

# مطالعه اثر رقیق سازی نیتروژن و دی اکسید کربن روی موقعیت و خاموش شدن شعله counterflow

صادق تابع جماعت<sup>1</sup>

آزمایشگاه سوخت و احتراق، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
sadeghtabe@yahoo.com

## چکیده

شعله پس مخلوط آرام در جریان counter-flow بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر رقیق سازی سوخت و اکسیدکننده با دی اکسید کربن و نیتروژن، در ساختار و خاموش شدن شعله به ازای دو نوع سوخت گاز شهری و پروپان، مورد مطالعه قرار گرفته است. مقدار حداکثر دمای شعله به ازای استفاده از دی اکسید کربن به عنوان رقیق ساز سوخت، کمتر از حالتی است که از نیتروژن به عنوان رقیق ساز استفاده می شود. افزایش مقدار strain rate منجر به کاهش ضخامت شعله و نزدیک شدن شعله به نازل خروجی سوخت (نازل پایینی) می گردد. طبق نتایج ارائه شده منحنی خاموش شدن شعله در تمامی حالات از یک نقطه بیشینه برخوردار است. نتایج حاصل از حل عددی و آزمایشگاهی مقایسه و ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: شعله - counterflow - مطالعه تجربی - پس اختلاط - گاز شهری - رقیق سازی

## 1- مقدمه

بدلیل تک بعدی بودن شعله در جریان counterflow، مدل سازی آن نسبت به حالات دیگر بسیار راحت تر بوده و یکی از مدل های رایج در احتراق پس مخلوط می باشد. از این مدل همچنین می توان جهت مدل سازی جریان آشفته نیز استفاده کرد. همانگونه که می دانیم طبیعت احتراق در اکثر موارد بصورت آشفته می باشد و آشفتگی جریان اغلب بصورت گردابه و چین و چروک های در جبهه شعله شناخته می شود که هر کدام از این چین و چروک ها را می توان به کمک شعله counterflow مدل کرد [1]. بنابراین نتایج حاصل از مطالعه شعله آرام پس مخلوط و یا پیش مخلوط منجر به افزایش قابلیت ها در زمینه مدل سازی شعله آشفته می گردد. از جهتی دیگر، تعیین درصد رقیق ساز سوخت و اکسیدکننده مورد نیاز جهت خاموش ساختن شعله به یکی از موارد مهم در تحقیقات مبدل گشته است. Tsuji و Isuizuka [2] به مطالعه اثر رقیق سازی و خاموش شدن شعله در شعله نفوذی counter-flow پرداخته اند. در آزمایشات انجام گرفته توسط آنها، مقدار غلظت بحرانی از رقیق ساز، با تزریق آن بدرون جریان سوخت و یا اکسیدکننده و ثابت نگه داشتن سایر مشخصه های جریان بدست آمده است. Maruta et al [3] به بررسی خاموش شدن شعله در مقادیر کم strain rate و شرایط شتاب جاذبه ناچیز پرداخته است. بر مبنای نتایج ارائه داده شده توسط این گروه، دو نوع خاموش شدن شعله به ازای مقدار ثابت از غلظت سوخت قابل مشاهده است. یکی از آنها خاموش شدنی است که به ازای مقادیر بالای strain rate و بدلیل کم شدن مدت زمان حضور عناصر واکنش دهنده روی

1- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا

می دهد و مورد دیگر در strain rate خیلی ناچیز و بدلیل بالا رفتن افت انتقال حرارت تشعشعی از شعله مشاهده می شود. منحنی تغییرات غلظت بحرانی سوخت بر حسب strain rate بصورت حرف C ارائه گردیده است. Bundy et al [4] اثر strain rate و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت را در خاموش شدن شعله پس مخلوط با نسبت strain rate کم مورد بررسی قرار داده اند. از گاز متان به عنوان سوخت و از هوا به عنوان اکسید کننده استفاده شده است و آزمایشات به گونه ای صورت گرفته است که می توان از افت انتقال حرارت به بدنه صرف نظر کرد. نتایج ارائه شده توسط این گروه حاکی از این نکته است که هرگونه تغییر در نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت منجر به تغییر در موقعیت و شکل شعله می گردد. Cheng et. al [5] به مطالعه اثر strain rate در شعله نفوذی متان به ازای اضافه کردن اکسیژن به جریان اکسید کننده پرداخته است. مطابق نتایج ارائه شده، افزایش مقدار strain rate اثر ناچیزی در حداکثر دمای شعله ایفا می کند ولیکن منجر به ایجاد تغییرات زیاد در ضخامت شعله می شود.

