

علمی - پژوهشی

مطالعه تجربی فرایند تأثیر گذاری پلاسما بر مشخصات عملکردی

شعله‌های ایستا و متحرک

امیر گودرزی^۱ اصغر افشاری^{۲*} 

دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸؛ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۳)

DOR: [20.1001.1.23223278.1402.12.1.7.6](https://doi.org/10.1001.1.23223278.1402.12.1.7.6)

چکیده

بهبود فرایند احتراق از دیرباز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای دخیل در تولید انرژی موردنیاز انواع سیستم‌ها موردتوجه بوده است. استفاده از ابزار پلاسمایی به‌عنوان راهکار نوین برای افزایش بازده و ایجاد قابلیت عملکرد سیستم‌های اشتعالی در شرایط کاری وسیع‌تر در سالیان اخیر موردتوجه قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیرات سیستم پلاسما پایه بر مشخصه‌های عملکردی فرایند احتراق به‌صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور از دو پیکربندی آزمایشگاهی استفاده شده است. در ساختار اول از مشعل بونزن به دو صورت باز و محصور برای مطالعه خواص شعله ساکن پیش‌آمیخته استفاده شده است. در این ساختار تحلیل نتایج بر اساس تصویربرداری اپتیکی به روش شیلرن و مشاهده پایداری و مخروط شعله تشکیل شده صورت‌گرفته است. در ساختار دوم از محفظه حجم ثابت برای مطالعه خواص شعله متحرک در محیط اشتعال‌پذیر استفاده شده است. در این مطالعه تفسیر نتایج بر اساس تصویربرداری فوق‌سریع به روش شیلرن از شعله شکل‌گرفته درون محفظه و همچنین داده‌های فشار درون محفظه حین احتراق استفاده شده است. نتایج گویای بهبود مشخصات شعله شامل سرعت آرام شعله و پایداری آن بر اساس مشاهدات شعله باز می‌باشد. همچنین کاهش زمان توسعه اولیه شعله و افزایش ناحیه اشتعال‌پذیری مخلوط تحت‌تأثیر محیط پلاسمایی، از نتایج حاصل از تست محفظه حجم بسته می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: احتراق، پلاسما، مطالعه آزمایشگاهی، روش‌های اپتیکی، راکتور سد دی‌الکترونیک

Experimental Study of Plasma Effects on the Stagnated and Propagating Flames Properties

Goudarzi, A.¹ Afshari, A.^{2*} 

University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 2023/03/09, Revised: 2023/07/16, Accepted: 2023/07/30, Published: 2024/08/25)

ABSTRACT

Combustion process improvement as one of the most important factors in the energy supplement for different devices has attracted great attention. Recently the concept of plasma assisted combustion as a new approach to increase efficiency and reliability of combustion based systems in the different working conditions has considered. In the present paper, two different experimental setups are used to investigate plasma system effects on the operational characteristics of combustion process. At the first setup, open and confined Bunsen burner is used to study premixed stagnated flame. In this structure flame properties are measured by optical schlieren photography method based on generation and stability of the flame cone. At the second setup, constant volume chamber is used to analyze propagating flame in combustible environment. In this structure high speed schlieren photography from propagating flame front and high frequency pressure measurement is used to study premixed propagating flame. Results indicate that, in the open stagnated flame plasma effects improve the laminar flame speed, in the confined stagnated flame plasma effects improve the flame stability and in the propagating flame plasma effects reduce the ignition delay, develop the lean flammability limit and increase laminar flame speed.

Keywords plasma assisted combustion, optical schlieren photography, experimental analysis, laminar flame speed, flame stability, flammability limit.

۱- دانشجوی دکتری: agoudarzi@ut.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): afsharia@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بیشتر انرژی پلاسمای تشکیل شده تبدیل به انرژی شیمیایی می‌شود در حالی که در پلاسمای گرم بیشتر انرژی آزاد شده تبدیل به گرما می‌شود. به عنوان نمونه‌ای از پلاسمای گرم می‌توان از مشعل پلاسمای و شمع‌های جرقه‌ای معمول نام برد و برای پلاسمای سرد می‌توان به تخلیه رشته‌ای کرونا، تخلیه میکروویو، تخلیه پالسی نانو ثانیه متوالی و تخلیه سد دی‌الکترونیک اشاره کرد. شایان ذکر است که پلاسمای غیر تعادلی به توان کمتری برای تشکیل نسبت به پلاسمای تعادلی نیاز دارد. مزیت بهبود احتراق به واسطه برانگیختگی غیر تعادلی نسبت به بهبود حرارتی مقدار انرژی بسیار کمتر مورد نیاز می‌باشد [۴].

دسته بندی انواع تخلیه الکترونیکی تشکیل دهنده پلاسمای بر اساس دو عامل میدان الکترونیکی کاهش یافته $(E/N)^6$ و غلظت الکترون‌ها (ne) صورت می‌گیرد [۵، ۶]. برخی از انواع تخلیه مخلوطی از چندین گونه پلاسمای هستند و نواحی مختلف آنها بر اساس مقادیر مختلف میدان الکترونیکی کاهش یافته مشخص می‌گردد. تخلیه الکترونیکی از نوع قوس الکترونیکی در مقادیر نسبتاً پایین میدان الکترونیکی کاهش یافته تشکیل می‌شود. در این حالت مسیر اولیه آزادسازی انرژی، تحریک مد چرخشی گاز می‌باشد. تخلیه پایای میکروویو در فشار بالا از تعدادی رشته^۷ تشکیل می‌شود که یک پلاسمای نسبتاً داغ تعادلی می‌سازد. جرقه‌های پالسی^۸ و قوس‌های لغزان^۹ برخی از ویژگی‌های تخلیه‌های تابان^{۱۰} و قوس‌ها را در مراحل توسعه خود ترکیب می‌کنند. در این حالت مقدار میدان الکترونیکی کاهش یافته در بازه ۱۰۰-۱۰ می‌باشد. مقدار معمول برای تخلیه تابان DC نزدیک به حد شکست می‌باشد و سازوکار غالب جهت تحریک برانگیختگی مدهای ارتعاشی و الکترونیکی از طریق برخوردی الکترونی می‌باشد. تخلیه ستون نور^{۱۱} دارای مقادیر زیاد E/N در پیشانی موج یونیزاسیون در سر ستون نور (حدود ۵۰۰ Td) است در حالی که این مقدار در کانال ستون نور در بازه ۳۰-۲۰ Td می‌باشد. این گونه از تخلیه در حالتی که ولتاژ مازاد^{۱۲} (ولتاژ مازاد عبارت از میدان

پلاسمای در یک تشریح ساده در واقع یک گاز الکترونیکی است که متشکل از مولکول‌های گاز خنثی، یون‌ها، اتم‌ها و مولکول‌ها و اتم‌های برانگیخته در مد الکترونی می‌باشد [۱]. اثرات پلاسمای می‌تواند منجر به افزایش دمای الکترون‌ها و یون‌ها و بهبود احتراق از طریق اثرات حرارتی، بهبود احتراق از طریق تشکیل اجزای فعال مانند رادیکال‌های آزاد و همچنین تجزیه مولکول‌های سوخت به اجزای سبک‌تر با قابلیت احتراق راحت‌تر گردد. از نتایج بهبود احتراق توسط پلاسمای می‌توان به افزایش سرعت کسند شدن^۱ در مخلوط پیش‌آمیخته، افزایش سرعت پرش^۲ و بلند شدن^۳ در جت شعله، گسترش محدوده اشتعال‌پذیری، افزایش نرخ واکنش‌ها و سرعت شعله، افزایش پایداری شعله و همچنین کاهش تأخیر اشتعال اشاره کرد [۲].

در حال حاضر دو گونه از پلاسمای فرایندهای پلاسمای شیمیایی بکارگرفته می‌شوند که شامل پلاسمای تعادلی یا پلاسمای گرم^۴ و پلاسمای غیر تعادلی یا پلاسمای سرد^۵ می‌باشد. یکی از تفاوت‌های شاخص بین این دو گونه عبارت از این است که پلاسمای گرم بر اساس انرژی تقریباً برابر (دمای یکسان) الکترون، یون و اجزای خنثی تعریف می‌شود در حالی که پلاسمای سرد شامل الکترون‌های پرانرژی و یون‌ها و اجزای خنثی کم انرژی (معمولاً با دمای نزدیک به دمای محیط) می‌باشد. این موقعیت خاص معمولاً امکان دستیابی به مسیرهای پربازده‌تر برای انتقال انرژی الکترون‌های پرانرژی به فرایندهای شیمیایی مورد نظر (شامل تجزیه یا تحریک مولکول‌ها) بدون انتالپی زیاد (شامل گرم کردن و افت انرژی‌های مربوطه) را فراهم می‌کند [۳]. تفاوت عمده بین این دو گونه از پلاسمای درجه یونیزاسیون می‌باشد. به این ترتیب که پلاسمای گرم معمولاً به طور کامل یونیزه هستند در حالی که در پلاسمای سرد درجه یونیزاسیون (نسبت اجزای یونیزه شده به کل اجزا) پایین (10^{-5}) می‌باشد. در پلاسمای سرد بیشتر انرژی الکترون‌ها صرف تجزیه مولکول‌ها و ایجاد رادیکال‌ها می‌گردد و در نتیجه

6 -Reduced electric field

7 -Filament

8 -Pulsed spark

9- Gliding arc

10 -Glow discharge

11- Streamer

12- Overvoltage

1 -Blow off

2 -Blow out

3 -Lift off

4 -Equilibrium or thermal or hot plasma

5 -Non-equilibrium or non-thermal plasma

پلاسما می‌تواند فرایندهای احتراق را از چند مسیر مختلف بهبود بخشد. مسیر اول حرارتی می‌باشد که در آن پلاسما می‌تواند به سرعت سبب افزایش دمای مخلوط توسط انتقال انرژی از الکترون‌ها به مولکول‌های گاز شود و به این ترتیب نرخ واکنش‌های شیمیایی را بر اساس رابطه آرنیوس افزایش دهد. به علاوه گرم کردن گاز غیر همگن موجب اغتشاشات در جریان و شروع آشفستگی و اختلاط می‌گردد. مسیر دوم سینتیکی می‌باشد. پلاسما الکترون‌ها و یون‌های پر انرژی تولید می‌کند که در ادامه سبب تولید رادیکال‌های فعال (مانند O, OH و H) و متعاقباً موجب شتاب و تولید سازوکارهای آغاز و انشعاب زنجیره احتراق می‌گردند. این سازوکار از طریق تجزیه به‌واسطه برخورد مستقیم الکترونی، برخورد یونی و تجزیه به‌واسطه باز ترکیب (مانند O_2^+ و N_2^+) و تجزیه به‌واسطه برخورد واکنش دهنده‌ها با مولکول‌های برانگیخته الکترونیکی (مانند N_2^*) و $O_2(a^1\Delta_g)$ و ارتعاشی (مانند $N_2(v)$) اعمال می‌شود. همچنین پلاسما امکان تولید گونه‌های واکنش پذیر با طول عمر زیاد (مانند O_3) و کاتالیست‌های میانی (مانند NO)، که زمینه‌ساز شتاب‌دهی به فرآیند اکسایش سوخت در دمای پایین هستند، را فراهم می‌کند. مسیر سوم تجزیه مستقیم سوخت از طریق برخورد با الکترون‌های پر انرژی می‌باشد. در این حالت مولکول‌های بزرگ سوخت به مولکول‌های کوچکتر شکسته می‌شوند و به این ترتیب واکنش‌پذیری سوخت و قابلیت پخش آن در مخلوط افزایش می‌یابد. مسیر چهارم بهبود فرآیند انتقال به‌واسطه طوفان یونی (القای جریان به‌واسطه نیروهای الکترواستاتیک در ابر یونی حاصل از تخلیه که پدیده‌ای الکتروهیدرودینامیک می‌باشد)، ناپایداری هیدرودینامیکی و حرکت جریان در اثر نیروهای کولومب و لورنز می‌باشد. به این ترتیب تغییر محلی سرعت جریان و افزایش آشفستگی و اختلاط در جریان به‌واسطه پلاسما حاصل می‌باشد. این سازوکارها به صورت توأمان و یا جداگانه می‌توانند منجر به کنترل بیشتر احتراق شوند که برای شعله‌های بسیار رقیق، احتراق در جریان با سرعت زیاد، احتراق در دما و فشار پایین، اشتعال مجدد در ارتفاع عملکردی زیاد، آغاز انفجار در موتورهای پالس انفجار و کنترل اشتعال در انواع موتورهای HCCI, PCCI و RCCI ضروری می‌باشند [۵، ۹].

الکتریکی می‌باشد که در مقایسه با حد شکست مقدار بیشتری داشته باشد) در نزدیکی الکترودها (۱/۲ تا ۲ برابر) وجود داشته باشد، می‌تواند تشکیل شود. تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی^۱ (SDBD) بر اساس مقادیر بیشتر میدان الکتریکی کاهش یافته به دلیل فاصله مؤثر کمتر بین الکترودها مشخص می‌شود. پالس‌های ولتاژ بالا با زمان برخاست بسیار کوتاه منجر به تشکیل موج‌های یونیزاسیون سریع^۲ (FIW) می‌شود. برای یک زمان محدود (معمولاً از مقیاس نانو ثانیه برای چگالی تعداد گاز حدود 10^{18} cm^{-3} و زمان کمتر در چگالی‌های گاز بیشتر) می‌توان مقدار میدان الکتریکی کاهش یافته را نزدیک یا بیشتر از حد فرار^۳ (برای هوا در حدود ۲kTd) نگه داشت. در این حالت الکترون‌های پر انرژی در ناحیه تخلیه تشکیل می‌شوند و یک پیش یونیزاسیون همگن و برانگیختگی گاز شکل می‌گیرد. در این حالت تخلیه مانند یک موج یونیزاسیون یکنواخت با سرعتی در حدود سرعت صوت محلی توسعه می‌یابد. توضیحات بیشتر مورد دسته بندی انواع تخلیه الکتریکی در مرجع [۷] آورده شده است.

