۶۰ میلیمتر از دهانه نازل برای نمونه های ۱ تا ۳ در جدول (۱)



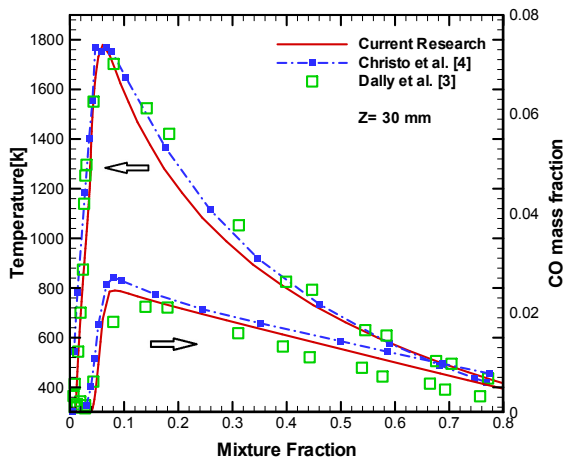
شکل ۴- اسپکتروم انرژی جنبشی در خط shear layer. خط نقطه چین نشان داده شده، خط با شیب  $-5/3$  می باشد



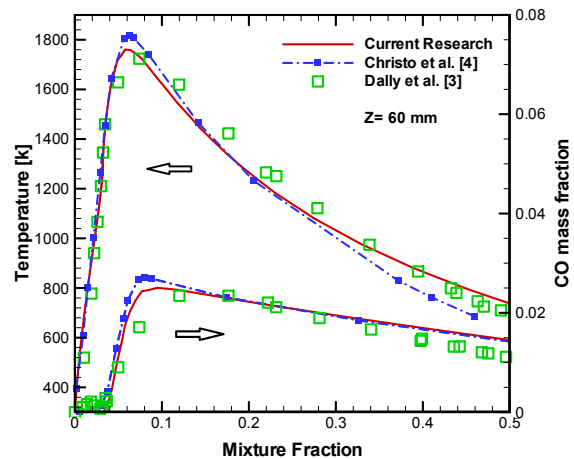
(a)



(b)



(c)