## 2- ملاحظات مربوط به انجام آزمایش

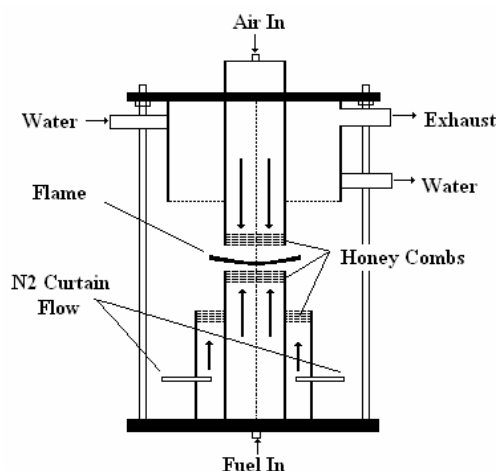
جهت مطالعه آزمایشگاهی شعله، مشعل counterflow (شکل 1) طراحی و ساخته شده است. مشعل counterflow از دو قسمت مجزا تشکیل شده است که بوسیله چهار میله راهنما در فاصله معینی از یکدیگر قرار گرفته اند. این فاصله بوسیله پیچ های تعبیه شده قابل تغییر می باشند. هر کدام از قسمت های مشعل از دو لوله هم محور تشکیل شده است، که وظیفه رساندن مواد واکنش دهنده (سوخت از پائین و هوا از بالا) به فضای بین دو لوله را بر عهده دارند. قطر لوله داخلی در هر دو قسمت بالائی و پائینی 25/4 میلی متر و فاصله بین دو قسمت 15 میلی متر همچنین قطر لوله خارجی در تکه بالائی 70 میلی متر و در تکه پائینی 50/4 میلی متر در نظر گرفته شده است. از چهار توری لانه زنبوری به فاصله 2 میلی متر از خروجی نازل ها و با فاصله بین دو توری 2 میلی متر، جهت یکنواخت کردن سرعت خروجی از هر کدام از نازل ها (لوله های داخلی) استفاده شده است. گاز نیتروژن جهت جلوگیری از واکنش سوخت با هوای محیط اطراف مورد استفاده قرار گرفته است. این نیتروژن از لوله بیرونی در تکه پائینی مشعل خارج می شود. مقدار دبی نیتروژن متناسب با دبی سوخت و اکسید کننده متفاوت می باشد. نتایج ارائه شده توسط Puri et.al [6] و Bundy et.al که به بررسی اثر نیتروژن تزریق شده به عنوان محافظ شعله پرداخته است، کمک شایانی در تعیین مقدار دبی نیتروژن نموده است. سیستم خنک کاری جهت ثابت نگه داشتن دمای هوای ورودی به محفظه احتراق تعبیه شده است. این سیستم از یک مجموعه لوله های مارپیچ تشکیل شده است که جریان آب درون آن مانع از افزایش دمای هوای در مجاور آن می گردد. از یک پمپ جهت برقراری جریان درون لوله استفاده شده است. میزان دبی آب متناسب با دمای هوای اندازه گیری شده بوسیله ترموکوپل تعیین می گردد.

تمامی آزمایشات در دما و فشار محیط انجام شده است. اکسید کننده، هوا با درصد نیتروژن و دی کسید کربن متفاوت می باشد. از گاز شهری با 86 درصد متان و پروپان خالص به عنوان سوخت استفاده شده است. هوا به وسیله کمپرسور فشار بالا پس از عبور از یک سری فیلتر و خشک کن تامین می شود. به منظور اجتناب از هر گونه آشفته گی در جبهه شعله، از یک سیستم غیر مستقیم جهت ساختن گاز های حاصل از احتراق از لوله بیرونی در تکه بالائی استفاده شده است. مقدار strain rate که یکی از پارامتر های اساسی در این نوع جریان می باشد، توسط رابطه زیر تعیین می شود.

$$a = \frac{2V_o}{L} \left( 1 + \frac{V_f \sqrt{\rho_f}}{V_o \sqrt{\rho_o}} \frac{1}{V_r} \right) \quad (1)$$

در رابطه بالا L فاصله بین دو نازل (15 میلی متر)، V و ρ به ترتیب مقدار سرعت و چگالی و اندیس f نشانگر سوخت و O نشانگر اکسید کننده است. strain rate یک معیار جهت ارزیابی زمان حضور مواد واکنش دهنده در محفظه احتراق است که اولین بار توسط Seshadri و Williams [7] جهت تعریف پدیده های موجود در جریان counterflow تعریف شده است. در تمامی آزمایشات مقدار strain rate از 15 s<sup>-1</sup> تا 45 s<sup>-1</sup> تغییر نموده است و در هر مقدار strain rate آزمایشات به ازای سه

نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت ( $V_F$ ) متفاوت یک و دو و سه انجام شده است تا بدین وسیله اثر نسبت سرعت روی موقعیت و خاموش شدن شعله مورد بررسی قرار گیرد.



