



بررسی تجربی اثرات گازهای رقیق کننده بر سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی گاز طبیعی و بنزین

محسن محسنی راد^۱، بیژن ملائی داریانی^{۲*}، مهدی اخلاقی^۳، مهدی بالو^۴

^۱ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، m_mohsenirad@aut.ac.ir

^۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، dariani@aut.ac.ir

^۳ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، mehdiakhlaghi@hotmail.com

^۴ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، m.baloo@aut.ac.ir

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۱۲۰۳۷۶۳۵

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳۰ آذر ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

گازهای باقی مانده

سرعت شعله آرام

سلولی شدن

روش نوری شیلیرین

چکیده

در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در زمینه اندازه‌گیری سرعت شعله آرام انجام شده است. سرعت شعله آرام یکی از خصوصیات مهم در احتراق است و مطالعه آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در این پژوهش اثرات گاز دی‌اکسیدکربن و گاز نیتروژن بر سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی گاز طبیعی و بنزین بررسی شده است. لذا با استفاده از روش نوری شیلیرین، سرعت شعله آرام و طول مارک اشتاین سوخت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. تمامی آزمون‌ها در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ بار انجام گرفت و برای اطمینان از تکرارپذیری، تمامی آزمون‌ها حداقل دو بار تکرار شده است. آزمون‌ها بر اساس سه درصد جرمی مختلف (۴٪، ۸٪، ۱۲٪) برای گاز دی‌اکسیدکربن و یک درصد جرمی (۱۲٪) برای گاز نیتروژن صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند افزودن گازهای رقیق کننده دی‌اکسیدکربن و نیتروژن باعث کاهش سرعت شعله آرام و کاهش دمای بی‌در رو شعله می‌شود. همچنین گاز دی‌اکسیدکربن به علت داشتن ظرفیت حرارتی بیشتر نسبت به گاز نیتروژن باعث کاهش بیشتر دمای واکنش و به دنبال آن سرعت شعله آرام می‌شود. همچنین افزودن گاز دی‌اکسیدکربن و گاز نیتروژن تأثیر محسوسی بر پدیده سلولی شدن و پایداری شعله نسبت به حالت بدون این گازها ندارند.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

احتراق مخلوط سوخت و هوا در داخل استوانه یکی از فرآیندهایی است که بازدهی، توان و آلاینده‌های موتور را کنترل می‌کند. یکی از نیازهای اولیه برای درک عملکرد موتور، داشتن آگاهی در زمینه پدیده احتراق است. پدیده‌های احتراقی برای انواع اصلی موتور احتراق جرقه‌ای و دیزلی، متفاوت اند.

در موتورهای احتراق جرقه‌ای، سوخت به طور طبیعی با هوا در سیستم مکش موتور مخلوط می‌شود. پس از تراکم مخلوط هوا و سوخت، تخلیه برقی باعث شروع فرآیند احتراق می‌شود. شعله در اثر هسته ایجاد شده از تخلیه برقی به وجود می‌آید و در طول استوانه و به سمت دیواره‌های محفظه احتراق پیشروی می‌کند. در دیواره‌ها، شعله سرد یا خاموش می‌شود، چرا که انتقال حرارت و تخریب گونه‌های فعال در واکنش، در دیواره‌ها به فرآیند غالب تبدیل می‌شود [۱].

فرآیند احتراق یک واکنش گرمایی سریع در حالت گازی است. شعله یک واکنش احتراقی است که با سرعت مادون صوت در فضا پراکنده می‌شود. حرکت شعله نسبت به گازهای سوخته، نکته‌ای است که دارای اهمیت است. ساختار شعله، به این که شعله نسبت به ناظر حرکت دارد و یا این که ثابت است و گازها به درون آن حرکت می‌کنند بستگی ندارد.

حضور حرکت شعله به این معناست که واکنش، محصور به ناحیه‌ای است که ضخامت آن در مقایسه با ابعاد محفظه احتراق موتور کوچک است. ناحیه واکنش معمولاً پیشانی شعله نامیده می‌شود.

ویژگی انتشار فضایی شعله نتیجه اثر توأم واکنش شیمیایی، فرآیندهای نفوذ جرم و هدایت حرارتی و جریان سیال است. تولید گرما و ذرات فعال، واکنش شیمیایی را شتاب می‌بخشند. فراهم سازی واکنش دهنده‌های جدید که با سرعت جابجایی کنترل می‌شود، واکنش را محدود می‌کند. زمانی که این فرآیندها متعادل شدند، یک شعله پایدار ایجاد می‌شود [۱].

شعله‌ها در موتورها ناپایدار و مغشوش هستند و این امر نتیجه نوع چرخه عملکردی موتورهای احتراق داخلی است. فقط با افزایش فراوان فرآیندهای انتقالی آرام توسط فرآیندهای همرفتی مغشوش می‌توان نرخ اختلاط، سوختن و انتشار شعله را به اندازه کافی سرعت بخشید تا فرآیند احتراق موتور در زمان موجود تکمیل شود.

از این رو، شعله معمولی ایجاد شده در اثر جرقه، شعله‌ای مغشوش، ناپایدار و پیش آمیخته است و مخلوط سوخت و هوایی که گسترش شعله در آن صورت می‌گیرد در حالت گازی قرار دارد. عمدتاً در فرآیند احتراق موتور دیزل، شعله ناپایدار، مغشوش و نفوذی است. فرآیندهای احتراق دیزل از فرآیند احتراق در موتورهای احتراق جرقه‌ای پیچیده‌تر است، زیرا که تبخیر سوخت مایع و اختلاط سوخت و هوا نیز در فرآیند وجود دارند.

۲- روش‌های اندازه‌گیری سرعت شعله آرام

پرباربردترین روش‌های اندازه‌گیری سرعت شعله آرام شامل شعله بنسون، شعله تخت تثبیت شده برنر، شعله ساکن و شعله نفوذ کروی اند [۲].

هر کدام از این روش‌ها، ویژگی‌ها و مزایا و معایب و دارای فرض‌های مختلفی اند که باید در انتخاب روش دقت لازم را داشت. از میان این روش‌ها، شعله ساکن و شعله نفوذ کروی روش‌های دقیق تری اند. به این علت که در روش شعله تخت تثبیت شده برنر، اثرات دیواره و در شعله بنسون یکسان نبودن سرعت شعله در سطح شعله، بر روی جواب اثرگذار اند. همچنین در روش شعله ساکن به خاطر محدودیت‌های عدد رینولدز در فشارهای زیاد، جواب‌های قابل قبولی به دست نمی‌آید [۳].

بنابراین بهترین روش، روش شعله نفوذ کروی است. کاهش سرعت شعله آرام به دلیل رقیق‌سازی سبب افزایش مدت زمان احتراق می‌شود.

حضور گازهای سوخته شده در مخلوط نسوخته درون استوانه به دلیل وجود گازهای باقی مانده و بازخورانی گازهای خروجی سبب کاهش چشم گیر در سرعت شعله آرام می‌شود.