پلاسما به‌عنوان حالت چهارم ماده ابعاد نوبنی برای احتراق و کنترل آلاینده‌گی فراهم آورده است. این ابعاد شامل حرارت‌دهی و افزایش دمای سریع طبق اثر ژول (که بیانگر تولید حرارت در اثر عبور جریان الکتریکی از محیط رسانا می‌باشد)، انرژی الکترونی بالا (۱-۱۰۰eV)، عدم تعادل بالا در مدهای تحریک شده الکترونی و ارتعاشی و نیروهای کولومب و لورنز (که بیانگر تأثیر میدان الکتریکی و مغناطیسی بر حرکت ذرات باردار می‌باشد) است. اساساً شیمی پلاسما ویژگی‌های متفاوتی نسبت به شیمی احتراق برخوردار است. به این ترتیب که شیمی پلاسما در دمای پایین (۳۰۰ تا ۶۰۰ کلوین) طی ابعاد زمانی نانو تا میکرو ثانیه رخ می‌دهد در حالی که شیمی احتراق در دمای بالا (۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین) طی ابعاد زمانی ده میکرو تا میلی ثانیه رخ می‌دهد. به این ترتیب احتراق به کمک پلاسما^۴ پلی جهت ارتباط بین فرایندهای سریع دما پایین پلاسما و فرایندهای کند دما بالای احتراق می‌باشد [۸].

1-Surface dielectric barrier discharge
2-Fast ionization wave
3-Runaway threshold
4-Plasma Assisted Combustion

آزمایشاتی بر روی دستگاه چراغ بونزن^۱ ترتیب دادند. در این سیستم ازن توسط دستگاه DBD جریان تزریق شده است و نتایج حاصل برای اعتبارسنجی مدل توسعه یافته مورد استفاده قرار گرفته است. مدل سازی احتراق در تحقیق حاضر بر پایه استفاده از کد یک بعدی PREMIX از مجموعه CHEMKIN [۱۷]، که شامل ۳۲۴ واکنش و ۵۴ جزء و ترکیبی از سازوکارهای GRI-Mech 3.0 و مجموعه ای از واکنش های ازن می باشد، صورت گرفته است. نتایج تحقیق گویای افزایش ۳ تا ۸ درصدی سرعت شعله در حضور ازن می باشد. البته این مقدار به صورت مطلق برای تمام نسبت های توازن یکسان است. از دیگر نتایج این تحقیق می توان به تغییر پروفیل اجزا و دمای شعله و همچنین تشکیل زودتر رادیکال ها و اتم ها در حضور ازن اشاره کرد. در این تحقیق تحلیل نتایج بر اساس نرخ تشکیل و مصرف اجزای میانی صورت گرفته است.

اومبرلو و همکارانش [۱۸] به صورت تجربی و عددی تأثیرات سینتیک و حرارتی ازن بر پیشروی شعله را در شعله آرام غیر پیش آمیخته مخلوط N_2 و O_2 ، C_3H_8 مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم ازن توسط دستگاه DBD تولید و توسط اسپکتروسکوپی اندازه گیری شده است. در تحقیق حاضر شبیه سازی عددی توسط کد PREMIX با افزودن واکنش های ازن صورت گرفته است. نتایج آزمایش در فشار اتمسفریک گویای بهبود ۸ درصدی سرعت شعله آرام به ازای افزودن ۱۲۶۰ ppm ازن به مخلوط نیتروژن و اکسیژن می باشد. همچنین ارتفاع بلند شدن شعله با افزودن ازن کاهش می یابد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که اثر سینتیک در بهبود پیشروی شعله توسط ازن، از طریق مهیا کردن ناحیه پیش گرم شعله جهت اکسایش زودتر سوخت، بیشتر از اثر حرارتی به واسطه انرژی ذخیره شده در ازن می باشد. همچنین بهبود سینتیکی توسط ازن تغییرات هیدرودینامیکی در جبهه شعله ایجاد می کند و سبب بهبود بیشتر سرعت پیشروی شعله می گردد. بررسی عددی سینتیک شیمیایی واکنش ها گویای بیشترین تأثیر پذیری پدیده های مشاهده شده از واکنش های مربوط به تجزیه ازن و ترکیب اتم های اکسیژن حاصل با سوخت و ایجاد رادیکال های OH می باشد.

اولین بررسی تجربی از تخلیه سد دی الکتریک در ۱۸۵۷ توسط ورنر فون زیمنس [۱۰] گزارش شده است. در این تحقیق زیمنس روی تولید اوزون تمرکز کرده است. او با عبور دادن هوا با گاز اکسیژن از فاصله میان دو استوانه هم مرکز از جنس شیشه این کار را انجام داد.

در دهه های بعد محققین بر روی تشکیل اوزون و اجزای N_xO_y مطالعاتی را انجام دادند. در آغاز قرن بیستم امیل واربورگ [۱۱] تحقیقات بسیار مهمی برای کنترل بهتر تخلیه گاز انجام داد. در ۱۹۲۰ اتو [۱۲] تولید کننده اوزون را صنعتی کرد. در ۱۹۳۰ باس [۱۳] کشف کرد که تجزیه هوا بین الکترودهای موازی مسطح که با دی الکتریک پوشیده شده اند در تعداد زیادی از جریان های رشته ای کوتاه رخ می دهد. او اثر این تخلیه کوچک را روی صفحات حساس به دست آورد و توانست خواص ولتاژ و جریان را ضبط کند.

از سال ۱۹۹۱ به بعد ماسین و همکارانش [۱۴، ۱۵] کمک بزرگی به درک حالت تابش در تخلیه سد دی الکتریک با فشار اتمسفریک نمودند و تخلیه گازهای هلیوم و نیتروژن را به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی عددی ارائه کردند. با این کار گام بزرگی برای فهم بنیادی فرایندهای موجود در حالت تابش برداشته شد.

مرور مطالعات صورت گرفته در حوزه بهبود احتراق توسط پلازما گویای معطوف بودن حجم بیشتر این آثار به تحقیقات تجربی می باشد. زمینه این جهت گیری مربوط به پیچیدگی های مربوط به مدل سازی بر همکنش جریان واکنشی و فرایندهای پلازما می باشد. همچنین توسعه مدل مناسب در گرو وجود نتایج تجربی جهت شناخت کلی پدیده و اعتبارسنجی می باشد. غالب مقالات تجربی ارائه شده، جهت تفسیر نتایج از مدل های صفر بعدی و یک بعدی بهره جسته اند.

یکی از بزرگترین چالش ها در این حوزه عدم وجود دانش کامل نسبت به گونه ها و واکنش های مهم می باشد. به این ترتیب سیر مطالعاتی در زمینه تأثیر گونه های پلازما بر بهبود احتراق و توسعه مکانیزم های سینتیکی مولکول های برانگیخته مورد توجه قرار گرفت است. هالتر و همکارانش [۱۶] به منظور تعیین تأثیر اوزون بر سرعت آرام شعله مخلوط پیش آمیخته متان-هوا در دما و فشار محیط

وجود گونه‌های پلاسمایی سبب حفظ احتراق در فاصله بین پالس‌ها می‌شود. نتایج این تحقیق همچنین گویای بهبود بیشتر اشتعال در صورت قرار گرفتن کاتد پیش از آند می‌باشد.

اهن و همکارانش [۲۱] مطالعه آزمایشگاهی شعله آشفته پیش‌آمیخته متان-هوا با درجه چرخش کم را تحت تأثیر تشعشعات پیوسته میکروویو مورد توجه قرار دادند. جریان با درجه چرخش کم توسط عبور ۶۰ درصد جریان از چرخاننده حلقوی خارجی و ۴۰ درصد جریان از سوراخدار داخلی و ترکیب آنها به دست آمده است. ایشان از سیستم PIV برای مشاهده میدان جریان استفاده کردند. همچنین میزان جذب میکروویو توسط شعله با آنالیز دما، نورتابی شیمیایی شعله و اندازه‌گیری CH_2O و OH توسط سیستم PLIF سنجیده شده است. نتایج این تحقیق برای دو رژیم انرژی میکروویو ارائه شده است. در رژیم انرژی زیاد، میکروویو سبب شکست الکتریکی در شعله می‌شود. در رژیم انرژی پایین شعله بزرگتر و پایدارتر می‌گردد و به نازل مشعل نزدیکتر می‌شود.

تحقیقات اخیر در زمینه توسعه جزئیات مدل سازی عددی، برای درک بهتر و کنترل بیشتر برای پدیده های تخلیه گذاری ناپایدار صورت گرفته است. این تحقیقات منجر به دانستن این موضوع شده که برای ایجاد تخلیه سد دی‌الکتریک در حالت پایدار و فشار اتمسفریک به شرایط عملکرد ویژه نیاز است که به صورت عمده توسط خواص گاز مورد استفاده تعیین می‌شود. از میان تحقیقات بعدی انجام شده می‌توان به مطالعه برای مدل سازی دو بعدی تخلیه سد دی‌الکتریک با سه گاز نئون، نیتروژن و اکسیژن توسط الیاسون و همکارانش [۲۲] اشاره کرد. بیشتر مطالعات مدل سازی، بر روی گازهای نجیب انجام می‌گیرد تا تخلیه پایداری رخ دهد. گولوباوسکی و همکارانش [۲۳] از مدل یک‌بعدی و با استفاده از چند ذره، روی مدل متفاوتی از عملکرد تخلیه گاز هلیوم در فشار اتمسفری مطالعه کردند.

از جنبه‌های مهم مدل سازی، در نظر گرفتن واکنش‌های شیمیایی پلاسما است. عملکرد شیمیایی پلاسما با در نظر گرفتن مکانیسم واکنش‌های بسیار پیچیده شامل مولکول و یا اتم‌های نیمه پایدار و ذرات چندگانه یون تغییر می‌کند و روی یونیزاسیون تأثیر می‌گذارد. ساده ترین مدل برای رفتار شیمیایی پلاسما در نظر گرفتن دو ذره الکترون و

اومبرلو و همکارانش [۱۹] تأثیر $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ را بر پیشروی شعله آرام غیر پیش‌آمیخته C_2H_4 در فشار پایین (۳/۶۱ و ۶/۷۳ کیلو پاسکال) به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. دلیل در نظر گرفتن فشار پایین برای این مطالعه رابطه بین فشار و نتیجتاً چگالی تعداد با غلظت و طول عمر گونه‌های پلاسمایی می‌باشد. به این ترتیب که کاهش فشار منجر به افزایش مسیر پیمایش آزاد و کاهش فرکانس برخورد و افزایش طول عمر گونه‌های می‌شود. در تحقیق حاضر این جزء توسط تخلیه پلاسما میکروویو تولید شده و از اکسیژن اتمی و ازن توسط افزودن NO در زمان ماند جریان حدود یک ثانیه جداسازی شده است. نتایج تحقیق بیانگر بهبود ۲ تا ۳ درصد سرعت شعله به ازای افزودن ۵۵۰۰ ppm $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ می‌باشد. همچنین نتایج گویای تأثیر زیاد فرآیند خاموشی $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ در اثر برخورد با مولکول‌های سوخت می‌باشد.

دو و همکارانش [۲۰] از تخلیه پلاسما پالس نانوثانیه برای اشتعال و نگهداری شعله جت برخواستی مادون صوت و صوتی هیدروژن و یا اتیلن در جریان عرضی اکسیژن دما بالا با ماخ ۱/۷ تا ۲/۴ و در شرایط ترمودینامیکی مختلف استفاده کردند. در سیستم مورد استفاده برای تست پلاسمای غیر تعادلی توسط پالس‌های متوالی با ولتاژ بیشینه ۱۵kV، عرض پالس ۱۰ns و فرکانس ۵۰kHz تولید شده است. ساختار جریان و شوک به واسطه جت‌های سوخت و همچنین توزیع رادیکال‌های OH حاصل از احتراق به ترتیب توسط تصویربرداری شیلرن^۲ و PLIF ثبت شده‌اند. نتایج تجربی شعله هیدروژن-اکسیژن به وسیله کد Cantera که مدلی صفر بعدی با فرض اختلاط آنی است و پالس پلاسما را به عنوان منبع تولید رادیکال در نظر می‌گیرد تفسیر شده است. در این کد از حلگر BOLSIG برای محاسبه EEDF بر اساس بیشینه میدان الکتریکی، چگالی تعداد و نسبت مولی گونه‌های استفاده شده است. تحقیق حاضر تنها برخوردهای الکترونی منجر به تجزیه مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن را در نظر گرفته است. نتایج نشان می‌دهد وجود پلاسما سبب افزایش تولید رادیکال تا نسبت مولی هزار برابر در مقایسه با عدم وجود پلاسما و نتیجتاً اشتعال و پایداری شعله در پایین دست می‌گردد. همچنین

1-Singlet delta oxygen

2-Schlieren

واکنش‌پذیری و سرعت آرام و آشفته شعله را افزایش می‌دهد.

ناگاراچا در رساله دکتری خود [۳۲] مدل‌سازی ابعادی پدیده مورد بررسی در مرجع [۲۱] را مورد نظر قرار داد. در این تحقیق مدل‌سازی پلازما بر اساس مدل تک ممان توسعه یافته و توسط عبارات منبع با معادلات حاکم بر جریان همبسته شده است. همچنین مدل‌سازی پلازما با فرض E/N و چگالی الکترونی یکنواخت و استفاده از حلگر BOLSIG برای محاسبه نرخ واکنش‌های الکترونی و در نظر گرفتن ۹ جزء و ۷۸ واکنش صورت گرفته است. مقادیر E/N و چگالی الکترونی طوری تعیین می‌شوند که در هر پالس انرژی منتقل شده به سیال برابر مقدار انرژی پالس در تست صورت گرفته باشد. به منظور پرهیز از پیچیدگی حل، شکل‌گیری پلازما در هر پالس برای یک محدوده کوچک مکعبی بین دو الکتروود و به صورت مجزا از حلگر LES شبیه‌سازی شده و به جریان تزریق شده است. به این ترتیب تنها تأثیر سینتیک پلازما لحاظ شده است. نتایج این تحقیق گویای عدم تأثیرپذیری توسعه شعله از رادیکال‌های تولیدی پلازما به دلیل نسبت ممنوم بالای جت سوخت نسبت به اکسیژن عبوری می‌باشد.