شکل 1- نمای شماتیکی از مشعل counterflow

دو سری از آزمایشات در نظر گرفته شده است. در سری اول، به بررسی اثر strain rate،  $V_F$  و رقیق سازی سوخت روی موقعیت و شکل شعله و در سری بعدی آزمایشات به اثر همان پارامترها بعلاوه رقیق سازی اکسید کننده، در خاموش شدن شعله پرداخته شده است. هرکدام از سری آزمایشات به ازای دو نوع سوخت پروپان و گاز شهری تکرار شده است. در شکل 2 نمونه ای از شعله تشکیل شده به ازای استفاده از گاز شهری (30 درصد گاز شهری و 70 درصد نیتروژن) و پروپان (30 پروپان و 70 درصد نیتروژن) نشان داده شده است.



شکل 2- مقایسه بین شعله پروپان (سمت چپ) و گاز شهری (سمت راست). مقدار strain rate برابر  $20 \text{ s}^{-1}$ ، سوخت شامل 30 درصد پروپان (گاز شهری)،  $V_F=1$

از دوربین دیجیتالی با رزولوشن (Resolution) بالا جهت داده برداری استفاده شده است. جهت تعیین موقعیت شعله نرم افزار تحلیل تصویر مورد استفاده قرار است. دمای شعله بوسیله ترموکوپل نوع B با قطر 0/05 میلی متر در امتداد محور تقارن مشعل، اندازه گیری شده است.

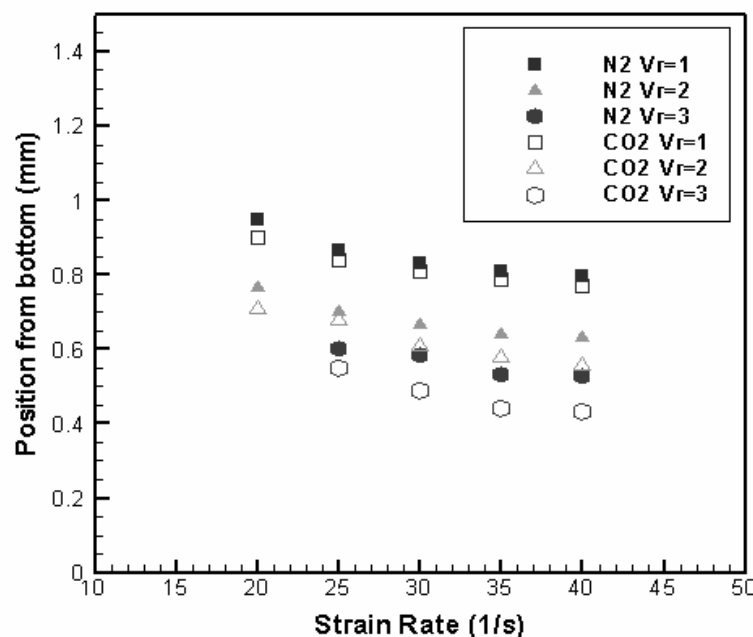
### 3- حل عددی

برای حل معادلات حاکم بر شعله پس مخلوط آرام متقارن counterflow از یک کد دوبعدی با الگوی simple [8] استفاده شده است. جهت تسهیل در روند حل، سطح بین دو نازل مدل سازی شده و به دلیل تقارن شعله تنها به مدل سازی نیمی از محفظه احتراق پرداخته شده است. بدلیل سرعت پائین دو جریان از اثر توربالانس صرف نظر شده است. فرایند اکسیداسیون متان در هوا با استفاده از مکانیزم شیمیایی ارائه شده در مرجع [9] حل گردیده است. در این مکانیزم فرض می شود که نیتروژن در واکنش شیمیایی وارد نمی شود. خواص ترمودینامیکی مواد بر مبنای داده های مرجع [10] و خواص انتقالی

مواد از مرجع [9] اخذ گردیده است. مدل فیزیکی با استفاده از شبکه دو بعدی با 53000 سلول محاسباتی شبکه بندی شده است.