هر مقدار گاز سوخته شده در مخلوط نسوخته، سبب کاهش ظرفیت حرارتی و دمای شعله و دمای در داخل استوانه می‌شود. درصد کاهش سرعت شعله آرام مستقل از نسبت سوخت به هوا، فشار و دمای درون موتور است. معادله (۱) تأثیر گازهای بازخورانی را بر روی سرعت شعله آرام نشان می‌دهد [۴]:

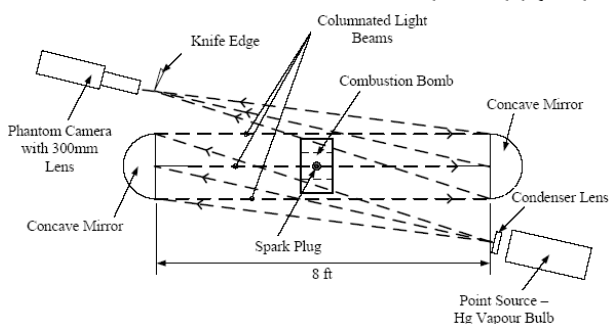
$$S_L(x_b) = S_L(x_b = 0)(1 - 2.06x_b^{0.77}) \quad (1)$$

که x_b درصد مولی گازهای سوخته شده رقیق ساز است. هنگامی که مخلوط نسوخته در موتورهای احتراق جرقه‌ای به وسیله هوای اضافی یا گازهای بازخورانی شده رقیق می‌شود، زمان توسعه شعله، زمان حالت احتراق سریع و تغییرات چرخه به چرخه در فرآیند احتراق افزایش می‌یابد.

تا جایی که عملکرد موتور غیر پایدار شده و مقدار هیدروکربن‌های نسوخته افزایش می‌یابد. نقطه‌ای که این پدیده‌ها در آن اتفاق می‌افتد را حد پایداری موتور می‌نامند [۴].

با افزایش رقیق‌سازی ابتدا احتراق اکثر چرخه‌ها کند می‌شوند، تا جایی که در برخی از چرخه‌ها احتراق درست قبل از باز شدن دریچه گازهای خروجی تمام می‌شود و سپس در صورت افزایش رقیق‌سازی زمان احتراق کندتر می‌شود و برخی از چرخه‌ها زمان لازم برای اتمام احتراق در داخل استوانه را نمی‌یابند و سرانجام احتراق رخ نمی‌دهد و در آن مخلوط محترق نمی‌گردد.

می‌شود. نور خروجی به یک آینه کروی برخورد می‌کند. خروجی آینه اول، دسته نورهای موازی اند که از درون محفظه احتراق عبور می‌نمایند و به آینه کروی دوم در سمت مقابل می‌رسند. این دسته نور موازی پس از برخورد با آینه دوم همگرا شده و پس از عبور از یک لبة تیز وارد دوربین سریع می‌شود و به این ترتیب می‌توان از پدیده مورد نظر تصویربرداری کرد [۹].



شکل ۱: عکس برداری از شعله به روش نوری شیلیرین [۹]

۲-۵- تعیین سرعت شعله از طریق عکسبرداری نوری

روش نوری شیلیرین روش مناسب برای تعیین مکان جناح شعله بعد از ایجاد جرقه و شروع احتراق و محاسبه سرعت شعله در مرحله نفوذ جناح شعله است. برای این کار ابتدا محفظه حجم ثابت از مخلوط از هوا و سوخت با نسبت سوخت به هوای معین در فشار و دمای اولیه مورد نظر پر می‌شود. بعد از حصول اطمینان از ساکن شدن کامل مخلوط، جرقه توسط شمع در مرکز محفظه زده می‌شود.

در این شمع‌ها از میله‌های نازک فلزی که به الکترودهای میانی هر یک جوش داده می‌شود، استفاده می‌شود. یکی از شمع‌ها به سیم پیچ و دیگری به زمین اتصال می‌یابد [۱۰-۱۱]. با توجه به این که نرخ تغییرات شعاع با استفاده از پردازش در نرم‌افزار متلب بدست می‌آید، کافی است که معادله سرعت شعله‌ای که به صورت کروی رشد می‌کند را بر اساس نرخ تغییرات شعاع بنویسیم. برای شعله که به صورت کروی رشد می‌کند داریم:

$$S_b = \frac{dr}{dt} \quad (2)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\rho_b S_b = \rho_u S_u \rightarrow S_u = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_b = \frac{\rho_b}{\rho_u} \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

در نتیجه معادله سرعت شعله بر اساس نرخ تغییرات شعاع و نسبت چگالی گاز سوخته به نسوخته به دست می‌آید [۱۰-۱۱].

۲-۶- محفظه احتراق

محفظه احتراق در این پژوهش به شکل استوانه است. در دو طرف استوانه دو شیشه کوارتز قرار گرفته تا پدیده‌هایی که درون محفظه احتراق رخ می‌دهد توسط دوربین قابل مشاهده باشد. برای آب‌بندی

۲-۱- خواص گاز دی‌اکسیدکربن

دی‌اکسیدکربن یکی از گازهای موجود در اتمسفر است. این گاز از سوختن مواد آلی در حضور اکسیژن کافی ایجاد می‌شود و گازی بیرنگ و بی بو است.

جدول ۱: خواص گاز دی‌اکسیدکربن [۵]

ظرفیت گرمایی ویژه (J/K mol)	دمای ذوب (°C)	چگالی (kg/m ³)	جرم مولکولی (g·mol ⁻¹)
۳۷،۱۳۵	-۵۶،۶	۱،۹۷۷	۴۴،۰۱

۲-۲- خواص گاز نیتروژن

نیتروژن یا ازت یکی از عناصر شیمیایی در جدول تناوبی است که عدد اتمی آن ۷ است. نیتروژن معمولاً به صورت گازی، غیر فلز، دو اتمی بی اثر، بیرنگ، بدون مزه و بی بو است که ۷۸٪ جو زمین را در بر گرفته است.

جدول ۲: خواص گاز نیتروژن [۵]

ظرفیت گرمایی ویژه (J/K mol)	دمای ذوب (°C)	چگالی (kg/m ³)	جرم مولکولی (g·mol ⁻¹)
۲۹،۱۲۴	-۲۱۰	۱،۲۵۱	۲۸،۰۱

۲-۳- مروری بر کارهای انجام شده

ژو^۱ و همکاران سرعت شعله آرام ایزواکتان غنی شده با اکسیژن و رقیق شده با دی‌اکسیدکربن را به صورت تجربی بررسی کردند [۶]. دانگ^۲ و همکاران سرعت شعله آرام برای ترکیب هیدروژن و دی‌اکسیدکربن را به صورت تجربی مطالعه کردند [۷]. بالو و همکاران نیز به صورت عددی و تجربی اثر افزودن گاز طبیعی بر سرعت شعله آرام بنزین را بررسی کردند [۸].

۲-۴- روش نوری شیلیرین

در روش نوری شیلیرین از اصل اختلاف چگالی استفاده می‌شود. به این صورت که با عبور یک دسته نور موازی از محیط مشخص می‌توان با توجه به شکست نور در اثر اختلاف چگالی ایجاد شده در اثر پاشش سوخت یا احتراق در محفظه پدیده‌های پاشش سوخت و احتراق را بررسی کرد.