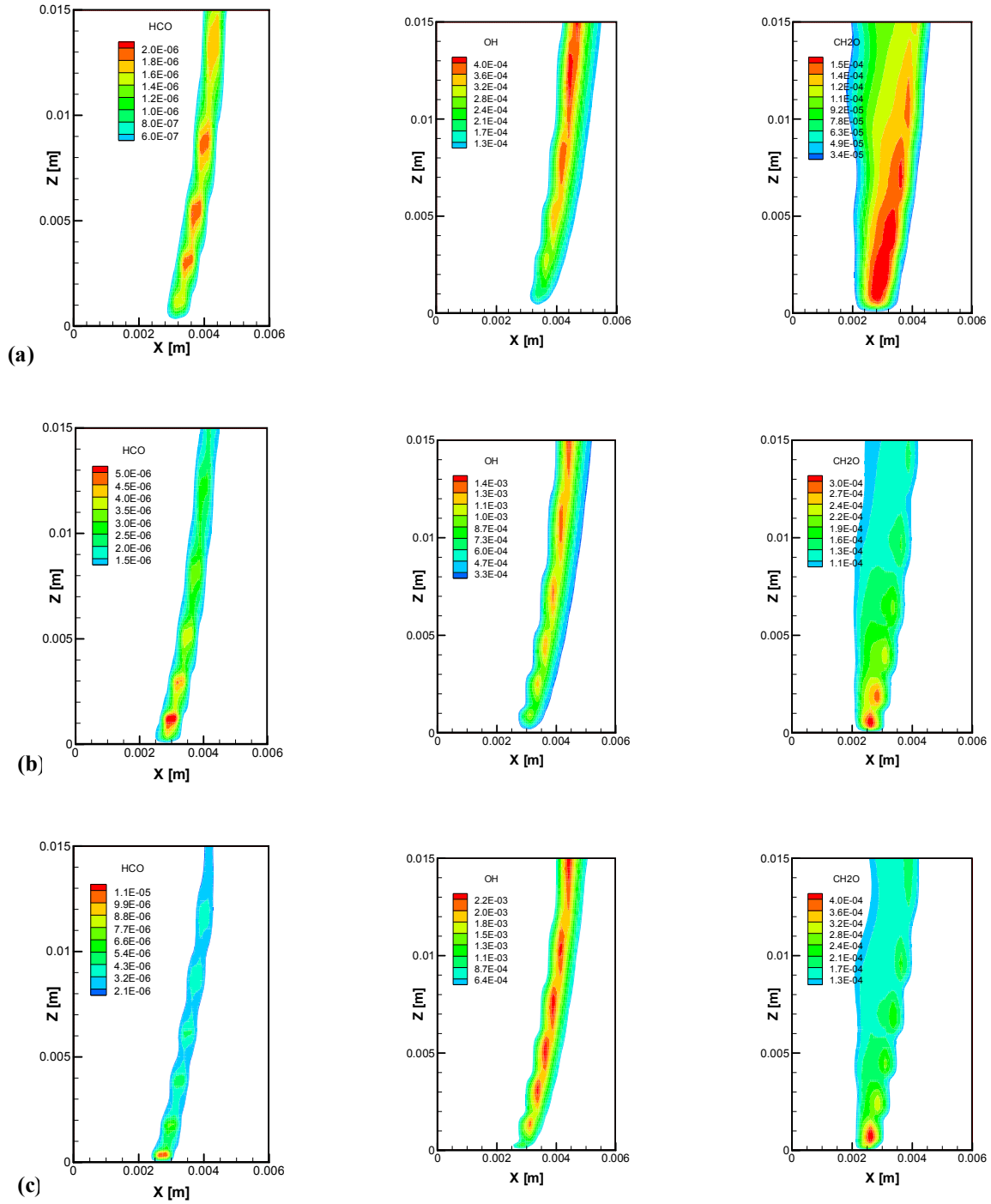


(d)

شکل ۵- مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش [۳] و حل عددی توسط مرجع [۴] با نتایج حاصل از تحقیق حاضر. (a) نمونه شماره ۱ در جدول ۱ در  $Z$  برابر ۳۰ میلیمتر، (b) نمونه شماره ۱ از جدول شماره ۱ در  $Z$  برابر ۶۰ میلیمتر، (c) نمونه شماره ۳ از جدول ۱ در  $Z$  برابر ۳۰ میلیمتر و (d) نمونه شماره ۳ از جدول ۱ در  $Z$  برابر ۶۰ میلیمتر.

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

۴-۲- مطالعه اثر غلظت اکسیژن





شکل ۶- اثر تغییر غلظت اکسیژن موجود در اکسید کننده در توزیع کسر جرمی  $\text{HCO}$ ،  $\text{CH}_2\text{O}$  و  $\text{OH}$  به ازای (a) ۳٪، (b) ۶٪ و (c) ۹٪.