وانگ [۳۳] در مقاله‌ای به بررسی عددی بهبود احتراق غیر پیش آمیخته آشفته متان-هوا توسط عملگر پالس متوالی پلازما بر اساس روش LES پرداخت. در این تحقیق اثرات پلازما روی جریان بر اساس مدل تک ممان و تنها با در نظر گرفتن اثرات هیدرودینامیکی و حرارتی در غالب عبارات منبع توسعه یافته است. به این ترتیب اثرات سینتیک و گونه‌های شیمیایی لحاظ نشده‌اند. در این تحقیق واکنش‌های شیمیایی بر اساس فرض سرعت بالا در نظر گرفته شده‌اند و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Fluent صورت گرفته است. نتایج عددی گویای تأثیر اغتشاشات آکوستیک ایجاد شده توسط عملگر پلازما بر بهبود واکنش‌های شیمیایی و نتیجتاً تغییر شکل شعله می‌باشد.

جمع‌بندی کلیات موضوع و مرور مقالات آورده شده گویای تأثیرگذاری پلازما بر عملکرد سیستم‌های احتراقی و قابلیت کاربردهای فراوان صنعتی این فناوری می‌باشد. از سوی دیگر این موضوع مفهومی نوین در راستای ارتقای سیستم‌های احتراقی می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیرات سیستم پلازما پایه بر مشخصه‌های عملکردی فرایند

یون مثبت است. مدل‌سازی‌های زیادی بر این مبنای انجام شده است. از جمله می‌توان به پژوهش شین و راجا [۲۴] روی گاز هلیوم و همچنین نیشیدا [۲۵] روی گاز نیتروژن اشاره کرد. برای انجام مدل‌سازی بادقت بیشتر واکنش‌های شیمیایی پیچیده و ذرات بیشتری از جمله ذرات نیمه پایدار، خنثی، ذرات برانگیخته و یون‌های مثبت و منفی و غیره در نظر گرفته می‌شود. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های لین و همکارانش [۲۶] و همچنین هانگ و همکارانش [۲۷] اشاره کرد.

مرور مطالعات صورت گرفته در حوزه بهبود احتراق توسط پلازما بیانگر بدیع بودن تحقیقات مربوط به بررسی عددی چندبعدی فرایندهای مرتبط با این حوزه می‌باشد. در این مقاله به واسطه جنبه‌های نوین این موضوع خصوصاً در منابع فارسی و ایجاد پایه مناسب برای مطالعات بعدی مرور اهم مطالعات عددی نیز آورده شده است.

اهن و همکارانش [۲۸] به مطالعه تجربی و عددی تأثیر غلظت‌های مختلف ازن بر سرعت آرام و نرخ کرنش خاموشی شعله^۱ پیش آمیخته رقیق متان-هوا آشفته با چرخش^۲ کم پرداختند. مدل‌سازی سه بعدی توسط کد OpenFOAM [۲۹] و بر اساس روش LES-PaSR [۳۰] و سازوکار واکنش‌های متان-هوا به انضمام واکنش‌های ازن صورت گرفته است. معیار سنجش بهبود بر اساس هیدروکسیل و فرالدهید صورت گرفته است. نتایج تحقیق گویای همچنین افزایش سرعت آرام شعله و نرخ کرنش خاموشی به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد به ازای ۰٫۵۷ درصد حجمی از ازن می‌باشد. افزایش نرخ کرنش خاموشی به معنای قابلیت شعله برای حضور در شرایط آشفته‌تر می‌باشد.

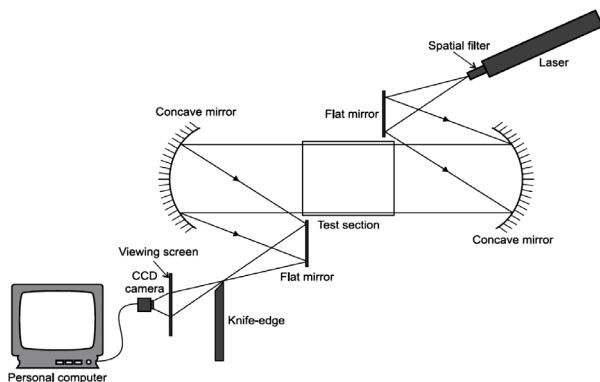
فربی و همکارانش [۳۱] بهبود احتراق پیش‌آمیخته متان-هوا با استفاده از پلازما میکروویو را در محفظه احتراق توربینی GELM6000 مورد بررسی قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که پلازما تقریباً بر میدان جریان بی‌تأثیر است ولی شکل شعله و چین خوردگی‌های آن را تغییر می‌دهد. همچنین تشعشعات میکروویو سبب افزایش نرخ واکنش‌ها و آزادسازی حرارت می‌گردد و

1-Extinction

2-Swirl

این روش ممکن است در مورد بعضی از گازها به اندازه روش پیشروی شعله باشد.

در این بخش سیستم‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی مطالعه ساختار شعله و ایجاد محیط پلاسمایی به طور مجزا برای شعله ساکن با استفاده از مشعل بونزن و شعله پیش‌رونده با استفاده از محفظه احتراق حجم بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجاکه روش اساسی مطالعه تجربی در تحقیق حاضر تصویربرداری از شعله و شیلرن می‌باشد در این قسمت به تشریح این روش پرداخته می‌شود. اندازه‌گیری با روش شیلرن [۳۴] بر پایه شکست باریکه نور است. این روش محبوب‌ترین روش اندازه‌گیری بر پایه شکست نور می‌باشد که دارای دو مزیت سادگی نصب تجهیزات و سهولت در تفسیر داده‌ها است. یک شماتیک از مجموعه آزمایش شیلرن که از آینه‌های مقعر استفاده می‌کند و به شکل حرف Z است در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم شامل دو آینه مقعر، دو آینه تخت، یک منبع نور متمرکز (لیزر)، یک لبه تیز و یک دوربین مدار بسته است. خط مرکزی تمامی اجزا باید در یک راستا قرار داشته باشند. در صورتی که آینه‌ها دارای فاصله کانونی بزرگ‌تری باشند، حساسیت روش به تمرکز گرا دیان‌های دمایی افزایش خواهد یافت. نقش آینه اول این است که باریکه نور را به صورت موازی درآورد این در حالی است که آینه دوم نقش متمرکز کردن نور بر روی لبه تیز را بر عهده دارد. منبع نور در فاصله کانونی آینه اول و تیغه تیز در فاصله کانونی آینه دوم قرار خواهند گرفت. وظیفه تیغه تیز جذب بخشی از نوری است که به آن می‌رسد به طوری که در صورت عدم وجود هیچ گونه اغتشاشی در ناحیه تست، تصویر تشکیل شده بر روی پرده کاملاً یکنواخت باشد.



شکل (۱): شماتیک چیدمان روش شیلرن [۳۴]

احتراق به صورت تجربی بررسی می‌شود. برای این منظور دو چیدمان آزمایشگاهی مورد توجه قرار می‌گیرد. در ساختار اول از مشعل بونزن به دو صورت باز و محصور برای مطالعه خواص شعله ساکن پیش‌آمیخته استفاده می‌شود. در این ساختار تحلیل نتایج بر اساس تصویربرداری اپتیکی به روش شیلرن و مشاهده پایداری و مخروط شعله تشکیل شده صورت می‌گیرد. در ساختار دوم از محفظه حجم ثابت برای مطالعه خواص شعله متحرک در محیط اشتعال‌پذیر استفاده می‌شود. در این مطالعه تفسیر نتایج بر اساس تصویربرداری فوق‌سریع به روش شیلرن از شعله شکل‌گرفته درون محفظه و همچنین داده‌های فشار درون محفظه حین احتراق استفاده می‌شود. به این ترتیب از منظرهای متفاوت پارامترهای مشخصه متنوع سیستم‌های احتراقی تحت تأثیر سیستم‌های پلاسما پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است در این تحقیق آزمایش برای هر یک از شرایط کاری سه مرتبه تکرار شده است و نتیجه نهایی کمی مربوط به میانگین‌گیری همه تست‌ها می‌باشد.

۲- پیکربندی آزمایشگاهی و روش‌های مطالعه تجربی

پیکربندی‌های متنوعی جهت مطالعه پارامترهای مشخصه شعله توسعه پیدا کرده‌اند. از پارامترهای مشخصه اساسی شعله می‌توان به سرعت آرام شعله، قابلیت اشتعال‌پذیری و تأخیر اشتعال اشاره کرد. همچنین مطالعه ساختار شعله و پایداری شعله از دیرباز مورد توجه بوده است. اندازه‌گیری مشخصات شعله و از مهم‌ترین آنها سرعت آرام شعله با استفاده از شیلرن به دو روش کلی انجام می‌پذیرد. روش اول که دقیق‌تر بوده و نیاز به تجهیزات بیشتری دارد، روش محفظه حجم ثابت و یا روش پیشروی شعله نامیده می‌شود. در این روش می‌توان فشار اولیه را بسته به استحکام محفظه احتراق و تجهیزات تأمین سوخت و هوای ورودی، تا مقادیر بسیار بالا افزایش داد و در نتیجه شرایط تست را به شرایط صنعتی نزدیک کرد. روش دوم که روش شعله ثابت و یا روش زاویه شعله نامیده می‌شود، سرعت آرام شعله را با استفاده از زاویه مخروط شعله و یا مساحت ناحیه واکنش در یک شعله دوبعدی و یا متقارن محوری اندازه‌گیری می‌گیرد. این روش تنها در فشار محل آزمایش قابل انجام بوده و دقت آن وابسته به دقت در به دست آوردن ناحیه واکنش است. دقت

۱-۲- مشعل بونزن

در یک مشعل بونزن پیش آمیخته اگر سرعت جریان خروجی بیشتر از سرعت آرام شعله مخلوط باشد یک شعله مخروطی در بالای نازل خروجی تشکیل می‌شود. سرعت جریان خروجی مخلوط نسوخته از دهانه مشعل را می‌توان به مؤلفه‌های مماسی و عمود بر سطح شعله تقسیم کرد. به دلیل انبساط حرارتی در جبهه شعله مؤلفه عمودی افزایش می‌یابد؛ ولی طبق رابطه زیر مقدار دبی جرمی گذرنده از سطح شعله ثابت باقی خواهد ماند. این در حالی است که سرعت مماسی از انبساط گاز تأثیر نمی‌پذیرد. از آنجاکه شعله ساکن می‌باشد، سرعت سوزش نسبت به مخلوط نسوخته باید برابر با مؤلفه عمود بر سطح شعله سرعت جریان نسوخته باشد. به این ترتیب رابطه (۱) حاصل می‌شود. در این رابطه زاویه α نصف زاویه مخروط شعله بونزن می‌باشد.

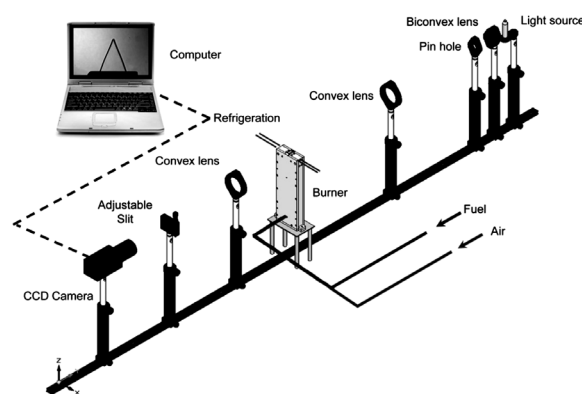
$$S_L = U_0 \sin \alpha \quad (1)$$

شایان ذکر است داشتن پروفیل سرعت خروجی تقریباً یکنواخت منجر به لبه نسبتاً تیزتر برای شعله می‌شود و اندازه‌گیری زاویه را با دقت بیشتری ممکن خواهد کرد. جهت یکنواخت نگه‌داشتن جریان در مقطع خروجی می‌توان از شبکه‌بندی کانال استفاده کرد. مهم‌ترین عارضه این روش جدای از اندازه‌گیری نادرست به دلیل اثر کشیدگی، عدم قطعیت زیاد حتی برای انحراف کوچک در خطوط جریان نزدیک شونده به شعله می‌باشد. همچنین تغییر پروفیل سرعت در خروجی تأثیر بسزایی بر شکل شعله خواهد داشت و به دلیل افزایش سرعت جریان در وسط مقطع مشعل، شعله بلندتر خواهد شد و این امر سبب کاهش دقت اندازه‌گیری زاویه مخروط شعله و بالتبع سرعت شعله بر مبنای زاویه مخروط شعله خواهد شد. در شرایط توسعه‌یافتگی جریان لازم است از روش مساحت شعله برای اندازه‌گیری سرعت شعله استفاده کرد. به این ترتیب با فرض یکسان بودن سرعت آرام شعله در تمام سطح شعله رابطه (۲) قابل حصول می‌باشد.

$$S_L = \frac{Q}{\rho_0 A} \quad (2)$$

از مشکلات عمده این روش می‌توان به وجود لبه‌های مختلفی با چگالی‌های متفاوت و قابل تمایز با روش‌های سنجش مختلف در جبهه شعله اشاره کرد. بدون شک بهترین سطح موردی است که دما شروع به انحراف از دمای مخلوط نسوخته کرده است. متأسفانه این موقعیت به آسانی

در این بخش پیکربندی اندازه‌گیری مشخصات شعله ساکن با استفاده از مشعل بونزن مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پیکربندی می‌تواند به صورت باز و یا محصور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از این پیکربندی می‌توان برای ایجاد شعله آرام و یا آشفته استفاده کرد. شعله ساکن با استفاده از یک مشعل شیباری و یا متقارن محوری که در آن سرعت مخلوط سوخت و هوای ورودی کاملاً ثابت است قابل تولید می‌باشد. یک نمونه از مجموعه اندازه‌گیری سرعت آرام شعله با روش شعله ساکن شیلرن در شکل ۲ نشان داده شده است. ساده‌ترین راه اندازه‌گیری سرعت شعله استفاده از یک مشعل متقارن محوری است که در آن شکل جبهه شعله به صورت یک مخروط ساده در خواهد آمد. در این حالت با استفاده از زاویه مخروط یا مساحت شعله و همچنین با اطلاع از سرعت گازهای ورودی به محفظه احتراق، می‌توان سرعت شعله را با استفاده از قانون پیوستگی، نسبت چگالی گازهای نسوخت به سوخته و روابط هندسی محاسبه کرد. هرچند این روش ساده به نظر می‌آید، اما این روش مشکلاتی نیز دارد که توسط رالیز و گارفورث [۳۵] بیان گردیده‌اند. مهم‌ترین مشکل تعیین مکان دقیق لبه شعله است. هرچند که روش‌های زیادی برای این کار وجود دارد، نتایج آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. نکته بسیار مهم دیگری که وجود دارد این است که سرعت سوختن در سراسر سطح مخروطی شکل جبهه شعله یکنواخت نیست که این خود به دلایلی چون غیریکنواخت بودن سطح شعله، انحنای آن و خاموش شدگی شعله در لبه مشعل به علت غیر آدیباتیک بودن شعله است.