به منظور افزایش شدت نور از یک عدسی همگرا کننده و یک سوراخ کوچک به قطر ۲ میلی‌متر در مسیر منبع نور قرار می‌گیرد، استفاده

¹ Zhou

² Dong

۳- آماده‌سازی مخلوط

در این پژوهش از روش تزریق سوخت مایع به داخل محفظه استفاده شد، لازم است ابتدا زمان باز بودن افشانه متناسب با فشار جزئی مشخص تعیین شود. به همین دلیل باید عملیات تنظیم^۲ افشانه با سوخت مایع و گازی انجام شده، تابع وابسته استخراج شود. در این پژوهش به جای بنزین از ایزواکتان خالص و به جای گاز طبیعی از متان استفاده شده است.

برای آماده‌سازی مخلوط در غنای^۳ مشخص از روش فشار جزئی گازها با فرض گاز آرمانی استفاده شده است. بر اساس الگوی دالتون برای گازهای مخلوط در یک محفظه بسته معادله‌هایی بدین شرح برقرار است:

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (۴)$$

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (۵)$$

$$P_i = x_i P \quad (۶)$$

که V حجم، P فشار و x_i کسر مولی جز i موجود در مخلوط است. همچنین با فرض گاز آرمانی معادله^(۷) بین نسبت فشار و نسبت مولی اجزا برقرار است:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (۷)$$

از طرفی با استفاده از الگوی دالتون برای فشار مخلوط خواهیم داشت:

$$P_{mix} = P_{air} + P_{fuel} + P_{CO_2} \quad (۸)$$

$$P_{mix} = P_{air} + P_{fuel} + P_{N_2} \quad (۹)$$

که فشار سوخت (P_{fuel}) برای سوخت‌های ترکیبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{fuel} = P_{iso-octane} + P_{methane} \quad (۱۰)$$

بنابراین فشار جزئی هر یک از اجزا در فشار اولیه (P_{mix}) و غناهای مختلف محاسبه خواهد شد. با فشار جزئی به دست آمده، مدت زمان پاشش هر یک از افشانه‌های سوخت مایع و سوخت گازی، به دست می‌آید.

کل مجموعه محفظه احتراق نیز از واشرهای مختلف سیلیکونی استفاده شده است.

در بالای محفظه نیز افشانه‌های پاشش سوخت قرار دارند. افشانه‌های سوخت مورد استفاده در مسیر سوخت‌های مایع و گاز، از نوع افشانه شش سوراخ تزریق مستقیم^۱ و از شرکت بوش اند. این افشانه‌ها تا فشار ۲۰۰ بار قابلیت عملکرد دارند. در قسمت کناری محفظه نیز راهگاه ورود و خروج هوا تعبیه شده است که با یک شیر قابلیت تنظیم شدن دارد و به منظور ورود هوا قبل از احتراق و تخلیه محتویات داخل محفظه پس از احتراق استفاده می‌شود. همچنین از یک حسگر فشار به منظور تنظیم مقادیر ورود هوا و سوخت استفاده می‌شود.

جدول ۳: مشخصات محفظه احتراق

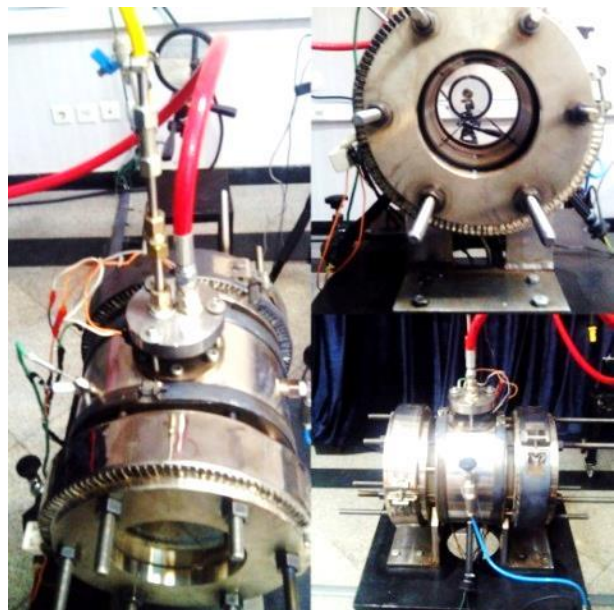
جنس	ضخامت دیواره	قطر داخلی استوانه
فولاد	۴۰ میلی‌متر	۱۳۵ میلی‌متر

جدول ۴: مشخصات شیشه‌ها

قابلیت تحمل فشار	جنس	قطر شیشه	ضخامت شیشه
۱۰۰ بار	کوارتز	۱۶۰ میلی‌متر	۸۰ میلی‌متر

جدول ۵: مشخصات منبع نور و آینه‌ها

فاصله کانونی آینه دوم (mm)	فاصله کانونی آینه اول (mm)	قطر روزنه منبع نور (mm)	منبع نور
۲۵۷۰	۲۶۱۰	۲	لامپ هالوژن ۵۰ وات



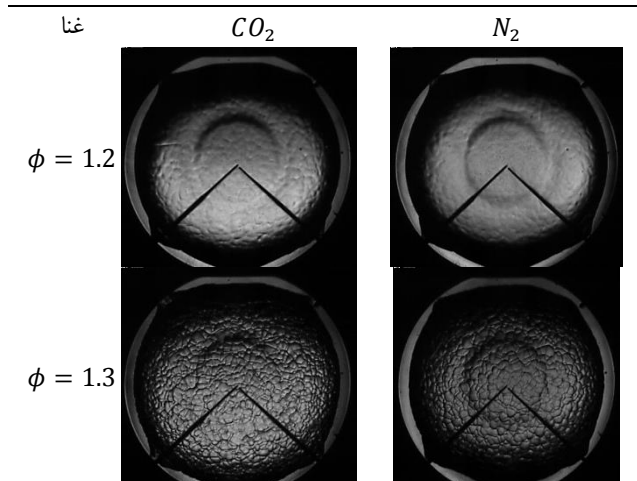
شکل ۲: محفظه احتراق

² Calibration

³ Fuel-air ratio (FAR)

¹ FSI HDEV Gasoline Direct Injection Injectors

جدول ۷: مقایسه پایداری شعله بین CO_2 و N_2 برای سوخت ایزواکتان



۴- نتایج پایداری شعله

سلولی شدن^۱ و تولید ترک‌های نامنظم در پیشانی شعله در حین بزرگ شدن آن، از علامت‌های ناپایداری شعله هستند. در صورت وقوع ناپایداری، به علت بیشتر شدن سطح پیشانی شعله، نرخ سوختن زیادتر می‌شود و شعله شتاب می‌گیرد [۸].

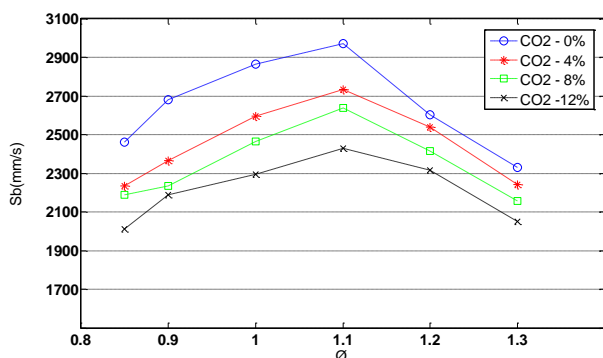
مقایسه پایداری شعله بین دو سوخت ایزواکتان و متان برای درصدهای جرمی مختلف گاز دی‌اکسیدکربن و گاز نیتروژن در جدول (۶) مشاهده می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود در تمامی حالت‌ها، شعله سوخت متان صاف و پایدار است و سوخت ایزواکتان دارای شعله سلولی شده و ناپایدار است.