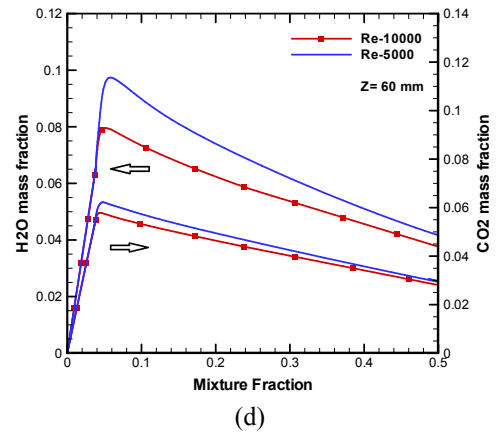
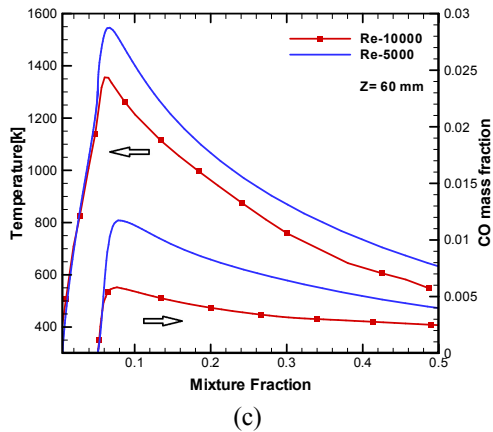
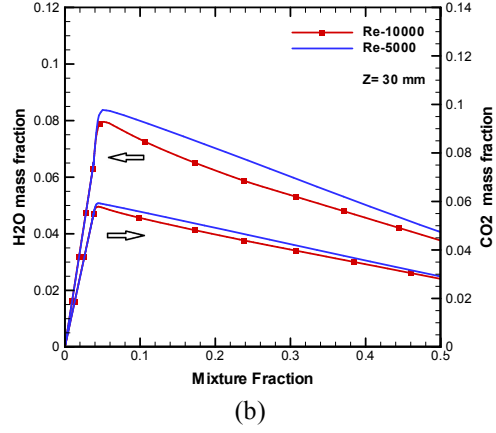
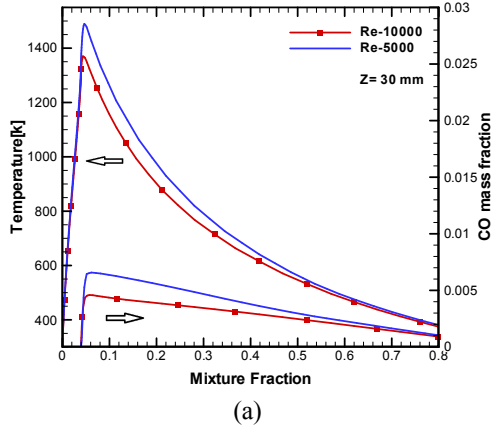
به منظور بررسی ساختار شعله در نزدیکی نازل و در شرایط MILD، تغییرات چهار رادیکال  $\text{HCO}$ ،  $\text{CH}_2\text{O}$  و  $\text{OH}$  در شکل ۶ ارائه شده است. ناحیه مورد بررسی در فاصله صفر تا ۱۵ سانتی متری از دهانه نازل در راستای محور مشعل و صفر تا ۶ میلیمتری در راستای شعاعی می باشد. لازم به یادآوری است که در راستای شعاع و تا طول ۲/۲۵ میلیمتری نازل سوخت و از آن فاصله به بعد نازل اکسید کننده با دمای بالا قرار دارد. در ابتدا لازم است به این نکته توجه شود که در هر سه درصد غلظت اکسیژن، رادیکال  $\text{CH}_2\text{O}$  نسبت به سایر رادیکالهای آزاد زودتر پدید می آید و این خود اثبات کننده این موضوع است که این رادیکال یکی از رادیکال های شروع کننده واکنش می باشد به نحوی که محل پدیدار شدن آن تقریباً در ناحیه سوخت غنی قرار می گیرد. میزان رادیکال  $\text{OH}$  ضمن افزایش مقدار غلظت اکسیژن در حال افزایش است که می توان حضور بیشتر اکسیژن در ناحیه واکنشی را دلیل آن دانست ولیکن این افزایش کاهش ضخامت  $\text{OH}$  را نیز در پی دارد. همچنین نوسانات مربوط به این رادیکال نیز با افزایش غلظت اکسیژن، متناوب تر و با دامنه بیشتر روی میدهد. توجه به این نکته قابل اهمیت است که در تمامی حالات ارائه شده در شکل ۶، کاهش غلظت  $\text{OH}$  در نتیجه ضعیف شدن شعله با افزایش شدید غلظت  $\text{CH}_2\text{O}$  همراه می باشد که این افزایش در غلظت ۳ درصد اکسیژن نمایانتر است. بر مبنای نتایج ارائه شده توسط مدول و همکارانش [۹] مقدار غلظت  $\text{CH}_2\text{O}$  در نواحی که پیش مخلوط جزئی<sup>۱</sup> روی میدهد بشدت افزایش می یابد که می توان با استناد بر این نتایج اینگونه بیان داشت که کاهش غلظت  $\text{OH}$  که در نتیجه کاهش فرآیند احتراق بوقوع پیوسته است، افزایش پیش اختلاط جزئی را در پی داشته و در نتیجه آن افزایش شدید در غلظت  $\text{CH}_2\text{O}$  را منجر می شود. هرچقدر که ضخامت  $\text{CH}_2\text{O}$  افزایش یابد نشان دهنده نفوذ بیشتر سوخت نسوخته بدون جریان اکسیدکننده است که مطابق نتایج ارائه شده بیشترین ضخامت این رادیکال به ازای ۳٪ اکسیژن ایجاد می گردد. با افزایش غلظت اکسیژن نوسانات مربوط به  $\text{HCO}$  در ناحیه کوچکتری بوقوع می پیوندد که همین روال در ارتباط با کسر جرمی  $\text{CH}_2\text{O}$  نیز قابل مشاهده است.