شکل (۲): نمای شماتیک چیدمان شناسایی مشخصات شعله ساکن با روش شیلرن

کشیدگی شعله وجود دارد. بر اساس آنالیز مجانبی [۳۶] اصلاح کشش سرعت سوختن در نواحی با کشش کم با استفاده از رابطه (۳) قابل بیان است. در این رابطه S_L سرعت آرام سوختن کشیده شده، S_L^0 سرعت آرام سوختن غیر کشیده (سرعت شعله آرام)، L طول مارکشتین و K نرخ کشیدگی شعله، $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ است. اندازه طول مارکشتین با ضخامت شعله هم‌مرتبه است [۳۷].

$$S_L = S_L^0 - LK \quad (3)$$

با در نظر گرفتن پیشروی کروی شعله نرخ تغییر شعاع این کره بر اساس رابطه (۴) قابل محاسبه است. در این رابطه σ نسبت انبساط گاز و C ثابت انتگرال می‌باشد.

$$\sigma S_L^2 t = R_f + 2\sigma L (\ln(R_f)) + C \quad (4)$$

با محاسبه معادله منطبق بر مقادیر آنی اندازه‌گیری شده شعاع شعله با روش حداقل مربعات خطا و برون‌یابی از این معادله تا حالت کشیدگی شعله صفر، می‌توان سرعت شعله آرام غیر کشیده شده را به دست آورد [۳۵].

در این روش بیشینه افزایش فشار در محفظه احتراق در حین داده‌برداری باید کمتر از ۲ درصد باشد که این امر در حالتی که پیشروی شعله کمتر از ۳۰ درصد حجم محفظه احتراق را دربر گرفته است اتفاق می‌افتد. در هنگام داده‌برداری، اطلاعات مربوط به چند فریم اول نیز که ممکن است تحت تأثیر انرژی حاصل از جرقه قرار گرفته است باید حذف گردد. نحوه محاسبه شعاع شعله به صورت تابعی از زمان و استخراج سرعت شعله فضایی غیر کشیده آرام $\frac{dR_f}{dt}$ از تحلیل عکس‌های شلرین توسط ماول و همکارانش [۳۸] به صورت کامل تبیین گردیده است.

در محفظه احتراق حجم ثابت یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین مشخصه‌های احتراقی ثبت داده‌های فشار حین پیشروی شعله می‌باشد. در این روش توسط سنسورهای فشار با فرکانس داده‌برداری بالا مقادیر فشار درون محفظه در هر لحظه ثبت می‌شود. نمونه‌ای از نمودار فشار درون محفظه در شرایط احتراقی در شکل ۴(a) آورده شده است. بر اساس این نمودار، نمایشگر نرخ آزادسازی حرارت بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شود. در نهایت نرخ آزادسازی حرارت تجمعی بی‌بُعد شده طبق رابطه (۶) به دست می‌آید.

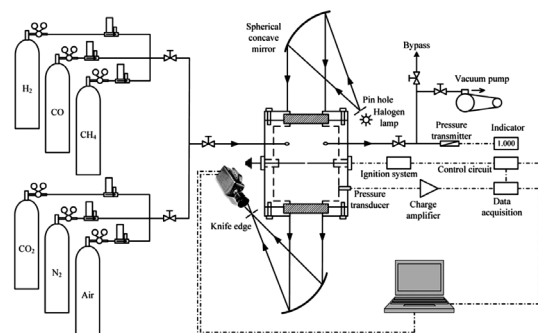
$$RHRR = \frac{dP_{chamber}}{dt} \quad (5)$$

$$NCHR = \frac{\int_{t_0}^t RHRR dt}{\int_{t_0}^{t_{end}} RHRR dt} \quad (6)$$

قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و روش‌های پیشنهاد شده برای این امر منتج به نتایج متفاوت می‌گردد.

۲-۲- محفظه احتراق حجم بسته

در این بخش پیکربندی اندازه‌گیری مشخصات شعله پیش‌رونده با استفاده از محفظه حجم بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش مخلوط پیش‌آمیخته سوخت و هوا در یک محفظه احتراق حجم ثابت با استفاده از الکترودها محترق شده و از پیشروی شعله با روش شیلرن عکس‌برداری شده و داده‌هایی فشاری ثبت می‌گردد. توسط این‌گونه از مشعل می‌توان مشخصات شعله حاصل از سوخت و اکسیدکننده مشخص را برای شرایط کاری مختلف مانند نسبت توازن، فشار و دما به دست آورد. یک نمونه از مجموعه تست با استفاده از این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. نحوه تست در این چیدمان به این صورت است که ابتدا محفظه توسط پمپ مکش خلأ می‌گردد. سپس با فرض وجود مخلوط گاز ایده‌آل، بر اساس مقدار فشار جزئی، ترکیب گازی پیش‌آمیخته موردنظر در محفظه برای نسبت توازن و فشار اولیه موردنظر ایجاد می‌شود. پس از ورود تمامی گازها به محفظه مدت‌زمان مشخصی برای یکنواخت شدن مخلوط گازها اختصاص داده می‌شود و سپس توسط جرقه الکتریکی این مخلوط اشتعال‌پذیر محترق می‌گردد. در نتیجه این عمل شعله تشکیل می‌شود و به صورت کروی و تا حد زیادی متقارن شروع به پیشروی درون محفظه می‌کند. برای اندازه‌گیری فشار در حین اجرای تست نیز از یک فشارسنج با قابلیت داده‌برداری بالا استفاده می‌شود.



شکل (۳): نمای شماتیک چیدمان اندازه‌گیری مشخصات شعله

پیش‌رونده با استفاده از روش شیلرن

برای محاسبه سرعت آرام سوختن از نتایج پیشروی کروی شعله، نیاز به اصلاحات به‌منظور جبران تأثیر اثر

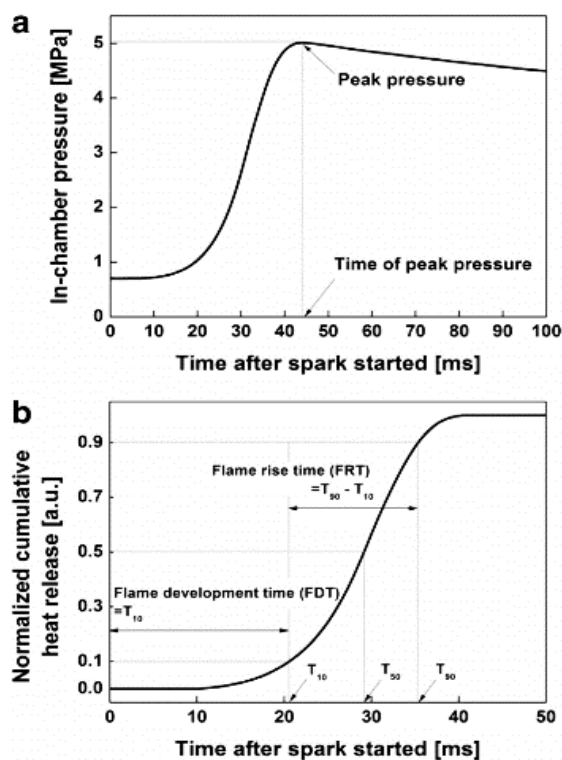
۳- بیان شرایط تست‌ها و ارائه نتایج

در این قسمت مشخصات سیستم‌های استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها بیان شده است و در ادامه نتایج مربوط به هر تست آورده شده است. به این ترتیب ابتدا برای شعله ساکن و سپس برای شعله متحرک فرایند فوق‌الذکر به طور مجزا طی خواهد شد. شایان ذکر است تمامی تجهیزات بر روی میز اپتیکی با ابعاد $3 \times 1/5$ متر نصب شده‌اند. میز اپتیک بر روی چهارپایه پنوماتیکی قرار گرفته است. این پایه‌ها به هوای فشرده با فشار ۴ بار وصل شده‌اند. در واقع توسط این بالشتک‌های هوایی، میز اپتیک از ارتعاشات زمین ایزوله می‌گردد و افقی بودن میز نیز تأمین می‌گردد. جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های آزمایش زمانی به طور دقیق میسر می‌شود که تنظیمات اپتیکی و ابزار دقیق اندازه‌گیری کمیت‌های هدف به خوبی صورت گرفته باشد.

۳-۱- مشعل بونزن

شعله ساکن عبارت از شعله پایدار به همراه نوسانات محدود قرار گرفته در یک مکان مشخص می‌باشد. در مورد شعله ساکن از مشعل با مقطع دایروی برای مطالعات حاضر استفاده شده است. به این ترتیب دو کلاس شعله باز و شعله محصور مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد مشعل باز محل تشکیل شعله خارج از لوله انتقال مخلوط قابل‌اشتعال قرار می‌گیرد؛ ولی در مورد حالت محصور شعله داخل لوله حاوی مخلوط قابل‌اشتعال قرار می‌گیرد. در واقع تفاوت اساسی این دو حالت اثرگذاری دیواره بر مشخصات شعله تشکیل شده می‌باشد. در این تحقیق برای شعله ساکن در مرحله اول، با استفاده از یک مشعل بونزن با مقطع دایروی شعله حاصل از احتراق سوخت گازی (متان و نرمال بوتان) و هوا که در محفظه اختلاط با هم پیش مخلوط شده‌اند تشکیل می‌شود و مشخصات اپتیک آن در اعداد رینولدز و نسبت‌های هم‌ارزی متفاوت به دست می‌آید. در مرحله دوم با اعمال محیط پلازما بر مسیر ورودی مخلوط به برنر مشخصات شعله از طریق فرایندهای پیش‌گرمایش و تولید گونه‌های فعال تحت تأثیر قرار می‌گیرد که میزان اثرگذاری این عامل با تغییر میزان دبی جریان عبوری و ولتاژ اعمالی تغییر خواهد کرد. در گام بعدی و پایانی سرعت سوزش آرام برای گاز با استفاده از روش شلرین بررسی می‌شود. سوخت گازی و هوا پس از عبور از روتامتر وارد محفظه

از این نتایج برای مقایسه فرایند احتراق بین شرایط کاری مختلف استفاده می‌شود. زمان توسعه شعله (FDT) به عنوان دوره زمانی فرمان آغاز اشتعال تا رسیدن به ۱۰٪ مقدار کل NCHR تعریف می‌شود. زمان برخواست شعله (FRT) به عنوان دوره زمانی رسیدن از ۱۰٪ به ۹۰٪ مقدار کل NCHR تعریف می‌شود. شماتیک نمودار NCHR در شکل (b) ارائه شده است. T_{10} ، T_{50} و T_{90} در این شکل به ترتیب زمان رسیدن به ۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ مقدار کل NCHR هستند. از تصاویر تطابق مراحل شکل‌گیری شعله و نمودار فشار احتراق بر حسب زمان می‌توان دریافت با پیشروی فرایند احتراق تا رسیدن به فشار بیشینه درون محفظه شدت نور تصاویر شعله افزایش پیدا می‌کند و پس از آن به دلیل تمام شدن مخلوط قابل‌اشتعال این شعله به تدریج مضمحل خواهد شد. قابل توجه این نکته است که پس از اتمام فرایند احتراق بسته به میزان انتقال حرارت به جداره محفظه و دمای محیط منحنی فشار به تدریج روند کاهشی را در پیش خواهد گرفت. به این ترتیب کاهش فشار بر اساس رابطه گازهای کامل و باتوجه به فرایند انتقال حرارت که بیشتر معطوف به نوع تشعشعی می‌باشد و کاهش دمای متناسب با آن قابل تحلیل است.



شکل (۴): دیاگرام شماتیک (a) فشار درون محفظه و (b) نرخ آزاد شدن حرارت تجمعی بی‌بعد شده [۱۶]

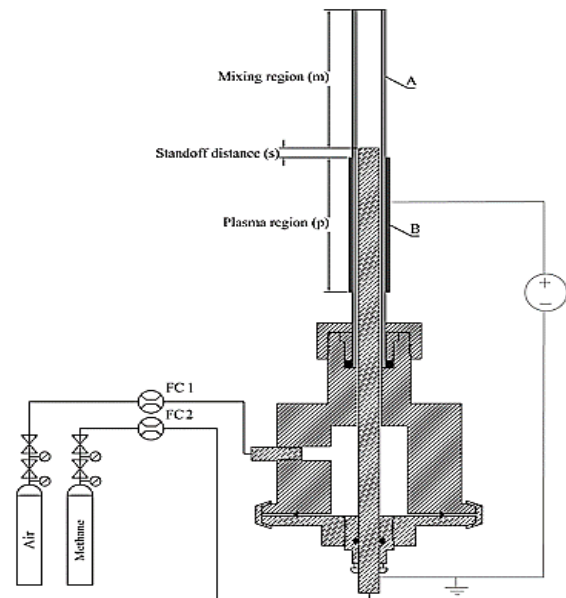
از جنس کوارتز است و حکم ماده دی الکتریک را دارد. در این هندسه از یک عملگر پلاسمای DBD استفاده شده است. در قسمت بیرونی محفظه احتراق الکتروود استوانه‌ای قرار گرفته است که از جنس مس می‌باشد و پهنای آن ۴۰mm و فاصله انتهای این باند با انتهای الکتروود داخلی ۲mm است. الکتروود داخلی در مرکز محفظه احتراق قرار دارد و از یک میله فولادی با قطرهای ۴mm، ۶mm و ۸mm ساخته شده است. این مشعل به‌عنوان ابزار ایجاد شعله پیش‌آمیخته استفاده شده است و دو گونه شعله باز و محصور تحت تأثیر پلاسمای الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این ترتیب طیفی از شرایط کاری باتوجه به تغییر مقدار عدد رینولدز و نسبت توازن مورد توجه قرار گرفته است.