طبق جدول (۷) که پایداری شعله بین گاز نیتروژن و گاز دی‌اکسیدکربن برای سوخت ایزواکتان را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود افزوده شدن گاز دی‌اکسیدکربن تغییر محسوس در وضعیت پایداری شعله ایجاد نمی‌کند.

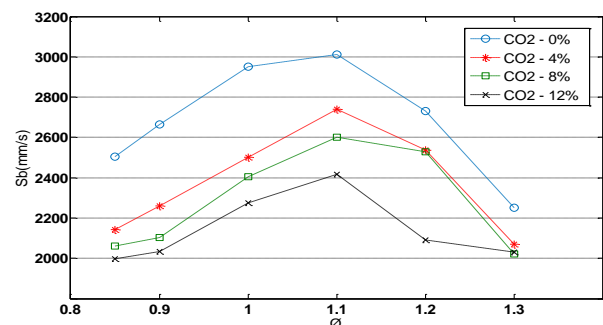
۴-۱- سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته

در این بخش نتایج تجربی سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته بررسی می‌شود. در شکل‌های (۳-۷) مشاهده می‌شود با افزودن گاز دی‌اکسیدکربن و افزایش مقدار آن سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته کاهش پیدا می‌کند.

کاهش سرعت شعله آرام به دلیل جذب گرمای واکنش توسط گاز دی‌اکسیدکربن است. با افزایش مقدار گاز دی‌اکسیدکربن گرمای بیشتری از واکنش جذب شده و در نتیجه سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته کاهش می‌یابد.



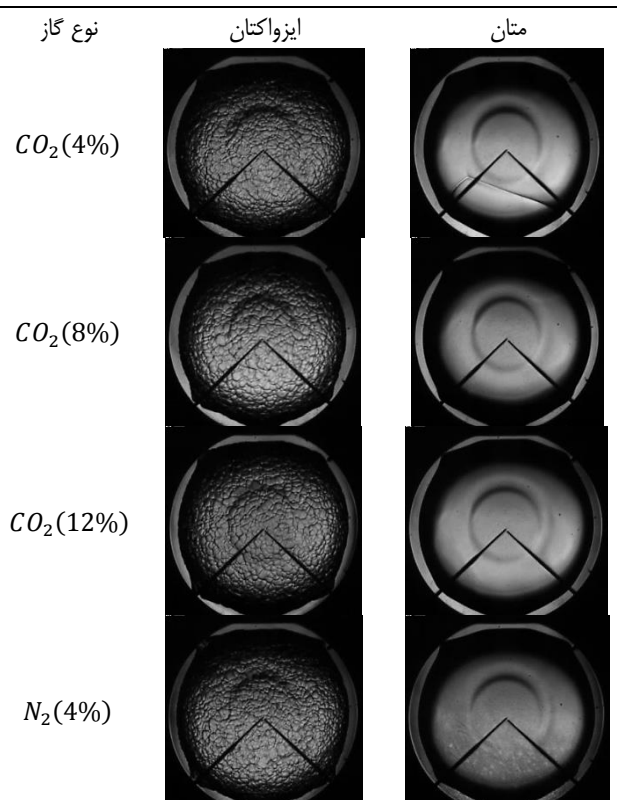
شکل ۳: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت ایزواکتان



شکل ۴: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت ترکیبی (۴۵ درصد

مولی متان)

جدول ۶: مقایسه پایداری شعله بین متان و ایزواکتان برای $\phi = 1.3$



مشاهده می‌شود در غناهای ($\phi = 1.2, \phi = 1.3$) برای سوخت ایزواکتان پدیده سلولی شدن و ناپایداری شعله مشاهده می‌شود که اضافه شدن گاز نیتروژن و دی‌اکسیدکربن به مخلوط نیز تأثیری بر این ناپایداری نداشته است و هر دو گاز رفتار یکسانی را نشان می‌دهند.

¹ Cellularity

نتایج نشان می‌دهد که برای سوخت ایزواکتان، سوخت ترکیبی (۴۵ درصد مولی متان) و سوخت ترکیبی (۷۰ درصد مولی متان) این کاهش برای تمامی درصدهای گاز دی‌اکسیدکربن مشاهده می‌شود. اما در حالت‌های سوخت ترکیبی (۹۵ درصد مولی متان) و سوخت متان بین حالت ۸ درصد جرمی دی‌اکسید کربن و ۱۲ درصد جرمی دی‌اکسیدکربن اختلاف کمی مشاهده می‌شود.

این مطلب نشان می‌دهد که افزایش مقدار گاز دی‌اکسیدکربن در حالت‌هایی که سوخت متان سوخت غالب است، تأثیر چندانی بر کاهش سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته ندارد.

همچنین برای دو حالت سوخت ترکیبی (۷۰ درصد مولی متان) و سوخت ترکیبی (۹۵ درصد مولی متان)، در نقطه $(\phi = 1.3)$ مقدار سرعت شعله کشیده نشده سوخته ۸ درصد جرمی دی‌اکسیدکربن کمتر از مقدار سرعت شعله کشیده نشده سوخته ۱۲ درصد جرمی دی‌اکسیدکربن است.

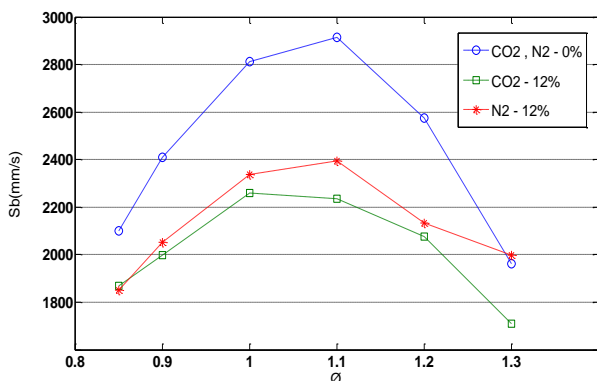
این نشان می‌دهد که در نزدیکی این محدوده اثر کاهشی افزوده شدن گاز دی‌اکسیدکربن را نمی‌توان مشاهده کرد و در این نواحی سرعت شعله کشیده نشده سوخته روندی نسبتاً غیر قابل پیش بینی را دنبال می‌کند.

۴-۲- مقایسه سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته

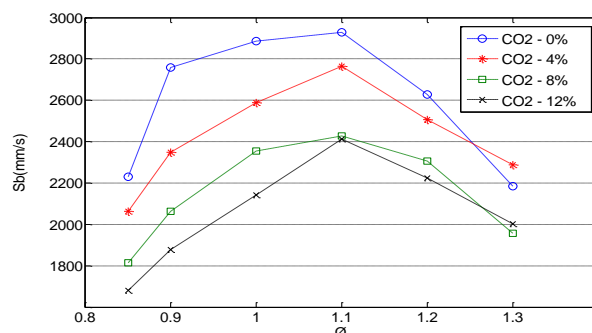
بین گاز دی‌اکسیدکربن و گاز نیتروژن

در این بخش سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته را بین گاز دی‌اکسیدکربن و گاز نیتروژن با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. همان طور که در شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده می‌شود سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته گاز دی‌اکسیدکربن کمتر از سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته گاز نیتروژن است.