#### ۴-۳- مطالعه اثر عدد رینولدز جت سوخت

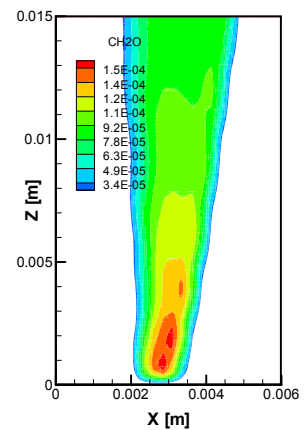
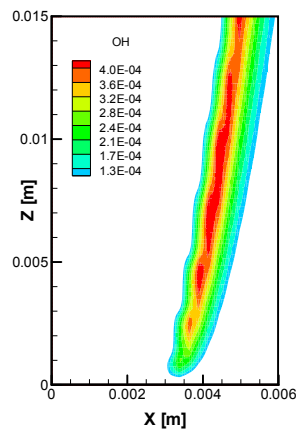
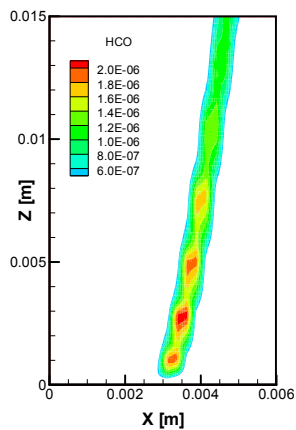
به جهت کامل ساختن مطالعه در زمینه ساختار شعله در شرایط احتراقی MILD، عدد رینولدز جت سوخت از ۱۰،۰۰۰ به ۵،۰۰۰ کاهش داده شده و در ادامه به اثر این تغییر پرداخته شده است. شکل ۷ به مقایسه تغییرات دما و کسر جرمی  $\text{CO}$ ،  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  در دو فاصله ۳۰ و ۶۰ میلیمتر از نازل پرداخته است. همانگونه که از این شکل قابل مشاهده است، تمام نمودارها با کاهش مقدار عدد رینولدز افزایش می یابند و تاثیر این افزایش در فاصله ۶۰ میلی متری بیشتر از فاصله ۳۰ میلیمتر خود را نشان می دهد به نحوی که مقدار بیشینه دما و کسر جرمی  $\text{CO}$  ضمن کاهش رینولدز در فاصله ۶۰ میلیمتری افزایشی بیشتر از ۱۵ درصد داشته است. دلیل این افزایش را می توان افزایش زمان حضور سوخت و اکسید کننده در مجاورت یکدیگر با کاهش عدد رینولدز دانست. البته این نکته حائز اهمیت است که افزایش عدد رینولدز بدلیل بالا بردن توربولانس میدان و بهتر ساختن فرآیند اختلاط مطمئناً نقش تقویت کننده فرآیند احتراق را داراست ولیکن بر مبنای نتایج بدست آمده این تقویت نمی تواند جبران کاهش مدت زمان حضور مواد شرکت کننده در واکنش را نماید.