در مطالعه شعله ساکن از دوربین سونی مدل NEX-FS700UK AVCHD MTS با قابلیت تصویربرداری ۱۰۰۰ fps، پنل دیجیتالی مدل Autonics MT4W-DA-4N، منبع تغذیه ولتاژ بالا مدل Afra Sanat، لیزر آرگون مدل Ion Laser Tech 5500A-00، اسیلوسکوپ، ترموکوپل PT100، میز اپتیک و ادوات اپتیکی مدل Melles Griot، کمپرسور هوا و سیلندرهای گاز متان و بوتان استفاده شده است.

۱-۱-۳- شعله پیش آمیخته باز

در تحقیق حاضر شعله پیش‌آمیخته باز به‌عنوان شعله‌ای معرفی شده است که خارج از تیوب برنر تشکیل شده است و ساختار مخروطی دارد. به‌منظور بررسی تأثیر پلاسما بر ساختار شعله از پیکربندی سد دی الکتریک استفاده شده است. به این ترتیب برای کنترل مشخصات پلاسما از یک منبع ولتاژ بالا با فرکانس ثابت ۱۰kHz و توان مصرفی قابل تغییر جهت اعمال مقادیر مختلف ولتاژ استفاده شده است. شایان ذکر است در محدوده ولتاژ اعمال شده پلاسمای تشکیل شده از نوع تخلیه استریم است که با پالس‌های جریان بسیار زیاد که با عنوان میکرو تخلیه شناخته شده و در زمان و مکان به طور تصادفی توزیع می‌گردند، مشخص می‌شوند. شدت ساختار پلاسمای استریم با افزایش توان پلاسما افزایش پیدا می‌کند و چگالی و شدت نور میکرو تخلیه‌ها در این حالت افزایش می‌یابند. تحلیل نتایج این بخش بر اساس ساختار شعله و میزان کشیدگی شعله در هر مورد آورده شده است. در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر حرارتی پلاسما به‌صورت مجزا، از تصویربرداری شعله در

مخلوط‌کننده می‌شوند. رواتر برای هر گاز طوری کالیبره می‌گردد که محل قرارگیری آن در مقابل هر درجه بیانگر دبی حجمی لحظه‌ای سیال مورد نظر باشد. همچنین برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل نوع K استفاده می‌شود. پس از آنکه مخلوط سوخت و هوا به طور کامل با هم ترکیب شدند، جریان حاصل از آن‌ها وارد مشعل بونزن می‌گردد، به‌منظور یکنواختی و پخش شدن جریان در عبور از یک مقطع کوچک به یک مقطع بزرگ و حذف گردابه‌های احتمالی از ساچمه‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر از جنس استیل استفاده شده است. در تحقیق حاضر برای شعله ساکن، ایجاد پلاسما از طریق اعمال اختلاف پتانسیل و فرکانس بالا بین دو الکتروود با حذف دی الکتریک در مسیر عبور جریان صورت می‌گیرد. دو الکتروود مورد اشاره یکی به‌صورت میله فلزی داخل مسیر عبور جریان و دیگری به‌صورت نوار مسی پیچیده شده در اطراف لوله کوارتز به‌عنوان دی الکتریک ساخته می‌شود. به این ترتیب در مسیر عبور جریان محیط پلاسما تشکیل می‌شود و بر خواص ترموفیزیکی سیال اثر می‌گذارد. نمای شماتیک مشعل استفاده شده در این تحقیق برای مطالعه مشخصات شعله ساکن در شکل ۵ آورده شده است.



شکل (۵): شماتیک مشعل بونزن استفاده شده در آزمایش

مشخصات هندسی این مشعل به این صورت است که طول اختلاط محفظه احتراق ۱۰۰mm بوده و قطر خارجی آن ۱۲mm و قطر داخلی آن ۱۰mm است. محفظه احتراق

همچنین این شعله از زاویه مخروط کمتری برخوردار است که بر اساس روش توضیح داده شده برای بررسی سرعت شعله، به معنای سرعت شعله بیشتر در نسبت توازن $1/2$ نسبت به $1/4$ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد سرعت آرام شعله با افزایش نسبت توازن از $1/2$ به $1/4$ به میزان ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. این مشاهده در تطابق با نتایج عددی و مشاهدات تجربی پیشین می‌باشد که بیانگر صحت اندازه‌گیری انجام گرفته می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی تأثیرات پلاسما بر مشخصات شعله پیش آمیخته باز از پیکربندی تشریح شده استفاده شده است. برای این منظور با تغییر توان پلاسمای اعمالی طیف متنوعی از کیفیت پلاسمای استریمر برای پیش فعال‌سازی مخلوط پیش آمیخته استفاده شده است. به منظور تفکیک تأثیر حرارتی و کینتیک پلاسما، اندازه‌گیری دما در توان‌های مختلف صورت گرفته است و هر بار تست در دو شرایط فعال بودن پلاسما و شرایط دمایی مشابه انجام گرفته است. در شکل ۶ منحنی تغییرات دما در خروجی مشعل بر حسب توان پلاسما برای الکترودهای با قطر 4mm و 8mm آورده شده است. همان‌طور که مشخص است الکتروده با قطر بیشتر سبب وجود گپ کوچکتر در ساختار DBD و تشکیل پلاسمای متراکم‌تر با توان کمتر می‌شود. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است اعمال پلاسما سبب افزایش زاویه مخروط شعله و کاهش ارتفاع آن می‌شود به این ترتیب سبب افزایش سرعت آرام شعله خواهد شد. همچنین مشاهده نتایج در افزایش دمای معادل شرایط پلاسمای فعال نشان می‌دهد که افزایش دما سبب افزایش سرعت شعله می‌شود که این امر در تطابق با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد. نکته دارای اهمیت تأثیرگذاری بیشتر فعال‌سازی پلاسما نسبت به افزایش دما به میزان معادل آن می‌باشد. دلیل این امر وجود وجوه اثرگذاری دیگر پلاسما علاوه بر افزایش دما می‌باشد. از این جوانب می‌توان به اثرات آیرودینامیک و تغییر در پروفیل سرعت به واسطه وجود نیروهای هیدرودینامیکی لورنز اشاره کرد. همچنین میدان الکتریکی پلاسما سبب افزایش مسیرهای اکسیداسیون سوخت شده و باعث کاهش زمان شکسته شدن سوخت می‌شود. به این ترتیب پلاسمای فعال نسبت به افزایش دمای خالص علاوه بر افزایش دما سبب تغییرات کینتیک و هیدرودینامیکی در شعله می‌شود که مجموعاً به افزایش بیشتر سرعت شعله می‌انجامد. همچنین از این جدول مشخص است که افزایش توان پلاسما به دلیل افزایش ولتاژ پلاسما سبب تشدید اثرات پیش گفته می‌شود و نتیجتاً سرعت آرام شعله بیشتر افزایش خواهد یافت. از این جدول

دمای جریان مشابه با افزایش دمای حاصل از فعال شدن پلاسما در توان کاری مشخص استفاده شده است. این شرایط توسط حرف T در تصاویر ارائه شده مشخص شده است. این در حالی است که نتایج مربوط به پلاسما فعال در هر توان با حرف P در تصاویر مشخص شده است. در ادامه اهم نتایج تست شعله پیش آمیخته باز ارائه شده است.

در جدول ۱ شعله پیش‌آمیخته باز متان برای رینولدز 400 ، قطر الکتروده داخلی 4mm و نسبت توازن‌های $1/2$ و $1/4$ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است.

جدول (۱): شعله پیش‌آمیخته باز متان برای الکتروده با قطر 4mm رینولدز 400 و نسبت توازن‌های $1/2$ و $1/4$

Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
0		
55P		
55T		
80P		
80T		

همان‌طور که مشخص است برای عدد رینولدز یکسان ارتفاع شعله برای نسبت توازن $1/4$ بیشتر از $1/2$ می‌باشد و

شایان توجه دیگر در این شکل اثرگذاری بیشتر پلاسما با توان کمتر نسبت به افزایش دمای متناظر با توان پلاسمای بیشتر است که نشان از تفوق اثرات کینتیک و هیدرودینامیک بر اثرات صرف حرارتی دارد. تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۳ در آورده شده است.

جدول (۳): شعله پیش آمیخته باز متان برای الکتروود با قطر ۴mm، رینولدز ۶۰۰ و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴

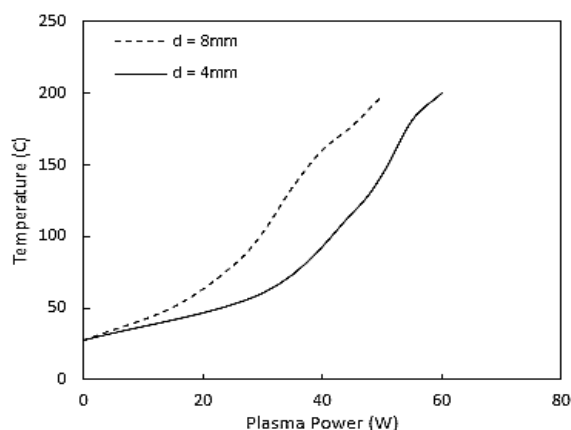
Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
0		
55P		
55T		
80P		
80T		

جدول (۴): تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۳ بر اساس درصد

افزایش سرعت آرام شعله نسبت به حالت توان پلاسمای صفر

Power (W)	$\phi = 1.2$	$\phi = 1.4$
55 P	25.6	28.2
55 T	14.4	19.6
80 P	31.0	34.3
80 T	22.3	26.7

و با تحلیل نتایج می توان دریافت که اثرگذاری پلاسما بر نسبت توازن ۱/۴ بیشتر از ۱/۲ می باشد. دلیل این امر واکنش پذیری کمتر مخلوط با نسبت توازن ۱/۴ نسبت به ۱/۲ می باشد به این ترتیب فعال سازی پلاسما در این شرایط سبب اثرگذاری بیشتری بر مشخصات شعله خواهد شد. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که با فاصله گرفتن از محدوده نزدیک به شرایط استوکیومتری به سمت مخلوط های رقیق و غلیظ به دلیل دور شدن از شرایط ایده آل احتراق و سخت شدن فرایند احتراق اثرگذاری مکانیز بهبود احتراق پلاسما بیشتر خواهد شد. از نکات مهم دیگر در این جدول کاهش نرخ اثرگذاری پلاسما با افزایش توان آن می باشد. تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۱ در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۶): منحنی تغییرات دما بر حسب توان پلاسما در خروجی مشعل برای هوا با رینولدز ۲۰۰ و قطر الکتروودهای ۴mm و ۸mm

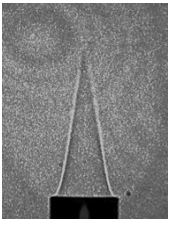
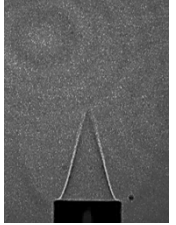
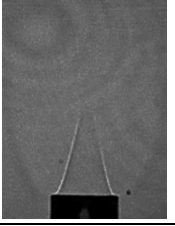
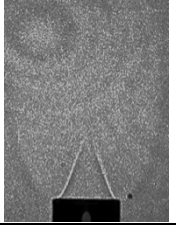
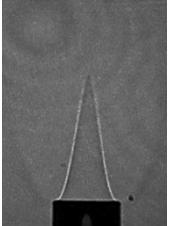
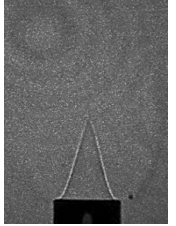
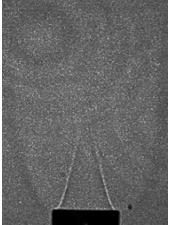
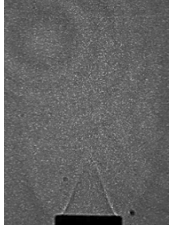
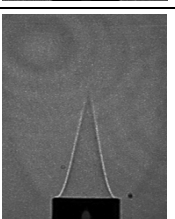
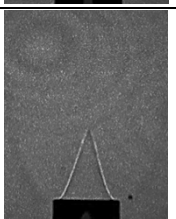
جدول (۲): تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۱ بر اساس درصد افزایش سرعت آرام شعله نسبت به حالت توان پلاسمای صفر

Power (W)	$\phi = 1.2$	$\phi = 1.4$
55 P	27.2	30.5
55 T	20.4	23.2
80 P	35.1	38.9
80 T	29.6	33.4

در جدول ۳ شعله پیش آمیخته باز متان برای رینولدز ۶۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش عدد رینولدز برای نسبت توازن ثابت، میزان زاویه مخروط کاهش یافته و ارتفاع شعله افزایش می یابد. البته این امر به معنای کاهش سرعت شعله نیست زیرا با افزایش سرعت جریان طبق روابط توضیح داده شده سرعت شعله با افزایش رینولدز جریان ثابت می ماند. نکته حائز اهمیت کاهش تأثیر پلاسما با توان ثابت بر سرعت شعله با افزایش عدد رینولدز می باشد. دلیل این امر کاهش زمان ماند برای تحت تأثیر پلاسما قرار گرفتن جریان مخلوط با افزایش عدد رینولدز می باشد. از نکات

نسبت به سوخت متان می‌باشد. تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۵ در جدول ۶ آورده شده است.