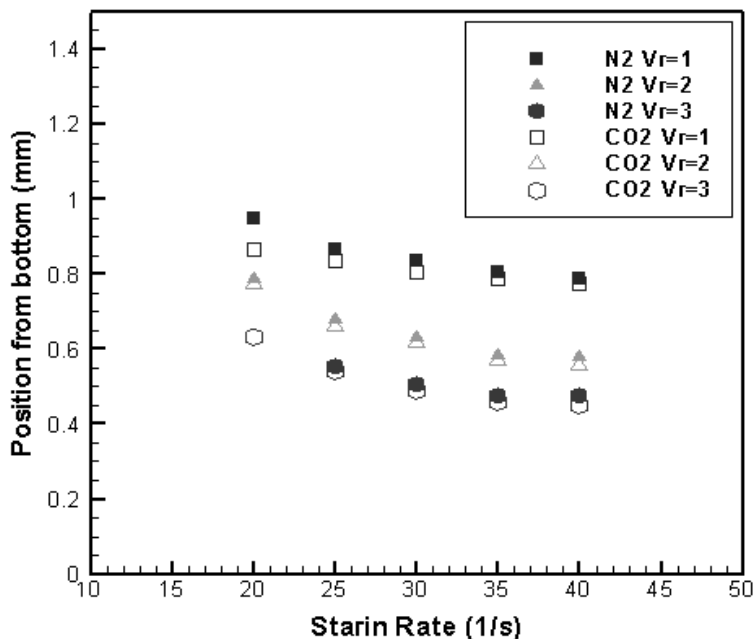
#### 4- نتایج

سری اول آزمایشات به بررسی اثر strain rate و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت همچنین نوع رقیق سازنده در موقعیت و ساختار شعله به ازای دو نوع سوخت گاز شهری و پروپان به صورت جداگانه تکرار شده است. در این سری از آزمایشات از هوا به عنوان اکسید کننده و از سوخت با 30 درصد حجمی گاز شهری ( پروپان ) و رقیق سازنده نیتروژن و یا دی اکسید کربن با 70 درصد حجمی استفاده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل 3، به ازای تمامی نسبت سرعت های اکسید کننده به سوخت، افزایش مقدار strain rate به دلیل اثر شناوری منجر به نزدیک شدن شعله به نازل خروجی سوخت (نازل پائینی) می گردد. در حالتی که از دی اکسید کربن در مقایسه با نیتروژن به عنوان رقیق ساز استفاده گردد، افزایش مقدار strain rate، نزدیکتر شدن شعله به نازل سوخت را در پی خواهد داشت. علت این پدیده را می توان بالا رفتن چگالی و در نتیجه مومنتم سوخت به ازای استفاده از دی اکسید کربن به عنوان رقیق ساز دانست. همچنین مطابق نتایج ارائه شده در شکل 3 افزایش نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت در تمامی مقادیر strain rate منجر به نزدیکتر شدن شعله به نازل سوخت می گردد که این پدیده را می توان به دلیل افزایش مومنتم سوخت به ازای افزایش نسبت سرعت دانست. طبق نتایج ارائه شده در شکل 4، تغییر موقعیت شعله به ازای استفاده از پروپان همانند حالتی است که از گاز شهری به عنوان سوخت استفاده می گردد. در نتیجه تغییر در نوع سوخت تاثیری چندانی در موقعیت شعله ایفا نمی کند.

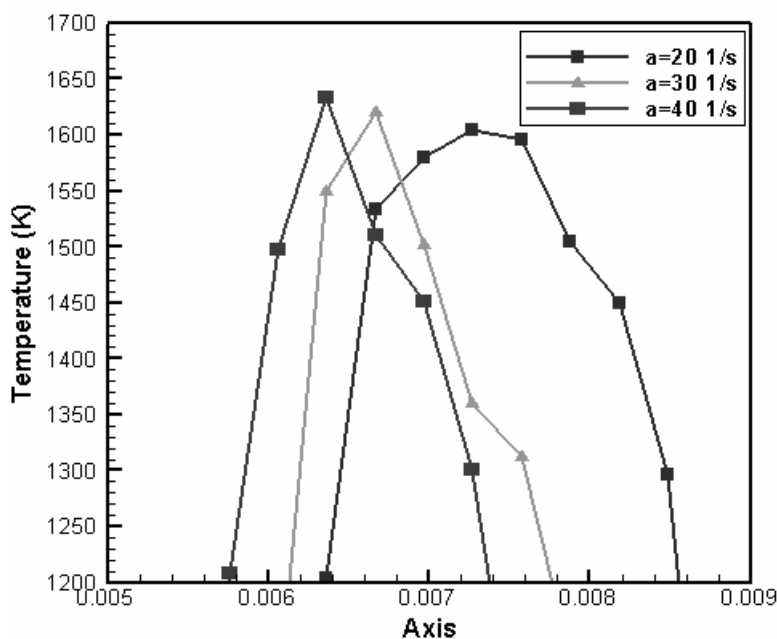


شکل 3- موقعیت شعله تابعی از strain rate به ازای مقادیر متفاوتی از نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت. جریان سوخت ترکیبی از 30 درصد حجمی گاز شهری و 70 درصد حجمی نیتروژن یا دی اکسید کربن.

همانگونه که در شکل 5 قابل مشاهده است، افزایش مقدار strain rate منجر به کاهش ضخامت شعله می گردد. در این شکل مقدار دمای اندازه گیری شده شعله به ازای سوخت با 30 درصد گاز شهری و 70 درصد نیتروژن و استفاده از هوا به عنوان اکسید کننده ارائه شده است. بدلیل مشکلاتی که در زمینه اندازه گیری دما بوسیله ترموکوپل وجود داشت، اندازه گیری دما به ازای تعداد محدودی از نقاط انجام شده است. Sung et al. [11] نتایج مشابهی با نتایج شکل 5 را ارائه نموده است.