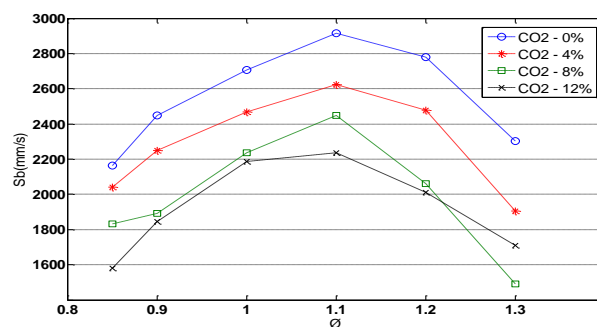
علت آن نیز به دلیل بیشتر بودن ظرفیت حرارتی گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به گاز نیتروژن است. بدین صورت که گاز دی‌اکسیدکربن گرمای بیشتری از واکنش را جذب خود کرده و دمای شعله را نیز بیشتر از گاز نیتروژن کاهش می‌دهد و در نتیجه سرعت شعله کمتری نسبت به گاز نیتروژن دارد.



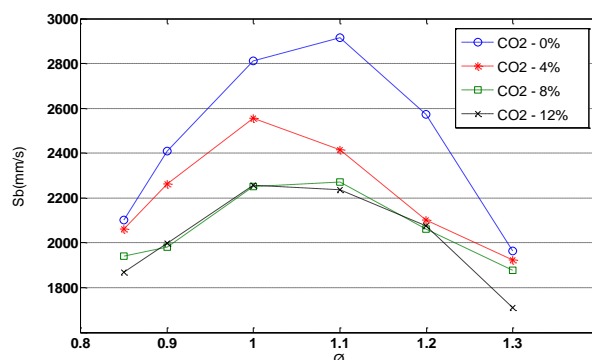
شکل ۹: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت متان



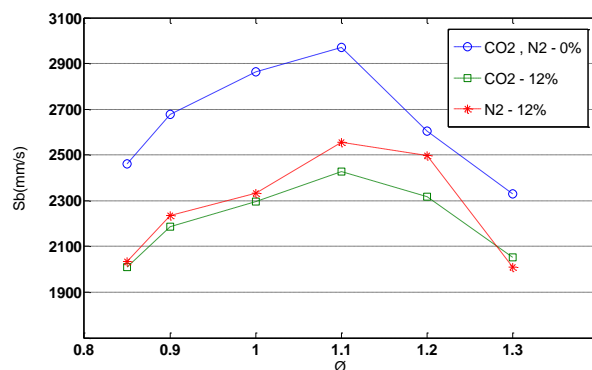
شکل ۵: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت ترکیبی (۷۰٪ مولی متان)



شکل ۶: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت ترکیبی (۹۵٪ مولی متان)



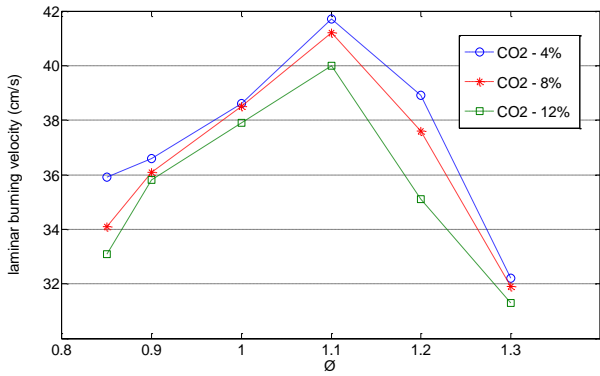
شکل ۷: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت متان برای گاز دی‌اکسیدکربن



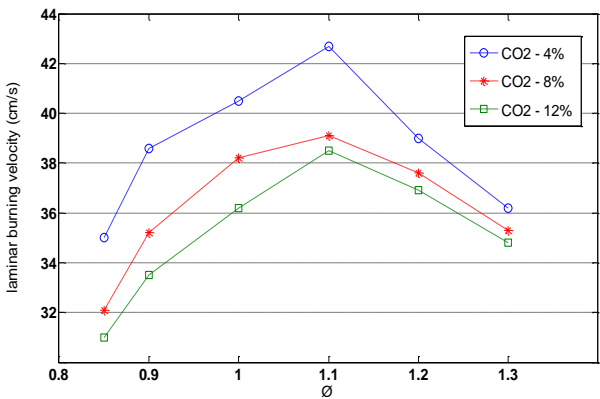
شکل ۸: سرعت شعله آرام کشیده نشده برای سوخت ایزواکتان

۳-۴- سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته

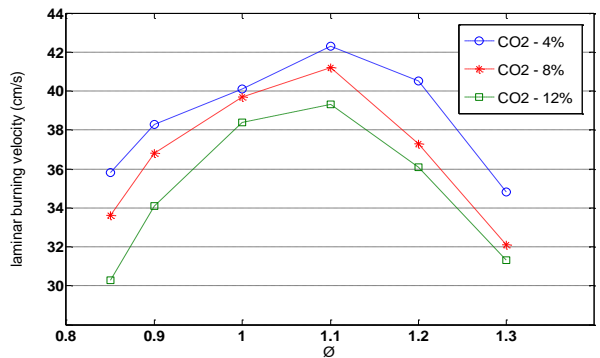
سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته از ضرب نسبت چگالی گاز سوخته به سوخته در سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته به دست می‌آید. نسبت چگالی گاز سوخته به سوخته با افزایش غنا در ناحیه رقیق روندی کاهشی و در ناحیه غنی روندی افزایشی را دنبال می‌کند. همان طور که در شکل‌های (۱۲-۱۶) مشاهده می‌شود با افزودن گاز دی‌اکسیدکربن و افزایش مقدار آن سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته کاهش پیدا می‌کند.



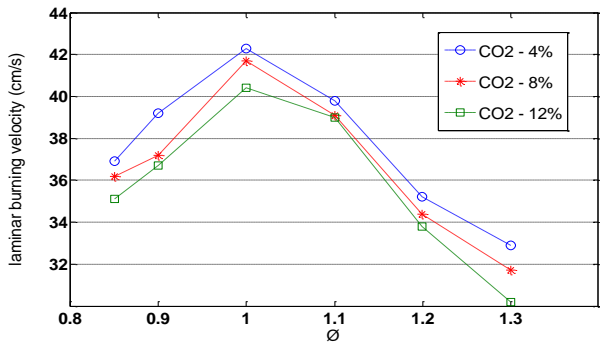
شکل ۱۳: سرعت شعله آرام برای سوخت ترکیبی (۴۵ درصد مولی متان)



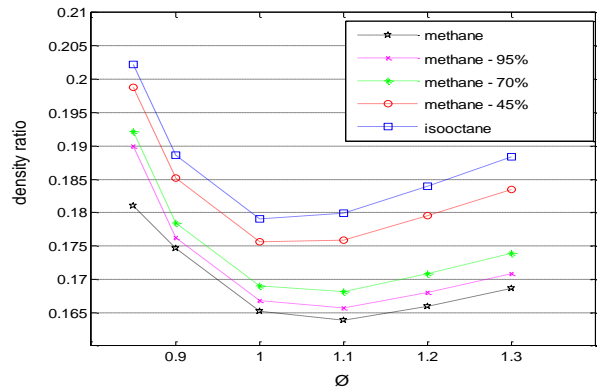
شکل ۱۴: سرعت شعله آرام برای سوخت ترکیبی (۷۰ درصد مولی متان)