جدول (۵): شعله پیش‌آمیخته باز بوتان برای الکتروود با قطر ۴mm، رینولدز ۶۰۰ و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴

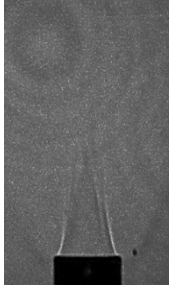

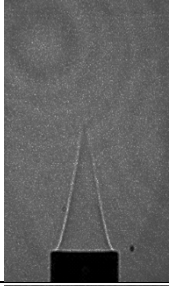
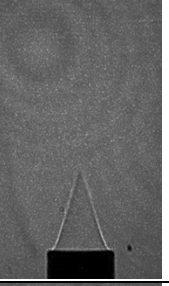
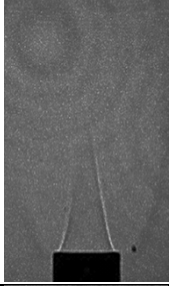
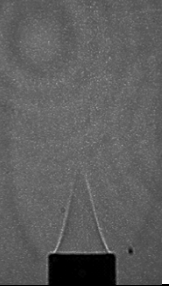
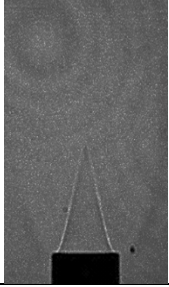
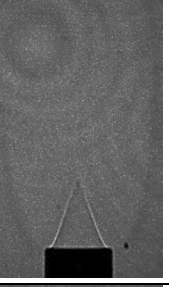
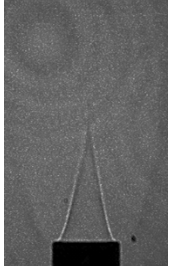
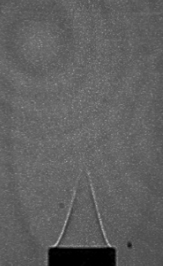
Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
0		
55P		
55T		
80P		
80T		

جدول (۶): تحلیل کمی نتایج مربوط به جدول ۵ بر اساس درصد افزایش سرعت آرام شعله نسبت به حالت توان پلاسمای صفر

Power (W)	$\phi = 1.2$	$\phi = 1.4$
60 P	28.4	31.4
60 T	18.3	19.7
80 P	35.1	37.2
80 T	24.6	26.6

در جدول ۵ شعله پیش‌آمیخته باز بوتان برای رینولدز ۶۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسمای آورده شده است. همان‌طور که مشخص است برای عدد رینولدز یکسان ارتفاع شعله برای نسبت توازن ۱/۴ بیشتر از ۱/۲ می‌باشد و همچنین این شعله از زاویه مخروطی کمتری برخوردار است که به معنای سرعت شعله بیشتر در نسبت توازن ۱/۲ نسبت به ۱/۴ می‌باشد. این مشاهده در تطابق با نتایج عددی و مشاهدات تجربی پیشین می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است اعمال پلاسمای سبب افزایش زاویه مخروطی شعله و کاهش ارتفاع آن می‌شود به این ترتیب سبب افزایش سرعت آرام شعله خواهد شد. همچنین مشاهده نتایج در افزایش دمای معادل شرایط پلاسمای فعال نشان می‌دهد که افزایش دما سبب افزایش سرعت شعله می‌شود که این امر در تطابق با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد. نکته دارای اهمیت تأثیرگذاری بیشتر فعال‌سازی پلاسمای نسبت به افزایش دما به میزان معادل آن می‌باشد. همچنین از این شکل مشخص است که افزایش توان پلاسمای به دلیل افزایش ولتاژ پلاسمای سبب تشدید اثرات پیش گفته می‌شود و نتیجتاً سرعت آرام شعله بیشتر افزایش خواهد یافت. از این شکل و با تحلیل نتایج می‌توان دریافت که اثرگذاری پلاسمای بر نسبت توازن ۱/۴ بیشتر از ۱/۲ می‌باشد. در مقایسه با جدول ۳ نکته شایان توجه اثرگذاری بیشتر پلاسمای فعال نسبت به افزایش دما در مواجهه با جریان پیش‌آمیخته سوخت بوتان می‌باشد. دلیل این امر بزرگتر بودن مولکول سوخت بوتان و مکانیزم پیچیده‌تر اکسیداسیون بوتان نسبت به متان می‌باشد. به این ترتیب فعال‌سازی جریان توسط پلاسمای و ایجاد اجزای فعال می‌تواند منجر به ایجاد مسیرهای جدید بیشتری برای تغییر مکانیزم پایه اکسایش بوتان شود و اثرگذاری بیشتری بر سرعت شعله آرام خواهد داشت. از نکات شایان توجه دیگر در این شکل اثرگذاری بیشتر پلاسمای با توان کمتر نسبت به افزایش دمای متناظر با توان پلاسمای بیشتر است که نشان از تفوق اثرات کینتیک و هیدرودینامیک بر اثرات صرف حرارتی دارد. اثر مذکور برای نسبت توازن‌های بالا مشهودتر است. همچنین این اثر برای مخلوط متان نیز مشاهده شده است ولی برای سوخت بوتان با شدت بیشتری نمایان شده است که این مسئله گواه دیگری بر اثرگذاری بیشتر کینتیکی پلاسمای بر سوخت بوتان

جدول (۷): شعله پیش آمیخته باز بوتان برای الکتروود با قطر ۶mm رینولدز ۶۰۰ و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴

Power(W)	$\phi = 1.4$	$\phi = 1.2$
0		
55P		
55T		
80P		
80T		

استخراج می شود. به منظور بررسی تأثیر پلاسما بر ساختار شعله از پیکربندی سد دی الکتریک استفاده شده است. به این ترتیب برای کنترل مشخصات پلاسما از یک منبع ولتاژ



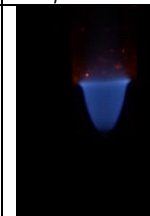
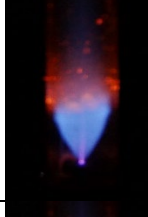

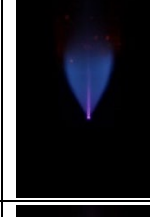



در جدول ۷ شعله پیش آمیخته باز بوتان برای رینولدز ۶۰۰، قطر الکتروود داخلی ۶mm و نسبت توازن های ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است.

همان طور که در این شکل مشخص است شعله مخلوط بوتان در شرایط عدم وجود پلاسما ناپایدار می باشد و اصطلاحاً شعله تشکیل شده پرش دارد و زبانه می کشد. دلیل این امر کاهش سطح مقطع عبور جریان در پایین دست مشعل و ایجاد جریان غیریکنواخت در خروجی مشعل و تشکیل جت در مناطقی از خروجی می باشد. همان طور که در شکل مشخص است فعال سازی پلاسما منجر به پایدار شدن شعله می شود. دلیل این امر ترکیبی از اثرات حرارتی و کینتیک و هیدرودینامیکی می باشد به این ترتیب که در اثر وجود نیروهای هیدرودینامیکی از سوی پلاسما تأثیر عدم یکنواختی شکل گرفته در مقطع خروجی کاهش می یابد و پایداری شعله بالاتر می رود. از نکات دارای اهمیت در این شکل مواجهه با شعله ناپایدار در حالت دمای مخلوط افزایش یافته خصوصاً برای نسب توازن ۱/۴ می باشد. این پدیده با فعال سازی پلاسما به کلی مضمحل می شود که مجدداً گواهی بر اهمیت اثرات غیرحرارتی پلاسما بر شعله می باشد. مقایسه بین نتایج مربوط به الکتروود داخلی به قطر ۴mm و ۶mm به دلیل به وجود آمدن ناپایداری و تغییر اساسی جریان نمی تواند منجر به نتایج واضحی شود به همین دلیل مورد توجه قرار نگرفته است. به دلیل عدم پایداری شعله در جدول ۷ نتایج کمی برای این شکل ارائه نشده است.



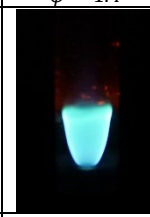


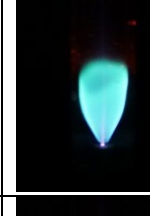



۲-۱-۳- شعله پیش آمیخته محصور

در تحقیق حاضر شعله پیش آمیخته محصور به عنوان شعله ای معرفی شده است که داخل تیوب مشعل تشکیل شده است و محصور به دیواره های تیوب می باشد و از آن متأثر می شود. مطالعه خواص این گونه از شعله ها توسط تصویربرداری مستقیم از شعله صورت می گیرد و با بررسی ساختار شعله، مشخصات آن در شرایط کاری مختلف

جدول (۸): مشعل پیش‌آمیخته محصور متان برای رینولدز ۴۰۰ و نسبت توازن‌های ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۰

P(W)	$\varphi = 0.8$	$\varphi = 0.9$	$\varphi = 1.0$
0			
40			
60			

جدول (۹): مشعل پیش‌آمیخته محصور بوتان برای رینولدز ۵۰۰ و نسبت توازن‌های ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴

P(W)	$\varphi = 1.0$	$\varphi = 1.2$	$\varphi = 1.4$
0			
40			
60			

در جدول ۹ شعله پیش‌آمیخته محصور بوتان برای رینولدز ۵۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۱/۰، ۱/۲ و ۱/۴ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. توضیحات ارائه شده برای جدول ۸ در مورد این

بالا با فرکانس ثابت ۱۰kHz و توان مصرفی قابل تغییر جهت اعمال مقادیر مختلف ولتاژ استفاده شده است. شایان ذکر است در محدوده ولتاژ اعمال شده پلاسما تشکیل شده از نوع تخلیه استریم است که با پالس‌های جریان بسیار زیاد که با عنوان میکرو تخلیه شناخته شده و در زمان و مکان به طور تصادفی توزیع می‌گردند، مشخص می‌شوند. شدت ساختار پلاسما استریم با افزایش توان پلاسما افزایش پیدا می‌کند و چگالی و شدت نور میکرو تخلیه‌ها در این حالت افزایش می‌یابند. تحلیل نتایج این بخش بر اساس ساختار شعله در هر مورد آورده شده است.

در جدول ۸ شعله پیش‌آمیخته محصور متان برای رینولدز ۴۰۰، قطر الکتروود داخلی ۴mm و نسبت توازن‌های ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۰ و برای مقادیر مختلف توان پلاسما آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است شعله بدون وجود پلاسما کاملاً جدا از الکتروود داخلی می‌باشد. در فرایند تست، تشکیل و حفظ این شعله به سختی مقدور بود و معمولاً به سرعت از تیوب خارج و یا خاموش می‌شد. به این ترتیب با شعله کاملاً ناپایدار مواجه هستیم. با اعمال پلاسما همان‌طور که مشخص است قسمت پایین شعله به واسطه میدان الکتریکی تشکیل شده کاملاً به الکتروود داخلی می‌چسبد و به این ترتیب پایداری شعله افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش توان پلاسما اعمال شده ساختار شعله متراکم‌تر شده و بیشتر به الکتروود داخلی نزدیک می‌شود و نقاط اتصال نیز افزایش می‌یابد. به این ترتیب پهنای شعله در قسمت پایین افزایش می‌یابد و ارتفاع شعله کم شده و شدت نور آن افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر وجود اثرات هیدرودینامیک پلاسما و اثرگذاری بر میدان جریان اطراف الکتروود است که سبب تشکیل ورتکس در نزدیکی الکتروود می‌شود و منجر به ساختار پایدار شعله می‌گردد. اثرات مذکور برای مخلوط رقیق بیشتر قابل مشاهده است و حرکت از شعله ناپایدار به پایداری شعله در این حالات ملموس‌تر است.

محفظه صورت می گیرد. به این ترتیب که با اعمال پلاسما بر جریان ورودی مانند اکسیژن و واکنش های شیمیایی موردنیاز برای تولید اجزاء فعال مانند اوزون انجام می گیرند و بر اساس دبی عبوری، زمان ماند سیال در رآکتور پلاسما، میزان اختلاف پتانسیل و فرکانس اعمال ولتاژ و همچنین زمان موردنظر برای اختلاط پیش از آغاز فرایند احتراق مقادیر متنوعی از گونه های فعال در سیال ایجاد می شود. شایان ذکر است که با توجه به مدت زمان موردنیاز برای اختلاط مؤثر اجزاء، غالب گونه های فعال که ناپایداری بالایی دارند در واکنش های برگشت در مجاورت با سایر گونه های موجود و همچنین دیوار به اجزا سازنده اولیه تبدیل خواهند شد. به این ترتیب تنها گونه های دارای نیمه عمر بالا در محفظه باقی خواهند ماند. در میان گونه های پلاسمایی، مورد غالبی که شرایط ماندگاری در این حالت را دارد گونه اوزون می باشد. به این ترتیب تست حاضر تبدیل به بررسی تأثیر اوزون بر ساختار شعله متحرک می گردد. عملکرد رآکتور پلاسما به این ترتیب می باشد که یک لوله کوارتز به عنوان مجرای عبور جریان و همچنین به عنوان دی الکتریک در نظر گرفته می شود و اطراف آن ورقه مسی به عنوان یک قطب ولتاژ پیچیده شده است. همچنین از یک میله فلزی در میان لوله کوارتز به عنوان قطب دیگر ولتاژ استفاده شده است. به این ترتیب با اعمال ولتاژ AC با دامنه زیاد می توان پلاسمای نسبتاً یکنواخت در مجرای عبور جریان ایجاد کرد.