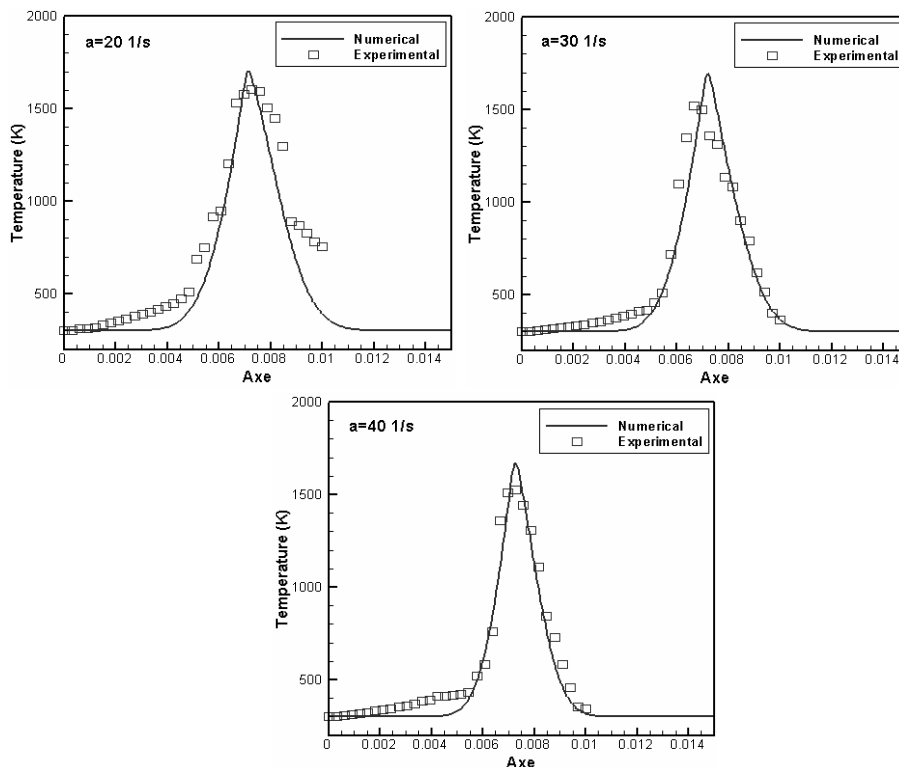


شکل 4- موقعیت شعله تابعی از strain rate به ازای مقادیر متفاوتی از نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت. جریان سوخت ترکیبی از 30 درصد حجمی پروپان و 70 درصد حجمی نیتروژن یا دی اکسید کربن.

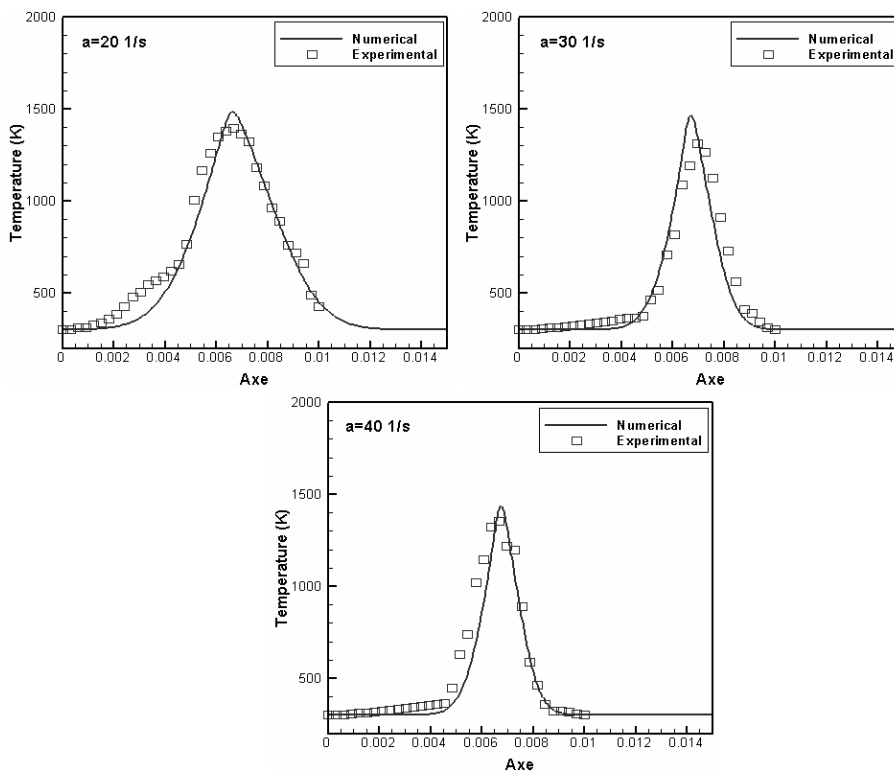


شکل 5- توزیع دمای شعله در امتداد محور تقارن مشعل، به ازای سه مقدار strain rate  $20 \text{ s}^{-1}$ ،  $30 \text{ s}^{-1}$  و  $40 \text{ s}^{-1}$ . جریان سوخت ترکیبی 30 درصد گاز شهری و 70 درصد نیتروژن.