به منظور بررسی دقیقتر اثر تغییر عدد رینولدز جت سوخت در ساختار شعله، در شکل ۸ کانتور سه رادیکال  $\text{HCO}$ ،  $\text{OH}$  و  $\text{CH}_2\text{O}$  نشان داده شده است. همانگونه که با توجه به شکل ۷ قابل پیش بینی بود، کاهش عدد رینولدز بدلیل فراهم آوردن مدت زمان حضور بیشتر مواد شرکت کننده در واکنش، پایدارتر شدن بیشتر شعله را در پی داشته است که اثر آن را می توان در افزایش غلظت رادیکال  $\text{OH}$ ، کاهش نوسانات این جزء شیمیایی و همچنین کاهش نوسانات جزء  $\text{CH}_2\text{O}$  و  $\text{HCO}$  یافت. به نحوی که بر مبنای نتایج ارائه شده در شکل ۸، نوسانات جزء  $\text{HCO}$  به نواحی نزدیکتر به نازل سوخت محدودتر می گردد.

<sup>۱</sup> Partial Premixing



شکل ۷- مقایسه توزیع دما و کسر جرمی CO، CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O در ۳۰ و ۶۰ میلیمتر از نازل برای نمونه های شماره ۱ و ۴ در جدول (۱)



شکل ۸- اثر تغییر رینولدز جت سوخت موجود در توزیع کسر جرمی HCO، CH<sub>2</sub>O و OH به ازای عدد رینولدز برابر ۵،۰۰۰

## ۵- جمع بندی

در این تحقیق مدل سازی شعله توربولانس دیفیوژن متان-هیدروژن در شرایط MILD بوسیله روش LES انجام شده است. مقایسه نتایج با نتایج حاصل از آزمایشات صورت گرفته توسط گروه دالی [۳] و نتایج حاصل از شبیه سازی عددی کریستو [۴] حاکی از صحت جواب های بدست آمده می باشد. به منظور بررسی ساختار شعله خصوصاً در نزدیکی خروجی نازل، اثر دو پارامتر عدد رینولدز جت سوخت و غلظت اکسیژن موجود در جریان اکسیدکننده مورد بررسی قرار گرفته شده است. بدین منظور کانتور OH، HCO و  $\text{CH}_2\text{O}$  در ناحیه نزدیک نازل به ازای سه کسر جرمی ۳درصد، ۶ درصد و ۹ درصد و دو عدد رینولدز ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. بر مبنای نتایج بدست آمده، کاهش غلظت اکسیژن تا مرز ۳ درصد، ناپایداری شعله و خاموشی موضعی آن را در پی خواهد داشت. اثرات ناشی از این ناپایداری در غلظتهای بالاتر نیز با شدت کمتری قابل مشاهده است. همچنین کاهش غلظت اکسیژن، ضخیم شدن شعله، کاهش حداکثر دما، کاهش مقدار CO و  $\text{CO}_2$  و افزایش غلظت  $\text{CH}_2\text{O}$  را در پی خواهد داشت. در مرحله بعد اثرات ناپایداری در ارتباط با عدد رینولدز سوخت مورد مطالعه قرار گرفته است. بر مبنای نتایج بدست آمده کاهش عدد رینولدز سوخت، بدلیل افزایش دادن مدت زمان حضور عوامل موثر در احتراق، پایدار شدن بیشتر شعله را در پی خواهد داشت. همچنین این کاهش، بیشتر شدن کسر جرمی  $\text{H}_2\text{O}$ ، CO و  $\text{CO}_2$  را نیز ناشی می شود.