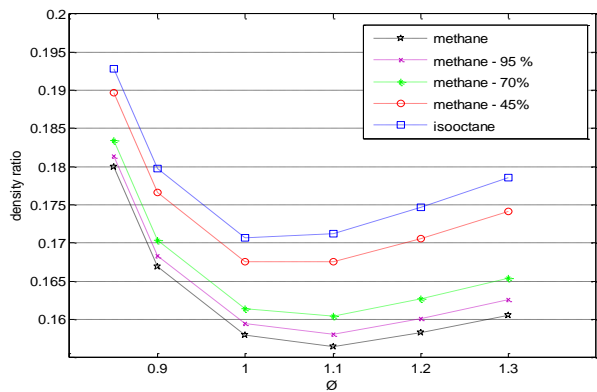
شکل ۱۵: سرعت شعله آرام برای سوخت ترکیبی (۹۵ درصد مولی متان)



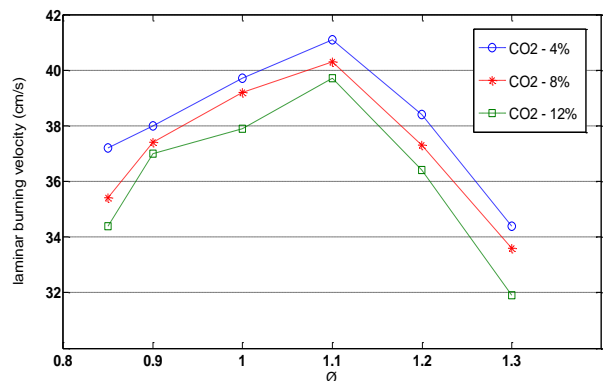
شکل ۱۶: سرعت شعله آرام برای سوخت متان



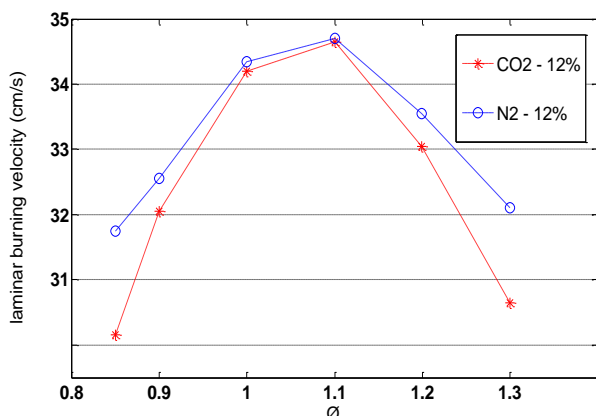
شکل ۱۰: نمودار نسبت چگالی برای ۱۲ درصد جرمی گاز دی‌اکسیدکربن



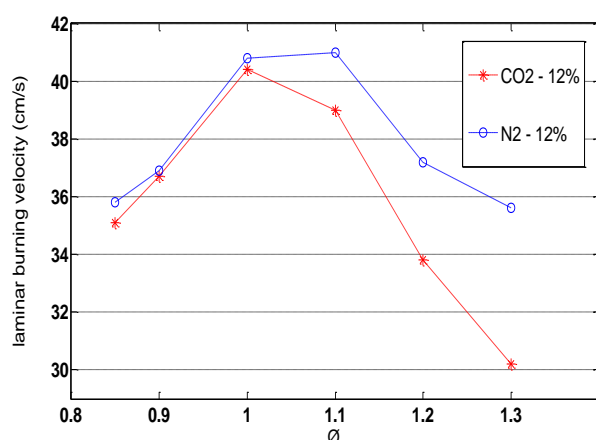
شکل ۱۱: نمودار نسبت چگالی برای ۱۲ درصد جرمی گاز نیتروژن



شکل ۱۲: سرعت شعله آرام برای سوخت ایزواکتان



شکل ۲۰: سرعت شعله آرام برای سوخت ترکیبی (۹۵ درصد مولی متان)



شکل ۲۱: سرعت شعله آرام برای سوخت متان

۴-۴- طول مارک اشتاین

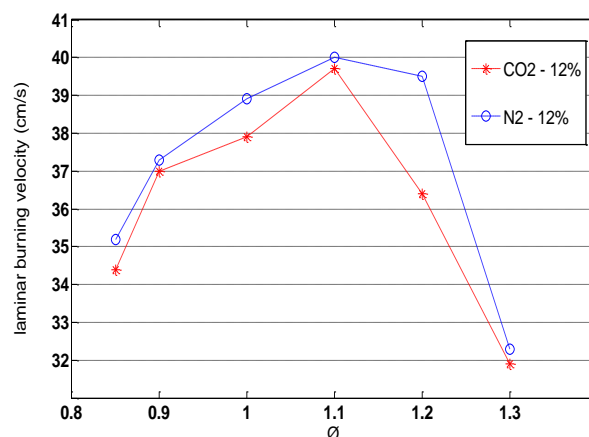
طول مارک اشتاین به عدد لوئیز اکسید کننده در مخلوط غنی و عدد لوئیز سوخت در مخلوط رقیق بستگی دارد. افزایش طول مارک اشتاین، ناپایداری نفوذ حرارتی را کاهش می‌دهد و کاهش آن ناپایداری نفوذ حرارتی را افزایش می‌دهد.

افزایش یا کاهش طول مارک اشتاین با افزایش یا کاهش عدد لوئیز همراه است. طول مارک اشتاین منفی نیز نشان دهنده بروز ناپایداری در هنگام بزرگ شدن شعله و در نتیجه تشکیل ساختار سلولی در سطح شعله است [۸].

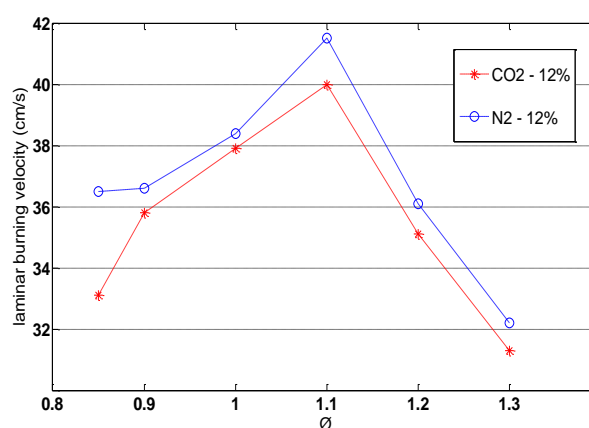
همان طور که در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود در سوخت ایزواکتان با افزایش غنا مقدار طول مارک اشتاین کاهش می‌یابد. برای سوخت متان نیز همان طور که در شکل (۲۳) مشاهده می‌شود با افزایش غنا طول مارک اشتاین نیز افزایش می‌یابد.

اما در شکل (۲۴) طول مارک اشتاین برای سوخت ترکیبی (۹۵ درصد مولی متان) رسم شده است که تقریباً مقدار جرمی سوخت ایزواکتان و متان با یکدیگر برابر است و به همین علت طول مارک اشتاین نه افزایشی و نه کاهش می‌یابد و به صورت میانگینی از این دو رفتار کاهش و افزایشی نمایان شده است.