در این تحقیق جهت بررسی تأثیر پیش فعال سازی جریان ورودی به محفظه احتراق از یک وسیله سد دی الکتریک DBD استفاده شده است. مشخصات این وسیله عبارت از یک لوله کوارتز به طول ۲۰۰ mm و قطر داخلی ۲۰ mm و قطر خارجی ۲۳ mm که به عنوان دی الکتریک استفاده می شود. در این وسیله از یک لوله فولادی با طول ۲۰۰ mm و قطر ۱۷ mm که توسط دو فلنج پلی اتیلن هم مرکز با لوله کوارتز قرار می گیرد، به عنوان یک الکترود و از نوار مسی به ضخامت ۰/۲ mm که در اطراف لوله کوارتز پیچیده شده است به عنوان الکترود دوم استفاده شده است. در این وسیله از یک ترانس تقویت ولتاژ به عنوان منبع تغذیه استفاده شده است. مشخصات ترانس عبارت از فرکانس ۶۰ Hz، ولتاژ متناوب ۱۵ kV و توان مصرفی ۱۳۰ W می باشد. به منظور کنترل بیشتر بر فرایند تولید اوزون و افزایش راندمان کاری

شکل نیز صادق است. با این تفاوت که در این قسمت به دلیل بالابودن رینولدز جریان شعله کشیده تر است که مجدداً در این حالت افزایش شدت شعله در قسمت پایین و کاهش طول آن با فعال شدن پلاسما قابل مشاهده است. در این حالت به دلیل تشکیل مخلوط غلیظ رنگ شعله به سبب افزایش درصد مونو اکسید کربن نسبت به حالت رقیق و استوکیومتری مت تر می شود که در مراجع پیشین نیز به آن اشاره شده است

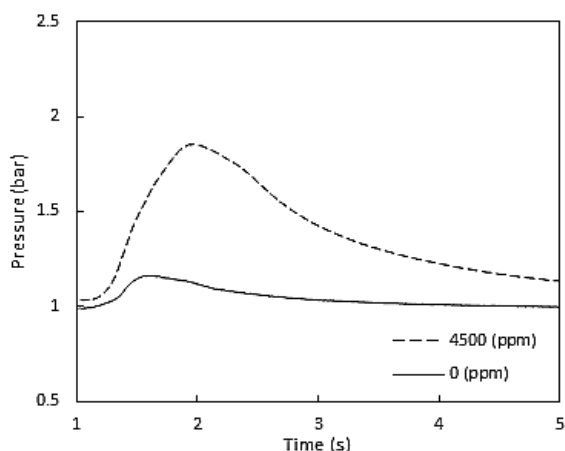
۲-۳- محفظه احتراق حجم ثابت

مشخصات هندسی محفظه احتراق حجم بسته به شرح زیر می باشند. یک محفظه احتراق استوانه ای از جنس استیل ضد زنگ با قطر داخلی ۲۷۰ mm، قطر خارجی ۳۰۰ mm و طول ۲۵۰ mm استفاده شده است. این محفظه دارای دو سوراخ رزوه شده جهت تعبیه الکترودهای سیستم جرقه زنی در وسط سیلندر می باشد. این الکترودها که از جنس تنگستن و به قطر ۱/۵ mm ساخته شده اند به صورت شمع خودرو بسط یافته می باشند و پس از نصب در محل قابلیت تنظیم فاصله بین الکترودها از ۱ mm تا ۴ mm را دارا می باشند. همچنین با تنظیم ولتاژ ورودی به کوئل انرژی معادل بین ۸۰ mJ تا ۴۰۰ mJ در هر بار جرقه زدن قابل تولید است. دو فلنج موازی نیز برای نگه داشتن شیشه هایی از جنس کوارتز به قطر تقریبی ۷۰ mm و ضخامت ۱۵ mm به منظور ایجاد دسترسی اپتیکی تعبیه گردیده است. قطر قابل مشاهده این پنجره ۵۰ mm بوده و مابقی در داخل فنچ قرار گرفته است. یک دوربین سرعت بالا نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مجموعه شلرین استفاده شده در این کار شامل یک لیزر، میکروسکوپ، فیلتر پلو رایزر برای تنظیم شدت نور، لنزهای کروی، یک روزنه با قطر ۰/۶ میلی متر و یک فیلتر اپتیکی برای محافظت از دوربین در برابر تشعشعات شعله بوده است. برای اندازه گیری فشار در حین اجرای تست نیز از یک فشارسنج دینامیکی با قابلیت اندازه گیری حداکثر ۱۰۰ psi با دقت ۰/۱ درصد محدوده اندازه گیری استفاده شده است. دلیل استفاده از این فشارسنج توجه به محدوده تست موردنظر و کاهش خطای اندازه گیری می باشد.

بررسی تأثیرات پلاسما بر مشخصات احتراقی در محفظه حجم ثابت توسط اعمال پلاسما بر جریان های ورودی به

در ادامه نتایج مربوط به منحنی تغییرات فشار درون محفظه حجم ثابت بر حسب زمان برای مخلوط‌های پیش آمیخته با نسبت توازن‌های مختلف و در شرایط فشار اتمسفریک و دمای اولیه ۲۹۸K و در دو حالت وجود و عدم وجود گاز اوزون در محفظه آورده شده است. در تست‌ها زمان جرقه زنی به میزان یک ثانیه پس از شروع ضبط تصاویر تنظیم شده است بنابراین در شکل‌ها خط زمان از مبدأ یک ثانیه آورده شده‌اند تا نتایج بهتر قابل تفسیر باشند.

در شکل ۸ نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن ۰/۵۵ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است برای حالت عدم وجود گاز اوزون اساساً احتراق شکل نمی‌گیرد. دلیل این امر رقیق بودن بیش از حد مخلوط جهت تشکیل و ادامه شعله متحرک می‌باشد. این نتیجه گیری در تطابق با تصاویر درون محفظه قرار دارد که گویای عدم شکل‌گیری شعله می‌باشد. با افزودن اوزون به مخلوط واکنش‌پذیری مخلوط افزایش پیدا می‌کند و افزایش فشار در محفظه پس از ایجاد شعله اولیه به معنای شکل‌گیری و ادامه شعله‌ای محدود می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت افزودن اوزون می‌تواند منجر به گسترش محدوده رقیق‌سوزی مخلوط به سمت نسبت توازن‌هایی شود که پیش از حضور گاز اوزون امکان اشتعال را نداشته‌اند. در این نسبت توازن اساساً پیشروی کروی شعله قابل مشاهده نیست و تنها شعله‌ای محدود در مرکز محفظه تشکیل می‌شود که پس از اندکی حرکت مضمحل می‌گردد.

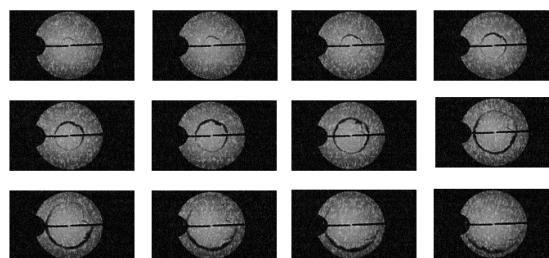


شکل (۸): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۵۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K

ابزار DBD هوا به صورت گازهای تشکیل‌دهنده آن یعنی نیتروژن و اکسیژن به صورت مجزا وارد محفظه احتراق می‌شود. همچنین تنها گاز اکسیژن از DBD گذرانده می‌شود و کنترل میزان اوزون بر اساس تغییر میزان اکسیژن عبوری از DBD پیش از ورود به محفظه صورت می‌گیرد. برای افزایش دقت تست‌ها لازم است از کپسول‌های گاز با درصد خلوص بسیار بالا مثلاً ۹۹/۹۹۵ استفاده کرد.

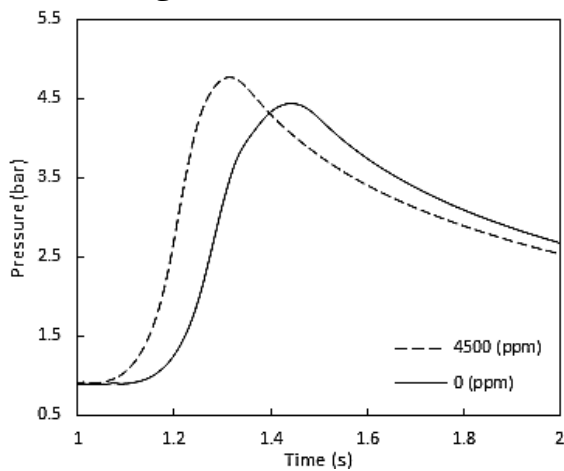
در مطالعه شعله متحرک از دوربین سونی مدل NEX-FS700UK AVCHD MTS با قابلیت تصویربرداری ۱۰۰۰ fps، سنسور اندازه‌گیری فشار مطلق و بارومتریک مدل Testo 511 (0560 0511)، سنسور فشار فرکانس ۲۰ kHz مدل Optrand autopsy-s، دیتالاگر مدل National Instruments SCB-100، پنل دیجیتالی مدل Ion Laser Tech MT4W-DA-4N، ترانس نئون مدل JBKC-1520A، وسیله DBD، میز اپتیک و ادوات اپتیکی مدل Melles Griot، آنالیزور گاز اوزون مدل BMT 964 BT، پمپ خلأ تک استیج مدل Active VE115 3CFM، کمپرسور هوا و سیلندرها گاز متان، اکسیژن و نیتروژن استفاده شده است.

نتایج مربوط به پیشروی آرام شعله متان با نسبت توازن ۰/۷ درون محفظه احتراق حجم ثابت در شرایط اتمسفریک و دمای اولیه ۲۹۸K در شکل ۷ آورده شده است. در این شکل رون تغییرات شعله در طول زمان با فواصل ۱ms آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است مطالب مذکور در مورد پیشروی کروی شعله به دلیل مواجهه با محیط ساکن پیش از وقوع اشتعال صحیح می‌باشد. به این ترتیب می‌توان از روش مذکور برای تعیین مشخصات شعله آرام استفاده کرد.



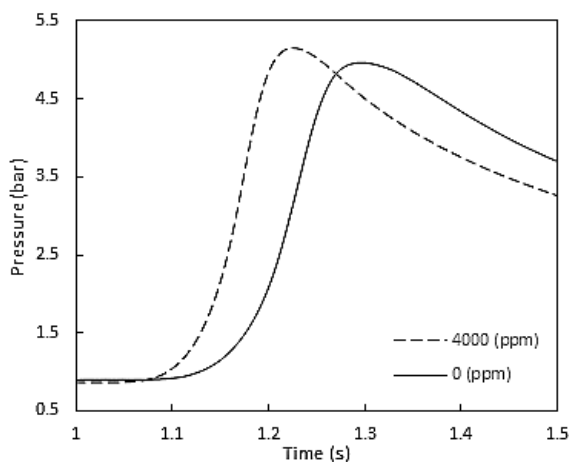
شکل (۷): تصاویر روند حرکت شعله آرام متان با نسبت توازن ۰/۷ در شرایط اتمسفریک و دمای اولیه ۲۹۸K درون محفظه احتراق با فواصل زمانی ۱ms پس از ایجاد اشتعال اولیه

نیز هموار شده است که گویای عدم تغییر شکل پیشانی شعله تا رسیدن به دیواره محفظه احتراق می باشد.



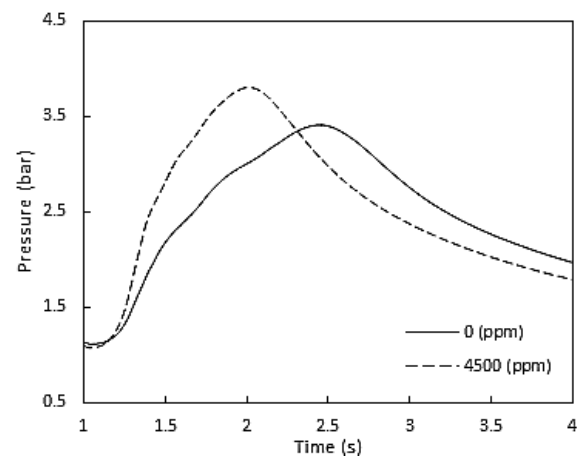
شکل (۱۰): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۶۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K

در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن های ۰/۷ و ۰/۷۵ آورده شده است. این نسبت توازن ها مقداری متداول برای بکارگیری مخلوط سوخت و هوا در کاربردهای مختلف می باشد. همان طور که در این شکل ها مشخص است در حالت بدون اوزون منحنی تغییرات فشار درون محفظه کاملاً هموار است و تصاویر شعله بر پیشروی کروی آن صحنه می گذارد. افزایش گاز اوزون به این مخلوط ها سبب کاهش زمان توسعه اولیه شعله و رسیدن به بیشینه مقدار فشار می شود.



شکل (۱۱): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۷ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K

در شکل ۹ نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن ۰/۶ آورده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است برای حالت عدم وجود گاز اوزون منحنی تغییرات فشار بسیار تدریجی می باشد و این امر به معنای شکل گیری شعله غیر یکنواخت می باشد. تصاویر شعله متحرک نیز گویای شکل گیری شعله نامتقارن و حرکت نیم کره شعله به سمت بالا می باشد که نشان دهنده عدم پیشروی کروی شعله در تمام محفظه است. با افزودن گاز اوزون به مخلوط روند افزایش فشار تشدید می شود و تصاویر نیز گویای پیشانی شعله یکنواخت تر است هر چند همچنان با پیشروی کروی کامل فاصله دارد.



شکل (۹): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۶ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K

در شکل ۱۰ نتایج مربوط به منحنی فشار درون محفظه بر حسب زمان برای مخلوط سوخت متان و هوا با نسبت توازن ۰/۶۵ آورده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است در مقایسه با نسبت توازن های کمتر در این حالت منحنی هموارتری وجود دارد که مطابق با تصاویر شعله بیانگر پیشروی شعله کروی از محل ایجاد شعله به سمت دیواره محفظه می باشد. البته با دور شدن از محل ایجاد شعله پیشانی شعله از شکل کروی خارج می شود که در منحنی فشار نیز برای نواحی نزدیک به بیشینه فشار قابل تشخیص می باشد. با افزودن گاز اوزون به این مخلوط مجدداً روند تغییرات فشار تشدید می شود و زمان توسعه اولیه شعله و رسیدن به بیشینه مقدار فشار نیز کاهش پیدا می کند. همچنین روند تغییر فشار در ناحیه فشار بیشینه

جدول (۱۰): تحلیل کمی نتایج مربوط به شعله متحرک متان درون محفظه حجم ثابت بر اساس میزان سرعت آرام شعله (cm/s)

Power (W)	0 (ppm)	4000 (ppm)	Improvement (%)
$\phi = 0.65$	16.2	20.2	24.7
$\phi = 0.7$	20.5	24.8	21
$\phi = 0.75$	24.1	28.9	19.8

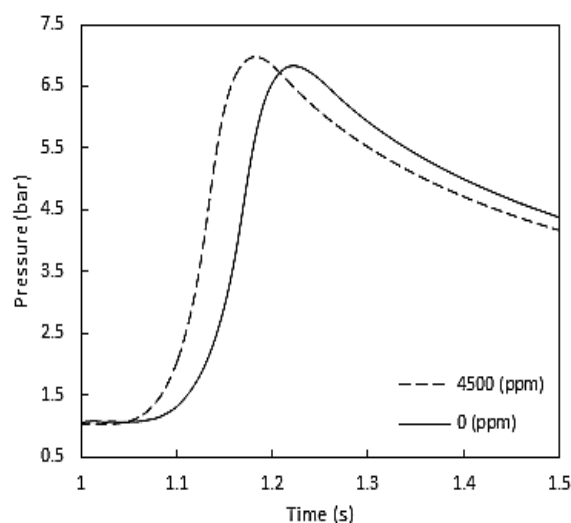
جدول (۱۱): تحلیل کمی نتایج مربوط به شعله متحرک متان درون محفظه حجم ثابت بر اساس میزان زمان لازم برای توسعه اولیه شعله (ms)