مقایسه بین نتایج حل عددی و آزمایشگاهی ارائه شده در شکل های 6 و 7 تطابق خوبی بین دو نوع حل را نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که مقدار حداکثر دمای شعله به ازای استفاده از دی اکسید کربن به عنوان رقیق ساز سوخت، کمتر از حالتی است که از نیتروژن به عنوان رقیق ساز استفاده می شود که این تفاوت را می توان بدلیل بالا بودن ظرفیت حرارتی دی اکسید کربن نسبت به نیتروژن دانست. همانگونه که از این دو شکل مشخص است، محل حداکثر دما ضمن تغییر مقدار strain rate ثابت می ماند و تنها ضخامت شعله با افزایش این نسبت کاهش پیدا می کند.

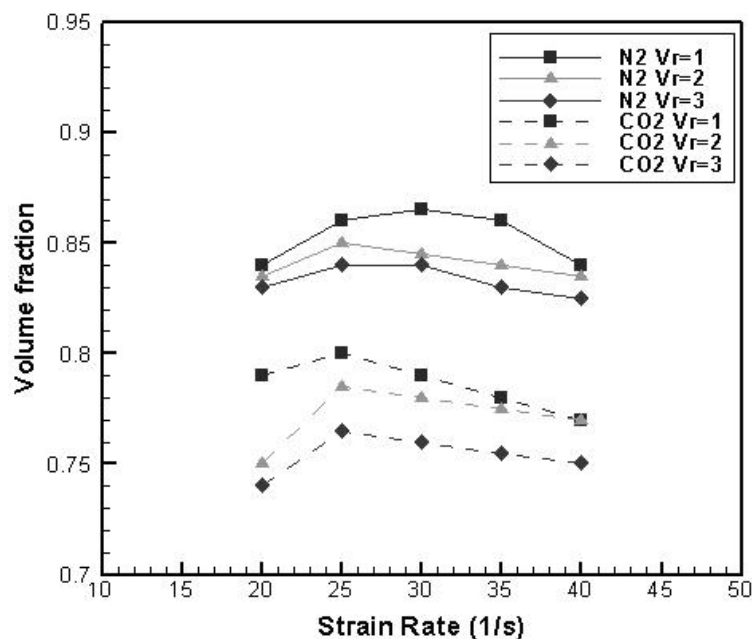


شکل 6- مقایسه بین توزیع دمای اندازه گیری شده و حاصل از حل عددی به ازای سه مقدار متفاوت از strain rate و جریان سوخت با 30 درصد گاز شهری و 70 درصد نیتروژن و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت برابر یک.



شکل 7- مقایسه بین توزیع دمای اندازه گیری شده و حاصل از حل عددی به ازای سه مقدار متفاوت از strain rate و جریان سوخت با 30 درصد گاز شهری و 70 درصد دی اکسید کربن و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت برابر یک.

در مرحله بعدی آزمایش به بررسی اثر رقیق سازی سوخت در خاموش شدن شعله پرداخته شده است. جهت انجام این آزمایش، مقدار غلظت رقیق ساز در جریان سوخت را به ازای یک مقدار ثابت از strain rate و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت، تا مرحله خاموش شدن شعله افزایش داده و آخرین درصد حجمی رقیق ساز، که به ازای آن شعله حضور داشته باشد را به عنوان درصد بحرانی ثبت گردیده است. شکل 8 منحنی خاموش شدن شعله پیش مخلوط گاز شهری به ازای استفاده از دی اکسید کربن و نیتروژن به عنوان رقیق ساز را نشان می دهد. همانگونه که از شکل 8 قابل مشاهده است، در حالت استفاده از دی اکسید کربن بدلیل بالاتر بودن ظرفیت حرارتی آن نسبت به نیتروژن، شعله به ازای درصد حجمی کمتری از رقیق ساز خاموش می گردد. به ازای هر دو رقیق ساز، منحنی خاموش شدن شعله گاز شهری نسبت به strain rate، از یک نقطه بیشینه برخوردار است بطوریکه به ازای مقادیر strain rate کمتر از این مقدار، افزایش مقدار strain rate منجر به بالا رفتن درصد بحرانی رقیق ساز موجود در سوخت می گردد. ولیکن با افزایش بیشتر مقدار strain rate، این روال معکوس می شود. بررسی اثر نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت، نشانگر این مطلب است که با بالا رفتن این نسبت بدلیل بالا رفتن سرعت هوا و در نتیجه ازدیاد هوای اضافی موجود در محفظه احتراق و افزایش انتقال حرارت، شعله به ازای درصد پائین تری از رقیق ساز خاموش می شود.