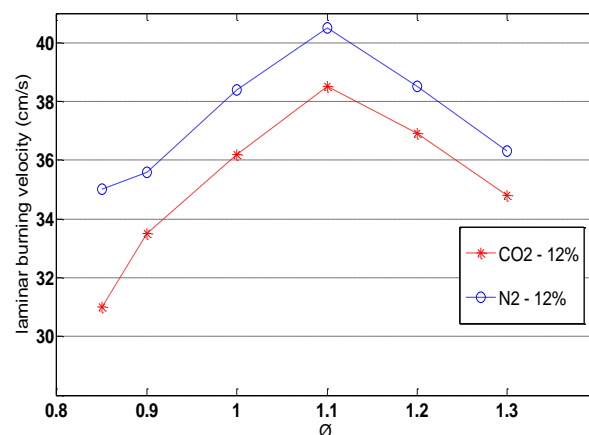
در این بخش سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته را بین گازهای دی‌اکسیدکربن و نیتروژن با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. همان طور که در شکل‌های (۱۷-۲۱) مشاهده می‌شود سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته گاز دی‌اکسیدکربن کمتر از سرعت شعله آرام کشیده نشده سوخته گاز نیتروژن است.



شکل ۱۷: سرعت شعله آرام برای سوخت ایزواکتان



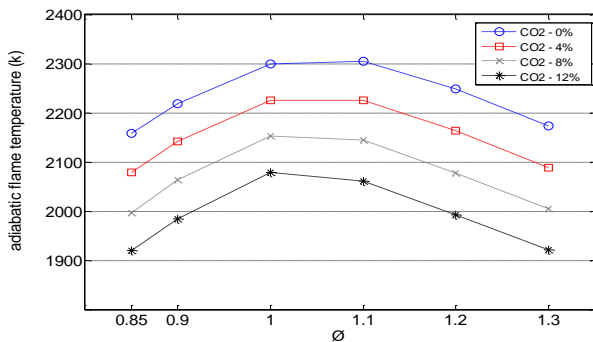
شکل ۱۸: سرعت شعله آرام برای سوخت ترکیبی (۴۵ درصد مولی متان)



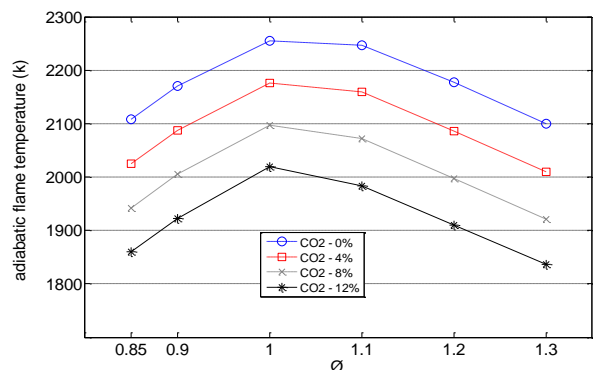
شکل ۱۹: سرعت شعله آرام برای سوخت ترکیبی (۷۰ درصد مولی متان)

خواهد بود، چون انتقال حرارت از ناحیه واکنش و هر گونه احتراق ناقص دمای محصولات را کاهش خواهد داد [۸].
 دمای شعله بی در رو با استفاده از نرم افزار کمکین^۲ محاسبه شده است. همان طور که در شکل های (۲۵) و (۲۶) مشاهده می شود و همان طور که پیش بینی می شد با افزودن گاز دی اکسید کربن دمای بی در رو شعله کاهش می یابد و این مهم در همه حالت های مختلف ترکیب سوخت برقرار است.

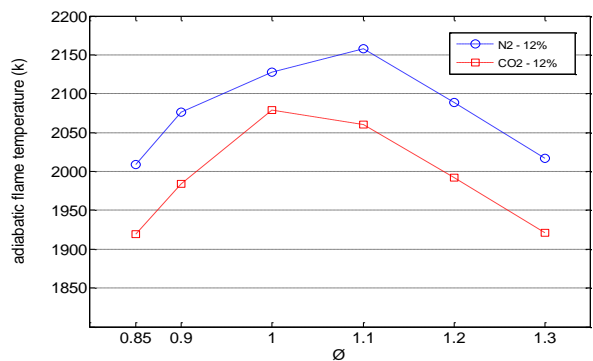
همچنین دمای بی در رو شعله بین گاز دی اکسید کربن و گاز نیتروژن نیز مقایسه شده است و همان طور که شرح داده شد به علت بیشتر بودن ظرفیت حرارتی ویژه گاز دی اکسید کربن نسبت به گاز نیتروژن دمای بی در رو شعله آن کمتر است.



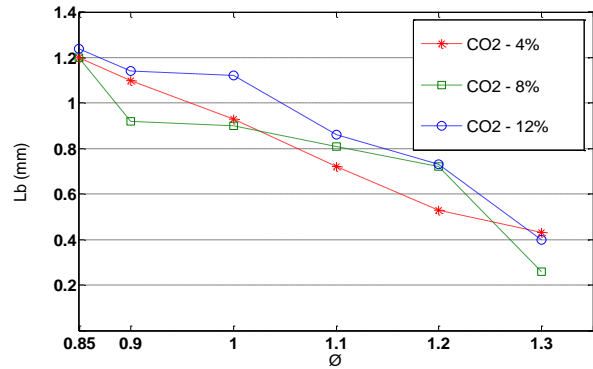
شکل ۲۵: دمای بی در رو شعله برای سوخت ایزواکتان



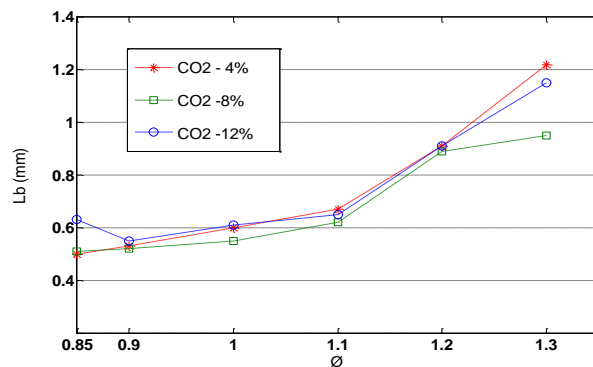
شکل ۲۶: دمای بی در رو شعله برای سوخت متان



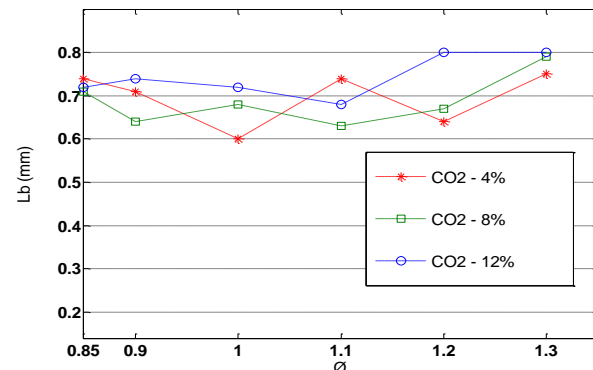
شکل ۲۷: دمای بی در رو شعله برای سوخت ایزواکتان