## ۶- مراجع

- 1- Cavalier, A., de Joannon, M., "Mild combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.* 30, pp: 329-366, 2004
- 2- Dally, B.B., "Laminar nonpremixed flame calculations of methane with highly preheated air", The 1999 Australian Symposium on Combustion & Sixth Australian Flame Days, Newcastle, Australia, 1999.
- 3- Dally, B. B., Karpets, A.N., Barlow, R.S., "Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow" *Proc. Combust. Inst* 29, pp.1147-1154, 2002.
- 4- Christo, F.C., Dally, B.B., "Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow", *Comb. and Flame* 142, pp: 117-129, 2005.
- 5- Frassoldati, A., Sharma, P., Cuoci, A., Faraveli, T., Ranzi, E., "Kinetic and fluid dynamics modeling of methane/hydrogen jet flames in diluted coflow", *Applied Thermal Engineering* 30, pp: 376-383, 2010.
- 6- Mardani, A., Tabejamaat, S., Ghamari, M., "Numerical study of influence of molecular diffusion in the Mild combustion regime", *Combustion Theory and Modeling* Vol.14, No.5, pp: 747-774, 2010.
- 7- Ihme, M., See C.Y., "LES flamelet modeling of a three-stream MILD combustor: Analysis of flame sensitivity to scalar inflow conditions" *Proc. Combust. Inst* 33, pp: 1309-1317, 2011.
- 8- Kobayashi, H., Oono, K., Cho, E.S., Hagiwara, H., Ogami, Niioka, T., "Effects of turbulence on flame structure and  $\text{NO}_x$  emission of turbulent jet non-premixed flames in high-temperature air combustion" *JSME International Journal Series B*, Vol. 48, No.2, 2005.
- 9- Medwell, P.R., Kalt, P.A.M., Dally, B.B., "Influence of fuel type on turbulent nonpremixed jet flames under MILD combustion conditions" 16<sup>th</sup> Australian Fluid Mechanics Conference, pp: 1350-1355, 2007.

- 10- Magnussen, B.F., "On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow", 19<sup>th</sup> AIAA Meeting, St. Louis, MO, 1981.
- 11- Chomiak, J., Karlsson, J., "New observations concerning diesel combustion" Proceeding of the 22<sup>nd</sup> CIMAC, Vol. 2, pp: 431-441, 1998.
- 12- Pope, S.B., *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, 2000.
- 13- C.T. Bowman, R.K. Hanson, D.F. Davidson, W.C. Gardiner Jr., V. Lissianski, G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach and M. Goldenberg, GRI-2.11. [Available at [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mesh/\(1995\)](http://www.me.berkeley.edu/gri_mesh/(1995))].
- 14- Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C., "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques", Computer in Physics, Vol. 12, NO. 6, pp: 620-631, 1998.
- 15- Leonard, B.P., "Simple high-accuracy resolution program for convective modeling of discontinuities", Int. J. Num. Meth. Fluids, 8, pp:1291-1318, 1988.
- 16- Darwish, M.S., "A new high-resolution scheme based on the normalized variable formulation", Numerical Heat Transfer, part B, 24, pp:353-371, 1993.
- 17- Lodato, G., Domingo, P., Vervisch, L., "Three-dimensional boundary conditions for direct and large-eddy simulation of compressible viscous flows" J. Compute. Phys. 227 (10), pp: 5105-5143, 2008
- 18- Pope, S., "Ten questions concerning the large eddy simulation of turbulent flows" New J. Phys. 6, 2004.
- 19- Domaradzki, J. A., Rogallo R. S. , "Local energy transfer and nonlocal interactions in homogeneous, isotropic turbulence" Physics of Fluids A, 2(3), pp:413-426, 1990.
- 20- Stefano, GD, Vasilyev OV., "Sharp cutoff versus smooth filtering in large eddy simulation" Phys Fluid 14(1), pp:264-369, 2002.
- 21- Bilger, R.W., Starner, S.H., Kee, R.J., "On reduced mechanisms for methane-air combustion in non-premixed flames" Combust. Flame 80: 135-149 (1990)