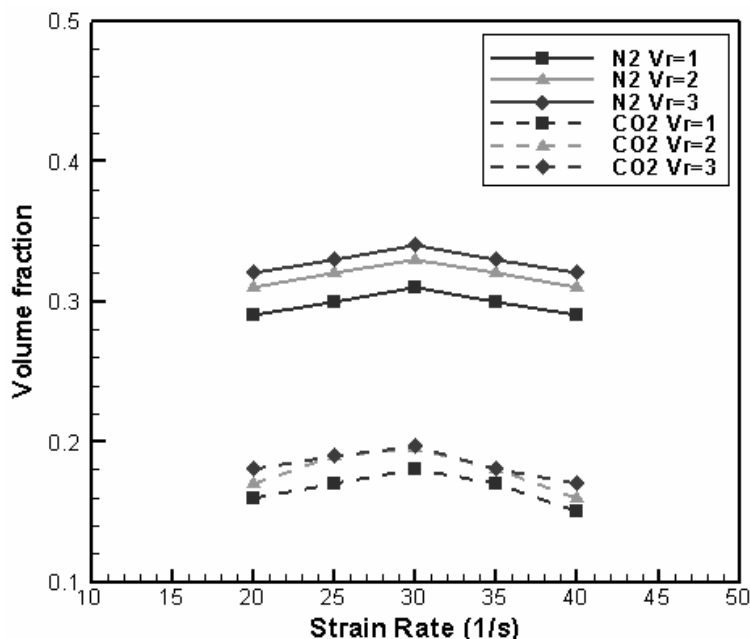


شکل 8- مقدار دی اکسید کربن و نیتروژن در جریان سوخت مورد نیاز جهت خاموش ساختن شعله به ازای استفاده از گاز شهری به عنوان سوخت

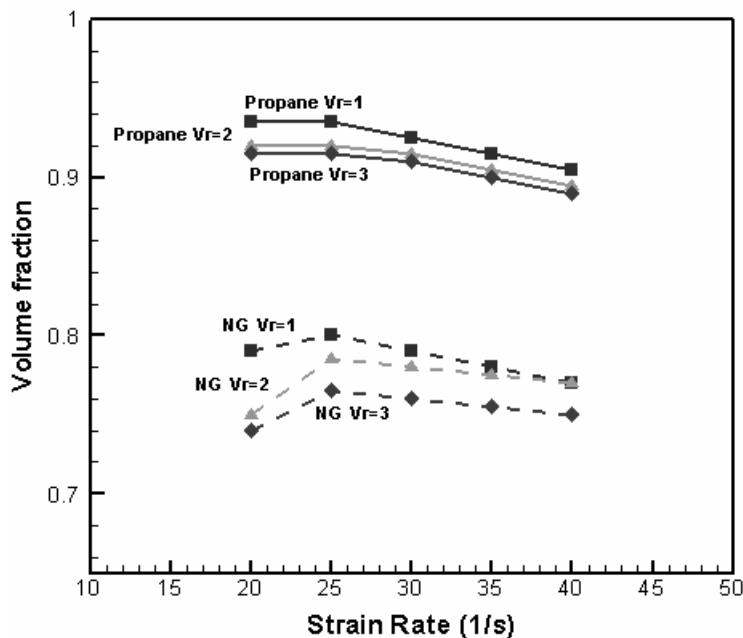
شکل 9 مقدار درصد حجمی دی اکسید کربن و نیتروژن در درون جریان اکسید کننده مورد نیاز برای خاموش ساختن شعله در حالی که از گاز شهری به عنوان سوخت استفاده می شود را نشان می دهد. همانند منحنی خاموش شدن شعله در حالت رقیق سازی سوخت، در این حالت نیز منحنی از یک نقطه بیشینه برخوردار است. در حالت رقیق سازی اکسید کننده نیز، رقیق سازی بوسیله دی اکسید کربن منجر به زودتر خاموش شدن شعله می گردد. همانگونه که در شکل 9 قابل مشاهده است، برخلاف رقیق سازی سوخت در این حالت، افزایش نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت بدلیل بالا بردن مقدار هوا در محفظه احتراق، کمبود اکسید کننده به واسطه رقیق سازی آن را مرتفع نموده و شعله پایدار تری را ایجاد می کند.

منحنی خاموش شدن شعله در حالت رقیق سازی سوخت با دی اکسید کربن به ازای سوخت گاز شهری و پروپان در شکل 10 مورد مقایسه قرار گرفته است. بدلیل بالاتر بودن ظرفیت تولید حرارت پروپان نسبت به گاز شهری، منحنی خاموش شدن آن

به ازای درصد بالاتری از رقیق سازی تشکیل گردیده است. همچنین نقطه بیشینه در منحنی خاموش شدن شعله در حالت استفاده از پروپان به عنوان سوخت در مقدار strain rate پائین تری به وقوع می پیوندد.