شکل ۲۲: طول مارک اشتاین برای سوخت ایزواکتان



شکل ۲۳: طول مارک اشتاین برای سوخت متان



شکل ۲۴: طول مارک اشتاین برای سوخت متان

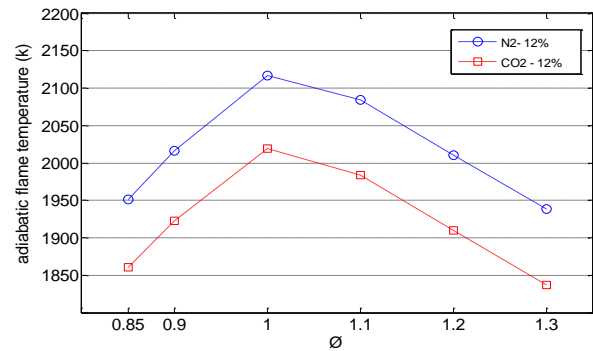
۴-۵- دمای بی در رو شعله

دمای شعله از طریق موازنه انرژی بین واکنش دهنده ها و محصولات در حالت تعادل به دست می آید. اگر منطقه واکنش در مقایسه با دیگر نواحی احتراق، بسیار نازک باشد، بیشینه دمای منطقه واکنش، به عنوان دمای شعله محسوب می شود. اگر احتراق به صورت بی در رو و بدون مبادله کار رخ دهد، دمای شعله آن، دمای شعله بی در رو^۱ نامیده می شود. این دما، بیشترین دمای ممکن برای یک مخلوط معین

² CHEMKIN

¹ Adiabatic flame temperature

ρ	چگالی، kg/m^3
ϕ	غنا
	زیرنویس‌ها
b	ناحیه سوخته
u	ناحیه نسوخته
mix	مخلوط
air	هوا
$fuel$	سوخت



شکل ۲۸: دمای بی‌در رو شعله برای سوخت متان

منابع و مراجع

- [1] J. B. Heywood. Internal combustion engine fundamental. New York: McGraw-Hill, 1988
- [2] S. Hochberg, Combustion characteristics of alternative liquid fuels, Phd thesis, University of Cambridge, August 2011
- [3] S. P. Marshall, *et al.*, Laminar burning velocity measurements of liquid fuels at elevated pressures and temperatures with combustion residuals. Combustion and Flame, Vol. 158, No. 10, pp: 1920-1932, 2011
- [4] M. Akbari, Simultaneous design and modeling of cooled EGR & VVT systems on turbocharged spark ignition engine EF7-TC, December 2012
- [5] V. Wylen, Fundamental of thermodynamics, Sonntag, 7edition, John Wiley & Sons, Inc., 2009
- [6] J. X. zhou, M. Cordier, C. Mounam-Rousselle, F. Foucher, Experimental estimate of the laminar burning velocity of iso-octane in oxygen-enriched and CO2-diluted air, Combustion and Flame, Vol. 158, No. 12, pp: 2375-2383, 2011
- [7] C. Dong, Q. Zhou, Q. Zhao, Y. Zhang, T. Xu, S. Hui, Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures, state key laboratory of multiphase flow in power engineering, Fuel, Vol. 88, No. 10, pp: 1858-1863, 2009
- [8] M. Baloo, B. Mollaei, M. Akhlaghia, I. Chitsaz, Effect of iso-octane/methane blend on laminar burning velocity and flame instability, Fuel, Vol. 144, No. 15, pp: 264-273, 2015
- [9] M. Baloo, B. Mollaei, M. Akhlaghi, M. AghaMirsalim, Effects of pressure and temperature on laminar burning velocity and flame instability of iso-octane/methane fuel blend, Fuel, Vol. 170, No. 15, pp: 235-244, 2016
- [10] V. Vukadinovic, P. Habisreuther and N. Zarzalis, Influence of pressure and temperature on laminar burning velocity and Markstein number of kerosene Jet A-1: Experimental and numerical study. Fuel, Vol. 111, pp: 401-410, 2013
- [11] C. Tang, *et al.*, Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 18, pp: 4906-4914, 2008

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از محفظه حجم ثابت و روش نوری شیلیرین اثرات افزودن گازهای رقیق کننده بر سرعت شعله آرام سوخت ترکیبی گاز طبیعی و بنزین بررسی شد. آزمون‌ها بر اساس سه درصد جرمی مختلف (۴٪، ۸٪، ۱۲٪) برای گاز دی‌اکسیدکربن و یک درصد جرمی (۱۲٪) برای گاز نیتروژن صورت گرفت. همچنین آزمون‌ها برای ۵ نوع سوخت متفاوت (متان خالص، ایزواکتان خالص و سه سوخت ترکیبی) و ۶ غنای مختلف (۸۵، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰، ۹۰) انجام شده است. تمامی آزمون‌ها در دمای ۹۵ درجه سلسیوس و فشار ۱ بار انجام گرفته است.

مشاهده شد با افزودن گاز دی‌اکسیدکربن و افزایش مقدار آن سرعت شعله آرام کاهش پیدا می‌کند. به علت بزرگتر بودن ظرفیت حرارتی ویژه گاز دی‌اکسیدکربن، سرعت شعله آرام در حضور گاز دی‌اکسیدکربن کمتر از سرعت شعله آرام در حضور گاز نیتروژن است. با افزایش غنا طول مارک اشتاین برای سوخت ایزو اکتان (بنزین) روند کاهشی و برای سوخت متان (گاز طبیعی) روند افزایشی دارد. طول مارک اشتاین برای سوخت ترکیبی (۹۵ درصد مولی متان) به صورت میانگینی از دو رفتار کاهشی و افزایشی نمایان شده است.

فهرست علائم

S_L	سرعت شعله آرام، cm/s
x_b	درصد مولی گاز رقیق کننده
S	سرعت شعله، cm/s
r	شعاع، m
t	زمان، sec
V	حجم، m^3
P	فشار، Pa
n	نسبت مولی
x_i	کسر مولی

علائم یونانی



An experimental investigation of the influence of diluent gas on laminar flame speed of natural gas and gasoline fuel mixture

M. Mohsenirad¹, B. Mollaei^{2*}, M. Akhlaghi³, M. Baloo⁴

¹ Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, m_mohsenirad@aut.ac.ir

^{2*} Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, dariani@aut.ac.ir

³ Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, mehdiakhlaghi@hotmail.com

⁴ Irankhodro Powertrain Company, Tehran, Iran, m.baloo@aut.ac.ir

*Corresponding Author, Telephone Number: +98-9112037635

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 December 2015

Accepted: 17 February 2016

Keywords:

Diluent gas

Laminar flame speed

Cellularity

Schlieren

ABSTRACT

In recent years several studies have been done in the field of laminar flame speed. One of the important characteristics of the combustion is the laminar flame speed. In this study, the effects of CO₂ and N₂ on the laminar flame speed of natural gas and gasoline fuel mixture have been investigated. Schlieren method has been used in this study. Experiments were carried out at pressure of 1 bar and 363 k in constant volume chamber. The mass fraction of CO₂ and N₂ varied from 0% to 12%. The result shows laminar burning velocity and the adiabatic flame temperature decrease with the adding CO₂ and N₂. Specific heat capacity of CO₂ more than N₂, for this reason the laminar burning velocity of N₂ more than CO₂. Also the result shows Addition of CO₂ and N₂ does not cause much change in stability.



© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.