Power (W)	0 (ppm)	4000 (ppm)	Improvement (%)
$\phi = 0.65$	236	163	31
$\phi = 0.7$	174	127	27.1
$\phi = 0.75$	119	89	25.3

از نتایج این جداول می‌توان دریافت که تأثیر افزایش گاز اوزون با افزایش نسبت توازن مخلوط به سمت مقادیر استوکیومتری کاهش می‌یابد. دلیل این امر بهبود روند احتراق پایه و افزایش واکنش‌پذیری مخلوط به سبب افزایش نسبت توازن مخلوط و کاهش پتانسیل بهبود مشخصات احتراقی و افزایش واکنش‌پذیری مخلوط به‌واسطه افزودن گاز اوزون به مخلوط می‌باشد. این امر در مورد افزایش بیشینه فشار درون محفظه احتراق با افزودن گاز اوزون نیز صادق است که برای نسبت توازن‌های دورتر از شرایط استوکیومتری این نتیجه بیشتر مشخص می‌باشد. به‌این ترتیب می‌توان دریافت افزودن گاز اوزون به مخلوط سبب اضافه‌شدن واکنش‌های جدید به مکانیزم احتراق می‌شود که سبب افزایش نرخ تولید رادیکال‌های اکسیژن و هیدروژن به‌عنوان عوامل اساسی در افزایش نرخ تولید حرارت، در احتراق می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از سیستم‌های پلاسمایی به‌عنوان راهکار نوین برای افزایش بازده و ایجاد قابلیت عملکرد سیستم‌های اشتعالی در شرایط کاری وسیع‌تر در سالیان اخیر موردتوجه قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیرات سیستم‌های پلاسمایی بر مشخصه‌های عملکردی فرایند احتراق به‌صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور از دو چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده است. در ساختار اول از مشعل بونزن به دو صورت باز و محصور برای مطالعه خواص شعله ساکن پیش آمیخته استفاده شده است. در این ساختار تحلیل نتایج بر اساس تصویربرداری اپتیکی به روش شیلرن



شکل (۱۲): منحنی تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان برای سوخت متان با نسبت توازن ۰/۷۵ برای فشار اتمسفریک و دمای ۲۹۸K

تحلیلی کمی نتایج مربوط به مشاهدات تجربی تصاویر پیشروی شعله و منحنی تغییرات فشار درون محفظه بر حسب زمان برای نسبت توازن‌های مختلف در جدول ۱۰ و جدول ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد شعله شکل‌گرفته برای نسبت توازن‌های ۰/۵۵ و ۰/۶ کامل نمی‌باشد و در این حالات پیشروی کروی شعله رخ نخواهد داد بنابراین نتایج کمی برای این حالات ارائه نشده است. در جدول ۱۰ نتایج مربوط به سرعت آرام شعله بر اساس روش‌های تحلیل پیشتر معرفی شده آورده شده است. همان‌طور که از مندرجات این جدول مشخص است افزایش گاز اوزون به مخلوط سبب افزایش سرعت آرام شعله می‌شود و این امر از کاهش زمان رسیدن به بیشینه فشار درون محفظه قابل تشخیص است. در جدول ۱۱ نتایج مربوط به زمان توسعه اولیه شعله بر اساس روش‌های پیشتر معرفی شده آورده شده است. همان‌طور که از مقادیر مندرج در این جدول مشخص است افزایش گاز اوزون به مخلوط سبب کاهش زمان شکل‌گیری شعله می‌شود. همچنین در مورد بیشینه فشار درون محفظه، همان‌طور که در شکل‌ها نمایش داده شده است، افزایش اوزون سبب افزایش فشار درون محفظه می‌گردد که دلیل این امر تکمیل فرایند سوزش مخلوط قابل‌اشتعال به‌واسطه افزودن گاز اوزون می‌باشد.

- [7] Fridman, A. "Plasma chemistry", Cambridge University Press, 2008.
- [8] Adamovich, I.V., and Lempert, W.R. "Challenges in understanding and predictive model development of plasma-assisted combustion", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 57, No. 1, p. 014001, 2014. Doi:10.1088/0741-3335/57/1/014001.
- [9] Ju, Y., and Sun, W. "Plasma assisted combustion: Progress, challenges, and opportunities", *Combustion and Flame*, Vol. 162, No. 3, pp. 529-532, 2015. Doi:10.1016/j.combustflame.2015.01.017.
- [10] Siemens, W. "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähnen", *Annalen der Physik*, Vol. 178, pp. 66-122, 1857. Doi:10.1002/andp.18571780905.
- [11] Warburg, E. "Über die Ozonisierung des Sauerstoffs durch stille elektrische Entladungen", *Annalen der Physik*, Vol. 318, pp. 464-476, 1904. Doi:10.1002/andp.18943180303.
- [12] Otto, M.P. "L'Ozone et ses applications", E. Chiron, 1929.
- [13] Buss, K. "Die elektrodenlose Entladung nach Messung mit dem Kathodenoszillographen", *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 26, pp. 261-265, 1932. Doi:10.1007/BF01657192.
- [14] Massines, F., Rabehi, A., Decomps, P., Gadri, R.B., Ségur, P., and Mayoux, C. "Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier", *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, pp. 2950-2957, 1998. Doi:10.1063/1.367051.
- [15] Massines, F., Segur, P., Gherardi, N., Khamphan, C., and Ricard, A. "Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: diagnostics and modelling", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 174, pp. 8-14, 2003. Doi:10.1016/S0257-8972(03)00540-1.
- [16] Halter, F., Higelin, P., and Dagaut, P. "Experimental and detailed kinetic modeling study of the effect of ozone on the combustion of methane", *Energy & fuels*, Vol. 25, No. 7, pp. 2909-2916, 2011. Doi:10.1021/ef200550m.
- [17] Kee, R.J., Grcar, J.F., Smooke, M.D., Miller, J., and Meeks, E. "PREMIX: A Fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flames", Sandia National Laboratories Report, No. SAND85-8249, 1985.
- [18] Ombrello, T., Won, S.H., Ju, Y., and Williams, S. "Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen. Part I: Effects of O₃", *Combustion and flame*, Vol. 157, No. 10, pp. 1906-1915, 2010. Doi:10.1016/j.combustflame.2010.02.005.
- [19] Ombrello, T., Won, S.H., Ju, Y., and Williams, S. "Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen. Part II: Effects of O₂(a¹Δ_g)", *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 10, pp. 1916-1928,

و مشاهده پایداری و مخروط شعله تشکیل شده صورت گرفته است. در ساختار دوم از محفظه حجم ثابت برای مطالعه خواص شعله متحرک در محیط اشتعال پذیر استفاده شده است. در این مطالعه تفسیر نتایج بر اساس تصویربرداری فوق سریع به روش شیلرن از شعله شکل گرفته درون محفظه و همچنین داده های فشار درون محفظه حین احتراق استفاده شده است. نتایج گویای بهبود مشخصات شعله شامل سرعت آرام شعله و پایداری آن بر اساس مشاهدات شعله باز می باشد. همچنین کاهش زمان توسعه اولیه شعله و افزایش ناحیه اشتعال پذیری مخلوط تحت تأثیر محیط پلاسمایی، از نتایج حاصل از تست محفظه حجم بسته می باشد. نتایج به صورت خلاصه در شمارگان زیر آورده شده است. ۱- افزایش سرعت آرام شعله برای شعله پیش آمیخته باز تحت تأثیر پلاسما ۲- افزایش پایداری شعله برای شعله پیش آمیخته محصور تحت تأثیر پلاسما ۳- افزایش شدت اثرگذاری پلاسما بر مشخصات شعله با افزایش توان آن ۴- اثرگذاری بیشتر پلاسما بر نسبت توازن های دورتر نسبت به مخلوط استوکیومتری ۵- اثرگذاری بیشتر پلاسمای فعال بر مشخصات شعله نسبت به پیش گرمایش مخلوط قابل اشتعال ۶- افزایش سرعت آرام شعله برای شعله متحرک در محفظه حجم بسته تحت تأثیر افزودن گاز اوزون ۷- کاهش زمان توسعه اولیه شعله برای شعله متحرک در محفظه حجم بسته تحت تأثیر افزودن گاز اوزون ۸- اثرگذاری بیشتر گاز اوزون بر نسبت توازن های دورتر نسبت به شرایط استوکیومتری

۶- مراجع

- [1] Fridman, A., and Kennedy, L.A. "Plasma physics and engineering", CRC press, 2021.
- [2] Ju, Y. "Recent progress and challenges in fundamental combustion research", *Advances in Mechanics*, Vol. 44, No. 20, p. 201402, 2014. Doi: 10.6052/1000-0992-14-011.
- [3] Fitzpatrick, R. "Plasma physics: an introduction", CRC Press, 2014.
- [4] Matveev, I.B., Ardelyan, N., Bychkov, V., Bychkov, D., and Kosmachevskii, K. "Plasma Assisted Combustion, Gasification and Pollution Control", Outskirts Press, Inc., 2013.
- [5] Starikovskiy, A., and Aleksandrov, N. "Plasma-assisted ignition and combustion, Progress in Energy and Combustion Science", Vol. 39, No. 1, pp. 61-110, 2013. Doi:10.1016/j.pecs.2012.05.003.
- [6] Raizer, Y. P. "Gas discharge physics", Springer, New York, 1991.

- and Flame, Vol. 160, No. 1, pp. 83-96, 2013. Doi:10.1016/j.combustflame.2012.09.008.
- [31] Fureby, C., Ehn, A., Nilsson, E., Petterson, P., Aldén, M., Hurtig, T., Zettervall, N., Li, Z., and Larfeldt, J. "Investigations of microwave stimulation of turbulent flames with implications to gas turbine combustors", In 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, p. 1779, 2017. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1779>.
- [32] Nagaraja, S. "Multi-scale modeling of nanosecond plasma assisted combustion", PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2014.
- [33] Wang, C.C. "Numerical Simulation of Combustion Enhancement Through a Repetitive Pulsed Plasma Actuator", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2015. Doi:10.2514/1.T4579.
- [34] Settles, G.S. "Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media", Springer Science & Business Media, 2001.
- [35] Rallis, C.J., and Garforth, A.M. "The determination of laminar burning velocity", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 6, No. 4, pp. 303-329, 1980. Doi:10.1016/0360-1285(80)90008-8.
- [36] Elattar, H. F., Specht, E., Fouda, A., and BinMahfouz, A.S. "Study of parameters influencing fluid flow and wall hot spots in rotary kilns using CFD", Can. J. Chem. Eng., Vol. 94, No. 2, pp. 355-367, 2016. Doi:10.1002/cjce.22392.
- [37] Holman, J., "Experimental methods for engineers", 2001.
- [38] Sun, H., Yang, S.I., Jomaas, G., and Law, C.K. "High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion", Proc. Combust. Inst., Vol. 31, No. 1, pp. 439-446, 2007. Doi:10.1016/j.proci.2006.07.193.
2010. Doi:10.1016/j.combustflame.2010.02.004.
- [20] Do, H., Im, S.k., Cappelli, M.A., and Mungal, M.G. "Plasma assisted flame ignition of supersonic flows over a flat wall", Combustion and Flame, Vol. 157, No. 12, pp. 2298-2305, 2010. Doi:10.1016/j.combustflame.2010.07.006.
- [21] Ehn, A., Hurtig, T., Petersson, P., Zhu, J., Larsson, A., Fureby, C., Larfeldt, J., Li, Z., and Aldén, M. "Setup for microwave stimulation of a turbulent low-swirl flame", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 49, No. 18, p.185601, 2016. Doi:10.1088/0022-3727/49/18/185601.
- [22] Eliasson, B., and Kogelschatz, U. "Modeling and applications of silent discharge plasmas", IEEE transactions on plasma science, Vol. 19, pp. 309-323, 1991. Doi:10.1109/27.106829.
- [23] Golubovskii, Y.B., Maiorov, V., Behnke, J., and Behnke, J. "Modelling of the homogeneous barrier discharge in helium at atmospheric pressure", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 36, No. 39, 2002. Doi:10.1088/0022-3727/36/1/306.
- [24] Shin, J., and Raja, L.L. "Dynamics of pulse phenomena in helium dielectric-barrier atmospheric-pressure glow discharges", Journal of Applied Physics, Vol. 94, pp. 7408-7415, 2003. Doi:10.1063/1.1625414.
- [25] Nishida, H., and Abe, T. "Numerical analysis for plasma dynamics in SDBD plasma actuator", 41st Plasmadynamics and Lasers Conference, p. 4634, 2010. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4634>.
- [26] Lin, K.M., Hung, C.T., Hwang, F.N., Smith, M.R., Yang, Y.W., and Wu, J.S. "Development of a parallel semi-implicit two-dimensional plasma fluid modeling code using finite-volume method", Computer Physics Communications, Vol. 183, pp. 1225-1236, 2012. Doi:10.1016/j.cpc.2012.02.001.
- [27] Seaton, A., Godden, D., MacNee, W., and Donaldson, K. "Particulate air pollution and acute health effects", The lancet, Vol. 345, pp. 176-178, 1995. Doi:10.1016/S0140-6736(95)90173-6.
- [28] Ehn, A., Zhu, J.J., Petersson, P., Li, Z.S., Aldén, M., Fureby, C., Hurtig, T., Zettervall, N., Larsson, A., and Larfeldt, J. "Plasma assisted combustion: Effects of O3 on large scale turbulent combustion studied with laser diagnostics and Large Eddy Simulations", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 35, No. 3, pp.3487-3495, 2015. Doi:10.1016/j.proci.2014.05.092.
- [29] Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., and Fureby, C. "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques", Computers in physics, Vol. 12, No. 6, pp. 620-631, 1998. Doi:10.1063/1.168744.
- [30] Sabelnikov, V., and Fureby, C. "LES combustion modeling for high Re flames using a multi-phase analogy", Combustion