شکل 9- مقدار دی اکسید کربن و نیتروژن در جریان اکسید کننده مورد نیاز جهت خاموش ساختن شعله به ازای استفاده از گاز شهری به عنوان سوخت



شکل 10- مقایسه بین مقدار درصد دی اکسید کربن اضافه شده به سوخت، مورد نیاز جهت خاموش شدن شعله، به ازای استفاده از پروپان و گاز شهری به عنوان سوخت

بطور کلی دو پارامتر در منحنی خاموش شدن شعله و تشکیل نقطه بیشینه در آن تاثیر به سزایی دارند. یکی از آنها انتقال حرارت تشعشعی و دیگری مقدار انتقال حرارت جابجایی از شعله به محیط اطراف می باشد. افزایش مقدار strain rate منجر به



نازکتر شدن شعله و در نتیجه کاهش انتقال حرارت جابجائی از شعله به محیط اطراف می گردد و از طرفی دیگر این افزایش، بالا رفتن حداکثر دمای شعله و در نتیجه افزایش انتقال حرارت تشعشعی از شعله را در پی خواهد داشت. تقابل این دو پارامتر منجر به تشکیل نقطه بیشینه در منحنی خاموش شدن شعله بر حسب strain rate می گردد. بطوریکه با افزایش مقدار strain rate در مقادیر کم آن، مقدار انتقال حرارت جابجائی کاهش یافته و شعله پایدارتر می شود تا جایی که بدلیل بالا رفتن زیاد حداکثر دمای شعله و در نتیجه مقدار انتقال حرارت تشعشعی، از یک strain rate به بعد، با افزایش مقدار strain rate شعله ناپایدارتر می گردد.

## 5- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار شعله counterflow حاصل از احتراق گاز شهری و پروپان در شرایط استاندارد پرداخته شده است. پدیده خاموش شدن شعله در مقادیر متفاوت از strain rate و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت به ازای رقیق سازی سوخت و اکسیدکننده با نیتروژن و دی اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن تغییرات ایجاد شده در شعله به ازای تغییر در مقدار strain rate و نسبت سرعت اکسید کننده به سوخت مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج ارائه شده منحنی خاموش شدن شعله در تمامی حالات از یک نقطه بیشینه برخوردار است که حاصل تقابل دو نوع انتقال حرارت تشعشعی و جابجائی از شعله به محیط اطراف می باشد. اضافه کردن دی اکسید کربن به عنوان رقیق سازنده به درون جریان سوخت یا اکسید کننده نسبت به نیتروژن، شعله ناپایدارتری را ایجاد می کند و بنابراین در حالت رقیق سازی با دی اکسید کربن شعله زودتر خاموش می شود. در بخش دیگری از تحقیق به بررسی اثر نوع سوخت در رفتار شعله پرداخته شده است و نتایج حاکی از این مطلب است که شعله ایجاد شده بوسیله پروپان از درخشندگی و پایداری بالاتری نسبت به گاز شهری برخوردار است.

## مراجع

- 1- Turns, S.R., Introduction to Combustion, Concepts and Applications, Second Edition, McGraw-Hill Company, New York, 2000
- 2- S. Ishizuka, H. Tsuji, Proc. Combust. Inst. 18, 1981 695-703.
- 3- K. Maruta, M. Yoshida, H. Guo, Y. Ju, T. Niioka, Combust. Flame 112, 1998 181.
- 4- M. Bundy, A. Hamins, K. Y. Lee, Combust. Flame 133, 2003 299-310.
- 5- Z. Cheng, J.A. Wehrmeyer, R.W. Pitz, Experimental and numerical studies of opposed jet oxygen-enhanced methane diffusion flames, Mechanical Engineering Department, Vanderbilt University Nashville, TN 37235, USA, 2006.
- 6- I.K. Puri, K. Seshadri, Combust. Flame 65, 1986 137-150
- 7- K. Seshadri, F.A. Williams, Int. J. Heat Mass Transfer 21, 1978 251
- 8- S.V. Patankar, Hemisphere, Washington DC, 1980
- 9- C.K. Westbrook and F.L. Dryer: simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon fuels in flame, Combust. Sci. Technol., Vol. 127, 1981, p. 31.
- 10- M.W. Chase, C.A. Davies, J.R. Downey, D.J. Frurip, R.A. McColald and A.N. Syverud: JANAF Thermo Chemical Table, 3<sup>rd</sup> ed., vol. 14, American Inst. Physics, New York, 1985
- 11- C.J. Sung, J.B. Liu, C.K. Law, 1995, Combust. Flame 102, 481